

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Mémoire De Master

Présenté à l'Université 8 Mai 1945 de Guelma

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département de : Génie Civil & Hydraulique

Spécialité : Travaux Publics

Option : VOIES ET OUVRAGES D'ART

Présenté par : DALI Ahlam et ALLOUT Amal

**Thème: Modélisation numérique et optimisation par la méthode
des surfaces de réponses des murs en terre armée.**

Sous la direction de : Dr. LAFIFI Brahim

Juin 2022

Remerciement

*Ce travail a été réalisé dans le cadre du projet de fin d'étude au niveau de
département de génie civil et hydraulique spécialité voies et ouvrages d'art de
L'Université 8 mai 1945 Guelma.*

*Nous remercions en premier Allah, pour la santé, la volonté d'entamer et de
terminer ce travail.*

*Nous remercions chaleureusement notre encadreur **Dr LAFIFI Brahim** pour sa
disponibilité, ces conseil, sa gentillesse et surtout pour la confiance qu'il nous a
témoignées.*

*Nous remerciant aussi **les membres du jury** pour avoir accepté d'honorer par
leur présence.*

*Nos remerciements s'adressent aussi à toutes personne ayant contribué de près
ou de loin à la réalisation de ce travail.*

Dédicace

Premièrement et avant tout الحمد لله الذي بنعمته تتم الصالحات

Je dédie ce travail À ma famille qui je prie dieu que la protège ;

À mes chers parents... À mes sœurs ... À mon frère...

Aussi À la mémoire de mes grands parents (رحمهم الله)

DALI Ahlam ...



Dédicace

Premièrement et avant tout الحمد لله الذي بنعمته تتم الصالحات

Je dédie ce modeste travail À moi-même avant tout ;

À ma sœur pour son soutien et que dieu la protège ;

À la mémoire de mes parents, mes deux frères et mon oncle (رحمهم الله)

Aussi À mes chères amies ;

À mes collègues de travail.....

ALLOUT Amal ...



Résumé

L'objectif de ce travail de fin d'études est la modélisation numérique et l'optimisation des paramètres influençant la stabilité des murs en terre armée, par l'utilisation de la méthode des surfaces de réponse via les plans d'expériences numériques. Cette technique est utilisée à travers le calcul numérique par le logiciel en éléments finis Plaxis, de la stabilité des murs en terre armée renforcées par géosynthétique.

Pour atteindre cet objectif, un plan d'expériences numérique fractionnel type Box-Behnken sera adopté comme support de modélisation du mur basé sur les paramètres de renforcement, à savoir l'espacement vertical entre renforcements, sa longueur, l'angle d'inclinaison du remblai technique de renforcement et sa largeur. Une analyse statistique des résultats basée sur l'analyse de variance (ANOVA) et la méthodologie de surfaces de réponse (RSM) sera menée et cela dans le but de déterminer les paramètres influençant sur le comportement de problème traité et de proposer des modèles mathématiques reliant les paramètres de renforcement pour d'éventuelles optimisations. Enfin, le modèle mathématique développé est couplé avec une technique d'optimisation (fonction de désirabilité) pour l'optimisation des paramètres de renforcement.

Mots Clés : Modélisation numérique, Plan d'expériences, RSM, Murs en terre armée, Géosynthétique, Optimisation.

Abstract

The objective of this end-of-studies work is the numerical modeling and optimization of the parameters influencing the stability of reinforced earth walls by using the response surface method via numerical experimental plans. This technique is used through the numerical calculation by the finite element software Plaxis of the stability of reinforced earth walls reinforced by geosynthetics.

To achieve this objective, an experiment plan type Box-Behnken will be adopted to support modeling the wall based on the reinforcement parameters, namely the vertical spacing between reinforcements, its length, and the angle of inclination of the embankment reinforcement technique, and its width. A statistical analysis of the results based on the analysis of variance (ANOVA) and the response surface methodology (RSM) will be carried out to determine the parameters influencing the behavior of the problem treated and propose mathematical models linking reinforcement parameters for possible optimizations. Finally, the developed mathematical model is coupled with an optimization technique (desirability function) to optimize the reinforcement parameters.

Keywords: Numerical modeling, Design of experiments, RSM, Reinforced earth walls, geosynthetics, Optimization.

ملخص

الهدف من هذا العمل في نهاية الدراسة هو النمذجة الرقمية وتحسين الإعدادات التي تؤثر على ثبات الجدران الأرضية المسلحة ، باستخدام طريقة سطح الاستجابة عبر المخططات التجريبية الرقمية. تُستخدم هذه التقنية من خلال الحساب الرقمي بواسطة برنامج العناصر المحدودة Plaxis ، لاستقرار الجدران الأرضية المعززة والمدعومة بمواد أرضية صناعية (جيوسانتيك).

لتحقيق هذا الهدف ، سيتم اعتماد خطة التجربة الرقمية الجزئية من نوع Box-Behnken كدعم لنمذجة الجدار بناءً على إعدادات التعزيز ، أي التباعد الرأسي بين التعزيزات وطولها وزاوية ميل الردم المختار و عرضه. سيتم إجراء تحليل إحصائي للنتائج بناءً على تحليل التباين (ANOVA) ومنهجية سطح الاستجابة (RSM) من أجل تحديد الإعدادات التي تؤثر على سلوك المشكلة التي تمت معالجتها واقتراح نماذج رياضية تربط إعدادات التعزيز الممكنة للتحسين. أخيرًا ، يقترن النموذج الرياضي المطور بتقنية التحسين (وظيفة الاستحسان) لتحسين إعدادات التعزيز.

كلمات مفتاحية:

النمذجة الرقمية ، تصميم التجارب ، RSM ، الجدران الأرضية المسلحة ، جيوسانتيك ، التحسين.

Table des matières

Remerciements	
Dédicace	
Résumé	i
Abstract	ii
ملخص	iii
Table des matières	iv
Liste des symboles	xv
Liste des figures	x
Liste des tableaux	xiv
Introduction générale	xvii

Chapitre I : Les ouvrages de soutènement

I.1 Introduction	2
I.2 Définition	2
I.3 Principe de soutènement	2
I.4 Rôle des ouvrages de soutènement	3
I.5 Différents types des ouvrages de soutènement	3
I.6 Définition de mur de soutènement	4
I.7 Type des murs en soutènement	4
I.7.1 Les murs poids	6
I.7.2 Murs en béton armé ou murs cantilever	6
I.7.3 Voile et poutres ancrés	7
I.7.4 Rideau de palplanches métalliques	8
I.7.5 Paroi en béton	8
I.7.6 Murs en sol renforcé	9
I.7.7 Le mur en terre armée	9
I.8 Choix de type de mur de soutènement	10
I.9 Justification du soutènement	10
I.10 Conclusion	12

Chapitre II : les murs en terre armée

II.1 Introduction	14
II.2 Avantages de la terre armée	14
II.3 Les éléments d'un mur en terre armée	14
II.3.1 La terre ou le remblai	14
II.3.2 Les armatures	15
II.3.3 Les écailles	15
II.4 Domaine d'applications des murs en terre armée	16
II.4.1 Routes et autoroutes	16
II.4.2 Ponts	16
II.4.3 Ouvrages ferroviaires	17
II.4.4 Ouvrages hydrauliques	17
II.4.5 Ouvrages industriels et de protection	18
II.5 Le renforcement des soutènements par le géosynthétique	19
II.5.1 Définition des géosynthétique	19
II.5.2 Les types des géosynthétiques	19
II.5.3 Domaine d'application des géosynthétiques	21
II.5.4 Les fonctions des géosynthétiques	22
II.5.5 Les géosynthétiques dans les murs de soutènement	22
II.6 Conclusion	23

Chapitre III : Les plans d'expériences et la méthode des surfaces de réponses

III.1 Introduction	25
III.2 Historique des plans d'expériences	25
III.3 But et domaine d'utilisation	26
III.4 Définition d'un plan d'expérience	26
III.5 Conditions d'application des plans d'expériences	26
III.5.1 Choix de la méthode d'expérimentation	27
III.5.2 Vocabulaire de base des plans d'expériences	27
III.5.3 Facteur	28

III.5.3.1 Facteur quantitatif	28
III.5.3.2 Facteur qualitatif	28
III.5.4 Réponses	30
III.5.5 Choix des réponses	30
III.6 Différents types des plans d'expériences	30
III.6.1 Plans de mélanges	30
III.6.2 Plans de criblage	31
III.6.2.1 Plans factoriels complets à deux niveaux	31
III.6.2.2 Plans factoriels fractionnaires à deux niveaux	31
III.6.2.3 Les plans de Plackett-Burman	32
III.6.3 Les tables de Taguchi	32
III.6.4 La méthode de surface de réponse	33
III.6.4.1 Les plans composites centrés	34
III.6.4.2 Les plans de Box-Behnken	35
III.7 Principaux avantages des plans d'expériences	35
III.8 Choix d'une stratégie expérimentale	35
III.8.1 Démarche expérimentale	36
III.8.2 Les étapes de l'expérimentation	37
III.8.3 La méthodologie des surfaces de réponse	39
III.8.3.1 Les principes généraux	39
III.8.3.2 Étapes de la méthodologie de surface de réponse	39
III.8.3.3 La RSM pour l'optimisation en ingénierie	42
III.8.3.3.1 Méthode graphique	42
III.8.3.3.2 Méthodes numériques	42
III.9 Conclusion	43
Chapitre IV : Présentation du logiciel de calcul Plaxis	
IV.1 Présentation de la méthode des éléments finis	45
IV.1.1 Le calcul par la méthode des éléments finis	45
IV.2 Présentation du code de calcul Plaxis	46
IV.2.1 Les sous-programmes de Plaxis	47

IV.2.2 Les modèles de comportement utilisés dans le Plaxis	48
IV.2.2.1 Modèle élastique linéaire	48
IV.2.2.2 Modèle élastique parfaitement plastique Mohr-Coulomb	48
IV.2.2.3 Modèle de sol avec écouissage (Hardening Soil Model)	50
IV.2.2.4 Modèle pour les sols mous (Soft Soil model)	50
IV.3 Les éléments de la modélisation	50
IV.3.1 Modélisation de sol	50
IV.3.2 Plaques	51
IV.3.3 Géogrilles	51
IV.3.4 Interfaces	52
IV.4 La démarche de Modélisation	53
IV.4.1 Entrée des données	53
IV.4.2 Le calcul	54
IV.4.3 Analyse des résultats	54
IV.5 Conclusion	55
Chapitre IV : Validation du modèle numérique et étude paramétrique	
V.1 Présentation du modèle numérique	57
V.2 Modèles constitutifs et paramètres géomécaniques de modélisation	58
V.2.1 Le sol	58
V.2.2 Les écailles en béton	60
V.2.3 L'interface sol/écailles en béton	60
V.2.4 Les armatures de renforcement	60
V.3 Critères d'analyse	61
V.4 Résultats de la modélisation	61
V.4.1 Déformation et stabilité	61
V.5 Étude Paramétrique	62
V.5.1 Influence de l'espacement (Sv)	63
V.5.2 Influence de la longueur de Renforcement (L)	63
V.5.3 Influence de la largeur du Remblai (B)	64
V. 5.4 Influence de l'angle d'inclinaison Alpha α	65

V.6 Conclusion	65
Chapitre VI : Optimisation des paramètres de renforcement	
VI.1 Introduction	67
VI.2 Choix d'un plan d'expérience	67
VI.3 Interprétation des résultats par la méthode des surfaces de réponses	68
VI.3.1 Introduction	68
VI.3.2 Analyse de la variance ANOVA	69
VI.3.3 Analyse de régression	70
VI.3.4 Résultats	71
VI.3.4.1 Analyse de régression	73
VI.3.4.2 Analyse des surfaces de réponses et graphiques	75
VI.3.4.3 Optimisation par la méthode de fonction de désirabilité	76
VI.4 Conclusion	81
Conclusion générale et perspectives	82
Références bibliographiques	83

Liste des figures

Chapitre I : Les ouvrages de soutènement

Figure I.1: Les murs bordant.	4
Figure I.2 : Les murs indépendants.	5
Figure I.3: les murs poids.	6
Figure I.4: Murs en béton armé.	7
Figure I.5: Un voile.	7
Figure I.6: Rideau de palplanches métalliques.	8
Figure I.7: Paroi en béton.	9
Figure I.8: Mur en sol renforcé.	9
Figure I.9: Mur en terre armée.	10
Figure I.10: Diagramme de déformation.	11
Figure I.11 : (Stabilité externe) les efforts au voisinage de l'ouvrage.	11

Chapitre II : Les murs en terre armée

Figure II.1 : Mur en terre armée	14
Figure II.2 : Armature de terre armée.	15
Figure II.3 : Ecailles.	15
Figure II.4 : Application des murs en terre armée dans les routes.	16
Figure II.5 : Application des murs en terre armée dans les ponts.	17
Figure II.6 : Application des murs en terre armée dans les ouvrages ferroviaires.	17
Figure II.7 : Application des murs en terre armée dans les ouvrages.	18
Figure II.8 : Application des murs en terre armée dans les ouvrages industriels et de protection.	18
Figure II.9 : Type des géotextiles.	19
Figure II.10 : Géomembranes.	20
Figure II.11 : Géocomposite.	20

Figure II.12 : Types de géogrilles.	21
Figure II.13 : Principe des murs en sol renforcé par géosynthétiques.	22

Chapitre III : Les plans d'expériences et la méthode des surfaces de réponse

Figure III.1: Schématisation d'un processus expérimental.	27
Figure III.2 : Les différents types de facteur.	28
Figure III.3: Le domaine et les niveaux d'un facteur.	29
Figure III.4: Le domaine et les niveaux d'un facteur.	29
Figure III.5: La surface de réponse correspondant à tous les points du domaine d'étude.	30
Figure III.6: Illustration du plan de Box-Behnken pour trois facteurs. Il y a douze points d'expériences au milieu des arêtes du cube et trois points au centre.	32
Figure III.7: Surface de réponse.	33
Figure III.8: Plan composite centré.	34
Figure III.9: Plan de Box-Behnken pour trois facteurs.	35
Figure III.10: Démarche générale de la méthodologie expérimentale.	36
Figure III.11: Etapes de la méthodologie de surface de réponse.	39

Chapitre IV : Présentation du logiciel de calcul Plaxis

Figure IV.1: Exemples de problèmes en déformations plane et axisymétrique.	47
Figure IV.2: Courbe intrinsèque du modèle de Mohr-Coulomb.	49
Figure IV.3: Résultats d'essais triaxiaux standards (a) et modèle élasto-plastique (b) (Brinkgreve et al., 2011).	49
Figure IV.4: Position des nœuds et des points de contrainte dans les éléments du sol.	50
Figure IV.5: Position des nœuds et des points de contrainte sur les éléments de géogrille à 3 nœuds et à 5 nœuds.	51
Figure IV.6: Distribution des nœuds et des points de contrainte dans les éléments d'interface et connexion avec les éléments de sol : (a) élément à 6 nœuds ; (b) élément à 10 nœuds (Brinkgreve et al., 2011)	52

Chapitre V : Validation du modèle numérique et étude paramétrique

Figure V.1 : Géométrie du mur réel étudié.	57
Figure V.2 : Représentation du mur tridimensionnelle par un modèle bidimensionnel.	58
Figure V.3 : Modèle numérique du modèle de référence.	59
Figure V.4 : Déplacements horizontaux dans le mur en terre armée (6 m de hauteur).	62
Figure V.5 : Influence de l'espacement vertical (S_v).	63
Figure V.6 : Influence de la longueur de renforcement (L).	64
Figure V.7 : Influence de la largeur de remblai (B).	64
Figure V.8 : Influence de l'angle d'inclinaison du remblai ($\text{Alpha } \alpha$).	65

Chapitre VI : Optimisation des paramètres de renforcement.

Figure VI.1 : Valeurs numériques et valeurs prédites du déplacement horizontal U_x .	73
Figure VI.2 : Probabilités normales des résidus du déplacement horizontal U_x .	74
Figure VI.3 : Surfaces de réponses et contours pour le déplacement horizontal U_x .	75
Figure VI.4 : Désirabilité individuelle d_i d'une réponse Y_i .	76
Figure VI.5 : Fonction de désirabilité d'une fonction à minimiser.	77
Figure VI.6 : Fonction de désirabilité d'une fonction à cibler.	78
Figure VI.7 : Représentation graphique de la procédure d'optimisation.	80

Liste des tableaux

Chapitre I : Les ouvrages de soutènement

Tableau I.1 : Classification des ouvrages de soutènement d'après le mode de reprise de la poussée.	4
---	---

Chapitre II : Les murs en terre armée

Tableau II.1 : Fonctions des géosynthétiques.	22
--	----

Chapitre III : Les plans d'expériences et la méthode des surfaces de réponse

Tableau III.1 : Étapes de l'expérimentation.	37
---	----

Chapitre V : Validation du modèle numérique et étude paramétrique

Tableau V.1 : Caractéristiques géomécaniques du sol.	59
---	----

Tableau V.2 : Caractéristiques des écaillés en béton.	60
--	----

Tableau V.3 : Caractéristiques des renforcements.	61
--	----

Tableau V.4 : Résultats du calcul de référence avec les armatures synthétiques.	62
--	----

Tableau V.5 : Influence des paramètres géométriques du mur renforcé.	63
---	----

Chapitre VI : Optimisation des paramètres de renforcement

Tableau VI.1 : Intervalle de variation des paramètres à optimiser.	67
---	----

Tableau VI.2 : Plan d'expérience type Box-Behnken L25 (4 facteurs, 3 niveaux).	68
---	----

Tableau VI.3 : Plan d'expériences L25 en valeurs des paramètres.	71
---	----

Tableau VI.4 : Analyse de la variance ANOVA pour le déplacement horizontal U_x .	72
---	----

Tableau VI.5 : Contraintes appliquées sur les paramètres à optimiser.	79
--	----

Tableau VI.6 : Valeurs des paramètres à optimiser.	79
---	----

Tableau VI.7 : Comparaison entre les valeurs des paramètres numériques et prédites.	80
--	----

Liste des symboles

β :	Vecteur de régression.
ε :	Terme d'erreur.
x_i :	Variables.
y :	Grandeur d'intérêt.
nf :	Essais du plan factoriel.
S :	Réponse.
f_β :	La fonction de réponse.
X_i :	Variables de prédiction codées appelées facteurs.
β :	Coefficient de régression.
R_i :	Variable courante.
X :	La matrice de terme de modèle évalué aux points de conception.
R^2 :	Coefficient de détermination statistique.
R^2_{adj} :	Coefficient de détermination ajusté.
SS_E :	La somme des carrés de l'erreur.
Sst :	L'erreur totale.
G :	Module de cisaillement.
ν :	Coefficient de Poisson.
K :	comme second paramètre.
E :	Module d'Young.
C :	Cohésion.
Φ :	L'angle de frottement.
Ψ :	L'angle de dilatance.
σ_n :	Contrainte normale.
τ :	Contrainte de cisaillement.
Deq :	L'épaisseur équivalente.
J :	Module de rigidité.
N :	La tension interne.
U :	Déformation du sol renforcé.
F_s :	Coefficient de sécurité.
S_v :	L'espacement vertical.
B :	Largeur de remblai.
L :	Longueur de renforcement.

Alpha α :	L'angle d'inclinaison du remblai de renforcement.
SC :	La somme des carrés.
N :	Nombre total d'expériences.
N_{nf} :	Niveau de chaque facteur.
MC :	La moyenne des carrés.
df :	degré de liberté.
MC_e :	Les carrés moyens des erreurs.
U_x :	Déplacement horizontal.
Y :	Fonction de réponse.
b_0 :	Le terme constant de l'équation de régression.
X_i :	Paramètres d'entrée.
y_i :	Valeur de la réponse calculée à la <i>i</i> ème expérience.
\bar{y}_i :	Valeur mesurée à la <i>i</i> ème expérience.
\bar{y} :	Valeur moyenne des réponses mesurées.
$Y_{i,min}$:	Valeur en dessous de laquelle la réponse Y_i ne convient pas ($d_i = 0$).
$Y_{i,max}$:	Valeur cible au-dessus de laquelle la réponse Y_i est très satisfaisante ($d_i = 1$).



**Introduction
générale**

Introduction générale

Depuis l'invention de la terre armée par Henri. VIDAL il ya maintenant plus de cinquante ans, les procédés de renforcement des sols se sont considérablement développés à travers le monde dans le domaine de la construction géotechnique. Ils se sont progressivement imposés comme des méthodes à la fois simples de mise en œuvre et économiquement avantageuses par rapport à d'autres solutions plus traditionnelles qui permettent d'améliorer les propriétés mécaniques des sols. La technique de renforcement des massifs de remblais par géosynthétiques permet de réaliser d'importants ouvrages de soutènements en renforçant un massif de remblais associé à un parement.

L'objectif de ce travail est de présenter et utiliser la méthode des surfaces de réponse via les plans d'expériences, pour l'optimisation des paramètres géométriques d'un mur en terre armé à savoir l'espacement vertical des couches et la longueur de renforcement, ainsi la largeur et l'angle d'inclinaison du remblai sélectionné de renforcement, il s'agit de l'utilisation des plans d'expériences numériques pour l'estimation du déplacement horizontal et le cout d'un mur en terre armée, dont le but est d'obtenir un maximum d'information et en réalisant un minimum d'essais, en se basant sur la modélisation d'un mur en terre armée par le logiciel de calcul par élément finis Plaxis. L'approche consiste à utiliser un plan d'expérience de type Box Behnken L25 comme support de modélisation pour déterminer les paramètres de comportement utilisés souvent dans la modélisation.

Le mur de soutènement de référence utilisé est de 6 m de hauteur est composé initialement, horizontalement et verticalement de 4 écailles superposées et renforcés par 8 niveaux de renforcements géosynthétiques de 4 mètres de longueur.

Le comportement mécanique des murs de soutènement en sol renforcé par géosynthétiques est complexe et nécessite des études et des recherches qui permet d'analyser la stabilité, la déformation, comprendre les mécanismes de rupture et l'influence de plusieurs paramètres géométriques tel que l'espacement vertical entre les couches de renforcement, la longueur du renforcement, la largeur du remblai et l'angle d'inclinaison du remblai de renforcement. C'est dans ce cadre que s'inscrit le présent travail, dont l'objectif est de développer un modèle numérique qui tient compte des interactions complexe pour ce type d'ouvrage.

La conception, le calcul et la surveillance des murs en sol renforcé par géosynthétique nécessitent un certain nombre de règles et de principes (Méthodes), ont été élaborés à la suite de nombreuses analyses du comportement des sols renforcés sous l'effet des diverses paramètres géométriques.

Le présent mémoire est présenté en six chapitres :

Le premier chapitre est une revue bibliographique sur les ouvrages de soutènement. Il sera exhibé dans ce chapitre : présentation générale des ouvrages de soutènement, les différents types des ouvrages de soutènement leurs rôles, choix de type des murs de soutènement et justifications des soutènements.

Le deuxième chapitre sera consacré aux murs en terres armée, avantage de la terres armée, les éléments constitutif d'un mur en terre armée, domaine d'application des murs en terre armée, le renforcement des soutènements par le géosynthétique.

Dans le troisième chapitre nous présenterons les plans d'expériences et la méthode des surfaces de réponse notamment le plan type Box Behnken qui est utilisé dans notre mémoire, 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 variation supposées (facteurs).

Le quatrième chapitre est consacré à la présentation du logiciel de calcul par élément finis Plaxis, qui sera notre support de modélisation numérique le long de ce travail.

Le cinquième chapitre présente la validation du modèle numérique de référence en ce basant sur le travail présenté par Abdelkader dans sa thèse à travers la comparaison des résultats obtenus en termes de déplacement horizontal du mur (U_x) et du coefficient de sécurité (F_s). Dans le but d'étudier l'influence des paramètres géométriques du mur renforcé, a savoir l'espacement vertical entre les couches de renforcement, la longueur du renforcement, la largeur du remblai et l'angle d'inclinaison du remblai de renforcement, une étude paramétrique sera également présentée.

Le sixième chapitre présente une étude statistique à travers l'analyse de variance (ANOVA) d'une part et la procédure d'optimisation des paramètres de renforcement d'une autre part, en se basant sur les modèles numériques développés par la méthode des surfaces de réponses.

Enfin les conclusions principales tirées de cette étude, ainsi les perspectives pour les futurs travaux ont été présentées à la fin de ce mémoire comme conclusion générale.



Chapitre I
Les ouvrages de
soutènement

Chapitre I : Les ouvrages de soutènement

I.1 Introduction	2
I.2 Définition	2
I.3 Principe de soutènement	2
I.4 Rôle des ouvrages de soutènement	3
I.5 Différents types des ouvrages de soutènement	3
I.6 Définition de mur de soutènement	4
I.7 Type des murs en soutènement	4
I.7.1 Les murs poids	6
I.7.2 Murs en béton armé ou murs cantilever	6
I.7.3 Voile et poutres ancrés	7
I.7.4 Rideau de palplanches métalliques	8
I.7.5 Paroi en béton	8
I.7.6 Murs en sol renforcé	9
I.7.7 Le mur en terre armée	9
I.8 Choix de type de mur de soutènement	10
I.9 Justification du soutènement	10
I.10 Conclusion	12

I.1 Introduction

Les ouvrages de soutènement sont des ouvrages courants de génie civil. Ils sont construits en nombre pour des usages aussi variés que le blindage de fouille pour la construction d'ouvrages souterrains (parking, voirie, soubassement d'immeubles...).

La détermination des forces agissantes entre le sol et les structures de soutènement est une étape importante dans l'ingénierie. Une conception sécuritaire et économique d'un écran de soutènement nécessite une connaissance profonde des pressions de terre passive et active.

Ils ont pour principale fonction de soutenir un remblai ou un déblai, ils sont conçus de manière à créer une dénivellation entre les terres situées à l'amont de l'ouvrage et les terres situées à l'aval c'est-à-dire devant l'ouvrage.

Dans ce chapitre on va présenter les ouvrages de soutènement avec leurs différents types, leurs rôles et aussi le choix d'un ouvrage de soutènement et la justification de soutènement.

I.2 Définition

Les ouvrages de soutènements sont ceux qui retiennent des terrains (sols, roches ou remblais et de l'eau). Le matériau est retenu par l'ouvrage s'il est maintenu à une pente plus raide que celle qu'il adopterait éventuellement si aucun ouvrage n'était présent. Les ouvrages de soutènement comprennent tous les types de murs et de systèmes d'appui dans lesquels des éléments de structure subissent des forces imposées par le matériau soutenu.[6]

I.3 Principe de soutènement

La principale considération dans le dimensionnement des soutènements, quelque soit leur type, est la correcte estimation de la poussée des terres ou du matériau retenu par cette paroi. Dans leur état naturel, les terres tendent à se conformer en un tas pyramidal conique à la façon d'un tas de sable présentant une pente de talus naturel. L'interposition d'un écran de soutènement dans un massif de terre se substitue à la partie manquante à la base et reçoit une partie du poids des terres restantes en une composante biaise de poussée qui tend à faire basculer et en même temps glisser le mur de soutènement disposé. Pour combattre cette poussée des terres, le mur peut être constitué de différentes façons.

- Opposer un poids supérieur à la partie remplacée en contrebalancement de la poussée telle sont les murs-poids.
- Être ancré dans un corps mort fournissant une inertie ou ancré plus loin dans le sol à

proximité qui ne fait pas partie de l'ensemble susceptible de glissement ou a une meilleure composition afin que la poussée soit contenue, éviter le glissement et annuler le moment de basculement: ce sont les parois ancrées.

- Résister au basculement par une semelle insérée sous les terres, semelle de surface de base en rapport avec la hauteur fournissant le moment de renversement.
- Réduire la poussée par un épaulement des terres retenues entre deux contreforts murs à redans. Les murs de soutènement, quelque soit leur type, doivent en principe être drainés, car la pression de l'eau retenue derrière un mur sans interstices d'évacuation augmente d'autant la poussée sur l'ouvrage et modifie la "consistance" du matériau en le fluidifiant ce qui apporte une transmission de poussée d'une partie plus importante, la friction (phénomène de s'agripper) en résistance au glissement ayant partiellement disparu, la pente naturelle du tas diminue.[6]

I.4 Rôle des ouvrages de soutènement

Le rôle des ouvrages de soutènement est de retenir les massifs de terre.

La pente que suppose la construction d'un talus occasionne généralement une perte d'espace, que le mur vertical permet de récupérer. Le mur peut également servir de butée pour des pentes naturelles instables.

I.5 Différents types des ouvrages de soutènement

Il existe de nombreux types d'ouvrages de soutènement, qui ont été conçus pour répondre aux situations les plus diverses. Ils se distinguent principalement par :

- leur morphologie ;
- leur mode de fonctionnement ;
- les matériaux qui les constituent ;
- leur mode d'exécution ;
- leur domaine d'emploi privilégié (urbain, montagneux, aquatique,...).

Le tableau I.1 montre les divers types d'ouvrages de soutènement classés d'après le mode de reprise de la poussée, en séparant les ouvrages rigides des ouvrages souples ou semi-souples.

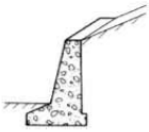
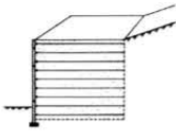
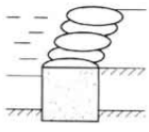
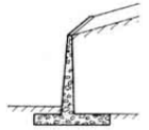

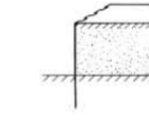
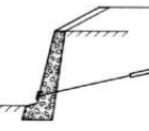
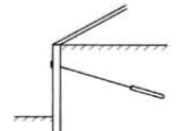
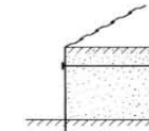
Classification des ouvrages de soutènement d'après le mode de reprise de la poussée			
Mode de reprise de la poussée	Ouvrages de soutènement		
Poids de l'ouvrage	 Mur poids en béton ou maçonnerie	 Mur en Terre Armée	 Ouvrage cellulaire
Encastrement	 Mur cantilever en béton armé	 Paroi moulée	 Rideau de palplanches
Ancrage	 Mur en béton, ancré	 Paroi moulée ancrée	 Rideau ancré

Tableau I.1 : Classification des ouvrages de soutènement d'après le mode de reprise de la poussée.

I.6 Définition de mur de soutènement

Un mur de soutènement est, par définition, un mur destiné à contenir les terres dans un espace réduit afin de répondre aux différents besoins humains.

I.7 Type des murs en soutènement

En se basant sur le fait que la matière à soutenir par l'ouvrage est de la terre, on peut catégoriser distinctement les murs de soutènement en deux [7] :

✓ Les murs bordant, à leur périphérie, les sous-sols enterrés

Ils ne sont pas conçus pour être stables d'eux-mêmes. Ils ne se stabilisent que s'ils sont maintenus, en tête par un plancher supérieur et accessoirement par des murs latéraux.

Ainsi, pour éviter les risques d'effondrement, il faut éviter d'effectuer le remblayage sans même avoir réalisé le plancher haut du sous-sol.



Figure I.1 : les murs bordant.

- ✓ **Les murs indépendants** du bâtiment ou qui sont quelques fois accolés à ce dernier.



Figure I.2 : Les murs indépendants.

Nous pouvons distinguer :

- Les murs destinés à soutenir les terres en limite de propriétés. Les murs qui sont à l'intérieur d'une propriété et qui permettent la création des terrasses étagées.
- Les murs qui bordent les rampes d'accès au garage situé en sous-sol.
- Les murs qui sont maintenus constamment par des tirants d'ancrage. Ils sont mis en œuvre pour être auto-stables.

Les murs de soutènement qui sont considérés comme auto-stables peuvent également être divisés en deux grandes familles :

✓ **Les murs-poids ou murs gravitaires** : qui acquièrent leur stabilité uniquement grâce à leur propre masse (gabion).

✓ **Les murs lestés ou murs cantilevers** : Ils peuvent être sous T renversé ou d'un L, coulés sur place ou préfabriqués.

Mais d'une manière générale, tous les ouvrages de soutènement peuvent être différenciés selon les critères suivants :

- Leur morphologie : ouvrages massifs, ouvrages en béton armé, parois ancrées ou non, etc.
- Leur méthode de dimensionnement et fonctionnement.
- Les méthodes employées pour leur mise en œuvre.
- Les matériaux utilisés : aciers, terres armées, maçonnerie, géosynthétique, béton armé ou non, etc.
- Leur domaine d'emploi spécifique.

I.7.1 Les murs poids

Ce sont généralement des ouvrages rigides ou semi-rigides et sont équipés d'un système de drainage quand ils n'ont pas pour fonction de maintenir le niveau de l'eau contenu dans les terres à soutenir.

Ils sont employés habituellement pour soutenir des matériaux en déblai. De plus, ils sont faciles à mettre en œuvre et s'intègrent parfaitement au site dans lequel ils sont réalisés.

Les matériaux qui peuvent être utilisés pour leur réalisation sont :

- Maçonnerie de pierre jointoyée, de béton non armé ou en béton cyclopéen (blocs de pierres ou moellons noyés dans le béton) coulé en place.
- Maçonnerie de pierres sèches ou pierres non jointoyées et/ou gabion.
- Éléments préfabriqués en béton armé ou non (caissons remplis de terre, blocs, poutres, cellules fleuries, etc).



Figure I.3 : les murs poids.

I.7.2 Murs en béton armé ou murs cantilever

Ils sont très couramment employés. Ils sont caractérisés par une base élargie qui est encastree dans la partie supérieure du sol de fondation afin de faire participer le remblai à soutenir dans sa stabilité.

Un voile en béton armé est encastree dans la semelle de fondation en béton armé. Cette dernière peut être équipée d'une bêche afin de garantir la stabilité du mur au glissement dans le cas où la résistance du sol et/ou l'emprise imposent que la largeur de la semelle soit faible. Comme les murs poids, ils peuvent être également considérés comme rigides. Pour la pérennité de l'ouvrage, vous pouvez avoir recours à des contreforts extérieurs ou intérieurs,

des tirants, des fondations sur pieux et une console. Ils sont généralement réalisés sur un sol ayant une assez bonne portance (moyen) dont les tassements sont faibles. Ils sont adaptés pour les ouvrages en déblai comme en remblai, sur les sites terrestres hors d'eau.



Figure I.4 : Mus en béton armé.

I.7.3 Voile et poutres ancrés

Les voiles ancrés sont des ouvrages réalisés en déblai par le terrassement du sol en place en une ou plusieurs passes. Elles sont formées d'éléments verticaux (pieux, planches ou tubes) liées entre eux et ancrer par deux ou plusieurs tirants d'ancrage précontraints. Ils peuvent être réalisés sur un même plan ou avec des plans décalés vers l'aval (disposition en gradin).

Étant donné que ce ne sont pas des ouvrages destinés à retenir les eaux, il est impératif qu'un dispositif de drainage adéquat soit réalisé.

Les poutres ancrées quant à elles se différencient des voiles ancrés par le fait qu'elle est épaisse et ne comporte qu'un seul lit de tirants d'ancrage précontraints. Ce sont des ouvrages de soutènement en déblai et de stabilisation. Tous les types de terrains leur conviennent. Toutefois, ils ne sont réalisés que par des entreprises spécialisées.



Figure I.5 : Un voile.

I.7.4 Rideau de palplanches métalliques

C'est une structure chargée par la poussée des terres et de l'eau à soutenir. Il est très résistant en flexion dont les appuis sont constitués par le sol en fiche (la partie enterrée du rideau) et des tirants d'ancrage ou butons qui sont disposés dans la partie libre de l'écran. Les palplanches sont des profilés que l'on obtient par laminage à chaud ou profilage à froid. Elles sont enfoncées dans le sol par battage, vérinage ou vibrage. S'emboîtant les unes aux autres, elles permettent la réalisation des rideaux continus très étanches qui peuvent être rectilignes ou courbes.

Leur domaine d'utilisation est assez large du fait qu'elles permettent de construire des soutènements aussi bien en remblai qu'en déblai. De plus, elle est relativement étanche ce qui la rend intéressant pour des sites aquatiques (batardeau). Ainsi, elle peut être employée pour le soutènement et défenses de berges de rivières et canaux, quais fluviaux et maritimes. Ce sont uniquement des entreprises spécialisées qui peuvent la réaliser.



Figure I.6 : Rideau de palplanches métalliques.

I.7.5 Paroi en béton

Que ce soit une paroi moulée, une paroi préfabriquée ou une paroi berlinoise, elles peuvent être encastrées, ancrées ou bétonnées.

Une paroi moulée est obtenue par l'assemblage de panneaux verticaux en béton armé dans un même plan. Ces derniers sont réalisés par la mise en place d'armatures dans une

tranchée avant de procéder au bétonnage grâce à un tube plongeur. Elle est spécialement utilisée pour des travaux sous nappe.



Figure I.7 : Paroi en béton.

I.7.6 Murs en sol renforcé

Ce sont des ouvrages dont le remblai est renforcé ou armé. Lors de la mise en place du massif de remblai par couches successives compactées, on y insère les armatures ou les éléments de renforcement. Les renforcements sont souples, résistants et extensibles. Ils peuvent être métalliques (lanières métalliques, treillis soudés, etc.) ou synthétiques (nappes géotextiles, bandes géosynthétiques, etc.).



Figure I.8 : Mur en sol renforcé.

I.7.7 Mur en terre armée

Il s'agit d'une méthode de soutènement assez récente (1963) développée par Henri Vidal, qui consiste à utiliser le sol, et non un mur en béton pour assurer la stabilité d'un versant. Le concept est de renforcer le sol par l'ajout d'armatures qui solliciteront un frottement entre elles et les cailloux du remblai.

Un massif en terre armée est constitué de trois composants :

- Un remblai granulaire compacté en couches peu épaisses.
- Les armatures disposées en lit dans le remblai qui peuvent être de deux natures :
 - 1- Les métalliques qui sont jusqu'à maintenant les plus répandues.
 - 2- Géosynthétique qui ne présentent pas de problème de corrosion et qui tendent à remplacer les premières.
- Un parement, faisant le lien entre les armatures et assurant l'esthétique du mur, il est généralement réalisé en éléments de béton préfabriqué faciles à assembler, en pneus ou autres éléments récupérés destinés à être couverts de végétaux. L'ensemble forme un massif stable assurant la retenue de la poussée du sol en place.



Figure I.9 : Mur en terre armée.

I.8 Choix de type de mur de soutènement

En choisie le type de mur de soutènement en fonction de :

- Mode de réalisation (déblai, remblai),
- Données géométriques (dénivellation à créer),
- Site (urbanisé, aquatique, emprises,...),
- Sol et hydrogéologie (portance, présence de nappes,...),
- Exigences architecturales, etc.

I.9 Justification du soutènement

La justification du soutènement nécessite de comprendre les modes de rupture auxquels on s'intéresse. [6]

Définitions possibles

- Stade ultime (inacceptable) des déplacements d'un massif de sol ou d'un ouvrage.
- Ruine le long d'une surface préférentielle (glissement e.g.).
- Déformation complexe du massif.

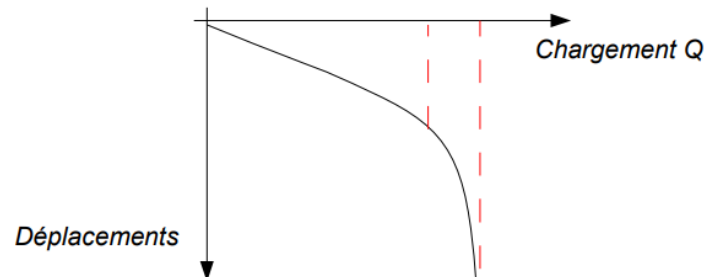


Figure I.10 : Diagramme de déformation.

– Frontière entre les états stables et les états instables (impossibles) du massif Pour un ouvrage de soutènement.

- Vérifier les divers modes de rupture envisageables.[6]

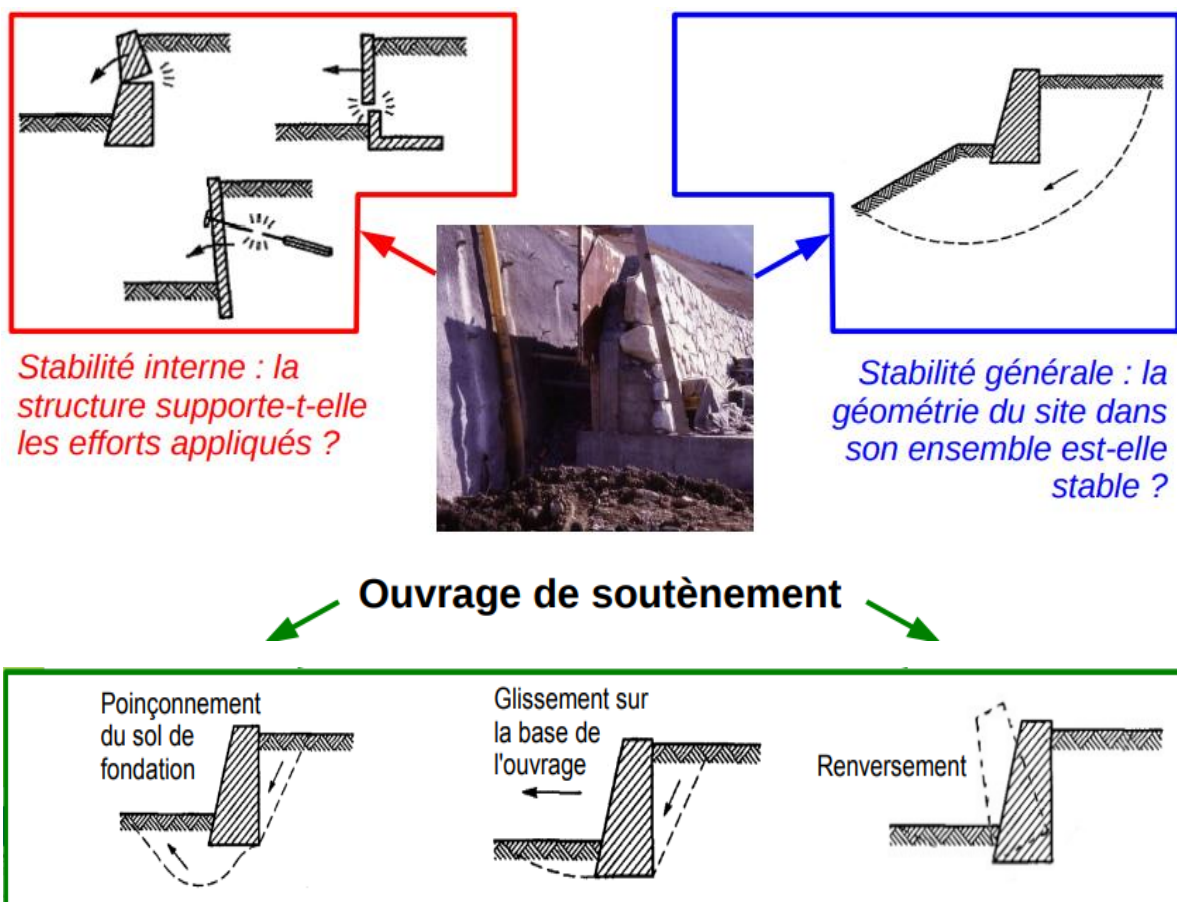


Figure I.11 : (Stabilité externe) les efforts au voisinage de l'ouvrage.

I.10 Conclusion

Les ouvrages de soutènement sont des ouvrages généralement verticaux, ou au moins proche de la verticale, destinés à retenir soit des terres soit n'importe quels matériaux sur une surface donnée. Les ouvrages de soutènement comprennent tous les types de murs et les systèmes d'appui où la surface subit les forces qu'impose le matériau à soutenir. Ils sont appelés à soutenir un remblai ou un déblai et surtout quand un terrain est en pente et nécessite une remise à niveau.

Certains ouvrages de soutènement permettent également de protéger une construction ainsi que leur utilisateur contre d'éventuelles crues.

Enfin, ils permettent également de limiter les effets des intempéries et autres phénomènes naturels.



Chapitre II
Les murs en terre
armée

Chapitre II: Les murs en terre armée

II.1 Introduction	14
II.2 Avantages de la terre armée	14
II.3 Les éléments d'un mur en terre armée	14
II.3.1 La terre ou le remblai	14
II.3.2 Les armatures	15
II.3.3 Les écailles	15
II.4 Domaine d'application des murs en terre armée	16
II.4.1 Routes et autoroutes	16
II.4.2 Ponts	16
II.4.3 Ouvrages ferroviaires	17
II.4.4 Ouvrages hydrauliques	17
II.4.5 Ouvrages industriels et de protection	18
II.5 Le renforcement des soutènements par le géosynthétique	19
II.5.1 Définition des géosynthétiques	19
II.5.2 Les types des géosynthétiques	19
II.5.3 Domaine d'application des géosynthétiques	21
II.5.4 Les fonctions des géosynthétiques	22
II.5.5 Les géosynthétiques dans les murs de soutènement	22
II.6 Conclusion	23

II.1 Introduction

La terre armée est une méthode imaginée par Henri Vidal. Sa mise en œuvre consiste à associer des couches de remblais compactés et des lits d'armatures métalliques ou synthétiques non-corrosive.

Au tout début de son histoire, sa mise en œuvre consistait à alterner un lit d'armature puis une couche de remblai jusqu'à la hauteur voulue. Mais par la suite, le principe a évolué en liant les armatures à une plaque en béton ou "l'écaille". Cette dernière améliorait ainsi l'esthétisme tout en jouant le rôle de consolidation.

De ce fait, la terre armée est généralement utilisée comme un mur de soutènement. [7]

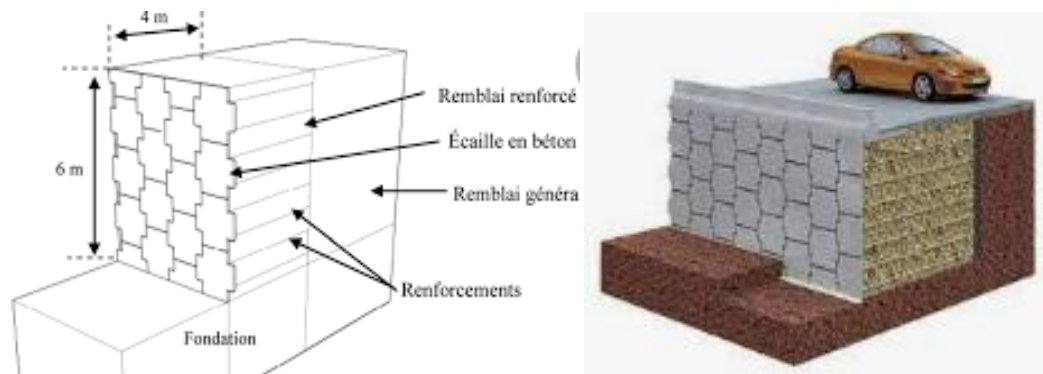


Figure II.1 : Mur en terre armée.

Dans la suite on va détailler les éléments qui constituent un mur en terre armée, les avantages de la terre armée, le domaine d'application et le renforcement par le géosynthétique.

II.2 Avantages de la terre armée

Les avantages de la technique de la terre armée sont les suivantes:

- Rapidité d'exécution ;
- Murs souples pouvant supporter sans dommage des tassements différentiels importants ;
- Construction ne nécessitant qu'un matériel très léger ;
- Coût compétitif. La principale limitation à l'utilisation de cette technique est la qualité du remblai, qui doit être frottant. [7]

II.3 Les éléments d'un mur en terre armée

II.3.1 La terre ou le remblai

Le remblayage consiste à remplir ou à combler un fossé en y ajoutant tous types de matériaux de construction ou de déchets inertes. Mais pour les murs en terre armée, comme son nom l'indique, c'est généralement la terre qui est utilisée.[2]

II.3.2 Les armatures

La forme des armatures était toujours ronde et lisse mais petit à petit on commence à utiliser des aciers tord. Par la suite, des formes plus complexes telles que le fer plat galvanisé pourvu de nervures et le fer tord en treillis soudé ont été inventées. C'est ce qu'on utilise actuellement.

- L'usage de matériaux synthétiques non-corrosif est également possible.[2]

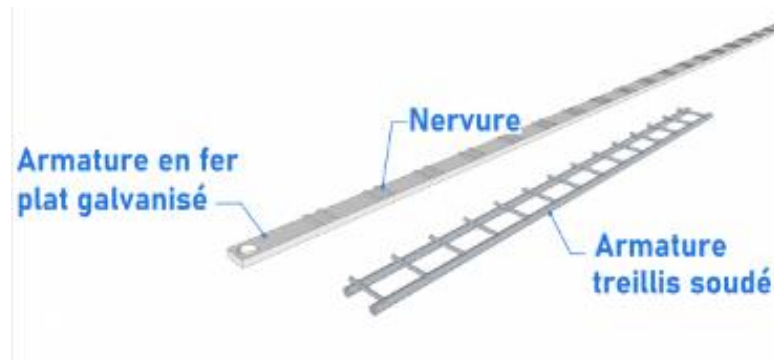


Figure II.2 : Armature de terre armée.

II.3.3 Les écailles

C'est un élément généralement préfabriqué, construit en béton armé ou non et/ou en acier.

L'écaille en béton est constituée de :

- Un parement qui sera la face visible de l'écaille ;
- Amorce destinée à recevoir les armatures ;
- Manchons dans lesquels seront ancrés une tige de fer (goujon) pour l'assemblage des écailles ;
- Butées pour palier les déplacements des écailles.

Elle peut être soit en bloc de béton ou soit en treillis métalliques. La forme standard est comme sur l'illustration. [2]

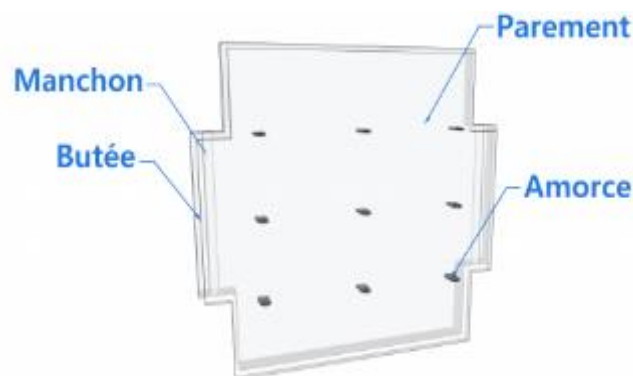


Figure II.3 : Ecaille.

II.4 Domaine d'application des murs en terre armée

II.4.1 Routes et autoroutes

La technique terre armée a été largement utilisée au cours des 50 dernières années pour la construction de routes et d'autoroutes dans des environnements urbains et suburbains ou en montagne.

La plupart des applications concernent la construction de murs de soutènement à un ou plusieurs niveaux pour supporter des voies de circulation :

- Rampes d'accès à des viaducs
- Échangeurs complexes à plusieurs niveaux
- Ouvrages en relief accidenté
- Élargissements de routes

Les murs en terre armée situés le long des autoroutes et des routes nationales comportent souvent des finitions architecturales standard ou personnalisées qui allient esthétique et fonctionnalité. [2]



Figure II.4 : Application des murs en terre armée dans les routes.

II.4.2 Ponts

Les culées de pont sont des ouvrages critiques et les capacités uniques de résistance et de distribution des charges de la terre armée permettent de répondre à cette caractéristique d'une manière économique et structurellement efficace.

Pour de nombreux ponts routiers ou ferroviaires, le sommet d'appui peut être supporté directement sur le massif de sol renforcé, ce qui élimine la nécessité de piles et de pieux. Ces culées pures constituent des solutions parfaites lorsque les sols de fondation sont compressibles. Si le sol de fondation est très compressible, la combinaison des techniques

d'amélioration des sols et terre armée se révèle très économique comparée aux culées en béton sur pieux coulées en place. [2]



Figure II.5 : Application des murs en terre armée dans les ponts.

II.4.3 Ouvrages ferroviaires

Ils sont utilisés dans de nombreux pays pour le chemin de fer ou le métro. Hormis quelques constructions spécifiques, l'application de la technique terre armée fait appel à la même technologie qu'en infrastructure routière, même si le souci de sécurité tend parfois à faire augmenter la durée de vie et les coefficients de sécurité pour les ouvrages ferroviaires. [2]



Figure II.6 : Application des murs en terre armée dans les ouvrages ferroviaires.

II.4.4 Ouvrages hydrauliques

La résistance aux sollicitations très sévères telles que les crues, les fortes marées, la houle, les tempêtes, les efforts de la glace et les chocs divers (bateaux, épaves, etc.), la rapidité d'exécution, en particulier pour les travaux effectués en zone de marnage grâce à l'exécution simultanée de remblai mènent à une utilisation variée en site fluvial ou maritime. Aussi l'utilisation d'armatures géosynthétiques non corrodables et la possibilité de la construction

de murs de quai en terre armée effectuée entièrement sous l'eau, ont permis d'élargir cette technique dans les environnements salins et maritimes (marinas, ports de pêche).[2]

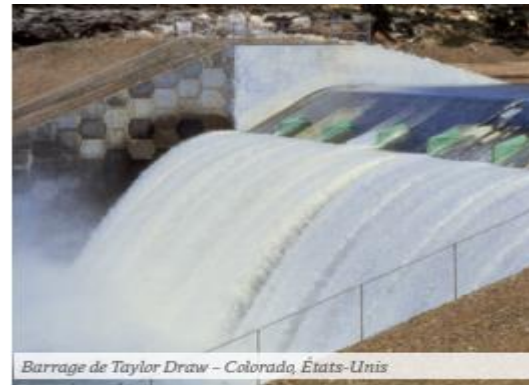


Figure II.7 : Application des murs en terre armée dans les ouvrages hydrauliques.

II.4.5 Ouvrages industriels et de protection

La technique terre armée est très utilisée pour répondre à des besoins d'aménagement dans les sites industriels classiques et spécifiques tels que les silos de stockage de charbon ou de minéral, les murs de déchargement, les postes de criblage et de concassage.[2]



Figure II.8 : Application des murs en terre armée dans les ouvrages industriels et de protection.

II.5 Le renforcement des soutènements par le géosynthétique

II.5.1 Définition des géosynthétique

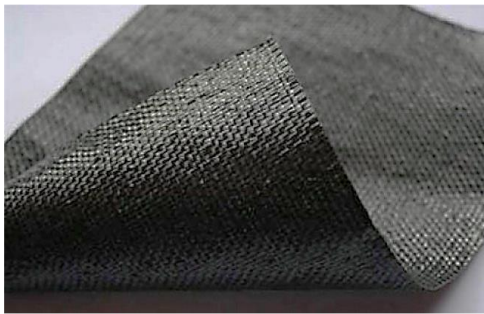
Les géosynthétiques sont des produits couramment utilisés dans les ouvrages de génie civil. Parmi les différentes fonctions qu'ils peuvent assurer, la fonction renforcement est appliquée pour des ouvrages divers et variés tels que des ouvrages de soutènement ou des bases de remblai. Le comportement en renforcement des géosynthétiques est lié au mode de sollicitation qui leur est appliqué. Leur dimensionnement requiert des essais de caractérisation des produits et de leur interaction avec le sol environnant il nécessite une approche particulière prenant en compte leur nature et des facteurs d'influence liés à leur environnement. [5]

II.5.2 Les types des géosynthétiques

Les géosynthétiques peuvent être généralement classés en catégories selon le mode de fabrication, les plus utilisés pour le renforcement des sols sont : Les géotextiles, les géogrilles, les géomembranes et les géocomposites.

a. Les géotextiles

Sont des nappes réalisées à l'aide de fibres, filaments, fils ou bandelettes généralement synthétiques car les fibres naturelles se dégradent trop rapidement au contact du sol. On distingue trois types de géotextiles :



1. Géotextiles tissés.



2. Géotextiles non tissés.



3. Géotextiles tricotés.

Figure II.9 : Type des géotextiles.

b. Les géomembranes

Ce sont des nappes souples continues fabriquées à partir d'un ou plusieurs matériaux synthétiques. Elles sont relativement imperméables et sont utilisées comme couche d'étanchéité pour le confinement des fluides ou des gaz et comme barrière à la vapeur.

On distingue deux types de géomembranes :

➤ Géomembrane bitumineuse

Une géomembrane bitumineuse est un produit de structure assemblée en usine constituée de géosynthétiques. Se présentant sous la forme d'une feuille et dans laquelle la fonction d'écran est essentiellement assurée par du bitume.

➤ Géomembrane de synthèse

Une géomembrane de synthèse est un géosynthétique permettant d'assurer la fonction d'étanchéité. Elle est constituée de polymère, composé principalement d'élastomère et de thermoplastique. Les résines thermoplastiques les plus utilisées sont le polyéthylène haute densité (PEHD), le polypropylène (PP), le polychlorure de vinyle (PVC). (Lambert, 1997).



Figure II.10 : Géomembranes.

c. Les géocomposites

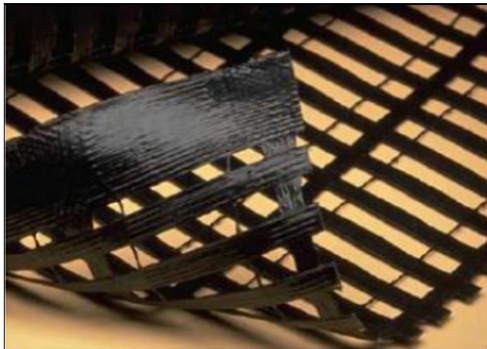
Elles sont des géosynthétiques fabriqués par association de deux ou plusieurs types de géosynthétiques. Ils incluent par exemple : géotextile, géogrille, Les drains géocomposites préfabriqués ou les drains verticaux préfabriqués sont constitués d'une âme drainante en plastique entourée d'un filtre géotextile.



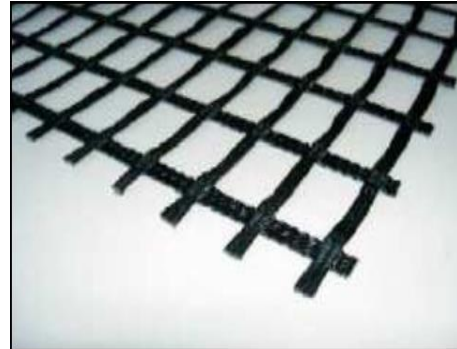
Figure II.11 : Géocomposite

d. Les géogrilles

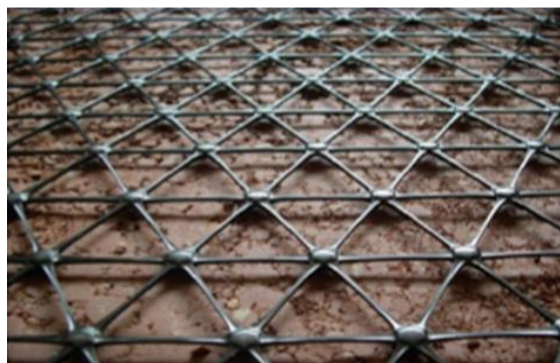
C'est une structure polymère plane, constituée par un ouvert d'éléments résistants à la traction, reliés entre eux selon un motif régulier, dont les ouvertures sont des dimensions supérieures à celle des constituants. Elles sont souvent utilisées dans le renforcement des massifs. Il existe 3 types de géogrilles [5] :



1. Géogrille uni-axiale.



2. Géogrille bi-axiale.



3. Géogrilles tridimensionnelles.

Figure II.12 : Types de géogrilles.

II.5.3 Domaine d'application des géosynthétiques

Les géosynthétiques de renforcement des sols sont employés dans les ouvrages géotechniques depuis plus de quarante ans. Leur domaine d'application est très vaste puisqu'ils peuvent être installés :

- sur des talus d'ouvrages hydrauliques ou d'installations de stockage de déchets ;
- à la base de remblai construit sur :
 - sol compressible,
 - sur zone à risque de cavité,
 - sol amélioré par inclusions rigides ;
- dans des ouvrages en terre pour construire des talus renforcés ou des ouvrages de soutènements.[2]

II.5.4 Les fonctions des géosynthétiques

	Géotextile non tissu	Géotextile tissu	Géotextile	Géocomposite
Protection	●			●
Filtration	●			●
Drainage				●
Séparation	●	●		●
Renforcement		●	●	

Tableau II.1 : Fonctions des géosynthétiques.[5]

II.5.5 Les géosynthétiques dans les murs de soutènement

La technique de renforcement des massifs de remblai par des nappes horizontales de géosynthétiques est l'une des techniques qui sont évoluée actuellement dans le domaine de la géotechnique, la conception de ce renforcement est assez proche de celle des murs en remblais renforcés par éléments métalliques. Les géogrilles sont utilisés principalement pour améliorer la résistance du remblai support des charges. Ce type de renforcement devient plus adapté que l'ancien type de renforcement par armatures métalliques. Des nappes horizontales de géogrilles peuvent être associées à un massif de remblai à parement vertical ou sub-vertical pour constituer un massif en sol renforcé équivalent à un mur poids susceptible de résister à la poussée des terres à l'arrière de l'ouvrage. Ces structures sont constituées d'un massif de remblai mis en place par couches successives compactées, entre lesquelles sont disposés des géogrilles. Les longueurs des géogrilles et les espacements verticaux entre lits ne sont pas forcément constants sur toute la hauteur de l'ouvrage. (La figure II.13) présente le principe des murs en sol renforcé par géosynthétiques.[5]



Figure II.13 : Principe des murs en sol renforcé par géosynthétique.

II.6.Conclusion

Les ouvrages réalisés en terre armée sont essentiellement de deux types :

Murs de soutènement des terres et ouvrages porteurs comme les culées de ponts. Les renforcements utilisés généralement dans ces deux types d'ouvrages sont des bandes métalliques. Cependant, dans les environnements agressifs, ces armatures métalliques sont remplacées par des bandes géosynthétiques non corrodables qui présentent une extensibilité plus importante. Et c'est ce qu'on a présenté dans ce chapitre.

Chapitre III

**Les plans d'expériences et la
méthode des surfaces de
réponses**

Chapitre III : Les plans d'expériences et la méthode des surfaces de réponses

III.1 Introduction	25
III.2 Historique des plans d'expériences	25
III.3 But et domaine d'utilisation	26
III.4 Définition d'un plan d'expérience	26
III.5 Conditions d'application des plans d'expériences	26
III.5.1 Choix de la méthode d'expérimentation	27
III.5.2 Vocabulaire de base des plans d'expériences	27
III.5.3 Facteur	28
III.5.3.1 Facteur quantitatif	28
III.5.3.2 Facteur qualitatif	28
III.5.4 Réponses	30
III.5.5 Choix des réponses	30
III.6 Différents types des plans d'expérience	30
III.6.1 Plans de mélanges	30
III.6.2 Plans de criblage	31
III.6.2.1 Plans factoriels complets à deux niveaux	31
III.6.2.2 Plans factoriels fractionnaires à deux niveaux	31
III.6.2.3 Les plans de Plackett-Burman	32
III.6.3 Les tables de Taguchi	32
III.6.4 La méthode de surface de réponse	33
III.6.4.1 Les Plans composites centrés	34
III.6.4.2 Les plans de Box-Behnken	35
III.7 Principaux avantages des plans d'expériences	35
III.8 Choix d'une stratégie expérimentale	35
III.8.1 Démarche expérimentale	36
III.8.2 Les étapes de l'expérimentation	37
III.8.3 La méthodologie des surfaces de réponse	39
III.8.3.1 Les principes généraux	39
III.8.3.2 Étapes de la méthodologie de surface de réponse	39
III.8.3.3 La RSM pour l'optimisation en ingénierie	42
III.8.3.3.1 Méthode graphique	42
III.8.3.3.2 Méthodes numériques	42
III.9 Conclusion	43

III.1 Introduction

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, y , et des variables, x_i . Il faut penser aux plans d'expériences si l'on s'intéresse à une fonction du type :

$$y = f(x_i) \quad (3.1)$$

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. Les principes fondamentaux de cette science seront indiqués et les principaux plans seront passés en revue.

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

Le succès de la démarche originale des plans d'expériences réside dans la possibilité d'aboutir aux résultats escomptés et d'interpréter ces résultats avec un effort minimal sur le plan expérimental. [4]

III.2 Historique des plans d'expériences

- Dans le secteur Industriel, technique restée confidentielle jusqu'après la deuxième guerre mondiale ; développement au Japon entre les années 1950 et 1960 grâce notamment à TAGUCHI ; ses travaux sont diffusés aux Etats Unis et appliqués à grande échelle vers les années 1970.
- En Europe, les grandes Entreprises industrielles utilisent les plans expérimentaux à partir des années 1980. Actuellement cette méthode d'expérimentation est utilisée par l'ensemble des Industriels, petits et grands.

La méthode est maintenant considérée comme un outil de la qualité, indispensable

- au stade de la conception des produits pour permettre de fixer les paramètres de développement du produit de façon optimale.
- au cours de la production, comme complément indispensable des méthodes de maîtrise des procédés.

III.3 But et domaine d'utilisation

Les plans d'expériences sont utilisés dans les études industrielles en recherche développement.

Ils interviennent dans de nombreux domaines industriels. On peut notamment citer :

- Industries chimiques, pétrochimiques et pharmaceutiques
- Industries mécaniques et automobiles
- Industries métallurgiques

Leur utilisation vise aux buts suivants :

- Détermination des facteurs clés dans la conception d'un nouveau produit ou d'un nouveau procédé
- Optimisation des réglages d'un procédé de fabrication ou d'un appareil de mesure
- Prédiction par modélisation du comportement d'un procédé

Les plans d'expériences s'inscrivent dans une démarche générale d'amélioration de la qualité.

III.4 Définition d'un plan d'expérience

Un plan d'expérience est une méthode pour planifier ou organiser les expériences scientifiques et industrielles dans le but de retirer l'information correspondante à l'objectif fixé préalablement. Leur but est d'obtenir un maximum d'informations avec un minimum d'expérimentations par rapport à l'objectif que l'on s'est fixé. Les plans d'expériences sont appliqués dans différents domaines des sciences. 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.

D'une manière générale, un plan d'expérience consiste à évaluer et à quantifier l'influence existant entre deux types de variables :

- **Le facteur**
- **La réponse**

III.5 Conditions d'application des plans d'expériences

Les plans d'expériences sont un instrument bien adapté à la recherche à chaque fois qu'intervient un grand nombre de paramètres. Ils permettent de réduire fortement le nombre d'essais, de gagner du temps et de l'argent, tout en parvenant à un meilleur résultat. Leurs applications s'imposent chaque fois que l'on veut concilier au mieux de nombreuses exigences différentes.

Trois éléments sont indispensables pour réussir cette démarche : la planification des essais, la qualité de l'expérience, ensuite, la maîtrise d'outils mathématiques tels que la régression

linéaire multiple, enfin, l'apport des statistiques pour la validation globale des modèles et la détermination des effets significatifs.

Pour appliquer la méthode des plans d'expériences, il faut que les deux conditions suivantes soient réalisées:

➤ **Condition 1**

La valeur que prend chaque variable doit être connue sans erreur, or dans un travail d'expérimentation on ne peut nier la présence d'erreur. Donc pour satisfaire cette condition on doit s'assurer que l'erreur induite sur la valeur de la variable soit très petite, voire négligeable devant la variation de cette même variable lorsqu'elle change de valeur.

➤ **Condition 2**

La réponse doit être homoscédastique pour cela il appartient à l'expérimentateur de garder les mêmes gestes, le même matériel et la même cadence lors de toute la campagne d'expérimentation.

III.5.1 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.

III.5.2 Vocabulaire de base des plans d'expériences

Le scientifique est souvent amené à comprendre comment réagit un système en fonction des facteurs susceptibles de le modifier. Pour visualiser cette évolution, il mesure une réponse et va ensuite essayer d'établir des relations de cause à effet entre les réponses et les facteurs. Parmi les facteurs on distinguera :

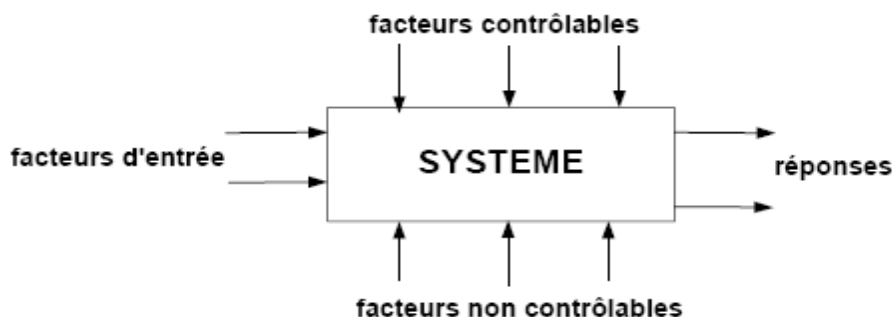


Figure III.1: Schématisation d'un processus expérimental.

- Les facteurs contrôlables qui dépendent directement du choix du technicien (pression, température, matériau ...)

- Les facteurs non contrôlables qui varient indépendamment du choix du technicien (conditions climatiques, environnement d'utilisation...)
- Les facteurs d'entrée dont on cherche à analyser une influence (matière première, vitesse d'agitation, température, rendement ...)

III.5.3 Facteur

On désigne sous le nom de facteur les paramètres susceptibles d'influencer les réponses et que l'on peut faire varier, Les facteurs étudiés dans un plan d'expériences sont bien entendu les **facteurs d'entrée** et ils existent deux types:

III.5.3.1 Facteur quantitatif

Un facteur quantitatif est un facteur mesurable, souvent à variation continue ou discrète.

- **Variable continue** : variable numérique qui peut prendre un nombre infini de valeurs réelles : exemple : le dosage en ciment le pourcentage de super plastifiant.
- **Variable discrète** : variable numérique qui prend uniquement un nombre limité de valeur réelle : exemple classe de ciment.

III.5.3.2 Facteur qualitatif

Un facteur qualitatif est un facteur non mesurable, on distingue des variables qualitatives ordinales et nominales.

- **Variable ordinale** : sont des variables qui contiennent un ordre.
- **Variable nominale** : sont des variables qui correspondent à des noms, il n'y a aucun ordre précis

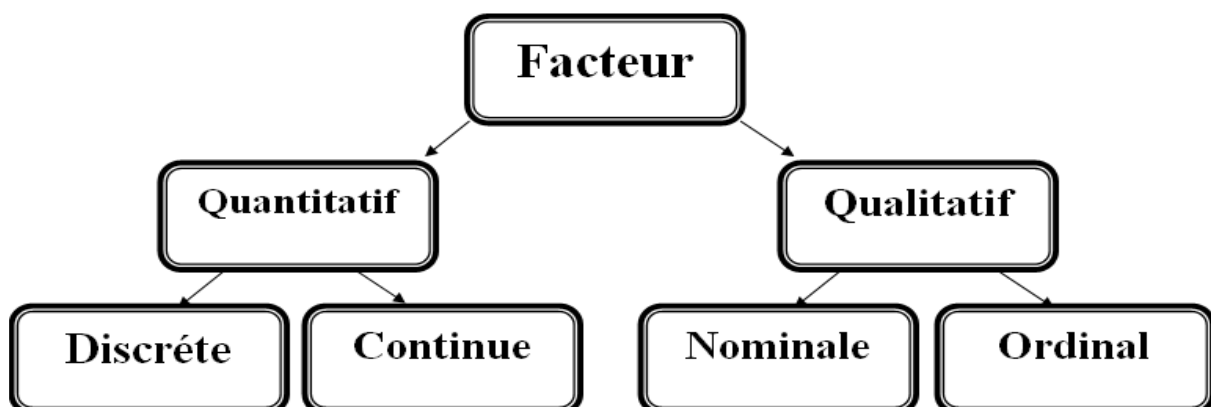


Figure III. 2 : Les différents types de facteur.

a) Niveau d'un facteur

Valeur que prend le facteur au cours des essais, il importe d'attribuer à chaque facteur au moins deux niveaux : un niveau supérieur (haut) et un niveau inférieur (bas) (figure III.3) pour les facteurs quantitatifs la valeur est algébrique, donc classé numériquement. Pour les facteurs qualitatifs les valeurs ne sont pas mesurables. [4]

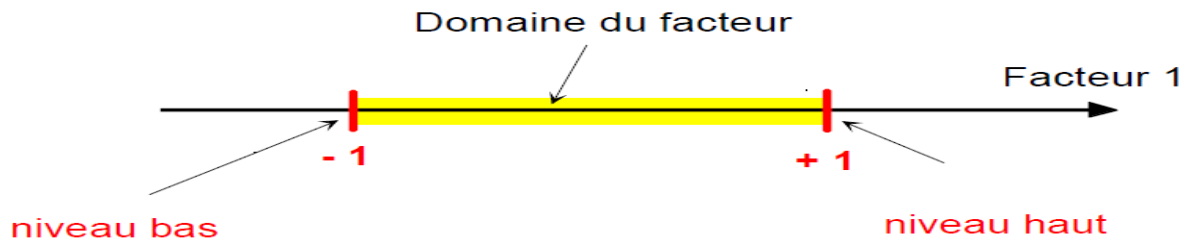


Figure III.3 : Le domaine et les niveaux d'un facteur.

La réunion des domaines de chaque facteur définit le « *domaine d'étude* ». Ce domaine d'étude est la partie de l'espace expérimental retenu par l'expérimentateur pour faire ses essais. Une étude, c'est-à-dire un ensemble d'expériences bien définies, est représentée par une série de points disposés dans le domaine d'étude (figure III.4). Cette manière de représenter une expérimentation par un ensemble de points dans un espace cartésien est une représentation géométrique de l'étude.

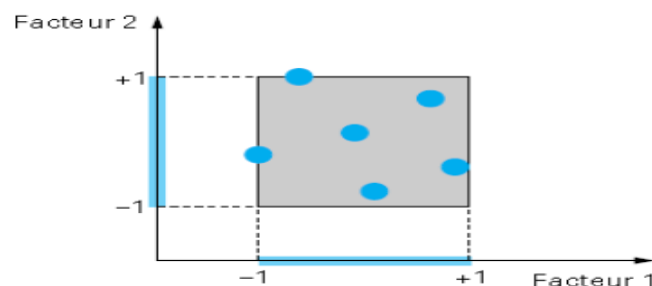


Figure III.4 : La disposition des points expérimentaux dans le domaine d'étude.

À chaque point du domaine d'étude correspond une réponse. L'ensemble de tous les points du domaine d'étude correspond un ensemble de réponses qui se localise sur une surface appelée « *surface de réponse* ».

b) Valeurs centrées réduites ou codées

L'utilisation des variables centrées réduites présente l'intérêt de pouvoir généraliser la théorie des plans d'expériences quelque soient les facteurs ou les domaines d'études retenus. Remplacer les variables naturelles par les variables codées va permettre d'avoir pour chaque

facteur le même domaine de variation (entre -1 et +1) et de pouvoir ainsi comparer entre eux l'effet des facteurs. Le niveau bas est ainsi codé (- 1) alors que le niveau haut est codé (+ 1).

III.5.4 Réponses

La réponse est la grandeur mesurée à chaque essai, le plan vise à déterminer les facteurs influençant ou l'évolution de l'influence en fonction de ceux-ci. Cette grandeur est souvent mesurable comme la résistance à la compression, l'affaissement et l'air occlus mais elle peut également être qualitative, par exemple une appréciation visuelle sur l'état d'une surface ou une appréciation (ségrégation, pas de ségrégation) sur un béton.[1]

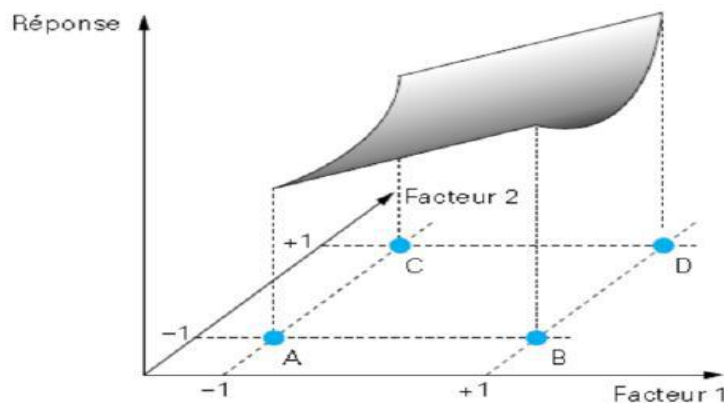


Figure III.5 : La surface de réponse correspondant à tous les points du domaine d'étude.

III.5.5 Choix des Réponses

Le choix des réponses est une étape capitale. Toute l'analyse et toutes les conclusions dépendent de ce choix. Une réponse mal adaptée au problème rendra l'expérimentation inutilisable ou conduira à des conclusions sans intérêt. La réponse sélectionnée doit permettre de répondre sans ambiguïté à la question posée. Ce choix n'est pas aussi simple que l'on pourrait le croire et c'est parfois la principale difficulté à laquelle on se heurte.

III.6 Différents types des plans d'expériences

Il existe trois grandes familles de plans d'expériences, plans de mélange, plans de criblage et plans de modélisation (surfaces de réponses).

III.6.1 Plans de mélange

Les plans de mélange sont des plans particuliers adaptés à l'étude des facteurs dépendants. Ils sont principalement utilisés pour l'étude de l'influence des proportions des constituants d'un produit sur une réponse donnée. [1]

III.6.2 Plans de criblage

L'objectif de ces plans est de découvrir les facteurs les plus influents sur une réponse donnée. Aucune relation ne précise entre les variations des facteurs et celle de la réponse n'est établie. Parmi les plans proposés : plans factoriels complets à deux niveaux, plans factoriels fractionnaires et plans de Plackett-Burman. [4]

III.6.2.1 Plans factoriels complets à deux niveaux

Les avantages des plans factoriels complets sont nombreux :

- Chaque facteur ne prend que deux niveaux les essais sont faciles à contrôler et les risques d'erreurs sont minimisés.
- Les plans factoriels complets sont des plans d'expériences optimaux qui étudient toutes les combinaisons possibles des niveaux des facteurs traités et qui nous garantissent les meilleurs résultats.
- La modélisation mathématique est immédiate.

-Les résultats obtenus avec un premier plan peuvent être utilisés en partie ou en totalité soit, pour explorer une zone du domaine expérimental soit, pour établir un modèle mathématique de degré plus élevé.

Le seul inconvénient de ces plans est qu'ils obligent rapidement à faire beaucoup d'essais. Par exemple, pour étudier simplement sept facteurs il faut réaliser 128 expériences. Cependant, de nombreuses interactions sont nulles et certains facteurs sont sans influence. C'est pourquoi les plans factoriels fractionnaires ont été développés.

III.6.2.2 Plans factoriels fractionnaires à deux niveaux

Les plans factoriels fractionnaires sont des plans factoriels qui permettent d'étudier tous les facteurs mais dont le nombre d'essais est réduit par rapport aux plans factoriels complets. Un plan factoriel fractionnaire à 2 fois moins, ou 4 fois moins ou 2^q fois moins d'essais que le factoriel complet correspondant.

A la fin d'un plan factoriel fractionnaire, on a un système de n équations à p coefficients inconnus avec p plus grand que n . On ne sait pas résoudre un tel système. Comme on ne peut pas augmenter le nombre d'équations, il faut diminuer le nombre d'inconnues. On y arrive en utilisant un artifice : on regroupe les coefficients de telle manière qu'il y ait n inconnues. On résout donc un système de n équations à n groupes de coefficients. On appelle ces groupes de

coefficients, des **contrastes** ou des **aliases** et on dit que les coefficients sont aliasés dans les contrastes [4].

III.6.2.3 Les plans de Plackett-Burman

R.L. Plackett et JP. Burman ont publié leur étude en 1946 dans *Biometrika*. Ils expliquent comment construire des plans permettant d'étudier un grand nombre de facteurs avec peu d'essais. Ils attribuent deux niveaux à chaque facteur et supposent que toutes les interactions entre facteurs sont négligeables devant les effets principaux.[4] Le plan de Plackett-Burman est basé sur la matrice d'Hadamard qui présente les propriétés suivantes :

- Les éléments sont +1, -1 ;
- Les matrices sont carrées et ces matrices sont orthogonales.

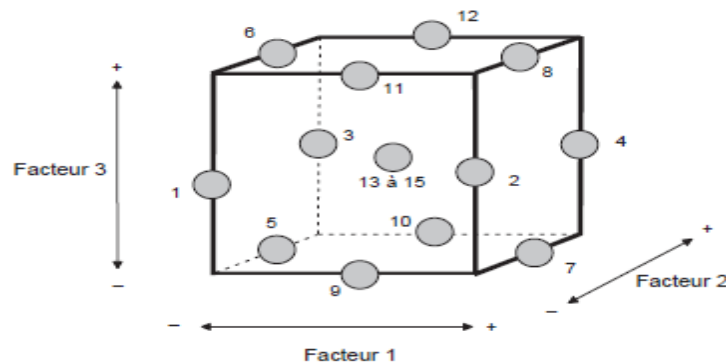


Figure III. 6: Illustration du plan de Box-Behnken pour trois facteurs. Il y a douze points d'expériences au milieu des arêtes du cube et trois points au centre.

III.6.3 Les tables de Taguchi

Les Tables de Taguchi sont des plans de Plackett et Burman dans lesquels on a remplacé +1 par 1 et -1 par 2. Les noms des plans ont également été traduits. Le plan 23 est la Table L8 et le plan 24 est la Table L16. Le plan de 12 essais, appelé Table L12, est un plan de Plackett et Burman. A l'origine ces plans étaient utilisés avec un modèle sans interaction. Aujourd'hui, certaines personnes leur appliquent les résultats et les principes de la théorie classique. Box et Behnken, c'est plans qui permettent d'établir directement des modèles du second degré. Tous les facteurs ont trois niveaux : -1, 0 et +1. Ces plans sont faciles à mettre en œuvre et possèdent la propriété de séquent alité. On peut entreprendre l'étude des k premiers facteurs en se réservant la possibilité d'en ajouter de nouveaux sans perdre les résultats des essais déjà effectués. Le plan de Box-Behnken pour trois facteurs est construit sur un cube. Pour quatre facteurs ce plan est construit sur un hyper cube à quatre dimensions. On place les points expérimentaux non pas aux sommets du cube ou de l'hyper cube, mais au milieu des arêtes ou

au centre des faces (carrés) ou au centre des cubes. Cette disposition a pour conséquence de répartir tous les points expérimentaux à égale distance du centre du domaine d'étude, donc sur une sphère ou sur une hyper sphère suivant le nombre de dimensions. On ajoute des points au centre du domaine d'étude.

III.6.4 La méthode des 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. Alors on fait 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 [1].

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 :

$$y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_{12}x_1x_2 + a_{11}x_1^2 + a_{22}x_2^2 + e \quad (3.2)$$

- Pour trois facteurs :

$$y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_3 + a_{12}x_1x_2 + a_{13}x_1x_3 + a_{23}x_2x_3 + a_{11}x_1^2 + a_{22}x_2^2 + a_{33}x_3^2 + e \quad (3.3)$$

Ce type de modèle permet l'estimation d'une surface de réponse pour étudier les effets linéaires, les effets quadratiques et les effets d'interaction.

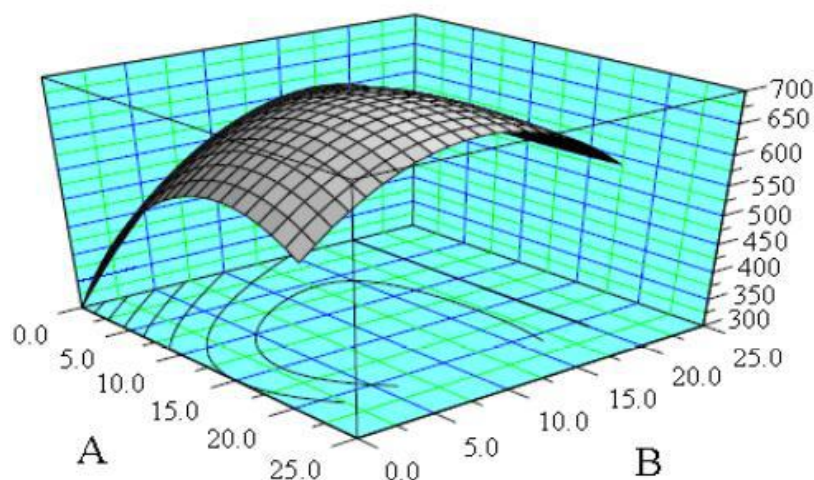


Figure III. 7 : Surface de réponse.

Il existe plusieurs types de plans du second ordre et les plus employés sont :

- ✓ Les plans composites centrés
- ✓ Les plans de Box-Behnken

III.6.4.1 Les plans composites centrés

Les plans composites se prêtent bien au déroulement séquentiel d'une étude. La première partie de l'étude est un plan factoriel complet ou fractionnaire complété par des points au centre pour vérifier la validité du modèle. Si les tests de validation sont positifs (la réponse mesurée au centre du domaine est statistiquement égale à la réponse calculée au même point), l'étude s'achève le plus souvent, mais s'ils sont négatifs, on entreprend des essais supplémentaires pour établir un modèle du second degré.[4] Les essais supplémentaires sont représentés par des points d'expériences situés sur les axes de coordonnées et par de nouveaux points centraux. Les points situés sur les axes de coordonnées sont appelés les points en étoile. Les plans composites présentent donc trois parties (figure III.8) :

- **Le plan factoriel** : c'est un plan factoriel complet ou fractionnaire à deux niveaux par facteurs. Les points expérimentaux sont aux sommets du domaine d'étude.
- **Le plan en étoile** : les points du plan en étoile sont sur les axes et ils sont, en général, tous situés à la même distance du centre du domaine d'étude.
- **Les points au centre du domaine d'étude** : on prévoit toujours des points expérimentaux situés au centre du domaine d'étude, et cela aussi bien pour les plans factoriels que pour les plans en étoile.

Le nombre total n d'essais à réaliser est la somme des essais du plan factoriel (n_f), des essais du plan en étoile (n_α) et des essais au centre (n_0). Le nombre n des essais d'un plan composite est donné par la relation : $n = n_f + n_\alpha + n_0$

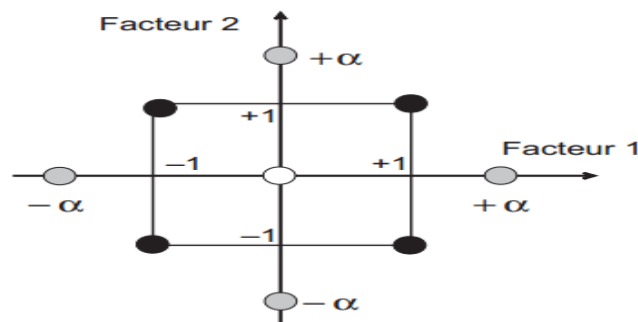


Figure III.8 : Plan composite centré.

III.6.4.2 Les plans de Box-Behnken

Les plans de Box-Behnken sont facile de mise en œuvre car tous les facteurs ne prennent que trois niveaux : - 1, 0 et + 1, en variables codées.

Les points expérimentaux sont au milieu des arêtes de chacun des côtés du cube (figure III.9).

Ce plan comporte douze essais auxquels on peut ajouter un (ou plusieurs) point central [12]

Les plans de Box-Behnken répondent à un critère d'optimisation particulier.

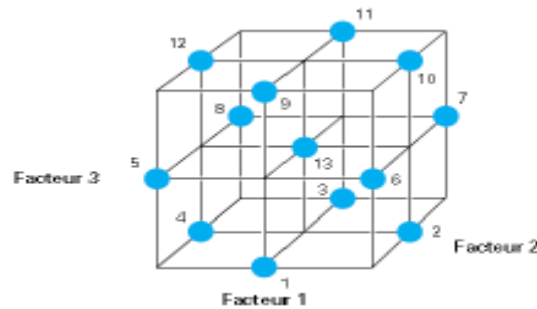


Figure III.9: Plan de Box-Behnken pour trois facteurs.

III.7 Principaux avantages des plans d'expériences

Les principaux avantages de cette méthode sont :

- ✓ Diminution du nombre d'essais
- ✓ Possibilité d'étudier un grand nombre de facteurs
- ✓ Détection des interactions entre facteurs
- ✓ Modélisation des réponses étudiées
- ✓ Une précision optimum des résultats

La méthode des plans d'expériences permet une interprétation rapide et sans équivoque en fournissant un modèle expérimental précis du système étudié.

III.8 Choix d'une stratégie expérimentale

Dans le cadre d'une expérimentation, deux stratégies expérimentales sont envisageables :

a. Le maillage du domaine expérimental

Cette méthode permet d'étudier une réponse dépendant de plusieurs facteurs en réalisant un maillage du domaine expérimental et en effectuant une expérience à chaque nœud de ce réseau. L'interprétation d'une telle série d'expériences est alors aisée dans le cas d'un problème d'optimisation. Mais le nombre d'expériences à réaliser augmente de façon considérable avec le nombre de facteurs et le nombre de modalités de chacun des facteurs.

b. La méthode du « un facteur à la fois »

Cette méthode est beaucoup moins coûteuse que le maillage expérimental. Elle consiste à faire varier successivement chacun des facteurs en laissant les autres constants. Le risque d'une interprétation erronée des résultats est alors élevé.

Pour pallier aux faiblesses de ces deux stratégies, la planification expérimentale permet de trouver un nombre minimum d'expérience à réaliser de façon à obtenir une modélisation fiable avec un minimum d'expérience.

III.8.1 Démarche expérimentale

Si un système dont la réponse y est une variable dépendant de p facteurs X_1, \dots, X_p , le but de l'expérimentateur est en général de valider un modèle de la réponse en fonction des valeurs des facteurs influents. On utilise alors un modèle du type : (3.4)

$$y = f_{\beta}(x_1, x_2, \dots, x_p) + \varepsilon \quad (3.4)$$

Où :

β : est un ensemble de paramètres caractérisant la forme de la fonction.

ε : terme d'erreur

L'objectif est d'estimer les paramètres du modèle en minimisant l'erreur ε . La méthodologie expérimentale doit être conçue comme un processus itératif entre le modèle et le plan expérimental. Elle permet de planifier les expériences pertinentes pour ajuster un modèle aux données et le valider.

La Figure III.10 illustre cette démarche expérimentale.

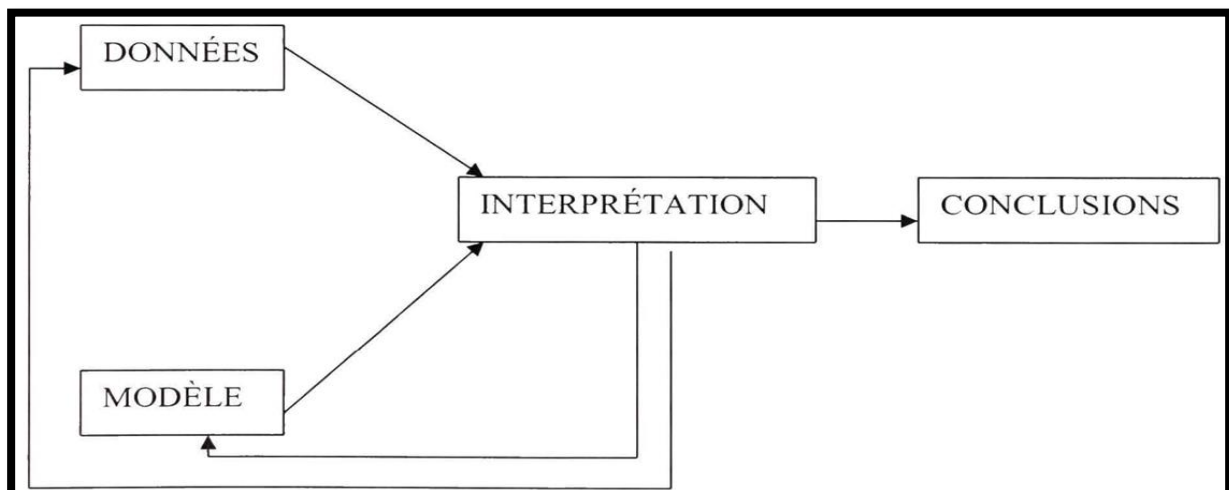


Figure III.10 : Démarche générale de la méthodologie expérimentale.

L'expérimentation consiste à réaliser séquentiellement des plans expérimentaux permettant d'estimer au mieux les paramètres du modèle recherché. À chaque étape, on procède à un test d'ajustement de ce modèle et on complète ce dernier si l'analyse montre qu'il est insuffisant pour décrire efficacement les données expérimentales. La modification du modèle envisagé doit bien entendu être accompagnée de la réalisation d'un nouveau plan d'expériences optimal pour ce modèle.

III.8.2 Les étapes de l'expérimentation

Le Tableau III.1 présente les différentes étapes à suivre pour mener à bien une expérimentation.

Phases	Étapes
Planification	1. Définir PROBLEME / PROCESSUS – objectifs.
	2. Choisir les variables de REPONSE (S) Y à mesure.
	3. Choisir les VARIABLES facteurs X et l'espace de variation.
	4. Définir & comparer des DESIGNS EXPERIMENTAUX.
Exécution	5. PREPARER l'expérience.
	6. CONDUIRE l'expérience.
Analyse	7. ANALYSE statistique des résultats.
	8. AGIR en fonction des conclusions de l'analyse.

Tableau III.1 : Étapes de l'expérimentation.

a. Phase de planification

Cette phase consiste à définir le problème à résoudre avec ses réponses et les facteurs qui influent sur ces dernières. L'élaboration d'un design expérimental approprié conduit à l'obtention d'une matrice d'expérience. Cette matrice d'expérience est un ensemble d'expériences supposées homogènes, effectuées consécutivement, dont l'exploitation ne peut être faite que lorsque la totalité des résultats expérimentaux est obtenue. Elle doit apporter des réponses aux questions ou aux hypothèses du chercheur et est définie par :

- Le nombre d'expérience à effectuer
- La nature des expériences (niveaux des variables codées)
- L'organisation des expériences dans le temps (par lots ou séquentielles)

b. Phase d'exécution

Cette phase consiste à mener à bien les différentes expériences indiquées par la matrice d'expérience.

c. Phase d'analyse

Il s'agit d'une phase d'analyse statistique des résultats consistant à modéliser les réponses et à vérifier la validité des modèles obtenus.

✓ Modélisation

Toute stratégie expérimentale est élaborée pour établir une relation de cause à effet entre les facteurs et les réponses. Cette relation a généralement la forme d'un modèle mathématique. Ce modèle mathématique peut être théorique (c'est-à-dire qu'il est obtenu à partir d'une loi physique), ou empirique. Il peut être linéaire ou non linéaire par rapport aux coefficients qui sont les inconnues. Deux principaux types de modèles se distinguent:

✓ Modèles de connaissance

Ils dérivent des lois physiques. Afin de mieux comprendre certains phénomènes, les chercheurs ont été amenés à étudier différents mécanismes théoriques et à les traduire sous forme de modèle mathématique. En général, ces formules contiennent un grand nombre de variables et sont sous forme non linéaire. Pour ce type de modèle, l'objectif de la planification expérimentale est seulement de chercher à obtenir une estimation des coefficients de ce modèle sans chercher à le remettre en cause.

✓ Modèles empiriques

Dans ce cas, il s'agit de trouver un modèle mathématique qui permet de relier les facteurs aux réponses. Ce modèle mathématique doit avoir deux atouts majeurs.

D'abord, il doit bien représenter le phénomène dans le domaine d'expérience étudié.

Ensuite, il doit permettre une prévision de bonne qualité en n'importe quel point du domaine expérimental.

La méthodologie des surfaces de réponses est efficace pour effectuer cette modélisation. Les modèles les plus utilisés pour la représentation des réponses sont des polynômes, car ils permettent une démarche séquentielle. Quant aux matrices d'expériences, les plus utilisées sont les matrices composites, les matrices de Doehlert ou les matrices hybrides.

III.8.3 La méthodologie des surfaces de réponse

III.8.3.1 Les principes généraux

La méthode des surfaces de réponse (RSM) est un ensemble de techniques statistiques et mathématiques utilisées pour développer, améliorer et optimiser des procédés. Elle a aussi d'importantes applications dans la conception, le développement et la formulation de nouveaux produits, ainsi que dans l'amélioration de la conception de produits existants.

L'objectif de cette méthode est, plus que de hiérarchiser les effets des différents facteurs, de décrire le plus précisément possible le comportement de la réponse en fonction des variations des facteurs. [14]

III.8.3.2 Étapes de la méthodologie des surfaces de réponse

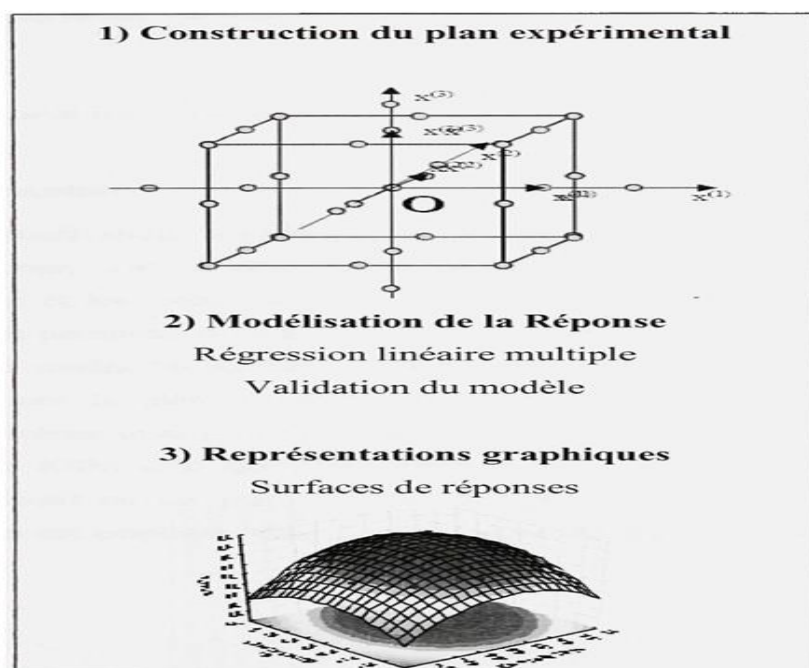


Figure III.11 : Étapes de la méthodologie de surface de réponse.

Les phases de construction du plan et de modélisation sont étroitement liées et peuvent être menées de manière itérative.

Dans une première étape, on construit un plan d'expérience optimal pour le modèle le plus simple possible. Ensuite, ce plan pourrait, éventuellement, être complété si les phases de modélisation et de validation montrent que le modèle présumé s'avère inadéquat.

Les étapes de la RSM sont les suivantes :

a. Planification expérimentale

Pour une bonne planification expérimentale, il est souhaitable que le nombre d'expériences effectuées, soit le plus faible possible afin de réduire les besoins informatiques, le délai et les coûts d'expérimentation. Une bonne sélection des points pour l'expérimentation permettra de

réduire la variance des coefficients de notre modèle mathématique, ce qui rendra les surfaces de réponses obtenues plus fiables. Pour ce faire, il faut déterminer le plan d'expérience le plus approprié afin d'obtenir les expériences les plus intéressantes pour notre type de problème. Les plans utilisés dans le cadre d'une étude de RSM sont des plans quadratiques tels que les plans centraux composites (Box-Wilson) ou les plans de Box-Behnken. Le plan central composite (CCD) est le plus souvent employé. Mais d'autres types de plan quadratique s'offrent à l'expérimentateur.

b. Modélisation

Lorsque l'on utilise la RSM, on cherche à relier une réponse continue y à k facteurs continus et contrôlés X_1, X_2, \dots, X_k à l'aide d'un modèle de régression linéaire qui peut s'écrire [4]:

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^d \beta_i x_i + \sum_{i=1}^d \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{j=2}^d \sum_{i=1}^{j-1} \beta_{ij} x_i x_j + \epsilon \quad (3.5)$$

$$y = f_{\beta}(x_1, x_2, \dots, x_p) + \epsilon \quad (3.6)$$

Bien que la forme précise de la fonction de réponse f_{β} soit inconnue, l'expérience montre que l'on peut en avoir une bonne approximation par un polynôme.

Dans le cas de deux facteurs, le modèle de régression linéaire est de la forme [4] :

$$y = \beta_0 + \beta_1 + \beta_2 x_2 + \beta_{12} x_1 x_2 + \epsilon \quad (3.7)$$

Il s'agit d'un des modèles les plus simples qui correspond à un modèle du premier degré avec interaction. Lorsque ce modèle est insuffisant pour décrire avec efficacité la réalité expérimentale, il est courant d'utiliser un modèle du second degré incluant les effets quadratiques des facteurs qui, dans la plupart des cas, est suffisant pour modéliser correctement les phénomènes étudiés.

Un modèle de surface de réponses du second degré avec d variables peut s'écrire de la manière suivante :

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^d \beta_i x_i + \sum_{i=1}^d \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{j=2}^d \sum_{i=1}^{j-1} \beta_{ij} x_i x_j + \epsilon \quad (3.8)$$

Où:

X_i : variables de prédiction codées appelées facteurs

β : coefficient de régression

ϵ : erreur totale qui est la différence entre les valeurs observées et les valeurs estimées de la réponse.

Dans la phase d'expérimentation de RSM, il convient de transformer les variables de conception réelles en variables codées, qui sont définies comme étant sans dimension avec

une moyenne de zéro et le même écart-type. Le but de l'opération est de traiter tous les facteurs de la même manière et de façon plus aisée car, simplifiée. La règle de passage des variables courantes aux variables codées est :

$$X_i = \frac{2R_i - [R_{\max} + R_{\min}]}{[R_{\max} + R_{\min}]} \quad (3.9)$$

- X_i : variables de prédiction centrée réduite (codée).
- R_i : Variable courante (naturelle, réelle).

Les coefficients de régression, paramètres inconnus du modèle (équation 3.8), sont estimés par la technique des moindres carrés et la qualité d'ajustement du modèle est évaluée à l'aide d'outils classiques de régression linéaire multiple.

Le modèle d'approximation peut s'écrire sous forme matricielle :

$$\hat{y} = X_b \quad (3.10)$$

Où:

- $\hat{y} = [\hat{y}_1 + \hat{y}_2, \dots, \hat{y}_n]^T$: estimation de la vectrice réponse des n réponses observées.
- X : la matrice de terme de modèle évalué aux points de conception
- b est l'estimateur des moindres carrés du vecteur de régression β , dont la valeur est estimée en minimisant la somme des carrés de l'erreur SS_E définie par :

$$SS_E = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (3.11)$$

Une fois les modèles mathématiques obtenus, il est nécessaire de vérifier que ces modèles donnent une approximation adéquate du système réel à l'étude.

c. Validation des modèles

Une fois la modélisation effectuée, il faut valider les modèles obtenus. Pour cela, des mesures statistiques importantes sont à considérer :

- le coefficient de détermination statistique : R^2
- le coefficient de détermination ajusté : R^2_{adj} ;
- l'erreur RMSE.

Leurs définitions impliquent la partition de l'erreur totale :

$$SS_T = \sum_{i=1}^n (y - \hat{y})^2 \quad (3.12)$$

En une somme de l'erreur accidentelle et de l'erreur systématique.

$$SS_T = SS_R + SS_E \quad (3.13)$$

Où :

$$\hat{y} = \sum_{i=1}^n \frac{y_i}{n} \quad \text{est la moyenne de réponses.}$$

Quant au coefficient de détermination R^2 il permet d'estimer la variation de la réponse autour de la moyenne qui peut être représentée par le modèle. Il est compris entre 0 et 1 et un R^2 de 1 exprime une correspondance parfaite entre l'évaluation et la valeur réelle ($\hat{y}_i = y_i$). Par contre, un R de 0 signifie que l'évaluation est incapable de prédire la valeur réelle.

$$R^2 = 1 - \frac{SSE}{SST} \quad (3.14)$$

Le coefficient de détermination ajusté R^2_{adj} est une mesure améliorée de R^2 .

Contrairement à R^2 , R^2_{adj} n'augmente pas lorsque des paramètres redondants sont ajoutés à l'approximation de surface de réponse.

$$R^2_{adj} = 1 - \left[\frac{n-1}{n-p} \right] (1 - R^2) \quad (3.15)$$

Quant à la RMSE, il s'agit d'une estimation de la déviation standard de l'erreur aléatoire et peut s'écrire :

$$RMSE = \sqrt{\frac{SSE}{(n-p)}} \quad (3.16)$$

III.8.3.3 La RSM pour l'optimisation en ingénierie

Une fois la modélisation terminée, le problème à l'étude doit être optimisé. Plusieurs méthodes d'optimisation peuvent permettre d'optimiser simultanément les différentes réponses découlant de l'emploi de la méthode des surfaces de réponses.

III.8.3.3.1 Méthode graphique

La première méthode de résolution est l'approche graphique. Pour cela, il suffit de tracer des courbes d'iso réponses pour chaque critère en fonction des variables, puis d'hachurer les zones intéressantes suivant les objectifs retenus. Enfin, par superposition des graphes, on fait apparaître les zones de compromis. Malheureusement, si cette méthode semble très attractive pour des cas simples avec 2 ou 3 variables, elle devient très lourde pour des problèmes plus complexes. Parce que, l'utilisateur doit jongler avec un grand nombre de graphiques pour découvrir le meilleur compromis.

III.8.3.3.2 Méthodes numériques

A: Le quadrillage

Cette méthode numérique présente le double avantage d'une conception simple et d'une recherche systématique. Pour réaliser cette recherche, il suffit de quadriller la zone expérimentale, et de calculer en chacun des nœuds les valeurs obtenues pour les différentes réponses. On obtient ainsi les différents points présentant des valeurs obtenues pour tous les

critères. L'inconvénient majeur vient essentiellement de la difficulté d'obtenir à la fois une grande précision et un temps de calcul raisonnable :

- Un maillage trop fin augmente le temps calcul
- Un maillage trop large risque de ne pas signaler des zones solutions qui seraient intéressantes.

III.9 Conclusion

L'approche des plans d'expériences, consiste à organiser la démarche expérimentale et l'analyse décisionnelle en appliquant plusieurs outils et tests statistiques. L'utilisation des plans d'expériences conduit à établir un plan, comportant le maximum de précision dans les résultats avec un minimum d'expériences.

Dans le cadre de notre travail, la méthode de la surface de réponse a été choisi afin d'étudier l'influence des différents paramètres géométriques, à savoir : l'espacement vertical entre les couches de renforcement (S_v), la longueur de renforcement (L) , la largeur du remblai (B), et l'angle d'inclinaison du remblai de renforcement ($\text{Alpha } \alpha$) sur le comportement des murs en terre armée.

Chapitre IV

**Présentation du logiciel de
calcul Plaxis**

Chapitre IV : Présentation du logiciel de calcul Plaxis

IV.1	Présentation de la méthode des éléments finis	45
IV.1.1	Le calcul par la méthode des éléments finis	45
IV.2	Présentation du code de calcul Plaxis	46
IV.2.1	Les sous-programmes de Plaxis	47
IV.2.2	Les modèles de comportement utilisés dans le Plaxis	48
IV.2.2.1	Modèle élastique linéaire	48
IV.2.2.2	Modèle élastique parfaitement plastique Mohr-Coulomb	48
IV.2.2.3	Modèle de sol avec écouissage (Hardening Soil Model)	50
IV.2.2.4	Modèle pour les sols mous (Soft Soil model)	50
IV.3	Les éléments de la modélisation	50
IV.3.1	Modélisation de sol	50
IV.3.2	Plaques	51
IV.3.3	Géogrilles	51
IV.3.4	Interfaces	52
IV.4	La démarche de modélisation	53
IV.4.1	Entrée des données	53
IV.4.2	Le calcul	54
IV.4.3	Analyse des résultats	54
IV.5	Conclusion	55

IV.1 Présentation de la méthode des éléments finis

La méthode des éléments finis est une technique récente à caractère pluridisciplinaire car elle met en œuvre les connaissances de trois disciplines de base :

1. La mécanique des structures : élasticité, résistance des matériaux, dynamique, plasticité, etc.
2. L'analyse numérique : méthodes d'approximations, résolution des systèmes linéaires, des problèmes aux valeurs propres, ... etc.
3. L'informatique appliquée : techniques de développement et de maintenance des grands logiciels.

La méthode des éléments finis est donc une méthode mathématique qui permet la résolution d'équations différentielles. Elle a été développée dans les années 60 et permet de décrire le comportement global d'une structure complexe à partir de fonctions simples et paramétrées définies pour chaque zone du modèle. Un maillage du domaine à étudier permet de définir des zones élémentaires appelées éléments. Ceux-ci sont reliés entre eux en différents points dénommés nœuds.

Cette dernière elle consiste à résoudre de manière discrète une équation aux dérivées partielles dont on cherche une solution approchée. Elle comporte des conditions aux limites permettant d'assurer l'existence et l'unicité de la solution. La discrétisation du problème consiste à vérifier les équations de base en un nombre limité de points (nœuds). Ainsi, on obtient une formulation algébrique du problème initial. La solution algébrique obtenue correspond aux composantes de la solution approchée du problème pour les éléments. [9]

IV.1.1 Le calcul par la méthode des éléments finis

La méthode aux éléments finis est théoriquement, la plus satisfaisante puisqu'elle permet la modélisation des problèmes géotechniques complexes. [8]

➤ Elle nécessite

- ✓ La définition de la géométrie du problème, pour que les frontières du calcul n'influencent pas sur les résultats.
- ✓ Le choix d'une loi de comportement du sol, de type Mohr-Coulomb, Cam-Clay, ... etc.
- ✓ Les caractéristiques des ouvrages et des éléments d'interface pour introduire l'interaction sol-structures et les conditions hydrauliques.
- ✓ Les caractéristiques des butons ou des tirants d'ancrage.
- ✓ L'état initial des contraintes et des pressions interstitielles.

➤ Elle permet :

- ✓ D'effectuer les calculs d'écoulement ;
- ✓ De simuler toutes les phases de travaux ;
- ✓ De prendre en compte les variations des caractéristiques : des ouvrages, des couches de terrain et des lits de butons ou de tirants ;
- ✓ De calculer un coefficient de sécurité.

Les sorties fournissent pour les ouvrages sont :

- ✓ Les déplacements des ouvrages ;
- ✓ Les sollicitations internes des ouvrages ;
- ✓ Les efforts dans les butons ou tirants.

Et pour le sol :

- ✓ Les déplacements du sol ;
- ✓ Les déformations du sol ;
- ✓ Les contraintes totales et effectives dans le sol ;
- ✓ Les pressions interstitielles ;
- ✓ De calculer un coefficient de sécurité.

IV.2 Présentation du code de calcul Plaxis

Le logiciel Plaxis V8 est un programme de calcul basé sur la méthode des éléments finis spécialement conçu pour réaliser des analyses de déformation et de stabilité pour les différents types d'applications géotechniques. Il permet d'analyser des problèmes élastiques, élasto-plastiques, élasto-viscoplastiques.

L'algorithme général du code Plaxis consiste à résoudre un système d'équations algébriques non linéaires selon un processus itératif pour déterminer les champs de déplacements aux différents nœuds du maillage, le champ de contraintes et les états de rupture du sol.

Les situations réelles peuvent être représentées par un modèle plan ou axisymétrique. Le programme utilise une interface graphique pratique permettant aux utilisateurs de générer rapidement un modèle géométrique et un maillage d'éléments finis basés sur la coupe verticale de l'ouvrage à étudier.

L'interface d'utilisation du programme Plaxis V8 se compose de quatre sous-programmes (Input, Calculations, Output et Curves).

Plaxis version 8 peut être utilisé pour réaliser des analyses par les éléments finis en deux ou trois dimensions. Les modèles d'éléments finis en deux dimensions « 2D » peuvent être soit

aux déformations planes (Plane strain), soit axisymétriques en trois dimensions « 3D » (Axisymétric).

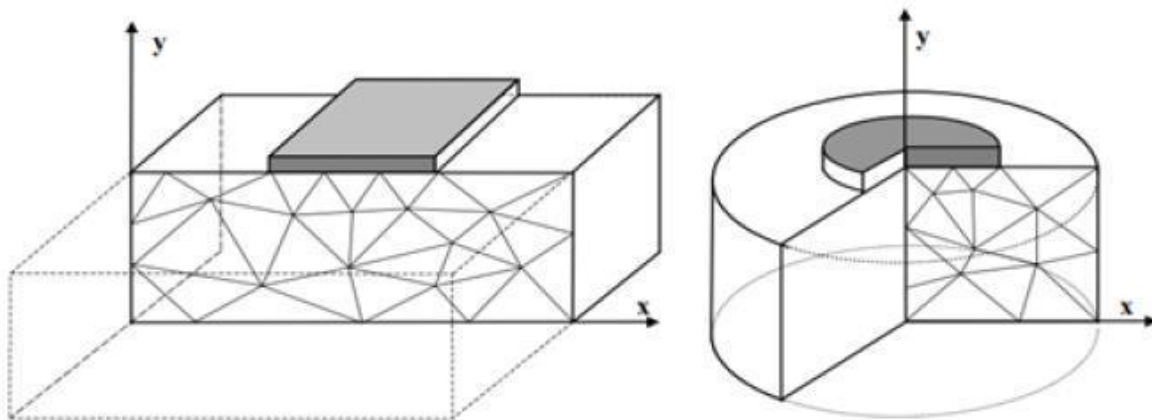


Figure IV.1 : Exemples de problèmes en déformations plane et axisymétrique. [3]

IV.2.1 Les sous-programmes de Plaxis

L'interface d'utilisation de Plaxis se compose de quatre sous-programmes (Input, Calculations, Output et Curves). [10]

a. Le programme d'entrée de données (Input)



Le programme contient tout ce qui est nécessaire pour créer et modifier un modèle géométrique, pour générer le maillage d'éléments finis correspondant et pour générer les conditions initiales.

b. Le programme de calcul (Calculations)



Ce programme contient tous les éléments pour définir et amorcer un calcul par la méthode des éléments finis. Au début du programme de calcul, l'utilisateur doit choisir le projet pour lequel les calculs vont être définis.

c. Le programme de résultats (Output)



Ce programme contient tous les éléments qui permettent de voir les résultats des données générées et des calculs d'éléments finis. Au début du programme de résultats, l'utilisateur doit choisir le modèle et la phase de calcul appropriée ou le numéro du pas pour lequel les résultats seront affichés.

d. Le programme courbe (Curves)



Ce programme contient tout le nécessaire pour générer des courbes charges déplacements, des chemins de contrainte et des courbes contraintes-déformations.

IV.2.2 Les modèles de comportement utilisés dans le Plaxis

La méthode des éléments finis qui utilise le code Plaxis comprend des lois de comportement à différents niveaux de complexité depuis l'élasticité linéaire jusqu'à un modèle permettant de tenir compte de la raideur du sol sous très petites déformations.

Les détails de chaque modèle peuvent être trouvés dans le guide d'utilisateurs de Plaxis. [9].

IV.2.2.1 Modèle élastique linéaire

Ce modèle représente la loi de Hooke pour l'élasticité linéaire et isotrope. Le modèle comporte deux paramètres de rigidité élastique, le module d'Young E , et le coefficient de Poisson ν . Le modèle linéaire élastique est très limité pour simuler le comportement d'un sol. Il est utilisé principalement pour des structures rigides massives placées dans le sol (par exemple le cas du parement en bloc en béton). [9]

Le modèle élastique linéaire utilisé dans Plaxis est classique. Les tableaux de rentrée des données demandent le module de cisaillement G et le coefficient de Poisson ν . L'avantage de G est d'être indépendant des conditions de drainage du matériau ($G_u = G'$), ce qui n'est pas le cas des modules d'Young : le module d'Young non drainé est supérieur au module d'Young drainé. Il aurait pu sembler logique, si G est utilisé comme paramètre élastique, d'utiliser K comme second paramètre. D'une part K_u est infini (correspondant à $\nu = 0,5$) et il est moins courant d'emploi. G est en fait le module mesuré dans les essais pressiométriques. La relation entre le module d'Young E et les autres modules sont données par les équations :

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (4.1) ; \quad K = \frac{E}{3(1-2\nu)} \quad (4.2) ; \quad E_{oed} = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (4.3)$$

Le modèle élastique linéaire de Plaxis peut être employé surtout pour modéliser les éléments de structures en béton ou métal en interaction avec le sol. Il peut aussi être intéressant pour certains problèmes de mécanique des roches.

IV.2.2.2 Modèle élastique parfaitement plastique Mohr-Coulomb

Le modèle bien connu de Mohr-Coulomb peut être considéré comme une approximation au premier ordre du comportement réel du sol. Ce modèle, élastique parfaitement plastique, nécessite cinq paramètres fondamentaux qui sont :

- Le module d'Young E ,
- Le coefficient de Poisson ν ,
- La cohésion c ,
- L'angle de frottement φ ,
- L'angle de dilatance ψ .

Comme les ingénieurs géotechniciens sont habitués à utiliser ces cinq paramètres, et qu'ils disposent rarement d'autres données. Le modèle à critère de rupture de Mohr-Coulomb, est le plus couramment utilisé en mécanique des sols. Le modèle de Mohr-Coulomb est un modèle élastique-parfaitement plastique (sans écrouissage). Dans le plan de Mohr, la droite intrinsèque est représentée par : $\tau = \sigma_n \tan \varphi + C$ (4.4) où σ_n et τ sont respectivement les contraintes normales et de cisaillement, c et φ respectivement la cohésion et l'angle de frottement du matériau (figure IV.2).

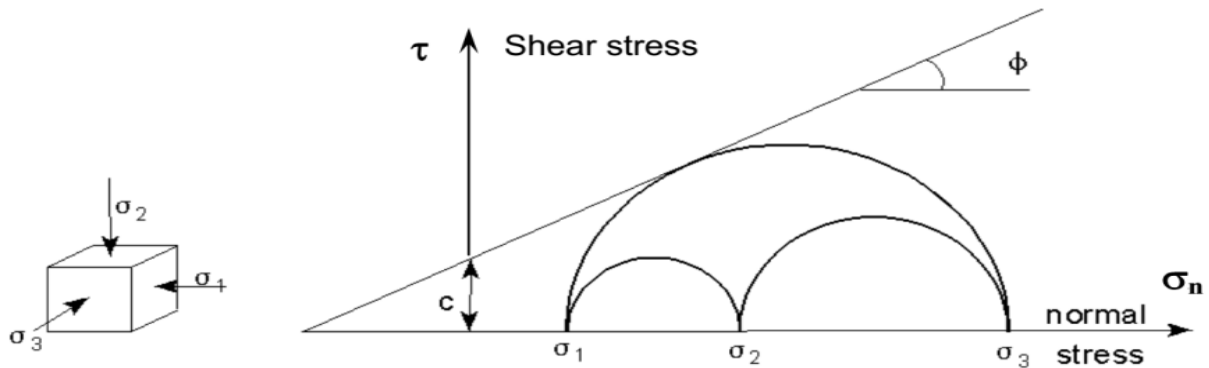


Figure IV.2 : Courbe intrinsèque du modèle de Mohr-Coulomb.

Afin de comprendre la signification des cinq paramètres fondamentaux du modèle, considérons des courbes contraintes-déformations classiques comme celles obtenues à partir d'essais triaxiaux drainés (figure IV.3).

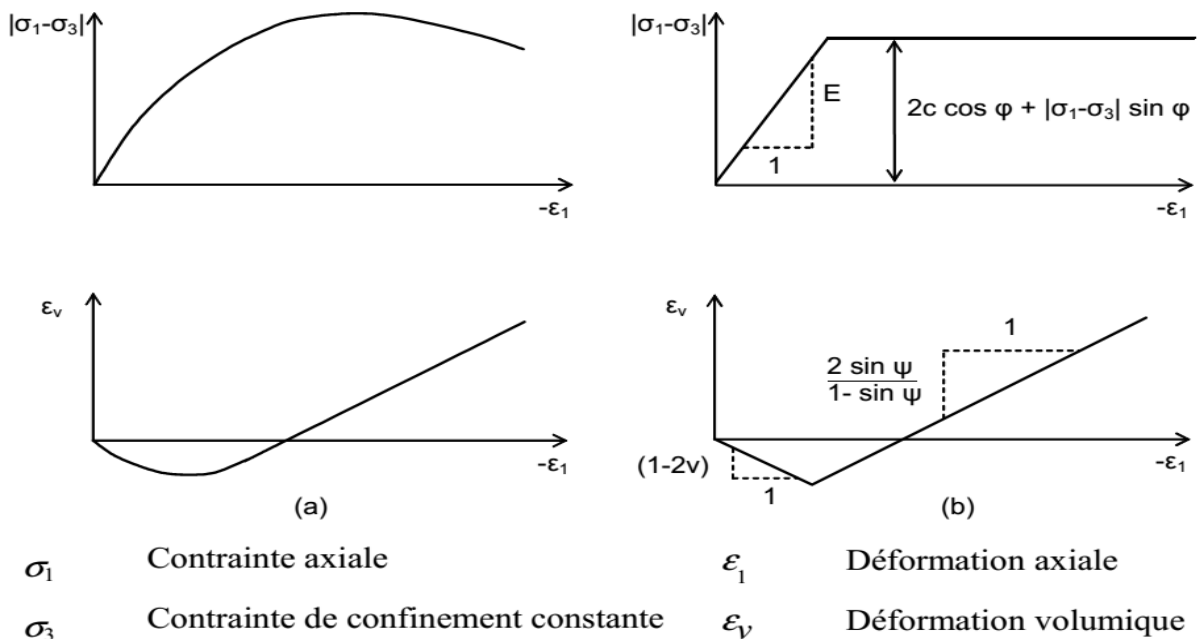


Figure IV.3 : Résultats d'essais triaxiaux standards (a) et modèle élasto-plastique (b). [3]

IV .2.2.3 Modèle de sol avec écouissage (Hardening Soil Model)

C'est un modèle hyperbolique de type élasto-plastique formulé dans le cadre de la plasticité avec écouissage en cisaillement. De plus, ce compactage irréversible d'un sol sous son premier chargement en compression. Ce modèle du deuxième ordre permet de simuler le comportement des sables, des graviers, mais aussi de sols plus mous comme les argiles et les limons [12].

IV.2.2.4 Modèle pour les sols mous (Soft Soil model)

C'est un modèle de type Cam-Clay qui permet de simuler le comportement de sols mous comme des argiles normalement consolidées. Ce modèle s'applique très bien aux situations où la consolidation primaire est prépondérante [12].

IV.3 Les éléments de la modélisation

IV.3.1 Modélisation de sol

L'utilisateur de Plaxis doit sélectionner des éléments triangulaires à 6 ou 15 nœuds pour modéliser les couches de sol et autres éléments de volume. L'élément par défaut de Plaxis est le triangle à 15 nœuds, il fournit des interpolations de quatrième ordre pour les déplacements. La matrice de rigidité des éléments est évaluée par l'intégration numérique en utilisant en total douze points de Gauss (points de contrainte). Pour les triangles à 6 nœuds, l'interpolation est du second ordre, et l'intégration nécessite trois points de contraintes (Figure IV.4) [11].

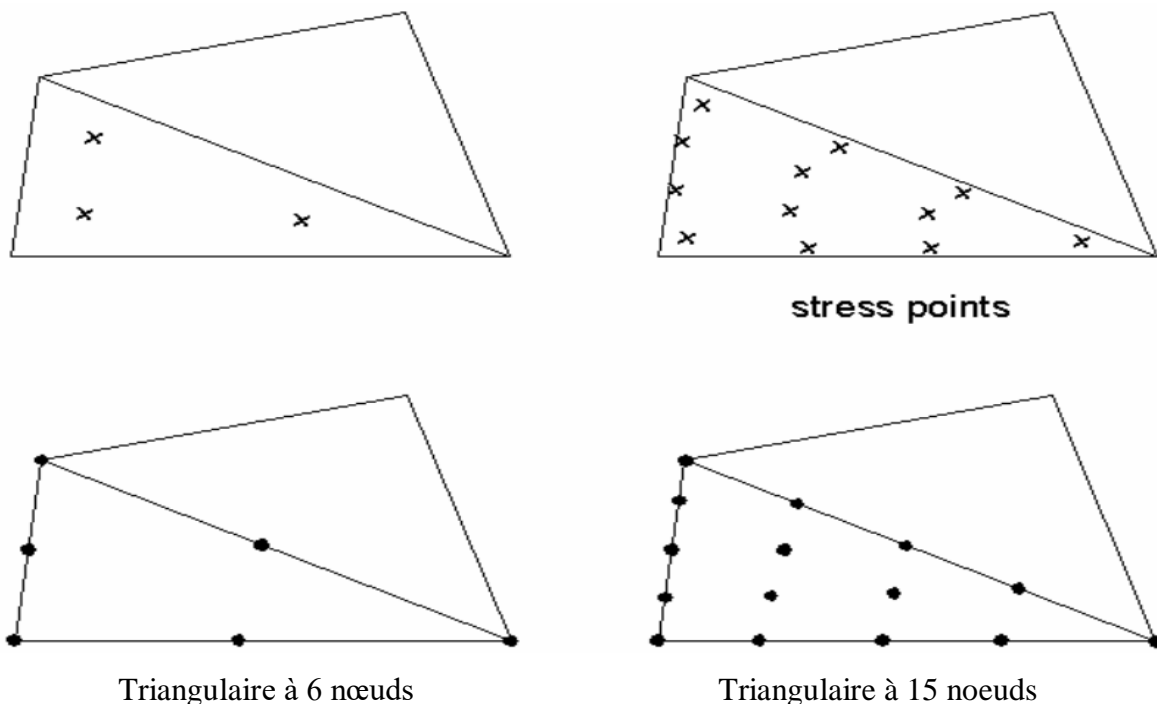


Figure IV.4 : Position des nœuds et des points de contrainte dans les éléments du sol. [3]

Dans cette étude, la masse de sol est modélisé par un maillage en éléments triangulaires à 15 nœuds comme montré sur la figure IV.4. Le triangle à 15 nœuds est un élément très précis qui à produit des résultats en contraintes de haute qualité, sur différents problèmes. L'utilisation des triangles à 15 nœuds implique une consommation de mémoire assez élevée, quoique les calculs et la manipulation soient donc un peu ralentis.

IV.3.2 Plaques

Le logiciel Plaxis offre la possibilité de modéliser des éléments de structure tels que des fondations en béton armé, des murs, des blocs en béton, des voiles de soutènement, des coffrages, ...etc. par l'élément " Plate ". Ces éléments peuvent suivre des rhéologies élastiques et élasto-plastiques. Dans le cas d'une élasto-plasticité, le projeteur doit rentrer le moment de plastification de la poutre préalablement calculé. Dans les modélisations réalisées, nous n'avons considéré qu'un comportement élastique. [9] Les données demandées par le logiciel pour la modélisation des blocs en béton sont les suivantes :

- la valeur **EA** égale au produit de la section du bloc modulaire ($b \times h$ dans le cas d'une section rectangulaire) et du module d'élasticité du matériau constitutif ces blocs,
- la valeur **EI** égale au produit du second moment d'inertie ($bh^3/12$ dans le cas d'une section rectangulaire) et du module d'élasticité du matériau constitutif ces blocs. [9]

A partir de ces deux paramètres, l'épaisseur équivalente de la plaque est calculée à partir de l'équation :

$$d_{eq} = \sqrt{12 \frac{EI}{EA}} \quad (4.5)$$

IV.3.3 Géogrilles

Les géogrilles sont des éléments élancés possédant une rigidité normale mais aucune rigidité de flexion. Les géogrilles ne peuvent résister qu'à des efforts de traction et non à des efforts de compression. Ces éléments sont principalement utilisés pour modéliser des renforcements de sol. Les nappes géogrilles sont modélisées par un élément de structure appelé "geogrid". Cet élément est régi par un comportement élastique parfaitement plastique, l'élément est caractérisé par sa rigidité axiale **EA** (ou le module de rigidité **J**) et la tension interne **N**. [9]

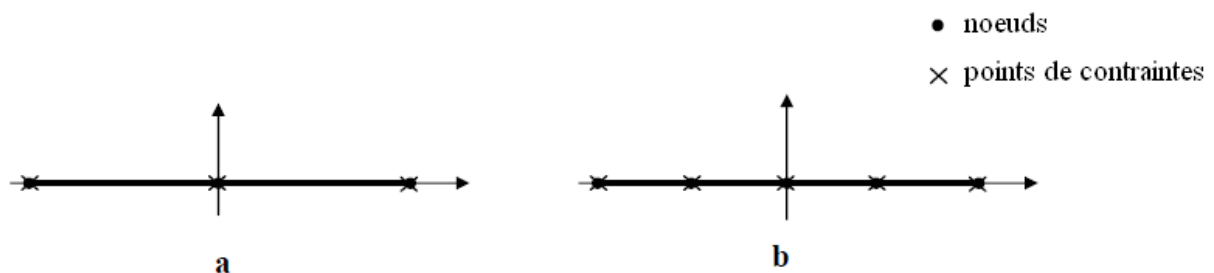


Figure IV.5 : Position des nœuds et des points de contrainte sur les éléments de géogrille à 3 nœuds et à 5 nœuds. [3]

IV.3.4 Interfaces

Les interfaces sont utilisées pour modéliser les interactions entre les structures et le sol. Les interfaces sont composées d'éléments "Interface". La figure IV.6 montre comment les éléments d'interface sont connectés aux éléments de sol. Si les éléments de sol à 6 nœuds sont utilisés, les éléments d'interface correspondant sont définis par trois paires de nœuds, alors que pour les éléments de sols à 15 nœuds, les éléments d'interface sont définis par cinq paires de nœuds. Sur la figure, les éléments d'interface sont montrés avec une épaisseur finie, mais dans la formulation des éléments finis, les coordonnées de chaque paire de nœuds sont identiques, ce qui signifie que les éléments ont une épaisseur nulle. Chaque interface à une "épaisseur virtuelle" qui lui est assignée ; c'est une dimension imaginaire utilisée pour obtenir les propriétés du matériau de l'interface. Cette épaisseur virtuelle est définie comme le produit du facteur d'épaisseur virtuelle (Virtual thickness factor) par la taille moyenne de l'élément. La taille moyenne de l'élément est déterminée par le réglage de la précision du maillage. La valeur par défaut de Virtual thickness factor est de 0.1. Cette valeur peut être changée en double cliquant sur la ligne géométrique et en sélectionnant l'interface dans la boîte de dialogue. Toutefois, des précautions doivent être prises en changeant le facteur par défaut. Cependant, si des éléments d'interface sont sujets à des contraintes très importantes, il peut être nécessaire de réduire l'épaisseur virtuelle. [9]

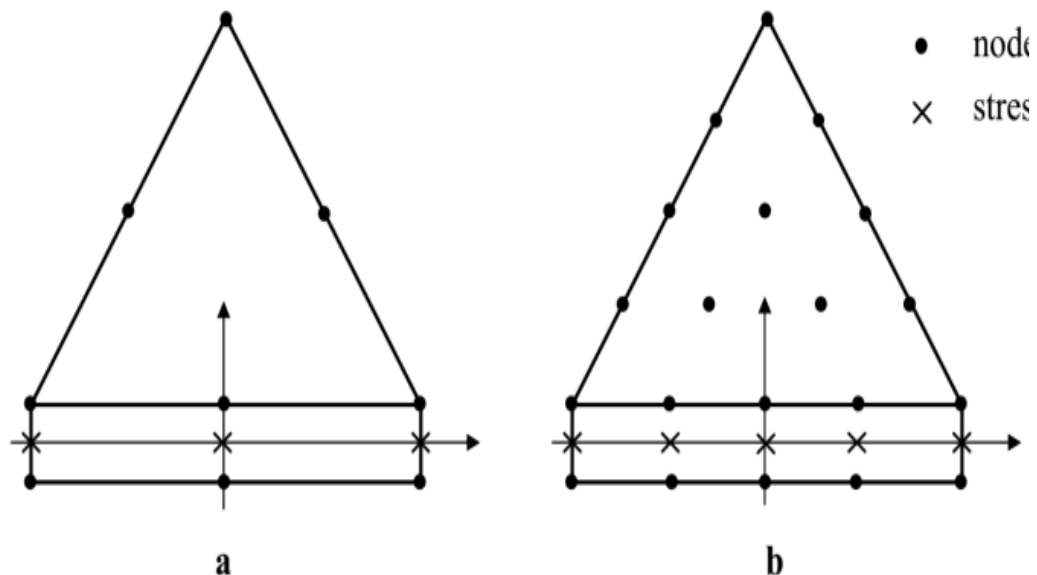


Figure IV.6 : Distribution des nœuds et des points de contrainte dans les éléments d'interface et connexion avec les éléments de sol : (a) élément à 6 nœuds ; (b) élément à 10 nœuds. [3]

IV.4 La démarche de modélisation

IV.4.1 Entrée des données

a. La géométrie du modèle

La définition des couches de sol, des ouvrages, des phases de construction, des chargements et des conditions aux limites s'appuie sur des procédures graphiques faciles à utiliser, ce qui permet une description détaillée et précise des conditions réelles à modéliser. Le maillage d'éléments finis en 2D est généré de manière automatique directement à partir de ce modèle géométrique.

b. Conditions aux limites

Les "fixités" sont des déplacements nuls imposés. Ces conditions peuvent être appliquées aux lignes comme aux points définissant la géométrie du modèle, dans les directions x ou y. Une option permet d'appliquer les conditions d'appui standard valables dans la majorité des cas.

c. Chargement

Deux systèmes de chargement indépendants sont proposés pour appliquer des forces ponctuelles ou des charges réparties. Les forces ponctuelles peuvent être appliquées à n'importe quel point de la géométrie, les charges réparties à n'importe quelle ligne de la géométrie, sans se limiter à la seule frontière extérieure. Les valeurs des chargements peuvent être modifiées dans le mode "Construction par étapes" et/ou par l'utilisation des multiplicateurs.

d. Propriétés des Matériaux

Dans Plaxis, les propriétés du sol et les propriétés des matériaux des structures sont toutes stockées dans une base de données. Il y a quatre types différents de matériaux : Sols et interfaces (Soil & Interfaces), plaques (Plates), géogrilles (Geogrids) et ancrages (Anchors).

Le modèle de comportement et les différents paramètres permettant de le définir.

Pour les sols, en plus de la définition des caractéristiques mécaniques, leurs interfaces avec les autres types d'éléments peuvent être paramétrés, il faut également définir le comportement hydraulique du sol (drainer, non- drainer ou non-poreux).

e. Génération automatique du maillage

Plaxis offre une génération entièrement automatique de maillages non structurés d'éléments finis, avec des options pour raffiner le maillage, globalement ou localement. Le maillage peut contenir des milliers d'éléments.

f. Conditions initiales

Une fois le modèle géométrique créé et le maillage d'éléments finis généré, l'état de contraintes initiales et la configuration initiale doivent être spécifiés. Cela se fait dans la partie traitant des conditions initiales du programme d'entrée des données. Les conditions initiales sont constituées de deux modes différents, l'un pour générer les pressions interstitielles initiales (mode des conditions hydrauliques) et l'autre pour spécifier la configuration géométrique initiale et générer le champ des contraintes effectives initiales (mode de configuration géométrique).

IV.4.2 Le calcul

Le programme de calcul conduit des analyses en déformation menées soit par un calcul plastique, un calcul de consolidation ou un calcul en grandes déformations et calcul de coefficient de sécurité. Pour chaque projet, plusieurs phases de calcul peuvent être définies avant le lancement du calcul.

IV.4.3 Analyse des Résultats

Les principaux résultats d'un calcul d'éléments finis sont les déplacements aux nœuds et les contraintes aux points de contraintes. De plus, lorsqu'un modèle d'éléments finis inclut des éléments de structure, des efforts sont calculés dans ces éléments. [8]

a. Déformations

La restitution graphique des déformations peut se faire sous la forme de maillage déformé, carte de déplacements totaux ou incrémentaux ou cartes de déformations totales ou incrémentales.

b. Contraintes

La restitution des contraintes peut se faire en contraintes effectives, contraintes totales, pressions interstitielles et surpressions interstitielles

IV.5 Conclusion

Comme tous les logiciels, Plaxis est un outil facile d'utilisation, il permet l'analyse de problèmes géotechniques en 2D. La barre d'outils contient les icônes pour les actions relatives à la création du modèle géométrique. Ces icônes sont placées dans un ordre tel qu'il permet en général de définir entièrement le modèle en suivant les boutons de la barre d'outils de la gauche vers la droite. Il se caractérise notamment par La fonction "construction par étapes" (Staged construction) est le type de chargement (Loading input) le plus important. Grâce aux fonctionnalités spéciales de Plaxis, il est possible de changer la géométrie et la configuration de chargement en désactivant ou réactivant les charges, les couches de sol ou les éléments de structure créés lors de la définition du modèle géométrique. La construction par étapes permet une simulation précise et réaliste de différents processus de chargement, construction et excavation. Le code de calcul Plaxis a été utilisé dans ce mémoire comme support de modélisation dans la suite du travail.

Chapitre V

**Validation du modèle
numérique et étude
paramétrique**

Chapitre V : Validation du modèle numérique et étude paramétrique

V.1 Présentation du modèle numérique	57
V.2 Modèles constitutifs et paramètres géomécaniques de modélisation	58
V.2.1 Le sol	58
V.2.2 Les écailles en béton	60
V.2.3 L'interface sol/écailles en béton	60
V.2.4 Les armatures de renforcement	60
V.3 Critères d'analyse	61
V.4 Résultats de la modélisation	61
V.4.1 Déformation et Stabilité	61
V.5 Étude Paramétrique	62
V.5.1 Influence de l'espacement (S_v)	63
V.5.2 Influence de la longueur de renforcement (L)	63
V.5.3 Influence de la largeur du remblai (B)	64
V.5.4 Influence de l'angle d'inclinaison α	65
V.6 Conclusion	65

V.1 Présentation du modèle numérique

Le mur étudié de 6m de hauteur est composé initialement, horizontalement et verticalement de 4 écailles superposées et renforcés par 8 niveaux de renforcements géosynthétiques de 4 mètres de longueur (Figure V.1).

La forme cruciforme des panneaux (Figure V.2a), conduit à une géométrie complexe de la façade du mur. Cette géométrie tridimensionnelle est réduite à deux dimensions en utilisant quelques simplifications. Deux panneaux sont considérés comme largeur de calcul (4 bandes de renforcement sont mis en place pour chaque panneau). Les panneaux sont modélisés comme des plaques carrés de 1,5 m sur 1,5 m. Une densité homogène des renforcements est alors utilisée (Figure V.2b).

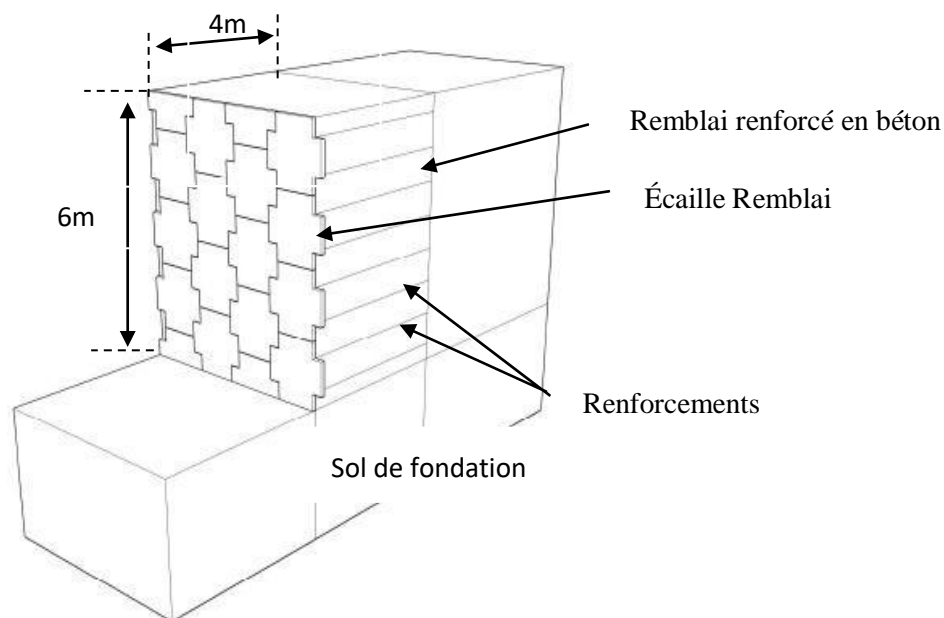


Figure V.1 : Géométrie du mur réel étudié. [5]

La simplification de la géométrie permet d'utiliser un modèle bidimensionnel avec des armatures continues. Les paramètres de ces armatures sont calculés comme étant le ratio des caractéristiques pour la largeur du terrain considéré (Figure V.2c). Par exemple, le périmètre des armatures est calculé de la manière suivante :

$$\text{Périmètre des armatures} = \frac{2 \times \text{largeur d'armature} \times \text{nombre d'armature}}{\text{largeur de calcul}} \quad (5.1)$$

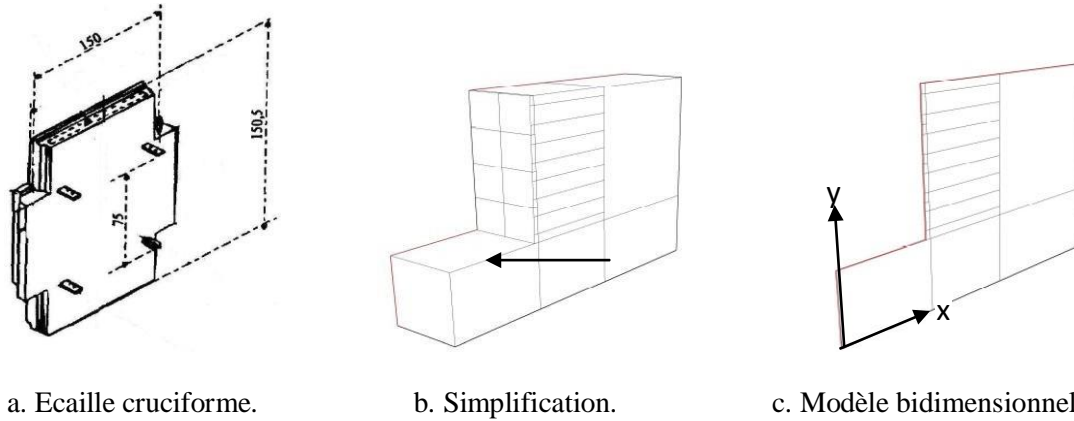


Figure V.2 : Représentation du mur tridimensionnelle par un modèle bidimensionnel. . [5]

Pour les conditions aux limites, les déplacements horizontaux et verticaux sont bloqués à la base du modèle et seuls les déplacements horizontaux sont bloqués sur les côtés latéraux. Afin de reproduire les étapes de construction de la structure réelle, la mise en place du remblai renforcé et du remblai général est modélisée par des couches de 0.375m en plusieurs phases :

- **Phase 1:** mise en place de la première écaille, de la première et deuxième couche et installation de la première armature entre les deux couches de remblai renforcé (équilibre).
- **Phase 2:** mise en place de la troisième et quatrième couche, installation de la deuxième armature entre les deux couches de remblai renforcé (équilibre).
- **Phase 3:** mise en place du deuxième panneau, de la cinquième et sixième couche de remblai et installation de la troisième armature entre les deux couches de remblai renforcé.
- Ces phases sont répétées jusqu'à 6 mètres de hauteur du mur.

V.2 Modèles constitutifs et paramètres géomécaniques de modélisation

Le cas de référence est modélisé en prenant en compte des paramètres géomécaniques réels. Ces paramètres de référence sont décrits ci-dessous.

V.2.1 Le sol

Le modèle est constitué de trois sols différents (Figure V.3) dont les caractéristiques figurent dans le Tableau V.1:

- Remblai renforcé : simulé par du sable fin uniforme, connu sous le nom de sable d'Hostun ;
- Remblai général ;
- Le sol de fondation ;

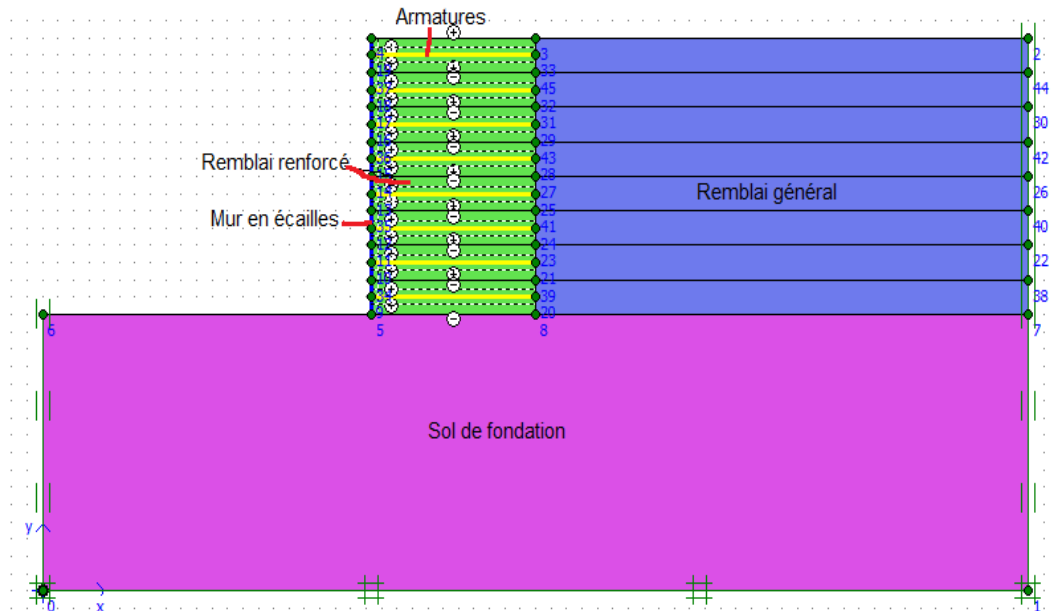


Figure V.3 : Modèle numérique du modèle de référence.

Type de sol	Remblai renforcé	Remblai général	Sol de fondation
Modèle de comportement	Mohr Coulomb	Mohr Coulomb	Elastique linéaire
Module de Young (MPa)	50	30	50
Coefficient de Poisson	0,3	0,3	0,3
Masse volumique (kg/m ³)	1580	1800	2000
Angle de frottement (°)	36	30	-
Angle de dilatance (°)	6	0	-
Cohésion (KPa)	0	0	-

Tableau V.1 : Caractéristiques géomécaniques du sol.

Le modèle de comportement utilisé pour simuler le remblai renforcé et le remblai général est un modèle linéaire élastique parfaitement plastique avec le critère de plasticité de Mohr- Coulomb.

Ce modèle de comportement est caractérisé par cinq paramètres: les paramètres élastiques (E: module d'Young, ν : le coefficient de Poisson) et les paramètres plastiques (ϕ : angle de frottement, c: la cohésion, et ψ : angle de dilatance).

Pour le sol de fondation, un modèle de comportement élastique linéaire est utilisé. Ce modèle est caractérisé par deux paramètres élastiques (E: module d'Young et ν : coefficient de Poisson).

V.2.2 Les écaillés en béton

Les panneaux sont modélisés en utilisant des éléments plaques représentés par l'objet « plate » dans le code de calcul Plaxis 2D. Ils sont utilisés pour simuler des éléments structurels. Les caractéristiques du modèle sont représentées dans le tableau V.2.

Paramètres	
Modèle de comportement	Elastique linéaire
Module d'Young (MPa)	15000
Coefficient de Poisson	0,2
Masse volumique (kg/m ³)	2500

Tableau V.2 : Caractéristiques des écaillés en béton.

V.2.3 L'interface sol/écaillés en béton

Des éléments d'interface ont été modélisés sur un seul côté des panneaux afin de simuler la raideur et le frottement à l'interaction parement en béton/sol. L'angle de frottement à l'interface est supposé être égal à 2/3 de l'angle de frottement du sol.

V.2.4 Les armatures de renforcement

Les renforcements simulés dans le calcul de référence correspondent aux bandes géosynthétique GeoStrap 50 (GS 50) utilisées actuellement dans le renforcement des murs en terre armée. Les propriétés prises en compte dans le modèle sont présentées dans le tableau V.3.

Les renforcements sont modélisés en utilisant des éléments structurels en forme de bandes représentés par l'objet Geogrids dans le logiciel Plaxis. Ces éléments sont spécialement conçus pour simuler le comportement de bandes de renforcement utilisées en terre armée. L'élément Geogrid peut simuler une résistance en traction, mais ne présente aucune raideur en flexion.

Dans les murs réels utilisant le système GeoMega, les armatures GeoStrap 50 sont mises en place par paire de bandes de 50mm de large (2x50mm). Dans le modèle numérique 2D, ces bandes sont simplifiées et considérées comme des armatures continues dont les paramètres (géométriques et physiques) sont calculés comme étant le ratio des caractéristiques pour la largeur du terrain considéré.

Renforcement	GS 50
Modèle de comportement	Elastique linéaire
Module élastique (GPa)	2.5
Largeur (m)	0.1
Épaisseur (mm)	3
Résistance à la traction (KN)	100
Résistance à la compression (N)	0.0
Déformation avant la rupture (%)	12

Tableau V.3: Caractéristiques des renforcements.

V.3 Critères d'analyse

Deux critères sont utilisés pour étudier le comportement du mur en Terre Armée ; la déformation et la stabilité. La déformation du sol renforcé $|U|$ est calculée en déterminant le point qui subit le plus de déplacement :

$$|U| = \sqrt{[U_x^2 + U_y^2]} \quad (5.2)$$

L'analyse de la stabilité des murs a été effectuée par le calcul du coefficient de sécurité (F_s). Ce facteur est calculé par la méthode $c-\phi$ réduction. Dans cette approche, les paramètres de résistance du sol (frottement et de cohésion) sont progressivement réduits jusqu'à la rupture de la structure. Le coefficient de sécurité est alors donné par:

$$F_s = \frac{\text{Résistance initiale}}{\text{Résistance à la rupture}} \quad (5.3)$$

V.4 Résultats de la modélisation

V.4.1 Déformation et Stabilité

Les déplacements calculés dans le sol renforcé en utilisant des paramètres de référence avec des bandes synthétiques (GS 50) sont reportés dans le Tableau V.4. Pour la validation de notre modèle numérique de référence, les résultats obtenus en termes de déplacement et du coefficient de sécurité sont comparés à ceux obtenus par Abdelkader dans sa thèse. Ces déplacements maximum concernent le sol localisé juste derrière le parement en béton (Figure V.4). En ce qui concerne la stabilité de la paroi, le calcul du facteur de sécurité F_s montre une stabilité importante du mur avec un coefficient de sécurité égale 1.55.

	$ U $ (mm)	U_x (mm)	U_y (mm)	F_s
Abdelkader	78	61	53	1,51
Présente étude	79.61	60.24	53.48	1.55

Tableau V.4 : Résultats du calcul de référence avec les armatures synthétiques.

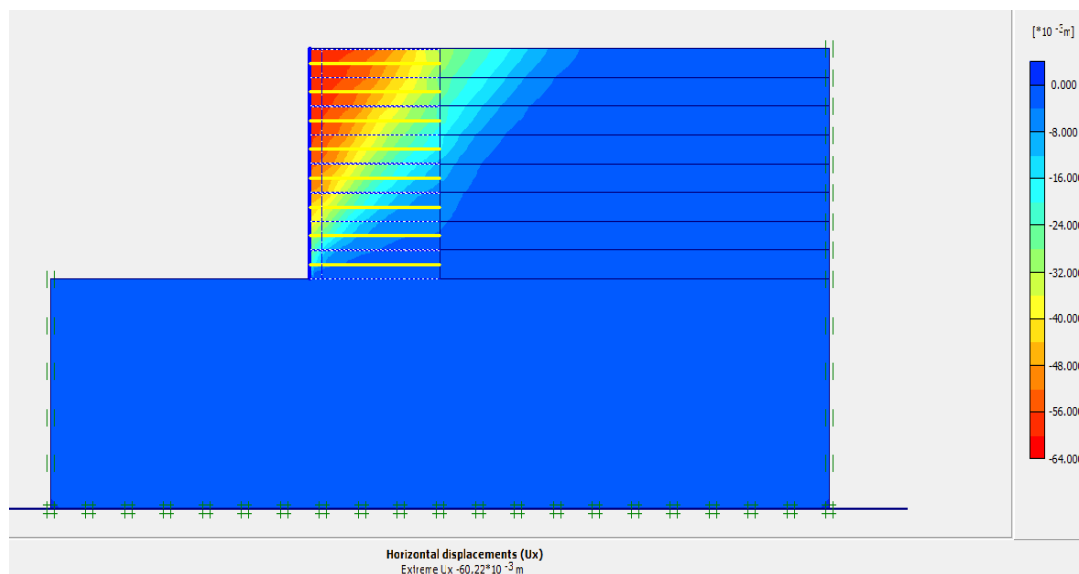


Figure V.4 : Déplacements horizontaux dans le mur en Terre Armée (6 m de hauteur).

V.5 Etude paramétrique

L'influence de plusieurs paramètres (l'espacement vertical (S_v), la largeur du remblai (B), la longueur de renforcement (L) et l'angle d'inclinaison du remblai de renforcement (α) sur le comportement des murs en terre armée sera étudiée, la plage de variation est présentée

au Tableau V.5. Cette étude est basée sur la première modélisation, en utilisant les paramètres de référence. Après avoir calculé le déplacement horizontal avec le logiciel Plaxis, en variant chaque paramètre dans un intervalle fixé, on a obtenus les résultats qui sont présentés dans les courbes ci-dessous:

Paramètre	Valeur de référence	Variation entre	
		Min	Max
L'espace vertical Sv (m)	0,75	0,50	1,00
Longueur du renforcement L(m)	4,0	2,0	6,0
Largeur du remblai B (m)	3,0	2,0	4,0
L'angle Alpha α (°)	75	60	90

Tableau V.5 : Influence des paramètres géométriques du mur renforcé.

V.5.1 Influence de l'espace vertical (Sv)

L'effet de l'espace vertical sur le comportement du mur et le déplacement latéral est présenté dans la figure (Figure V.5).

Les résultats de cette étude montrent que l'espace vertical entre les couches de renforcement influence d'une façon remarquable sur le déplacement latéral.

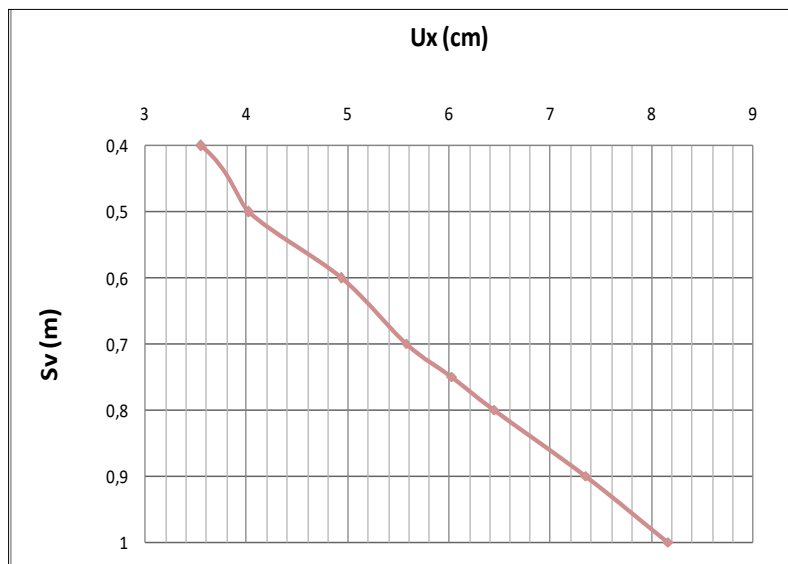


Figure V.5 : Influence de l'espace vertical (Sv).

V.5.2 Influence de la longueur de renforcement (L)

L'effet de la longueur du renforcement (L) a été examiné en considérant différentes longueurs du renforcement tandis que l'espacement vertical a été maintenue constant. La figure V.6 montre l'effet de la longueur du renforcement qui influence sur le déplacement. Comme montre les résultats, la réduction la plus remarquable du mouvement horizontal du mur est où la longueur (L) varie de 2 m après ce rapport le déplacement horizontal du mur diminuée a chaque fois que la longueur augmente.

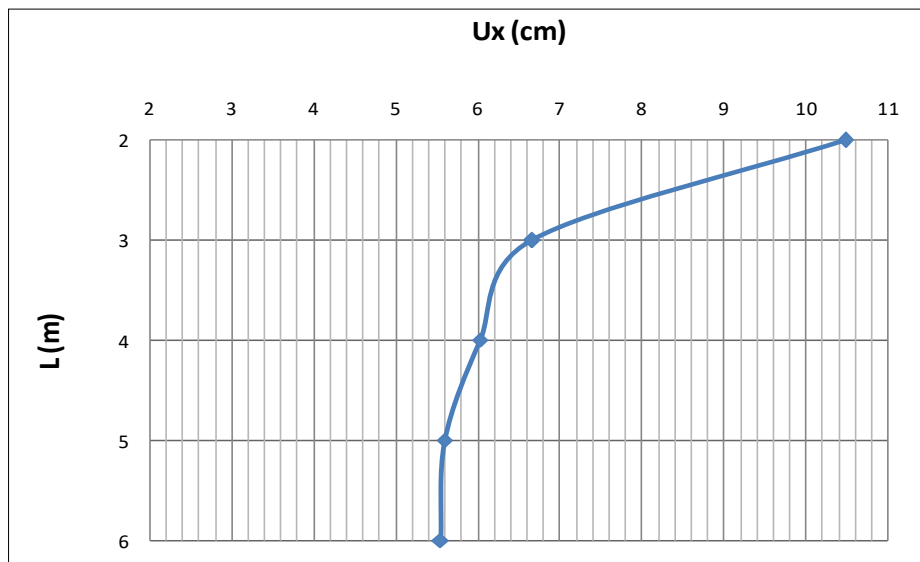


Figure V.6 : Influence de la longueur de renforcement (L).

V.5.3 Influence de la Largeur du Remblai (B)

L'effet de la largeur du remblai sur le comportement de mur et le déplacement latéral est résumé dans la figure (Figure V.7). Les résultats de cette étude montrent qu'à partir d'une largeur de remblai de 2.0 m, ce paramètre n'a pas un grand effet sur le déplacement latéral du mur.

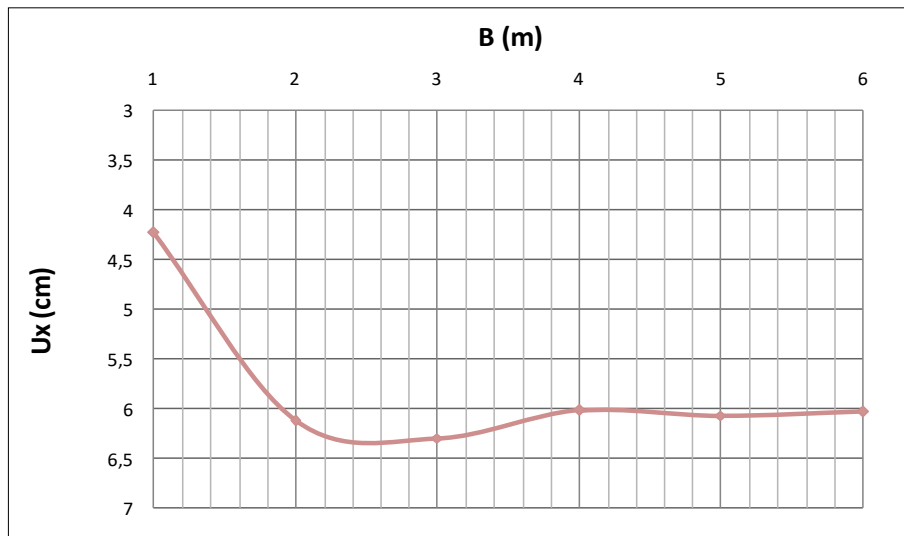


Figure V.7: Influence de la largeur du remblai (B).

V.5.4 Influence de l'angle d'inclinaison Alpha α

L'effet de l'angle d'inclinaison du remblai allant de 60° à 90° , sur le déplacement latéral du parement est illustré sur la figure V.8.

D'après les résultats, avec une augmentation de 5 degrés de l'angle d'inclinaison du remblai, (de 60 à 90), le déplacement horizontal maximal du mur est resté presque constant donc elle n'a pas une influence remarquable sur le déplacement horizontal du mur.

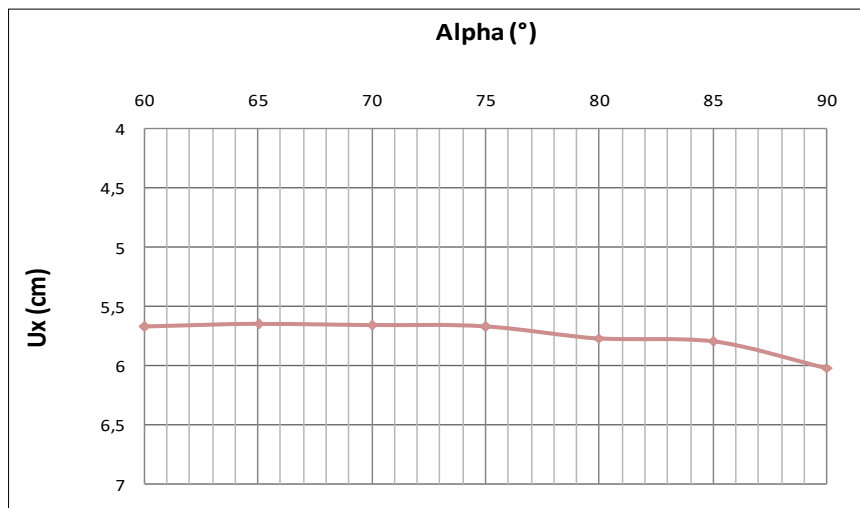


Figure V.8 : Influence de l'angle d'inclinaison du remblai (Alpha α).

V.6 Conclusion

Les résultats de cette étude numérique ont permis de déduire d'une part, des conclusions intéressantes concernant le comportement des structures en Terre Armée, et d'autre part, de mettre en évidence l'importance de quelques paramètres géométriques dans la modélisation numérique. L'importance de cette étude réside dans le fait que la méthode et les paramètres pris en compte dans la modélisation sont aussi réalistes que possible, en effet, les étapes de la construction sont reproduites comme dans des conditions réelles.

La première modélisation effectuée en utilisant des paramètres de référence a permis de valider notre modèle numérique, en comparant les résultats en termes de déplacement latéral et du coefficient de sécurité avec les travaux déjà réalisés sur ce type d'ouvrage.

L'étude paramétrique a permis de définir les paramètres qui influencent le comportement du mur ainsi que l'importance de chaque paramètre. A partir de cette étude, on peut conclure que l'espacement vertical entre les couches de renforcement ainsi que la longueur de ces couches présentent l'influence la plus significative sur la stabilité et la déformation du mur étudié.



Chapitre VI

Optimisation des Paramètres de Renforcement

Chapitre VI

**Optimisation des paramètres
de renforcement**

Chapitre VI : Optimisation des paramètres de renforcement

VI.1 Introduction	67
VI.2 Choix d'un plan d'expérience	67
VI.3 Interprétation des résultats par la méthode des surfaces de réponse	68
VI.3.1 Introduction	68
VI.3.2 Analyse de la variance ANOVA	69
VI.3.3 Analyse de régression	70
VI.3.4 Résultats	71
VI.3.4.1 Analyse de régression	73
VI.3.4.2 Analyse des surfaces de réponses et graphiques	75
VI.3.4.3 Optimisation par la méthode de fonction de désirabilité	76
VI.4 Conclusion	81

VI.1 Introduction

Ce chapitre de validation de la méthode d'optimisation proposée a pour objectif d'optimiser les paramètres géométriques influençant sur le comportement du mur renforcé, à savoir l'espacement vertical entre les couches de renforcement (S_v), la longueur du renforcement (L), la largeur du remblai (B) et l'angle d'inclinaison ($\text{Alpha } \alpha$), à partir des résultats du déplacement horizontal du mur renforcé en tenant en compte le coût de réalisation de chaque configuration étudiée.

Nous considérons maintenant la mise en œuvre de la méthode de surface de réponse pour l'optimisation, la méthode consiste alors en premier de choisir, dans un recueil de tables, le plan d'expériences le plus adapté au modèle employé. Ce modèle comporte 4 facteurs et chaque facteur possède trois niveaux, dont l'intervalle de variation de chaque paramètre est présenté dans le tableau ci-dessous :

Paramètres	Niveaux de variation		
	Valeur minimale	Valeur moyenne	Valeur maximale
Sv (m)	0,50	0,75	1,00
L (m)	2,00	4,00	6,00
B (m)	2,00	3,00	4,00
Alpha α (°)	60	75	90

Tableau VI.1: Intervalle de variation des paramètres à optimiser.

VI.2 Choix d'un plan d'expériences

Il faut maintenant choisir un plan d'expériences, c'est-à-dire une liste ordonnée d'essais permettant d'identifier les paramètres cherchés du problème. Dans ce cas d'étude, un plan fractionnel type Box-Behnken L25 sera adopté (voir tableau ci-dessous):

N° d'essai	Facteurs			
	Sv (m)	L (m)	B (m)	Alpha α (°)
1	0,5	4	2	75
2	0,75	2	2	75
3	0,5	6	3	75
4	0,5	2	3	75
5	1	4	3	90

6	0,75	6	3	90
7	0,75	6	4	75
8	1	4	2	75
9	1	2	3	75
10	0,5	4	4	75
11	0,75	4	2	60
12	0,75	6	2	75
13	0,75	4	4	90
14	1	4	3	60
15	0,75	2	3	90
16	0,75	2	3	60
17	0,75	4	2	90
18	0,5	4	3	90
19	0,5	4	3	60
20	0,75	4	3	75
21	1	6	3	75
22	0,75	2	4	75
23	1	4	4	75
24	0,75	4	4	60
25	0,75	6	3	60

Tableau VI.2: Plan d'expérience type Box-Behnken L25 (4 facteurs, 3 niveaux).

Dans ce tableau, chaque ligne correspond à une modélisation à réaliser numériquement par le logiciel Plaxis, donc il faut réaliser 25 modèles numériques conformément aux données du tableau ci-dessus.

VI.3 Interprétation des résultats par la méthode des surface de réponse

VI.3.1 Introduction

La méthodologie de surface de réponse est une procédure visant à déterminer une relation entre les paramètres indépendants d'entrée et les données de sortie (réponse). Cette procédure comprend 5 étapes :

- 1) Définir les variables d'entrée indépendantes et les réponses de sortie désirées,
- 2) Adopter un plan de conception expérimentale,
- 3) Effectuer une analyse statistique de la variance (ANOVA) des variables d'entrées indépendantes afin de trouver les paramètres les plus significatifs qui affectent la réponse,

- 4) Effectuer une analyse de régression avec le modèle quadratique de (MSR), et enfin
- 5) Optimiser, les paramètres d'entrée par rapport aux réponses adoptées.

Le concept de surface de réponse modélise une variable dépendante Y , dite variable de réponse, en fonction d'un certain nombre de variables indépendantes (facteurs), X_1, X_2, \dots, X_k , permettant d'analyser l'influence et l'interaction de ces dernières sur la réponse.

VI.3.2 Analyse de la variance ANOVA

L'analyse de variance (ANOVA) est utile pour comprendre l'influence des paramètres d'entrée donnés à partir d'une série de résultats expérimentaux, par la méthode des plans d'expériences pour le modèle proposé, et elle permet également de fournir une interprétation des données de sortie. Elle consiste essentiellement à partitionner la variation totale d'une expérience en éléments attribuables aux facteurs contrôlés et les erreurs générées. La signification statistique des modèles quadratiques de prédiction est évaluée par P-value et F-value d'ANOVA [13].

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.

$$SC_f = \frac{N}{N_{nf}} \cdot \sum_{i=1}^{N_{nf}} (\bar{y}_i - \bar{y})^2 \quad (6.1)$$

Où $\bar{y} = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N y_i$: 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 .

$$MC_i = \frac{SS_i}{df_i} \quad (6.2)$$

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.

$$F_i = \frac{MC_i}{MC_e} \quad (6.3)$$

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.

$$Cont.\% = \frac{SC_f}{SC_T} \times 100 \quad (6.4)$$

VI.3.3 Analyse de régression

La régression est une méthode statistique visant à analyser la relation (association) entre une variable dépendante particulière et une ou plusieurs variables indépendantes. Cette relation entre les paramètres d'entrées, à savoir l'espacement vertical entre les couches de renforcement (S_v), la longueur du renforcement (L), la largeur du remblai (B) et l'angle d'inclinaison ($\text{Alpha } \alpha$) et les paramètres de sorties (déplacement horizontal U_x , le cout) est donnée par :

$$Y = f(S_v, L, B, \text{Alpha}(\alpha)) \quad (6.5)$$

Où : Y est la fonction de réponse.

L'approximation des Y est proposé au moyen d'un modèle mathématique non-linéaire (quadratique), qui est approprié pour l'étude des effets d'interaction des paramètres du modèle. Le modèle mathématique du second ordre basé sur la méthode de régression générale est donné par [13]:

$$Y = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i X_i + \sum_{ij} b_{ij} X_i X_j + \sum_{i=1}^k b_{ii} X_i^2 \quad (6.6)$$

Où : b_0 est le terme constant de l'équation de régression, les coefficients $b_1, b_2 \dots b_k$ et b_{11}, b_{22}, b_{kk} sont les termes linéaires et quadratiques respectivement, tandis que b_{12}, b_{13}, b_{k-1} sont les termes d'interaction.

X_i représente les paramètres d'entrée ($S_v, L, B, \text{Alpha } \alpha$);

Le coefficient de détermination R^2 est défini par le rapport de la dispersion des résultats, donné par la relation :

$$R^2 = \frac{\sum (y_i - \bar{y})^2}{\sum (\bar{y}_i - \bar{y})^2} \quad (6.7)$$

Avec :

y_i : Valeur de la réponse calculée à la $i^{\text{ème}}$ expérience;

\bar{y}_i : Valeur mesurée à la $i^{\text{ème}}$ expérience;

\bar{y} : Valeur moyenne des réponses mesurées.

Afin de tester la validité du modèle, l'analyse de variance (ANOVA) est utilisée pour examiner la signification et l'adéquation du modèle. Le modèle est adéquat dans un intervalle de confiance de 95%. Lorsque les valeurs de P value sont inférieures à 0,05, les modèles obtenus sont considérés statistiquement significatives. En d'autres termes, plus le R^2 approche à la valeur 1, le modèle est compatible avec les valeurs réels (expérimentales).

VI.3.4 Résultats

Le Tableau VI.3 présente les résultats de la modélisation en termes de déplacement horizontal du mur renforcé, ainsi du cout de réalisation calculé à partir des formules. Ces résultats sont obtenus suite aux différentes combinaisons conformément à la matrice de planification des expériences pour un plan fractionnel type Box-Behnken L25.

Cout du remblai sélectionné (DZA) = le volume du remblai sélectionné x le prix unitaire (6.8)

Cout du géosynthétique (DZA) = la longueur du géosynthétique x le prix unitaire (6.9)

Cout total (DZA) = Cout du remblai sélectionné + Cout du géosynthétique (6.10)

Dont le prix unitaire du remblai sélectionné est estimé à : **750,00 DZA /m³** et le prix unitaire du géosynthétique est estimé à : **1500,00 DZA/m²**.

N° d'essai	Facteurs				Réponses	
	Sv (m)	L (m)	B (m)	Alpha α (°)	Ux (cm)	Cout (DZA)
1	0,5	4	2	75	3,75	84600,00
2	0,75	2	2	75	10,57	36600,00
3	0,5	6	3	75	3,67	125100,00
4	0,5	2	3	75	6,17	53100,00
5	1	4	3	90	8,67	49500,00
6	0,75	6	3	90	5,92	85500,00
7	0,75	6	4	75	5,43	93600,00
8	1	4	2	75	8,31	48600,00
9	1	2	3	75	15,67	35100,00
10	0,5	4	4	75	3,77	93600,00
11	0,75	4	2	60	6,02	64762,50
12	0,75	6	2	75	6,20	84600,00

13	0,75	4	4	90	6,02	66000,00
14	1	4	3	60	7,97	57262,50
15	0,75	2	3	90	13,58	37500,00
16	0,75	2	3	60	10,74	45262,50
17	0,75	4	2	90	6,11	57000,00
18	0,5	4	3	90	4,14	85500,00
19	0,5	4	3	60	2,24	93262,50
20	0,75	4	3	75	6,01	65100,00
21	1	6	3	75	7,68	71100,00
22	0,75	2	4	75	10,03	45600,00
23	1	4	4	75	8,15	57600,00
24	0,75	4	4	60	5,65	73762,50
25	0,75	6	3	60	5,51	93262,50

Tableau VI.3: Plan d'expériences L25 en valeurs des paramètres.

Source	Somme des carrés SS	df	Moyenne des carrés MC	F-value	P-value	% de Contribution	Remarque
Model	230.99	9	25.67	53.10	< 0.0001	97.397	Significant
A-Sv	90.70	1	90.70	187.65	< 0.0001	38.244	Significant
B-L	86.94	1	86.94	179.88	< 0.0001	36.658	Significant
C-B	0.3468	1	0.3468	0.7175	0.4103	0.146	Non Significant
D-Alpha α	2.85	1	2.85	5.90	0.0282	1.202	Significant
AB	8.32	1	8.32	17.22	0.0009	3.508	Significant
AD	0.3600	1	0.3600	0.7448	0.4017	0.152	Non Significant
BD	1.32	1	1.32	2.74	0.1189	0.557	Non Significant
B ²	38.71	1	38.71	80.09	< 0.0001	16.322	Significant
D ²	0.3655	1	0.3655	0.7563	0.3982	0.154	Non Significant
Résiduel	7.25	15	0.4833			3.057	
Total	238.24	24				100	

Tableau VI.4: Analyse de la variance ANOVA pour le déplacement horizontal Ux.

L'analyse de la variance ANOVA présentée dans le Tableau VI.4, montre que l'espacement vertical entre les couches de renforcement (S_v) et la longueur de renforcement (L) sont les facteurs les plus importants dans le renforcement, leurs contributions sont 38,244 %, pour l'espacement vertical (S_v) et 36.322 % pour la longueur du renforcement (L) avec un pourcentage de contribution de 36.658 % , puis le terme quadratique L^2 dont sa contribution est de 16.322 %. L'angle d'inclinaison Alpha (α) et le terme d'interaction ($S_v * L$) ont des faibles contributions variant de 1.202 % jusqu'au 3.508 %, tandis que la largeur du remblai (B), les termes d'interactions ($S_v * \text{Alpha } \alpha$, $L * \text{Alpha } \alpha$) et le terme quadratique ($\text{alpha } \alpha$)² n'ont pas d'effets significatifs sur le résultat.

VI.3.4.1 Analyse de régression

La relation fonctionnelle entre la variable de sortie (déplacement horizontal) et les variables d'entrées (S_v , L , B , Alpha α) a été exprimé avec un coefficient de détermination ($R^2=96,96$ %) correspondant à la précision de régression. Le modèle quadratique obtenu à partir de l'analyse statistique peut être utilisé pour prédire la sortie Y en fonction des facteurs étudiés. Le modèle obtenu est présenté par l'équation (6.11).

$$U_x = -1.242 + 28.537xS_v - 2.937xL - 0.170xB + 0.001x\text{Alpha}(\alpha) - 2.885xS_v * L - 0.08xS_v * \text{Alpha}(\alpha) - 0.019xL * \text{Alpha}(\alpha) + 0.649xL^2 + 0.001x\text{Alpha}(\alpha)^2 \quad (6.11)$$

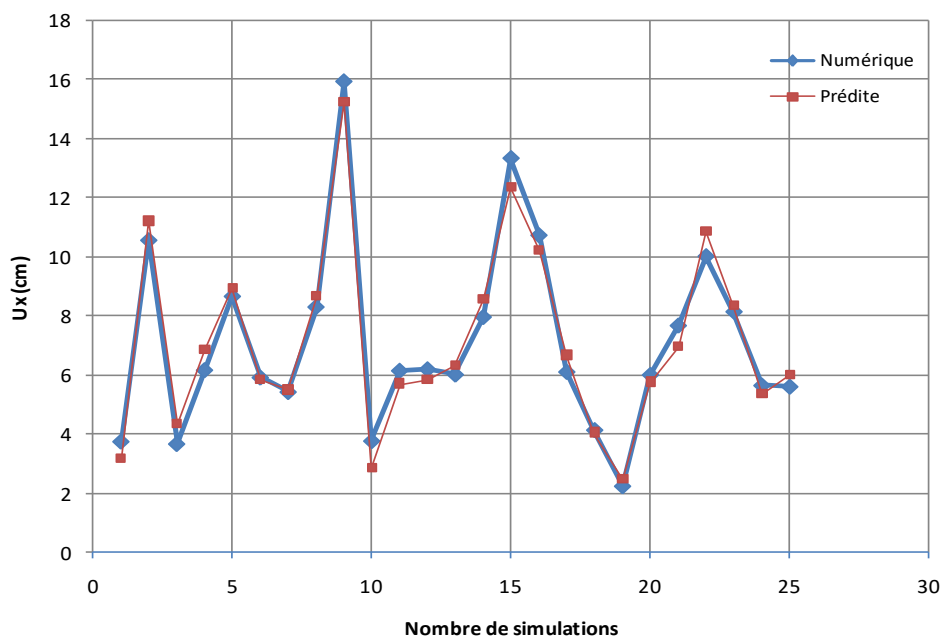


Figure VI.1 : Valeurs numériques et valeurs prédites du déplacement horizontal U_x .

La comparaison entre les valeurs numériques et prédites est présentée dans la figure VI.1. L'analyse des résultats montre que les valeurs prédites et les valeurs numériques sont très proches, cela montre la précision du modèle trouvé.

D'après la figure VI.2, les résidus du modèle du déplacement horizontal peuvent être jugés comme normalement distribués. Le test de normalité est donc satisfaisant.

U_x

Color points by value of

U_x:

2.24  15.95

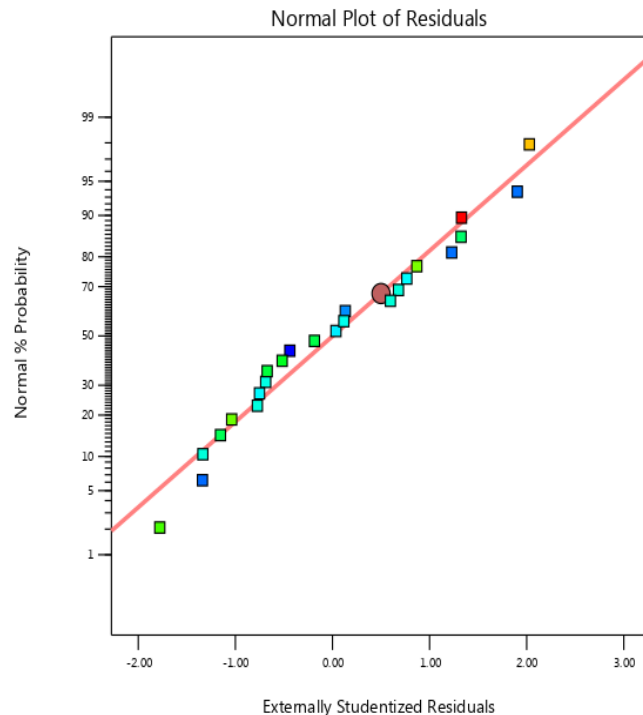


Figure VI.2 : Probabilités normales des résidus du déplacement horizontal U_x.

Le graphe de surface de réponse de la figure VI.3 représente les résultats de la surface de réponse (3D) du déplacement horizontal U_x, en fonction des paramètres cherchés (S_v, L, B, Alpha α). L'analyse des surfaces de réponses confirme les résultats de l'ANOVA, on remarque que l'espacement vertical entre les couches de renforcement (S_v) est important, donc ce facteur possède l'effet le plus significatif sur le déplacement horizontal U_x. Les graphes de contour permettent de visualiser la surface de réponse, et aussi de limiter les plages de variation des valeurs de réponse et les conditions d'exploitation souhaitables.

VI.3.4.2 Analyse des surfaces de réponses et graphiques

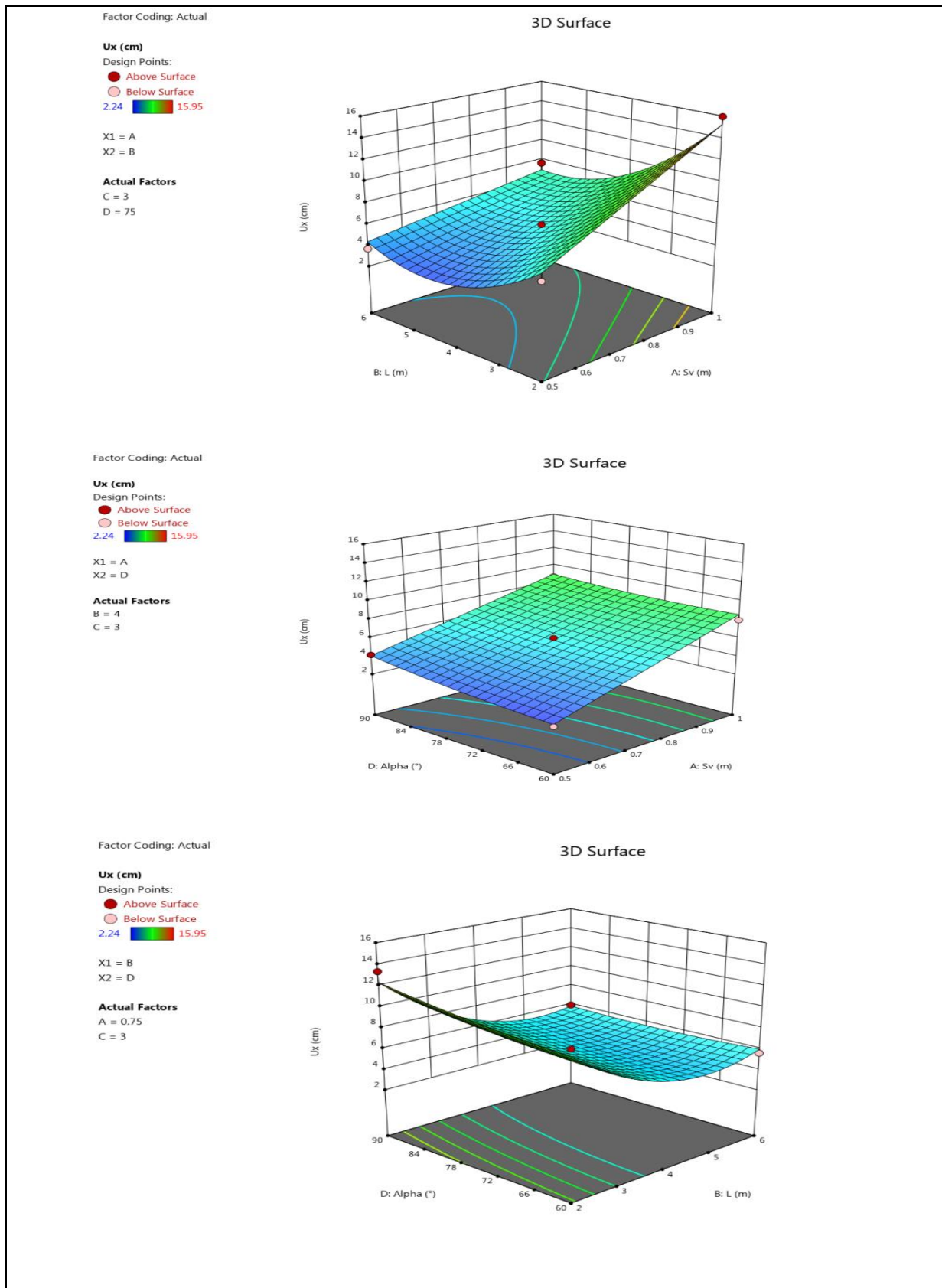


Figure VI.3: Surfaces de réponses pour le déplacement horizontal U_x .

VI.3.4.3 Optimisation par la méthode de fonction de désirabilité

L'optimisation d'une réponse ou la recherche d'un compromis entre plusieurs réponses consiste à définir, au sein du domaine expérimental, un réglage des facteurs permettant de satisfaire au mieux les exigences énoncées en termes de réponse. Dans le but d'optimiser les paramètres géométriques, à savoir l'espacement vertical entre les couches de renforcement (S_v), la longueur du renforcement (L), la largeur du remblai (B) et l'angle d'inclinaison (α), chaque paramètre dans la conception (MSR) a été étudié à trois niveaux différents. L'optimisation des réponses par la méthodologie de surface de réponse (MSR) aide à identifier la combinaison des paramètres des variables d'entrées qui optimisent une réponse unique ou un ensemble de réponses. Une optimisation commune doit satisfaire aux conditions requises pour toutes les réponses de l'ensemble. L'optimisation de réponses multiples est une méthode permettant un compromis entre diverses réponses grâce à la fonction de désirabilité qui permet de rassembler des critères ayant des unités différentes par le biais de fonction de désirabilité élémentaire et variant entre 0 et 1. Une désirabilité de 0, c'est-à-dire une désirabilité élémentaire prenant la valeur nulle, représente une configuration inacceptable pour la réponse sélectionnée, alors qu'une désirabilité prenant la valeur 1 représente le cas idéal [13].

a. Désirabilité d'une réponse à maximiser

Un exemple de fonction de désirabilité individuelle (d_i) dans le cas d'une réponse à maximiser, est représenté sur la figure VI.4. La valeur de 0 (une désirabilité individuelle prenant la valeur nulle) est attribuée lorsque les facteurs conduisent à une réponse inacceptable (non désirée) et celle de 1 lorsque la réponse représente la performance maximale désirée pour les facteurs considérés.

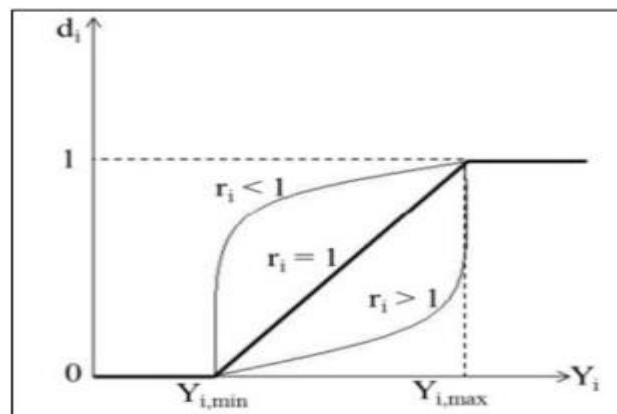


Figure VI.4 : Désirabilité individuelle d_i d'une réponse Y_i .

L'équation permettant de calculer les valeurs de désirabilités individuelles peut être ainsi présentée:

$$\begin{aligned}
 d_i &= 0, \text{ Si } Y_i \leq Y_{i,\min} \\
 d_i &= \left[\frac{Y_i - Y_{i,\min}}{Y_{i,\max} - Y_{i,\min}} \right] \text{ Si } Y_{i,\min} \leq Y_i \leq Y_{i,\max} \quad (6.12) \\
 d_i &= 1, \text{ Si } Y_i \geq Y_{i,\max}
 \end{aligned}$$

Avec:

$Y_{i,\min}$: valeur en dessous de laquelle la réponse Y_i ne convient pas ($d_i = 0$),

$Y_{i,\max}$: valeur cible au-dessus de laquelle la réponse Y_i est très satisfaisante ($d_i = 1$).

b. Désirabilité d'une réponse à minimiser

Lorsque l'on cherche à minimiser une réponse, la fonction de désirabilité peut être tracée comme le montre la figure VI.5.

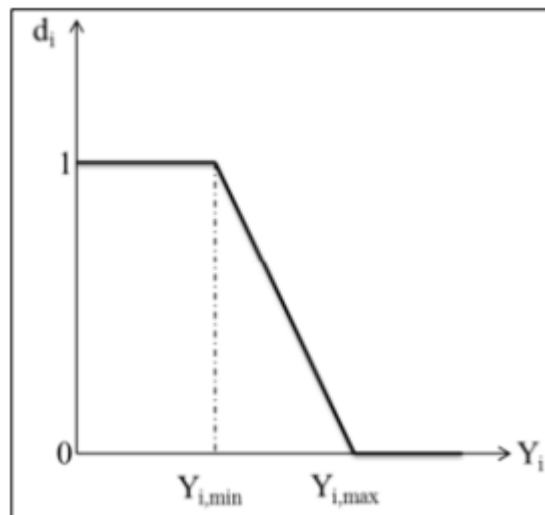


Figure VI.5 : Fonction de désirabilité d'une fonction à minimiser.

Dans ce cas, la fonction de désirabilité est nulle quand la réponse dépasse la valeur limite ($Y_{i,\max}$), elle vaut 1 lorsque la réponse est inférieure ou égale à la valeur cible ($Y_{i,\min}$). L'équation permettant de calculer les valeurs de désirabilités individuelles peut être ainsi présentée:

$$\begin{aligned}
 d_i &= 1, \text{ Si } Y_i \leq Y_{i,\min} \\
 d_i &= \left[\frac{Y_i - Y_{i,\max}}{Y_{i,\min} - Y_{i,\max}} \right] \text{ Si } Y_{i,\min} \leq Y_i \leq Y_{i,\max} \quad (6.13) \\
 d_i &= 0, \text{ Si } Y_i \geq Y_{i,\max}
 \end{aligned}$$

Avec : $Y_{i,min}$, la valeur cible en dessous de laquelle la réponse Y_i est très satisfaisante ($d_i = 1$),

$Y_{i,max}$: la valeur au-dessus de laquelle la réponse Y_i ne convient pas ($d_i = 0$).

c. Désirabilité d'une réponse à cibler

Dans le cas où l'on souhaite avoir une valeur cible d'une réponse, la fonction de désirabilité individuelle est représentée sur la figure VI.6.

Si on cherche par exemple une valeur cible Y_c de la réponse Y_i , l'équation permettant de calculer les valeurs de désirabilités individuelles peut être présentée de la façon suivante:

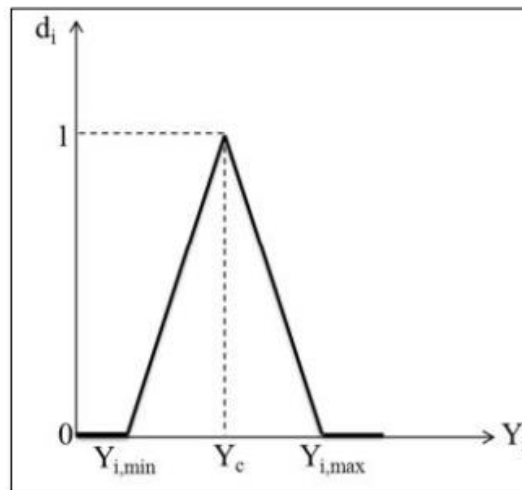


Figure VI.6: Fonction de désirabilité d'une fonction à cibler.

$$\begin{aligned}
 d_i &= 0, \text{ Si } Y_i \leq Y_{i,min} , Y_i \geq Y_{i,max} \\
 d_i &= \left[\frac{Y_i - Y_{i,min}}{Y_{i,c} - Y_{i,min}} \right] \text{ Si } Y_{i,min} \leq Y_i \leq Y_{i,c} \\
 d_i &= \left[\frac{Y_i - Y_{i,max}}{Y_{i,c} - Y_{i,max}} \right] \text{ Si } Y_{i,c} \leq Y_i \leq Y_{i,max} \\
 d_i &= 1, \text{ Si } Y_i = Y_c
 \end{aligned} \tag{6.14}$$

La fonction de désirabilité vaut 1 lorsque la réponse est égale à la valeur cible cherchée. Elle vaut zéro si la réponse est en dessous ou au-dessus des valeurs $Y_{i,min}$ et $Y_{i,max}$ précisées.

d. Optimisation des paramètres Sv, L, B et Alpha(α):

Les contraintes utilisées pendant le processus d'optimisation sont illustrés dans le tableau VI.5. Les valeurs des paramètres optimales sont obtenues en utilisant le logiciel «**Design Expert V10**». Le problème revient à cibler la fonction de désirabilité (D) qui est la fonction objective sous les contraintes des variables. Le tableau VI.6 illustre les valeurs optimales des paramètres du problème étudié.

Paramètre	Objectif	Limite inférieure	Limite Supérieure	Poids inférieure	Poids Supérieure	Importance
Sv (m)	Dans l'intervalle	0.5	1.0	1	1	3
L (m)	Dans l'intervalle	2.0	6.0	1	1	3
B (m)	Dans l'intervalle	2.0	4.0	1	1	3
Alpha (α) (°)	Dans l'intervalle	60	90	1	1	3
Ux (cm)	minimiser	2.24	15.95	1	1	3
Cout (DZA)	minimiser	35100	125100	1	1	3

Tableau VI.5 : Contraintes appliquées sur les paramètres à optimiser.

N°	Sv (m)	L (m)	B (m)	Alpha (α) (°)	Ux (cm)	Cout (DZA)	Désirabilité	
1	0.500	2.437	2.010	60.002	4.760	62047.511	0.765	Selected
2	0.500	2.484	2.000	60.000	4.651	62806.751	0.765	
3	0.500	2.494	2.000	60.005	4.628	62974.448	0.765	
4	0.500	2.511	2.000	60.002	4.590	63259.858	0.765	
5	0.500	2.448	2.000	60.001	4.734	62197.761	0.765	
6	0.500	2.462	2.000	60.142	4.710	62388.573	0.765	
7	0.500	2.427	2.000	60.003	4.785	61833.310	0.765	
8	0.500	2.479	2.010	60.002	4.661	62765.957	0.765	
9	0.500	2.472	2.000	60.314	4.695	62512.901	0.765	
10	0.501	2.489	2.000	60.191	4.662	62763.960	0.765	

Tableau VI.6 : Valeurs des paramètres à optimiser.

Le graphique de la solution optimale désirée est donné dans la figure VI.7. Cette figure montre la valeur maximale de désirabilité et les valeurs des paramètres géométriques (S_v , L , B , α) pour obtenir des réponses minimales (déplacement horizontal minimal avec un cout de réalisation aussi minimal).

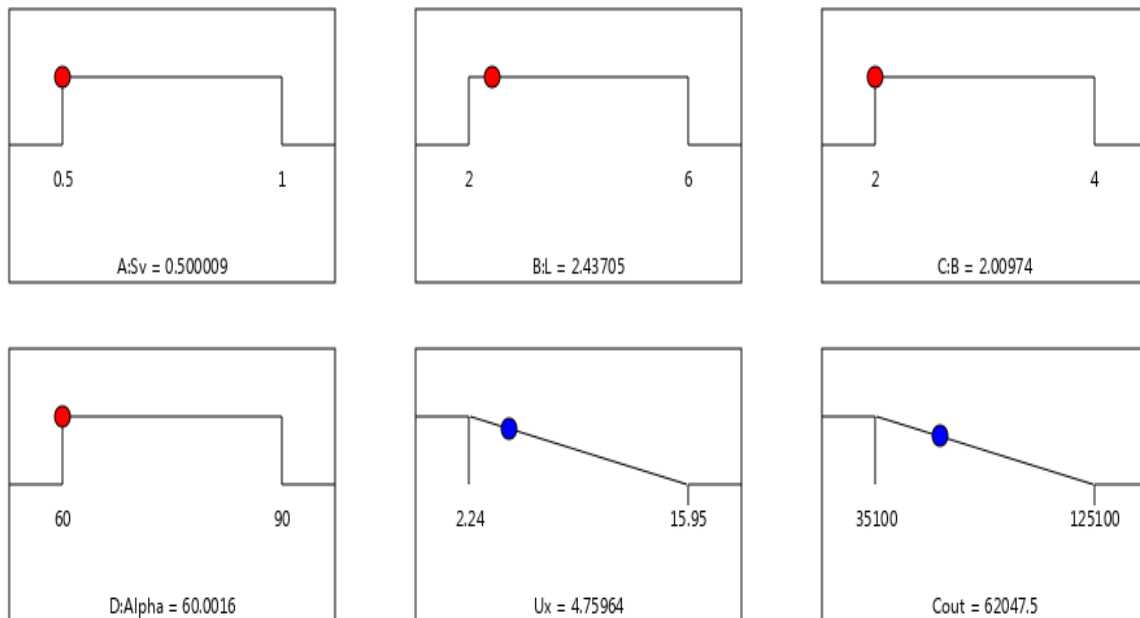


Figure VI.7: Représentation graphique de la procédure d'optimisation.

Dans le tableau ci-dessous, une comparaison est présentée entre les valeurs des paramètres déduites numériquement et celles optimisées par la méthode proposée.

Paramètres	S_v (m)	L (m)	B (m)	α (°)	Réponses			
					Numériques		Prédites	
					U_x (cm)	Cout (DZA)	U_x (cm)	Cout (DZA)
Valeurs optimisées	0,50	2,44	0,50	60	5,41	61875,00	4,76	62047,50

Tableau VI.7: Comparaison entre les valeurs des paramètres numériques et prédites.

VI.4 Conclusion

La méthode d'optimisation proposée ici a permis d'optimiser les paramètres géométriques qui influencent le comportement du mur en terre armé tel qu'il est présenté dans cette étude. Cet exemple montre que l'application de la méthode (ici, à l'aide de la méthode de surface de réponse) ne représente aucune difficulté particulière, et montre que dans les cas les plus simples, les valeurs souhaitées peuvent être trouvées, sans faire appel à des méthodes d'optimisation complexes.



**Conclusion générale
et perspectives**

Conclusion générale et perspectives

L'objectif de ce travail de fin d'études s'était la modélisation numérique et l'optimisation des paramètres influençant la stabilité des murs en terre armée, par l'utilisation de la méthode des surfaces de réponses via les plans d'expériences numériques. Cette technique est utilisée, à travers le calcul numérique par le logiciel en éléments finis Plaxis, de la stabilité d'un mur en terre armée renforcé par géosynthétique.

Un plan d'expériences numériques est adopté comme support de modélisation du mur basé sur les paramètres de renforcement, à savoir l'espacement vertical entre renforcements (S_v), sa longueur (L), l'angle d'inclinaison du remblai technique ($\text{Alpha } \alpha$) et sa largeur (B). L'utilisation des plans d'expériences conduit à établir un plan, comportant le maximum de précision dans les résultats avec un minimum d'expériences.

Dans notre cas d'étude, un plan fractionnel type Box-Behnken est adopté et chaque modélisation est réalisée numériquement par le logiciel Plaxis, (25 modèles numériques).

Le modèle mathématique postulé à travers ce plan est un modèle du second degré avec interactions. A travers cette étude, on a tenté de modéliser un mur de soutènement en sol renforcé par géogrid et de déduire l'importance de chaque paramètre choisi et montre qui sont les plus influents sur la déformation du parement.

Après, une analyse de la variance ANOVA est effectuée pour comprendre l'influence des paramètres d'entrée donnés à partir d'une série de résultats numériques, et de fournir une interprétation des données de sortie. En suite on a passé à l'optimisation des paramètres S_v , L , B et $\text{Alpha } \alpha$;

Les valeurs des paramètres optimales sont obtenues en utilisant le logiciel «Design Expert V10». Le problème revient à cibler la fonction de désirabilité (D) qui est la fonction objective sous les contraintes des variables.

Les développements se sont concentrés sur la mise au point et l'application de stratégies d'optimisation, par l'utilisation exclusive de la méthode des plans d'expériences numériques et plus particulièrement la méthode de surface de réponse.

Le travail réalisé montre que l'application de la méthode de surface de réponse ne représente aucune difficulté particulière, et montre que dans les cas les plus simples, les valeurs souhaitées peuvent être trouvées, sans faire appel à des méthodes d'optimisation complexes.

Les résultats fournis par la méthode proposée, nous a permis de mettre en évidence une bonne concordance entre les valeurs estimées par optimisation et ceux fournis par la modélisation numérique, d'où l'avantage de la technique d'optimisation proposée dans ce travail.

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 travail.

- L'utilisation d'autres types de plans d'expériences (plans factoriels complets),
- Utiliser des modèles numériques en 3 dimensions pour mieux représenter la réalité du problème traité;
- Utiliser d'autres méthodes pour le développement de modèles mathématiques tels que la méthode des réseaux de neurones;
- La comparaison de cette méthode avec d'autres méthodes d'optimisation telle que la méthode d'optimisation par algorithme génétique.



**Références
bibliographiques**

Références Bibliographiques

- [1] GOUPY Jacques, (2001), «*Introduction aux Plans d'expériences*». Dunod. Paris. 303 p.
- [2] LCPC (Laboratoire central des ponts et chaussées) , (2003) , Technique et méthodes des laboratoires des ponts et chaussées , Guide Technique , Bialec-Nancy (France).
- [3] Monsieur J. Brinkgreve, (2003), Manuel de référence Plaxis V8 (Delft University of Technology & PLAXIS BV, Pays-Bas).
- [4] GOUPY, Jacques, (2006), «*Les plans d'expériences*». Revues Modulad, n°34.
- [5] Abdelkader Abdelouhab, (2010), Comportement des murs en terre armée modélisation physique, Analytique et numérique des renforcements extensibles, Thèse de doctorat, Laboratoire de Génie Civil et de l'Ingénierie Environnementale (LGCIE) de l'INSA de Lyon (France).
- [6] Fabrice ROJAT ,(2011/2012) , Ouvrages de soutènement , Cours mds 2 , Ecole nationale des travaux publics de l'état (ENTPE) , Laboratoire de lyon (France) .
- [7] DJABRI mohamed, (2013), Etude de la sensibilité de la réponse sismique à la disposition du renforcement des remblais d'accès de pont, Thèse de magister, Université mohamed khider-Biskra (algérie), Département de génie civil et hydrolyque.
- [8] M. KHEMOUM Imad et M. GUIDOUM Nedjm Eddine, (2017), Université OEB. "Etude paramétrique du comportement d'un mur de soutènement renforcé par la géogridle "
- [9] M. ATTALLAOUI Samir, (2017), Université de Biskra, Analyse numérique du comportement des culées porteuses en sol renforcé "
- [10] Ouassim RAHMOUNI, (2017), Contribution à l'étude numérique des ouvrages de soutènement renforcés par géogridle, Thèse de doctorat, Université mohamed khider-Biskra (algérie), Département de génie civil et hydrolyque.
- [11] ABDERRAHIM Zakariya et HACHEMI Abdelaziz , (2019) , Optimisation des paramètres géotechniques des sols par la méthode des surfaces de réponse , Mémoire de master , Université de Guelma (algérie) , Département de génie civil et hydrolyque .
- [12] SEMACHE Samir, (2019), Université d'Oum El Bouaghi, Analyse numérique des déformations des culées de pont en sol renforcé "

[13] DJEBABLAH Wafa , (2020/2021), Etude du comportement des murs de soutènement en sol stabilisé mécaniquement , Thèse de doctorat , Université de Guelma (Algérie) , Département de Génie Civil et Hydrolyque.

[14] Jacques Goupy. Lee Creighton, Introduction aux plans d'expériences.