

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique



Mémoire de Master

Présenté à l'Université de Guelma

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département de : Génie Civil & Hydraulique

Spécialité : Génie civil

Option : Structures

Présenté par : - MIHOUBI Bouchra

- HAMICI Roubila

Thème :

**OPTIMISATION DU SYSTEME DE CONTREVENTEMENT
D'UNE STRUCTURE EN BETON ARME PAR LA METHODE
DE TAGUCHI ET LA METHODE RELATIONNELLE GRISE.**

Sous la direction de : Dr. LAFIFI Brahim

Octobre 2020

Remerciement

*On remercie tout d'abord Dieu tout puissant de nous avoir
donné le courage, la force et la patience d'achever
ce modeste travail.*

Nous tenons à remercier notre encadreur

Dr LAJIFI Brahim

*pour ses orientations et ses conseils durant
L'évolution de ce travail.*

On remercie tous nos enseignants durant tout notre cursus,

*Comme on tient à remercier toutes les personnes qui ont
participé,*

de près ou de loin, à la réalisation de ce mémoire.

Enfin, nos remerciements aux membres de jury qui nous

feront l'honneur de juger notre travail.

Dédicace

Avec l'expression de ma reconnaissance, je dédie ce travail à

ceux qui, quels que soient les termes embrassés,

Je n'arriverais jamais à leur exprimer mon amour sincère :

À l'homme, mon précieux offre du dieu, qui doit ma vie, ma

réussite et tout mon respect : mon cher père.

À la femme qui a souffert sans me laisser souffrir, qui n'a

jamais épargné aucun effort pour me rendre heureuse :

Mon adorable mère.

À mes très chers frères et mes sœurs.

Puisse Dieu vous donne santé, bonheur, courage et surtout

réussite.

HAMICI Roubila

Dédicace

Je dédie ce modeste travail à : Mes parents. Aucun hommage ne pourrait être à la hauteur de l'amour dont t'ils ne cessent de me combler. Que dieu leur procure bonne santé et longue vie.

À celui que j'aime beaucoup et qui m'a soutenue tout au long de ce projet :

Ma petite sœur Latifa et bien sur mes frères, sans oublié mon neveu Yanis et ma nièce Mirale.

Mes chers amis.

À la mémoire de mes grands-pères et mes grands-mères.

MIHOUBI Bouchra

Résumé

Ce travail de fin d'études a pour objet l'optimisation du comportement dynamique de structures en béton armé avec contreventement mixte (portique-voile), par l'utilisation de la méthode de Taguchi et l'Analyse Relationnelle Grise (GRA).

Pour atteindre cet objectif, un plan d'expériences numérique de Taguchi, a été adopté comme support de modélisation d'une structure en béton armé par le logiciel RSA 2010, afin d'obtenir le minimum de simulation à réaliser et par conséquent un cout de réalisation des modèles numériques très réduit. Une première série de modélisations selon la table L27 de Taguchi a été achevée, consacré à la détermination du degré d'influence des facteurs d'entrées (épaisseur des voiles (e), position des voiles selon la direction X (Pos/V/X), position des voiles selon la direction Y (Pos/V/Y), nombre de voiles selon la direction X (Nbr/V/X) et nombre de voiles selon la direction Y (Nbr/V/Y)) sur les paramètres de sorties (à savoir la période fondamentale de la structure (T), le déplacement de la structure U_x selon la direction X, le déplacement de la structure U_y selon la direction Y et le poids total des voiles P), à travers l'analyse de variance (ANOVA) et l'effet des moyennes par le biais du logiciel (Minitab V18). Ensuite, une deuxième série d'optimisation par la méthode de Taguchi et l'Analyse Relationnelle Grise a été achevée afin de trouver la configuration optimale des paramètres d'entrées pour avoir un comportement dynamique optimale de la structure.

Mots-clés : Comportement dynamique - Plan d'expériences – Optimisation - Méthode de Taguchi - Analyse Relationnelle Grise - ANOVA.

Abstract

This graduation project aims to optimize the dynamic behaviour of reinforced concrete structures with mixed bracing (frame-shear), using the Taguchi method and Grey Relational Analysis (GRA). To reach this previously-mentioned goal, a numerical design of experiments of Taguchi was adopted as a support for modelling a reinforced concrete structure by the RSA 2010 software in order to obtain the minimum simulation to be carried out and consequently a very lower cost of producing numerical models. A first series of modelling according to the L27 Taguchi table has been achieved, dedicated to the determination of the influence degree of the input factors (thickness of the walls (e), position of the walls according to the direction X (Pos/V/X), walls position in the Y direction (Pos/V/Y), walls number in the X direction (Nbr/V/X), and walls number in the Y direction (Nbr/V/Y)) on the outputs responses (namely the fundamental period of the structure (T), the displacement of the structure U_x within the direction X, the displacement of the structure U_y within the direction Y and the total weight of the walls P), throughout the analysis of variance (ANOVA) and the main effects using the (Minitab V18) software). Furthermore, a second optimization series by the Taguchi method and the Gray Relational Analysis was achieved with the intention to find the optimal configuration of the input parameters, so as to have an optimal structure's dynamic behaviour.

Keywords: Dynamic Behaviour - Design of Experiments - Optimization - Taguchi Method - Grey Relational Analysis - ANOVA.

ملخص

الغرض من نهاية عمل الدراسة هذا هو تحسين السلوك الديناميكي للهياكل الخرسانية المسلحة باستخدام دعامة مختلطة (جدار-بوابة)، باستخدام طريقة تاغوشي وتحليل العلاقات الرمادي (GRA) لتحقيق هذا الهدف تم اعتماد تصميم رقمي للتجارب بواسطة تاغوشي كدعم لنمذجة هيكل خرساني مقوى بواسطة برنامج RSA2010 من أجل الحصول على الحد الأدنى من المحاكات التي يتعين تنفيذها وبالتالي تكلفة انخفاض انتاج النماذج الرقمية.

تم الانتهاء من سلسلة أولى من النماذج وفقا لجدول تاغوشي L27 وهي مخصصة لتحديد درجة تأثير عوامل الإدخال (سمك الجدران (e) وموضع الجدران وفقا للاتجاه X(POS/V/X) وموقع الاشرعة وفقا للاتجاه Y(Pos/V/Y) وعدد الاشرعة في الاتجاه X(Nbr/V/X) وعدد الاشرعة في الاتجاه Y(Nbr/V/Y) على معلومات الإخراج (أي الفترة الأساسية للهيكل (T), إزاحة الهيكل U_x في الاتجاه x، إزاحة الهيكل U_y في الاتجاه y، والوزن الإجمالي للجدران (P) من خلال تحليل التباين (ANOVA) وتأثير الوسائل من خلال البرنامج (Minitab v18)

بعد ذلك، تم الانتهاء من جولة ثانية من التحسين باستخدام طريقة تاغوشي وتحليل العلاقات الرمادية من أجل إيجاد التكوين الأمثل لمعلومات الإدخال للحصول على السلوك الديناميكي الأمثل للهيكل.

الكلمات المفتاحية: السلوك الديناميكي - تصميم التجارب - التحسين - طريقة تاغوشي- تحليل العلاقات الرمادي
ANOVA -(GRA)

Tables des matières.

Tables des matières

Remerciement.....	I
Dédicace.....	II
Résumé.....	IV
Table des matières.....	VII
Liste des figures.....	XIV
Liste des tableaux.....	XVII
Introduction générale.....	1

Chapitre I : Notion de base sur les plans d'expériences.

I.1. introduction	4
I.2. Notions de base	4
I.2.a Notion de « plan »	4
I.2.b Notion d'« expériences ».....	4
I.3. Plans d'expériences.....	5
I.3.1. Définition.....	5
I.3.2. Le but d'un plan d'expérience	5
I.3.3. Définir les sorties (Réponses)	5
I.3.4. Définir les entrées (Facteurs)	6
I.4. Choix de la méthode d'expérimentation.....	6
I.5. Comment l'utiliser ?.....	6
I.6. Notion d'espace expérimental	7
I.7. Notion de surface de réponse.....	10
I.8. Différents types des plans d'expériences.....	11
I.8.1. Plan factoriel complet.....	11
I.8.2. Plans factoriels fractionnaires	12
I.9. Plans pour surfaces de réponses	12
I.10. Avantages des plans factoriels.....	13
I.11. Des plans d'expériences classiques aux plans d'expériences numériques.....	13
I.12. Conclusion	14

Tables des matières.

Chapitre II : Présentation de la méthode de Taguchi et l'Analyse Relationnelle Grise.

II.1. Présentation de la méthode de Taguchi	15
II.1.1. Historique de Taguchi	15
II.1.2. Le but de la méthode de Taguchi	16
II.1.3. Intérêts d'un plan d'expérience Taguchi	17
II.1.4. Définitions	17
II.1.5. Analyse de la méthode de Taguchi.....	17
II.1.6. Méthode de Taguchi	18
II.1.7. Démarche	19
II.1.8. Qu'est-ce qu'un plan de Taguchi (ou plan de Taguchi orthogonal) ?.....	22
II.1.9. Optimisation par la méthode de Taguchi.....	23
a) L'optimum est une valeur minimale.....	23
b) L'optimum est une valeur maximale.....	23
c) L'optimum est une valeur ciblé.....	24
II.2. Analyse relationnelle grise.....	24
II.2.1. La méthode Grey-Taguchi	24
II.2.2. Optimisation par l'Analyse Relationnelle Gris (GRA).....	25
II.2.2.1. Étape 1: La normalisation	26
II.2.2.2. Étape 2: Calcul des coefficients du Relationnel Gris.....	26
II.2.2.3. Etape 3 : Calcul du GRG (Grey Relational Grade)	27
II.2.3. Test de confirmation	27
II.2.4. Analyse de variance ou ANOVA	28
II.2.4.1. Introduction à l'analyse de variance (ANOVA)	28
II.2.4.2. Graphe des effets des facteurs.....	30
II.2.4.3. Moyenne générale.....	30
II.2.4.4. Effet d'un facteur.....	31
II.2.5. Conclusion.....	32

Tables des matières.

Chapitre III : Comportement dynamique des structures.

III.1. Introduction.....	33
III.2. Définition de contreventement.....	33
III.3. Choix du Type d'Analyse.....	35
III.4. Choix du contreventement	36
III.5. Avantages d'utilisation des voiles	37
III.6. Règles de contreventement.....	38
III.6.1. Principes de bases	38
III.6.2. Analogie.....	38
III.7. Les sollicitations des charges sur les voiles.....	39
III.7.1. Les charges verticales	39
III.7.2. Les charges horizontales.....	40
III.8. La Disposition des voiles de contreventement	41
III.8.1. Le contreventement vertical	41
III.8.2. Le contreventement horizontal.....	41
III.9. Classification des structures avec voiles	41
III.9.1. Structure «Mixtes» avec des murs porteurs associés à des portiques.....	42
III.9.2. Structures à noyau central	42
III.9.3. Structures uniquement à mur porteur.....	43
III.10. Définition simplifiée.....	43
III.10.1. Mode propre de vibration	43
III.10.2. Phénomène périodique	43
III.10.3. La période d'un phénomène périodique.....	43
III.10.4. La fréquence d'un phénomène périodique.....	44
III.10.5. La fréquence	44
III.11. Conclusion	44

Tables des matières.

Chapitre IV : Présentation de la structure étudiée et modélisation.

IV.1. Introduction.....	45
IV.2. Conception de la structure du bâtiment	45
IV.2.1. Structure de contreventement	45
IV.2.2. Le Plancher.....	46
IV.2.3. Maçonnerie	46
IV.2.4. Revêtement	47
IV.2.5. Escaliers	47
IV.2.6. Les façades	47
IV.3. Hypothèse de calcul	47
IV.4. Règles de calcul.....	47
✚ Les règles parasismiques algériennes (R.P.A.99)	47
✚ Les règles du béton armé aux états limites (B.A.E.L)	48
IV.4.1. Etats limites ultimes(ELU)	48
✚ Hypothèses de calcul pour l'état limite ultime.....	48
IV.4.2. Etats limites de service (ELS)	49
✚ Hypothèses de calcul pour l'état limite de service.....	49
IV.4.3. Actions et sollicitations.....	49
IV.5. Pré dimensionnement des éléments et descente des charges	50
IV.5.1. Pré dimensionnement des planchers	50
IV.5.1.1. Dalle à corps creux.....	50
✚ Résistance au feu	50
✚ Condition de flèche.....	50
✚ Isolation phonique	51
IV.5.2. Pré dimensionnement des voiles.....	52

Tables des matières.

IV.5.3 Pré dimensionnement des escaliers	53
-Caractéristiques technique.....	53
➤ Pour étage courant et RDC.....	53
IV.5.4. Pré dimensionnement des poutres.....	54
IV.5.4.1. Poutres principales (porteuses)	55
IV.5.4.2. Poutres secondaires (non porteuses)	55
IV.5.5. Pré dimensionnement des poteaux.....	56
IV.5.6. Evaluation des charges.....	57
IV.5.6.1. Les planchers.....	57
✚ Planchers étages courant+RDC.....	58
IV.5.6.2. L'acrotère.....	59
IV.5.6.3. Mur extérieur	59
IV.5.6.4. L'escalier.....	60
✚ Palier.....	60
✚ Volée paillasse.....	60
IV.6. Présentation de logiciel "ROBOT2010".....	60
IV.6.1. Modélisation.....	62
IV.6.2. Modélisation de la structure	62
a. Modélisation des éléments structuraux	62
b. Modélisation de la masse	63
IV.7 Les données géométriques de la structure	63
-Coordonnées du centre de gravité de la structure.....	64
IV.8. Modes propres de vibration de la structure sans voile.....	64
IV.9. Conclusion.....	68

Tables des matières.

Chapitre v : Etude de l'influence des paramètres de modélisation.

V.1. Introduction	69
V.2. Plan d'expériences.....	69
V.3. Résultats de la modélisation.....	72
V.3.1. Résultats pour la période fondamentale de la structure T.....	74
a) Analyse de la variance ANOVA.....	74
b) Analyse des effets principaux sur la période T.....	74
V.3.2. Résultats pour le déplacement Ux selon la direction X.....	75
a) Analyse de la variance ANOVA.....	75
b) Analyse des effets principaux sur le déplacement Ux.....	76
V.3.3. Résultats pour le déplacement Uy selon la direction Y.....	76
a) Analyse de la variance ANOVA.....	76
b) Analyse des effets principaux sur le déplacement Uy.....	77
V.3.4. Résultats pour le poids total des voiles.....	78
a) Analyse de la variance ANOVA.....	78
b) Analyse des effets principaux sur le poids total des voiles.....	79
V.4. Conclusions.....	80

Chapitre VI : Optimisation par la méthode de Taguchi et la méthode Relationnelle Grise.

VI.1. Introduction	81
VI.2. Optimisation par la méthode de Taguchi.....	81
VI.3. Analyse des effets moyens des niveaux des facteurs.....	83
VI.3.1. Analyse des effets moyens pour la période fondamentale T.....	84
VI.3.2. Analyse des effets moyens pour le déplacement Ux selon la direction X.....	85
VI.3.3. Analyse des effets moyens pour le déplacement Uy selon la direction Y.....	86

Tables des matières.

VI.3.4. Analyse des effets moyens pour le poids total des voiles P.....	88
VI.4. Optimisation par L'Analyse Relationnelle Grise (Grey Relational Analysis: GRA).....	90
VI.4.1. Etape 1 : La normalisation	90
VI.4.2. Etape 2 : Calcul des coefficients du Relationnel Gris.....	90
VI.4.3. Etape 3 : Calcul du GRG (Grey Relational Grade)	91
VI.4.4. Prédiction de la combinaison optimale	92
VI.5. Conclusion.....	95
Conclusion générale et perspective	96
Références bibliographiques	98

Liste des figures.

Chapitre I : Notions de base sur les plans d'expériences.

Figure I.1: Le niveau bas du facteur est noté par - 1 et le niveau haut par +1.....	7
Figure I.2 : Chaque facteur est représenté par un axe gradué et orienté. Les axes des facteurs sont orthogonaux entre eux. L'espace ainsi défini est l'espace expérimental.....	8
Figure I.3: Dans l'espace expérimental, les niveaux des facteurs définissent des points expérimentaux.....	9
Figure I.4: Les points expérimentaux sont disposés dans le domaine d'étude défini par l'expérimentateur	9
Figure I.5 : la surface de réponses.....	10

Chapitre II : Présentation de la méthode de Taguchi et l'Analyse Relationnelle Grise

Figure II.1: Genichi Taguchi.....	16
Figure II.2 : Exemple de graphe des effets des facteurs.....	31

Chapitre III : Comportement dynamique des structures.

Figure III. 1 : Constructions contreventées par voiles en béton armé.....	35
Figure III. 2 : Ferrailage de Voile en béton armé.....	37
Figure III. 3 : Un bâtiment avec des voiles en béton armé.....	38
Figure III. 4 : Structures « mixte » avec des murs porteurs associés à des portiques.....	42
Figure III. 5 : Structures à noyau central.....	42
Figure III. 6 : Structures uniquement à murs porteurs.....	43

Liste des figures.

Chapitre IV : Présentation de la structure étudiée et modélisation.

Figure IV.1 : Détail mur extérieur.....	46
Figure IV.2 : Dalle à corps creux.....	51
Figure IV.3: Schéma d'escalier.....	53
Figure IV.4: Vue en plan.....	53
Figure IV.5: Dimensions des poutres principales.....	55
Figure IV.6: Dimensions des poutres secondaires.....	56
Figure IV.7 : Coupe plancher terrasse.....	58
Figure IV.8 : Coupe plancher étage courant.....	58
Figure IV.9 : Schéma de l'acrotère.....	59
Figure IV.10 : Les différents types de structures.....	61
Figure IV.11: Model de la structure.....	63
Figure IV.12 : Mode 1 « Translation sens y » avec $T = 0.72$ sec.....	65
Figure IV.13 : Mode 2 « Rotation sens Z » $T = 0.68$ sec.....	66
Figure IV.14 : Mode 3 « Translation sens x » avec $T = 0.82$ sec.....	66

Chapitre v : Etude de l'influence des paramètres de modélisation.

Figure V.1 : Position de voiles selon la direction X (cas de 2 voiles)	70
Figure V.2 : Position de voiles selon la direction X (cas de 4 voiles)	70
Figure V.3 : Position de voiles selon la direction X (cas de 6 voiles)	70
Figure V.4 : Position de voiles selon la direction Y (cas de 2 voiles)	71
Figure V.5 : Position de voiles selon la direction Y (cas de 4 voiles)	71
Figure V.6 : Position de voiles selon la direction Y (cas de 6 voiles)	71
Figure V.7 : Graphe des effets principaux sur la période fondamentale T	75
Figure V.8 : Graphe des effets principaux sur le déplacement U_x	76
Figure V.9 : Graphe des effets principaux sur le déplacement U_y	78
Figure V.10 : Graphe des effets principaux sur le poids total des voiles.....	79

Liste des figures.

Chapitre VI : Optimisation par la méthode de Taguchi et la méthode Relationnelle Grise.

Figure VI.1 Graphique des effets principaux sur le ratio S/N de T.....	85
Figure VI.2 Graphique des effets principaux sur le ratio S/N de U_x	86
Figure VI.3 Graphique des effets principaux sur le ratio S/N de U_y	87
Figure VI.4 Graphique des effets principaux sur le ratio S/N de P.....	89
Figure VI.5 Graphique des effets principaux sur le ratio S/N (Grey) de T, U_x , U_y et P.....	94

Liste des tableaux.

Chapitre I : Notions de base sur les plans d'expériences.

Tableau I.3 : Plan factoriel complet 2^2 pour deux facteurs (A, B) à deux niveaux.....	11
---	----

Chapitre IV : Présentation de la structure étudiée et modélisation.

Tableau IV.1 : Evaluation des charges permanentes du plancher terrasse.....	57
Tableau IV.2 : Evaluation des charges permanentes du plancher courant.....	58
Tableau IV.3 : Evaluation des charges permanentes de mur extérieur.....	59
Tableau IV.4 : Evaluation des charges permanentes de palier.....	60
Tableau IV.5 : Evaluation des charges permanentes de volée.....	60
Tableau IV.6 : Période et facture de participation massique du modèle de la référence.....	65
Tableau IV.7 : Cas de charges appliquées.....	67
Tableau IV.8 : Les différentes combinaisons.....	68

Chapitre v : Etude de l'influence des paramètres de modélisation.

Tableau V.1 : Paramètres d'entrée et de sortie pour le processus d'optimisation.....	69
Tableau V.2 : Table de Taguchi L27.....	72
Tableau V.3 : Résultats de la modélisation selon la table de Taguchi L27.....	73
Tableau V.4 : Analyse de la variance (ANOVA) pour la période fondamentale T.....	74
Tableau V.5 : Analyse de la variance (ANOVA) pour le déplacement U_x	75
Tableau V.6 : Analyse de la variance (ANOVA) pour le déplacement U_y	77
Tableau V.7 : Analyse de la variance (ANOVA) pour le déplacement U_y	79

Liste des tableaux.

Chapitre VI : Optimisation par la méthode de Taguchi et la méthode Relationnelle Grise.

Tableau VI.1 : Les ratios S/N de (T, U _x , U _y et P).....	83
Tableau VI.2 : Moyenne des ratios S/N (T) pour chaque niveau des facteurs.....	84
Tableau VI.3 : Moyenne des ratios S/N (U _x) pour chaque niveau des facteurs.....	85
Tableau VI.4 : Moyenne des ratios S/N (U _y) pour chaque niveau des facteurs.....	87
Tableau VI.5 : Moyenne des ratios S/N (P) pour chaque niveau des facteurs.....	88
Tableau VI.6 : Moyenne des ratios S/N (P) pour chaque niveau des facteurs.....	89
Tableau VI.7 : Valeurs normalisé.....	92
Tableau VI.8 : Coefficients GRC et GRG (Grey Relational Coefficients, Grey Relational Grad).....	93
Tableau VI.9 : Effets principaux de la qualité grise de T, U _x , U _y et P.....	94

Introduction

La plupart des ingénieurs et techniciens améliorent leurs produits ou leurs processus de production à partir des expériences. Malheureusement, les stratégies couramment utilisées pour mener ces expériences sont souvent coûteuses et peu performantes et elles conduisent à de nombreuses expériences difficiles exploitables. Pour toutes ces raisons, de nombreux ingénieurs et techniciens font appel à la planification des expériences.

Avec les plans d'expériences on obtient le maximum de renseignements avec le minimum d'expériences et par suite le temps et le coût de réalisation des essais. Il existe de nombreux plans d'expériences adaptés à tous les cas rencontrés par un expérimentateur.

Dans ce travail, nous utilisons une approche statistique pratique et informatisée dite « plans d'expériences numériques » pour rechercher la configuration dynamique optimale d'une structure en béton armé avec contreventement mixte (portiques-voiles). Nous adoptons dans cette étude un plan d'expérience de Taguchi comme technique d'optimisation pour déterminer les niveaux des facteurs d'entrée adoptés dans cette étude à savoir, l'épaisseur des voiles (e), le nombre de voiles et la position des voiles dans chaque direction de contreventement, à travers l'étude du comportement dynamique de la structure en tenant en compte les paramètres de sorties suivant (la période fondamentale de la structure (T), le déplacement de la structure selon la direction X noté U_x , le déplacement de la structure selon la direction Y noté U_y et le facteur économique représenté par le poids total des voiles de contreventement.

Le mémoire s'articule sur les chapitres suivants :

Le premier chapitre de ce mémoire présente une synthèse sur la notion de plans d'expériences, cette technique est un ensemble homogène d'outils et de méthodes visant à établir et analyser les relations existantes entre les grandeurs étudiées (réponses) et leurs sources de variations supposées (facteurs). Dans tous les cas, elle a pour objectif la détermination de modèles mathématiques approchés des réponses exprimées en fonction des facteurs. Les multiples facettes de la méthode des plans

d'expériences servent alors de fondement au développement de stratégies d'optimisation.

Dans le deuxième chapitre, nous avons présenté une description méthodique de recherche qui est basée sur la définition de la méthode de Taguchi, l'analyse de variance ANOVA et l'Analyse Relationnelle Grise (GRA).

Le troisième chapitre présente l'utilisation de système de contreventement pour assurer la stabilité globale d'un bâtiment. Un contreventement peut être réalisé par des voiles (contreventements verticaux) ou des plaques (contreventements horizontaux) en béton armé. L'utilisation des voiles diminue l'influence des éléments non-porteurs sur le comportement de la structure, aussi augmente la rigidité de l'ouvrage.

Le quatrième chapitre sera divisé en trois parties successivement : La première sera composée d'une description de l'ouvrage avec le prédimensionnement des éléments structuraux. La deuxième partie consistera sur la présentation de logiciel de calcul et d'optimisation des structures «Robot 2010». La troisième partie porte sur la modélisation des éléments structuraux, modélisation de la masse et présentation des modes propres de vibration sans voiles de contreventement.

Le cinquième chapitre présente les résultats obtenus de la modélisation selon la table L27 de Taguchi, ainsi que l'étude de l'influence des facteurs d'entrées (l'épaisseur des voiles (e), le nombre des voiles et la position des voiles dans chaque direction de contreventement) sur les paramètres de sorties (la période fondamentale de la structure (T), le déplacement de la structure selon la direction X noté U_x , le déplacement de la structure selon la direction Y noté U_y et le facteur économique représenté par le poids total des voiles de contreventement) en utilisant une analyse de variance ANOVA et l'effet des moyennes par le biais de logiciel «Minitab 18».

Dans le sixième chapitre, nous avons présenté une étude d'optimisation du comportement dynamique de la structure par la méthode de Taguchi et par l'Analyse Relationnelle Grise (Grey Relational Analysis: GRA). L'objectif de ce chapitre est de trouver la configuration optimale des paramètres d'entrée pour avoir un comportement

dynamique de la structure, en tenant en compte les paramètres dynamiques adoptés dans cette étude.

Ce thème termine par une conclusion générale qui expose une synthèse des résultats obtenus durant ce travail de recherche ainsi que les perspectives suivi d'une liste des références bibliographiques.

Chapitre I

Notions de base sur les plans d'expériences.

I.1. introduction

Le plan d'expériences est une technique statistique introduite par Ronald Fisher en Angleterre au début des années 1920 dans le cadre de recherches agronomiques pour étudier l'effet des variables comme la quantité de pluie, d'eau, de rayons solaires, etc. nécessaires pour produire de bonnes récoltes.

D'après Cesarone (2001), les plans d'expériences peuvent être considérés comme des techniques d'optimisation des processus qui possèdent des entrées contrôlables et des sorties mesurables. Ces plans sont utilisés aussi bien dans les scénarios de production que de conception [1].

La compréhension de la méthode des plans d'expériences s'appuie sur deux notions essentielles, celle d'espace expérimental et celle de modélisation mathématique des grandeurs étudiées [2].

I.2. Notions de base

L'expression « plan d'expériences » contient deux notions :

- La notion de « plan »,
- La notion d'« expériences ».

I.2.a. Notion de « plan » Ce terme renvoie aux mots planification, organisation et exploitation :

- Planification : action de diriger suivant un plan déterminé ;
- Organisation : action de préparer en vue d'un but précis ;
- Exploitation : action de tirer profit d'une chose (ici des expériences).

I.2.b. Notion d'« expériences »

Modification volontaire des paramètres d'un système pour en observer ou en mesurer les effets [3].

I.3. Plans d'expériences

I.3.1. Définition :

Les plans d'expériences permettent d'organiser au mieux les essais qui accompagnent une recherche scientifique ou des études industrielles. Ils sont applicables à de nombreuses disciplines et à toutes les industries à partir du moment où l'on recherche le lien qui existe entre une grandeur d'intérêt (réponse) et des variables (facteur).

Avec les plans d'expériences on obtient le maximum de renseignements avec le minimum d'expériences. Pour cela, il faut suivre des règles mathématiques et adopter une démarche rigoureuse. Il existe de nombreux plans d'expériences adaptés à tous les cas rencontrés par un expérimentateur. Nous aborderons le cas du plan de Taguchi uniquement [4].

I.3.2. Le but d'un plan d'expérience

Dans le but d'optimiser le nombre des essais, et par suite le temps et le coût de réalisation des essais, nous avons utilisé une approche statistique pratique et informatisée dite « plans d'expériences ». L'utilisation de cet outil demande une connaissance préalable de son principe et de son mode de fonctionnement. Pour cela et avant d'entamer la procédure expérimentale [5]. Un plan d'expériences permet de connaître le comportement d'un système, c'est-à-dire de :

- Connaître les facteurs qui ont le plus grand impact sur les résultats (sur la conformité d'un produit) [3].

I.3.3. Définir les sorties (Réponses)

La réponse Y (variable de sortie) correspond à un paramètre de sortie du système étudié. Une réponse doit être représentative, quantifiable et la moins dispersée possible pour des variables d'entrées maîtrisées et constantes. Pour appliquer la méthodologie des plans d'expériences, il est conseillé d'avoir une réponse exprimée sous forme quantitative. En effet, les méthodes d'analyses des résultats d'essais telles que l'analyse de variance ou l'analyse de régression au sens des moindres carrés, s'appuient sur des données exclusivement quantitatives. Par ailleurs, les réponses qualitatives comme par exemple la

morphologie d'un dépôt (lisse, poreux...etc.) qui n'est pas un critère quantitatif, pourront s'interpréter à partir d'un codage spécifique des modalités des réponses [6].

I.3.4. Définir les entrées (Facteurs)

Un paramètre d'entrée d'un système (variable d'entrée) est appelé facteur X. Ce facteur est une cause possible de variation de la réponse Y. Le choix d'un facteur se fait souvent en plusieurs phases : une phase de recensement faisant appel à la créativité du groupe, une phase de classement et une phase de sélection où les modalités des facteurs devant être étudiés de façon prioritaire seront définies [6].

I.4. Choix de la méthode d'expérimentation

La méthode d'expérimentation choisie doit faciliter l'interprétation des résultats. Elle doit également minimiser le nombre des essais sans toutefois sacrifier la qualité. La théorie des plans d'expériences assure les conditions pour lesquelles on obtient la meilleure précision possible avec le minimum d'essais. On a donc le maximum d'efficacité avec le minimum d'expériences et par conséquent le coût minimum [7].

I.5. Comment l'utiliser ?

Étapes :

- Identifier la façon dont la qualité du " produit " à mettre au point peut se mesurer ;
- Choisir l'indicateur le plus pertinent pour analyser la réponse pendant l'expérimentation ;
- Identifier les différents paramètres qui influencent le résultat. Ils s'appellent couramment les facteurs ;
- Définir le nombre de valeurs à étudier pour chaque facteur ;
- En déduire le type de plans à réaliser (il dépend du nombre de facteurs, du nombre de valeurs) ;
- Effectuer les essais en respectant les variations de facteurs et de niveaux mentionnées dans le plan ;

- Analyser et interpréter les résultats (l'analyse de variance et le calcul de régression linéaire sont réalisables avec des logiciels spécifiques) ;
- Modéliser la réponse en fonction de tous les paramètres ;
- Valider la modélisation par des expériences aléatoires de vérification ;
- Ajuster les facteurs pour optimiser la réponse en fonction de la modélisation retenue [8].

I.6. Notion d'espace expérimental

Un expérimentateur qui lance une étude s'intéresse à une grandeur qu'il mesure à chaque essai. Cette grandeur s'appelle la **réponse**, c'est la grandeur d'intérêt. La valeur de cette grandeur dépend de plusieurs variables. Au lieu du terme «variable» on utilisera le mot **facteur**. La réponse dépend donc de un ou de plusieurs facteurs. Le premier facteur peut être représenté par un axe gradué et orienté (Figure I.1). La valeur donnée à un facteur pour réaliser un essai est appelée **niveau**. Lorsqu'on étudie l'influence d'un facteur, en général, on limite ses variations entre deux bornes. La borne inférieure est le niveau bas, la borne supérieure est le niveau haut [2].

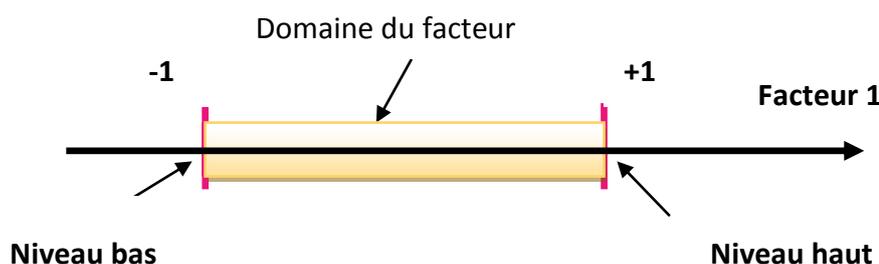


Figure I.1 : Le niveau bas du facteur est noté par - 1 et le niveau haut par +1.

Le domaine de variation du facteur est constitué de toutes les valeurs comprises entre le niveau bas et le niveau haut.

L'ensemble de toutes les valeurs que peut prendre le facteur entre le niveau bas et le niveau haut, s'appelle le domaine de variation du facteur ou plus simplement le **domaine** du facteur. On a l'habitude de noter le niveau bas par -1 et le niveau haut par $+1$.

S'il y a un second facteur, il est représenté, lui aussi, par un axe gradué et orienté. On définit comme pour le premier facteur, son niveau haut, son niveau bas et son domaine de variation. Ce second axe est disposé orthogonalement au premier. On obtient ainsi un repère cartésien qui définit un espace euclidien à deux dimensions. Cet espace est appelé **l'espace expérimental** (Figure I.2).



Figure I.2 : Chaque facteur est représenté par un axe gradué et orienté. Les axes des facteurs sont orthogonaux entre eux. L'espace ainsi défini est l'espace expérimental.

Le niveau x_1 du facteur 1 et le niveau x_2 du facteur 2 peuvent être considérés comme les coordonnées d'un point de l'espace expérimental (Figure I.3). Une expérience donnée est alors représentée par un point dans ce système d'axes. Un plan d'expériences est représenté par un ensemble de points expérimentaux.

Le regroupement des domaines des facteurs définit le «**domaine d'étude**». Ce domaine d'étude est la zone de l'espace expérimental choisie par l'expérimentateur pour faire ses essais. Une étude, c'est-à-dire plusieurs expériences bien définies, est représentée par des points répartis dans le domaine d'étude (Figure I.4).

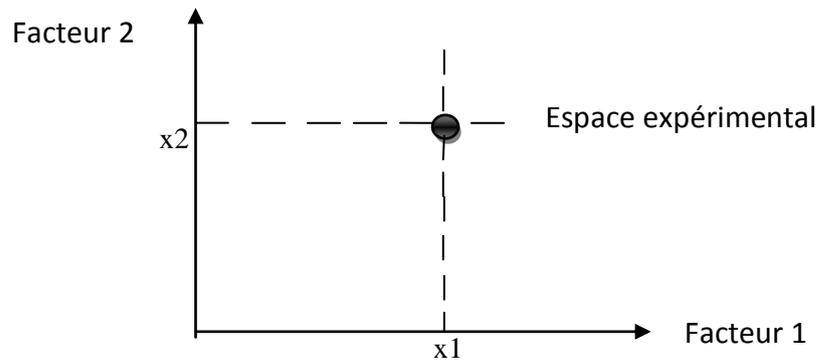


Figure I.3 : Dans l'espace expérimental, les niveaux des facteurs définissent des points expérimentaux.

Cette façon de représenter une expérimentation par des points dans un espace cartésien est une représentation géométrique de l'étude.

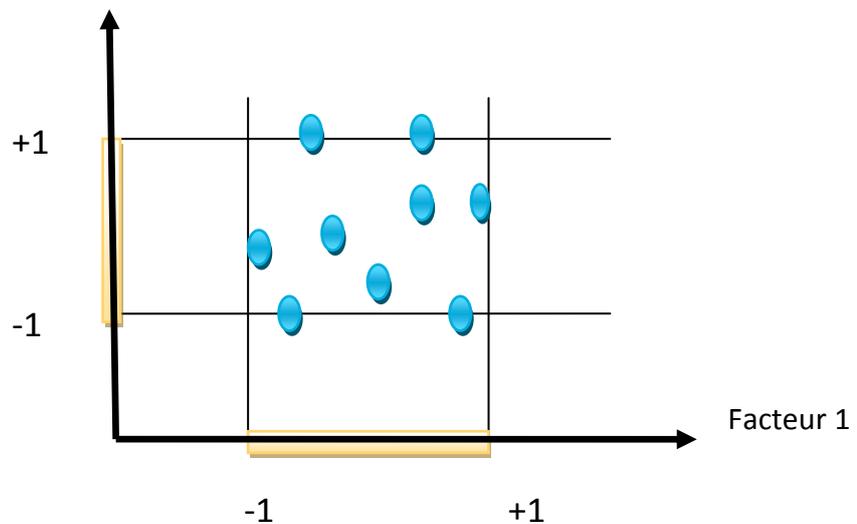


Figure I.4 : Les points expérimentaux sont disposés dans le domaine d'étude défini par l'expérimentateur.

Les définitions qui ont été données s'appliquent bien aux variables continues. Mais il existe d'autres types de variables. Il y a les variables discrètes comme par exemple des personnes : Julien, Arthur, Louis, Simon et Nathan. On peut encore parler d'espace expérimental mais il n'aura pas les mêmes propriétés que l'espace des variables continues. Il y a également les grandeurs ordonnables comme par exemple, des distances qui peuvent être courtes, moyennes et longues. Là aussi, la notion d'espace

expérimental existe toujours mais cet espace possède des propriétés différentes des deux premiers.

I.7. Notion de surface de réponse

Les niveaux x_i représentent les coordonnées d'un point expérimental et y est la valeur de la réponse en ce point. On définit un axe orthogonal à l'espace expérimental et on l'attribue à la réponse. La représentation géométrique du plan d'expériences et de la réponse nécessite un espace ayant une dimension de plus que l'espace expérimental. Un plan à deux facteurs utilise un espace à trois dimensions pour être représenté : une dimension pour la réponse, deux dimensions pour les facteurs.

A chaque point du domaine d'étude correspond une réponse. A l'ensemble de tous les points du domaine d'étude correspond un ensemble de réponses qui se localisent sur une surface appelée la surface de réponse (Figure I.5).

Le nombre et de l'emplacement des points d'expériences est le problème fondamental des plans d'expériences. On cherche à obtenir la meilleure précision possible sur la surface de réponse tout en limitant le nombre d'expériences. Elle vient pour enrichir les méthodes des plans d'expériences en apportant une amélioration considérable aux plans factoriels complets et fractionnaires [4].

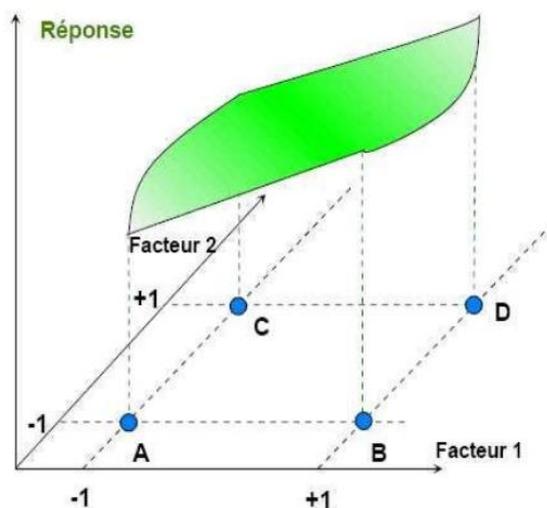


Figure I.5 : la surface de réponses.

I.8. Différents types des plans d'expériences

I.8.1. Plan factoriel complet

La réalisation d'un PE peut être très simple ou très compliquée suivant le nombre des facteurs étudiés et les hypothèses formulées. L'étude d'un plan complet consiste à étudier toutes les combinaisons possibles des facteurs pris en considération dans l'expérience. On note ce plan X_k , ce qui signifie que cette expérimentation concerne un système comportant k facteurs à X niveaux. Le principal inconvénient d'une telle méthode réside dans le nombre d'expériences nécessaires, vite dissuasif lorsque k devient important. Cependant, son grand avantage est qu'aucun facteur n'introduit de biais (ou erreur systématique) dans le calcul des effets des autres facteurs (effets indépendants). Pour étudier une réponse y en fonction de k facteurs, les expériences correspondant à toutes les combinaisons possibles des facteurs sont réalisées. Si chaque facteur A_i possède Nn_i niveaux, alors le nombre d'essais N à accomplir est donné par :

$$N = \prod_{i=1}^K Nn_i \quad (I.1)$$

Par exemple, pour deux facteurs à deux niveaux, le nombre de combinaisons possibles entraîne $2^2 = 4$ configurations (Tableau I.3). Dans le cas d'un plan comportant des facteurs ayant des niveaux différents, le calcul du nombre d'expériences du plan complet est effectué de manière similaire. Par exemple, pour un plan complet de 3 facteurs à 2 niveaux et 4 facteurs à 2 niveaux, $2^3 \times 2^4 = 128$ expériences sont nécessaires [12].

Tableau I.3 : Plan factoriel complet 2^2 pour deux facteurs (A, B) à deux niveaux.

N°essai	Facteurs		Réponse
	Facteur A	Facteur B	
1	-1(niveau bas)	-1	Y_1
2	+1(niveau haut)	-1	Y_2
3	-1	+1	Y_3
4	+1	+1	Y_4

I.8.2. Plans factoriels fractionnaires

Le principal inconvénient des plans factoriels complets est le nombre excessif d'essais à réaliser lorsque le nombre de facteurs devient important. La question est alors de savoir s'il est possible d'estimer les coefficients du modèle avec une précision acceptable sans pour autant réaliser tous les essais du plan factoriel. Des travaux précédents ont débouché sur les plans fractionnaires présentés sous forme de tables standards en fonction des éléments que l'on souhaite prendre en compte dans l'expérimentation et qui concernent les facteurs, les valeurs (ou niveaux) de ces facteurs, et les interactions entre facteurs. L'hypothèse faite dans l'élaboration de plans fractionnaires est que certaines interactions sont insignifiantes et qu'elles peuvent donc être confondues avec des facteurs dont l'influence est significative. L'inconvénient majeur des plans fractionnaires est qu'ils occasionnent par conséquent des risques potentiels d'erreurs. Les avantages de ces plans résident dans le fait qu'ils sont beaucoup plus économiques, plus rapides et demandent moins d'essais [9].

I.9. Plans pour surfaces de réponses

Les plans examinés précédemment n'avaient que deux niveaux d'étude par facteur et les modèles mathématiques utilisés étaient du premier degré (avec ou sans interactions) par rapport à chaque facteur. Ces plans sont les plus employés car ils permettent le criblage des facteurs et conduisent parfois à des modélisations simples mais suffisantes. Pourtant, il existe de nombreux cas où il est nécessaire d'avoir une bonne modélisation des phénomènes étudiés et où il faut passer à des modèles mathématiques du second degré. On fait alors appel aux plans pour surfaces de réponse. Ces plans utilisent des modèles polynomiaux du second degré. Nous étudierons les trois plus importants plans de ce type : **les plans composites, les plans de Box-Behnken et les plans de Doehlert** [7].

Le modèle mathématique postulé utilisé avec les plans pour surfaces de réponse est un modèle du second degré avec interactions d'ordre 2 :

– pour deux facteurs :

$$y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_{12}x_1x_2 + a_{11}x_1^2 + a_{22}x_2^2 + e \quad (\text{I.2})$$

-pour trois facteurs :

$$y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_3 + a_{12}x_1x_2 + a_{13}x_1x_3 + a_{23}x_2x_3 + a_{11}x_1^2 + a_{22}x_2^2 + a_{33}x_3^2 + e \quad (\text{I.3})$$

I.10. Avantages des plans factoriels

- Orthogonaux (calculs simples, estimés des coefficients non corrélés) ;
- Bonne plage de variations pour tous les facteurs et dans toutes les directions ;
- Utilisation efficace de tous les points (expériences) ;
- Patron simple et symétrique (facilite la visualisation) ;
- Possible d'effectuer les expériences en blocs (plans fractionnés) ;
- Augmentation facile de l'ordre du design par l'ajout séquentiel d'expériences supplémentaires [10].

I.11.Des plans d'expériences classiques aux plans d'expériences numériques

La différence fondamentale entre les plans d'expériences numériques et les plans classiques développés en laboratoire (expériences physiques) réside dans le fait qu'en laboratoire, on suppose la présence d'erreurs aléatoires dues aux mesures, aux conditions expérimentales, etc. Ce qui n'est en principe pas le cas avec une expérience numérique (simulation déterministe) [11].

Remarque : Il convient de prendre conscience que la répétition d'une simulation, à variables de contrôle et d'environnement fixées, pour lesquelles on ferait varier les variables de simulation donnerait des résultats différents. Cette pratique se rapprocherait donc de la répétition d'expériences et générerait un bruit de nature numérique [11].

I.12. Conclusion

Le plan d'expérience est une méthode d'expérimentation particulière basée sur le principe suivant : plutôt que de réaliser un nombre considérable d'essais en ne faisant varier qu'un seul paramètre à la fois, il fait varier simultanément tous les paramètres. Le plan d'expérience est utilisable pour mettre au point un service, un produit ou un processus industriel. Il apporte un gain de temps sans entraver la qualité du produit à mettre au point [12]. Le succès de la démarche originale des plans d'expériences réside dans la possibilité d'interprétation des résultats expérimentaux avec un effort minimal sur le plan expérimental : la minimisation du nombre nécessaire d'expériences permet un gain en temps et en coût financier [13].

Chapitre

II

Présentation de la méthode de Taguchi et l'Analyse Relationnelle Grise.

II.1. Présentation de la méthode de Taguchi

II.1.1. Historique de Taguchi

Genichi Taguchi (né le 1^{er} Janvier 1924 au Japon) est un statisticien et un ingénieur ayant notamment développé une méthodologie complète d'application des statistiques à la production.

Ses parents ayant une activité de fabrication de kimonos, Genichi Taguchi oriente ses études vers l'ingénierie textile. Cependant, avec l'entrée en guerre du Japon en 1942, Taguchi est assigné au département astronomique de l'institut de navigation (faisant parti de la marine impériale Japonaise. Après la guerre, en 1948, il travaille pour le ministère de la santé au Japon où il est initié à l'expérimentation scientifique par Motosaburo Masuyama, un éminent statisticien Japonais qui remettait en cause les travaux de Sir Ronald Fisher sur les plans d'expérience. En parallèle Taguchi travaillait à l'institut Japonais de mathématiques et de statistiques.

Deux années plus tard, en 1950, Taguchi rejoint une branche de la Nippon telegraph and téléphone corporation afin de travailler sur le contrôle qualité. Il faut savoir qu'à cette époque, le contrôle qualité était très répandu au Japon grâce aux interventions d'Edwards Deming, Joseph Juran et du JUSE (Japanese Union for Scientists and Engineers). A cette époque la Nippon Telegraph était rentré dans une concurrence très forte avec la Bell Téléphone (USA) afin d'améliorer certains aspects produits. A cette époque Taguchi se fait consulter par de nombreuses sociétés Japonaises sur son travail et son application des statistiques à la qualité (consultation notamment de la part de Toyota).

Au milieu des années 50 il travaille en tant que professeur itinérant (il reste basé au Japon) à l'institut Indienne des statistiques. Ce nouveau travail de professeur lui permet de collaborer étroitement avec Walter Shewhart qui travaillait chez Bell Téléphone et Sir Ronald Fisher dont il était rappelés-le en opposition sur son travail. Il collabore également avec Calyampudi Radhakrishna Rao, un grand statisticien

Indien (élu « légende vivante » par l'American Statistical Association), qui inventera le concept de matrice orthogonale.

Taguchi finit son doctorat au Japon en 1962 puis, sur invitation de John Tukey (encore un grand statisticien) il fait plusieurs interventions à l'université de Princeton (USA). Il retournera de nombreuses fois et à partir des années 80, participera à des travaux d'amélioration de la qualité chez Bell Labs (son ancien concurrent), Ford Motors, Boeing, Xerox ou encore ITT.

Finalement, Genichi Taguchi devient consultant à l'institut Japonaise des standards et directeur exécutif à l'American Supplier Institute (qui publie la majorité de ses ouvrages) [14].



Figure II.1: Genichi Taguchi [14].

II.1.2. Le but de la méthode de Taguchi

Le but de la méthode de Taguchi : était de simplifier au maximum ses techniques statistiques afin de permettre au plus grand nombre de les utiliser sans pour cela être un génie des mathématiques. Les critiques rejettent cette trop grande simplification en démontrant mathématiquement que certains résultats obtenus par les plans d'expériences orthogonaux mènent à des résultats déviants de ceux obtenus par des plans d'expériences 'classiques' (travaux de Sir Ronald Fisher). Il faut noter que ses

critiques sont fondées, si l'on considère la méthode Taguchi comme fixe. Cependant, il faut voir les travaux de Taguchi comme une base de départ que l'expérimentateur doit adapter à son cadre de travail et au sujet étudié (il ne faut pas prendre sa démarche comme une solution clé-en-main) [14].

II.1.3. Intérêts d'un plan d'expérience Taguchi

Un plan d'expériences selon la méthode Taguchi présente plusieurs intérêts :

- Il est simple à mettre en œuvre ;
- Il requiert un faible nombre d'essais ;
- Il conduit aux solutions techniques les plus économiques [15].

II.1.4. Définitions

Caractéristique : c'est la grandeur que l'on désire suivre.

Facteurs : ce sont les paramètres du système qui ont a priori une influence sur la caractéristique.

Modalités : c'est le nombre de niveaux possibles associés à chaque facteur.

Réponse : c'est la valeur que prend la caractéristique à chaque essai [15].

II.1.5. Analyse de la méthode de Taguchi

La méthode de Taguchi fait une utilisation spécifique de la technique des plans d'expériences. La méthode classique des plans d'expériences ne considère que les valeurs moyennes des caractéristiques à optimiser. On la complète parfois par une analyse de la variance des différents facteurs testés. Les plans d'expériences Taguchi traitent conjointement la moyenne et la variabilité des valeurs des caractéristiques mesurées. Donc la méthode de Taguchi vient pour enrichir les méthodes de plans d'expériences en apportant une amélioration considérable aux plans factoriels complets et fractionnaires. Elle se distingue par une réduction importante du nombre d'essais, tout en gardant une bonne précision [16].

Elle a pour but de simplifier le protocole expérimental pour mettre en évidence les effets de facteurs sur la réponse, qui peut être une variable dans un procédé agroalimentaire ou même la mesure de la qualité d'un produit.

La place de chaque facteur dans le plan de Taguchi a son importance ; elle est choisie selon la difficulté de réalisation du facteur dans l'expérience. Cette place dans le plan permettra au facteur le plus difficile à réaliser d'effectuer le moins de changements de niveaux possibles. On peut ainsi regrouper les facteurs par degrés de difficulté de réalisation [17].

II.1.6. Méthode de Taguchi

La méthode de Taguchi a été largement utilisée dans l'analyse des systèmes d'ingénieries et se compose d'un plan d'expériences avec l'objectif d'acquérir des données d'une manière contrôlée, afin d'obtenir des informations sur le comportement d'un processus donné.

L'objectif du paramètre de conception est d'optimiser les valeurs et les paramètres d'un procédé pour améliorer les caractéristiques et les performances optimales de ces valeurs. En Outre, il est probable que les valeurs des paramètres du procédé optimales obtenues à partir du modèle de paramètres ne sont pas sensibles aux variations des conditions d'environnement et d'autres facteurs de bruit. Par conséquent, la conception des paramètres est l'étape clé dans la méthode Taguchi pour atteindre la haute qualité sans augmenter les coûts. Taguchi est une méthode de conception robuste et un outil de haute qualité, puissant pour les plans d'expériences. Elle envisage trois étapes dans un processus et le développement de produits : Conception des systèmes, la conception des paramètres et la conception de la tolérance. Dans La conception du système, l'ingénieur utilise des principes scientifiques et des techniques pour déterminer la configuration fondamentale. Dans l'étape de conception des paramètres, des valeurs spécifiques pour les paramètres du système sont déterminées. La conception de la tolérance est utilisée pour déterminer les meilleures tolérances des paramètres.

Les procédures de conception expérimentales traditionnelles sont trop compliquées et pas facile à utiliser. Lorsque le nombre de paramètres de processus augmente, un grand nombre de travaux expérimentaux doivent être effectués. Pour résoudre cette tâche, la méthode Taguchi utilise une conception spéciale de tableaux orthogonaux pour étudier l'espace des paramètres ensemble avec un petit nombre d'expériences seulement. Une fonction est alors définie pour calculer l'écart entre la valeur expérimentale et de la valeur souhaitée [18].

II.1.7. Démarche

Les étapes sont les suivantes :

1. Formaliser le problème, si possible au moyen d'un modèle graphique ;
2. Sélectionner les paramètres, fixer leurs modalités (niveau de variations des paramètres) et sélectionner leurs interactions ;
3. Construire le plan en fonction des tables de Taguchi ;
4. Réaliser les essais ;
5. Analyser les résultats ;
6. Conclure après choix du réglage des paramètres qui peuvent être maîtrisés et essai de confirmation [11].

➤ **ÉTAPE 1** : Formaliser le problème

Identifier le problème : est-ce un dysfonctionnement "produit" et/ou "processus", un taux de rebut important, une performance insuffisante, une mise au point à réaliser ?

Quantifier l'objectif à atteindre en définissant une ou plusieurs réponses. Les réponses étant définies,

- Comment les mesurer ?
- Qui mesure ?
- Que mesure-t-on ?
- Où le fait-on ?
- Quand le fait-on ?
- Comment le fait-on ?

Les différentes mesures peuvent être :

- une grandeur quantitative (une longueur, un poids, une dureté, une force...);
- un pourcentage (un taux de rebut ...);
- un classement;
- une cotation (un démerite ...) etc.

➤ **ÉTAPE 2** : Sélectionner les paramètres

Fixer leurs modalités et sélectionner leurs interactions.

Le groupe doit identifier les paramètres, qualitatifs ou quantitatifs, à priori responsables des variations des réponses. La manière de procéder est la suivante :

- Recenser tous les paramètres possibles (Remue-méninges, diagramme causes-effet (Ishikawa), ADMEC, ...).
- Sélectionner les paramètres à priori les plus influents pour l'étude, par élimination successive.
- Choisir le nombre de modalités et leurs valeurs pour chacun des paramètres retenus.
- Sélectionner les interactions à priori les plus influentes.
- Déterminer les conditions d'essais : les paramètres listés mais non retenus seront maintenus constants au cours des essais. La façon de réaliser les essais sera établie et figée.

C'est l'expérience acquise par chacun des membres du groupe qui est utilisée lors de cette étape.

A ce stade, il faut vérifier l'opportunité d'un plan d'expérience :

- L'influence des paramètres est-elle vraiment méconnue, mal quantifié (problème de type "boîte noire") ?
- Est-il possible de maîtriser les paramètres au cours des essais ?

Si non, les informations issues de l'étape 1 et 2 permettent de s'orienter vers d'autres méthodes : méthode de résolution de problèmes, analyses de données... etc.

➤ **ÉTAPE 3** : Construire le plan

Un plan d'expériences évite de combiner toutes les modalités de tous les paramètres.

Les plans les plus courants sont répertoriés dans un ensemble de tables disponibles en

standard. Le nombre de paramètres, de modalités par paramètres et le nombre d'interactions permettent de trouver le plan le mieux adapté au problème à résoudre.

Les paramètres sont affectés aux colonnes en tenant compte des interactions et des paramètres difficiles à faire varier.

➤ **ÉTAPE 4** : Réaliser les essais

Il s'agit de reproduire sur le produit et/ou le processus chaque combinaison du plan d'expériences et pour chacune d'entre elles de consigner la ou les réponses dans un tableau. Un soin particulier doit être apporté à la réalisation de ces essais (grande rigueur, respect de la gamme d'essais, relevé des conditions expérimentales).

Il faut réaliser tous les essais prévus. Il est impossible de s'arrêter sous peine de perdre le bénéfice de l'étude.

➤ **ÉTAPE 5** : Analyser les résultats

Il existe deux analyses complémentaires.

i. L'analyse graphique :

Elle donne une représentation simple des résultats. Elle permet de visualiser l'influence des paramètres et de leurs interactions.

ii. L'analyse statistique :

L'analyse de la variance vise à distinguer, dans les variations globales de la réponse, la part due à l'influence réelle des paramètres de la part due au hasard. Cette analyse :

- Complète l'analyse graphique.
- Donne un taux de confiance statistique aux résultats.
- Chiffre la contribution de chaque paramètre à la variation globale de la réponse.
- Quantifie la part du résidu, c'est-à-dire ce qui a varié à l'insu de l'expérimentateur.

➤ **ÉTAPE 6** : Conclure

L'objectif de cette dernière étape est de faire la synthèse des résultats obtenus et de décider des actions à entreprendre (réglages des paramètres ou préconception).

L'essai de confirmation doit permettre la décision à entreprendre soit :

- Accepter le niveau de qualité obtenu après réglage.
- Mettre en œuvre un nouveau plan pour améliorer le résultat.
- Changer de stratégie d'analyse où de conception du procédé.

II.1.8. Qu'est-ce qu'un plan de Taguchi (ou plan de Taguchi orthogonal) ?

Un plan de Taguchi est un plan d'expériences qui vous permet de choisir un produit ou un procédé qui fonctionne de manière plus cohérente dans son environnement d'exploitation. Les plans de Taguchi partent du principe que les facteurs à l'origine de la variabilité ne peuvent pas tous être contrôlés. Ces facteurs incontrôlables sont appelés facteurs de bruit. Les plans de Taguchi essaient d'identifier les facteurs contrôlables (facteurs de contrôle) qui minimisent l'effet des facteurs de bruit. Pendant l'expérimentation, vous manipulez les facteurs de bruit de manière à imposer une variabilité, puis vous déterminez les paramètres de facteurs de contrôle optimaux qui rendent le procédé ou le produit plus robuste ou plus résistant face à la variation provoquée par les facteurs de bruit. Un procédé conçu dans cette optique produira des résultats plus cohérents. Un produit conçu dans cette optique aura des performances plus cohérentes, quel que soit l'environnement dans lequel il sera utilisé.

Les plans de Taguchi utilisent des répertoires orthogonaux, qui évaluent les effets des facteurs sur la moyenne et sur la variation de la réponse. Avec un répertoire orthogonal, le plan est équilibré de telle sorte que les niveaux de facteurs sont également pondérés. Ainsi, chaque facteur peut être évalué indépendamment de tous les autres et l'effet d'un facteur n'influence pas l'estimation d'un autre facteur. Cela peut réduire la durée et le coût de l'expérience en cas d'utilisation des plans fractionnés.

Vous pouvez également ajouter un facteur de signal au plan de Taguchi, afin de créer une expérience à réponse dynamique. Une expérience à réponse dynamique vise à améliorer la relation fonctionnelle entre un signal et une réponse de sortie [19].

II.1.9. Optimisation par la méthode de Taguchi

Dans l'analyse des résultats selon la méthode de Taguchi, on cherche à identifier les facteurs qui contribuent à la réduction de la variation dans la réponse. La variation peut être analysée en observant les effets sur la réponse moyenne ou dans la dispersion. Pour mesurer les effets dans la variation, Taguchi a développé une transformation des données, désignée par la relation Signal/Bruit (S/N), qui représente la mesure de la variation existante.

Dans la méthode Taguchi, le terme «signal» représente la valeur souhaitable et le «bruit» représente la valeur indésirable. L'objectif de l'utilisation des S/N ratio est de mesurer les performances pour développer des produits et des processus insensibles aux facteurs de bruit. Le rapport S/N indique le degré de la performance prévisible d'un produit ou d'un procédé, en présence de facteurs de bruit [20].

Selon le critère de performance de la réponse, le ratio signal/bruit (S/N) prend les formes suivantes :

a) L'optimum est une valeur minimale : la valeur cible est égale à zéro (plus petit c'est meilleur), la caractéristique de performance Y a une distribution non négative et la fonction de perte augmente avec (y). Soient $y_{1j}, y_{2j}, \dots, y_{Nj}$ les résultats expérimentaux obtenus au point j, Taguchi recommande d'utiliser la fonction représentée par la relation:

$$S / N = -10 \log_{10} \left[\frac{1}{n} (\sum_{i=1}^n y_i^2) \right] \quad (\text{II.1})$$

b) L'optimum est une valeur maximale: la valeur cible est égale à l'infini (plus grand c'est meilleur), on vise la maximisation de la caractéristique de performance. Maximiser Y revient à minimiser 1/Y et, Taguchi recommande d'utiliser la formule suivante :

$$S / N = -10 \log_{10} \left[\frac{1}{n} (\sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2}) \right] \quad (\text{II.2})$$

c) L'optimum est une valeur ciblé : la valeur cible est égale à une valeur nominale m_0 (nominal c'est meilleur), la fonction de perte augmente quand (Y) s'éloigne de la valeur nominale m_0 , Taguchi recommande d'utiliser la fonction représentée par la relation :

$$S / N = 10 \log_{10} \left[\left(\frac{\bar{y}_j^2}{s_j^2} \right) \right] \quad (\text{II.3})$$

Avec :

$$S^2 = \sum \frac{(y_{ij} - \bar{y}_j)^2}{N_j - 1} \quad \text{Et} \quad \bar{y}_j = \sum \frac{y_{ij}}{N_j} \quad (\text{II.4})$$

Y_j : représente les valeurs individuelles de la réponse (résultats expérimentaux).

N : représente le n° de répétitions dans un essai.

S^2 : représente la variance de l'erreur.

II.2. Analyse Relationnelle Grise

II.2.1. La méthode Grey-Taguchi

La méthode Grey-Taguchi est basée sur la procédure d'optimisation de la méthode Taguchi et adopte une Analyse Relationnelle Grise (GRA) pour transférer des problèmes multi-réponse à des problèmes de réponse unique. La théorie du système gris proposé par Deng a été prouvée pour être utile pour traiter les informations insuffisantes, incomplètes et incertaines [18].

La théorie Grey-Taguchi dite Relationnelle Grise peut résoudre les problèmes flous et ceux qui ont des données incomplètes. Il peut également compenser les lacunes de la régression statistique et d'analyser efficacement et les relations entre les séquences dans des situations impliquant des données limitées. Par ailleurs, il est un procédé qui permet de mesurer la corrélation entre les séries et appartient à la catégorie de la méthode d'analyse de données ou d'une méthode géométrique. En outre, c'est une méthode efficace pour optimiser les interrelations complexes entre les réponses multiples. Dans l'Analyse Relationnelle Grise, Lorsque les unités dans lesquelles la

performance est mesurée sont différentes pour les différents attributs, l'influence de certains attributs peut être négligée. Cela peut également se produire si certaines performances ont une très grande portée. En outre, si les objectifs et les orientations de ces attributs sont différents, cela entraînera des résultats incorrects dans l'analyse. Il est donc nécessaire de traiter toutes les valeurs de performance pour chaque solution de rechange dans une séquence de comparabilité (processus de transfert de la séquence d'origine à une séquence comparable) dans un processus analogue à la normalisation.

Ce processus est connu comme la génération Relationnelle Grise. Dans notre travail, la méthode Grey-Taguchi proposée considère le problème multi-réponse comme un problème de prise de décision multi-attributs.

L'analyse Grey-Taguchi résout les problèmes, problème multi-réponse en combinant l'ensemble de valeurs attribuées de performance étant considéré pour toutes les alternatives en une seule valeur. Cela réduit le problème d'origine à un problème de prise de décision unique objectif. Le processus de combinaison des valeurs d'attribut en une seule valeur est similaire à la méthode adoptée dans les méthodes de pondération Ratio d'échelle [18].

II.2.2. Optimisation par L'Analyse Relationnelle Grise (Grey Relational Analysis GRA):

Les caractéristiques multiples de performance ont été évaluées en utilisant l'Analyse Relationnelle Gris (GRA). Dans cette analyse, l'optimisation des caractéristiques multiples de performance peuvent être convertis à l'optimisation de la Qualité Relationnelle Unique Grise. Les étapes suivantes sont considérées pour l'Analyse Relationnelle Gris (GRA) [20].

II.2.2.1. Etape 1 : La normalisation

Les rapports S/N obtenus par la méthode de Taguchi sont normalisés dans l'intervalle 0 à 1. Si le but est la minimisation du critère (les critères de rugosité et les efforts de coupe) alors la séquence originale est normalisée comme suit :

- Le plus petit est le meilleur (The-smaller-the-better) :

$$x_i(k) = \frac{\max(x_i^0(k)) - x_i^0(k)}{\max(x_i^0(k)) - \min(x_i^0(k))} \quad (\text{II.5})$$

Si le but est la maximisation du critère (volume de copeau enlevé par unité de temps, MRR) alors la séquence originale est normalisée comme suit :

- Le plus grand est le meilleur (The-larger-the better) :

$$x_i(k) = \frac{x_i^0(k) - \min(x_i^0(k))}{\max(x_i^0(k)) - \min(x_i^0(k))} \quad (\text{II.6})$$

Où : $x_i(k)$ valeur normalisée de la séquence.

$\max(x_i^0(k))$ la plus grande valeur de $x_i^0(k)$ la $k^{\text{ième}}$ réponse.

$\min(x_i^0(k))$ la plus petite valeur de $x_i^0(k)$ la $k^{\text{ième}}$ réponse.

II.2.2.2. Etape 2 : Calcul des coefficients du Relationnel Gris

Les coefficients du Relationnel Gris (Grey Relational Coefficients) peuvent être calculés comme suit :

$$\xi_i(k) = \frac{\Delta_{\min} + \psi \Delta_{\max}}{\Delta_{0i}(k) + \psi \Delta_{\max}} \quad 0 < \xi_i(k) \leq 1 \quad (\text{II.7})$$

Où :

$\Delta_{0i}(k)$ est la différence en valeur absolue entre $x_0^k(k)$ et $x_i^k(k)$.

Δ_{\min} est la plus petite valeur de $\Delta_{0i}(k)$.

Δ_{\max} est la plus grande valeur de $\Delta_{0i}(k)$ coefficient de distinction et sa valeur est comprise entre 0 à 1.

$$\Delta_{0i}(k) = \|x_0(k) - x_i(k)\| \quad (\text{II.8})$$

$$\Delta_{\min} = \min \min \|x_0(k) - x_i(k)\| \quad (\text{II.9})$$

$$\Delta_{\max} = \max \max \|x_0(k) - x_i(k)\| \quad (\text{II.10})$$

$\forall j \in i \quad \forall k$

-La valeur de ψ est en générale égale à (0.5).

II.2.2.3. Etape 3 : Calcul du GRG (Grey Relational Grade)

Après avoir calculé la moyenne des coefficients du Relationnel Gris (Grey Relational Coefficients), les γ_i (Grey Relational Grade) peuvent être obtenu comme suit :

$$\alpha_i = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \xi_i(k) \quad (\text{II.11})$$

Où: n est le nombre des caractéristiques de performance.

La plus grande valeur de "Grey Relational Grade" est considérée comme la relation la plus forte entre la séquence idéale ($x_0(k)$) et la séquence donnée ($x_i(k)$). La séquence idéale ($x_0(k)$) est la meilleure réponse dans le processus expérimental. Ainsi, le Grade Relationnel (Relational Grade) supérieur correspond à la combinaison des paramètres la plus proche de l'optimale.

II.2.3. Test de confirmation

Après avoir évalué la configuration optimale des paramètres, l'étape suivante consiste à prévoir et vérifier l'amélioration des caractéristiques de qualité en utilisant la combinaison Paramétrique optimale. L'estimation du Grade Relationnel Gris $\hat{\xi}_i$ en utilisant le niveau optimal des paramètres de conception qui peut être calculée comme suit :

$$\hat{\xi}_i = \bar{\xi} + \sum_{i=1}^q \bar{\xi}_i^* - \bar{\xi} \quad (\text{II.12})$$

Où:

$\bar{\xi}$: La moyenne totale du Grade Relationnel Gris;

$\bar{\xi}_i^*$: La moyenne totale du Grade Relationnel Gris au niveau optimal des paramètres qui ont un effet significatif sur les caractéristiques de performance multiples.

$\hat{\xi}_i$: L'estimation du Grade Relationnel Gris.

Le test de confirmation expérimentale est la dernière étape dans la vérification des résultats établis sur la base de l'approche de conception de Taguchi. Les conditions optimales sont fixées pour les facteurs importants (les facteurs insignifiants sont fixés à des niveaux économiques).

La moyenne des résultats de l'expérience de confirmation est comparée à la moyenne prédite en se basant sur les paramètres et les niveaux testés. L'expérience de confirmation est une étape cruciale et est fortement recommandé par Taguchi pour vérifier les résultats expérimentaux [18].

II.2.4. Analyse de variance ou ANOVA

II.2.4.1. Introduction à l'analyse de variance (ANOVA)

Au cœur du problème de la vérification d'hypothèses statistiques se trouve le fait qu'il est toujours possible d'attribuer à des variations aléatoires une partie des différences observées entre les moyennes des échantillons. Dans une expérience, toutes les sources incontrôlables de variabilité qui affectent la mesure constituent ce qu'il est convenu d'appeler l'erreur expérimentale l'une des sources les plus importantes de variabilité incontrôlable provient des différences individuelles. Une autre source d'erreur provient de l'erreur de mesure, une mauvaise lecture de l'instrument, une erreur de transcription, un arrondissement, etc. D'autre part, une situation expérimentale n'est jamais parfaitement identique d'un moment à l'autre, puisque le sujet perçoit les deux événements comme étant successifs. Il est impossible de créer des situations expérimentales exactement identiques. De plus, ces sources d'erreurs ne sont pas systématiques, elles sont aléatoires et indépendantes des effets du traitement.

L'analyse de la variance (ANOVA) a pour objectif d'étudier l'influence d'un ou plusieurs facteurs sur une variable quantitative. Nous nous intéresserons ici au cas où les niveaux, ou modalités, des facteurs sont fixés par l'expérimentateur. On parle alors de modèle fixe; C'est la comparaison de moyennes pour plusieurs groupes (> 2). Il s'agit de comparer la variance intergroupe (entre les différents groupes : écart des moyennes des groupes à la moyenne totale) à la variance intragroupe (somme des fluctuations dans chaque groupe).

S'il n'y a pas de différence entre les groupes, ces deux variances sont à peu près égales. Sinon, la variance intergroupe est nécessairement la plus grande.

L'ANOVA se résume à une comparaison multiple de moyennes de différents échantillons constitués par les différentes modalités des facteurs. Les conditions d'application du test paramétrique de comparaison de moyennes s'appliquent donc à nouveau [11].

Dans le tableau d'ANOVA, P-value est la probabilité (allant de 0 à 1) que les résultats observés dans une étude (ou résultats plus extrêmes) ont pu se produire par hasard.

- Si $P > 0,05$, le paramètre est insignifiant (Non significatif);
- Si $P < 0,05$, le paramètre est significatif.

La somme des carrés (SC) est utilisée pour estimer le carré de la déviation de la moyenne générale.

$$SC_f = \frac{N}{N_{nf}} \sum_{i=1}^{N_{nf}} (\bar{y}_i - \bar{y})^2 \qquad \bar{y} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y_i \qquad (\text{II.13})$$

Où :

\bar{y} : La moyenne des réponses,

y_i : La réponse moyenne observée dans les expériences où le facteur f prend son $i^{\text{ème}}$ niveau,

N : Nombre total d'expériences,

N_{nf} : Niveau de chaque facteur f .

La moyenne des carrés (MC) est estimée en divisant la somme des carrés sur le degré de liberté df .

$$MC_i = \frac{SS_i}{df_i} \quad (\text{II.14})$$

Afin de vérifier l'adéquation du modèle, l'indice de Fisher **F-value** est utilisé avec la base que les valeurs **de F-calculées** devraient être supérieures à celles obtenues à partir du **F-table**.

$$F_i = \frac{MC_i}{MC_e} \quad (\text{II.15})$$

Avec : MC_e les carrés moyens des erreurs.

La dernière colonne du tableau d'ANOVA (**Contribution en %**), montre la contribution des facteurs (**en pourcentage %**) sur la variation totale, indiquant le degré d'influence sur le résultat.

$$Cont. \% = \frac{SC_f}{SC_T} \times 100 \quad (\text{II.16})$$

II.2.4.2. Graphe des effets des facteurs

Il s'agit d'une manière commode de représenter l'évolution de la réponse en fonction des niveaux des différents facteurs. Il consiste à tracer pour chaque facteur la moyenne des réponses obtenues lorsqu'il prend ses différents niveaux. L'exemple de la (Figure II.2) correspond à un facteur A1 à trois niveaux, un facteur A2 à deux niveaux et un facteur A3 à quatre niveaux [11].

II.2.4.3. Moyenne générale

Elle correspond à la moyenne de la réponse sur les m essais.

$$M = \frac{\sum_{i=1}^m Y_i}{m} \quad (\text{II.17})$$

II.2.4.4. Effet d'un facteur

L'effet $E_{A_{ij}}$ du facteur A au niveau j correspond à la moyenne des réponses lorsque le facteur A est au niveau j soustrait de la moyenne M [11].

$$E_{A_{ij}} = (\text{Moyenne des réponses lorsque } A_i \text{ est au niveau } j) - M \quad (\text{II.18})$$

Remarque : la somme des effets d'un facteur à tous ses niveaux est nulle .

$$\sum_{j=1}^{n_{A_i}} E_{A_{ij}} = 0 \quad (\text{II.19})$$

- Exemple de calcul à 3 niveaux :

L'effet de paramètre au niveau $A_1 = m_{A1} - m = \frac{1}{3} (\eta_1 + \eta_2 + \eta_3) - m$.

L'effet de paramètre au niveau $A_2 = m_{A2} - m = \frac{1}{3} (\eta_1 + \eta_2 + \eta_3) - m$.

L'effet de paramètre au niveau $A_3 = m_{A3} - m = \frac{1}{3} (\eta_1 + \eta_2 + \eta_3) - m$.

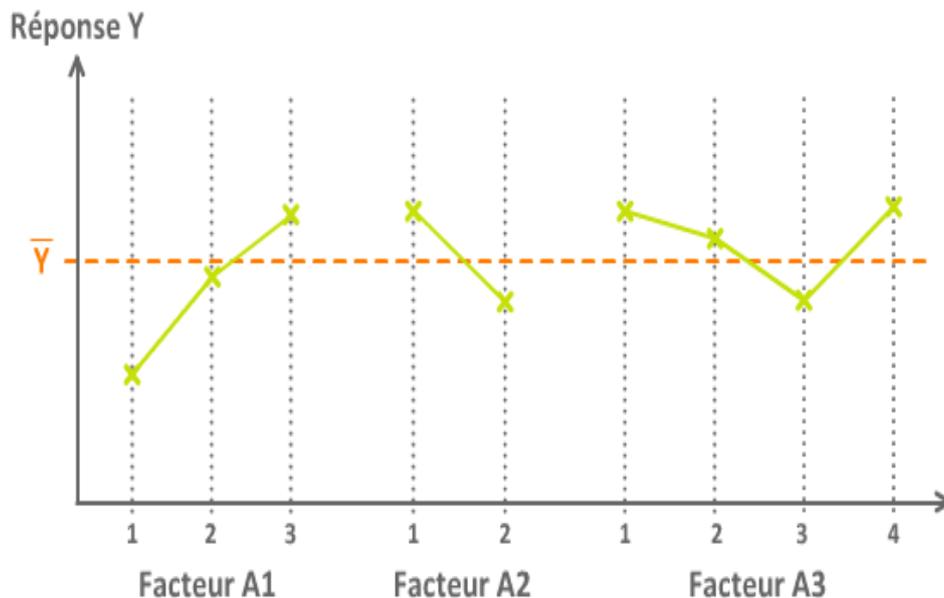


Figure (II.2) : Exemple de graphe des effets des facteurs [11].

II.2.5. Conclusion

A partir des années 50 le statisticien Taguchi élaborera des tables permettant de construire des plans d'expériences adopter à la majorité des problèmes industrielles. Taguchi a contribué à une méthodologie facile à appliquer en s'attaquant à l'amélioration de la qualité. Pour conclure cette introduction on résume les principaux avantages de cette méthode par rapport aux méthodes traditionnelles d'expérimentation :

- Diminution du nombre d'essais ;
- Possibilité d'étudier un très grand nombre de facteurs ;
- Détection des éventuelles interactions entre facteurs ;
- Modélisation très aisée des résultats ;
- Détermination des résultats avec bonne précision [21].

Chapitre

III

Comportement dynamique des structures.

III.1. Introduction

L'intensité des forces sismiques agissant sur un bâtiment lors d'un tremblement de terre est conditionnée non seulement par les caractéristiques du mouvement sismique, mais aussi par la rigidité de la structure sollicitée. Dans le passé, les structures relativement flexibles à base de portiques ou des cadres étaient censées se comporter mieux sous chargement sismique, dû au fait qu'elles attirent, généralement, des forces sismiques moins intenses. Cependant, les constatations faites dans le monde après les séismes destructeurs, ont montré que ce type de structure doit supporter d'importants déplacements relatifs entre deux étages consécutifs (« interstorey drifts ») et par conséquent des dommages sévères sur des éléments non structuraux. De plus, les demandes excessives de ductilité et les effets de deuxième ordre générés par les grandes déformations, peuvent provoquer la ruine de la structure.

Lors des tremblements de terre sévères, il a été constaté que de nombreux bâtiments à voiles en béton armé ont bien résisté sans endommagement exagéré. Mis à part leur rôle d'éléments porteurs vis-à-vis des charges verticales, les voiles (ou murs de contreventement) en béton armé correctement dimensionnés, peuvent être particulièrement efficaces pour assurer la résistance aux forces horizontales, permettant ainsi de réduire les risques [22].

III.2. Définition de contreventement

En génie civil, un contreventement est un système statique destiné à assurer la stabilité globale d'un ouvrage vis-à-vis des effets horizontaux issus des éventuelles actions sur celui-ci (par exemple : vent, séisme, choc, freinage, etc.). Il sert également à stabiliser localement certaines parties de l'ouvrage (poutres, poteaux) relativement aux phénomènes d'instabilité (flambage ou déversement).

Afin d'assurer la stabilité globale d'un bâtiment, il est nécessaire que celui-ci soit contreventé selon au moins 3 plans verticaux non colinéaires et un plan horizontal ; on distingue donc les contreventements verticaux (destinés à transmettre les efforts

horizontaux dans les fondations) des contreventements horizontaux (destinés à s'opposer aux effets de torsion dus à ces efforts).

Un contreventement peut être réalisé par des voiles (contreventements verticaux) ou des plaques (contreventements horizontaux) en béton armé, en maçonnerie, en bois ou en tôle ondulée ; ou par des treillis en bois ou en acier [23].

Nous expliquons brièvement dans ce paragraphe les différents types d'analyses dynamiques possibles.

En général, les essais dynamiques peuvent être divisés en deux catégories : les essais d'identification et les essais de simulation.

Les essais d'identification ont comme but de déterminer expérimentalement les paramètres définissant les modes propres d'un système par des essais appelés généralement essais d'analyse modale ou plus simplement essais modaux. Les paramètres modaux à déterminer peuvent être trouvés de deux manières :

- par une méthode d'appropriation des modes, parfois appelée résonance de phase, qui consiste à isoler successivement chaque mode par une excitation appropriée et à en mesurer directement les paramètres ;
- Par une méthode sans appropriation des modes, parfois appelée séparation de phase, qui consiste à exciter un ensemble de modes dont on détermine ensuite les paramètres par traitement des mesures [24].



Figure III. 1: Constructions contreventées par voiles en béton armé.

III.3. Choix du Type d'Analyse

L'analyse de comportement de la structure en sollicitation dynamique dépend de divers facteurs :

- la nature du comportement structural : celui-ci peut être linéaire c'est-à-dire proportionnel à l'excitation, ou non linéaire pour diverses raisons. Dans ce dernier cas, l'analyse est beaucoup plus difficile, à moins de pouvoir linéariser la réponse. Dans le cas linéaire, les équations du mouvement peuvent être intégrées assez facilement mais de manière plus ou moins lourde.
- le domaine d'analyse : on peut travailler en restant dans le domaine temporel, ou en passant dans le domaine fréquentiel. Ces deux domaines communiquent grâce à la transformée de Fourier et son inverse. Nous avons choisi la méthode du calcul fréquentiel car ce type de calcul est moins lourd que l'analyse temporelle et répond bien à nos besoins.

Cependant, en supposant qu'on n'a pas des grands déplacements, et qu'on ne dépasse pas la limite élastique des matériaux, on limite notre étude au cas linéaire, et l'on utilise donc les propriétés principales relatives à ce type d'analyse :

- la réponse de la structure à une somme d'excitations est la somme des réponses à chaque excitation. On peut donc analyser chaque excitation séparément, puis les superposer.
- la réponse est proportionnelle à l'excitation [24].

III.4. Choix du contreventement

Le contreventement permet d'assurer une stabilité horizontale et verticale de la structure lors des secousses qui, rappelons-le, ont des composantes dans les trois directions.

Le rôle du contreventement horizontal est de transmettre les actions latérales aux éléments verticaux appelés palées de stabilité.

Pour assurer le contreventement horizontal, les planchers et toitures faisant office de diaphragme rigide ne devraient pas être affaiblis par des percements trop grands ou mal placés pouvant nuire à leur résistance et leur rigidité. Les diaphragmes flexibles devraient être évités pour combattre le déversement des murs notamment en maçonnerie.

Le contreventement vertical par palées devrait répondre à des critères spécifiques tels que :

- leur nombre** : au moins trois palées non parallèles et non concourantes par étage.
- leur disposition** : elles seront situées le plus symétriquement possible par rapport au centre de gravité des planchers et de préférence aux angles avec une largeur suffisante.
- leur distribution verticale** : être régulière ; les palées seront de préférence superposées afin de conférer aux différents niveaux, une rigidité comparable aussi bien en translation qu'en torsion [23].

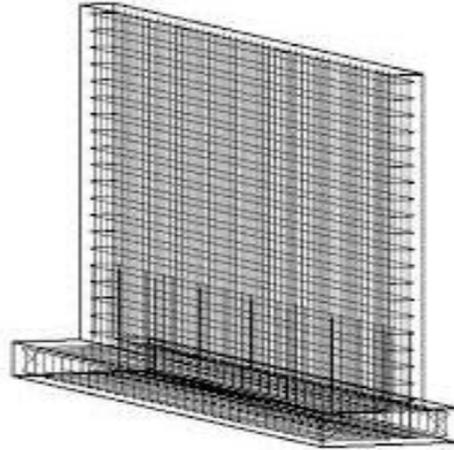


Figure III. 2 : Ferrailage de voile en béton armé.

III.5. Avantages d'utilisation des voiles

Par rapport à d'autres systèmes constructifs tels que les portiques, les structures à voiles en béton armé présentent particulièrement en zone sismique, plusieurs avantages :

- Augmente la rigidité de l'ouvrage ;
- Diminue l'influence des phénomènes du second ordre et éloigne la possibilité d'instabilité ;
- Diminue des dégâts des éléments non porteurs dont le cout de réparation est souvent plus grand que celui des éléments porteurs ;
- Apaise les conséquences psychologiques sur les habitants de hauts bâtiments dont les déplacements horizontaux sont importants lors des séismes ;
- Rend le comportement de la structure plus fiable que celui d'une structure ne comportant que des portiques ;
- L'utilisation des voiles diminue aussi l'influence des éléments non-porteurs sur le comportement de la structure, influence que nous ne maîtrisons pas aujourd'hui.

De plus, un voile fissuré garde une grande partie de sa résistance, ce qui n'est pas en général le cas d'un poteau.

L'utilisation du système constructif à voile peut apporter aussi des avantages économiques :

- la masse élevée des voiles permet un bon isolement acoustique et la bonne capacité calorifique du béton confère au bâtiment une inertie thermique appréciable ;
- Une construction à voiles en béton armé est souvent plus économique qu'une construction à poteaux et poutres, puisque les murs remplacent à la fois les poteaux, les poutres et les cloisons, et on économise ainsi les aciers [25].

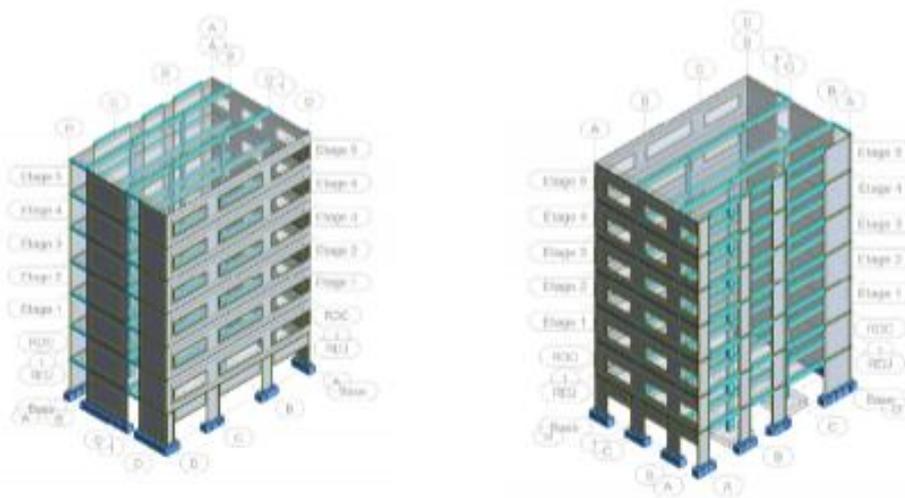


Figure III. 3 : Bâtiment avec des voiles en béton armé.

III.6. Règles de contreventement

III.6.1. Principes de bases

Pour équilibrer une force agissant dans n'importe quelle direction du plan, il faut :

- disposer d'au moins trois lignes de forces ;
- les lignes d'actions des forces ne doivent pas être concourantes ;
- les lignes d'action des forces ne doivent pas être toutes parallèles entre elles [26].

III.6.2. Analogie

Le contreventement d'un bâtiment suit en grande partie les règles d'isostatisme. Pour pouvoir stabiliser un bâtiment il est nécessaire de supprimer les six degrés de liberté

possibles, à savoir les trois translations suivant (O, x, y, z) et les trois rotations autour des axes (O, x, y, z).

Supposons un bâtiment placé dans un repère (O, x, y, z) la cote suit la hauteur du bâtiment. Si ce bâtiment possède un diaphragme rigide, il reprendra les efforts suivant trois degrés de liberté (R_x , R_y , T_z) puisqu'il s'agit d'un plan. Les murs qui soutiennent ce diaphragme rigide devront eux reprendre les efforts suivants T_x , T_y et R_z .

Le contreventement consiste à assurer la stabilité longitudinale d'un ouvrage à partir de « barres » formant une triangulation entre les éléments de structure (portiques ou arcs, pannes, lisses, poteaux...) représentant des « cadres » déformables initialement.

Ces barres peuvent être en bois reprenant des efforts de traction ou de compression, mais aussi en métal reprenant uniquement des efforts de traction ; ce deuxième cas nécessite alors une disposition systématique en croix de Saint André [26].

III.7. Les sollicitations des charges sur les voiles

III.7.1. Les charges verticales

D'une manière générale les efforts verticaux qui sollicitent les voiles sont :

- les poids propres des voiles appliqué au centre de gravité.
- la charge permanente revenant au voile.

Cette charges peut être appliquée au centre de gravité du voile dans ce cas l'excentricité est nulle, ou appliquée à une excentricité ($e \neq 0$) dans ce cas la charge N_G provoque un moment fléchissant M_G .

La charge d'exploitation revenant au voile : cette charge appliquer au centre de gravité du voile dans ce cas $e = 0$ ou appliquer d'une excentricité $e \neq 0$ dans ce cas la charge provoque un moment fléchissant.

- Pour les voiles pleins l'effort normal dû au séisme est nul($N_e = 0$) [25].

III.7.2. Les charges horizontales

Les sollicitations horizontales auxquelles sont soumises les structures bois proviennent pour des efforts de vent ou de sollicitations sismiques.

Les efforts de vent sont fonctions en plus de la situation géographique, de l'orographie (science géographique du relief), de l'exposition de l'ouvrage et de la volumétrie du bâtiment.

Les sollicitations sismiques dépendent principalement de la zone sismique dans laquelle se trouve le bâtiment, de la géométrie du bâtiment, de sa régularité en plan et en élévation, de sa masse et de la nature du sol sur lequel il se trouve, il faut s'assurer de la capacité de celui-ci à recevoir une construction dans de bonnes conditions.

Le tremblement de terre engendre des effets de deux natures,

- des effets directs, les tremblements de terre sont engendrés dans des plans de faille et provoquent un déplacement au niveau de la faille qui peut être vertical et (ou) horizontal et qui peuvent entraîner des déplacements en surface, un choc et une propagation des ondes sismiques dont l'amplitude et la durée sont influencées par la qualité du sol sous les bâtiments.

- des effets indirects, sous l'effet du tremblement de terre, l'ébranlement des sols va entraîner des pertes de cohésion de ces sols qui vont se traduire par des liquéfactions des sols (perte de la résistance des sols sous les constructions), des affaissements ou des tassements des sols.

Comme on le voit, les deux calculs d'efforts de vent et de séisme sont assez différents. Les efforts sismiques faisant intervenir notamment des notions de période et de dissipation d'énergie, un ouvrage bien conçu pour résister aux efforts de vent ne le sera pas nécessairement pour la résistance au séisme [26].

III.8. La disposition des voiles de contreventement

III.8.1. Le contreventement vertical

Il existe deux grands principes pour réaliser le contreventement vertical : par noyau ou par refend. Le contreventement par noyau est réalisé en positionnant au centre de la structure un élément rigide destiné à reprendre l'intégralité des charges horizontales. Ce sont généralement les circulations verticales telles que les cages d'ascenseur ou d'escalier qui remplissent cette fonction. Dans un contreventement par refends, la rigidité est assurée soit par des panneaux rigides (murs en ossature bois rigidifiés par panneaux, murs en bois massif contrecollé) soit par la création de palées de stabilité triangulées ou encore par des portiques rigides.

Le contreventement vertical doit être conçu de manière à stabiliser la structure sur toute la hauteur de l'ouvrage tout en apportant un minimum d'efforts aux fondations [26].

III.8.2. Le contreventement horizontal

Le contreventement horizontal est réalisé généralement par des dispositions constructives au niveau des planchers et de la toiture. Il est assuré par un diaphragme constitué de solives d'un platelage et éventuellement d'une dalle collaborant et des éléments de chaînage dans le cas de bâtiments à étages, soit par la réalisation de poutres au vent généralement obtenues par triangulation des éléments de stabilité [26].

III.9. Classification des structures avec voiles

Vu la grande variété des constructions à voiles de contreventement, on peut fournir une classification pratique de ces constructions. A cet égard, trois grandes catégories rencontrées :

- Structures «mixtes» avec des murs porteurs associés à des portiques.
- Structures à noyau central.
- Structures uniquement à mur porteur [27].

III.9.1. Structure «Mixtes» avec des murs porteurs associés à des portiques

Dans ce cas, Le rôle porteur vis-à-vis des charges verticales est assuré par les poteaux et les poutres (80% des charges verticales et les 20% restant repris par les voiles), tandis que les voiles assurent la résistance aux forces horizontales.

Un exemple de ce type de voile notions générales sur la (Figure III.4) :

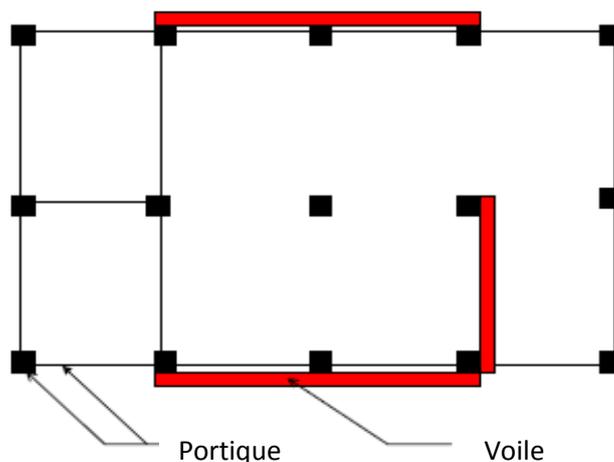


Figure III.4: Structures « mixte » avec des murs porteurs associés à des portiques [27].

III.9.2. Structures à noyau central

Un noyau central formé de deux murs couplés à chaque étage par des poutres et assure majoritairement la résistance aux forces horizontaux. Une certaine résistance supplémentaire peut être apportée par les portiques extérieurs, comme le montre la figure suivante :

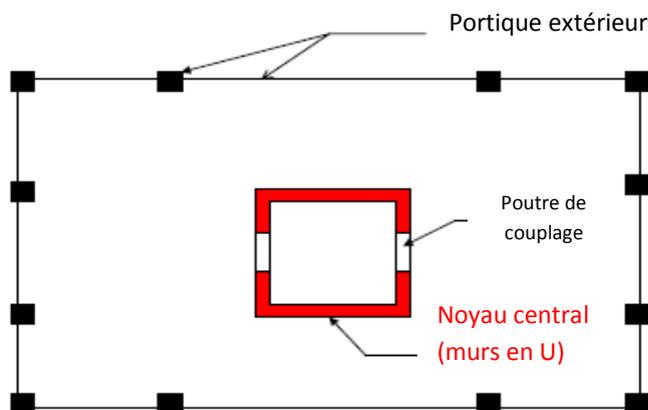


Figure III.5 : Structures à noyau central [27].

III.9.3. Structures uniquement à mur porteur.

Les voiles assurent en même temps le rôle porteur vis-à-vis des charges verticales et le rôle de résistance aux forces horizontales. L'exemple montré dans la (Figure III.6) fait apparaître ce système constructif.

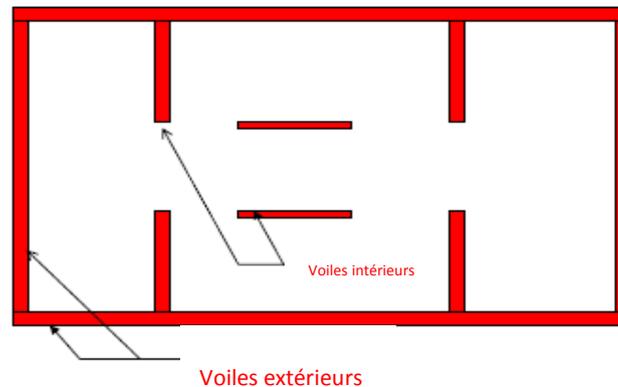


Figure III.6 : Structures uniquement à murs porteurs [27].

III.10. Définition simplifiée

III.10.1. Mode propre de vibration

La vibration de tous les points d'un système mécanique à une fréquence donnée est appelée mode propre de vibration.

La fréquence à laquelle le système vibre est appelée **fréquence propre**, notée f . Elle s'exprime en hertz (symbole: Hz) [28].

III.10.2. Phénomène périodique

C'est un phénomène qui se reproduit, identique à lui-même, à intervalles de temps égaux. Même si une activité physique peut modifier leur rythme, les battements du cœur représentent un bel exemple de phénomène périodique [29].

III.10.3. La période d'un phénomène périodique

On appelle période d'un phénomène périodique, la plus petite durée qui sépare deux reproductions à l'identique du phénomène. Elle est notée T et s'exprime en secondes (s) [29].

III.10.4. La fréquence d'un phénomène périodique

La fréquence d'un phénomène périodique correspond au nombre de fois où le phénomène se répète par seconde. Elle est notée f et s'exprime en Hertz (Hz). Ainsi, la fréquence cardiaque d'une souris dont le cœur bat 600 fois par minute est de 10 Hz [29].

III.10.5. Fréquence

Exprimée en Hertz (Hz), la fréquence correspond au nombre d'oscillations d'un phénomène périodique par unité de temps.

Il s'agit généralement d'une fréquence temporelle f , reliée à la période T (exprimée en s) du phénomène observé par la formule suivante : $f = 1/T$.

Il est aussi possible de parler de fréquence spatiale, l'analogie de la période temporelle étant généralement une distance angulaire [30].

III.11. Conclusion

Le comportement dynamique et la capacité sismique d'une structure en béton armé sont conditionnés par le nombre, la disposition et la rigidité des voiles qu'elle comporte. L'évaluation du comportement non linéaire de ces éléments de contreventement est l'une des étapes clés dans l'estimation des performances des constructions en zones de forte sismicité comme le nord Algérien. Le comportement dynamique d'un voile dépend non seulement des modèles de comportement adoptés pour les deux matériaux qui le composent, à savoir le béton et les fibres d'acier de ferrailage, mais aussi du modèle qui reproduit le fonctionnement du composite fortement hétérogène acier-béton [31].

Chapitre IV

Présentation de la structure étudiée et modélisation.

IV.1. Introduction

Pour notre analyse numérique, on a choisi comme un exemple pour vérifier nos nombreuses modélisations un bâtiment R+5 à usage d'habitation.

Le bâtiment se compose d'un seul bloc constitué d'un rez de chaussée et cinq étages identiques, avec une terrasse inaccessible.

La longueur du bâtiment est de 24 m, la largeur est de 22 m, alors la surface totale occupée par notre construction est de 528 m². La hauteur d'étage est de 3.20m, donc notre construction soulève à une hauteur totale de 19.2m.

Les murs extérieurs sont exécutés en double parois (15cm+10cm) séparant par une l'âme d'air de 5cm d'épaisseur. Les murs intérieurs (cloisons) sont exécutés par une brique de 10cm d'épaisseur.

Les escaliers sont exécutés en béton armé qui sont composés à deux volées avec palier de repos et palier de départ.

La structure du bâtiment présente une régularité en plan et une régularité en élévation [25].

IV.2. Conception de la structure du bâtiment

IV.2.1. Structure de contreventement

L'ouvrage rentre dans le cadre de l'application des RPA99/Version2003. D'après les conditions de l'article 3.4. A pour les structures en béton armé, on ne peut pas adopter un contreventement par portique auto stable puisque la hauteur totale du bâtiment dépasse les 14.00 m. Par conséquent, nous avons opté pour un contreventement mixte assuré par des voiles et des portiques avec justification d'interaction portiques-voiles.

Pour ce genre de contreventement il ya lieu également de vérifier les conditions suivantes:

- Les voiles de contreventement doivent reprendre au plus 20% des sollicitations dues aux charges verticales.

- Les charges horizontales sont reprises conjointement par les voiles et les portiques proportionnellement à leurs rigidités relatives ainsi qu'aux sollicitations résultant de leur interaction à tous les niveaux.
- Les portiques doivent reprendre outre les sollicitations dues aux charges verticales, au moins 25% de l'effort tranchant de l'étage [25].

IV.2.2. Le Plancher

On a opté pour un plancher semi préfabriqué (Corps creux, poutrelles et dalle de compression) qui présente les avantages suivants :

- ✓ Facilité de réalisation ;
- ✓ Réduction de la masse du plancher et par conséquent l'effet sismique ;
- ✓ Il fait fonction d'isolation acoustique et thermique ;
- ✓ Economie dans le coût de coffrage (les poutrelles et le corps creux forment un coffrage perdu).

Les planchers des différents niveaux sont prévus en corps creux [25].

IV.2.3. Maçonnerie

Toute la maçonnerie sera constituée de briques creuses revêtues d'un enduit de ciment ou de plâtre. Pour les murs extérieurs une paroi extrême de **15 cm** d'épaisseur et une paroi interne de **10 cm** d'épaisseur, les deux parois étant séparées par un vide de **5 cm** d'épaisseur, pour les murs intérieurs, une cloison simple de **10 cm** d'épaisseur.

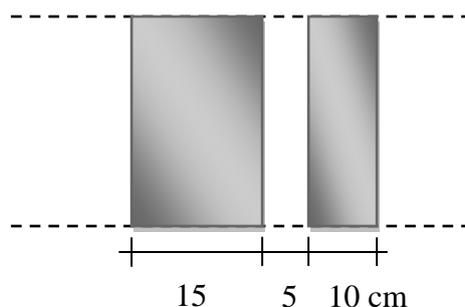


Figure IV.1 : Détail mur extérieur [25].

IV.2.4. Revêtement

Le revêtement est constitué de:

- ❖ Enduit en ciment pour les faces extérieur des murs de façade ;
- ❖ Enduit de plâtre pour les murs et les plafonds ;
- ❖ Carrelage pour les planchers et les escaliers ;
- ❖ Céramique pour la salle d'eau [25].

IV.2.5. Escaliers

Les escaliers aux différents étages sont des escaliers droits coulés sur place.

IV.2.6. Les façades

Les façades sont réalisées en double cloison par des éléments de briques comportant des ouvertures pour fenêtres à certains endroits.

IV.3. Hypothèse de calcul

Dans notre étude les hypothèses de calcul adoptées sont :

- La résistance à la compression du béton à 28 jours : $f_{c28} = 25 \text{ Mpa}$.
- La résistance à la traction du béton : $f_{t28} = 2.1 \text{ Mpa}$.
- Module d'élasticité longitudinal différé : $E_{vj} = 10818.865 \text{ Mpa}$.
- Module d'élasticité longitudinal instantané : $E_{ij} = 32164,195 \text{ Mpa}$.
- Limite élastique du l'acier : $f_e = 400 \text{ Mpa}$.

IV.4. Règles de calcul

- Le calcul et la vérification du bâtiment considéré sont basés sur les règlements suivants :

✚ Les règles parasismiques algériennes (R.P.A.99)

Elles sont applicables à toutes les catégories de constrictions courantes de configuration simple et régulière.

Le but de ce règlement est de prévoir les mesures à la conception et à l'exécution des constructions, il prévoit:

- ❖ Une classification selon les zones sismiques et le groupe d'usage d'une construction, les caractéristiques et les conditions du sol de fondations.
- ❖ Une conception sur la catégorie d'ouvrage pour prévoir un système convenable de contreventement.
- ❖ Des dimensionnements en vigueur des éléments structuraux.

Les règles du béton armé aux états limites (B.A.E.L)

Le règlement (B.A.E.L91) fait intervenir le calcul aux limites un état particulier au-delà duquel une structure cesse de remplir la fonction pour laquelle elle à été conçue, on distingue deux états limites qui sont:

IV.4.1. Etats limites ultimes (ELU)

Ils correspondent à la valeur maximale de la capacité portante de la structure dont le dépassement entraînerait la ruine de l'ouvrage.

Les états limites seront relatives à la limites soit:

- ✓ De l'équilibre statique.
- ✓ De la résistance de la structure ou de l'un de ses éléments.
- ✓ De la stabilité de forme de la construction (flambement).

La Combinaison d'action à l'état limite ultime est: $q = 1,35G + 1,5Q$

Hypothèses de calcul pour l'état limite ultime

De résistance (E.L.U.R) :

- ✓ Les sections droites planes avant déformation restent planes après déformation.
- ✓ Il n'y a pas de glissement entre les armatures et le béton.
- ✓ La résistance à la traction du béton est négligée.

De stabilité de forme :

Elle est exposée à l'article A4.43 des règles B.A.E.L91, on tient compte lors de la justification à cet état des efforts ramenés à étudier la stabilité de forme en majorant convenablement les actions à considérer dans les calculs (L'E.L.U.R).

IV.4.2. Etats limites de service (ELS)

Ils constituent les limites de déformation, de l'ouverture de fissuration, de contraintes au-delà desquelles les conditions normales d'exploitation et de la durabilité ou de l'un de ses éléments ne sont pas satisfaites, les états limites de service sont relatifs à la limite:

- De l'ouverture excessive des fissures.
- Des déformations excessives pour les éléments porteurs.
- Des vibrations inconfortables pour les usages.

La Combinaison d'action à l'état limite de service est : $q = G+Q$

✚ Hypothèses de calcul pour l'état limite de service

En plus des hypothèses citées ci-dessus, le béton et l'acier sont considérés comme des matériaux linéairement élastiques.

$$\sigma_b = E_b \times \varepsilon_b$$

$$\sigma_s = E_s \times \varepsilon_s$$

Par convention $N = \frac{E_s}{E_b}$ (coefficient d'équivalence).

IV.4.3. Actions et sollicitations

On distingue :

✚ **Actions permanentes:** telles que ;

Le poids propre, le retraitetc.

✚ **Actions variables :** telles que ;

Charge d'exploitation, charge climatique et les efforts dus à la température.

✚ **Actions accidentelles :**

Choc de véhicules, le séisme.

Les sollicitations sous les efforts (normaux et tranchants) et les moments (de flexion ou de torsion) sont calculées à partir des actions par la méthode de la résistance des matériaux (R.D.M) et lorsque celle-ci est invalide, on peut se pencher vers des méthodes forfaitaires.

IV.5. Pré dimensionnement des éléments et descente des charges

Le pré dimensionnement est très important, son but est de déterminer une épaisseur économique afin d'éviter un sur plus d'acier et béton.

IV.5.1. Pré dimensionnement des planchers

Les planchers sont des plaques minces dont l'épaisseur est faible par rapport à leurs dimensions en plan.

IV.5.1.1. Dalle à corps creux

On a opté pour des planchers à corps creux et ceci pour les raisons suivantes :

- la facilité de réalisation.
- Les portées de l'ouvrage sont moins importantes (max 4.30 m).
- Diminuer le poids de la structure et par conséquent le résultant de la force sismique.

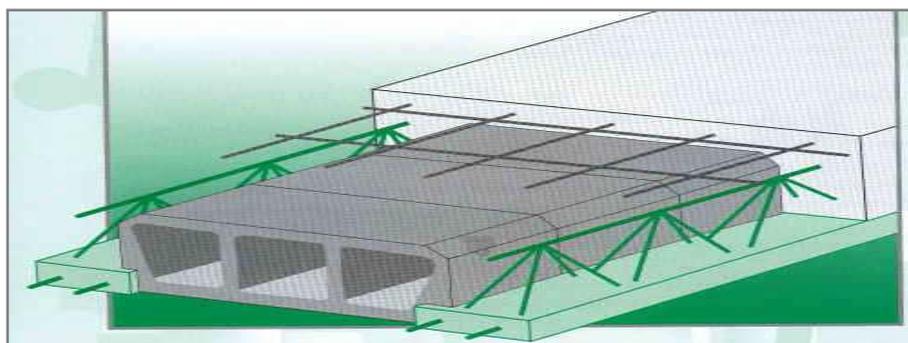
L'épaisseur des dalles dépend le plus souvent des conditions d'utilisation et de résistance.

✚ Résistance au feu

D'après BEAL 91

- $e = 7 \text{ cm}$ pour une heure de coupe-feu.
- $e = 11 \text{ cm}$ pour deux heures de coupe-feu.
- $e = 17,5$ pour un coupe feu de quatre heure

✚ Condition de flèche



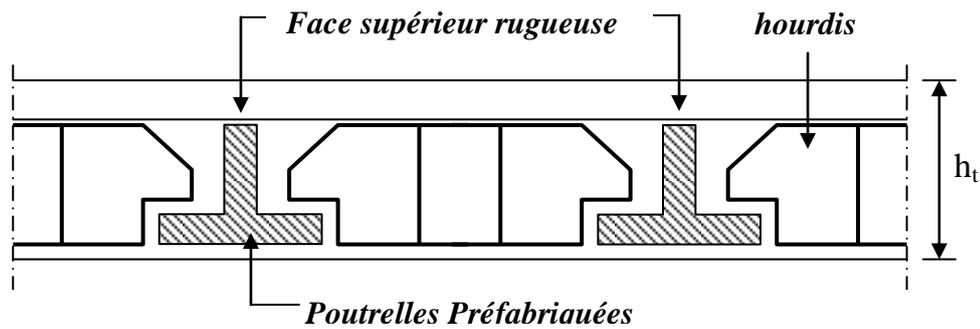


Figure IV.2 : Dalle à corps creux [25].

Les planchers sont constitués de poutrelles préfabriquées associées aux corps creux. Pour le Pré dimensionnement de la hauteur des poutrelles en utilisera la formule empirique suivante :

$$\frac{L}{25} < h_t < \frac{L}{20}$$

L : la portée de la poutrelle mesurée à nu des appuis

On a: L =350 cm d'ou $14 < h_t < 17.5$.

Donc l'épaisseur de: $h_t = 20$ cm

$$\text{Tel que } h_t = d + e \begin{cases} e = 16\text{cm} \\ d = 4\text{cm} \end{cases}$$

✚ Isolation phonique

Selon les règles techniques «CBA93» en vigueur en Algérie l'épaisseur du plancher doit être supérieure ou égale à 13cm pour obtenir une bonne isolation acoustique.

On limite donc notre épaisseur à: $e = 16$ cm

Conclusion

$$e = \max \{ 16; 10; 20; 16 \} \text{ (cm)}$$

$$e = (16+4) \text{ cm} \Rightarrow \mathbf{e = 20 \text{ cm}}$$

IV.5.2. Predimensionnement des voiles

Le Pré dimensionnement des murs en béton armé justifié par l'article 7.7 de **RPA 99**.

Les voiles servent, d'une part, à contreventer le bâtiment en reprenant les efforts horizontaux (séisme et/ou vent), et d'autre part, à reprendre les efforts verticaux (poids propre et autres) qu'ils transmettent aux fondations.

- Les charges verticales : charges permanentes et surcharges.
- Les actions horizontales : effets de séisme et/ou du vent.
- Les voiles assurant le contreventement sont supposés pleins.
- Seuls les efforts de translation seront pris en compte ceux de la rotation ne sont pas connus de la cadre de ce pré dimensionnement.

D'après le **RPA 99** article 7.7.1 sont considérés comme voiles les éléments satisfaisants à la condition: ($L \geq 4e$). Dans le cas contraire, les éléments sont considérés comme des éléments linéaires.

Avec :

- L : longueur de voile.
- e : épaisseur du voile.

L'épaisseur minimale est de 16 cm. De plus, l'épaisseur doit être déterminée en fonction de la hauteur libre d'étage h_e et des conditions de rigidité aux extrémités.

Les voiles sont des murs en béton armé justifiant à l'article **7.7.1 de RPA99** :

$$e_{\min} = 16\text{cm.}$$

A partir de la hauteur d'étage $h_e = 3,20\text{m}$ et de condition de rigidité aux extrémités suivantes :

$$e \geq h/20 \quad \Rightarrow \quad e \geq 16\text{cm}$$

$$e \geq \max (e_{\min} , h_e/25, h_e/22 , h_e /20)$$

$$e \geq \max (16 ; 12.8; 14.55; 16)$$

$$e \geq 16 \text{ cm}$$

On adopte : $e=16\text{cm}$; $e=18\text{cm}$; $e=20\text{cm}$

IV.5.3. Pré dimensionnement des escaliers

Dans une construction, la circulation entre les étages se fait par l'intermédiaire des escaliers ou par l'ascenseur. Les escaliers sont constitués par des volées préfabriquées en béton armé reposant sur des paliers coulés en place, la jonction palier – volée est assurée par des piques de scellement s'opposant à l'effort transmis par la paillasse au palier.

Le choix de ce type d'escalier a été retenu pour les avantages suivants :

- Rapidité d'exécution.
- Utilisation immédiate de l'escalier.

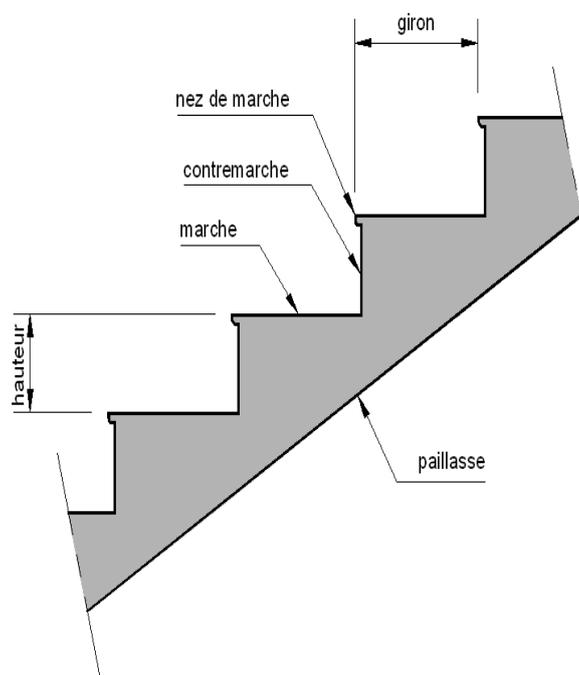


Figure IV.3: Schéma d'escalier.

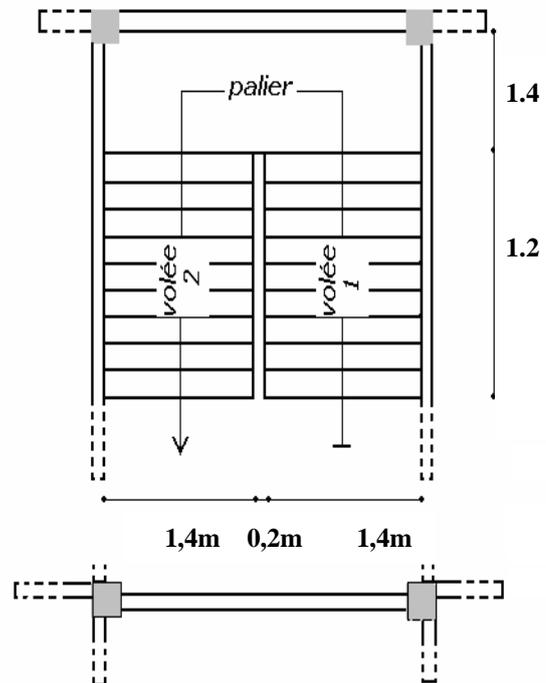


Figure IV.4: Vue en plan.

- Caractéristiques techniques

➤ Pour étage courant et RDC

Hauteur : $H=3,2\text{m}$.

Giron : $g=30\text{ cm}$.

Hauteur de la marche à partir de la formule de BLONDEL :

$$\text{On a: } 59 < 2h + g < 66 \Rightarrow 14,5 < h < 18.$$

h : varié de 14cm à 20cm.

g : varié de. 22cm à 33cm.

Pour: h=16 cm

$$N_c = H/h \quad N_c : \text{nombre des contremarches.}$$

$$N_c = 320/16$$

On aura 20 contre marche entre chaque étage " N_c "

10 contre marche

$$N = N_c - 1 = 9 \text{ marche}$$

Inclinaison de la paillasse

$$\text{Tga} = H' / L'$$

$$H' = N_c \times h \Rightarrow H' = 10 \times 16 \Rightarrow H' = 1.60\text{m}$$

$$L' = (n-1) \times g \Rightarrow L' = (10-1) \times 30 \Rightarrow L' = 2.7\text{m}$$

$$\text{Tga} = 1.60/2.7 = 0.592 \Rightarrow \alpha = 30.63^\circ.$$

$$\text{La longueur de volée est : } L = 1.60 / \sin \alpha \Rightarrow L = 3.14\text{m}$$

$$\text{L'épaisseur de la paillasse est : } L/30 < e < L/20 \Rightarrow 314/30 < e < 314/20$$

$$\Rightarrow 10.47 < e < 15.70 \quad \Rightarrow e = 15\text{cm.}$$

L'épaisseur du palier est la même que celle de la paillasse $e = 15\text{cm.}$

IV.5.4. Pré dimensionnement des poutres

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

Les poutres seront pré dimensionnées selon les formules empiriques données par BAEL91 et vérifiées par la suite selon le RPA99 (v2003).

IV.5.4.1. Poutres principales (porteuses)

D'après le BAEL91

- ♦ $L/15 \leq h_t \leq L/10$ h_t : hauteur de la poutre.
- $0.3h_t \leq b \leq 0.7h_t$ b : largeur de la poutre.

Avec : L : portée maximale de poutre.

Nous avons : $L = 4.50$ m.

$$L/15 \leq h_t \leq L/10 \quad \Rightarrow \quad 30 \text{ cm} \leq h_t \leq 45 \text{ cm}.$$

On prend $h_t = 40$ cm.

$$0.3h_t \leq b \leq 0.7h_t \quad \Rightarrow \quad 12 \text{ cm} \leq b \leq 28 \text{ cm}$$

On prend $b = 30$ cm

Les dimensions des poutres doivent respecter l'article:7.5.1 de RPA 99 suivant :

- ♦ $b \geq 20$ cm. \Rightarrow $b = 30 \text{ cm} > 20 \text{ cm}$ vérifie.
- $h \geq 30$ cm. \Rightarrow $h = 40 \text{ cm} > 30 \text{ cm}$ vérifie.

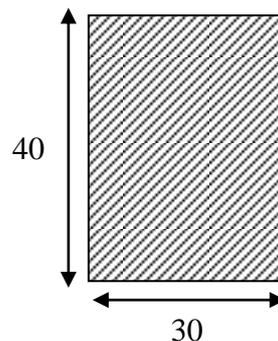


Figure IV.5: Dimensions des poutres principales

IV.5.4.2. Poutres secondaires (non porteuses)

D'après le BAEL91:

- ♦ $L/15 \leq h_t \leq L/10$ h_t : hauteur de la poutre.
- $0.3h_t \leq b \leq 0.7h_t$ b : largeur de la poutre.

Avec : L : portée maximale de poutre.

Nous avons : $L = 3.50$ m.

$$L/15 \leq h_t \leq L/10 \quad \Rightarrow \quad 23.33\text{cm} \leq h_t \leq 35\text{cm}.$$

On prend $h=35$ cm.

$$0.3h_t \leq b \leq 0.7h_t \quad \Rightarrow \quad 10.5\text{cm} \leq b \leq 24.5\text{cm}.$$

On prend $b=30$ cm.

Les dimensions des poutres doivent respecter l'article : 7.5.1 de RPA 99 suivant

- $b \geq 20$ cm. $\Rightarrow b = 30\text{cm} > 20\text{cm}$ vérifie.
- $h \geq 30$ cm. $\Rightarrow h = 35\text{cm} > 30\text{cm}$ vérifie.
- $h/b \leq 4$ $\Rightarrow h/b = 1.16 < 4$ vérifie.

Poutres principales : $(b \times h) = (30 \times 40)$ cm²

Poutres secondaires : $(b \times h) = (30 \times 35)$ cm²

E : module d'élasticité différée du béton.

I : moment d'inertie de la section $I = b h^3/12$

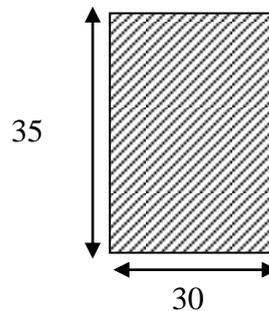


Figure IV.6: Dimensions des poutres secondaires

IV.5.5. Pré dimensionnement des poteaux

Selon le RPA 1999

$$L_c/a \leq 14.4 \quad \longrightarrow \quad a \geq L_c/14.4$$

Avec : a : petite dimension.

L_c : longueur de flambement

$$L_0 = 0.7 L_0 \quad \longrightarrow \quad L_c = 0.7 \times 3.20 = 2.24\text{m}$$

$$L_0 = 3.20 \text{ m}$$

Selon R.P.A. minimum de section de poteaux (25×25).

Donc : $a \geq 2.24/14.4=15.56\text{cm}$

Section des poteaux (30 x 40) cm².

IV.5.6. Evaluation des charges

L'évaluation des charges et surcharges consiste à calculer successivement pour chaque élément porteur de la structure, la charge qui lui revient à chaque plancher et ce jusqu'à la fondation.

Les différents charges et surcharges existantes sont :

- ♦ Les charges permanentes (**G**).
- ♦ Les surcharges d'exploitation (**Q**).

IV.5.6.1. Les planchers

La terrasse est inaccessible et réalisée en plancher à corps creux surmonté de plusieurs couches de protection en forme de pente facilitant l'évacuation des eaux pluviales.

- Charge permanente

Tableau IV.1 : Evaluation des charges permanentes du plancher terrasse.

Matériaux	Epaisseur (cm)	d (kg/m ³)	G (kg/m ²)
1- Protection en gravillon	5	1700	85
2- Etanchéité multicouche	/	/	12
3- Forme de pente	10	2200	220
4- Isolation liège	4	400	16
5- Dalle en corps creux	16+4	1400	280
6- Enduit plâtre	2	1000	20

$$G = 633\text{kg/m}^2$$

$$Q = 100 \text{ kg/m}^2$$

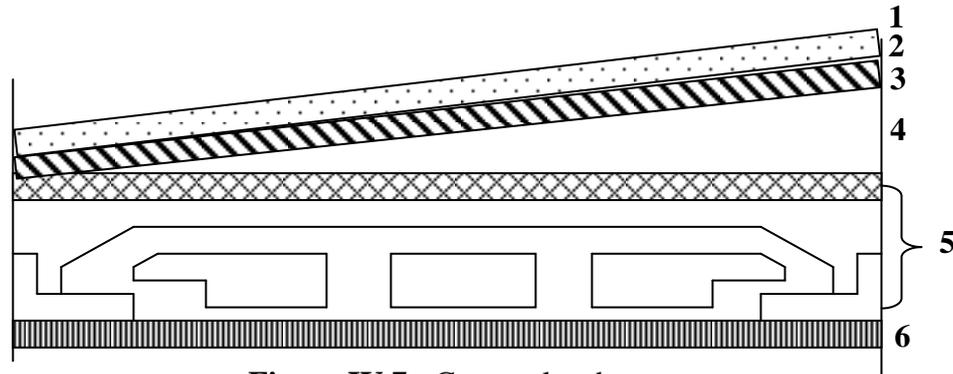


Figure IV.7 : Coupe plancher terrasse.

✚ Planchers étages courant+RDC

Les planchers des étages courant sont en corps creux.

- Charge permanente

Tableau IV.2 : Evaluation des charges permanentes du plancher courant.

Matériaux	Epaisseur (cm)	d (kg/m ³)	G (kg/m ²)
1-Carrelage	2	2200	44
2-Mortier de pose	2	2000	40
3-Lit de sable	2	1800	36
4-Dalle en corps creux	16+4	1400	2
5-Enduit plâtre	2	1000	20
6-cloison de séparation	/	/	75

$$G = 499 \text{ kg/m}^2$$

$$Q = 150 \text{ kg/m}^2$$

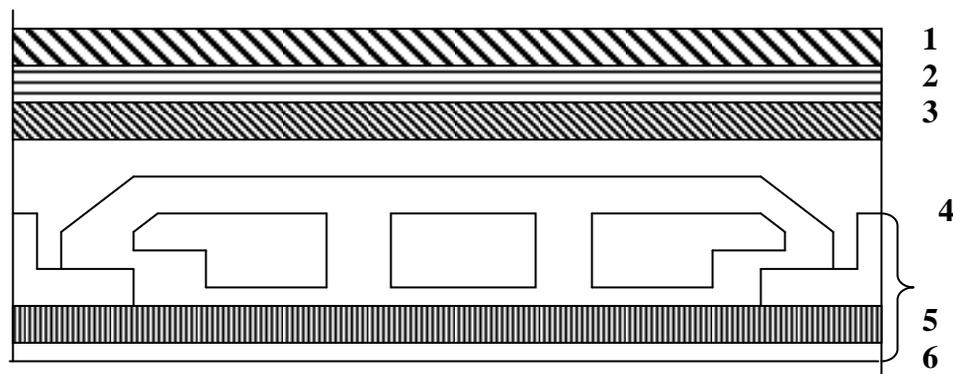


Figure IV.8 : Coupe plancher étage courant.

IV.5.6.2. L'acrotère

$$S = (0.10 \times 0.05) / (2) + (0.60 \times 0.1) + (0.10 \times 0.10) = 0.0725 \text{ m}^2$$

$$P = (0.0725 \times 2500) = 181.25 \text{ Kg/ml}$$

- Enduit : ep 2 cm **G** = 55 Kg/ml
- Charge permanente : **G** = 181.25 + 55 **G** = 236.25 Kg/ml
- Charge d'exploitation : **Q** = 100 Kg/ml

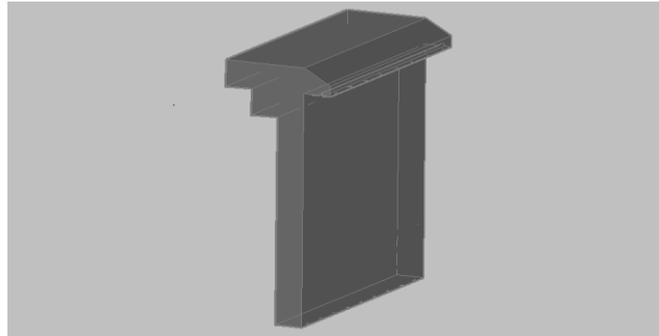


Figure IV.9 : Schéma de l'acrotère

IV.5.6.3. Mur extérieur

Tableau IV.3: Evaluation des charges permanentes de mur extérieur.

MATERIAUX	EPAISSEUR (cm)	D (Kg/m ³)	G (Kg/m ²)
Brique creux	25	1400	350
Enduit plâtre	2	1200	24
Enduit ciment	2	2000	40
			G = 414 Kg/m²

IV.5.6.4. L'escalier

✚ Palier

Tableau IV.4 : Evaluation des charges permanentes de palier

MATERIAUX	EPAISSEUR (cm)	D (Kg/m ³)	G (Kg/m ²)
Carrelage	2	2200	44
Mortier de pose	2	2000	40
Lit de sable	2	1800	36
Dalle en BA	15	2500	350
Enduit ciment	2	2000	40

$$G = 510 \text{ kg/m}^2$$

$$Q = 250 \text{ kg/m}^2$$

✚ Volée paillasse

Tableau IV.5 : Evaluation des charges permanentes de volée.

MATERIAUX	Epaisseur (cm)	d (kg/m ³)	G (kg/m ²)
Carrelage	2	2200	44
Mortier de pose	2	2000	40
Lit de sable	2	1800	36
Marche	16	2200	$2200 \times 0,16/2 = 176$
Paillasse	15	2500	$(2500 \times 0,15) / \cos 30,63 = 436$
Enduit ciment	2	2000	40
Gardes corps	/	/	90

$$G = 862 \text{ kg/m}^2$$

$$Q = 250 \text{ kg/m}^2$$

IV.6. Présentation de logiciel "ROBOT2010"

Le logiciel **Robot 2010 (Robot Structural Analysis)** est un progiciel CAO/DAO destiné à modéliser, analyser et dimensionner les différents types de structures. Robot permet de créer les structures, les calculer, vérifier les résultats obtenus, dimensionner les éléments spécifiques de la structure ; la dernière étape gérée par Robot est la création de la documentation pour la structure calculée et dimensionnée [32].

ROBOT 2010 est un logiciel de calcul et d'optimisation des structures. Il utilise la méthode d'analyse par éléments finis pour étudier les structures planes et spatiales de type :

- ✦ Treillis.
- ✦ Portiques.
- ✦ Structures mixtes.
- ✦ Grillages de poutres.
- ✦ Plaques.
- ✦ Coques.
- ✦ Contraintes planes.
- ✦ Déformations planes.
- ✦ Eléments axisymétriques.
- ✦ Eléments Volumiques.

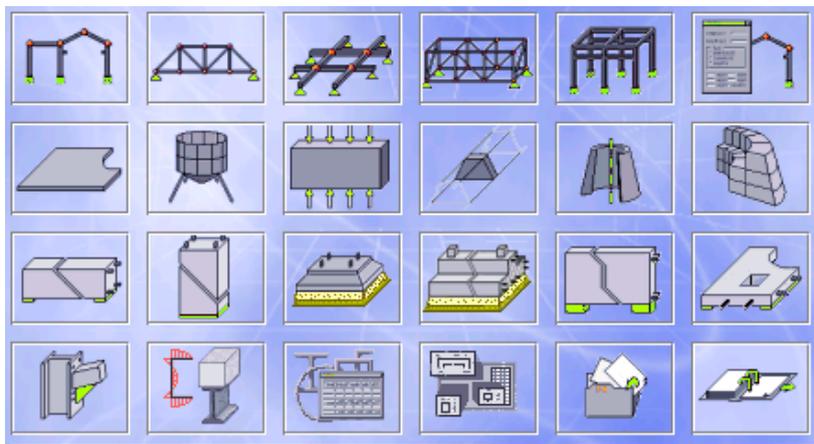


Figure IV.10 : Les différents types de structures [32].

Les caractéristiques principales du logiciel Robot 2010 sont les suivantes :

- Définition de la structure en mode graphique par un éditeur conçu a cet effet.
- Possibilité de présentation des différents types de résultats de calcul (efforts internes, déplacements, travail simultané en plusieurs fenêtres ouvertes etc.).
- Possibilité de calculer (ou dimensionner) une structure et d'en étudier simultanément une autre (architecture, multi thread)
- Possibilité d'effectuer plusieurs types d'analyse des structures (statique et dynamique).
- Possibilité de composer librement les impressions (note de calcul, captures d'écran, composition de l'impression, copie des objets vers d'autres logiciels.)

IV.6.1. Modélisation

Robot 2010 permet de modéliser tout type de structure en 2D ou en 3D composées d'éléments barres, poutres, éléments surfaciques ou volumiques. Il permet d'introduire parfaitement la géométrie, le chargement, les matériaux, les conditions aux frontières voire même les règlements et normes adoptés [33].

IV.6.2. Modélisation de la structure

L'analyse dynamique d'une structure représente une étape primordiale dans l'étude générale d'un ouvrage en Génie Civil dans une zone sismique, ou éventuellement soumis à des actions accidentelles :(vent extrême, explosion.....).

La résolution de l'équation du mouvement d'une structure tridimensionnelle en vibrations libres ne peut se faire manuellement à cause du volume de calcul. L'utilisation d'un logiciel préétablie en se basant sur la méthode des éléments finis par exemple « SAP2000, ETABS, ROBOT... » avec une modélisation adéquate de la structure, peut aboutir à une meilleure définition des caractéristiques dynamiques propres d'une structure donnée [34].

L'étude des éléments de contreventement consiste en l'évaluation et la distribution des charges verticales et horizontales aux portiques et voiles. Cette étude est effectuée par la méthode des éléments finis à l'aide du logiciel « ROBOT 2010 ». Pour la détermination des sollicitations et des déformations correspondantes ; le ferrailage étant effectué conformément aux prescriptions règlementaires (BAEL 91 et RPA 99version 2003) [25].

a. Modélisation des éléments structuraux

- 1)- Les poutres et les poteaux sont modélisés par des éléments «Poutre-Poteau ».
 - Les poutres entre deux nœuds de même niveau « i ».
 - Les poteaux entre deux nœuds de différents niveaux « i et i+1 ».
- 2)- Les voiles sont représentés par des éléments coques « voile » à quatre nœuds.
- 3)- Chaque plancher a été modélisé par un diaphragme rigide. Ces planchers sont supposés indéformables dans leurs plans.

b. Modélisation de la masse

La masse des planchers est calculée de manière à inclure la quantité βQ RPA99/version 2003 (dans notre cas $\beta = 0,2$) correspondant à la surcharge d'exploitation.

La masse des éléments concentrés non structuraux, comme l'acrotère et les murs extérieurs (maçonnerie), a été répartie sur les poutres concernées.

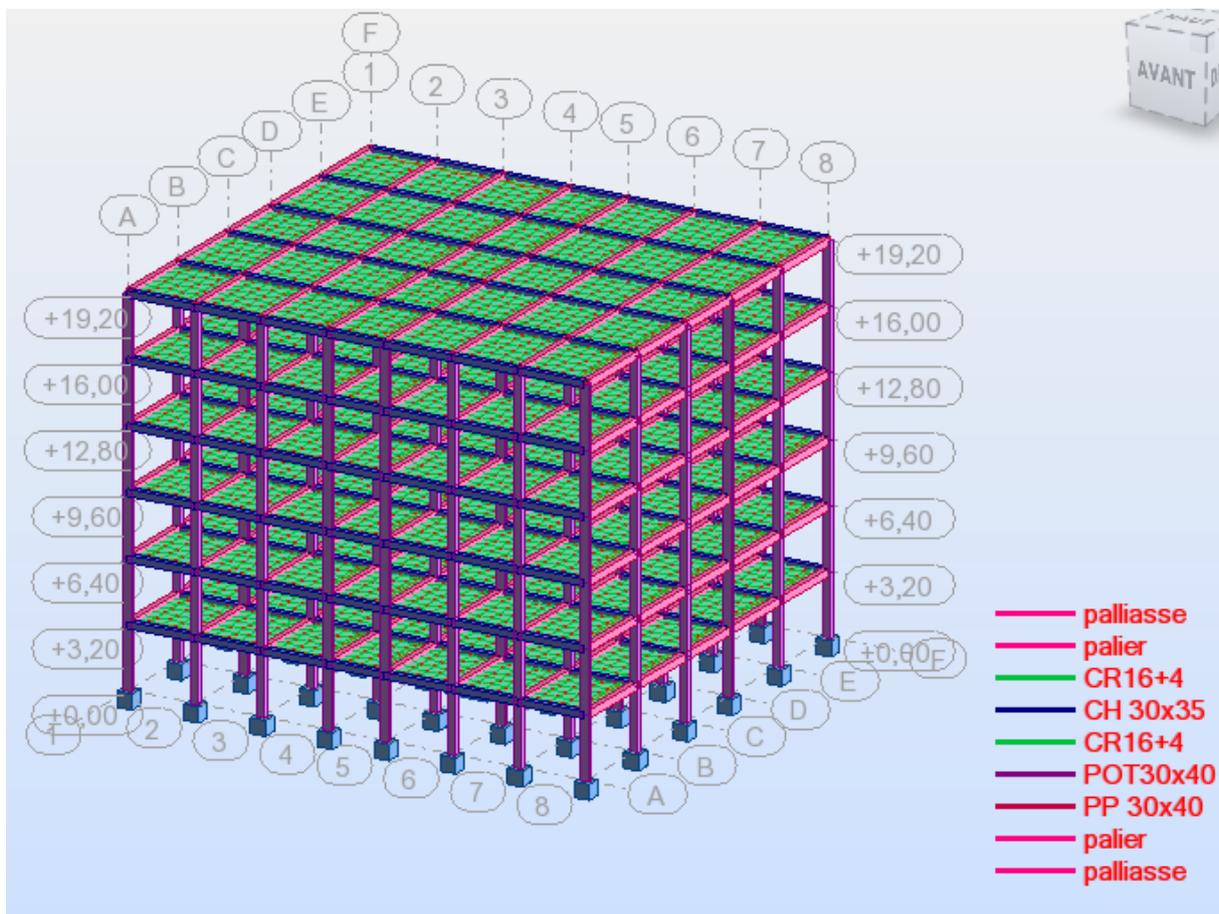


Figure IV.11: Modèle de la structure.

IV.7. Les données géométriques de la structure

Type de structure : Coque

Coordonnées du centre géométrique de la structure:

$$X = 12.000 (m)$$

$$Y = 11.000 (m)$$

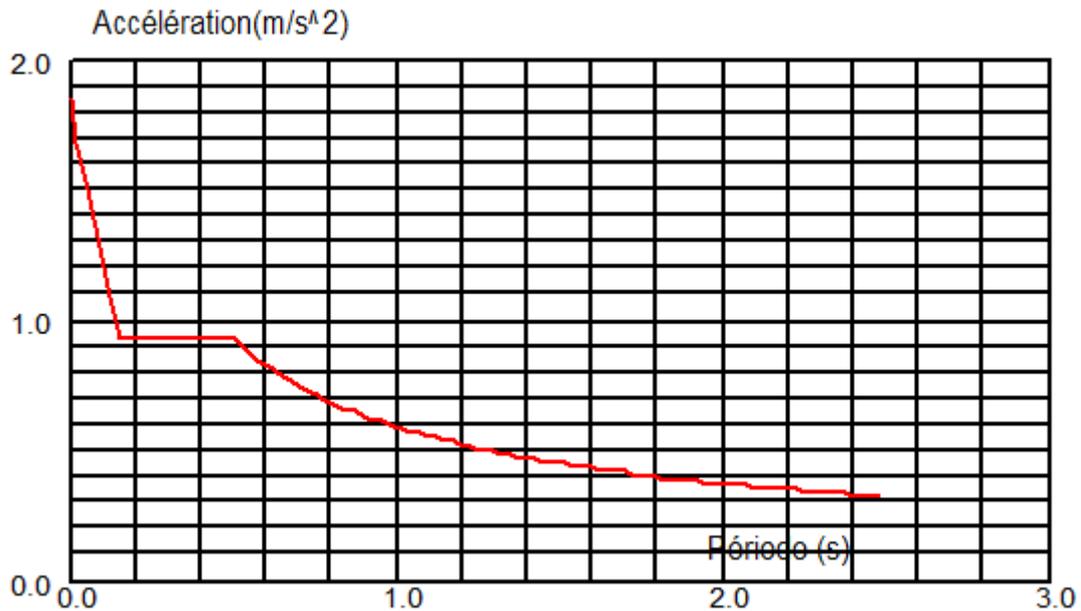
$$Z = 9.600 (m)$$

- **Coordonnées du centre de gravité de la structure:**

X = 12.000 (m)

Y = 11.003 (m)

Z = 10.972 (m)



Données:

Zone : IIa

Usage : 2

Assise : S3

Coefficient de qualité : 1.150

Coefficient de comportement : 5.000

Amortissement : $\alpha = 7.00 \%$

Paramètres du spectre:

Correction de l'amortissement : $\eta = [7 / (2 + \alpha)]^{0.5} = 0.882$

A = 0.150

T1 = 0.150 T2 = 0.500

IV.8. Modes propres de vibration de la structure sans voile

Le tableau ci-dessous présente les périodes et les facteurs de participation massique de chaque mode :

Tableau IV.6 : Période et facture de participation massique du modèle du référence.

Cas/Mode	Fréquence [Hz]	Période [sec]	Masses Cumulées UX [%]	Masses Cumulées UY [%]	Masses Cumulées UZ [%]	Masse Modale UX [%]	Masse Modale UY [%]	Masse Modale UZ [%]
4/ 1	1,22	0,82	0,00	84,31	0,00	0,00	84,31	0,00
4/ 2	1,39	0,72	0,67	84,31	0,00	0,66	0,00	0,00
4/ 3	1,47	0,68	83,41	84,32	0,00	82,74	0,00	0,00
4/ 4	3,64	0,27	83,41	94,00	0,00	0,00	9,69	0,00
4/ 5	4,23	0,24	83,48	94,00	0,00	0,07	0,00	0,00
4/ 6	4,44	0,23	93,49	94,00	0,00	10,01	0,00	0,00
4/ 7	6,05	0,17	93,49	97,38	0,00	0,00	3,38	0,00
4/ 8	7,17	0,14	93,50	97,38	0,00	0,02	0,00	0,00
4/ 9	7,52	0,13	97,09	97,38	0,00	3,59	0,00	0,00
4/ 10	8,37	0,12	97,09	98,97	0,00	0,00	1,59	0,00

On remarque que la participation modale cumulée atteint les 90 % dans le 6ème mode.

- Les figures suivantes montrent les 03 modes de vibration :

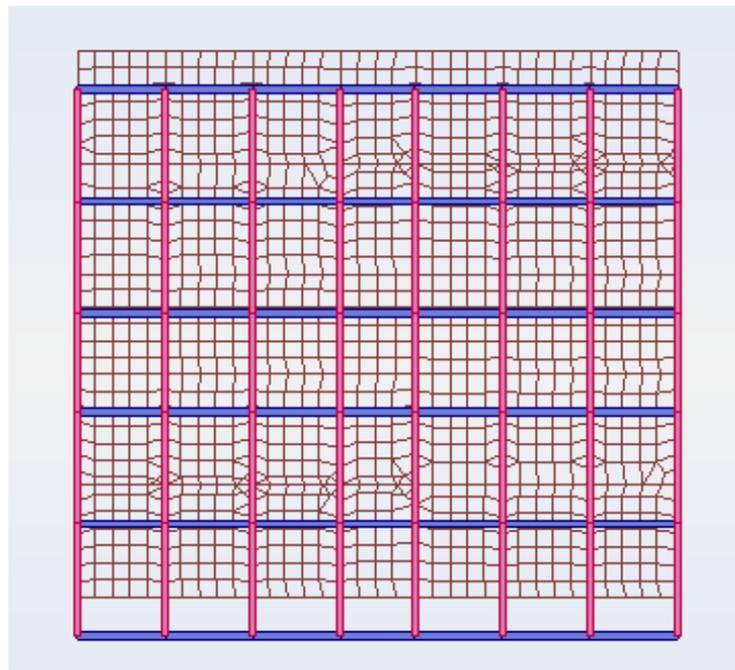


Figure IV.12 : Mode 1 « Translation sens y » avec $T = 0.72$ sec.

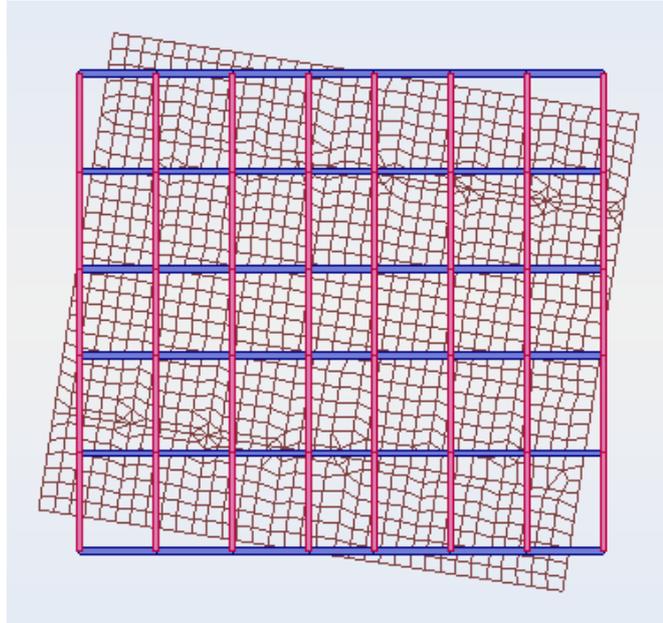


Figure IV.13 : Mode 2 « Rotation sens Z » $T = 0.68$ sec

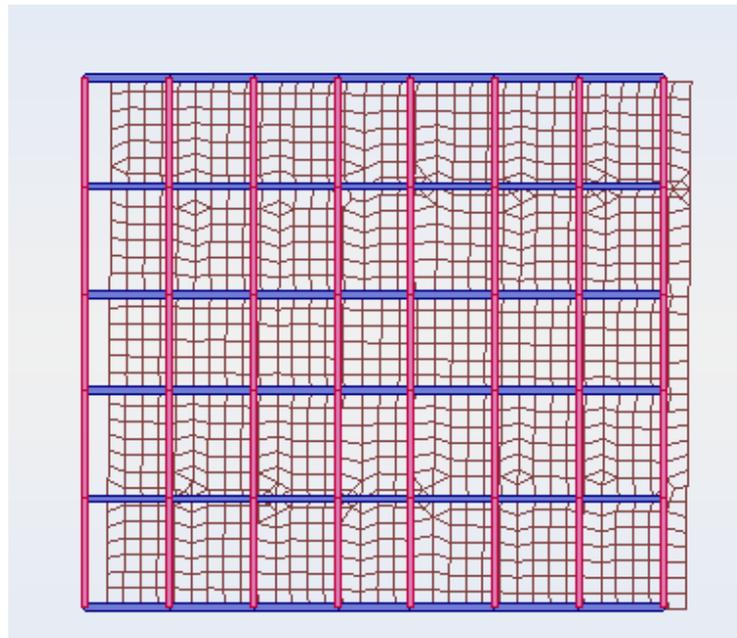


Figure IV.14 : Mode 3 « Translation sens x » avec $T = 0.82$ sec.

- **Commentaire :**

Le 2^{ème} mode est une rotation pure suivant l'axe Z. et Les modes 1 et 3 sont des modes de translation.

Tableau IV.7 : Cas des charges appliquées.

Cas	Type de charge	Liste	Colonne1	Colonne2	Colonne3	Colonne4
2:G	(EF) surfacique uniforme	306A310	PX=0,0	PY=0,0	PZ=-4,50	global
3:Q	(EF) surfacique uniforme	306A310	PX=0,0	PY=0,0	PZ=-1,00	global
2:G	charge uniforme	224A227 253A257 263A268 293A299 304 305	PX=0,0	PY=0,0	PZ=-2,25	global
2:G	(EF) surfacique uniforme	134A137 963A966 1097A1100 1231A1234 1365A1368	PX=0,0	PY=0,0	PZ=-3,20	global
3:Q	(EF) surfacique uniforme	134A137 963A966 1097A1100 1231A1234 1365A1368	PX=0,0	PY=0,0	PZ=-1,50	global
1:PP	(EF) surfacique uniforme	134A137 963A966 1097A1100 1231A1234 1365A1368	PX=0,0	PY=0,0	PZ=-1,00	global

Tableau IV.8 : Les différentes combinaisons

Combinaison	Nom	Type d'analyse	Nature de la combinaison	Nature du cas	Définition
7 (C)	1.35 (PP+G) +1.5Q	Combinaison linéaire	ELU	permanente	$(1+2)*1.35+3*1.50$
8 (C)	PP+G+Q	Combinaison linéaire	ELS	permanente	$(1+2+3)*1.00$
9 (C) (CQC)	PP+G+Q+Ex	Combinaison linéaire	ACC	sismique	$(1+2+3+5)*1.00$
10 (C) (CQC)	0.8 (PP+G)-Ey	Combinaison linéaire	ACC	sismique	$(1+2+3)*1.00+5*-1.00$
20 (C) (CQC)	(PP+G)+Q-Ex	Combinaison linéaire	ACC	sismique	$(1+2)*0.80+6*-1.00$
12 (C) (CQC)	(PP+G)+Q-Ey	Combinaison linéaire	ACC	sismique	$(1+2+3)*1.00+6*-1.00$
13 (C) (CQC)	(PP+G)+Q+1.2*Ex	Combinaison linéaire	ACC	sismique	$(1+2+3)*1.00+5*1.20$
14 (C) (CQC)	(PP+G)+Q-1.2*Ex	Combinaison linéaire	ACC	sismique	$(1+2+3)*1.00+5*-1.20$
15 (C) (CQC)	(PP+G)+Q+1.2*Ey	Combinaison linéaire	ACC	sismique	$(1+2+3)*1.00+6*1.20$
16 (C) (CQC)	(PP+G)+Q-1.2*Ey	Combinaison linéaire	ACC	sismique	$1+2+3)*1.00+6*-1.20$
17 (C) (CQC)	0.8 (PP+G) +Ex	Combinaison linéaire	ACC	sismique	$(1+2)*0.80+5*1.00$
18 (C) (CQC)	0.8 (PP+G)-Ex	Combinaison linéaire	ACC	sismique	$(1+2)*0.80+5*-1.00$
19 (C) (CQC)	0.8 (PP+G)+Ey	Combinaison linéaire	ACC	sismique	$1+2)*0.80+6*1.00$
20 (C) (CQC)	PP+G+Q+Ey	Combinaison linéaire	ACC	sismique	$(1+2+3+6)*1.00$

IV.9. Conclusion

Ce chapitre nous a permis de voir en détail l'ensemble des étapes à suivre dans le calcul d'un bâtiment, ainsi que le choix de ces éléments ; donc la conception de l'ouvrage.

Ainsi que nous a permis d'un côté d'assimiler les différentes techniques et logiciel de calcul comme le Robot, aussi la réglementation régissant les principes de conception et de calcul des ouvrages dans le domaine du bâtiment et d'approfondir ainsi nos connaissances [35].

Chapitre

V

Etude de l'influence des paramètres de modélisation.

V.1. Introduction

Il existe plusieurs facteurs influençant le comportement dynamiques des structures contreventées par voiles et portiques. Dans notre étude, on s'intéresse aux paramètres suivants: l'épaisseur des voiles (e), le nombre de voiles et la position des voiles dans chaque direction de contreventement. Ces facteurs sont considérés comme des facteurs d'entrée dans le processus d'optimisation. Pour les facteurs de sortie sont considérés, la période fondamentale de la structure (T), le déplacement de la structure selon la direction x noté U_x , le déplacement de la structure selon la direction y noté U_y et le facteur économique représenté par le poids total des voiles de contreventement. Donc pour notre étude, on a cinq paramètres d'entrée et quatre paramètres de sortie.

V.2. Plan d'expériences

Un plan d'expériences de 27 essais L27 est adopté pour la réalisation des différentes combinaisons possibles selon les tables de Taguchi, qui correspond à 5 facteurs avec 3 niveaux pour chacun de ces facteurs. Le tableau ci-dessous résume les différents facteurs d'entrée et leurs niveaux de variation ainsi que les facteurs de sortie.

Tableau V.1 : Paramètres d'entrée et de sortie pour le processus d'optimisation.

Paramètres d'entrée	Paramètres de sortie
Epaisseur des voiles (e) en cm $e = (16.0 - 18.0 - 20.0).$	- Période fondamentale de la structure (T) en s. - Déplacement de la structure selon la direction X (U_x) en cm. - Déplacement de la structure selon la direction Y (U_y) en cm. - Poids total des voiles (P) en kN.
Position des voiles /Y (Pos/V/Y) $Pos/V/Y = (Pos1/V/Y - Pos2/V/Y - Pos3/V/Y)$	
Position des voiles /X (Pos/V/X) $Pos/V/X = (Pos1/V/X - Pos2/V/X - Pos3/V/X)$	
Nombre de voiles /Y (Nbr/V/Y) $Nbr/V/Y = (2 - 4 - 6)$	
Nombre de voiles /X (Nbr/V/X) $Nbr/V/X = (2 - 4 - 6)$	

La position des voiles dans les deux directions X et Y est représentée dans les figures ci-dessous :

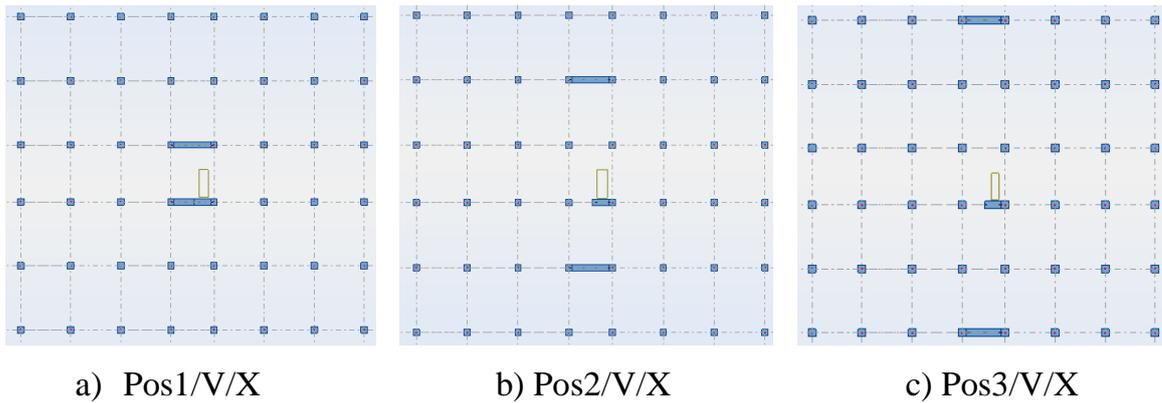


Figure V.1 : Position de voiles selon la direction X (cas de 2 voiles).

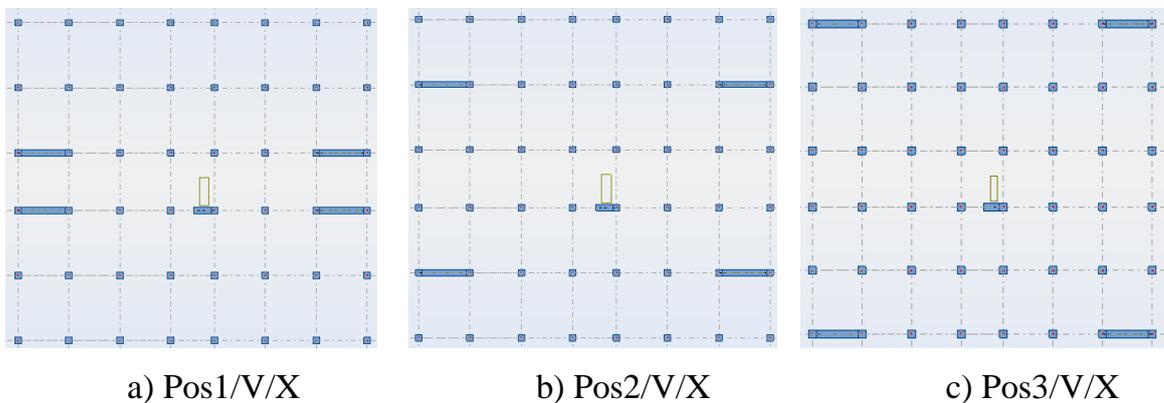


Figure V.2 : Position de voiles selon la direction X (cas de 4 voiles).

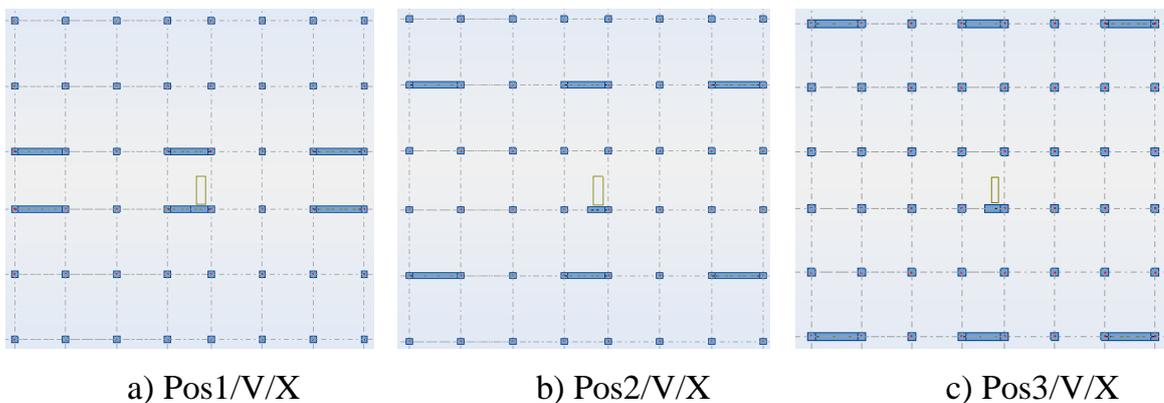


Figure V.3 : Position de voiles selon la direction X (cas de 6 voiles).

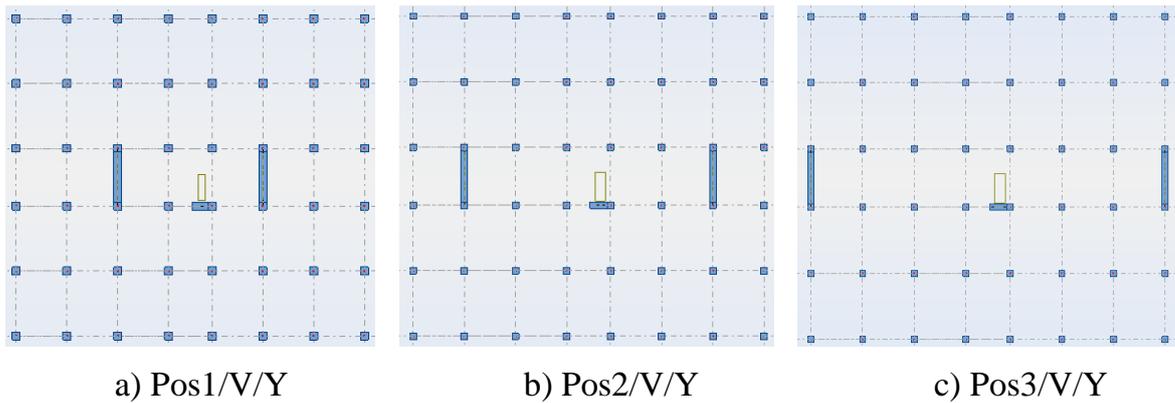


Figure V.4 : Position de voiles selon la direction Y (cas de 2 voiles).

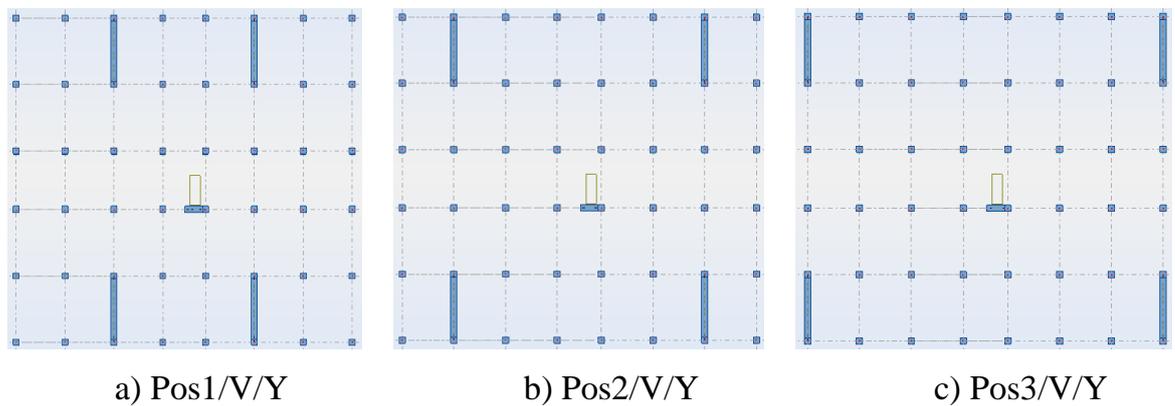


Figure V.5 : Position de voiles selon la direction Y (cas de 4 voiles).

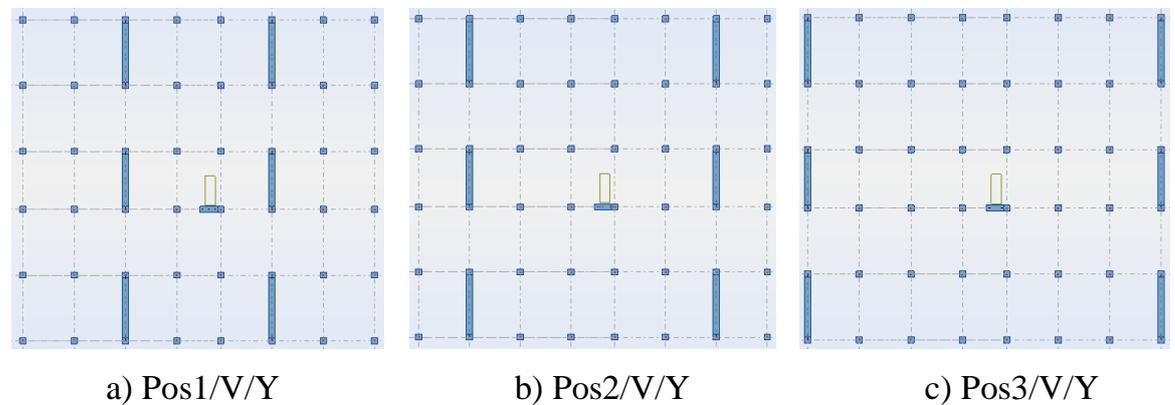


Figure V.6 : Position de voiles selon la direction Y (cas de 6 voiles).

Le plan d'expérience de Taguchi L27 est représenté par le tableau ci-dessous :

Tableau V.2 : Table de Taguchi L27.

N°	Epaisseur/ Voile (cm)	Position/ Voiles/Y	Position/ Voiles/X	Nombre/ Voiles/Y	Nombre/ Voiles/X
1	16	Po1Y	Pos1X	2	2
2	16	Po1Y	Pos1X	2	4
3	16	Po1Y	Pos1X	2	6
4	16	Po2Y	Po2X	4	2
5	16	Po2Y	Po2X	4	4
6	16	Po2Y	Po2X	4	6
7	16	Po3Y	Po3X	6	2
8	16	Po3Y	Po3X	6	4
9	16	Po3Y	Po3X	6	6
10	18	Po1Y	Po2X	6	2
11	18	Po1Y	Po2X	6	4
12	18	Po1Y	Po2X	6	6
13	18	Po2Y	Po3X	2	2
14	18	Po2Y	Po3X	2	4
15	18	Po2Y	Po3X	2	6
16	18	Po3Y	Pos1X	4	2
17	18	Po3Y	Pos1X	4	4
18	18	Po3Y	Pos1X	4	6
19	20	Po1Y	Po3X	4	2
20	20	Po1Y	Po3X	4	4
21	20	Po1Y	Po3X	4	6
22	20	Po2Y	Pos1X	6	2
23	20	Po2Y	Pos1X	6	4
24	20	Po2Y	Pos1X	6	6
25	20	Po3Y	Po2X	2	2
26	20	Po3Y	Po2X	2	4
27	20	Po3Y	Po2X	2	6

Dans ce tableau chaque ligne correspondant à une simulation à réaliser, en utilisant le logiciel RSA V2010. Les résultats à stocker sont : la période fondamentale de la structure, le déplacement U_x selon la direction X, le déplacement U_y selon la direction Y et le poids total des voiles de contreventement.

V.3. Résultats de la modélisation

Dans ce chapitre il s'agit, en premier lieu, de présenter les résultats obtenus de la modélisation selon la table L27 de Taguchi. Ensuite nous allons évaluer l'influence des facteurs d'entrée (épaisseur des voiles (e) , position des voiles selon la direction X

(Pos/V/X), position des voiles selon la direction Y (Pos/V/Y), nombre de voiles selon la direction X (Nbr/V/X) et nombre de voiles selon la direction Y (Nbr/V/Y) sur les différents paramètres de sortie étudiés, à savoir la période fondamentale de la structure (T), le déplacement de la structure U_x selon la direction X, le déplacement de la structure U_y selon la direction Y et le poids total des voiles P, en utilisant une analyse de variance ANOVA et l'effet des moyennes par le biais du logiciel «Minitab 18».

Les valeurs des paramètres de réponse considérés sont présentées dans le tableau V.3. Ces résultats sont obtenus suivant le plan d'expérience de Taguchi à 27 essais avec 5 facteurs à 3 niveaux L27.

Tableau V.3 : Résultats de la modélisation selon la table de Taguchi L27.

N°	Epaisseur/Voile (cm)	Position/Voiles/Y	Position/Voiles/X	Nombre/Voiles/Y	Nombre/Voiles/X	Période T(s)	U_x (cm)	U_y (cm)	Poids P(kN)
1	16	Po1Y	Pos1X	2	2	0,58	0,9	0,8	89,6
2	16	Po1Y	Pos1X	2	4	0,58	0,6	0,8	140,8
3	16	Po1Y	Pos1X	2	6	0,55	0,4	0,8	224
4	16	Po2Y	Po2X	4	2	0,52	0,9	0,5	153,6
5	16	Po2Y	Po2X	4	4	0,38	0,5	0,4	204,8
6	16	Po2Y	Po2X	4	6	0,35	0,4	0,4	288
7	16	Po3Y	Po3X	6	2	0,51	0,9	0,4	262,4
8	16	Po3Y	Po3X	6	4	0,38	0,5	0,3	313,6
9	16	Po3Y	Po3X	6	6	0,36	0,4	0,3	396,8
10	18	Po1Y	Po2X	6	2	0,51	0,8	0,3	295,2
11	18	Po1Y	Po2X	6	4	0,42	0,6	0,3	352,8
12	18	Po1Y	Po2X	6	6	0,39	0,5	0,3	446,4
13	18	Po2Y	Po3X	2	2	0,53	0,9	0,8	100,8
14	18	Po2Y	Po3X	2	4	0,49	0,6	0,8	158,4
15	18	Po2Y	Po3X	2	6	0,50	0,5	0,8	252
16	18	Po3Y	Pos1X	4	2	0,53	0,9	0,5	172,8
17	18	Po3Y	Pos1X	4	4	0,43	0,6	0,5	230,4
18	18	Po3Y	Pos1X	4	6	0,39	0,5	0,5	324
19	20	Po1Y	Po3X	4	2	0,52	0,9	0,4	192
20	20	Po1Y	Po3X	4	4	0,43	0,6	0,5	256
21	20	Po1Y	Po3X	4	6	0,39	0,6	0,8	360
22	20	Po2Y	Pos1X	6	2	0,52	0,9	0,3	328
23	20	Po2Y	Pos1X	6	4	0,39	0,5	0,2	392
24	20	Po2Y	Pos1X	6	6	0,36	0,4	0,3	496
25	20	Po3Y	Po2X	2	2	0,51	0,8	0,8	112
26	20	Po3Y	Po2X	2	4	0,49	0,6	0,8	176
27	20	Po3Y	Po2X	2	6	0,49	0,5	0,8	280

V.3.1. Résultats pour la période fondamentale de la structure T

a) Analyse de la variance ANOVA

Le tableau V.4 qui concerne l'analyse de la variance ANOVA de la période fondamentale T, montre que le nombre de voiles par rapport la direction Y (Nbr/V/Y) est le facteur de plus grande influence avec une contribution de 40.405%, suivi par le nombre de voiles par rapport la direction X (Nbr/V/X) avec une contribution de 37.663%, l'analyse indique que la position des voiles selon les deux directions ont une faible influence, tandis que l'épaisseur des voiles (e) a une influence négligeable sur la période T ($P > 0.05$).

Tableau V.4 : Analyse de la variance (ANOVA) pour la période fondamentale T.

	df	Sum of Squares	Mean Square	F Value	P Value	Contrib (%)	Remarque
E	2	0,000763	0,000381	0,35	0,713	0,557	Non significiant
Pos/V/Y	2	0,007030	0,003515	3,18	0,069	5,132	Non significiant
Pos/V/X	2	0,004585	0,002293	2,08	0,158	3,347	Non significiant
Nbr/V/Y	2	0,051585	0,025793	23,37	< 0.0001	37,663	Signifiant
Nbr/V/X	2	0,055341	0,027670	25,07	< 0.0001	40,405	Signifiant
Erreur	16	0,017659	0,001104			12,893	
Total	26	0,136963				100	

b) Analyse des effets principaux sur la période T

De la figure V.7, il apparaît que le nombre de voiles par rapport les deux directions (Nbr/V/X et Nbr/V/Y) a la plus importante influence caractérisé par des pentes remarquables, ce qui est confirmé par l'analyse ANOVA dans le tableau V.4.

En outre le graphe des effets principaux permet de constater que la période est meilleure pour une position des voiles correspondre à la position Pos3 selon les deux directions.

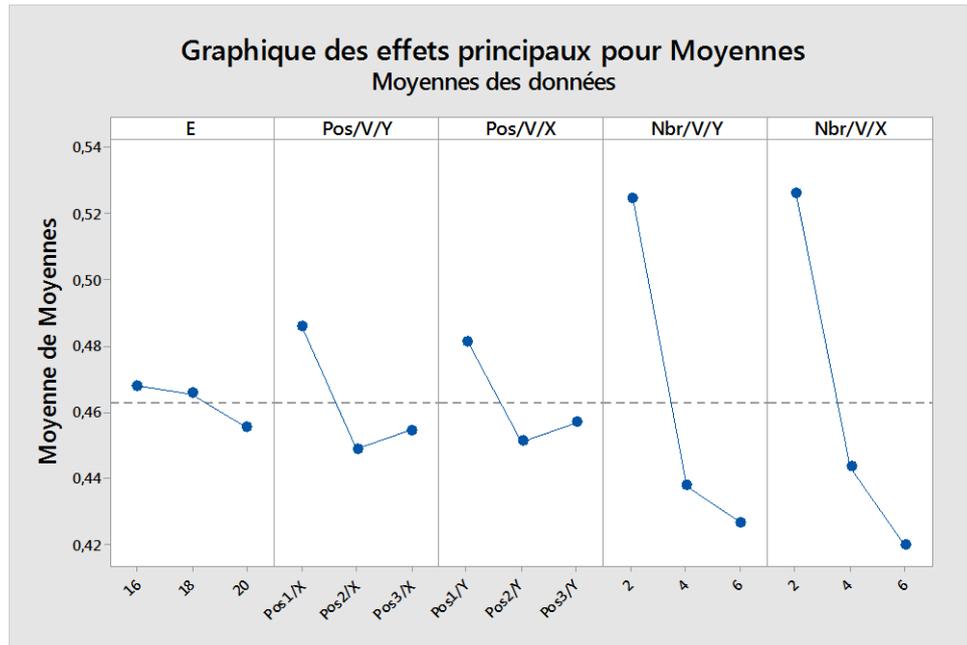


Figure V.7 : Graphe des effets principaux sur la période fondamentale T.

V.3.2. Résultats pour le déplacement U_x selon la direction X

a) Analyse de la variance ANOVA

Le tableau V.5 qui concerne l'analyse de la variance ANOVA du déplacement U_x , montre clairement que le nombre de voiles par rapport la direction X (Nbr/V/X) est le facteur de plus grande influence avec une contribution de 91.632%, alors que le reste des variables ont un effet négligeable, avec une contribution variant entre 0.574% et 1.066%.

Tableau V.5 : Analyse de la variance (ANOVA) pour le déplacement U_x .

	df	Sum of Squares	Mean Square	F Value	P Value	Contrib (%)	Remarque
E	2	0,009630	0,004815	1,68	0,218	1,066	Non significiant
Pos/V/Y	2	0,005185	0,002593	0,90	0,425	0,574	Non significiant
Pos/V/X	2	0,005185	0,002593	0,90	0,425	0,574	Non significiant
Nbr/V/Y	2	0,009630	0,004815	1,68	0,218	1,066	Non significiant
Nbr/V/X	2	0,827407	0,413704	144,13	< 0.0001	91,632	Signifiant
Erreur	16	0,045926	0,002870			5,086	
Total	26	0,902963				100	

b) Analyse des effets principaux sur le déplacement U_x

De la figure V.8, il apparaît que le nombre de voiles par rapport à la direction X ($Nbr/V/X$) est le facteur dominant pour ce cas, caractérisé par une pente remarquable, et confirme les résultats de l'analyse ANOVA dans le tableau précédent.

En outre le graphe des effets principaux permet de constater que le reste des paramètres ont un effet négligeable sur le déplacement de la structure selon la direction X. Ceci est expliqué par la faible pente de ces paramètres dans le graphe des effets principaux (Figure V.8).

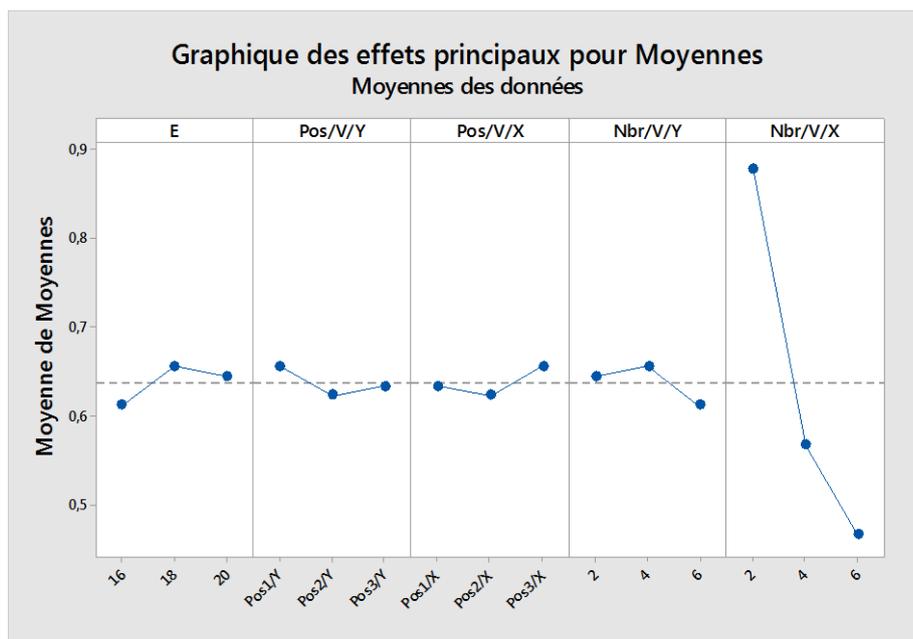


Figure V.8 : Graphe des effets principaux sur le déplacement U_x .

V.3.3. Résultats pour le déplacement U_y selon la direction Y

a) Analyse de la variance ANOVA

A partir des résultats du tableau V.6, qui concerne l'analyse de la variance ANOVA du déplacement U_y , il est clair que le nombre de voiles par rapport la direction Y ($Nbr/V/Y$) est le facteur le plus influençant, avec une contribution de 89.06%, alors que le reste des variables ont un effet négligeable, avec une contribution variant entre 0.69% pour le facteur nombre de voiles par rapport la direction X ($Nbr/V/X$) et 1.216% pour les facteurs position des voiles dans les deux directions.

Tableau V.6 : Analyse de la variance (ANOVA) pour le déplacement U_y .

	df	Sum of Squares	Mean Square	F Value	P Value	Contrib (%)	Remarque
E	2	0,00222	0,001111	0,18	0,835	0,173	Non significiant
Pos/V/Y	2	0,01556	0,007778	1,27	0,307	1,216	Non significiant
Pos/V/X	2	0,01556	0,007778	1,27	0,307	1,216	Non significiant
Nbr/V/Y	2	1,14000	0,570000	93,27	< 0.0001	89,063	Signifiant
Nbr/V/X	2	0,00889	0,004444	0,73	0,499	0,695	Non significiant
Erreur	16	0,09778	0,006111			7,639	
Total	26	1,28000				100	

b) Analyse des effets principaux sur le déplacement U_y

De la figure V.9, il apparaît que le nombre de voiles par rapport à la direction Y (Nbr/V/Y) est le facteur dominant pour ce cas, caractérisé par une pente remarquable, et confirme les résultats de l'analyse ANOVA dans le tableau précédent.

En outre le graphe des effets principaux permet de constater que le reste des paramètres ont un effet négligeable sur le déplacement de la structure selon la direction Y. Ceci est expliqué par la faible pente de ces paramètres dans le graphe des effets principaux (Figure V.9).

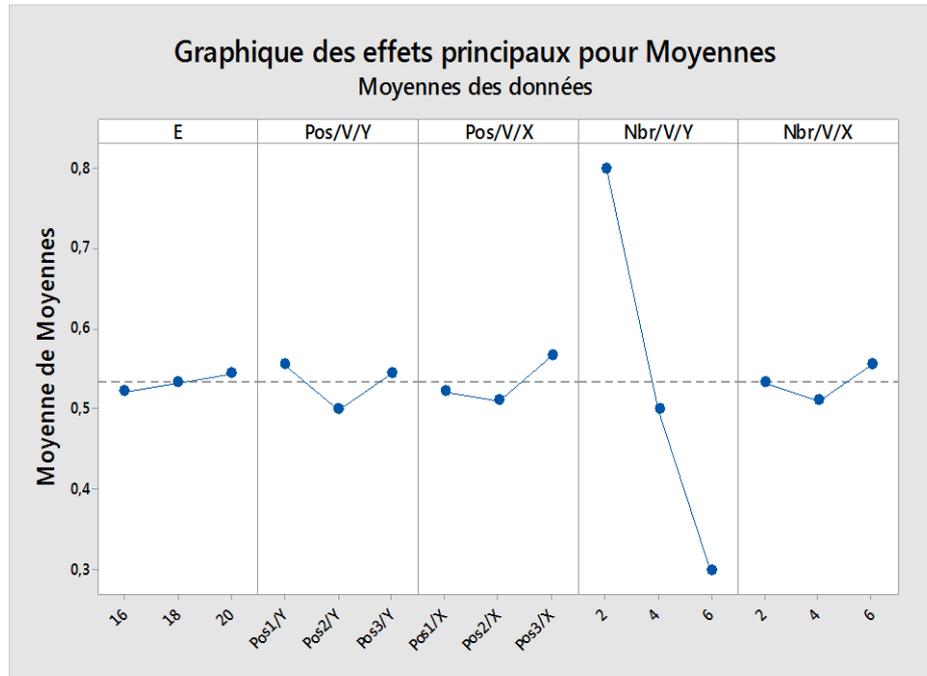


Figure V.9 : Graphe des effets principaux sur le déplacement U_y .

V.3.4. Résultats pour le poids total des voiles

a) Analyse de la variance ANOVA

Le tableau V.7 qui concerne l'analyse de la variance ANOVA pour le poids total des voiles de contreventement, montre que le nombre de voiles par rapport la direction Y (Nbr/V/Y) est le facteur de plus grande influence avec une contribution de 58.757%, suivi par le nombre de voiles par rapport la direction X (Nbr/V/X) avec une contribution de 35.442%, l'analyse indique que l'épaisseur des voiles (e) a une faible influence avec une contribution de 5.045%, tandis que la position des voiles selon les deux directions, a une influence négligeable sur le poids des voiles (0.242%).

Tableau V.7 : Analyse de la variance (ANOVA) pour le poids total des voiles.

	df	Sum of Squares	Mean Square	F Value	P Value	Contrib (%)	Remarque
E	2	14930	7465,0	138,45	< 0.0001	5,045	Signifiant
Pos/V/Y	2	716	357,8	6,64	0,008	0,242	Non signifiant
Pos/V/X	2	716	357,8	6,64	0,008	0,242	Non signifiant
Nbr/V/Y	2	173871	86935,7	1612,31	< 0.0001	58,757	Signifiant
Nbr/V/X	2	104820	52410,2	972,00	< 0.0001	35,422	Signifiant
Erreur	16	863	53,9			0,292	
Total	26	295916				100	

b) Analyse des effets principaux sur le poids total des voiles

De la figure V.10, il apparaît que le nombre de voiles par rapport les deux directions (Nbr/V/Y et Nbr/V/X), suivi par le facteur épaisseur des voiles avec une légère pente, alors que la pente de la position des voiles dans les deux directions est presque nulle. Ces résultats confirment ceux de l'analyse ANOVA présentés dans le tableau V.7.

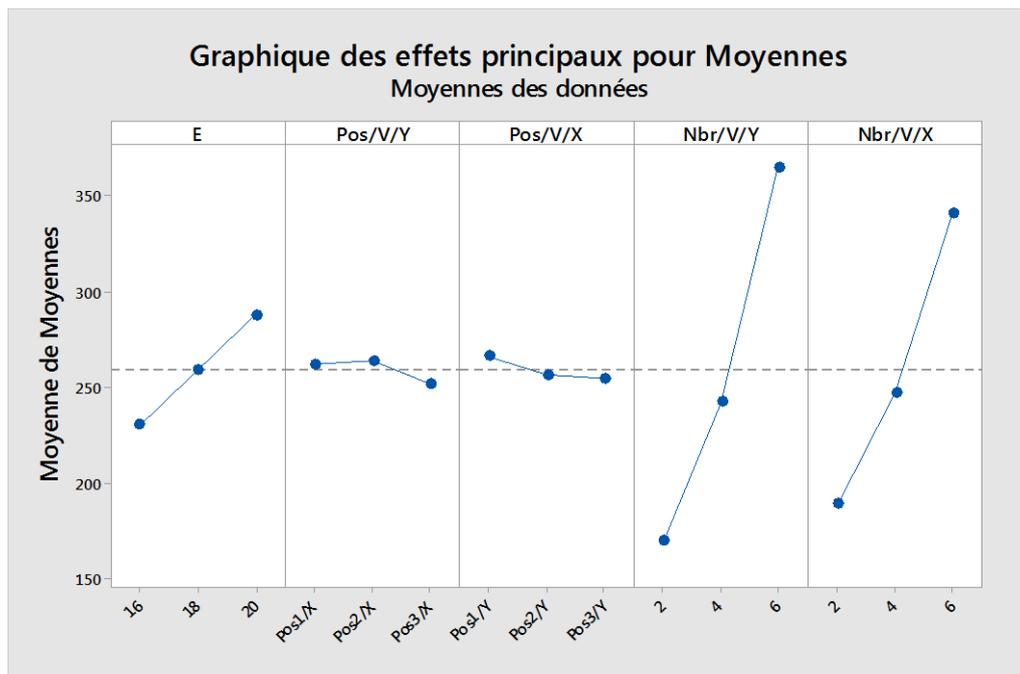


Figure V.10 : Graphe des effets principaux sur le poids total des voiles.

V.4. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté les résultats de la modélisation qui est consacré à la détermination du degré d'influence des paramètres de cette étude (épaisseur des voiles (e), position des voiles selon la direction X (Pos/V/X), position des voiles selon la direction Y (Pos/V/Y), nombre de voiles selon la direction X (Nbr/V/X) et nombre de voiles selon la direction Y (Nbr/V/Y)) sur le comportement dynamique de la structure étudiée.

L'analyse de la variance ANOVA et l'Analyse des effets principaux à l'aide de logiciel Minitab-18 des différents critères de l'étude (à savoir la période fondamentale de la structure (T), le déplacement de la structure U_x selon la direction X, le déplacement de la structure U_y selon la direction Y et le poids total des voiles P) montre que le nombre de voiles dans les deux directions est le facteur qui a l'influence la plus significative sur ces critères, alors que les autres paramètres n'ont pas d'influence significative sur les critères de cette étude.

Chapitre VI

*Optimisation par la méthode de Taguchi et la méthode
Relationnelle Grise.*

VI.1. Introduction

L'objectif de ce chapitre est de faire une étude d'optimisation du comportement dynamique de la structure, par l'utilisation de différentes méthodes d'optimisation.

Deux méthodes d'optimisation ont été utilisées pour arriver à cet objectif :

- Optimisation par la méthode de Taguchi;
- Optimisation par L'Analyse Relationnelle Grise (Grey Relational Analysis: GRA).

VI.2. Optimisation par la méthode de Taguchi

Dans l'analyse des résultats selon la méthode de Taguchi, on cherche à identifier les facteurs qui contribuent à la réduction de la variation dans la réponse. La variation peut être analysée en observant les effets sur la réponse moyenne ou dans la dispersion. Pour mesurer les effets dans la variation, Taguchi a développé une transformation des données, désignée par la relation Signal/Bruit (S/N), qui représente la mesure de la variation existante.

Dans la méthode Taguchi, le terme «signal» représente la valeur souhaitable et le «bruit» représente la valeur indésirable. L'objectif de l'utilisation des rapports S/N est de mesurer les performances pour développer des produits et des processus insensibles aux facteurs de bruit. Le rapport S/N indique le degré de la performance prévisible d'un produit ou d'un procédé, en présence de facteurs de bruit [20].

Selon le critère de performance de la réponse, le ratio signal/bruit (S/N) prend les formes suivantes :

a) L'optimum est une valeur minimale : (plus petit c'est meilleur), la caractéristique de performance Y a une distribution non négative et la fonction de perte augmente avec (y). Soient $y_{1j}, y_{2j}, \dots, y_{Nj}$ les résultats expérimentaux obtenus au point j, Taguchi recommande d'utiliser la fonction représentée par la relation (VI.1) :

$$S / N = -10 \log_{10} \left[\frac{1}{n} (\sum_{i=1}^n y_i^2) \right] \quad (VI.1)$$

b) L'optimum est une valeur maximale : la valeur cible est égale à l'infini (plus grand c'est meilleur), on vise la maximisation de la caractéristique de performance. Maximiser Y revient à minimiser 1/Y et, Taguchi recommande d'utiliser la formule (VI.2) suivante :

$$S / N = -10 \log_{10} \left[\frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right) \right] \quad (\text{VI.2})$$

c) L'optimum est une valeur ciblé : la valeur cible est égale à une valeur nominale m_0 (nominal c'est meilleur), la fonction de perte augmente quand (Y) s'éloigne de la valeur nominale m_0 , Taguchi recommande d'utiliser la fonction représentée par la relation (VI.3) :

$$S / N = 10 \log_{10} \left[\left(\frac{\bar{y}_j^2}{s_j^2} \right) \right] \quad (\text{VI.3})$$

Donc les ratios S/N correspondant seront calculés selon l'équation (VI.1).

Pour appliquer l'approche de Taguchi dans notre cas d'étude, nous avons fixé comme objectif d'atteindre l'optimum de chacun des critères étudiés. En d'autres termes, on doit minimiser tous les critères de notre étude d'optimisation, à savoir la période fondamentale de la structure (T), le déplacement U_x selon la direction X, le déplacement U_y selon la direction Y et le poids total des voiles de contreventement.

-Les différentes valeurs du ratio S/N correspondant aux différents critères considérés sont illustrées dans le tableau VI.1.

Tableau VI.1 : Les ratios S/N de (T, Ux, Uy et P).

N°	S/N - T	S/N - Ux	S/N - Uy	S/N - P
1	4,731	0,915	1,938	-39,046
2	4,731	4,437	1,938	-42,972
3	5,193	7,959	1,938	-47,005
4	5,680	0,915	6,021	-43,728
5	8,404	6,021	7,959	-46,227
6	9,119	7,959	7,959	-49,188
7	5,849	0,915	7,959	-48,379
8	8,404	6,021	10,458	-49,928
9	8,874	7,959	10,458	-51,971
10	5,849	1,938	10,458	-49,402
11	7,535	4,437	10,458	-50,951
12	8,179	6,021	10,458	-52,994
13	5,514	0,915	1,938	-40,069
14	6,196	4,437	1,938	-43,995
15	6,021	6,021	1,938	-48,028
16	5,514	0,915	6,021	-44,751
17	7,331	4,437	6,021	-47,250
18	8,179	6,021	6,021	-50,211
19	5,680	0,915	7,959	-45,666
20	7,331	4,437	6,021	-48,165
21	8,179	4,437	1,938	-51,126
22	5,680	0,915	10,458	-50,317
23	8,179	6,021	13,979	-51,866
24	8,874	7,959	10,458	-53,910
25	5,849	1,938	1,938	-40,984
26	6,196	4,437	1,938	-44,910
27	6,196	6,021	1,938	-48,943

VI.3. Analyse des effets moyens des niveaux des facteurs

Cette analyse est basée sur le calcul de la moyenne des ratios S/N des résultats obtenus pour chaque niveau des cinq principaux paramètres d'optimisation (épaisseur des voiles (e) , position des voiles selon la direction X (Pos/V/X), position des voiles selon la direction Y (Pos/V/Y), nombre de voiles selon la direction X (Nbr/V/X) et nombre de voiles selon la direction Y (Nbr/V/Y). La moyenne des ratios S/N pour un niveau d'un facteur correspond à la somme des valeurs des ratios S/N pour le même niveau du facteur divisée par le nombre des ratios pour le niveau du facteur.

VI.3.1. Analyse des effets moyens pour la période fondamentale T

Du tableau VI.2, il apparait que les paramètres d'entrée (e, Pos/V/X, Pos/V/Y, Nbr/V/X et Nbr/V/Y) présentent des effets différents sur la période fondamentale de la structure (T). La plus importante influence correspond au nombre de voiles pour les deux directions, avec un effet de 2.052 pour le Nbr/V/X et 1.866 pour le Nbr/V/Y, suivi par la position des voiles dans les deux directions, avec un effet de 0.695 pour le paramètre Pos/V/Y et 0.510 pour Pos/V/X. La plus faible influence est l'épaisseur des voiles avec un effet 0.205.

Tableau VI.2 : Moyenne des ratios S/N (T) pour chaque niveau des facteurs.

Niveau	E	Pos/V/Y	Pos/V/X	Nbr/V/Y	Nbr/V/X
1	6,776	6,379	6,490	5,625	5,594
2	6,702	7,074	7,001	7,268	7,145
3	6,907	6,932	6,894	7,491	7,646
Delta	0,205	0,695	0,510	1,866	2,052
Rang	5	3	4	2	1

Selon l'approche de Taguchi, l'optimum de la valeur la plus élevée de Signal/ Bruit (S/N) représente la meilleure performance de la réponse (T) correspond aux niveaux **e3 Pos/V/Y2 Pos/V/X2 Nbr/V/Y3 Nbr/V/X3** (les lettres représentent les paramètres de l'étude et les indices représentent les niveaux). Les niveaux des paramètres attendus sous les conditions optimales de la période de la structure (T) sont donc : l'épaisseur de voiles e= 20cm, la position des voiles selon l'axe Y est Pos2/V/Y, la position des voiles selon l'axe X est Pos2/V/X et le nombre de voiles égale 6 pour les deux directions.

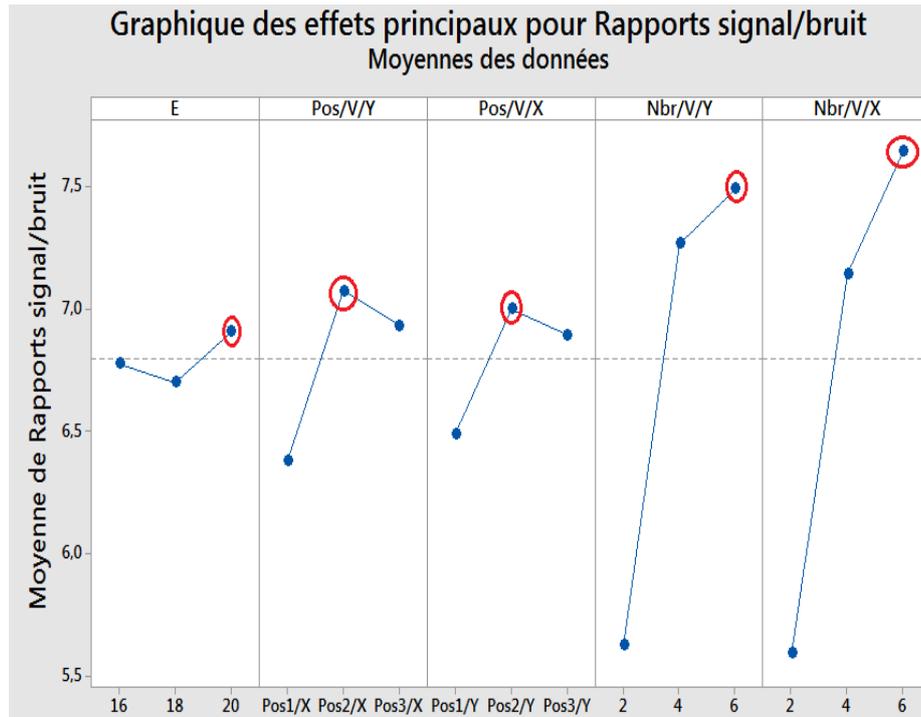


Figure VI.1 Graphique des effets principaux sur le ratio S/N de T.

VI.3.2. Analyse des effets moyens pour le déplacement U_x selon la direction X

Du tableau VI.3, il est clair que le paramètre Nbr/V/X présente la plus importante influence avec un effet de 5.564, tandis que le reste des paramètres ont de faible influence variant de 0.884 pour l'épaisseur, 0.681 pour le Nbr/V/Y, 0.63 pour le Pos/V/Y et 0.403 pour le Pos/V/X.

Tableau VI.3 : Moyenne des ratios S/N (U_x) pour chaque niveau des facteurs.

Niveau	E	Pos/V/Y	Pos/V/X	Nbr/V/Y	Nbr/V/X
1	4,789	3,944	4,398	4,120	1,142
2	3,905	4,574	4,410	4,006	4,965
3	4,120	4,296	4,006	4,687	6,706
Delta	0,884	0,630	0,403	0,681	5,564
Rang	2	4	5	3	1

Selon l'approche de Taguchi, l'optimum de la réponse déplacement U_x correspond aux niveaux **e1 Pos/V/Y2 Pos/V/X2 Nbr/V/Y3 Nbr/V/X3**. Les niveaux des paramètres attendus sous les conditions optimales sont donc : l'épaisseur de voiles = 16cm, la position des voiles selon l'axe Y est Pos2/V/Y, la position des voiles selon l'axe X est Pos2/V/X et le nombre de voiles égale 6 pour les deux directions.

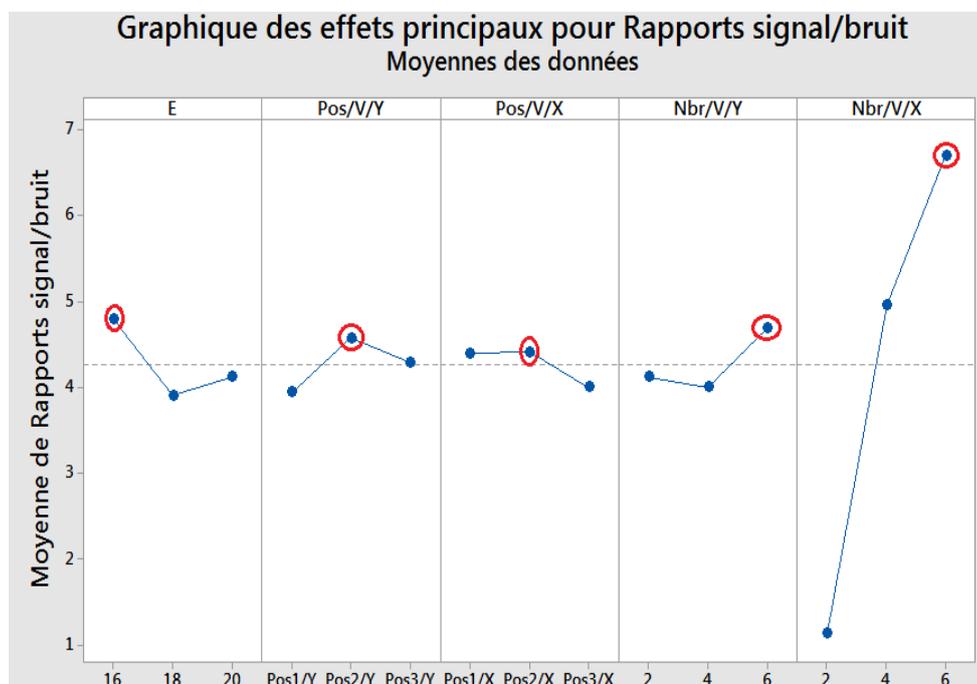


Figure VI.2 Graphique des effets principaux sur le ratio S/N de U_x .

VI.3.3. Analyse des effets moyens pour le déplacement U_y selon la direction Y

Du tableau VI.4, il est clair que le paramètre Nbr/V/Y présente la plus importante influence avec un effet de 8.633, tandis que le reste des paramètres ont de faible influence variant de 1.10 pour la position des voiles selon la direction Y, 0.974 pour Pos/V/X, 0.845 pour le Nbr/V/X et un effet pratiquement négligeable de 0.153 pour le paramètre épaisseur.

Tableau VI.4 : Moyenne des ratios S/N (Uy) pour chaque niveau des facteurs.

Niveau	E	Pos/V/Y	Pos/V/X	Nbr/V/Y	Nbr/V/X
1	6,292	5,901	6,530	1,938	6,077
2	6,139	6,961	6,570	6,213	6,745
3	6,293	5,861	5,623	10,571	5,901
Delta	0,153	1,100	0,947	8,633	0,845
Rang	5	2	3	1	4

Selon l'approche de Taguchi, l'optimum de la réponse déplacement Uy correspond aux niveaux **e3 Pos/V/Y2 Pos/V/X2 Nbr/V/Y3 Nbr/V/X2**. Les niveaux des paramètres attendus sous les conditions optimales sont donc : l'épaisseur de voiles e= 20cm, la position des voiles selon l'axe Y est Pos2/V/Y, la position des voiles selon l'axe X est Pos2/V/X et le nombre de voiles égale 6 pour la direction Y et 4 voiles pour la direction X.

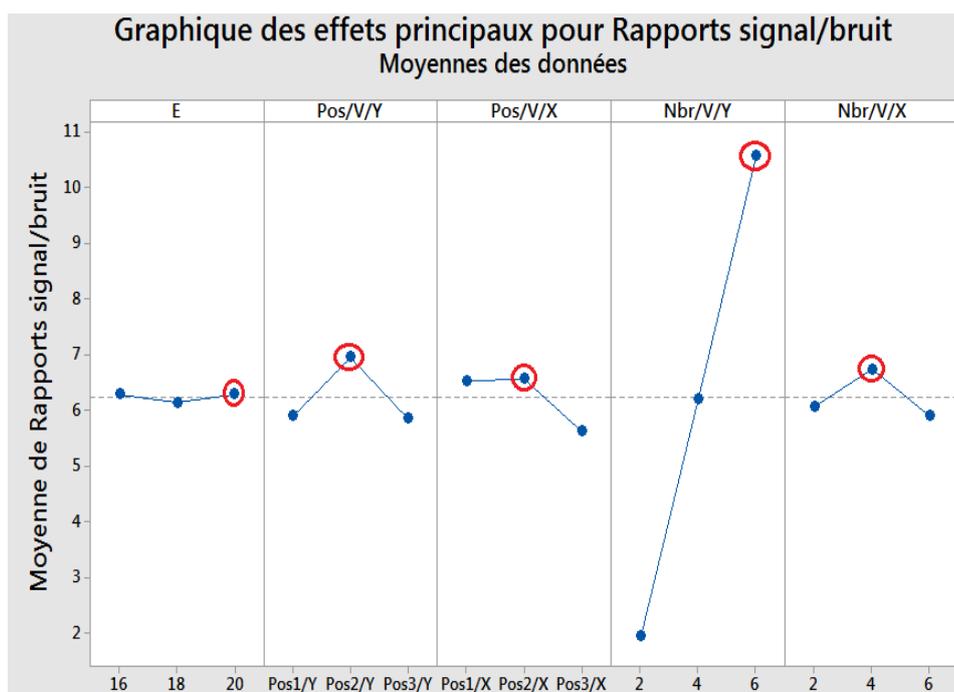


Figure VI.3 Graphique des effets principaux sur le ratio S/N de Uy.

VI.3.4. Analyse des effets moyens pour le poids total des voiles P

Du tableau VI.5, il est clair que les paramètres Nbr/V/Y et Nbr/V/X présentent la plus importante influence avec un effet de 7.09 pour Nbr/V/Y et 5.67 pour Nbr/V/X, tandis que le paramètre épaisseur a une faible influence de 1.94, alors que l'effet des paramètres Pos/V/Y et Pos/V/X est totalement nul.

Tableau VI.5 : Moyenne des ratios S/N (P) pour chaque niveau des facteurs.

Niveau	E	Pos/V/Y	Pos/V/X	Nbr/V/Y	Nbr/V/X
1	-46,49	-47,48	-47,48	-43,99	-44,70
2	-47,52	-47,48	-47,48	-47,37	-47,36
3	-48,43	-47,48	-47,48	-51,08	-50,38
Delta	1,94	0,00	0,00	7,09	5,67
Rang	3	4,5	4,5	1	2

Selon l'approche de Taguchi, l'optimum de la réponse poids des voiles P correspond aux niveaux **e1 Nbr/V/Y1 Nbr/V/X1**. Les niveaux des paramètres attendus sous les conditions optimales sont donc : l'épaisseur de voiles $e = 16\text{cm}$, et le nombre de voiles égale 2 pour les deux directions.

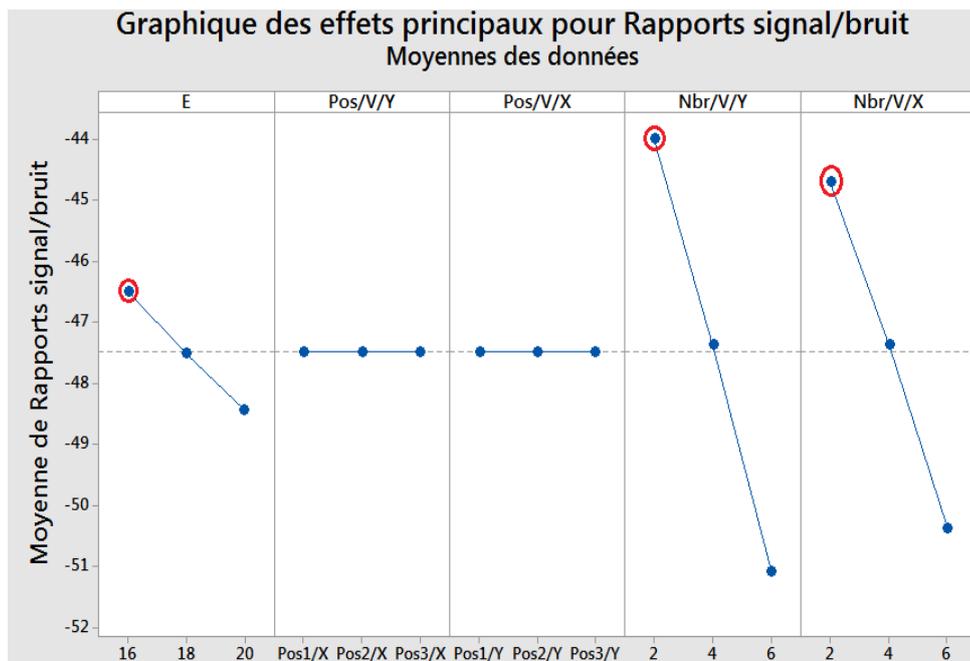


Figure VI.4 Graphique des effets principaux sur le ratio S/N de P.

Le tableau VI.6 présente un récapitulatif des résultats d'optimisation de chacun des paramètres considérés, selon l'approche de Taguchi.

Tableau VI.6 : Moyenne des ratios S/N (P) pour chaque niveau des facteurs.

Critère d'optimisation	e (cm)	Pos/V/Y	Pos/V/X	Nbr/V/Y	Nbr/V/X
T (s)	20	Pos2/V/Y	Pos2/V/X	6	6
U _x (cm)	16	Pos2/V/Y	Pos2/V/X	6	6
U _y (cm)	20	Pos2/V/Y	Pos2/V/X	6	4
P (kN)	16	-	-	2	2

D'après les résultats, il n'existe pas de régime optimal qui satisfait tous les paramètres étudiés, mais il existe différentes combinaisons correspondant chacune aux critères d'optimisation considérés. D'où la nécessité d'utiliser d'autres méthodes d'optimisation qui permettent de prendre en compte plusieurs objectifs simultanément.

VI.4. Optimisation par L'Analyse Relationnelle Grise (Grey Relational Analysis:GRA)

Les caractéristiques multiples de performance ont été évaluées en utilisant l'Analyse Relationnelle Gris (GRA). Dans cette analyse, l'optimisation des caractéristiques multiples de performance peuvent être convertis à l'optimisation de la qualité Relationnelle Unique Grise. Les étapes suivantes sont considérées pour l'Analyse Relationnelle Gris (GRA) [20].

VI.4.1 Etape 1 : La normalisation

Les rapports S/N obtenus par la méthode de Taguchi sont normalisés dans l'intervalle 0 à 1. Si le but est la minimisation la réponse, alors la séquence originale est normalisée comme suit :

- Le plus petit est le meilleur (The-smaller-the-better) :

$$x_i(k) = \frac{\max(x_i^0(k)) - x_i^0(k)}{\max(x_i^0(k)) - \min(x_i^0(k))} \quad (\text{VI.4})$$

Si le but est la maximisation la réponse, alors la séquence originale est normalisée comme suit :

- Le plus grand est le meilleur (The-larger-the better) :

$$x_i(k) = \frac{x_i^0(k) - \min(x_i^0(k))}{\max(x_i^0(k)) - \min(x_i^0(k))} \quad (\text{VI.5})$$

Où : $x_i(k)$ valeur normalisée de la séquence.

$\max(x_i^0(k))$ la plus grande valeur de $x_i^0(k)$ la $k^{\text{ième}}$ réponse.

$\min(x_i^0(k))$ la plus petite valeur de $x_i^0(k)$ la $k^{\text{ième}}$ réponse.

VI.4.2 Etape 2 : Calcul des coefficients du Relationnel Gris

Les coefficients du Relationnel Gris (Grey Relational Coefficients) peuvent être calculés comme suit :

$$\xi_i(k) = \frac{\Delta_{min} + \psi \Delta_{max}}{\Delta_{0i}(k) + \psi \Delta_{max}} \quad 0 < \xi_i(k) \leq 1 \quad (VI.6)$$

Où :

$\Delta_{0i}(k)$ est la différence en valeur absolue entre $x_0^k(k)$ et $x_i^k(k)$,

Δ_{min} est la plus petite valeur de $\Delta_{0i}(k)$

Δ_{max} est la plus grande valeur de $\Delta_{0i}(k)$ coefficient de distinction et sa valeur est comprise entre 0 à 1.

$$\Delta_{0i}(k) = \|x_0(k) - x_i(k)\| \quad (VI.7)$$

$$\Delta_{min} = \min_{j \in i} \min_{\forall k} \|x_0(k) - x_i(k)\| \quad (VI.8)$$

$$\Delta_{max} = \max_{j \in i} \max_{\forall k} \|x_0(k) - x_i(k)\| \quad (VI.9)$$

-La valeur de ψ est en générale égale à (0.5).

VI.4.3 Etape 3 : Calcul du GRG (Grey Relational Grade)

Après avoir calculé la moyenne des coefficients du Relationnel Gris (Grey Relational Coefficients), les γ_i (Grey Relational Grade) peuvent être obtenu comme suit :

$$\alpha_i = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \xi_i(k) \quad (VI.10)$$

Où: n est le nombre des caractéristiques de performance.

La plus grande valeur de "Grey Relational Grade" est considérée comme la relation la plus forte entre la séquence idéale ($x_0(k)$) et la séquence donnée ($x_i(k)$). La séquence idéale ($x_0(k)$) est la meilleure réponse dans le processus expérimental. Ainsi, le Grade Relationnel (Relational Grade) supérieur correspond à la combinaison des paramètres la plus proche de l'optimale.

VI.4.4 Prédiction de la combinaison optimale

Le tableau VI.7 présente les valeurs normalisées pour les critères de notre étude d'optimisation, à savoir la période fondamentale de la structure (T), le déplacement U_x selon la direction X, le déplacement U_y selon la direction Y et le poids total des voiles de contreventement.

Tableau VI.7 : Valeurs normalisé.

N°	ξT	ξU_x	ξU_y	ξP
1	1,000	1,000	1,000	0,000
2	1,000	0,500	1,000	0,264
3	0,895	0,000	1,000	0,535
4	0,784	1,000	0,661	0,315
5	0,163	0,275	0,500	0,483
6	0,000	0,000	0,500	0,682
7	0,745	1,000	0,500	0,628
8	0,163	0,275	0,292	0,732
9	0,056	0,000	0,292	0,870
10	0,745	0,855	0,292	0,697
11	0,361	0,500	0,292	0,801
12	0,214	0,275	0,292	0,938
13	0,822	1,000	1,000	0,069
14	0,666	0,500	1,000	0,333
15	0,706	0,275	1,000	0,604
16	0,822	1,000	0,661	0,384
17	0,407	0,500	0,661	0,552
18	0,214	0,275	0,661	0,751
19	0,784	1,000	0,500	0,445
20	0,407	0,500	0,661	0,613
21	0,214	0,500	1,000	0,813
22	0,784	1,000	0,292	0,758
23	0,214	0,275	0,000	0,862
24	0,056	0,000	0,292	1,000
25	0,745	0,855	1,000	0,130
26	0,666	0,500	1,000	0,395
27	0,666	0,275	1,000	0,666

Pour le calcul des coefficients Relationnels Gris, la valeur de la constante ψ a été prise (0.5). Les valeurs de ces coefficients et de la qualité grise (GRG), sont présentées dans le tableau VI.8.

Tableau VI.8 : Coefficients GRC et GRG (Grey Relational Coefficients, Grey Relational Grad).

N°	GRC/T	GRC/U _x	GRC/U _y	GRC/P	GRG	Rang
1	0,333	0,333	0,333	1,000	0,500	23
2	0,333	0,556	0,333	0,799	0,505	19
3	0,365	1,000	0,333	0,602	0,575	10
4	0,404	0,333	0,500	0,760	0,499	24
5	0,793	0,714	0,600	0,638	0,686	5
6	1,000	1,000	0,600	0,506	0,776	1
7	0,418	0,333	0,600	0,540	0,473	27
8	0,793	0,714	0,750	0,476	0,683	6
9	0,920	1,000	0,750	0,398	0,767	2
10	0,418	0,385	0,750	0,497	0,512	15
11	0,622	0,556	0,750	0,436	0,591	9
12	0,742	0,714	0,750	0,363	0,642	7
13	0,390	0,333	0,333	0,948	0,501	21
14	0,451	0,556	0,333	0,747	0,522	13
15	0,434	0,714	0,333	0,556	0,509	17
16	0,390	0,333	0,500	0,709	0,483	26
17	0,590	0,556	0,500	0,591	0,559	11
18	0,742	0,714	0,500	0,464	0,605	8
19	0,404	0,333	0,600	0,665	0,500	22
20	0,590	0,556	0,500	0,550	0,549	12
21	0,742	0,556	0,333	0,429	0,515	14
22	0,404	0,333	0,750	0,460	0,487	25
23	0,742	0,714	1,000	0,402	0,715	4
24	0,920	1,000	0,750	0,333	0,751	3
25	0,418	0,385	0,333	0,901	0,509	18
26	0,451	0,556	0,333	0,702	0,510	16
27	0,451	0,714	0,333	0,516	0,504	20

Selon le tableau VI.8, la combinaison des paramètres du modèle 6, a eu la qualité grise (GRG) la plus élevée et ceci signifie que le modèle 6 est la combinaison des paramètres optimaux.

La combinaison optimale est donc : épaisseur des voiles : "niveau 1", position des voiles selon la direction X : "niveau 2", position des voiles selon la direction Y : "niveau 2", nombre de voiles selon la direction X : "niveau 3" et nombre de voiles selon la direction Y : "niveau 3". Donc la combinaison optimale des paramètres est : **e1 Pos/V/Y2 Pos/V/X2 Nbr/V/Y3 Nbr/V/X3**. Les valeurs des paramètres optimaux sont : épaisseur des voiles $e = 16.0$ cm, position des voiles selon la direction X : $\text{Pos/V/X} = 2$, position

des voiles selon la direction Y : Pos/V/Y = 2, nombre de voiles selon la direction X : Nbr/V/X = 6 et nombre de voiles selon la direction Y : Nbr/V/Y = 6. La différence entre la valeur maximale et la valeur minimale (Delta = Max-Min) de la valeur grise relationnelle est également indiqué dans le tableau VI.9.

Tableau VI.9 : Effets principaux de la qualité grise de T, Ux, Uy et P.

Niveau	E	Pos/V/Y	Pos/V/X	Nbr/V/Y	Nbr/V/X
1	-4,485	-5,330	-4,906	-5,770	-6,090
2	-5,274	-4,519	-4,820	-4,913	-4,640
3	-5,146	-5,056	-5,180	-4,223	-4,176
Delta	0,789	0,811	0,359	1,547	1,914
Rang	4	3	5	2	1

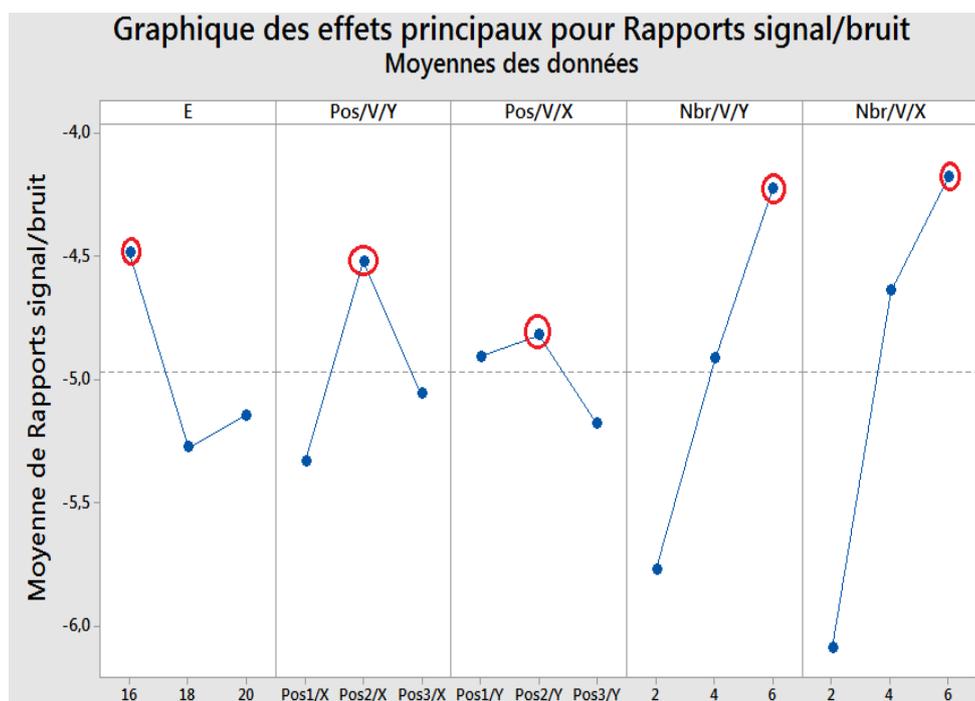


Figure VI.5 Graphique des effets principaux sur le ratio S/N (Grey) de T, Ux, Uy et P.

VI.5. Conclusion

Ce chapitre présente une étude d'optimisation du comportement dynamique de la structure par la méthode de Taguchi et l'Analyse Relationnelle Grise.

Au début, on a appliqué l'approche de Taguchi, à travers la minimisation de tous les critères de notre étude d'optimisation, à savoir la période fondamentale de la structure (T), le déplacement U_x selon la direction X, le déplacement U_y selon la direction Y et le poids total des voiles de contreventement. D'après la méthode de Taguchi nous avons conclu qu'il n'existe pas de régime optimal qui satisfait tous les paramètres étudiés, mais il existe différentes combinaisons correspondantes chacune aux critères d'optimisation considérés, donc la nécessité d'utiliser d'autres méthodes d'optimisation tenant en compte tous les critères d'optimisation simultanément. Par l'application de la méthode Relationnelle Grise, nous avons trouvé d'après le calcul des coefficients GRC et GRG (Grey Relational coefficients, Grey Relational Grad) que la combinaison des paramètres du modèle 6 a eu la qualité grise (GRG) la plus élevée.

Donc la combinaison des paramètres optimal est : voiles $e = 16.0$ cm, position des voiles selon la direction X : $Pos/V/X = 2$, position des voiles selon la direction Y : $Pos/V/Y = 2$, nombre de voiles selon la direction X : $Nbr/V/X = 6$ et nombre de voiles selon la direction Y : $Nbr/V/Y = 6$.

Conclusion générale

La méthode des plans d'expériences est une méthode d'expérimentation particulière basée sur la minimisation du nombre d'essais. Elle apporte un gain de temps et en cout financier. Parmi de nombreux d'expériences nous avons adopté le plan d'expérience de Taguchi.

C'est dans ce contexte que se pose la problématique de la recherche de la configuration optimale des paramètres d'entrées pour avoir un comportement dynamique optimal de la structure étudiée.

L'objectif de ce travail de fin d'études est d'apporter une nouvelle technique pour la modélisation et l'optimisation du comportement dynamique de structures en béton armé avec contreventement mixte (portique-voile), par l'utilisation de la méthode de Taguchi et l'Analyse Relationnelle Grise (GRA).

Le travail présenté dans ce mémoire concerne la détermination de la configuration optimale des paramètres d'entrées (épaisseur des voiles (e), position des voiles selon la direction X (Pos/V/X), position des voiles selon la direction Y (Pos/V/Y), nombre de voiles selon la direction X (Nbr/V/X) et le nombre de voiles selon la direction Y (Nbr/V/Y)) sur les paramètres de sorties (à savoir la période fondamentale de la structure (T), le déplacement de la structure U_x selon la direction X, le déplacement de la structure U_y selon la direction Y et le poids total des voiles P), en se basant sur les modèles proposés par les plans d'expériences de Taguchi. À travers l'analyse de variance (ANOVA) et l'effet des moyennes par le biais du logiciel (Minitab V18), il apparaît que le nombre de voiles par rapport aux deux directions (Nbr/V/Y et Nbr/V/X) est le facteur qui a l'influence la plus significative.

Dans l'analyse des résultats, la méthode Taguchi a développé une transformation des données, désignée par la relation Signal/Bruit (S/N) qui mesure les performances pour développer des produits et des processus insensibles aux facteurs de bruit, nous avons utilisé la forme l'optimum est une valeur minimale. En d'autres termes, on doit minimiser tous les critères de notre étude d'optimisation, à savoir la période

fondamentale de la structure (T), le déplacement U_x selon la direction X, le déplacement U_y selon la direction Y et le poids total des voiles de contreventement.

Et pour cela l'Analyse Relationnelle Grise nous a donné le résultat souhaitable, tandis que nous avons trouvé après le calcul que le modèle 6 contenir la combinaison des paramètres optimaux.

Alors la combinaison des paramètres optimal est : épaisseur des voiles $e = 16.0$ cm, position des voiles selon la direction X : $Pos/V/X = 2$, position des voiles selon la direction Y : $Pos/V/Y = 2$, nombre de voiles selon la direction X : $Nbr/V/X = 6$ et nombre de voiles selon la direction Y : $Nbr/V/Y = 6$.

Perspectives

Le travail présenté dans ce mémoire s'inscrit dans un cadre d'étude bien défini. Bien évidemment, certains points méritent d'être traités. Nous en citons quelques-uns ci-après, qui pourraient ainsi constituer les futurs développements de ce thème.

- Il est intéressant d'appliquer d'autres types de plans d'expériences tels que les plans de type surfaces de réponses ;
- Appliquer la méthode proposée pour des structures de formes complexes ;
- La comparaison de cette méthode avec d'autres méthodes d'optimisation telle que la méthode d'optimisation par algorithme génétique.

Références bibliographiques

[1] **CHEIKHI. L** : Thèse « Etudes empiriques des relations entre les modèles de qualité du logiciel DTSO 9126 en utilisant le référentiel de données DTSBSG et la méthode Taguchi », école de technologie supérieure université du QUEBEC. montreal, le 6 mars 2008.

[2] <https://www.rocq.inria.fr/axis/modulad/numero-34/Goupy-34/goupy-34.pdf> vu le 21/02/2020 à 22:10.

[3] **GRILLIER. J.C, VII-210**: livre «Comprendre les plans d'expériences Taguchi» AFNOR- Janvier 2017-MAJ 62. «<https://www.google.com/search?client=firefox-b-d&q=GRILLIER+Jean-Claude.VII-210%2C+livre+%C2%ABComprendre+les+plans+d%E2%80%99exp%C3%A9riences+Taguchi%C2%BB+AFNOR-+Janvier+2017-MAJ+62> » vu le 20/02/2020 à 21:56.

[4] **BOUZIDI. A, BADEK. M** : « Modélisation et optimisation mono et multi objectif des paramètres de coupe Lors de tournage d'un acier inoxydable 304L», Projet de fin d'études pour l'obtention du diplôme de Master en fabrication mécanique et productique ; Université Saad Dahleb de Blida 1, Faculté de Technologie, département de mécanique. 2018-2019

[5] **ZERTI. A**: Thèse de doctorat « Modélisation des efforts et de la rugosité de surface de l'acier inoxydable Martensitique basé sur les méthodes statistiques et les A.N.N», Université 8 Mai 1945 Guelma

[6] **SANDRINE. K**: Thèse de doctorat « Application de la méthodologie des plans d'expériences et de l'analyse de données à l'optimisation des processus de dépôt », Université de LIMOGES, 2004.

[7] **GOUPY. J, Lee. C** : Livre « Introductions aux plans d'expériences ». 3^e édition, 25 octobre 2006.

[8] <https://www.e-marketing.fr/Thematique/academie-1078/fiche-outils-10154/Le-plan-d-experience-324909.htm#> vu le 23/02/2020 à 19:48.

[9] **WAHDAME. B** : Thèse « Analyse et optimisation du fonctionnement de piles à combustible par la méthode des plans d'expériences ». Energie électrique. Université de Franche-Comté; Université de Technologie de Belfort-Montbéliard, 2006. Français. tel-00163317

[10] <http://www2.gch.ulaval.ca/cduchesne/Documents/64940/Chap3.PDF> vu le 29/02/2020 à 11:28

[11] **BOUMAZZA. N** : Thème « Optimisation des paramètres géotechniques des sols par la méthode de Taguchi », Présenté a l'Université 08 Mai 1945 de Guelma, Option : GEOTECHNIQUE. juin 2018

[12] **GERALDINE. B.C** : Livre : «La boîte à outils de l'Innovation »- 2^e édition (Français) Broché – 5 septembre 2012 ; Chapitre VII : Développement de l'innovation ; page 150. Collection : BâO La Boîte à Outils, Dunod , Broché: 192 pages.

[13] **YAHIAOUI. I**: « Les plans d'expériences Initiation à la construction et l'analyse des plans factoriels complets à deux niveaux et du plan composite centre », Université A. MIRA – Bejaia Faculté de Technologie Département de Génie des Procédés ; 2014/2015

[14] <https://3dc.asso-web.com/29+genichi-taguchi.html> vu le 28/02/2020 à 20:08

[15] <https://kitsdesurveiqse.afnor.org/pièces-jointes/download/aperçu/1310463> vu le 1/03/2020 à 16:29

[16] **ALEXIS. J**: « Pratique industrielle de la méthode Taguchi les plans d'expériences », Paris, Edition AFNOR, 1995.

[17] <https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/procedes-chimie-bio-agro-th2/genie-industriel-alimentaire-42469210/plans-d-experiences-f1006/> vu le 10/03/2020 à 18:16

[18] **KHOUALDIA. T** : Thèse de doctorat «Techniques de maintenance préventive des machines tournantes dans le cas de défauts combinés de roulements et

d'engrenages ». Université Badji Mokhtar-Annaba-Faculté des Sciences de l'Ingéniorat Département d'Electromécanique, Année: 2015/2016

[19]<https://support.minitab.com/fr-fr/minitab/18/help-and-how-to/modeling-statistics/doe/supporting-topics/taguchi-designs/taguchi-designs/> vu le 10/03/2020 à 19:30

[20] **ALLAL. M** : Mémoire de fin d'étude « Optimisation des conditions de coupe lors de l'usinage de deux aciers inoxydables ». Option : Conception et Production Industrielle, Université du 8 mai 1945 – Guelma Faculté des Sciences et de la Technologie Département de Génie Mécanique. Année universitaire 2015/2016.

[21] **KIR. A** : Thème « Effets du régime de coupe sur la qualité de surface, détermination des performances des machines-outils – Approche par Taguchi ». Université Badji Mokhtar Annaba, faculté des sciences de l'ingéniorat département de génie mécanique Année: 2014/2015.

[22] **NICOLAE. ILE**: Thèse « Contribution a la comprehension du fonctionnement des voiles en béton armé sous sollicitation sismique: apport de l'expérimentation et de la modélisation a la conception », l'institut national des sciences appliquées de LYON, Soutenue le 18 décembre 2000.

[23] **KASSOUL. A** : Cours« Ossatures Bâtiment (2015/2016); chapitre 3: les contreventements », MASTER Génie Civil – Option: Structures Civiles et industrielles –UHB Chlef.

[24] **RISHMANY. J**: En vue de l'obtention du grade de docteur: «Comportement statique et dynamique d'une structure périodique 3D d'un échangeur aéronautique: étude expérimentale, modélisation et simulations numériques ». Université TOULOUSE III – PAUL SABATIER ; Discipline : génie mécanique, le 17 avril 2007.

[25] **MOUAMNIA. D, BOUMAZA. K** : Thème : « Recherche de la position optimale des voiles de contreventement dans les structures de forme irrégulières ». Présenté à l'Université de Guelma, Faculté des Sciences et de la Technologie, Option : Conception et Calcul des Constructions, Juin 2014.

[26] <http://philippe.berger2.free.fr/Bois/Cours/TSC/Contreventement2/contreventement2.htm> vu le 24/03/2020 à 19:42

[27] **AIT OUFELLA. M** : Thème « Modélisation numérique du comportement des voiles de contreventement en béton armé couplés avec un profilé métallique ». Université MOULOUD MAMMARI, Tizi-Ouzou, faculté de génie de la construction ; département de génie civil, Option: Structures et Matériaux, promotion 2015/2016.

[28] <https://www.maxicours.com/se/cours/les-modes-propres-de-vibration-et-quantification-de-leurs-frequences/> vu le 25/03/2020 à 22:38

[29] https://www.futura-sciences.com/sciences/definitions/physique-phenomene-periodique-14964/?fbclid=IwAR3FMlm8B5c5N_ld%20zaI17jldIByj0TDvxmAF7UHOtZaKfXN0iKC4E5UhM8 vu le 25/03/2020 à 23: 10

[30] https://www.futura-sciences.com/sciences/definitions/physique-frequence-3940/?fbclid=IwAR3o0N_9SdUFmpOUkojLIHgjuGiE2iB38A_P6wWf1uxphTrcek9IaWfM6XA vu le 25/03/2020 à 23: 37

[31] **BOUZIANE. A, BOUBEGTITEN. L, KADA. O, SEGHIR. A** : Article « Comportement non linéaire et capacité sismique des voiles de contreventement en béton armé ». Université A. Mira, Bejaia. Route de Targua Ouzemour.

[32] **LAFIFI. B** : « Cours de modélisation des structures », Université 08 Mai 1945 de Guelma Faculté des Sciences et de la Technologie Département de : Génie Civil & Hydraulique.

[33] **BOUKHORS. Y**: Thème « Influence de la position et des dimensions des éléments de contreventement sur la stabilité et le cout d'un projet de batiment ». Université de M'SILA: faculté de technologie, promotion: juin 2012.

[34] **Mr. ALLAL. M-El-A**: Thème « Conception et étude d'un structure mixte et proposer une meilleure position des voiles.(Batiment SS+ RDC+8)», Université Mohamed Boudiaf –M'sila: faculté de technologie, promotion : 2016/2017.

[35] <https://fr.scribd.com/document/416108286/conclusion> vu le 9/04/2020 à 17:26

Logiciels utilisés :

- Autodesk Robot Structural Analysis Professional 2010 ;
- Microsoft Excel 2007 ;
- Minitab 18.