

République algérienne démocratique et populaire
Ministère de l'enseignement supérieur et de la
recherche scientifique
Université de M'sila
Faculté de Technologie

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
جامعة المسيلة
كلية التكنولوجيا



Département de Génie Civil

MEMOIRE DE FIN D'ETUDE

En vue de l'obtention du diplôme de :

MASTER

En Génie Civil

Option : Structures

Thème :

Analyse de quelques structures de Génie Civil
par M.E.F en utilisant le logiciel ROBOT

Proposé et dirigé par :

- **Pr. Messaoud TITOUM**

Présenté :

- Youcef LAIB

- Hemza SALEM

Année Universitaire : 2016 / 2017

N° d'ordre : GM/...../2017

REMERCIEMENTS

Tout d'abord, nous sommes très reconnaissants à notre Dieu de nous avoir guidés pour une fin réussie de notre travail. Rien de tout cela n'aurait été possible sans son aide notre Dieu merci pour l'occasion.

Dans le cadre de la réalisation de ce mémoire, un certain nombre de personnes ont contribué de façon ou d'autre, nous tenons à les reconnaître :

Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude et nos remerciements à notre promoteur **Pr. TITOUM Messaoud**, professeur au département de génie civil pour le sujet qu'il nous a proposé et nous a dirigé ainsi que pour sa disponibilité et pour tous les moyens mis à notre disposition pour l'élaboration de ce mémoire. La plupart de ce projet n'aurait pas été réalisé sans son aide et ses conseils.

Nous voudrions adresser nos sincères remerciements à tous **les professeurs du département de génie civil** à l'Université de Med BOUDIAF – M'SILA, en particulier **Dr. SELLINI Mohammed** pour son soutien durant l'année

Nous tenons aussi à remercier les **membres du jury** pour l'honneur qu'ils nous ont fait en acceptant de juger ce travail.

Enfin, nous tenons à remercier nos familles et nos amis pour leurs soutiens et leurs encouragements.

ملخص

باعتبار ان العمليات الحسابية المعقدة أصبحت شيء من الماضي. قدوم أجهزة الكمبيوتر وكذلك البرامج الهندسية ساهم بشكل كبير في تطوير مختلف العلوم الهندسية. الكثير من المشاكل والمعادلات الهندسية التي كانت تعتبر في غاية الصعوبة او معقدة الحل بالحسابات اليدوية او بالوسائل القديمة أصبحت الان سهلة الحل من خلال الطرق الرقمية. واحد من اهم هذه الطرق والقواعد التي ساهمت بشكل كبير في تطوير علوم المهندس هي قاعدة العناصر المحدودة

هذه القاعدة تعتبر واحدة من اهم القواعد الرقمية التي ساهمت في تطوير علوم المهندس على اختلاف فروعها ومن بين اهم إيجابياتها هي إتاحة الامكانية من اجل تطوير برامج تساعد على إيجاد حلول سهلة للعديد من المشاكل الهندسية. العديد من منتجي البرمجيات الرقمية قاموا باستحداث العديد من البرامج الحسابية والتي تعتمد على قاعدة العناصر المحدودة, نذكر على سبيل المثال برنامج التحليل الانشائي روبوت

هذا البرنامج هو برنامج تفاعلي يستخدم في معالجة المشاكل الهندسية المعقدة والبسيطة في وقت زمني بسيط مقارنة بالعمليات التقليدية خاصة في مجال الانشاءات الهندسية وكذا مشاريع الهندسة المدنية وهذا بفضل المهتم المتكاملة والعديد من الخيارات المتاحة التي يوفرها البرنامج

من خلال مشروع نهاية المسار الدراسي سنحاول قدر المستطاع تعريف المهندسين والتقنيين وبدرجة اكبر الطلبة بقاعدة العناصر المحدودة وهذا من خلال معالجة بعض منشآت الهندسة المدنية باستخدام برنامج التحليل الانشائي روبوت

Résumé

En rendant la complexité des calculs une chose du passé, l'arrivée de l'ordinateur et les logiciels des calculs ont révolutionné les sciences de l'ingénieur. Des problèmes autrefois considérés insolubles avec les calculs manuels et les méthodes classiques, sont maintenant facilement accessibles avec les méthodes numériques. Une de ces méthodes est la méthode des éléments finis. De ce point de vue ; elle constitue un outil formidable à la disposition de l'ingénieur en génie civil.

La méthode des éléments finis est l'une des techniques numériques les plus puissantes. L'un des avantages majeurs de cette méthode est le fait qu'elle offre la possibilité de développer un programme permettant de résoudre, avec peu de modifications, plusieurs types de problèmes. En particulier, toute forme complexe d'un domaine géométrique où un problème est bien posé avec toutes les conditions aux limites, peut être facilement traitée par la méthode des éléments finis. Différents éditeurs de logiciels ont créé plusieurs logiciels de calculs basés sur la méthode des éléments finis ; rappelons, par exemple: ROBOT Structural Analysis Program.

Le logiciel ROBOT Structural Analysis Program est un logiciel interactif basé sur la méthode des éléments finis. Il est utilisé dans les calculs scientifiques et les problèmes d'ingénierie parce qu'il permet de résoudre des problèmes numériques complexes en moins de temps requis par rapport aux calculs manuels courants, et ce grâce à une multitude de fonctions intégrées et à plusieurs options de calcul testées et regroupées selon usage dans ce logiciel.

Donc dans ce projet de fin d'étude on va essayer le maximum de familiariser les ingénieurs et techniciens mais également les étudiants à la méthode des éléments finis en abordant sa problématique par la pratique avec l'utilisation du logiciel ROBOT Structural Analysis Program.

Abstract

By considering the complexity of calculation is a thing of the past. The arrival of computers and software has revolutionized the engineering sciences. Problems formerly considered insoluble with manual calculations and conventional methods are now easily accessible with numerical methods. One of these methods is the finite element method. From this point of view; it is considered as one of a formidable tool available to the civil engineer.

The finite element method is considered as one of the most dominant numerical techniques. One of the major advantages of this method is that it offers the possibility of developing a program to solve, with few modifications, several Types of problems. In particular, any complex form of a geometric domain where a problem is well posed with all boundary conditions can be easily processed by the finite element method. Different software publishers are created several computer programs based on the finite element method; for example: ROBOT Structural Analysis Program.

The ROBOT Structural Analysis program is an interactive software based on the finite element method. It is used in scientific calculations and engineering problems because it solves complex numerical problems in less time than common manual calculations thanks to a multitude of integrated functions and several options of calculations verified and grouped according to the use in this software.

So in this end-of-study project we will try as much as possible to familiarize the engineers and technicians but also the students with the method of the finite elements by approaching its problematic by the practice with the use of the software ROBOT Structural Analysis Program.

Sommaire

Titre	Page
Remerciements.....	I
ملخص.....	II
Résumé.....	III
Abstract	IV
Sommaire	V
Liste de figures.....	VII
Liste de tableaux	VIII
 Introduction générale	 01
a) Généralité	01
b) Problématique	02
c) Objectif.....	02
d) Méthodologie	02
e) Limitation.....	02
 Chapitre 01 - Présentation générale de la méthode des éléments finis	 04
1.1 Introduction	04
1.2 Définition de la méthode des éléments finis	05
1.3 Les grandes lignes de la méthode MEF	06
1.5 Méthode des éléments finis (Types des éléments finis).....	08
1.5.1 Élément de barre.....	08
1.5.2 Éléments de poutre à deux nœuds	09
1.5.3 Éléments de membrane	11
1.5.4 Éléments de plaque.....	13
1.5.5 Éléments de coque	18
 Chapitre 02 - Présentation générale du logiciel Robot	 42
2.1 Définition du logiciel ROBOT.....	21
2.2 Le démarrage du logiciel ROBOT	21

2.3 L'environnement de travail sur le logiciel ROBOT	22
2.4 Le réglage des préférences du logiciel ROBOT	23
2.5 Différents étapes de modélisation avec le logiciel ROBOT	24
2.5.1 Définition des unités, normes et propriétés des matériaux.....	24
2.5.2 Définition de la géométrie du model	27
2.5.3 Définition et affectation des éléments de construction	28
2.5.4 Définition des chargements	34
2.5.5 Définition des combinaisons	36
2.5.6 Analyse de la structure	38
2.5.7 Traitement des résultats.....	39
Chapitre 03 – Exemple d'application.....	41
3.1 Modélisation d'un bâtiment R+4 avec le logiciel robot.....	41
3.1.1 Présentation et descriptif de l'application.....	41
3.1.2 La stabilité du bâtiment	43
3.1.3 Ferrailage des portiques	44
3.1.4 Dimensionnement & ferrailage des semelles	52
3.2 Modélisation d'un portique en charpente métallique.....	54
3.2.1 Présentation et descriptif de l'application.....	54
3.2.1 Modélisation de la structure	55
Conclusion générale et perspectives	59
Bibliographie	60

Liste de figures

Chapitre 01

Figure 1.1: Etapes générales de la méthode des éléments finis	6
Figure 1.2: Élément barre 2D.....	8
Figure 1.3: Déformation d'une poutre en flexion.....	9
Figure 1.4: Calcul des déplacements horizontaux	13
Figure 1.5: Sommation des moments par rapport à l'axe y	17
Figure 1.6: Matrice $[k_e]$ d'un élément de coque plane à 4 nœuds	20

Chapitre 02

Figure 2.1: La fenêtre de démarrage de ROBOT	21
Figure 2.2: La fenêtre de travail de ROBOT	22
Figure 2.3: Le menu contextuel supplémentaire	22
Figure 2.4: Edition du menu contextuel utilisateur	23
Figure 2.5: Préférences du logiciel ROBOT	23
Figure 2.6: Réglage des unités	25
Figure 2.7: Réglage des normes.....	25
Figure 2.8: Réglage des matériaux.....	26
Figure 2.9: Définition du matériau.....	26
Figure 2.10: Lignes de construction.....	27
Figure 2.11: Définition des barres.....	28
Figure 2.12: Définition des poteaux.....	29
Figure 2.13: Définition des poutres.....	29
Figure 2.14: Définition des voiles.....	30
Figure 2.15: Définition des dalles	31
Figure 2.16: Définition des barres.....	32
Figure 2.17: Définition des appuis	33
Figure 2.18: Types de charges	34
Figure 2.29: Définition des charges	35
Figure 2.20: Combinaisons manuelles	36
Figure 2.21: Tableau de combinaisons manuelles	37
Figure 2.22: Analyse de la structure	38

Figure 2.23: Traitement des résultats	40
---	----

Chapitre 03

Figure 3.1: Présentation de la structure.....	42
Figure 3.2: Résultats de l'analyse modale	44
Figure 3.3: Moment Fléchissant $G+Q$	45
Figure 3.4: Moment Fléchissant $1.35G+1.5Q$	45
Figure 3.5: Moment Fléchissant $G+Q+E_y$	47
Figure 3.6: Moment Fléchissant $0.8G-E_y$	49
Figure 3.7: Moment Fléchissant $G + Q + E_x$	50
Figure 3.8: Moment Fléchissant $0.8G + E_x$	50
Figure 3.9: Les forces sur les semelles	52
Figure 3.10: Coffrage des semelles.....	53
Figure 3.11: Lignes de construction.....	55
Figure 3.12: Définition des barres.....	56
Figure 3.13: Définition des jarrets	57
Figure 3.14: Définition des appuis	57
Figure 3.15: Déformation de la structure.	60
Figure 3.16: Résultats de l'analyse	60

Liste de tableaux

Table 3.1: Ferrailage des poutres principales (travée)	46
Table 3.2: Ferrailage des poutres principales (chapeau sup)	47
Table 3.3: Ferrailage des poutres principales (chapeau inf)	49
Table 3.4: Ferrailage des poutres secondaires (chapeau).....	50
Table 3.5: Ferrailage des poutres secondaires (travée)	51
Table 3.6: Résultats analyses des poteaux	51
Table 3.7: Ferrailage des poteaux	52
Table 3.8: Ferrailage des semelles	53

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

a) Généralité

Pour mener à bien un projet technique, l'ingénieur structure doit concevoir puis dimensionner l'ouvrage de manière à fournir à l'entreprise exécutante les plans nécessaires à sa réalisation. Très souvent, celui-ci utilisera un outil de calcul basé sur la méthode dite des éléments finis dont l'utilisation s'est généralisée dans l'industrie depuis une cinquantaine d'années. Cette méthode, qui n'est pas uniquement dédiée aux problèmes des structures lui permettra de résoudre un éventail très large de problèmes : structurels, thermiques, électromagnétiques, fluidiques, avec des aspects linéaires ou non linéaires, stationnaires ou transitoires. [1]

Différents éditeurs de logiciels se sont imposés sur ce marché, par exemple : SAP2000, ETAPS, ROBOT, etc... Ils proposent généralement plusieurs modules permettant d'aborder des problèmes multi physiques. La structure de ces codes comporte habituellement un **pré-processeur**, un ou plusieurs **solveurs**, un ou plusieurs **post-processeurs**. Le pré-processeur est une interface graphique permettant à l'utilisateur de décrire la géométrie et le type de problème à résoudre. Le ou les solveurs intègrent les bases des méthodes de résolution (linéaire ou non linéaire, stationnaire ou transitoire, etc.) spécifiques au cas étudié. Le ou les post-processeurs permettent de visualiser les résultats sous forme de courbes (évolution en fonction du temps, des charges, des déplacements, etc.) ou d'isovaleurs matérialisant le comportement de la structure par une échelle de couleurs variant du bleu au rouge généralement. [1], [2]

Généralement, les éditeurs de ces logiciels joignent au produit un manuel dit de vérification permettant de comparer les résultats obtenus à un référentiel souvent issu de bases théoriques. Dans le cadre de la mise en œuvre d'une nouvelle technique ou peut-être même lors d'une première utilisation, l'opérateur pourra aussi utiliser ce manuel comme base de formation à l'outil. C'est la démarche que nous avons essayé de reproduire avec l'utilisation d'un logiciel de calcul qui a appelé le ROBOT structural analysis program (student version). [1], [2]

b) Problématique

En rendant la complexité des calculs des structures simples et complexes une chose du passé. L'arrivée de l'ordinateur est révolutionné les sciences de l'ingénieur. Des problèmes autrefois considérés insolubles avec les calculs manuels et les méthodes classiques, sont maintenant facilement accessibles avec les méthodes numériques. Plusieurs méthodes de résolution numérique ont été ainsi développées et appliquées avec succès pour avoir des solutions satisfaisantes à des problèmes d'ingénierie très variés. Une de ces méthodes est la méthode des éléments finis. De ce point de vue ; elle constitue un outil formidable à la disposition de l'ingénieur structure.

c) Objectif

L'objectif de ce mémoire est la modélisation par éléments finis de quelques structures de génie civil en utilisant le logiciel ROBOT, il a donc pour but d'essayer le maximum de familiariser les ingénieurs mais également les étudiants à cette méthode en abordant sa problématique par la pratique. Il va donner quelques exemples qui traitant les aspects théoriques et pratiques de manière graduelle.

d) Méthodologie

Ce manuscrit est divisé en trois chapitres pour accomplir ses objectifs. Une brève introduction, objectif, et méthodologie sont présentée dans l'introduction générale. Le premier chapitre contient une introduction générale à la méthode des éléments finis. Dans le deuxième chapitre, on va essayer de donner une présentation générale et comment utiliser le logiciel ROBOT (student version). Quelques exemples dans le troisième chapitre seront traités pas à pas par l'utilisation du logiciel ROBOT. Enfin ; on va terminer par une conclusion et suggestions des perspectives de recherches futures comme suite de cette mémoire.

e) Limitation

Ce projet ne peut pas couvrir tous les principes de la méthode des éléments finis et le logiciel ROBOT parce que la méthode lui-même est très difficile à comprendre et besoin beaucoup de temps pour la maîtriser et ce que nous n'avons pas malheureusement à cause de limitation de temps.

CHAPITRE 01

PRESENTATION GENERALE DE LA

METHODE DES ELEMENTS FINIS

CHAPITRE 1

PRESENTATION GENERALE DE LA METHODE DES ELEMENTS FINIS

1.1 Introduction

Pour analyser un phénomène naturel en générale ou un problème d'ingénierie en particulier, on est souvent amené à développer un modèle mathématique pouvant décrire d'une manière aussi fiable que possible le problème en question. Le développement d'un modèle mathématique s'appuie généralement sur quelques postulats de base et plusieurs hypothèses simplificatrices pour aboutir à des équations gouvernantes qui sont souvent des équations différentielles auxquelles sont ajoutées des conditions aux limites. Exemple, la théorie d'élasticité s'appuient sur le postula fondamental de l'existence du vecteur contrainte et les équations générales d'élasticité linéaire isotrope sont obtenues avec les hypothèses de petites déformations, d'homogénéité et d'isotropie des matériaux ainsi que la linéarité des relations liants les contraintes et les déformations. La résolution analytique d'équations différentielles pose parfois des difficultés insurmontables, et une solution exacte décrivant bien le problème étudié n'est pas toujours facile à trouver. Le recours aux modèles physiques et à la simulation expérimentale pour la recherche d'une solution analogue à la solution recherchée peut s'avérer coûteux en temps et en moyens. [2], [3]

Avec les progrès enregistrés dans le domaine de l'informatique et les performances des ordinateurs de plus en plus grandes, il est devenu possible de résoudre des systèmes d'équations différentielles très complexes. Plusieurs techniques de résolution numérique ont été ainsi développées et appliquées avec succès pour avoir des solutions satisfaisantes à des problèmes d'ingénierie très variés. La méthode des éléments finis est l'une des techniques numériques les plus puissantes. L'un des avantages majeurs de cette méthode est le fait qu'elle offre la possibilité de développer un programme permettant de résoudre, avec peu de modifications, plusieurs types de problèmes. En particulier, toute forme complexe d'un domaine géométrique où un problème est bien posé avec toutes les conditions aux limites, peut être facilement traitée par la méthode des éléments finis. Cette méthode consiste à diviser le domaine physique à traiter en plusieurs sous domaines appelés éléments

finis à dimensions non infinitésimales. La solution recherchée est remplacée dans chaque élément par une approximation avec des polynômes simples et le domaine peut ensuite être reconstitué avec l'assemblage ou sommation des éléments. [2], [3]

1.2 Définition de la méthode des éléments finis

La méthode des éléments finis est une méthode générale d'analyse structurale dans laquelle la solution d'un problème dans la mécanique continue est rapprochée par l'analyse d'un assemblage des éléments finis qui sont reliés ensemble à un nombre de points nodaux finis et représentent le domaine de solution du problème. Elle est maintenant bien admise en tant qu'une technique générale plus puissante pour la solution numérique des problèmes de technologie variée. Les applications s'étendent de l'analyse de contrainte des solides à la solution des phénomènes acoustiques, de la physique et des problèmes dynamiques liquides. [1], [6], [7]

La méthode des éléments finis est le fruit de deux domaines de recherche qui sont les mathématiques et les sciences de l'ingénieur. [7]

- Mathématique: Outils qui remontent jusqu'aux résidus pondérés de Gauss (1775), Galerkin (1915) et Biezenokoch (1923), ainsi qu'aux méthodes variationnelles de Rayleigh (1870) et Ritz (1909). [7]

- Sciences de l'ingénieur : Dont la contribution a débuté dans les années quarante avec Hrenikoff (1941), Henry (1943) et Newmark (1949) qui touchèrent pour la première fois aux structures continues, en faisant une approximation sur des portions de petites dimensions dans un problème continu d'une barre longue. D'où l'idée de base des éléments finis. Argyris (1955), Turner (1956), Glough (1956) et Martin (1956) ont fait une analogie directe en adoptant un comportement simplifié pour des petites portions : ils représentent un milieu continu élastique à deux dimensions par un assemblage de panneaux triangulaires, sur lesquels les déplacements sont supposés variés linéairement comme pour chaque barre ou poutre du système discret : chaque panneau est décrit par une matrice de rigidité et l'assemblage donnait la rigidité globale du milieu continu. D'où la naissance d'éléments finis avec "panneaux" comme nom. Argyris et Kelsy (1960) utilisent la notion d'énergie dans l'analyse des structures et font appel à des méthodes mathématiques (résidus pondérés, principes variationnels ...). Le terme " élément fini " est utilisé pour la

première fois par Glough (1960), et dès lors, il y a un développement rapide de la méthode. Dans les années soixante ; Zienkiwicz (1965), De Arante (1968), Oliviera (1968), Green (1969), Tones (1969), Storne (1969), et Finlayson (1975) ont reformulé la méthode à partir de considérations énergétiques et variationnelles sous forme générale de résidus pondérés, d'où le modèle mathématique de la MEF. [7]

1.3 Les grandes lignes de la méthode

Dans ce paragraphe, nous essayerons de présenter d'une manière simplifiée, les étapes d'application de la méthode des éléments finis et les outils nécessaires à sa mise en œuvre. La résolution d'un problème physique par éléments finis suit grosso modo les étapes suivantes (Fig. 1.1). [7]

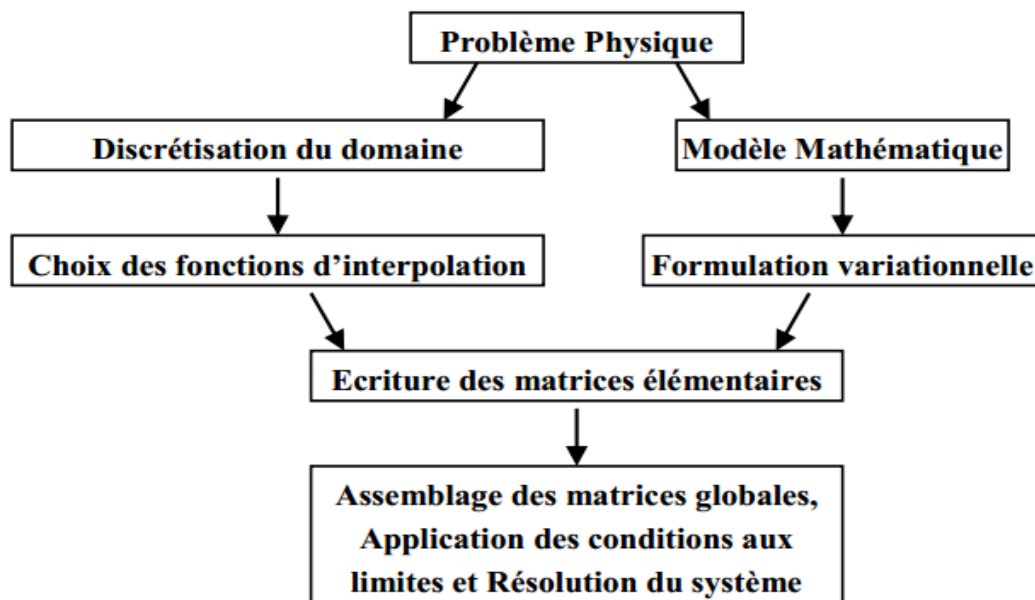


Figure 1.1 : Etapes générales de la méthode des éléments finis [7]

- **Etape 1 :** Formulation des équations gouvernantes et des conditions aux limites

La majorité des problèmes d'ingénierie sont décrits par des équations différentielles aux dérivées partielles associées à des conditions aux limites définies sur un domaine et son contour. L'application de la MEF exige une réécriture de ces équations sous forme intégrale. La formulation faible est souvent utilisée pour inclure les conditions aux limites. [7]

- **Etape 2 :** Division du domaine en sous domaines

Cette étape consiste à discrétiser le domaine en éléments et calculer les connectivités de chacun ainsi que les coordonnées de ses nœuds. Elle constitue ainsi la phase de préparation des données géométriques. [7]

- **Etape 3 :** Approximation sur un élément

Dans chaque élément la variable tel que le déplacement, la pression, la température, est approximée par une simple fonction linéaire, polynomiale ou autre. Le degré du polynôme d'interpolation est relié au nombre de nœuds de l'élément. L'approximation nodale est appropriée. C'est dans cette étape que se fait la construction des matrices élémentaires. [7]

- **Etape 4 :** Assemblage et application des conditions aux limites

Toutes les propriétés de l'élément (masse, rigidité,...) doivent être assemblées afin de former le système algébrique pour les valeurs nodales des variables physiques. C'est à ce niveau qu'on utilise les connectivités calculées à l'étape 2 pour construire les matrices globales à partir des matrices élémentaires. [7]

- **Etape 5 :** Résolution du système global

Le système global peut être linéaire ou non linéaire. Il définit soit un problème d'équilibre qui concerne un cas stationnaire ou statique ou un problème de valeurs critiques où il faut déterminer les valeurs et vecteurs propres du système qui correspondent généralement aux fréquences et modes propres d'un système physique. Un problème de propagation qui concerne le cas transitoire (non stationnaire) dans lequel il faut déterminer les variations dans le temps des variables physiques et la propagation d'une valeur initiale. Les méthodes d'intégration pas à pas sont les plus fréquentes telles que, méthode des différences finies centrales, méthode de Newmark, méthode de Wilson. A ces méthodes doivent être associées des techniques d'itération pour traiter le cas non linéaire. La plus célèbre est la méthode de Newton Raphson. [7]

1.5 Méthode des éléments finis (Types des éléments finis)

1.5.1 Élément de barre (Bar element) [1]

L'élément de barre est un élément à deux nœuds comportant un seul degré de liberté dans son repère local et deux (2D) ou trois (3D) dans le repère global. Ses caractéristiques géométriques et matérielles se résument à une section constante S et un module d'élasticité longitudinal E .

Fonctionnant en traction ou compression uniquement, l'hypothèse généralement retenue dans les logiciels du marché est d'associer un effort normal N positif à une traction. De plus et afin de simplifier les développements, seul le cas plan sera traité.

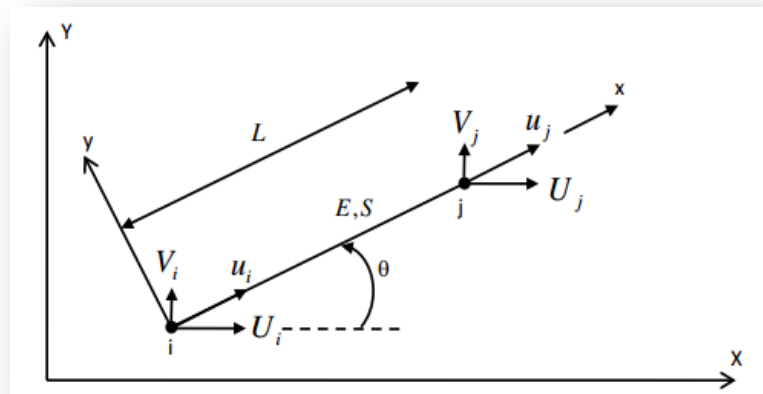


Figure 1.2 – Élément barre 2D [1]

1.5.2.1 Matrices de rigidité élémentaires

L'élément barre possédant un seul degré de liberté en repère local et deux dans le repère global, il est nécessaire, pour envisager ce changement de base, d'exprimer $[k_e]$ sous la forme d'une matrice de dimensions 4×4 . Pour ce faire, on reprend l'expression de $[k_e]$ établie en (équation, 1.1) et on ajoute deux lignes et deux colonnes de zéros associées à des v_i et v_j fictifs. [1]

La matrice de rigidité élémentaire de l'élément e donne pour l'élément barre est :

$$[k_e] = \int_{v_e} [B]^T \cdot [H] [B] dv_e = \int_0^L \int_s ds_e \left\{ \begin{matrix} -\frac{1}{L} \\ \frac{1}{L} \end{matrix} \right\} \cdot E \cdot \left\{ -\frac{1}{L} \quad \frac{1}{L} \right\} \cdot dx \quad \dots (1.1)$$

$$[k_e] = E \cdot S \int_0^L \begin{bmatrix} \frac{1}{L^2} & -\frac{1}{L^2} \\ -\frac{1}{L^2} & \frac{1}{L^2} \end{bmatrix} \cdot dx = \frac{ES}{L} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix}$$

On a alors :

$$[k_e] = \frac{E.S}{L} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} u_i \\ u_j \end{pmatrix} = \frac{ES}{L} \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} u_i \\ v_i \\ u_j \\ v_j \end{pmatrix} \quad \dots (1.2)$$

Le changement de base est alors possible en posant que :

$$[k_e] = [R_e]^T [k_e] [R_e] \quad \text{avec} \quad [R_e] = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 0 & 0 \\ -\sin \theta & \cos \theta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \cos \theta & \sin \theta \\ 0 & 0 & -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \quad \dots (1.3)$$

On retrouve alors la forme générique (1.30) de la matrice de rigidité $[k_e]$ en repère global :

$$[k_e] = \frac{ES}{L} \begin{bmatrix} \cos^2 \theta & \cos \theta \sin \theta & -\cos^2 \theta & 0 \\ \cos \theta \sin \theta & \sin^2 \theta & -\cos \theta \sin \theta & -\sin^2 \theta \\ -\cos^2 \theta & -\cos \theta \sin \theta & \cos^2 \theta & \cos \theta \sin \theta \\ -\cos \theta \sin \theta & -\sin^2 \theta & \cos \theta \sin \theta & \sin^2 \theta \end{bmatrix} \quad \dots (1.4)$$

1.5.2 Eléments de poutre à deux nœuds

Les sections droites d'une poutre en flexion restant droites après déformations (principe de Navier-Bernoulli), l'étude des déformations longitudinales sur un tronçon ABGH permet d'établir une relation linéaire entre la déformation longitudinale et le rayon de courbure ρ . En considérant dans un premier temps un état plan de déformation dans le plan xOy. [1]

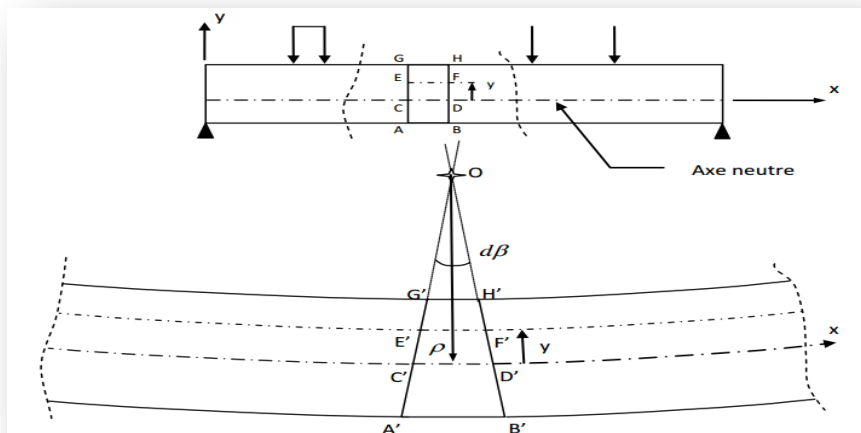


Figure 1.3 – Déformation d'une poutre en flexion [1]

Les déformations normales et distorsion angulaire peuvent être obtenues en posant que (équation 1.4) :

$$\begin{aligned}\varepsilon_{xx} &= \lim_{dx \rightarrow 0} \frac{A'B' - AB}{AB} = \lim_{dx \rightarrow 0} \frac{dx + u + \frac{\partial u}{\partial x} dx - u - dx}{dx} = \frac{\partial u}{\partial x} \\ \varepsilon_{yy} &= \lim_{dy \rightarrow 0} \frac{A'D' - AD}{AD} = \lim_{dy \rightarrow 0} \frac{dy + v + \frac{\partial v}{\partial y} dy - v - dy}{dy} = \frac{\partial v}{\partial y} \quad \dots (1.5)\end{aligned}$$

et on a la déformation à l'ordonnée y est égale à :

$$\varepsilon_{xx} = \frac{E'F' - EF}{EF} \quad \dots (1.6)$$

Comme EF = CD et CD = C'D', on déduit que:

$$\varepsilon_{xx} = \frac{E'F' - EF}{EF} = \frac{(\rho - y).d\beta - \rho.d\beta}{\rho.d\beta} = -\frac{y}{\rho} \quad \dots (1.7)$$

Enfin et en combinant l'équation d'équilibre de la section à celle liant contrainte et déformation, on retrouve la relation moment-courbure de la théorie des poutres :

$$\left. \begin{aligned} \int_S \sigma_{xx} \cdot y \cdot dS - M_z &= 0 \\ \sigma_{xx} &= E \cdot \varepsilon_{xx} = -\frac{E}{\rho} \cdot y \end{aligned} \right\} \Rightarrow M_z = -\frac{E}{\rho} \underbrace{\int_S y^2 \cdot dS}_{I_z} \Leftrightarrow -\frac{M_z}{EI_z} = \frac{1}{\rho} \quad \dots (1.8)$$

Avec $I_z = \int y^2 dS$: moment d'inertie autour de l'axe z (perpendiculaire au plan xy).

De plus et sous l'effet des charges extérieures, le point situé sur l'axe neutre à l'abscisse x subira un déplacement vertical $v(x)$ et une rotation $\beta(x)$, et d'après la figure (1.14), on sait que:

$$dx = \rho.d\beta \Rightarrow \frac{d\beta}{dx} = \frac{1}{\rho}$$

Mais également que $\beta = dv/dx$ ce qui permet de déduire :

$$\frac{1}{\rho} = \frac{d\beta}{dx} = \frac{d^2v}{dx^2} \quad \dots (1.9)$$

En égalisant (1.8) et (1.9), les relations moment-courbure et déformation-courbure deviennent :

$$\frac{1}{\rho} = -\frac{M_z}{EI_z} = \frac{d^2 v}{dx^2} \quad \dots (1.10)$$

$$\varepsilon_{xx} = -\frac{y}{\rho} = -y \frac{d^2 v}{dx^2} \quad \dots (1.11)$$

Sachant que l'effort tranchant correspond à la dérivée du moment fléchissant $dM_z/dx = T_y$ et que celle de l'effort tranchant est équivalente à la charge répartie $dT_y/dx = -q_y(x)$, on obtient finalement :

$$EI_z \frac{d^2 v}{dx^2} = -M_z(x) \quad \dots (1.12)$$

$$EI_z \frac{d^3 v}{dx^3} = -T_y(x) \quad \dots (1.13)$$

$$EI_z \frac{d^4 v}{dx^4} = q_y(x) \quad \dots (1.14)$$

Les relations (1.12) et (1.14) sont les formes les plus connues de l'équation générale des poutres. [1]

1.5.3 Éléments de membrane

Les éléments membranes sont destinés à modéliser des structures planes travaillant uniquement dans leur plan. Leurs nœuds possèdent uniquement deux degrés de liberté u et v . Ils ont une épaisseur constante notée e et suivent l'hypothèse de contrainte plane. [1]

On a donc :

$$\sigma_{zz} = \tau_{xz} = \tau_{yz} = 0 \quad \text{et} \quad \gamma_{xz} = \gamma_{yz} = 0 \quad \dots (1.15)$$

Restant dans le domaine élastique linéaire, l'application de la démarche précédente aux deux autres axes y et z , amènerait inmanquablement à des résultats similaires (permutations croisées des indices x , y et z). De ce fait et toujours en raison de la linéarité, la relation tridimensionnelle entre déformations et contraintes normales peut être obtenue par superposition des trois états d'équilibre suivant x , y et z soit :

$$\begin{aligned}\varepsilon_{xx} &= \frac{1}{E} [\sigma_{xx} - \nu(\sigma_{yy} + \sigma_{zz})] \\ \varepsilon_{yy} &= \frac{1}{E} [\sigma_{yy} - \nu(\sigma_{xx} + \sigma_{zz})] \\ \varepsilon_{zz} &= \frac{1}{E} [\sigma_{zz} - \nu(\sigma_{xx} + \sigma_{yy})]\end{aligned}\quad \dots (1.16)$$

L'équation (1.16) permet d'établir que :

$$\varepsilon_{zz} = -\frac{\nu}{E} (\sigma_{xx} + \sigma_{yy}) \quad \dots (1.17)$$

Mais également que :

$$\begin{Bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{xy} \end{Bmatrix} = \frac{E}{1-\nu^2} \begin{bmatrix} 1 & \nu & 0 \\ \nu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1-\nu}{2} \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} \quad \dots (1.18)$$

Cette approche étant directement applicable aux éléments de faibles épaisseurs, les éléments membranes, plaques et coques suivront cette hypothèse de contrainte plane.

La relation contrainte-déformation issue de (1.18) s'écrit alors :

$$\begin{Bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} = \frac{E}{1-\nu^2} \begin{bmatrix} 1 & \nu & 0 \\ \nu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1-\nu}{2} \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} = [H] \cdot \{\varepsilon\} \quad \dots (1.19)$$

Avec :

$$[H] = \frac{E}{1-\nu^2} \begin{bmatrix} 1 & \nu & 0 \\ \nu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1-\nu}{2} \end{bmatrix}$$

Le vecteur déformation est donnée par l'équation suivante :

$$\{\varepsilon\} = \begin{Bmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} & 0 \\ 0 & \frac{\partial}{\partial y} \\ \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial x} \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} u \\ v \end{Bmatrix} = [\partial] \cdot \begin{Bmatrix} u \\ v \end{Bmatrix} \quad \dots (1.20)$$

Si nécessaire la déformation ε_{zz} pourra être calculée à partir de la relation (1.17). Ceci nous amène à évoquer le cas des éléments en déformation plane dont les caractéristiques sont très similaires aux membranes. Ce sont bien évidemment toujours des éléments plans travaillant dans leur plan. La déformation transversale ε_{zz} étant cette fois prise égale à zéro, seule l'expression de la matrice $[H]$ changera. Il suffira alors de la remplacer dans (1.19) par son expression en déformation plane :

$$[H] = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1-\nu & \nu & 0 \\ \nu & 1-\nu & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2} \end{bmatrix} \quad \dots (1.21)$$

Dans cette hypothèse, les résultats seront donnés par unité de profondeur suivant z .

1.5.4 Éléments de plaque

▪ Théorie des plaques minces

La théorie de Kirchhoff relative aux plaques minces qui revient à ne pas prendre en compte le cisaillement transverse, est applicable lorsque le rapport de la plus petite de leurs dimensions sur l'épaisseur est supérieur ou égal à 20. [1]

▪ Relations moments-courbures

Les déplacements horizontaux peuvent être exprimés en fonction de w en posant que :

$$\begin{aligned} u &= -z \cdot \frac{\partial w}{\partial x} \\ v &= -z \cdot \frac{\partial w}{\partial y} \end{aligned} \quad \dots (1.22)$$

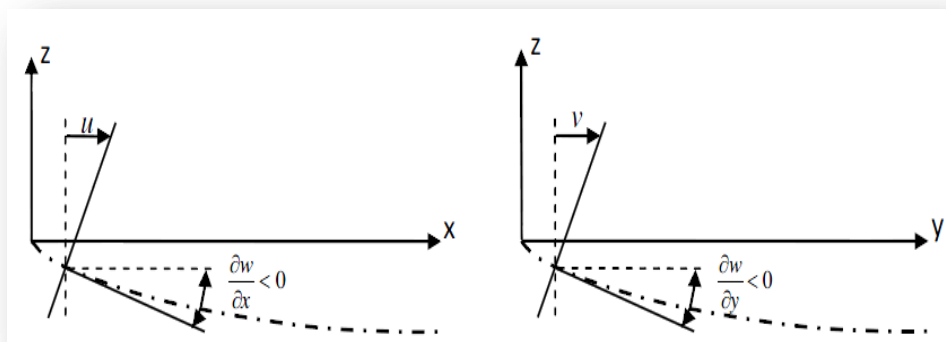


Figure 1.4– Calcul des déplacements horizontaux [1]

Les déformations correspondantes sont donc égales à :

$$\begin{aligned}\varepsilon_{xx} &= \frac{\partial u}{\partial x} = -z \cdot \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \\ \varepsilon_{yy} &= \frac{\partial v}{\partial y} = -z \cdot \frac{\partial^2 w}{\partial y^2}\end{aligned} \quad \dots (1.23)$$

La relation (1.23) est analogue à l'expression (1.11) issue de la théorie des poutres. La théorie de Kirchhoff s'apparente en fait à celle des poutres élancées. Le comportement des structures planes en flexion relevant de l'hypothèse de contrainte plane, la relation entre contraintes et déformations normales s'écrit d'après (1.1) :

$$\begin{aligned}\sigma_{xx} &= \frac{E}{1-\nu^2} (\varepsilon_x + \nu \varepsilon_y) = -\frac{E \cdot z}{1-\nu^2} \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \nu \cdot \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right) \\ \sigma_{yy} &= \frac{E}{1-\nu^2} (\varepsilon_y + \nu \varepsilon_x) = -\frac{E \cdot z}{1-\nu^2} \left(\frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \nu \cdot \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right)\end{aligned} \quad \dots (1.24)$$

D'où l'expression des moments de flexion M_{xx} et M_{yy} à partir des équations d'équilibre correspondantes :

$$\begin{aligned}M_{xx} \cdot dy &= \int_{-\frac{e}{2}}^{\frac{e}{2}} \sigma_{xx} \cdot z \cdot dz dy \\ M_{yy} \cdot dx &= \int_{-\frac{e}{2}}^{\frac{e}{2}} \sigma_{yy} \cdot z \cdot dz dx\end{aligned} \quad \dots (1.25)$$

En injectant (1.50) dans (1.51), on obtient finalement :

$$\begin{aligned}M_{xx} &= -D \cdot \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \nu \cdot \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right) \\ M_{yy} &= -D \cdot \left(\frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \nu \cdot \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right)\end{aligned} \quad \dots (1.26)$$

Avec :

$$D = \frac{E}{1-\nu^2} \int_{-\frac{e}{2}}^{\frac{e}{2}} z^2 \cdot dz = \frac{E e^3}{12(1-\nu^2)}$$

On notera que le paramètre D est assimilable au terme EI de la théorie des poutres, la valeur $e^3/12$ correspondant à l'inertie d'une section rectangulaire de largeur unitaire. Encore une fois, on retrouve la similitude avec cette théorie puisque (1.26) est analogue à (1.12).

De la même façon et d'après (1.11), (1.20), on aura pour la contrainte de cisaillement :

$$\tau_{xy} = G \cdot \gamma_{xy} = G \cdot \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) = -2G \cdot z \cdot \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \quad \dots (1.27)$$

On sait par ailleurs que ces contraintes de cisaillement, intégrées sur l'épaisseur, s'équilibrent avec un moment de torsion noté M_{xy} :

$$M_{xy} = \int_{-\frac{e}{2}}^{\frac{e}{2}} \tau_{xy} \cdot z \cdot dz \quad \dots (1.28)$$

D'où

$$M_{xy} = -\frac{Ge^3}{6} \cdot \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \quad \dots (1.29)$$

Soit en fonction de D :

$$M_{xy} = -D(1-\nu) \cdot \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \quad \dots (1.30)$$

▪ Relations moments-contraintes

Les relations (1.24) et (1.26) ayant des termes communs, les contraintes normales peuvent être directement reliées aux moments de flexion M_{xx} et M_{yy} par :

$$\begin{aligned} \sigma_{xx} &= \frac{12z \cdot M_{xx}}{e^3} \\ \sigma_{yy} &= \frac{12z \cdot M_{yy}}{e^3} \end{aligned} \quad \dots (1.31)$$

ce qui donne pour les fibres extrêmes de la plaque : ($z = \pm e/2$)

$$\begin{aligned}\sigma_{xx} &= \pm \frac{6M_{xx}}{e^2} \\ \sigma_{yy} &= \pm \frac{6M_{yy}}{e^2}\end{aligned}\quad \dots (1.32)$$

L'expression (1.32) est de plus tout à fait équivalente à celle utilisée pour la vérification des poutres en flexion simple. En effet, (1.31) peut être aisément retrouvée à partir de (1.12) en posant que l'inertie I est égale à $e^3/12$. De même et pour la contrainte de cisaillement, (1.27) et (1.29) permettent de déduire :

$$\tau_{xy} = \frac{12z.M_{xx}}{e^3} \quad \dots (1.33)$$

soit pour $z = \pm e/2$:

$$\tau_{xy} = \pm \frac{6M_{xy}}{e^2} \quad \dots (1.34)$$

▪ Flexion des plaques sous charges latérales réparties

En étudiant l'équilibre d'un tronçon de plaque soumis à une charge répartie q , on obtient :

En sommant les forces par rapport à l'axe z

$$\left(T_x + \frac{\partial T_x}{\partial x} dx\right).dy - T_x.dy + \left(T_y + \frac{\partial T_y}{\partial y} dy\right).dx - T_y.dx + q.dx.dy = 0$$

d'où après simplification :

$$\frac{\partial T_x}{\partial x} + \frac{\partial T_y}{\partial y} = -q \quad \dots (1.35)$$

En sommant les moments par rapport à l'axe y

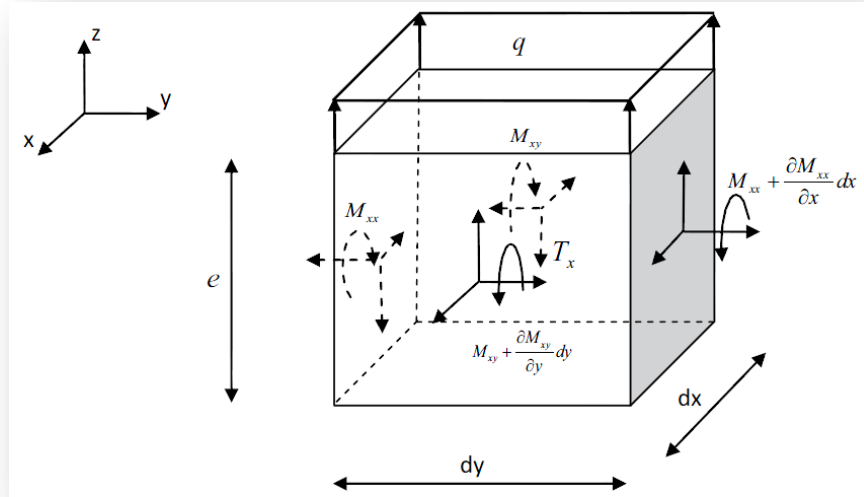


Figure 1.5 – Sommation des moments par rapport à l'axe y [1]

$$\left(M_{xx} + \frac{\partial M_{xx}}{\partial x} dx \right) \cdot dy - M_{xx} \cdot dy + \left(M_{xy} + \frac{\partial M_{xy}}{\partial y} dy \right) \cdot dx - M_{xy} \cdot dx - T_x \cdot dy \cdot dx = 0$$

d'où après simplification :

$$\frac{\partial M_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial M_{xy}}{\partial y} = T_x \quad \dots (1.36)$$

De la même manière et en étudiant l'équilibre suivant l'axe x, on trouvera comme troisième équation d'équilibre :

$$\frac{\partial M_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial M_{yy}}{\partial y} = T_y$$

En reportant (1.36) et (1.37) dans (1.35), on déduit :

.... (1.38)

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial M_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial M_{xy}}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial M_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial M_{yy}}{\partial y} \right) + q = 0$$

Soit :

$$\frac{\partial^2 M_{xx}}{\partial x^2} + 2 \frac{\partial^2 M_{xy}}{\partial x \partial y} + \frac{\partial^2 M_{yy}}{\partial y^2} = -q \quad \dots (1.39)$$

En injectant maintenant (1.5) et (1.9) dans (1.18), on obtient la deuxième forme de cette équation en fonction de w :

$$\frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} = \frac{q}{D} = \Delta \Delta(w) \quad \dots (1.40)$$

L'expression (1.40) est en fait une extension de la relation (1.14) relative à la théorie des poutres élancées.

1.5.5 Éléments de coque

Une coque est un élément surfacique tridimensionnel prenant en compte simultanément les effets de membrane et de flexion. Les surfaces à modéliser peuvent être planes ou éventuellement gauches. On distinguera ainsi deux grandes familles d'éléments relatives aux coques ; les coques planes ou courbes qui sont elles-mêmes divisées en deux sous catégories : les coques peu profondes (shallow shell) ou profondes (deep shell). Du fait de son caractère tridimensionnel, l'élément coque possède six degrés de liberté par noeud. [1]

Pour les structures formées de surfaces planes telles que les bâtiments constitués de voiles en béton armé ou les ponts caissons, le recours à un élément de coque plane se justifie amplement. Ceci étant, la même démarche est généralement adoptée pour les surfaces gauches car les éléments de coques courbes qui sont difficiles à formuler, sont d'une utilisation délicate. [1]

La surface gauche est donc, dans ce cas, reconstituée par un assemblage de surfaces planes. Cette approche présente néanmoins plusieurs inconvénients. Le premier concerne la précision de cette reconstitution qui suppose des éléments de petites tailles et donc un nombre de facettes important. Les charges appliquées perpendiculairement sur ces facettes ne sont pas non plus parfaitement représentatives de la réalité du fait du non prise en compte de la courbure dans le calcul des vecteurs charges. [1]

Comme pour les arcs maillés avec des éléments de poutres droites, on constate des « poussées au vide » liées aux efforts de membrane. Bien évidemment, ces poussées n'existent pas dans la réalité puisque ces efforts sont toujours tangents à la courbure de la coque. [1]

Le principe généralement le plus répandu pour la formulation d'un élément de coque plane consiste à considérer la superposition d'un élément de membrane à celui d'une plaque de même géométrie quadrangulaire ou triangulaire. Toutefois, cette approche suppose que ces deux effets sont découplés. L'élément membrane amenant deux degrés de liberté en translation u et v , la plaque un seul en translation w et deux en rotation β_x et β_y , le sixième associé à la normale au plan de la coque β_z est donc absent ce qui pose un réel problème pour les éléments de coques coplanaires puisque les termes de rigidité associés sont nuls. Il en résulte une singularité de la matrice de rigidité. [1]

Pour résoudre ce problème, une solution consiste à associer des termes de rigidité fictifs faibles à la rotation β_z assurant ainsi la stabilité numérique du système sans en perturber la solution. On pose alors que l'énergie de déformation associée à l'élément est égale à :

$$W_e = W_e + W_e^{\beta_z} \quad \dots (1.41)$$

Le principe de l'approximation polynomiale nous permet également d'écrire que β_z peut être exprimée à partir des fonctions de forme de l'élément et des rotations nodales, soit :

$$\beta_z = [N] + \{\beta_{ze}\} \quad \dots (1.42)$$

Ainsi et pour un élément à quatre nœuds de type, on aura :

$$\beta_z = N_1 \cdot \beta_{z1} + N_2 \cdot \beta_{z2} + N_3 \cdot \beta_{z3} + N_4 \cdot \beta_{z4} \quad \dots (1.43)$$

Avec :

$$N_i = \frac{1}{4} (1 + \zeta_i \cdot \zeta) (1 + \eta_i \cdot \eta)$$

Les déformations associées étant directement dépendantes des variations de β_z par rapport à x et y , on peut écrire pour un élément à n nœuds d'après (1.10) que :

$$\begin{Bmatrix} \frac{\partial \beta_z}{\partial x} \\ \frac{\partial \beta_z}{\partial y} \end{Bmatrix} = [J]^{-1} \cdot \begin{Bmatrix} \frac{\partial \beta_z}{\partial \zeta} \\ \frac{\partial \beta_z}{\partial \eta} \end{Bmatrix} = [J]^{-1} \cdot \underbrace{\begin{bmatrix} \frac{\partial N_1}{\partial \zeta} & \frac{\partial N_i}{\partial \zeta} & \frac{\partial N_n}{\partial \zeta} \\ \frac{\partial N_1}{\partial \eta} & \frac{\partial N_i}{\partial \eta} & \frac{\partial N_n}{\partial \eta} \end{bmatrix}}_{B_{\beta_z}} \{\beta_{ze}\} \quad \dots (1.44)$$

On déduit :

$$[k_{\beta z}] = \alpha \cdot \int_{S_e} [B_{\beta z}]^T \cdot [H_{\beta z}] [B_{\beta z}] dS_e \quad \dots (1.45)$$

avec :

$$H_{\beta z} = \frac{Ee^3}{12} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Le choix du terme $Ee^3/12$ provient du fait que cette démarche s'inspire de celle retenue pour le calcul de la part de rigidité associée à la flexion. Le coefficient α qui varie en fonction de la précision de l'ordinateur utilisé, doit être choisi suffisamment « petit1 » pour ne pas affecter les résultats. [1]

On notera cependant que dans ce cas la formulation retenue pour la partie flexion, est celle de la plaque épaisse. Cet élément de coque « épaisse » reprend donc intégralement les développements relatifs au blocage en cisaillement et à la prise en compte du cisaillement transverse. Il serait également tout à fait possible de développer un élément de coque « mince » se basant la théorie de Kirchhoff. [1]

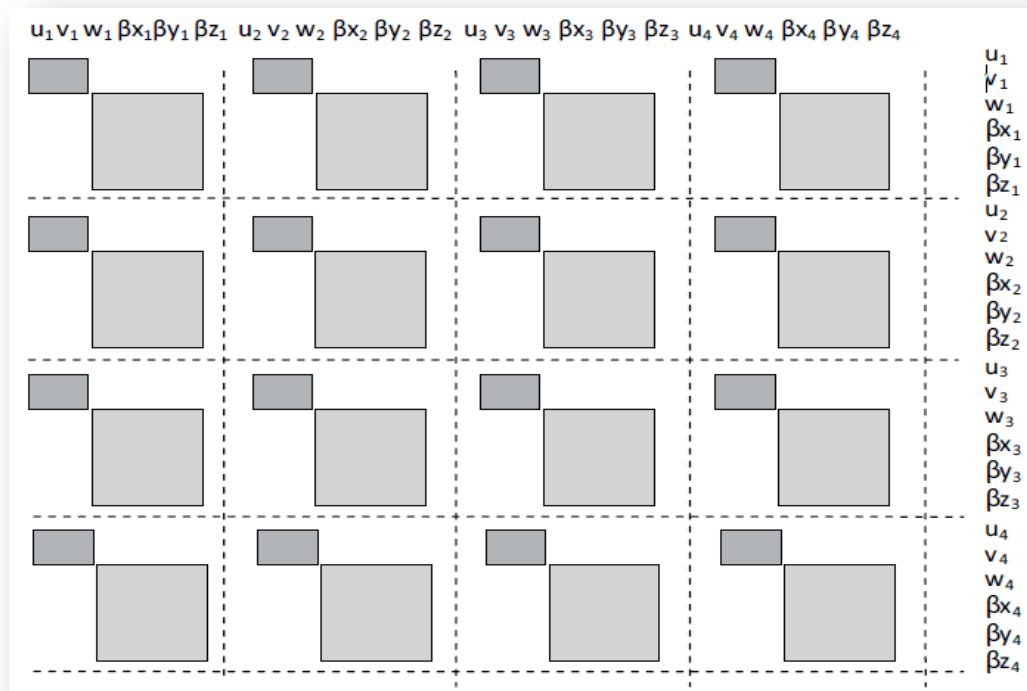


Figure 1.6 – Matrice [ke] d'un élément de coque plane à 4 nœuds [1]

CHAPITRE 02

PRESENTATION GENERALE DU LOGICIEL ROBOT (STRUCTURAL ANALYSIS PROGRAM)

CHAPITRE 02

PRESENTATION GENERALE DU LOGICIEL ROBOT

(STRUCTURAL ANALYSIS PROGRAM)

2.1 Définition du logiciel ROBOT

Le logiciel Autodesk ROBOT propose aux ingénieurs structures des fonctionnalités de simulation et d'analyse structurelle évoluées pour des structures vastes et complexes de la construction. Ce logiciel est un logiciel interactif basé sur la méthode des éléments finis. Il est utilisé dans les calculs scientifiques et les problèmes d'ingénierie parce qu'il permet de résoudre des problèmes numériques complexes en moins de temps requis par rapport les calculs manuelles courants, et ce grâce à une multitude de fonctions intégrées et à plusieurs options de calcul testés et regroupés selon usage dans ce logiciel. [5]

2.2 Le démarrage du logiciel ROBOT

Après le lancement du logiciel ROBOT sur un PC, l'interface se présente comme la fenêtre (Fig. 2.1) ci-dessous est affichée ; pour ce faire, cliquer sur l'icône approprié affiché sur le bureau ou sélectionner la commande appropriée dans la barre des tâches. Dans cette fenêtre, vous pouvez définir le type de la structure à étudier, ouvrir une structure existante ou créer un nouveau projet qu'il contient quatre options ; étude d'une coque, conception d'un bâtiment, étude d'une portique spatial et étude d'un portique plan et puis charger le module permettant d'effectuer le dimensionnement de la structure. [5], [10]

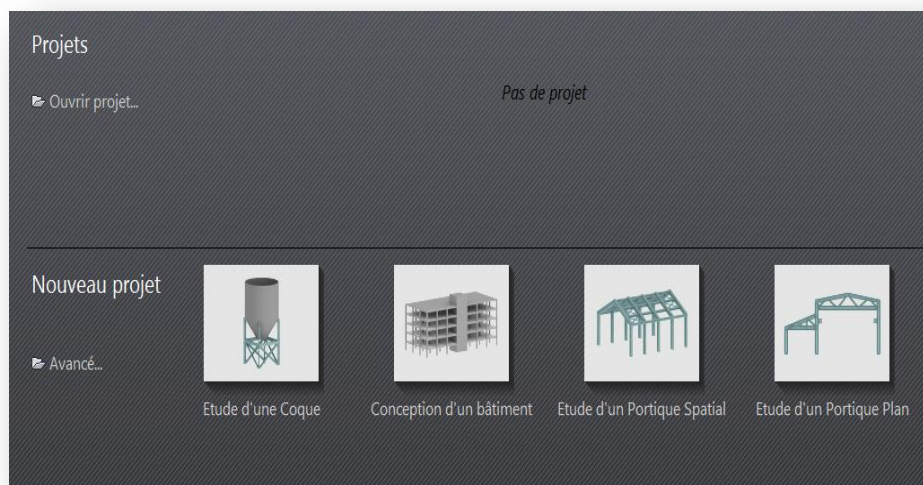


Figure 2.1: la fenêtre de démarrage de ROBOT

2.3 L'environnement de travail sur le logiciel ROBOT

Une fois un type de structure sélectionné, vous arrivez à l'écran ci-dessous (Fig. 2.2) avec un certain nombre de zones utiles à connaître pour le déroulement de votre modélisation et de l'exploitation des résultats. [5], [10]

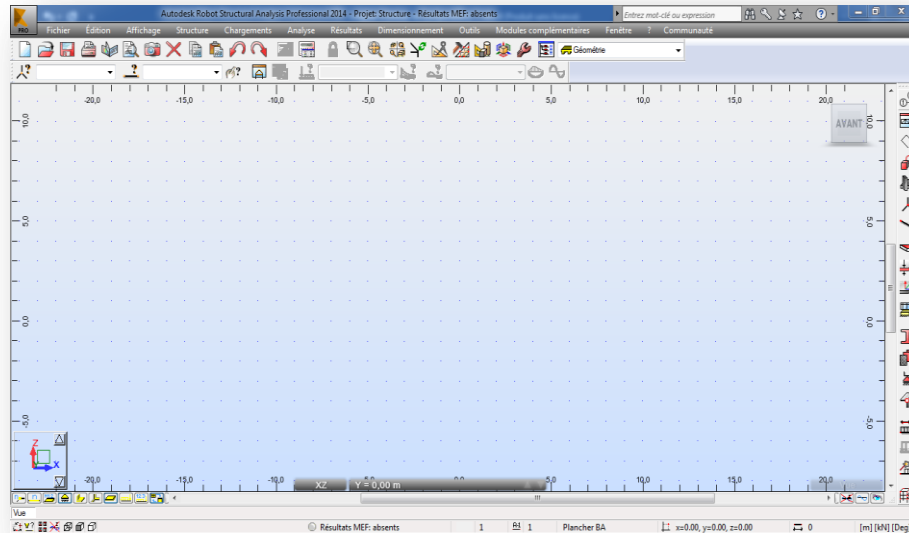


Figure 2.2: la fenêtre de travail de ROBOT

La sélection d'un bureau se fait à l'aide de la liste déroulante principale se trouvant en haut et à droite de votre écran (le bureau de départ se nommant: Démarrage). La barre d'outils de droite correspond à des fonctions additionnelles relatives au bureau dans lequel vous trouvez. L'autre fonctionnalité indispensable aux manipulations sous ROBOT est l'utilisation du Menu contextuel accessible par un simple clic droit sur la souris. Lors du travail dans l'éditeur graphique ou dans un tableau, un clic sur le bouton droit de la souris ouvre un menu contextuel supplémentaire (Fig. 2.3) qui affiche les commandes les plus souvent utilisées. [5]

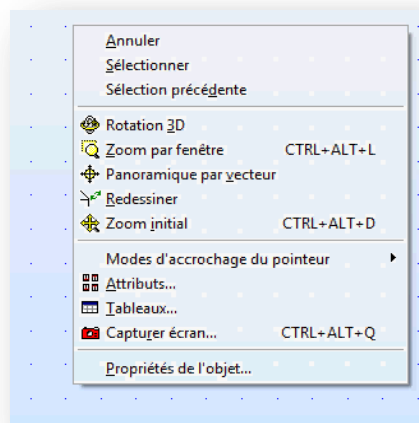


Figure 2.3: le menu contextuel supplémentaire

Le menu contextuel est personnalisable de façon à rajouter de nouvelles fonctions propres à votre métier. Pour cela, dans le menu déroulant **Outils**, choisissez **Personnaliser** et **Personnaliser menu contextuel**.

Il vous reste alors à rechercher, dans l'arborescence proposée, la fonction que vous souhaitez choisir et à la glisser à droite de l'écran (Fig. 2.4) :

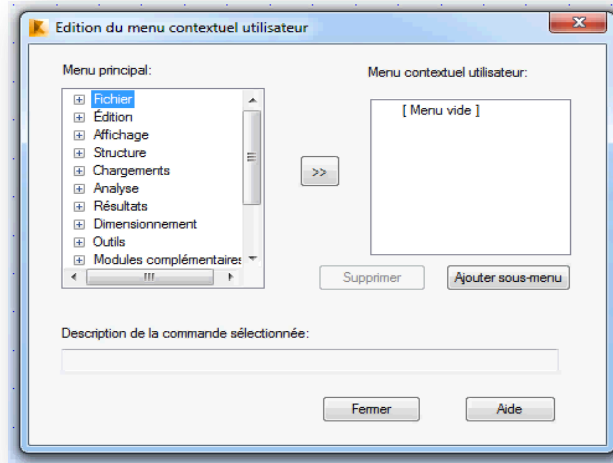


Figure 2.4: Edition du menu contextuel utilisateur

2.4 Le réglage des préférences du logiciel ROBOT

Les préférences du logiciel ROBOT nous permettront de changer les paramètres gérant la forme du logiciel : couleur, polices, tailles des icônes, etc. Dans la boîte de dialogue **préférences** représentée sur la figure ci-dessous (Fig. 2.5). Nous pouvons définir les paramètres de base du logiciel. Afin d'ouvrir la boîte de dialogue, vous pouvez sélectionner dans le menu déroulant Outils puis Préférences. [5], [10]

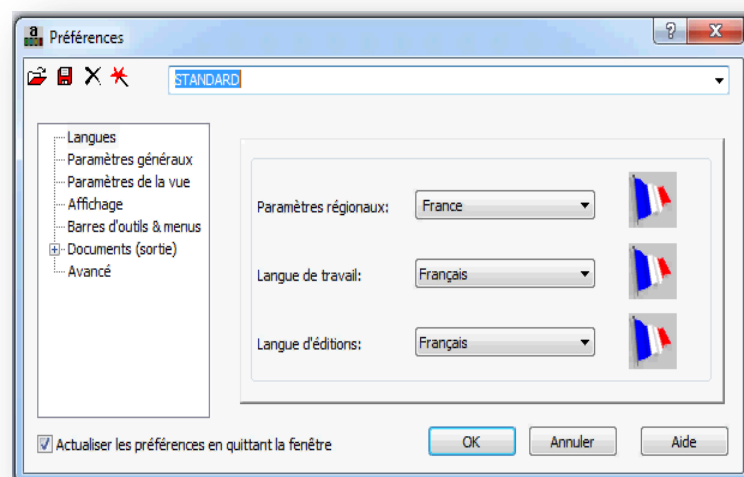


Figure 2.5: Préférences du logiciel ROBOT

La fenêtre de préférences se divise en plusieurs parties, notamment :

- La partie supérieure de la fenêtre de dialogue regroupe quatre icônes et le champ de sélection de fichiers de préférences. Par défaut, le nom des préférences actuelles est affiché. Dans ce champ, vous pouvez sélectionner un fichier de préférences existant ; pour cela, cliquez sur la flèche à droite du champ et sélectionnez les préférences appropriées à vos besoins dans la liste déroulante. [5], [10]
- La partie gauche de la fenêtre de dialogue préférences contient une arborescence qui affiche la liste des options que vous pouvez personnaliser. Pour cela, cliquez sur le bouton gauche de la souris sur la position que vous voulez modifier.
- Dans la partie droite de la fenêtre de dialogue préférences se trouve la zone dans laquelle vous pouvez définir les paramètres spécifiques du logiciel, l'aspect de cette zone varie en fonction de la sélection effectuée dans l'arborescence de gauche. [5]

2.5 Différents étapes de modélisation avec le logiciel ROBOT

La modélisation avec le logiciel ROBOT permet de considérer que structuraux, quant aux éléments non structuraux ils sont modélisés soit par masse aux nœuds, soit par des charges qui s'ajoutent au poids des éléments structuraux. La modélisation avec le ROBOT consiste en les étapes suivantes [7] :

- Définition des unités, normes et propriétés des matériaux ;
- Définition de la géométrie du model ;
- Définition et affectation des éléments de construction;
- Définition des chargements ;
- Définition de la masse et les charges sismiques ;
- Définition des combinaisons ;
- Analyse de la structure et traitement des résultats.

2.5.1 Définition des unités, normes et propriétés des matériaux

- **Réglage des unités :**

Les unités utilisées sont celles qui sont employées dans la pratique du béton armé et la charpente métallique. Elles sont parfois différentes des unités « légales » (Système International SI), ces dernières étant dans certains cas inadaptées, car

disproportionnées par rapport aux ordres de grandeur des valeurs couramment rencontrées. La fenêtre de réglage des unités est présentée sur la figure ci-dessous (Fig. 2.6).

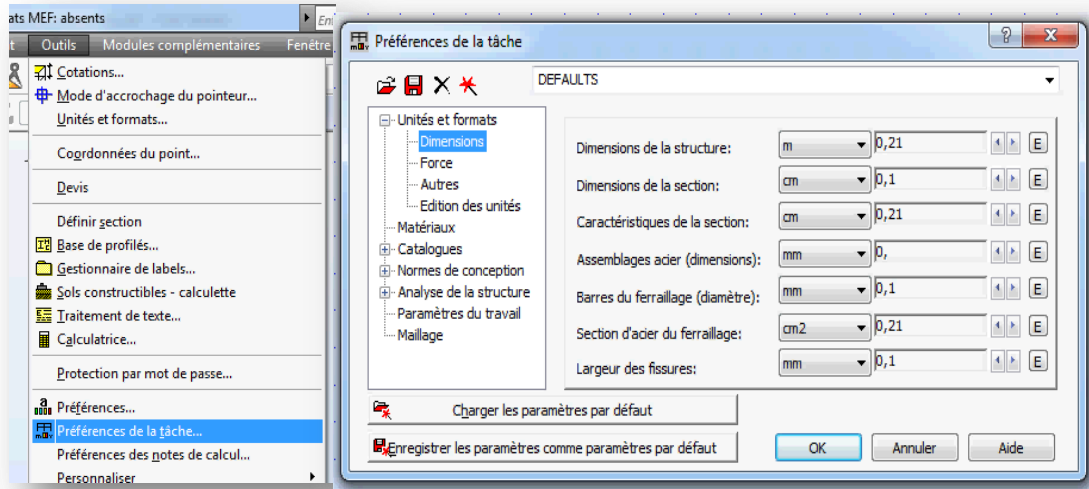


Figure 2.6: Réglage des unités

■ Réglage des normes

La fenêtre de réglage des normes est présentée sur la figure ci-dessous (Fig. 2.7). Le chapitre **Norme de conception** cache une sous-arborescence que vous pouvez afficher en cliquant sur le petit +. Le sous-chapitre **Charges** permet de définir notamment les paramètres d'actions du vent et le règlement de pondération utilisé, les règlements parasismiques...etc. Parmi les règlements parasismiques utilisé dans le logiciel ROBOT ; on trouve les règlements parasismiques algériens (RPA). [5],

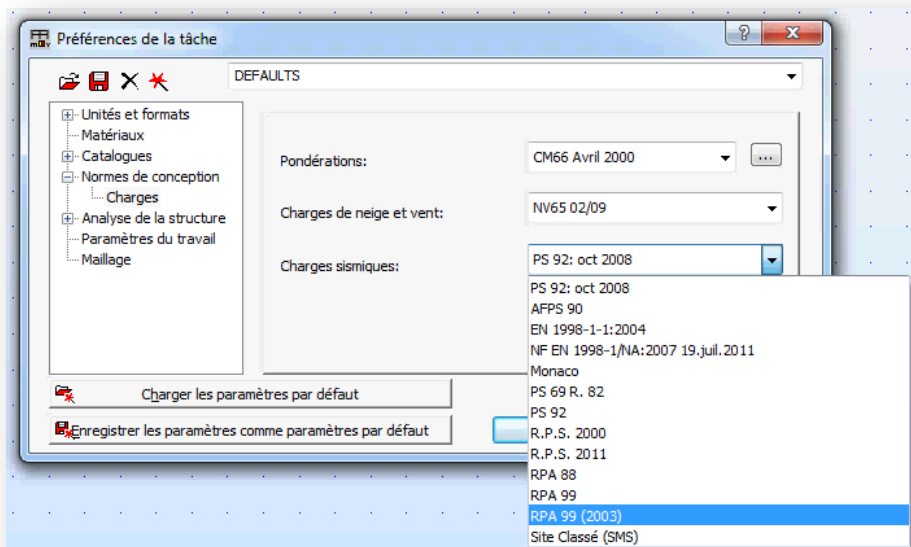


Figure 2.7: Réglage des normes

▪ Réglage des propriétés mécaniques des matériaux

La fenêtre des préférences relatives aux matériaux est présentée dans la figure ci-dessous (Fig. 2.8).

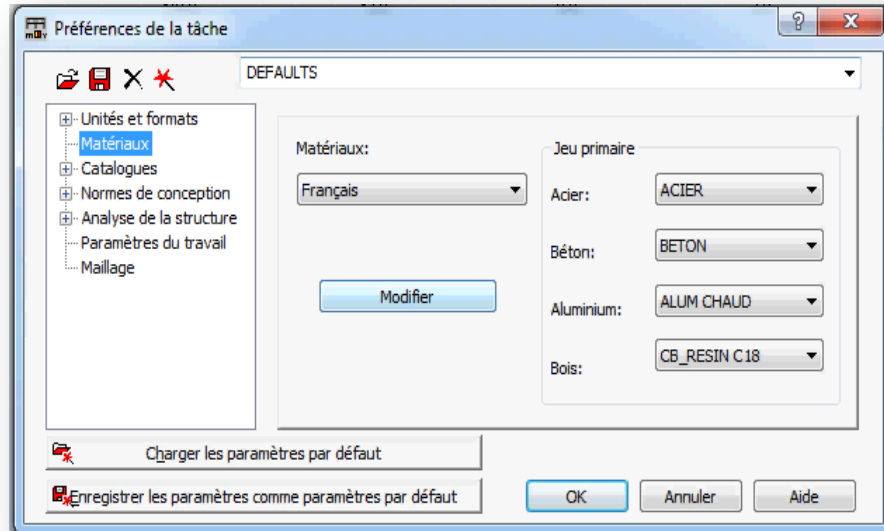


Figure 2.8: Réglage des matériaux

Pour consulter les caractéristiques des matériaux, les modifier ou même rajouter un matériau, vous devez sélectionner dans l'arborescence **Matériaux** et cliquez sur le bouton **Modifier** (Fig. 2.9). Il suffit alors de consulter ou de modifier les données en faisant Ajouter pour valider les modifications. De plus, si vous souhaitez ajouter un matériau, il suffit également de modifier le nom et de valider. [5], [10]

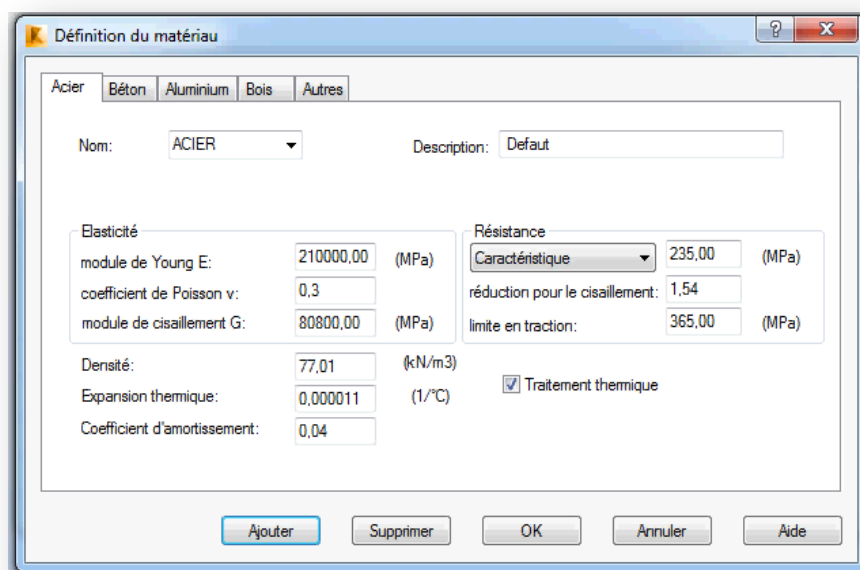


Figure 2.9: Définition du matériau

2.5.2 Définition de la géométrie du model

Afin de commencer la définition de la structure et créer le model qui nous allons étudier, donc il vous faut sélectionner la première icône (**Ligne de construction**) en haut et à droite du premier rang dans la fenêtre de l'assistant affichée par le logiciel **ROBOT**. Il suffit alors de définir les lignes de construction dans les axes X, Y, Z afin de vous faciliter la mise en place des barres. Il apparaît alors la boîte de dialogue représentée ci-dessous (Fig. 2.10). [5], [10]

Les lignes de construction forment une grille auxiliaire qui peut servir à définir les différents éléments de la structure et à se référer aux composants de la structure sélectionnés (effectuer la sélection). Les intersections de la grille forment des points qui facilitent le travail du concepteur en guidant les mouvements du curseur lors de la définition graphique d'une structure à l'aide de la souris. [5], [10]

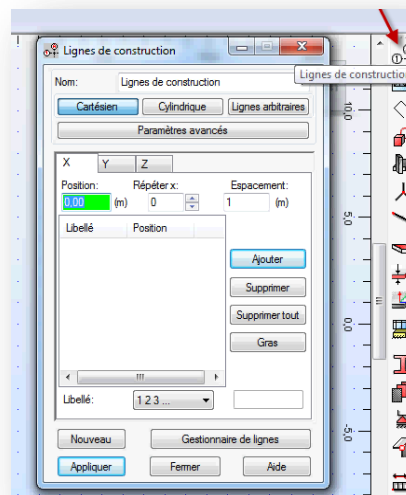


Figure 2.10: Lignes de construction

Les lignes de construction sont d'une grande importance lors de la navigation dans le modèle de la structure. A l'aide des lignes de construction, vous pouvez afficher rapidement le plan de travail sélectionné (boîte de dialogue Vue) ou sélectionner les éléments situés sur les lignes de construction. [5], [10]

La sélection des lignes de construction peut être effectuée au moyen des descriptions situées à deux extrémités des lignes de construction. Un clic sur la description de la ligne sélectionnée entraîne la sélection de tous les nœuds de la structure située sur cette ligne et ouvre la boîte de dialogue de modification des lignes de construction.

2.5.3 Définition et affectation des éléments de construction

Pour définir la structure qui nous allons étudier ; il faut choisir l'option qui nous permet de sélectionner et/ou définir les types des sections ou des barres à utiliser dans la structure (Fig. 2.11). Dans le logiciel ROBOT, les types de barre suivants sont disponibles :

- Barre en béton armé
- Barre en acier/aluminium
- Barre en bois.

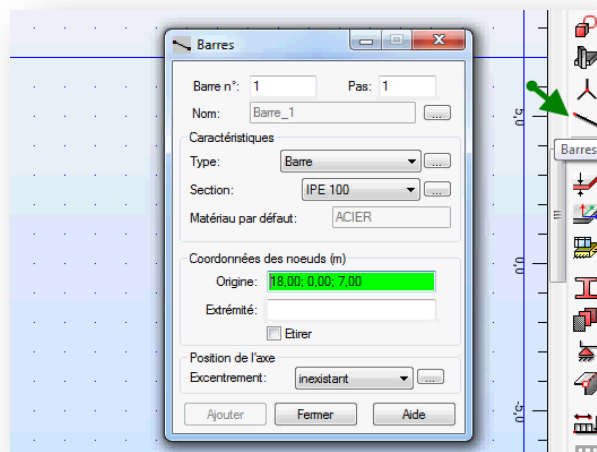


Figure 2.11: définition des barres

Dans la fenêtre **Barres**, sélectionner la section qui correspond à la barre que vous souhaitez modéliser (poteau : IPE 240, traverse : IPE220). Si le profilé n'est pas disponible, cliquer sur les 3 points [...] à côté du champ **Section** et ajouter le nouveau profilé [10]

• Poteaux

Ouvrez la boîte de dialogue Poteaux en procédant de l'une des manières suivantes :

- Cliquez direct sur l'icône poteaux (Fig.  2.12)

Utilisez cette option pour définir les poteaux d'une structure en spécifiant les paramètres suivants :

- Coordonnées de la position du poteau
- Hauteur du poteau
- Orientation le long de l'axe vertical Z admis (haut, bas)

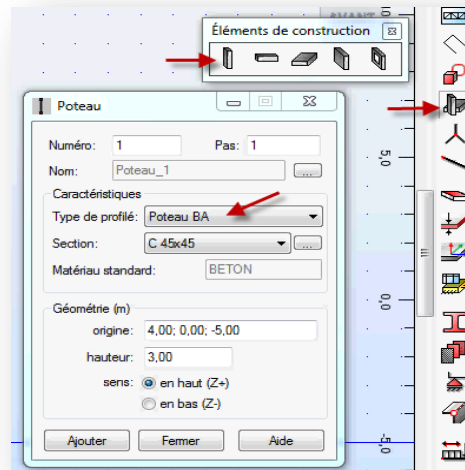


Figure 2.12: définition des poteaux

La partie inférieure de la boîte de dialogue regroupe les options permettant la définition de la géométrie du poteau dans la structure :

- Coordonnées du nœud origine du poteau
- Hauteur du poteau
- Orientation (en haut ou en bas par rapport à la position du nœud origine). [10]

❖ Poutres

L'option sert à définir les poutres dans la structure.

Vous pouvez accéder à cette option à l'aide de l'une des méthodes suivantes :

- Sélectionnez le menu Géométrie > Poutres.
- Cliquez direct sur l'icône poutres  (Fig. 2.13)

La boîte de dialogue ci-dessous s'affiche.

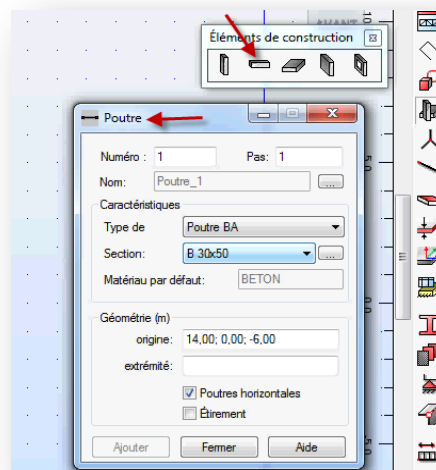


Figure 2.13: définition des poutres

La partie supérieure de la boîte de dialogue contient les champs d'édition permettant de définir le numéro et le nom de la poutre. Le champ Nom est inaccessible pour l'édition et affiche un aperçu du nom créé conformément à la syntaxe déterminée dans la boîte de dialogue Nom des barres/objets. **[10]**

Cliquez sur  en regard du champ Nom pour ouvrir la boîte de dialogue Nom des barres/objets dans laquelle vous pouvez définir une nouvelle syntaxe des noms pour les barres.

❖ Voiles

Ouvrez la boîte de dialogue Voiles en procédant de l'une des manières suivantes :

- Cliquez sur le menu Géométrie > Voiles.
- Cliquez sur l'icône voiles  (Fig. 2.14).

Utilisez cette option pour définir les voiles d'une structure en spécifiant les paramètres suivants :

- Coordonnées des points de départ et d'arrivée de la ligne de base du voile.
- Hauteur du mur
- Orientation le long de l'axe vertical Z admis (haut, bas). **[10]**

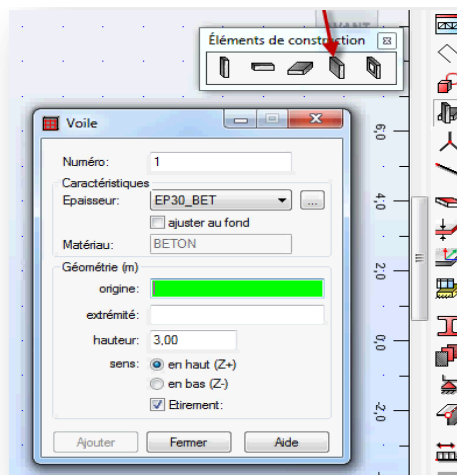


Figure 2.14: définition des voiles

Pour définir un voile, il faut entrer :

1. Numéro du voile
2. Caractéristiques du voile :

✚ Épaisseur ; Ajuster au fond - Si vous sélectionnez cette option lors du dessin du voile, son épaisseur est automatiquement ajustée aux traits de contour du voile.

✚ Matériau (ce champ n'est pas éditable ; il indique le matériau défini pour le type d'épaisseur du voile sélectionné).

3. Géométrie du voile :

✚ Les points de départ et de fin d'un voile.

✚ Hauteur du mur

✚ Orientation (en haut ou en bas par rapport à la position du nœud origine).

Par ailleurs, le matériau par défaut du type d'épaisseur de voile sélectionné s'affiche.

❖ Dalles

Nous pouvons accéder à cette option à l'aide de l'une des méthodes suivantes:

- à partir du menu Géométrie > Dalles
- Cliquez sur l'icône dalles  (Fig. 2.15).

La boîte de dialogue ci-dessous s'affiche.

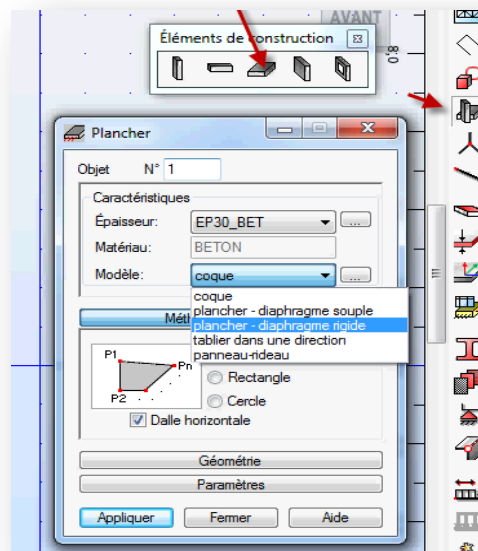


Figure 2.15: définition des dalles

Utilisons cette option pour définir des dalles dans une structure ; pour cela, vous devez spécifier :

- les propriétés des dalles ;
- la méthode de définition des dalles ;
- les paramètres de la discrétisation.

La boîte de dialogue est divisée en quatre parties :

- Champ Objet (affiche le numéro ou l'identifiant de l'objet créé ou sélectionné) et Propriétés
- Méthode de définition
- Géométrie
- Paramètres

❖ Barres (en acier, aluminium et bois)

Ouvrez la boîte de dialogue Barres, qui vous permet de définir les éléments de barres d'une structure, en procédant de l'une des manières suivantes :

- Cliquez sur l'icône  (Fig. 2.16).
- Via le bureau BARRES (vous pouvez sélectionner des présentations dans la liste de sélection dans la barre d'outils Standard)

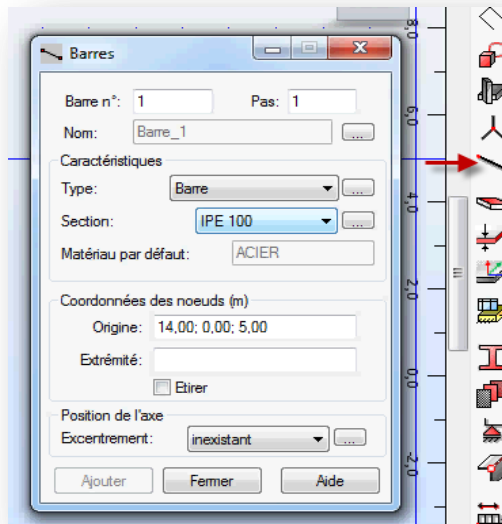


Figure 2.16: définition des barres

Le mode de définition des barres dépend du mode d'accrochage du pointeur. Selon son type, les options disponibles dans la boîte de dialogue permettent d'effectuer les tâches suivantes :

- Mode d'accrochage à la grille (snap=grid) - définit les points de grille de coordonnées (comportement analogue au mode Aucun accrochage)
- En faisant glisser le curseur vers des points ou des nœuds existants de la structure (snap=node) - Définit les numéros des points ou des nœuds
- En faisant glisser le curseur vers des lignes existantes (snap=line) - Définit le numéro de ligne.

❖ Appuis (fondation)

Ouvrez la boîte de dialogue Appuis, qui permet de définir les appuis d'une structure, en procédant de l'une des manières suivantes :

- Cliquez sur l'icône appuis   (Fig. 2.17).
- Le bureau Appuis.

La boîte de dialogue ci-dessous apparaît :

- La partie supérieure, qui propose plusieurs boutons;
- La partie centrale, qui affiche la liste des appuis actifs; Le nombre d'onglets dépend du type de la structure.
- La partie inférieure, qui contient le champ de sélection actuel et les boutons standard.

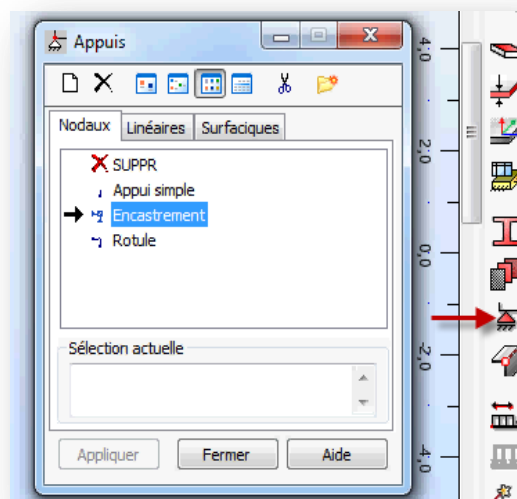


Figure 2.17: définition des appuis

La partie supérieure de la boîte de dialogue regroupe les icônes suivantes :

-  Définit un nouveau type d'appui (Définir un nouvel appui).

-  Supprime un type d'appui de la liste active.
- , ,  et  Affichent la liste des appuis actifs en utilisant de grandes icônes, de petites icônes, ou sous forme de liste abrégée ou détaillée.
-  Supprime de la liste active tous les types d'appuis non utilisés dans la structure.
-  - ouvre la boîte de dialogue Gestionnaire des labels.

Si vous sélectionnez la liste détaillée, les paramètres des appuis définis seront affichés :

- Le symbole X apparaît dans la deuxième colonne : le type d'appui est déjà utilisé dans la structure.
- Les normes suivantes décrivant l'appui sont affichées dans la troisième colonne :
 - X indique un degré de liberté fixe dans un nœud de la structure
 - F indique un degré de liberté libre relâché dans un nœud de la structure
 - E indique le degré de liberté dans lequel un appui élastique est défini

2.5.4 Définition des chargements

a) Types de charges

Ouvrez la boîte de dialogue Cas de charge grâce à l'une des méthodes suivantes :

- Par un clic sur  (Fig. 2.18).
- Dans la liste déroulante du système de bureaux, sélectionnez CHARGES

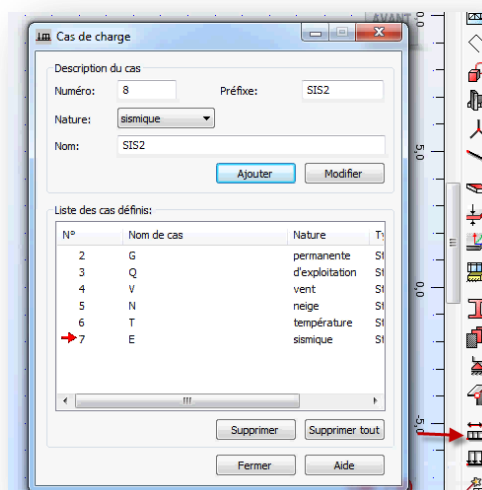


Figure 2.18: Types de charges

Afin de définir un nouveau cas de charge vous devez effectuer les opérations suivantes :

- Spécifiez la nature de la charge : permanente, d'exploitation, de vent, de neige ou sismique. La nature de la charge dépend de la norme que vous avez sélectionnée.
- Spécifiez la sous-nature de la charge (si disponible).
- Affectez un numéro de cas de charge.
- Saisissez une description du cas. Dans le nom d'une combinaison, les cas peuvent être présentés non seulement au moyen de leurs numéros, mais aussi par leurs noms abrégés (préfixe). Par défaut, le programme saisit dans le champ Nom le nom abrégé du cas de charge
- Saisissez le Nom du cas de charge.

Cliquez sur Nouveau. Commence la définition d'un nouveau cas de charge. Chaque nouveau cas de charge prendra automatiquement le premier numéro libre, que vous pourrez modifier ultérieurement. [10]

b) Définition des charges

Ouvrez la boîte de dialogue Définition des charges, qui permet de définir les charges à partir de cas de charge existants, à l'aide de l'une des méthodes suivantes :

- Cliquez sur  (Fig. 2.19).

NB : Au moins un cas de charge doit être défini avant que vous puissiez utiliser cette boîte de dialogue.

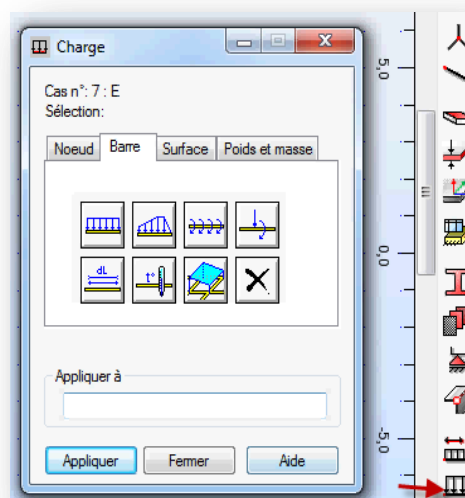


Figure 2.19: Définition des charges

La boîte de dialogue contient quatre onglets qui sont nœud, barre, surface et en fin poids et masse.

De nouveaux types de charges vous permettent de définir les forces d'inertie, centrifuges et d'accélération angulaire, de sorte que vous puissiez analyser et concevoir des structures pour l'industrie maritime. Ces structures sont associées à l'extraction de pétrole brut des fonds marins, par exemple, les composants d'équipements pour plates-formes de forage. Ces charges génèrent les forces dues à l'inertie de la structure provoquée par la vitesse ou l'accélération imposées. Les charges de ce type sont utilisées pour les structures marines dans lesquelles les charges de transport sont assez importantes (par exemple, la structure est soulevée par une grue ou posée sur un bateau). Ces charges ne résolvent pas complètement des problèmes de modélisation des structures marines, mais elles les facilitent. [10]

2.5.5 Définition des combinaisons

Pour ouvrir la boîte de dialogue Définition/modification de la combinaison, vous devez effectuer les opérations suivantes :

- Cliquez sur Menu des charges > Combinaisons manuelles (Fig. 2.20).
- Cliquez sur le bouton Nouvelle dans la boîte de dialogue Combinaisons.

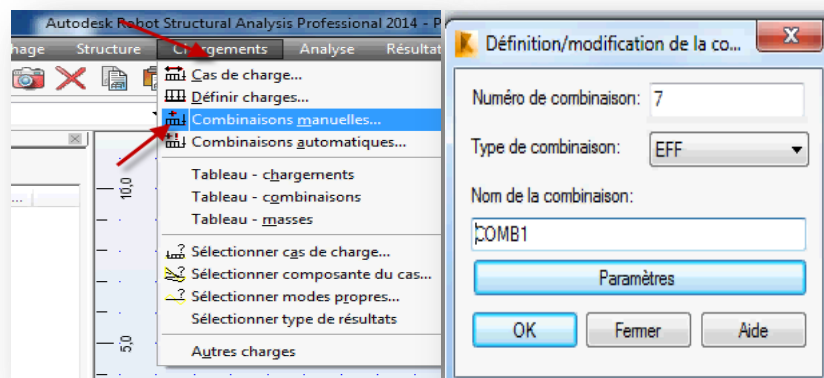


Figure 2.20: Combinaisons manuelles

Pour définir une nouvelle combinaison :

1. Saisissez le numéro de la combinaison (par défaut, le numéro suivant du cas de charge est saisi).
2. Sélectionnez un type de combinaison :

Selon le BAEL :

- ELU ($1.35G + 1.5Q$) : si cette option est sélectionnée, la combinaison définie sera utilisée lors du dimensionnement des éléments acier et BA lors de la vérification des conditions de l'état limite ultime.
- ELS ($G+Q$) : si cette option est sélectionnée, la combinaison définie sera utilisée lors du dimensionnement des éléments acier et BA lors de la vérification des conditions de l'état limite de service.

Selon le RPA99/version2003 :

- Accidentelle et sismique : si cette option est sélectionnée, la combinaison définie sera utilisée lors du dimensionnement des éléments acier et BA lors de la vérification des conditions de l'état limite accidentel et sismique.
 - **GQEx** : $G+Q+Ex$;
 - **GQEy** : $G+Q+Ey$;
 - **GQ1.2Ex** : $G+Q+1.2Ex$;
 - **GQ1.2Ey** : $G+Q+1.2Ey$;
 - **0.8GEx** : $0.8G+Ex$;
 - **0.8G+Ey** : $0.8G+Ey$.
3. Saisissez le nom de la combinaison.
 4. Cliquez sur OK.

Le logiciel affiche la boîte de dialogue Combinaisons suivante s'ouvre (Fig. 2.21).

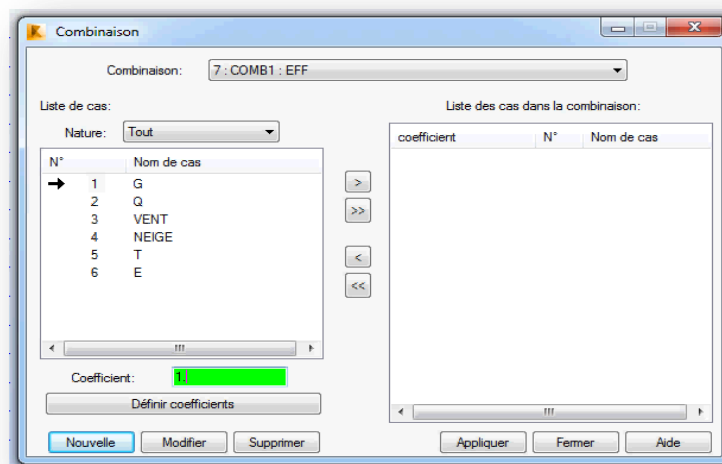


Figure 2.21: Tableau de combinaisons manuelles

2.5.6 Analyse de la structure

Cliquez sur  dans la barre d'outils (Fig. 2.22) ou sélectionnez la commande Analyse > Type d'analyse pour définir un nouveau cas de charge (analyse modale, spectrale, sismique etc.), modifier le type de cas de charge et modifier les paramètres du cas de charge sélectionné. [10]

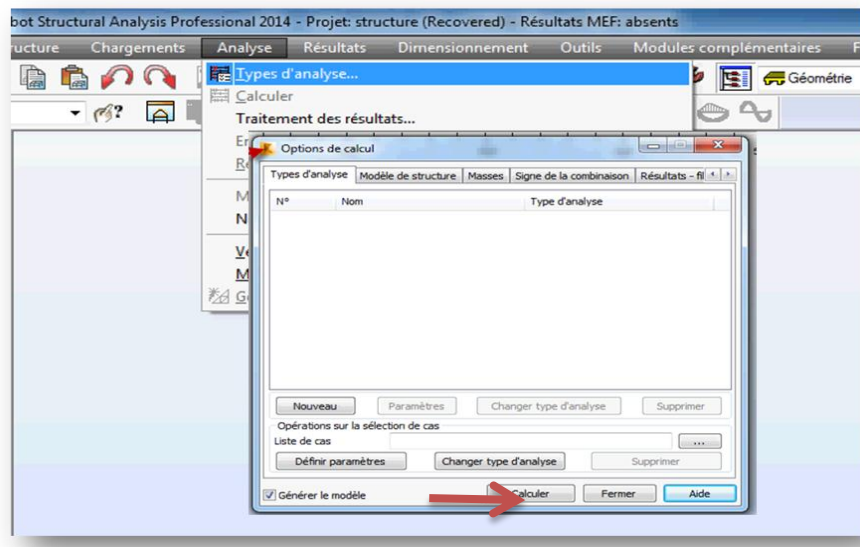


Figure 2.22: Analyse de la structure

Lors de la définition des charges appliquées à la structure, l'analyse statique linéaire est affectée à tous les cas de charge. Vous pouvez modifier le type d'analyse en analyse de flambement, harmonique ou temporelle. De même, dans cette boîte de dialogue vous pouvez créer les nouveaux cas de charge et lancer les calculs pour les types d'analyse pour lesquels il n'est pas nécessaire de définir préalablement un cas de charge statique (analyse modale ou sismique).

La boîte de dialogue contient six onglets :

- Types d'analyse
- Modèle de structure
- Masses
- Signe de la combinaison
- Résultats - filtres
- Déformation de flambement.

L'onglet Types d'analyse affiche les cas de charge précédemment définis. Les boutons Nouveau, Paramètres, Changer type d'analyse et Supprimer permettent de changer le type et les paramètres de l'analyse d'un cas unique sélectionné.

- Saisissez une liste de cas dans le champ Liste de cas ou cliquez sur (...) et sélectionnez les cas dans la boîte de dialogue Sélection. Les opérations sur la sélection de cas sont effectuées à l'aide des boutons suivants :
- Définir paramètres. Permet de définir les paramètres de l'algorithme des calculs de l'analyse non-linéaire et de flambement
- Changer type d'analyse. Permet de changer le type de cas en cas auxiliaire, non-linéaire ou de flambement et de définir les paramètres de calcul
- Supprimer. Supprime les cas sélectionnés dans la liste
- Les boutons Calculs (lance les calculs de structure des calculs pour les cas de charge définis) et Fermer (ferme la boîte de dialogue Options) sont regroupés dans la partie inférieure de la boîte de dialogue
- S'il y a des erreurs dans le model étudié le logiciel ROBOT affichera une liste des erreurs qui pouvant se produire lors de l'analyse de la structure.
- L'option protège contre la perte des résultats de calcul de la structure dans le cas où vous effectuez une opération qui modifie les données sur la structure enregistrées dans le fichier *.RTD. Vous obtenez alors l'état de calcul Non actuels.

2.5.7 Traitement des résultats

Avec les types de structures volumiques ou de plaques/coques, sélectionnez Analyse > Traitement des résultats pour définir le traitement des résultats pour l'affichage des cartographies (Fig. 2.23).

La boîte de dialogue contient les informations suivantes :

- Un nom de modèle
- Une brève description du modèle
- Une liste de résultats à calculer

Quatre modèles standards contenant les jeux de résultats de base sont disponibles.

Pour calculer les résultats, cliquez sur Démarrer le traitement ou activez l'option Démarrer le traitement des résultats après les calculs. Lorsque les calculs d'un modèle de structure sont terminés, le traitement des résultats commence automatiquement. [10]

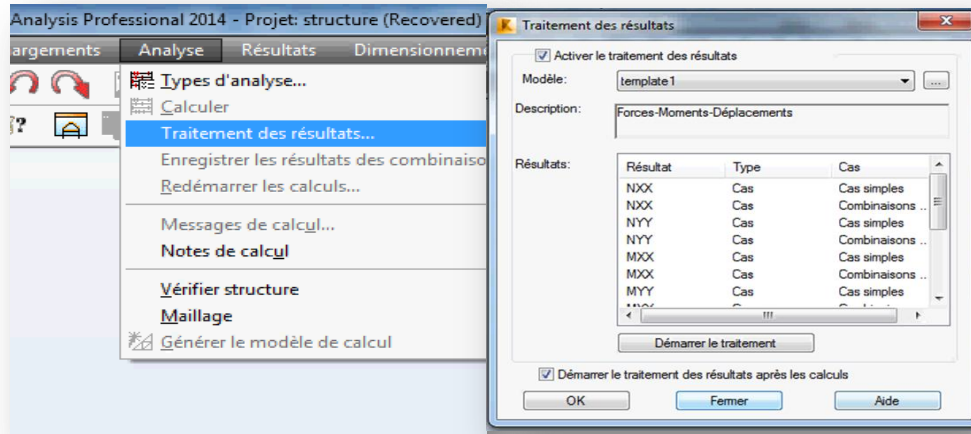


Figure 2.23: Traitement des résultats

Vous pouvez créer des modèles définis par l'utilisateur pour le traitement des résultats. Pour définir un nouveau modèle, cliquez sur le bouton (...). La boîte de dialogue Composition du modèle pour le traitement des résultats s'ouvre.

Le traitement des résultats est destiné aux modèles de structure volumineux qui exigent d'importantes ressources. Il est possible de traiter les résultats à l'avance si le processeur et la mémoire ne sont pas sollicités excessivement.

Il est possible de procéder au traitement des résultats dans le logiciel Robot ou dans l'application externe utilisée à cet effet.

La différence du temps d'accès aux résultats obtenus est visible dans l'affichage des cartographies des structures surfaciques ou volumiques. Si les résultats sont préparés (mis en mémoire tampon) lors de la présentation des cartographies, il n'est pas nécessaire de recalculer les valeurs pour les cartographies, mais uniquement de redessiner la structure.

L'option permettant d'activer ou de désactiver le traitement par défaut des résultats pour l'affichage de cartographies est disponible dans la boîte de dialogue Préférences, dans l'onglet Avancées. [10]

CHAPITRE 03

EXEMPLE D'APPLICATION

CHAPITRE 03

EXEMPLE D'APPLICATION

3.1 Modélisation d'un bâtiment R+4 avec le logiciel robot

La but de cette application est d'appliquer la norme algérienne de construction antisismique dénommée RPA99 version 2003 sur un bâtiment R+4 avec l'utilisation du logiciel ROBOT. Tout au long de cette application, il sera discuté la stabilité de ce bâtiment, le ferrailage des poteaux, poutres, et des semelles.

- Les poteaux en béton sont modélisés en éléments barre et sont bi-articulés lorsqu'ils ne reprennent que des charges verticales ou bi-encastres lorsqu'ils participent au contreventement.
- Les poutres sont aussi modélisées en éléments barre.
- Le maillage pour le calcul en éléments finis est constitué d'éléments quadrangulaires.
- Les dalles et les voiles sont modélisés en coques : les coques sont plus précises que les modèles planchers qui ne fournissent aucune indication sur la flexion des dalles.
- À la base des murs et des poteaux, au niveau des appuis sur fondations, il est modélisé des appuis rotules rigides.

3.1.1 Présentation et descriptif de l'application

Le projet consiste en la réalisation d'un bâtiment en béton armé qu'il est implanté à Sidi Aissa wilaya de M'sila (longueur : 22.60m, largeur : 9.55m, hauteur : 15.30m). L'opération immobilière à dominantes résidentielles se caractérise par sa diversité, notamment au regard de la pluralité des fonctions (habitations / locaux commerciaux).

L'ouvrage est composé d'un rez-de-chaussée et quatre étages ainsi que d'un parking en sous-sol et il est destiné à recevoir 08 logements collectifs (Fig. 3.1). La structure du bâtiment est en béton armé. L'ouvrage est de type auto-stable contreventé par un système de portiques longitudinaux et transversaux de poteaux et de poutres.

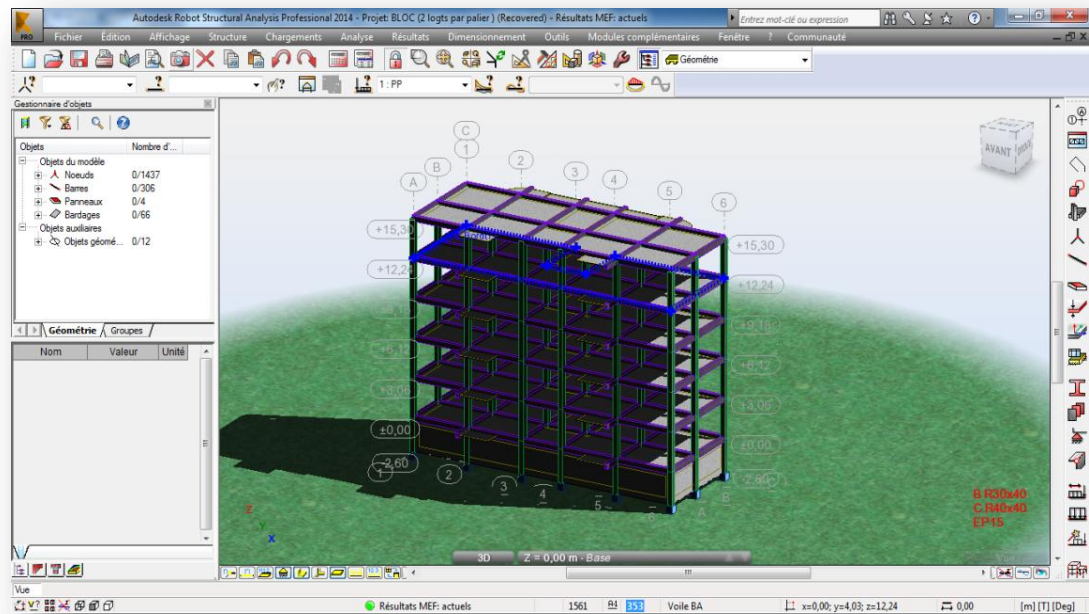


Figure 3.1: Présentation de la structure

- **Hypothèse du calcul**

- La fissuration est préjudiciable pour tous les éléments de fondations ;
- La fissuration est peu préjudiciable pour tous les éléments de la superstructure.

- **Règlements utilise**

- RBA99 version 2003 ;
- CBA93 ;
- DTR B.C 2.2 charges permanentes et charges d'exploitation.

- **Classification de la zone sismique**

D'après l'article 3-1 et l'annexe 1 du RPA99 version 2003 portant la classification sismique des wilayas et des commune d'Algérie, la commune de Sidi Aissa est classée en zone de sismicité (zone I).

- **Classification De L'ouvrage Selon Leur Importance**

D'après l'article 3-2 du RPA99 version 2003 portant la classification des ouvrages selon leur importance, l'ouvrage qui fait l'objet de cette étude est classé comme « Ouvrages courants ou d'importance moyenne en groupe d'usage 2 ».

3.1.2 La stabilité du bâtiment

▪ Analyse modale avec le logiciel Robot

L'analyse modale spectrale est reconnue comme méthode de référence pour étudier le comportement d'une structure soumise à l'action d'un séisme. Elle a pour but de déterminer le comportement de la structure sous une excitation de direction quelconque au droit des fréquences de résonances. A chaque fréquence de résonance correspond un comportement différent de la structure, appelé "mode propre". En fonction des fréquences de ces modes, les sollicitations sismiques sont caractérisées avec les spectres de réponses.

Comme le bâtiment est régulier, la détermination des modes propres est effectuée à l'aide de la modélisation sur le logiciel Robot.

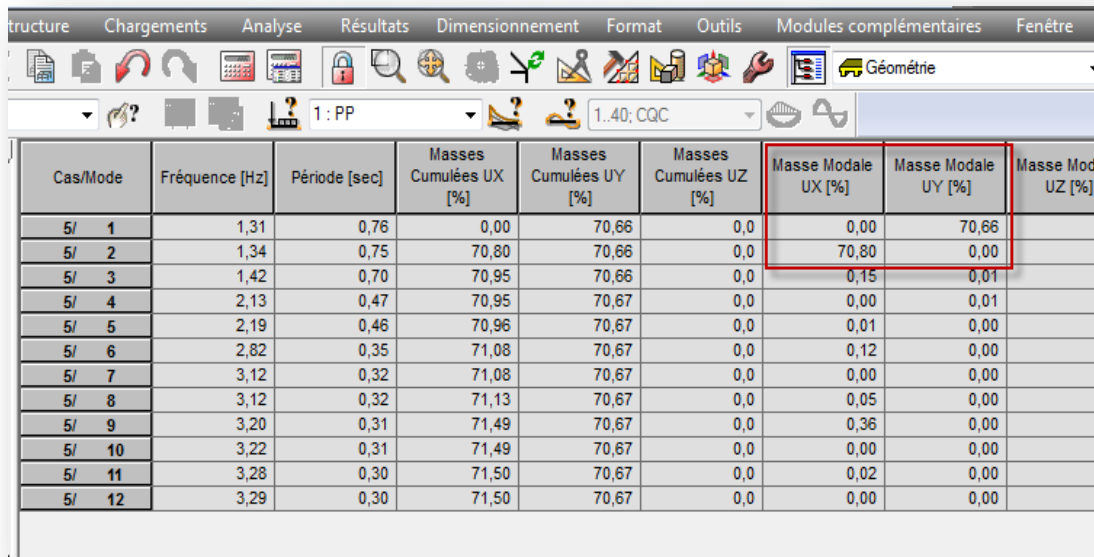
L'analyse modale spectrale comporte les étapes suivantes :

- recherche des modes propres ;
- sélection des modes utiles et prise en compte éventuellement du pseudo-mode ;
- combinaisons des réponses modales ;
- cumul des effets des composantes du mouvement sismique.

Lorsque le cumul des masses modales n'atteint pas 90% de la masse totale de l'ouvrage à la fréquence de coupure, les modes négligés sont pris en compte soit avec l'utilisation d'un mode résiduel (ou pseudo-mode), soit en majorant toutes les variables par un facteur de majoration. Dans les 2 cas, le nombre de modes peut être limité tel que la somme cumulée des masses modales est supérieure à 70%. Ceci permet d'optimiser le temps de calcul sans négliger des modes propres significatifs.

À l'aide du logiciel Robot, il est fait l'ensemble des calculs en vue de déterminer le nombre de mode (Fig. 3.2).

Pour obtenir le tableau de résultats de l'analyse modale ; cliquez sur le menu supérieur > Résultats > Avancé > Modes propres



Cas/Mode	Fréquence [Hz]	Période [sec]	Masses Cumulées UX [%]	Masses Cumulées UY [%]	Masses Cumulées UZ [%]	Masse Modale UX [%]	Masse Modale UY [%]	Masse Modale UZ [%]
5/ 1	1,31	0,76	0,00	70,66	0,0	0,00	70,66	
5/ 2	1,34	0,75	70,80	70,66	0,0	70,80	0,00	
5/ 3	1,42	0,70	70,95	70,66	0,0	0,15	0,01	
5/ 4	2,13	0,47	70,95	70,67	0,0	0,00	0,01	
5/ 5	2,19	0,46	70,96	70,67	0,0	0,01	0,00	
5/ 6	2,82	0,35	71,08	70,67	0,0	0,12	0,00	
5/ 7	3,12	0,32	71,08	70,67	0,0	0,00	0,00	
5/ 8	3,12	0,32	71,13	70,67	0,0	0,05	0,00	
5/ 9	3,20	0,31	71,49	70,67	0,0	0,36	0,00	
5/ 10	3,22	0,31	71,49	70,67	0,0	0,00	0,00	
5/ 11	3,28	0,30	71,50	70,67	0,0	0,02	0,00	
5/ 12	3,29	0,30	71,50	70,67	0,0	0,00	0,00	

Figure 3.2: Résultats de l'analyse modale

Comme expliqué au paragraphe précédent, plus de 70% des masses sont excitées dans chaque direction (X et Y). La période fondamentale est de 0,76 seconde. D'après la construire en zone sismique I, la structure est considérée comme rigide. Le mode fondamental excite près de 70% des masses selon la direction X et Y. De ce fait, les deux directions X et Y sont considérée souple.

3.1.3 Ferrailage Des Portiques

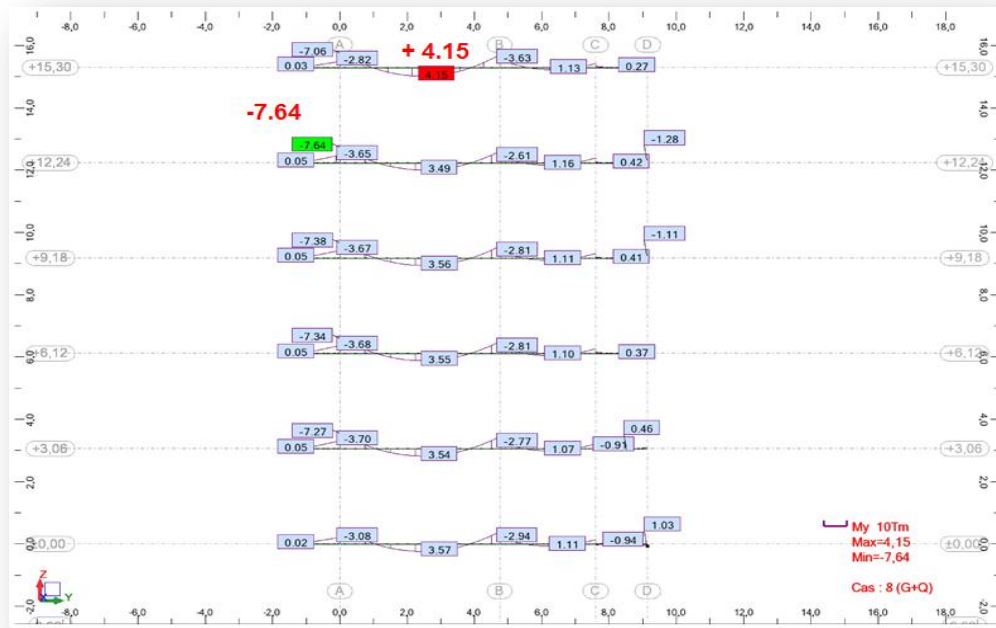
Les combinaisons d'action utilisée pour le calcul sous les charges Verticales et les charges horizontales sont les suivantes :

- $1.35 G + 1.5 Q$ (E.L.U)
- $G + Q$ (E.L.S)
- $G + Q \pm E_x, E_y$ (séisme)
- $0.8 G \pm E_x, E_y$ (séisme)
- $G + Q \pm 1.2 E_x, E_y$ (séisme)

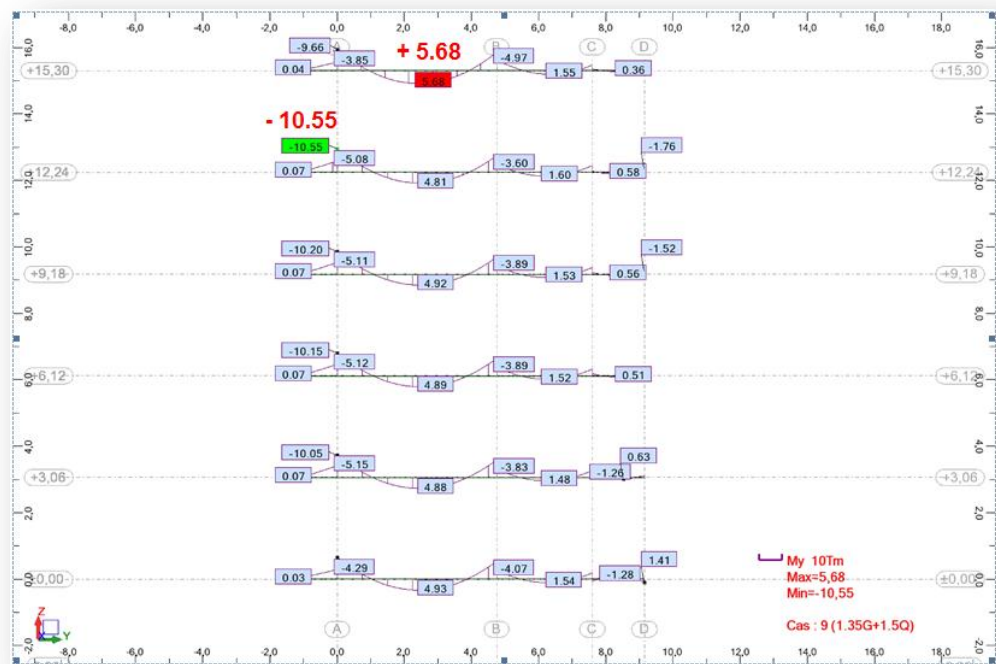
Ferrailage des poutres porteuses : (30 × 40)

D'après les résultats du logiciel ROBOT, on va choisir les poutres qu'ont les valeurs maximales des moments fléchissant.

- Moment Fléchissant dans les poutres principales de portique sous action état limite de service : **$G+Q$**


 Figure 3.3: Moment Fléchissant $G+Q$

- Moment Fléchissant dans les poutres principales de portique sous action état limite de service : **$1.35G+1.5Q$**


 Figure 3.4: Moment Fléchissant $1.35G+1.5Q$

- Calcul des armatures des travées (Calcul de Section en Flexion Simple)

Moment	M (t.m)	$A_{s\text{-réel}}$ (cm ²)	$A_{s\text{-choix}}$ (cm ²)
Service	4.15	4.59	3T14 (fil)
Ultime	5.68	4.59	3T14 (fil)

Tableau 3.1: Ferrailage des poutres principales (travé)

- Exemple note calcul du logiciel ROBOT :

1. Hypothèses:

Béton: $f_{c28} = 20,0$ (MPa)

Acier: $f_e = 400,0$ (MPa)

- Fissuration non préjudiciable

2. Section:

$b = 30,0$ (cm)

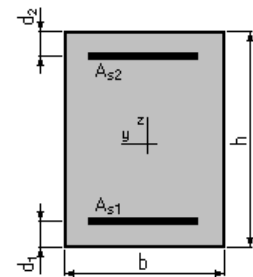
$h = 40,0$ (cm)

$d_1 = 2,5$ (cm)

$d_2 = 2,5$ (cm)

3. Moments appliqués:

	$M_{\max}$ (T*m)
Etat Limite Ultime (fondamental)	5,68
Etat Limite de Service	4,15



4. Résultats:

Sections d'Acier:

Section théorique $A_{s1} = 4,59$ (cm²)

Section théorique $A_{s2} = 0,0$ (cm²)

Analyse par Cas:

Cas ELU $M_{\max} = 5,68$ (T*m) $M_{\min} = 0,00$ (T*m)

Coefficient de sécurité: 1,00 Pivot: A

Position de l'axe neutre: $y = 5,8$ (cm)

Bras de levier: $Z = 35,2$ (cm)

Déformation du béton: $\epsilon_b = 1,84$ (‰)

Déformation de l'acier: $\epsilon_s = 10,00$ (‰)

Contrainte de l'acier:

Tendue: $\sigma_s = 347,8$ (MPa)

Cas ELS $M_{\max} = 4,15 \text{ (T*m)}$ $M_{\min} = 0,00 \text{ (T*m)}$

Coefficient de sécurité: 1,51

Position de l'axe neutre: $y = 11,0 \text{ (cm)}$

Bras de levier: $Z = 33,8 \text{ (cm)}$

Contrainte maxi du béton: $\sigma_b = 7,3 \text{ (MPa)}$

Contrainte limite: $0,6 f_{cj} = 12,0 \text{ (MPa)}$

Contrainte de l'acier:

Tendue: $\sigma_s = 264,1 \text{ (MPa)}$

Contrainte limite de l'acier: $\sigma_{s \text{ lim}} = 400,0 \text{ (MPa)}$

- Moment Fléchissant dans les poutres principales de portique sous action état Accidental: **G+Q+Ey**

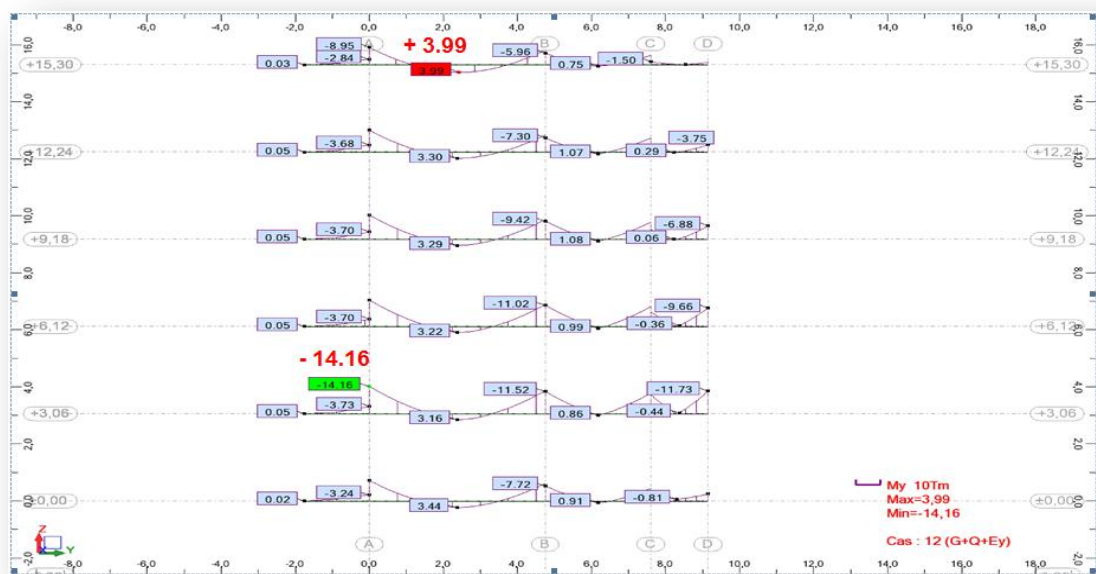


Figure 3.5: Moment Fléchissant G+Q+Ey

- Calcul des armatures des travées (Calcul de Section en Flexion Simple)

G + Q + Ey			
NIVEAU	$M_{aSup} \text{ (t.m)}$	$A_{s-r\acute{e}el} \text{ (cm}^2\text{)}$	$A_{s-choix}$
4 & terr	11.23	9.00	3T12 (fil.) +3T16 (Chap.)
2 & 3	13.67	10.2	3T12 (fil.) +3T16 (Chap.)
1	14.16	10.5	3T14 (fil.) +3T16 (Chap.)

Tableau 3.2: Ferrailage des poutres principales (chapeau sup)

- Exemple note calcul du logiciel ROBOT :

1. Hypothèses:

Béton: $f_{c28} = 20,0$ (MPa)

Acier: $f_e = 400,0$ (MPa)

- Fissuration non préjudiciable

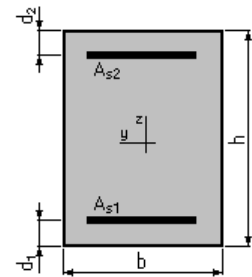
2. Section:

$b = 30,0$ (cm)

$h = 40,0$ (cm)

$d_1 = 2,5$ (cm)

$d_2 = 2,5$ (cm)



3. Moments appliqués:

	M_{max} (T*m)
Etat Limite Ultime (fondamental)	-10,55
Etat Limite de Service	-7,64
Etat Limite Ultime (Accidentel)	-14,16

4. Résultats:

Sections d'Acier:

Section théorique $A_{s1} = 10,6$ (cm²)

Section théorique $A_{s2} = 0,0$ (cm²)

Analyse par Cas:

Cas ELU $M_{max} = -10,55$ (T*m)

Coefficient de sécurité: 0,00 Pivot: A
 Position de l'axe neutre: $y = 0,0$ (cm)
 Bras de levier: $Z = 37,5$ (cm)
 Déformation du béton: $\epsilon_b = 0,00$ (‰)
 Déformation de l'acier: $\epsilon_s = 0,00$ (‰)
 Contrainte de l'acier:

Cas ELS $M_{max} = -7,64$ (T*m)

Coefficient de sécurité: 0,01
 Position de l'axe neutre: $y = 0,6$ (cm)
 Bras de levier: $Z = 37,3$ (cm)
 Contrainte maxi du béton: $\sigma_b = 80,7$ (MPa)
 Contrainte limite: $0,6 f_{cj} = 12,0$ (MPa)
 Contrainte de l'acier:
 Contrainte limite de l'acier:
 $\sigma_{s\lim} = 400,0$ (MPa)

Cas ELA $M_{max} = -14,16$ (T*m)

Coefficient de sécurité: 0,00 Pivot: A
 Position de l'axe neutre: $y = 0,0$ (cm)
 Bras de levier: $Z = 37,5$ (cm)
 Déformation du béton: $\epsilon_b = 0,00$ (‰)
 Déformation de l'acier: $\epsilon_s = 0,00$ (‰)
 Contrainte de l'acier:

- Moment Fléchissant dans les poutres principales de portique sous action état Accidental: **0.8G-Ey**.

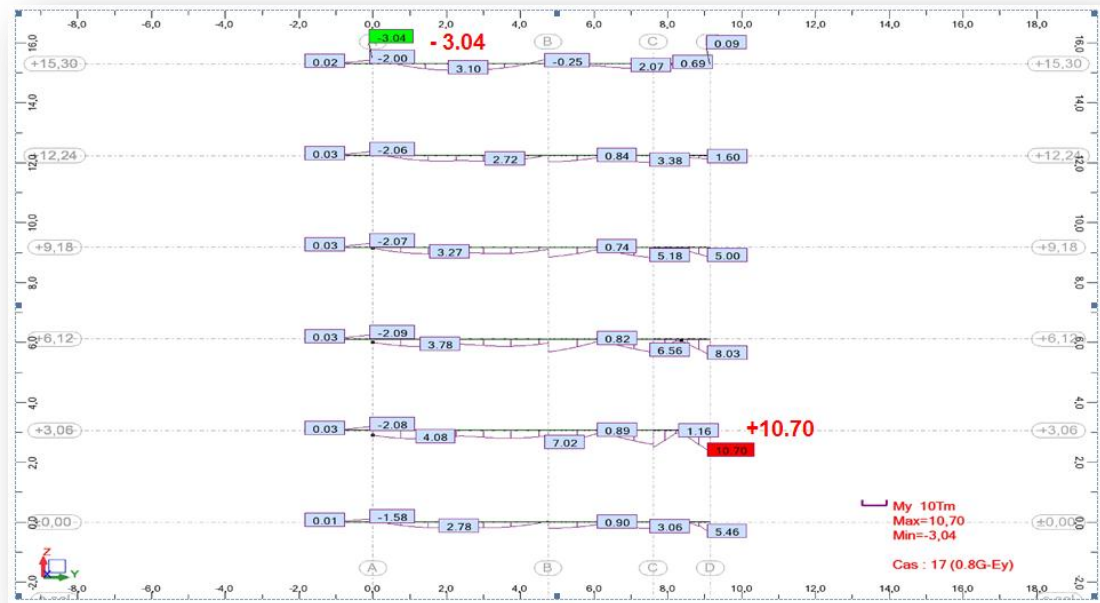


Figure 3.6: Moment Fléchissant 0.8G-Ey

- Calcul des armatures des chapeaux inférieurs des poutres porteuses

0.8G + Ey			
NIVEAU	M_{aInf} (t.m)	$A_{s-r\acute{e}el}$ (cm ²)	$A_{s-choix}$
3,4 & terr	5.69	3.4	3T14 (fil.)
2	10.83	6.6	3T14 (fil.) + 2T12 (Chap.)
1	12.16	7.5	3T14 (fil.) + 2T14 (Chap.)

Tableau 3.3: Ferrailage des poutres principales (chapeau inf)

+ Ferrailage des poutres secondaires : (30 × 40)

Moment Fléchissant dans les poutres secondaires de portique sous actions accidentelles : **G + Q + Ex**

- Calcul des armatures des chapeaux supérieurs des poutres secondaire :

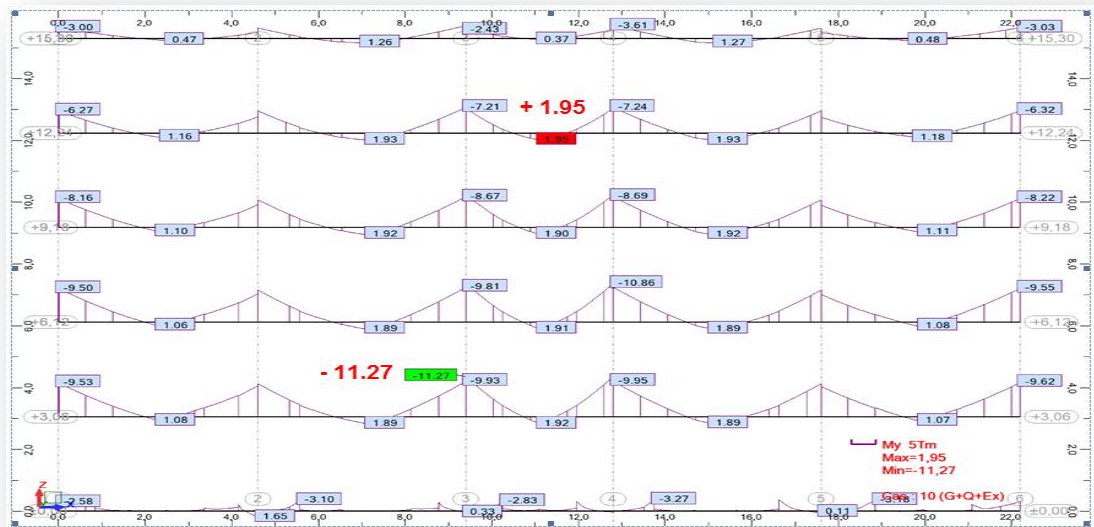


Figure 3.7: Moment Fléchissant G + Q + Ex

G + Q + Ex			
NIVEAU	M _{aSup} (t.m)	A _{s-réel} (cm ²)	A _{s-choix}
4 & terr	8.59	6.1	3T12 (fil.) +2T14 (Chap.)
2 & 3	10.86	7.8	3T12 (fil.) +3T14 (Chap.)
1	11.42	8.3	3T12 (fil.) +3T14 (Chap.)

Tableau 3.4: Ferrailage des poutres secondaires (chapeau)

- Calcul des armatures inférieures des poutres secondaire **0.8G + Ex** :

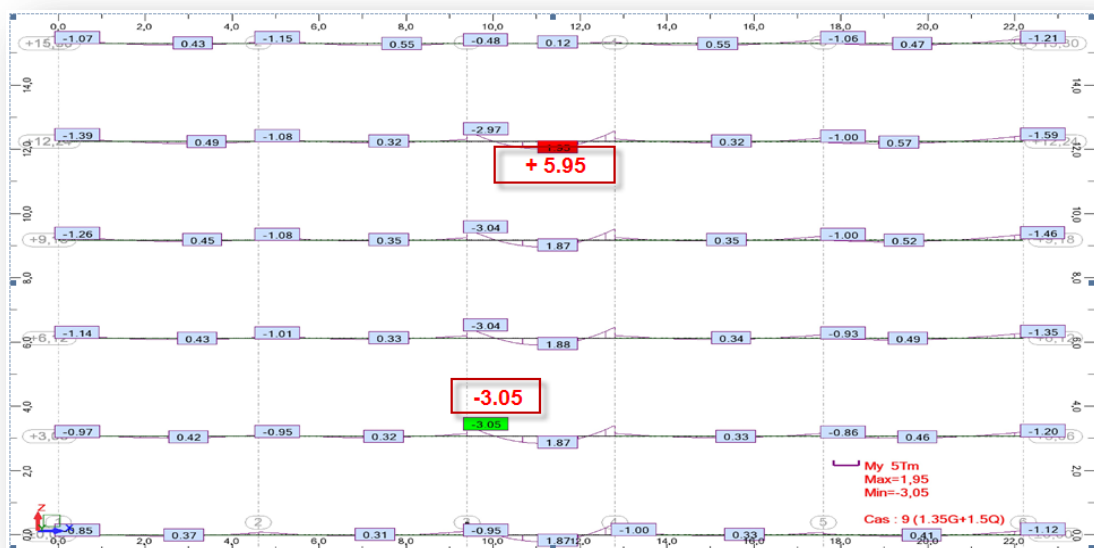


Figure 3.8: Moment Fléchissant 0.8G + Ex

0.8G - Ex			
NIVEAU	M _{alnf} (t.m)	A _{s-réel} (cm ²)	A _{s-choix}
4 & terr	5.95	4.59	3T14 (fil.)
2 & 3	6.03	4.59	3T14 (fil.)
1	6.14	4.59	3T14 (fil.)

Tableau 3.5: Ferrailage des poutres secondaires (travée)

+ Ferrailage des poteaux

- Effort dans les poteaux

Le logiciel robot nous donne le tableau suivant :

Barre	Nom du cas	N [T]	TY [T]	TZ [T]	MY [Tm]	MZ [Tm]
RDC + E-1	1.35G+1.5Q	72,82>>	1,27	-0,39	0,06	1,21
	0.8G-Ex	29,49<<	-0,46	-4,01	2,97	-2,36
	0.8G+Ey	47,68	3,70>>	-0,14	-0,15	7,2
	G+Q-1.2Ey	43,14	-2,77<<	-0,38	0,26	-7,12
	G+Q+1.2Ex	63,79	2,21	4,26>>	-9,57	3,61
	G+Q-1.2Ex	43,08	-0,37	-4,84<<	9,65	-1,86
	G+Q+1.2Ex	63,79	2,21	4,26	-9,57	3,61
	G+Q-1.2Ex	43,08	-0,37	-4,84	9,65	-1,86
	G+Q-1.2Ex	43,08	-0,37	-4,84	9,65>>	-1,86
	G+Q+1.2Ex	63,79	2,21	4,26	-9,57<<	3,61
	0.8G+Ey	47,68	3,7	-0,14	-0,15	7,20>>
	G+Q-1.2Ey	43,14	-2,77	-0,38	0,26	-7,12<<
E-2 + E-3	1.35G+1.5Q	143,30>>	0,97	-0,49	0,57	1,69
	0.8G-Ey	61,12<<	-2,3	-0,21	-0,38	-3,84
	0.8G+Ey	80,05	3,41>>	-0,2	0,24	6,6
	G+Q-1.2Ey	93,65	-2,71<<	-0,36	0,42	-5,56
	G+Q+1.2Ex	107,21	1,22	6,15>>	-11,66	2,28
	G+Q-1.2Ex	101,63	0,21	-6,86<<	12,48	0,21
	0.8G+Ey	80,05	3,41	-0,2	0,24	6,6
	G+Q-1.2Ey	93,65	-2,71	-0,36	0,42	-5,56
	G+Q-1.2Ex	101,63	0,21	-6,86	12,48>>	0,21
	G+Q+1.2Ex	107,21	1,22	6,15	-11,66<<	2,28
	0.8G+Ey	80,05	3,41	-0,2	0,24	6,60>>
	G+Q-1.2Ey	93,65	-2,71	-0,36	0,42	-5,56<<
A-3	1.35G+1.5Q	134,60>>	1,74	-0,13	0,14	2,8
	0.8G-Ey	57,60<<	-1,61	-0,02	-0,02	-4,71
	0.8G+Ey	76,7	3,51>>	-0,01	0,01	6,04
	G+Q-1.2Ey	87,32	-1,79<<	-0,09	0,1	-3,38

Tableau 3.6: Résultats analyses des poteaux

D'après le tableau précédent le ferrailage des poteaux 40X40 sera:

NIVEAU	$A_{s-choix}$
4	8T14
2 & 3	4T16+4T14
R.d.C & 1	8T16

Tableau 3.7: Ferrailage des poteaux

3.1.4 Dimensionnement & ferrailage des semelles

La résistance caractéristique a la compression du béton $f_{c28} = 25$ Mpa.

Poids volumique $\rho = 2.45$ t/m³ et aciers longitudinaux type haute adhérence de 400 Mpa.

- Prédimensionnement et coffrage des semelles : réaction sous semelle filante

1.35G+1.5Q

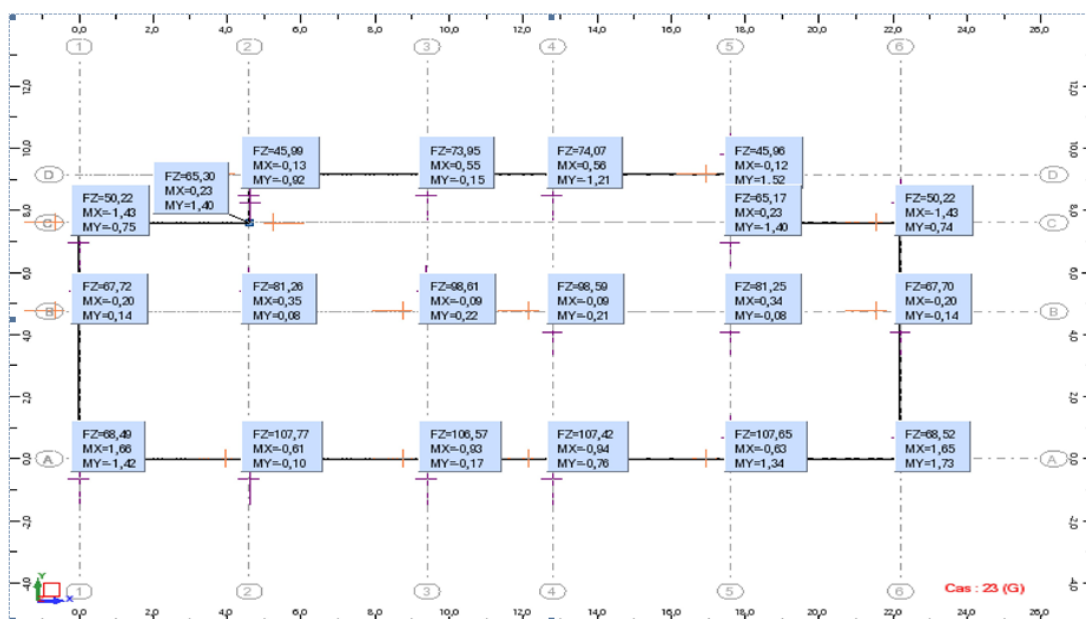


Figure 3.9: Les forces sur les semelles

Après l'analyse des résultats précédents et le dimensionnement des semelles avec le logiciel ROBOT on a remarqué qu'il y a de chevauchement dans les semelles, donc on a décidé d'utiliser le système des semelles filantes croisées (Fig. 3.10).

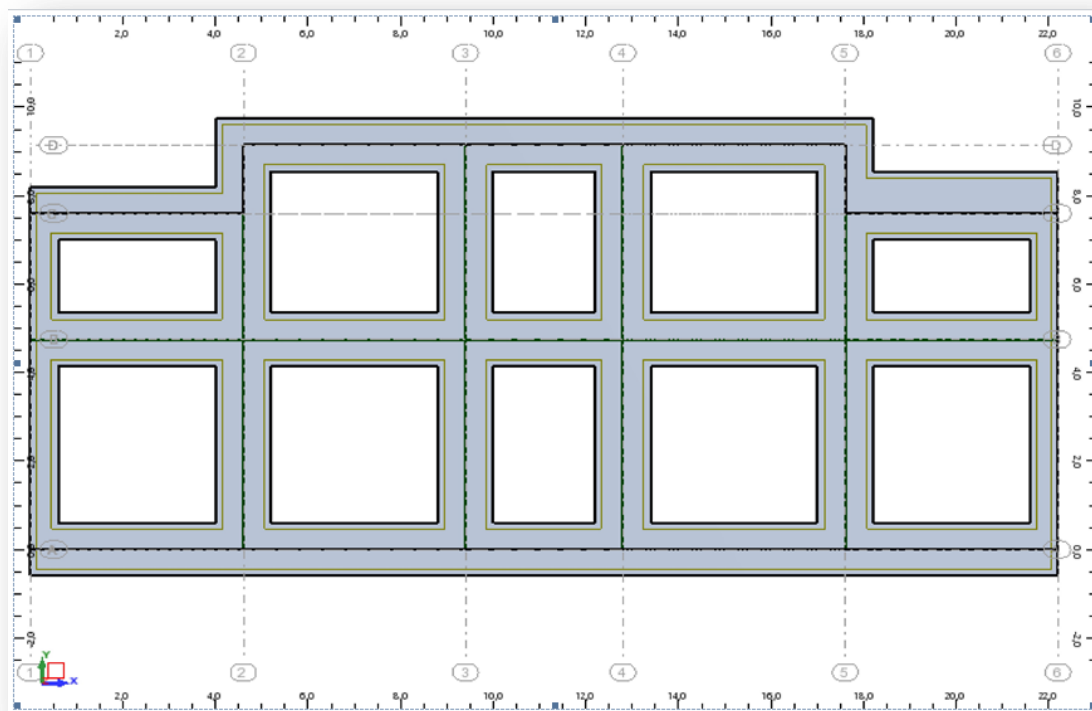


Figure 3.10: Coffrage des semelles

semelles	B(m) largeur	Hauteur de semelles		Hauteur de la Poutre de redressement		ferrailage // B	ferrailage // L	ferrailage poutre de redressement	
								inf	sup
		ht	h	b	h				
S1 sous voile	1.2	0.55	0.4	0.35	0.5	1T14/15cm	1T14/15cm	4T16fil + 4T16 cha	4T14fil
S2	1.4	0.6	0.4	0.35	0.7	1T14/10cm	1T14/15cm	6T16fil + 6t16 cha	6T16fil

Tableau 3.8: Ferrailage des semelles

3.2 Modélisation d'un portique en charpente métallique

3.2.1 Présentation et descriptif de l'application

Cette application présente la définition, l'analyse et le dimensionnement d'un portique en charpente métallique. Il doit nous permettre de comprendre les mécanismes de dimensionnement avec **ROBOT**. Au cours de ce exemple, quelques "astuces" seront exposées afin de faciliter la démarche de l'utilisateur face aux multiples choix offerts par **ROBOT**. [5]

Le projet consiste en la réalisation d'un hangar de stockage en charpente métallique. Il a les caractéristiques géométriques suivantes :

- Largeur nef : 10,00 m
 - Longueur du bâtiment : 50,00 m
 - Largeur entre portique : 5,00 m (constante)
 - Hauteur des poteaux : 5,00 m (versants symétriques)
 - Pente : 6% (soit flèche 0,30 m)
 - Jarret de traverse: 2,00 m.
 - Pieds de poteaux : articulés, pas de baïonnettes
- Section (Prédimensionnement) :
- Poteau : IPE 240
 - Traverse : IPE 220
- Charges :
- Permanentes : Poids propre, toiture multi-couches : 27 daN/m², et bardage de long pan : 10 daN/m²
 - Exploitation : Palan : 800 daN (placé à 2,00 m du poteau de gauche)
 - Neige et vent : altitude de la construction est moins de 200 m et le site est considéré comme normal (type de vent : normal).

3.2.2 Modélisation de la structure

Dans cette partie on va appliquer tous les étapes situés dans le chapitre 02.

🔧 Lignes de construction

Dans la fenêtre de l'assistant affichée par **ROBOT**, sélectionner le quatrième icône du premier rang (**Etude d'un portique plan**) puis lignes de construction (Fig. 3.11).

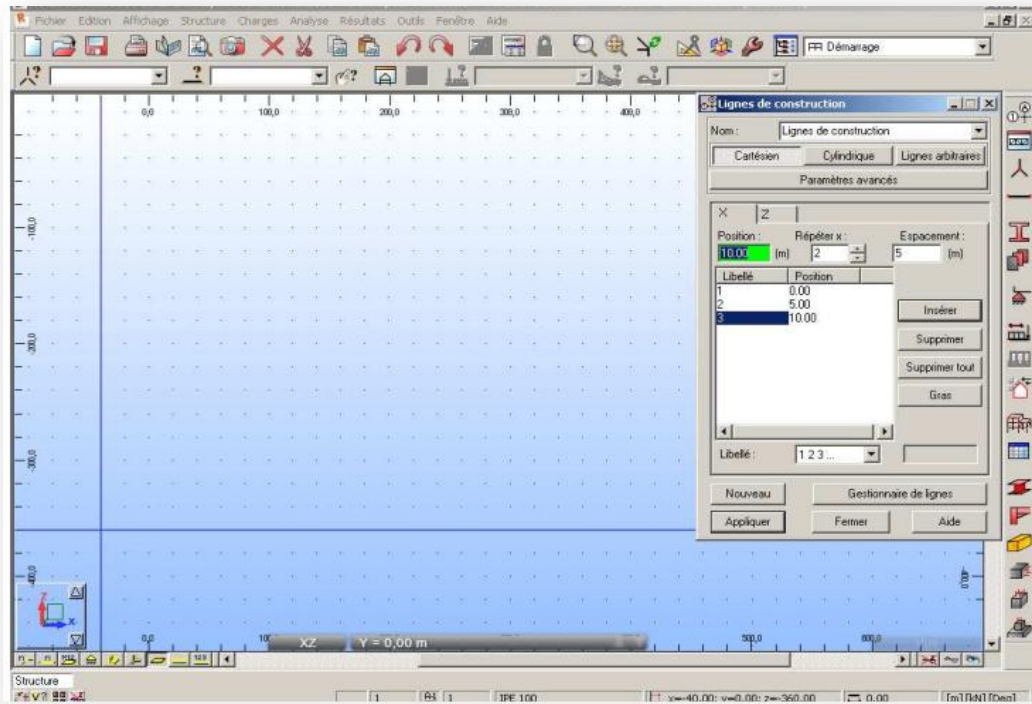


Figure 3.11 – Lignes de construction

Définissez les lignes de construction afin de vous faciliter la mise en place des barres.

- Lignes verticales : onglet **X** : position 0, répétition 2, espacement 5 (**insérer**)
- Lignes horizontales : onglet **Z** : position 0 (**insérer**) ; position 5.0 (**insérer**) ; position 5.3 (**insérer**) ; changer ensuite le libellé en A,B,C (**appliquer**). [5]

🔧 Barres

Dans la fenêtre **Barres**, on va sélectionner la section qui correspond à la barre que nous allons modéliser (poteau : IPE 240, traverse : IPE220). Si le profilé n'est pas

disponible, cliquer sur les 3 points (...) à côté du champ **Section** et ajouter le nouveau profilé. [5]

Définition des barres dans la structure étudiée. Clic dans le champ **Origine** (le champ devient vert), puis définition des barres à l'aide de la souris et des lignes de construction (Fig. 3.12).

- Poteaux: (A1 - B1) et (A3 - B3)
- Arbalétrier : (B1 - C2) et (C2 - B3)

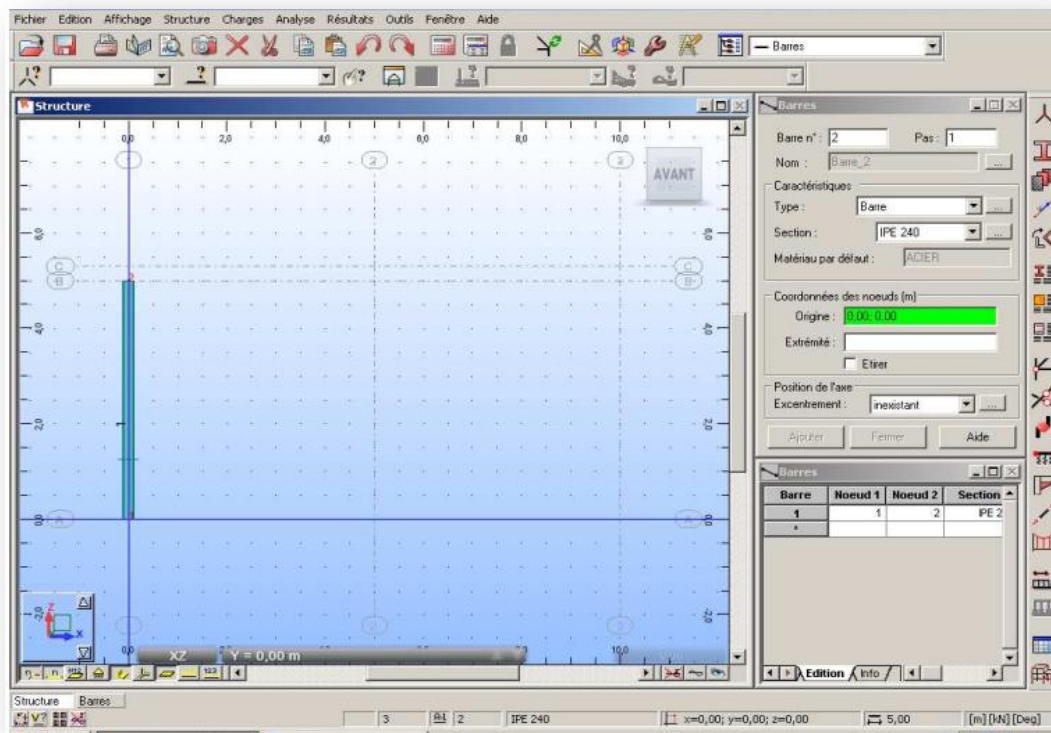


Figure 1.12 – Définition des barres

Jarrets

Définition des jarrets: Clic sur l'icône **jarret**



- 1- Ouverture des propriétés du jarret Jarret_01x1: Double-clic sur l'icône de Jarret_0.1x1
- 2- Définir un jarret de type profilé avec une longueur réelle du jarret de 2 m, et une hauteur de 1H (Attention aux unités).
- 3- Clic sur Ajouter, puis Clic sur les deux arbalétriers dans la zone de position finale des jarrets (Fig. 3.13). [5]

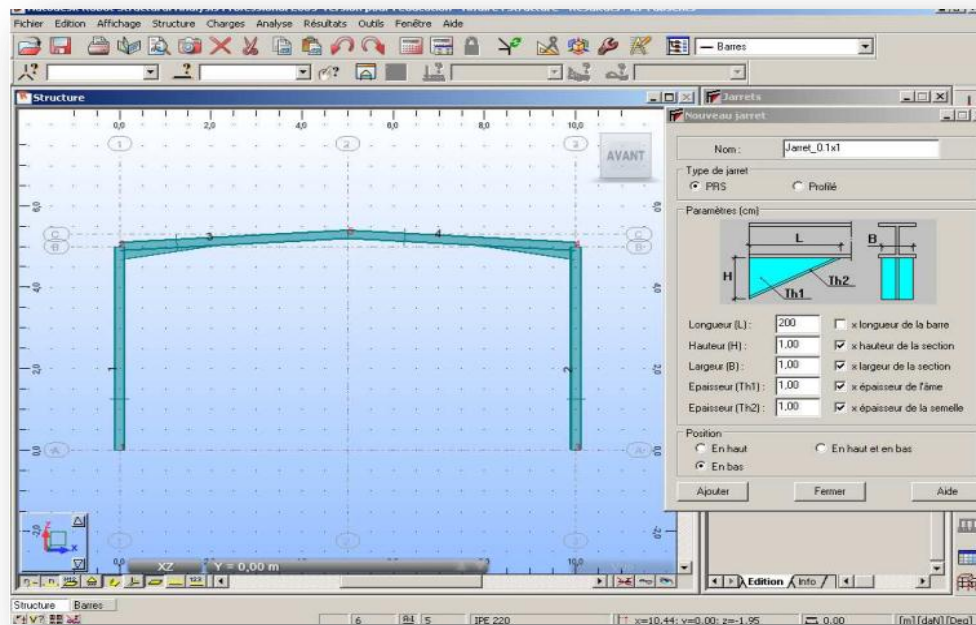


Figure 3.13 – Définition des jarrets

Appuis

Dans la liste des bureaux disponibles, sélectionner le bureau Appuis.

- 1- Dans la fenêtre Appuis, sélectionner Rotule (Fig. 3.14).
- 2- Imposer l'appui en cliquant sur les nœuds concernés (bases des poteaux).

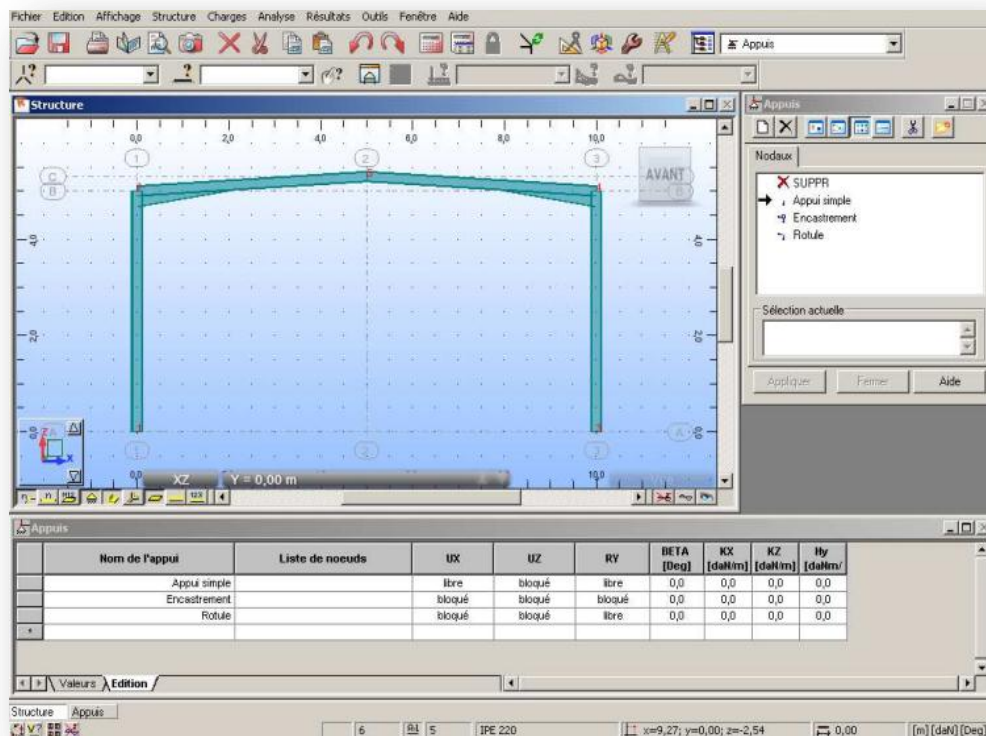


Figure 3.14 – Définition des appuis

Définition des chargements

Dans la liste des bureaux disponibles, sélectionner **Chargements**.

- Définition d'un nouveau cas de charge (nature : permanente, nom standard PERM1).
- Clic sur le bouton **Nouveau** dans la boîte de dialogue **Cas de charge**.

NB : Remarque : Dans la première ligne, le logiciel a appliqué de façon automatique le poids propre à toutes les barres de la structure (en direction Z).

a) Charge permanente due à la toiture multicouche

Clic sur l'icône Définir charges puis sur l'index Barres, puis sur Charges uniformes 

- Paramètres de la charge : Clic dans le champ intersection de la colonne "P" et de la ligne Z et saisir la valeur 135 (daN/m), puis Ajouter.
- Sélectionner les deux barres composant l'arbalétrier.

b) Charge permanente due au bardage de long pan

- Clic sur l'index Barres puis sur Charges uniformes.
- Paramètres de la charge : Clic dans le champ intersection de la colonne "P" et de la ligne Z et saisir la valeur 50 (daN/m), puis Ajouter.
- Sélectionner les deux poteaux. [5]

c) Charge d'exploitation due au palan

- Définition d'un nouveau cas de charge (nature : exploitation, nom standard : EXPL1). Clic sur le bouton Nouveau dans la boîte de dialogue Cas de charge puis sur Définir charges. Clic sur l'index Barres puis sur Force et/ou Moment sur barre.
- Paramètres de la charge : Clic dans le champ intersection de la colonne "F" et de la ligne Z et saisir la valeur 800 (daN). Définir la coordonnée de la charge en absolue (2m), puis Ajouter.
- Sélectionner l'arbalétrier de gauche et Appliquer. [5]

d) Charge de neige et de vent

- Définition des charges de Neige et vent. Clic sur l'icône : 
- Définition des caractéristiques géométriques du bâtiment. Pour définir l'enveloppe, Clic sur Auto, puis cocher « sans acrotère » et renseigner les champs Profondeur et Entraxe (50m et 5m).
- Définition des paramètres globaux. Clic sur Paramètres. Choisir par exemple le Lot et Garonne comme département. Toutes les autres valeurs par défaut restent correctes. Clic sur l'onglet Vent, puis définir le site comme normal.
- Calcul des charges de Neige et Vent : Générer.
Les notes de calcul concernant les paramètres de neige et vent apparaissent afin que vous puissiez contrôler les différents coefficients. Après vérification, vous pouvez refermer ces fichiers. [5]

e) Calcul des pondérations

- Activation du module Pondération : Clic sur l'icône pondération
- Désactivation des pondérations accidentelles. Clic sur la coche située devant
- ACC. Calcul des pondérations : Calculer. [5]

3.2.3 Analyse de la structure

Dans la liste des bureaux disponibles, sélectionner Résultats/Résultats. Le fait de choisir ce bureau provoque le démarrage automatique des calculs.

Pour voir la déformation de la structure :

- Sélection des résultats concernant un cas de charge de vent. Dans le champ relatif au cas de charge, sélectionner Vent GD surpression.
- Visualisation de la déformée de la structure sous le chargement de vent. Dans la fenêtre Diagrammes, Clic sur l'onglet Déformée et activer l'option Déformée, puis Appliquer (Fig. 3.15). [5]

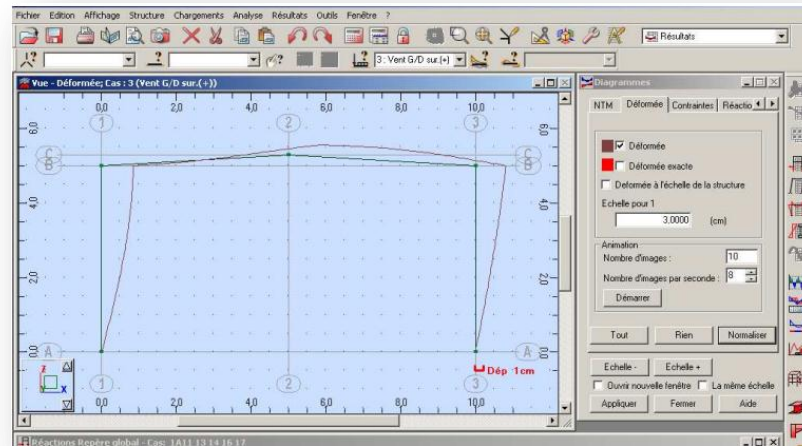


Figure 3.15 – Déformation de la structure

Pour afficher le tableau de résultats (Fig. 3.16).

Modification du tableau de résultats concernant les réactions. Clic BD dans le tableau Réactions (appel du menu contextuel). Ajout du nom du cas de charge. Sélection de l'option Colonnes, une boîte de dialogue s'ouvre alors. Clic dans l'onglet Cas de charge. Puis Clic sur Nom du cas.

Opération de filtrage sur les résultats. Sélection des cas de charge simples. Clic BD dans le tableau Réactions puis Filtre, remplacer Nœud par le mot clé Cas, puis sélectionner un par un tous les cas simples à l'aide d'un clic sur la double flèche.

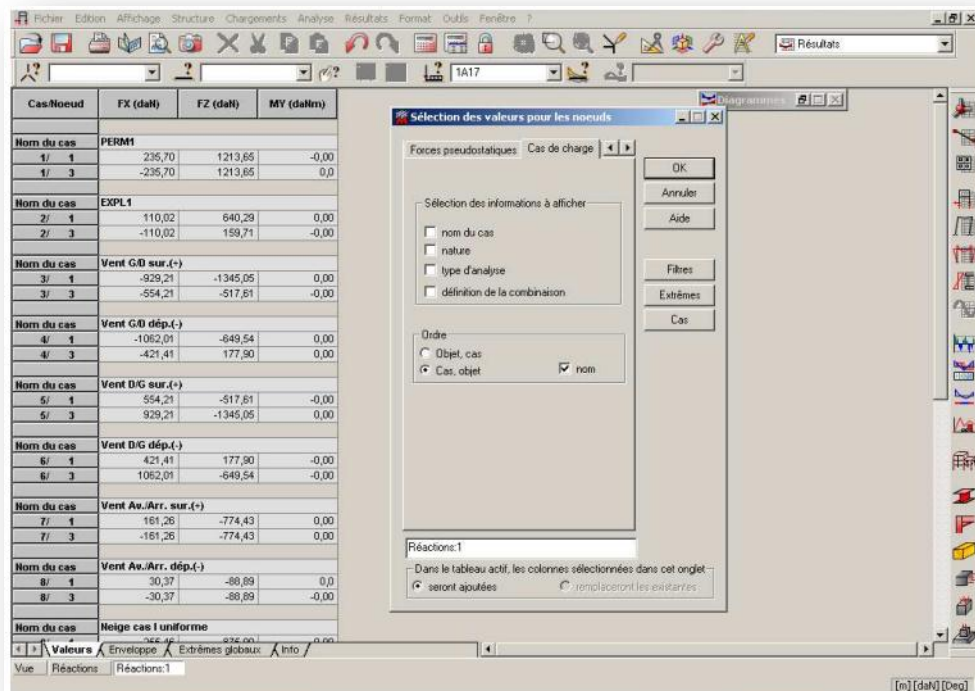


Figure 3.16 – Résultats de l'analyse

Conclusion

Ce projet de fin d'études à nous permis d'avoir une idée concernant la méthode des éléments finis et le logiciel de calcul structural ROBOT et leurs importance sur la résolution des problèmes structurels. La méthode des éléments finis est maintenant bien admise en tant qu'une technique générale plus puissante pour la solution numérique des problèmes de technologie variée.

Quelques structures de génie civil ont été mobilisées avec le logiciel ROBOT qu'il est basé sur la méthode des éléments finis. Après l'analyse modale et le calcul sismique effectués avec le logiciel ROBOT, l'exploitation des résultats à nous permis de vérifier la stabilité de ces structures et il a donné le ferrailage des portiques et des fondations d'une façon simple et efficace. Ainsi il a pu être prouvé qu'il n'existe aucune rupture par capacité portante et que les fondations ne sont pas soumises à un risque de soulèvement. Ces vérifications démontrent que les structures sont stables sous chargement sismique.

D'un point de vue personnel, le PFE a été une étape nécessaire et complémentaire à notre formation master en structure, il a été un véritable tremplin à un futur métier d'ingénieur structures. Cela a été l'occasion de développer nos compétences dans le calcul des structures en zone sismique.

Perspectives

Notre étude a porté sur la méthode des éléments finis et l'utilisation du logiciel ROBOT dans les calculs des structures de génie civil, une étude similaire en considère l'utilisation et la comparaison entre les autres logiciels de calculs disponibles sur le marché come le SAP2000 et l'ETAPS, pourrait faire l'objet d'une recherche future.

Bibliographie

- **Ouvrage :**

- [1] Michel Cazenave, Méthode des éléments finis-Approche pratique en mécanique des structures, Dunod, 2010.
- [2] André Fortin & André Garon, Les éléments finis : de la théorie à la pratique, Département de mathématiques et de statistique Université Laval, 1997.
- [3] R. HASSANI, Mise en œuvre de la méthode des éléments finis, université chambray Annecy de Savoie, 2004-2005.
- [4] Daniel Choi, Méthode des éléments-finis par l'exemple, Université de Caen, 2010.

- **Article :**

- [5] Initiation à ROBOT Structural Analysis, Université Paul Sabier – Toulouse.
- [6] Abdelghani SEGHIR, Cours, Méthode des Éléments Finis, Université Abderrahmane Mira – Bejaia, 2005-2014.

- **Mémoire & thèse :**

- [7] : KACIMI Nacera, Mémoire de magister, Analyse numérique d'une structure auto stable et d'une structure mixte (portique + voile), Université de TIZI-OUZOU, 2013.
- [8] : Antoine-Xavier GANGLOFF, Projet de Fin d'Etudes, Étude parasismique de 3 bâtiments en béton armé à Colmar, Université de INSA de Strasbourg, 2011.
- [9] : Hervé YAMKOUDOUGOU, Projet de Fin d'Etudes, L'Eurocode 8 appliquée à un établissement d'enseignement à Strasbourg (Comparaison des grands principes avec le PS92), Université de INSA de Strasbourg, 2011.

- **Site web :**

- [10] Autodesk, www.docs.autodesk.com/RSAPRO/2014/FRA, consulté le : 01/05/2017