

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique



Mémoire de Master

Présenté à l'Université de Guelma

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département de : Génie Civil & Hydraulique

Spécialité : Génie civil

Option : Géotechnique

Présenté par : - BOUHBEL Fouad

- SEGHIR Lotfi

Thème :

Calage du modèle de Mohr Coulomb à partir de l'essai à la boîte de cisaillement, en utilisant la méthode d'optimisation de Taguchi

Sous la direction de : Dr. LAFIFI Brahim

Septembre 2020

Remerciement

Tout d'abord, Nous tenons à remercier DIEU le tout puissant qui m'a donné la santé, le courage et la foi pour arriver à ce jour.

*Nous remercions de tous nos cœurs notre encadreur monsieur le professeur **LAFIFI Brahim** qui nous a aidé à élaborer notre mémoire de fin cycle.*

Nous adressons nos vifs remerciements à monsieur chef de département de Génie civil et hydraulique ainsi que nos autres professeurs et enseignants.

Nous remercions également les membres de jury pour le temps consacré à la lecture de ce travail et pour leurs remarques éventuelles.

Aussi à Mr Le Directeur de laboratoire National de l'habitat et de la construction et ses assistants qui nous ont aidés à contribuer à élargir nos connaissances sur site.

Nous Remercions tous ceux qui ont participé de près ou de loin, et aidé à réaliser ce modeste travail.

Dédicace

« Nous tenons à remercier notre dieu ALLAH le tout puissant de nous avoir donné la force et le courage ».

C'est avec un grand plaisir que je dédie ce travail fruit De mes études :

A Ma chère mère

Pour toute l'affection qu'elle m'a donnée, la source de la tendresse,

A mon cher père

Qui a veillé sur moi, qui se suis inquiété pour que je sois tranquille et s'est Privé pour me satisfaire.

• *A mes frères :*

Hocine,

Hamza, Mohamed

Aymen ,Ayoub

A mes sœurs : Sara, Roumaïssa

A ma femme : Saida

A Mon fils : Bara-eddine

A tous mes amis(es) : Yacine , Hocine , Bilal ,

A mon collègue et binôme : Lotfi et sa famille.

A Toute la promo de master 2 géotechnique 2019-2020

Résumé

Ce travail de fin d'études a pour objet le calage de la loi de comportement de Mohr Coulomb, par l'utilisation de la méthode d'optimisation de Taguchi via les plans d'expériences numériques. La méthode proposée est utilisée, à travers la modélisation numérique de l'essai à la boîte de cisaillement pour un sol argileux, en utilisant le logiciel en éléments finis Plaxis.

Pour atteindre cet objectif, un plan d'expérience numérique de Taguchi L9 a été adopté comme support de modélisation. Une analyse statistique des résultats basée sur l'analyse de variance (ANOVA) et de régression a été effectuée et cela dans le but de proposer un modèle mathématique représentatif en fonction des paramètres du modèle en question pour d'éventuelles optimisations. Enfin, la méthode d'optimisation de Taguchi, basée sur l'analyse de l'effet du rapport signal/bruit est adoptée pour le calage des paramètres du modèle.

De cette étude, il est ressort une bonne concordance entre les valeurs trouvées par la méthode proposée et ceux déduites expérimentalement.

Mots-clés : Optimisation - Plans d'expériences - Méthode de Taguchi – Essai à la boîte de cisaillement - Modélisation - Plaxis.

Abstract

This end-of-study work aims to calibrate Mohr Coulomb's constitutive law, by using the Taguchi optimization method via digital designs of experiments. The proposed method is used, through the numerical modeling of the shear box test for clay soil, using the Plaxis finite element software. To achieve this goal, a Taguchi L9 digital experiment design was adopted as a modeling medium. A statistical analysis of the results based on analysis of variance (ANOVA) and regression was performed with the aim of proposing a representative mathematical model according to the parameters of the model in question for possible optimizations. Finally, the Taguchi optimization method, based on the analysis of the effect of the signal / noise ratio is adopted for the calibration of the model parameters. From this study, it emerges a good agreement between the values found by the proposed method and those deduced experimentally.

Keywords: Optimization - Design of experiments - Taguchi method - Shear box test - Modeling - Plaxis.

ملخص

يهدف عمل نهاية الدراسات هذا إلى معايرة قانون Mohr باستخدام الطريقة المقترحة من خلال النمذجة العددية لاختبار مربع القص للتربة الطينية باستخدام برنامج العناصر المحدودة Plaxis.

لتحقيق هذا الهدف ، تم اعتماد تصميم التجربة الرقمية Taguchi L9 كوسيط للنمذجة. تم إجراء تحليل إحصائي للنتائج بناءً على تحليل التباين (ANOVA) والانحدار بهدف اقتراح نموذج رياضي تمثيلي وفقاً لمعايير النموذج المعني للتحسينات الممكنة. أخيراً ، تم اعتماد طريقة Taguchi الأمثل ، بناءً على تحليل تأثير نسبة الإشارة / الضوضاء لمعايرة معاملات النموذج.

من هذه الدراسة يظهر اتفاق جيد بين القيم التي تم العثور عليها من خلال الطريقة المقترحة وتلك المستخلصة تجريبياً.

الكلمات المفتاحية: التحسين - تصميم التجارب - طريقة تاغوشي - اختبار مربع القص - النمذجة -

البلاكسيس

Tables des matières.

Tables des matières

SOMMAIRE

Remerciements	
Dédicace	
Résumé	
Abstract	
ملخص	
Liste des figures	
Liste des tableaux	

CHAPITRE I : • Notions de base sur les plans d'expériences

Introduction.....	1
I.1 Introduction.....	5
I.2 Notions de base	5
I.2.a Notion de « plan ».....	6
I.2.b Notion d'« expériences »	6
I.3 Plans d'expériences	6
I.3.1 Définition :.....	6
I.3.2 But d'un plan d'expérience	6
I.3.3 Définir les sorties (Réponses)	7
I.3.4 Définir les entrées (facteurs)	7
I.7 Notion d'espace expérimental	7
I.8 Notion de surface de réponse	10
I.9 Différents types des plans d'expériences	11
I.10 Des plans d'expériences classiques aux plans d'expériences numériques.	12

CHAPITRE II: Présentation de la méthode de Taguchi

Présentation de la méthode de Taguchi	14
II.1. But de la méthode de Taguchi	15
II.2. Intérêts d'un plan d'expérience Taguchi	15
II.3. Méthode de Taguchi.....	15
II.4. Optimisation par la méthode de Taguchi.....	20

Tables des matières.

II.5. Analyse de variance ou ANOVA.....	21
CHAPITRE III: Principe de l'essai à la boite de cisaillement	
III.1 Principe de l'essai à la boite de cisaillement.....	24
III.1 Exécution de l'essai	24
III.1.1 Caractéristiques de l'appareillage de la boite de cisaillement.....	24
III.3 Mode opératoire.....	27
III.3.1 Sols cohérents reconstitués après compactage.....	27
III.3.2 Saturation et consolidation	28
III.4 Interpretation des resultants.....	30
III.4.1 Essai de cisaillement rectiligne direct	30
CHAPITRE IV: Présentation du logiciel PLAXIS et modélisation de l'essai à la boite de cisaillement	
IV.1 Présentation du logiciel PLAXIS	34
IV.2 Lois de comportement utilisées dans PLAXIS	34
IV.3 Modélisation de l'essai à la boite de cisaillement	38
IV.3.4 Caractéristiques des matériaux	40
.....	42
CHAPITRE V Optimisation des paramètres du modèle de Mohr Coulomb à partir des résultats de l'essai à la boite de cisaillement	
V.1 Introduction	45
V.2 Modélisation	45
V.4. Choix d'un plan d'expériences	47
V.5. Résultats	48
V.6. Optimisation par la méthode de Taguchi	51
V.7 Conclusion.....	54
Conclusion générale	56
Références Bibliographiques	58

Liste des figures

CHAPITRE I :

Figure 1.1: Le niveau bas du facteur est noté par -1 et le niveau au par +1	8
Figure 1.2 : Chaque facteur est représenté par axe gradué et orienté la axes	8
Figure 1.3 : Dans l'espace expérimental, les niveaux des facteurs définissent des points expérimentaux	9
Figure 1.4 : Les points expérimentaux sont disposés dans le domaine d'étude défini par l'expérimentateur.....	9
Figure 1.5: la surface de réponses.	11

CHAPITRE III

Figure 3.1: Détermination de T100.	29
Figure3.2 : Fenêtre des paramètres de Mohr-Coulomb	29

CHAPITRE IV

Figure 4.1: Fenêtre des paramètres de Mohr-Coulomb.	37
Figure 4.2: Définition du module à 50% de la rupture..	39
Figure 4.1: Vue en coupe de la boite de cisaillement.....	39
Figure 4.2: Modèle géométrique de la boite de cisaillement	41
Figure 4.3: Maillage du modèle.....	41
Figure 4.4: Génération des contraintes initiales	42
Figure 4.5: phase 2 : déformation de maillage.....	42
Figure 4.6: Déplacement Maximal.....	43
Figure 4.7: Courbr contrainte deviatorique – déformation axiale.....	43

CHAPITRE V

Figure 5.1: Modèle éléments finis 2D en déformation plane et maillage associé.....	46
Figure 5.2 : Concept de la fonction erreur	48

Liste des figures.

Figure 5.4: Courbe déviateur de contraintes principales q - déformations axiales principales ε_1	50
Figure 5.5: Graphe des effets principaux sur l'erreur.,.....	51
Figure 5.6: Valeurs expérimentales et valeurs prédites de la fonction erreur,.....	54

Liste des tableaux.

Liste des tableaux

CHAPITRE I :

Tableau 1.1: Plan factoriel complet 22 pour deux facteurs (A, B) à deux niveaux.	12
---	----

CHAPITRE III :

Tableau 3.1: Choix de la pression à appliquer	30
---	----

CHAPITRE VI :

Tableau 4.1.a : Propriétés du sol (sable).....	41
Tableau 4:1.b : propriétés desdemi-boites de cisaillement.	46

CHAPITRE V :

Tableau 5.1 : Paramètres géotechnique du sol.	47
Tableau 5.2: Facteurs et niveaux des paramètres du modèle.....	47
Tableau 5.3: Plan d'expérience L9 (3 facteurs, 3 niveaux).	48
Tableau 5.4: Plan d'expérience L9 (3 facteurs, 3 niveaux).	49
Tableau 5.5: Analyse de la variance ANOVA.....	49
Tableau 5.6: Le ratio S/N de la fonction erreur..	53
Tableau 5.7: Moyenne des ratios S/N (T) pour chaque niveau des facteurs.	54
Tableau 5.8: Comparaison entre les valeurs des paramètres	54

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

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

L'une des difficultés importantes d'une étude géotechnique réside dans l'estimation des paramètres géotechniques. En pratique, un ingénieur utilise les résultats d'essais dont il dispose. Il cherche les valeurs des paramètres de loi les plus probables. Ces valeurs sont ensuite utilisées pour la simulation de l'ouvrage.

L'essai à la boîte de cisaillement est l'un des essais au laboratoire le plus répandu dans les travaux du génie civil : il s'agit d'un essai qui permet d'obtenir les caractéristiques de cisaillement des sols, présentant une grande utilité dans le dimensionnement et les vérifications des ouvrages.

L'objectif de ce travail est de présenter et utiliser une nouvelle méthode pour l'optimisation des paramètres géotechniques des sols, il s'agit de l'utilisation des plans d'expériences numériques, en se basant sur la modélisation de l'essai à la boîte de cisaillement par le logiciel de calcul par éléments finis Plaxis. L'approche consiste à utiliser les plans d'expériences proposés par Taguchi comme technique d'optimisation pour le calibrage de la loi de Mohr Coulomb, utilisé souvent dans la modélisation des sols et des ouvrages géotechniques.

Pour réaliser cet objectif, nous avons opté pour la méthode des plans d'expériences numériques. Le but des plans d'expériences est d'obtenir un maximum d'information en ne réalisant qu'un minimum d'essais, ce qui répond parfaitement au défi qu'impose le contexte économique actuel.

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

Le deuxième chapitre présente la méthode d'optimisation basée sur les plans d'expériences de Taguchi. Cette méthode est l'un des outils de la qualité, comme tout outil, elle n'a d'intérêt que si l'on sait s'en servir, ce qui suppose à la fois de connaître la méthode et de pouvoir cerner les cas où elle apporte un "plus" par rapport aux techniques traditionnelles. Elle sert à mettre en évidence et à quantifier l'influence des paramètres pris en compte.

Dans le troisième chapitre, est présenté le principe de l'essai à la boîte de cisaillement, le mode opératoire de cet essai, et l'interprétation des résultats obtenus par cet essai. Cet essai sert par la suite comme un support de la modélisation pour le calibrage de la loi de comportement choisit dans cette étude.

La présentation du logiciel de calcul par éléments finis Plaxis, ainsi que les lois de comportement de Mohr Coulomb et la modélisation numérique de l'essai à la boîte de cisaillement font l'objet du quatrième chapitre.

Dans le cinquième chapitre, on aborde le processus d'optimisation des paramètres de la loi de comportement, à travers la modélisation numérique de l'essai à la boîte de cisaillement d'un sol argileux par le logiciel Plaxis. La construction du plan d'expériences utilisé pour réaliser cette modélisation se base sur un plan type de Taguchi L9, dans nos modélisation le critère utilisé cherche à minimiser l'erreur entre la courbe expérimentale (contrainte déviatorique – déformation axiale) déduite de l'essai et celle déduite de la modélisation numérique. Le choix des paramètres du modèle sera confirmé par un test de validation afin de prouver l'efficacité de la méthode utilisée.

Enfin, nous terminons cette étude par une conclusion générale sur les objectifs réalisés dans ce travail, ainsi les perspectives visées pour le développement de ce modeste travail.

CHAPITRE I

Notion de base sur les plans d'expérience

I.1 INTRODUCTION

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

Les plans d'expériences peuvent être considérés comme des techniques d'optimisation des processus qui possèdent des entrées contrôlables et des sorties mesurables. Ces plans sont utilisés aussi bien dans les scénarios de production que de conception.

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, i) . 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 d'espace expérimental et celle de modélisation mathématique des grandeurs étudiées.

I.2 NOTIONS DE BASE

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

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

I.2.A NOTION DE « PLAN » Ce terme renvoie aux mots planification, organisation, exploitation :

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

I.2.B NOTION D'« EXPÉRIENCES »

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

I.3 PLANS D'EXPÉRIENCES

I.3.1 DÉFINITION :

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

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

I.3.2 BUT D'UN PLAN D'EXPÉRIENCE

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

- Connaître les facteurs qui ont le plus grand impact sur les résultats (sur la conformité d'un produit),
- Mettre en évidence les éventuelles interactions entre facteurs .

I.3.3 DÉFINIR LES SORTIES (RÉPONSES)

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

I.3.4 DÉFINIR LES ENTRÉES (FACTEURS)

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

I.7 NOTION D'ESPACE EXPÉRIMENTAL

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

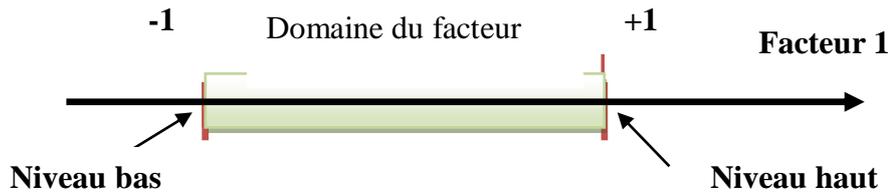


Figure (1.1) : Le niveau bas du facteur est noté par -1 et le niveau au par +1

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

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

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

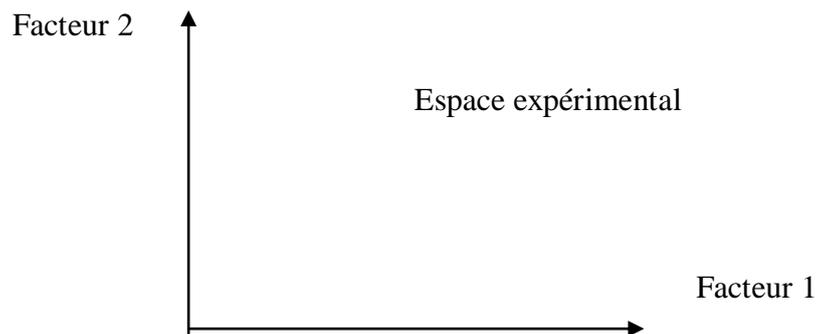


Figure (1.2) : Chaque facteur est représenté par axe gradué et orienté la axes

des facteurs sont orthogonaux entre eux. L'espace ainsi défini est l'espace expérimental.

Le niveau x_1 du facteur 1 et le niveau x_2 du facteur 2 peuvent être considérés comme les coordonnées d'un point de l'espace expérimental (Figure 3). Une expérience donnée

est alors représentée par un point dans ce système d'axes. Un plan d'expériences est représenté par un ensemble de points expérimentaux.

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

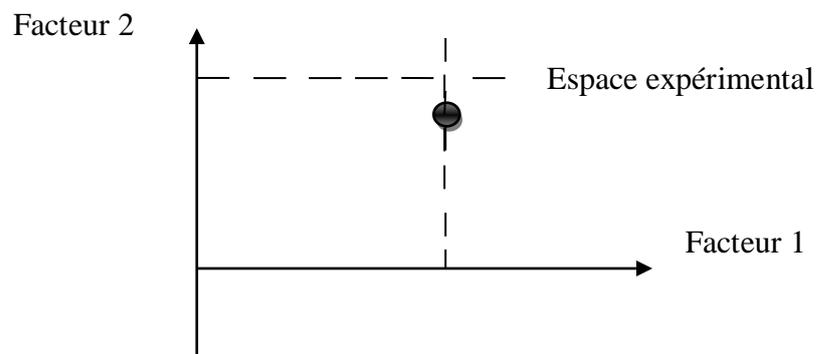


Figure 1.3:Dans l'espace expérimental, les niveaux des facteurs définissent des points expérimentaux

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

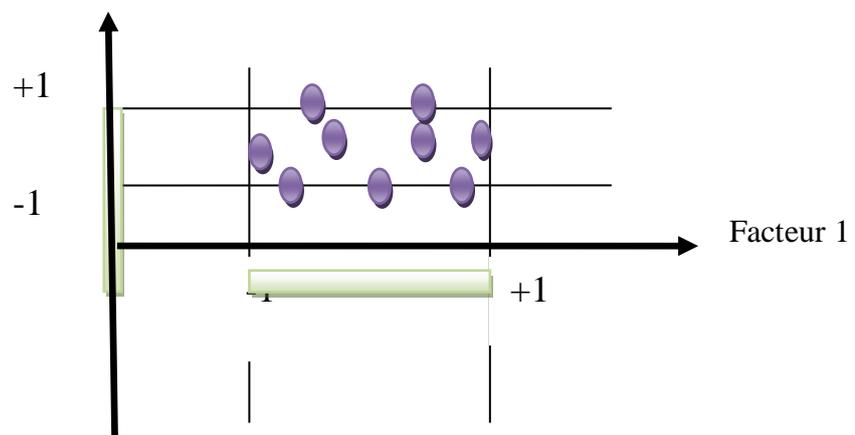


Figure 1.4:Les points expérimentaux sont disposés dans le domaine d'étude défini par l'expérimentateur.

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

I.8 NOTION DE SURFACE DE RÉPONSE

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

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

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

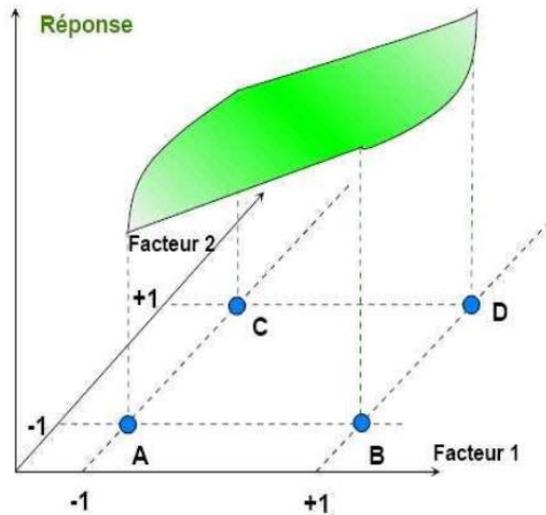


Figure 1.5: la surface de réponses.

I.9 DIFFÉRENTS TYPES DES PLANS D'EXPÉRIENCES

I.9.1 Plan factoriel complet

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

$$N = \prod_{i=1}^K Nn_i \quad (1.1)$$

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

Tableau 1.1: Graphique des effets principaux sur le ratio S/N de la fonction erreur.

N°essai	Facteurs		Réponse
	Facteur A	Facteur B	
1	-1(niveau bas)	-1	Y ₁
2	+1(niveau haut)	-1	Y ₂
3	-1	+1	Y ₃
4	+1	+1	Y ₄

I.9.2 Plans factoriels fractionnaires

Le principal inconvénient des plans factoriels complets est le nombre excessif d'essais à réaliser lorsque le nombre de facteurs devient important. La question est alors de savoir s'il est possible d'estimer les coefficients du modèle avec une précision acceptable sans pour autant réaliser tous les essais du plan factoriel. Les travaux de Box et Hunter (1978) [Box78] d'une part et Taguchi (1987) [Pil97] d'autre part ont débouché sur les plans fractionnaires présentés sous forme de tables standards en fonction des éléments que l'on souhaite prendre en compte dans l'expérimentation et qui concernent les facteurs, les valeurs (ou niveaux) de ces facteurs, et les interactions entre facteurs. L'hypothèse faite dans l'élaboration de plans fractionnaires est que certaines interactions sont insignifiantes et qu'elles peuvent donc être confondues avec des facteurs dont l'influence est significative. L'inconvénient majeur des plans fractionnaires est qu'ils occasionnent par conséquent des risques potentiels d'erreurs. Les avantages de ces plans résident dans le fait qu'ils sont beaucoup plus économiques, plus rapides et demandent moins d'essais.

I.10 DES PLANS D'EXPÉRIENCES CLASSIQUES AUX PLANS D'EXPÉRIENCES NUMÉRIQUES.

La différence fondamentale entre les plans d'expériences numériques et les plans classiques développés en laboratoire (expériences physiques) réside dans le fait qu'en laboratoire, on suppose la présence d'erreurs aléatoires dues aux mesures, aux

conditions expérimentales, etc. Ce qui n'est en principe pas le cas avec une expérience numérique (simulation déterministe).

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

CHAPITRE II

Présentation de la méthode de Taguchi

II.1. BUT DE LA MÉTHODE DE TAGUCHI

Le but de la méthode de Taguchi : était de simplifier au maximum ses techniques statistiques afin de permettre au plus grand nombre de les utiliser sans pour cela être un génie des mathématiques. Les critiques rejettent cette trop grande simplification en démontrant mathématiquement que certains résultats obtenus par les plans d'expériences orthogonaux mènent à des résultats déviants de ceux obtenus par des plans d'expériences 'classiques' (travaux de Sir Ronald Fisher). Il faut noter que ses critiques sont fondées, si l'on considère la méthode Taguchi comme fixe. Cependant, il faut voir les travaux de Taguchi comme une base de départ que l'expérimentateur doit adapter à son cadre de travail et au sujet étudié (il ne faut pas prendre sa démarche comme une solution clé-en-main).

II.2. INTÉRÊTS D'UN PLAN D'EXPÉRIENCE TAGUCHI

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

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

II.2.1 Définitions

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

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

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

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

II.3. MÉTHODE DE TAGUCHI

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

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

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

II.3.1 Démarche

Les étapes sont les suivantes :

1. Formaliser le problème, si possible au moyen d'un modèle graphique.
2. Sélectionner les paramètres, fixer leurs modalités (niveau de variations des paramètres) et sélectionner leurs interactions.
3. Construire le plan en fonction des tables de Taguchi.
4. Réaliser les essais.
5. analyser les résultats.

6. Conclure après choix du réglage des paramètres qui peuvent être maîtrisés et essai de confirmation.

➤ **ÉTAPE 1** : Formaliser Le Problème

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

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

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

Les différentes mesures peuvent être :

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

➤ **ÉTAPE 2** : Sélectionner Les Paramètres

Fixer leurs modalités et sélectionner leurs interactions.

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

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

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

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

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

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

➤ **ÉTAPE 3** : Construire Le Plan

Un plan d'expériences évite de combiner toutes les modalités de tous les paramètres. Les plans les plus courants sont répertoriés dans un ensemble de tables disponibles en standard. Le nombre de paramètres, de modalités par paramètres et le nombre d'interactions permettent de trouver le plan le mieux adapté au problème à résoudre. Les paramètres sont affectés aux colonnes en tenant compte des interactions et des paramètres difficiles à faire varier.

➤ **ÉTAPE 4** : Réaliser Les Essais

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

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

➤ **ÉTAPE 5** : Analyser Les Résultats

Il existe deux analyses complémentaires.

i. L'analyse graphique :

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

ii. L'analyse statistique :

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

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

➤ ÉTAPE 6 : Conclure

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

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

Accepter le niveau de qualité obtenu après réglage.

- Mettre en œuvre un nouveau plan pour améliorer le résultat.
- Changer de stratégie d'analyse ou de conception du procédé.

II.3.2 Qu'est-ce qu'un plan de Taguchi (ou plan de Taguchi orthogonal) ?

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

Les plans de Taguchi utilisent des répertoires orthogonaux, qui évaluent les effets des facteurs sur la moyenne et sur la variation de la réponse. Avec un répertoire orthogonal, le plan est équilibré de telle sorte que les niveaux de facteurs sont

également pondérés. Ainsi, chaque facteur peut être évalué indépendamment de tous les autres et l'effet d'un facteur n'influence pas l'estimation d'un autre facteur. Cela peut réduire la durée et le coût de l'expérience en cas d'utilisation de plans fractionnés.

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

II.4. OPTIMISATION PAR LA MÉTHODE DE TAGUCHI

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

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

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

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

$$S / N = -10 \log_{10} \left[\frac{1}{n} (\sum_{i=1}^n y_i^2) \right] \quad (2.1)$$

b) L'optimum est une valeur maximale : la valeur cible est égale à l'infini (plus grand c'est meilleur), on vise la maximisation de la caractéristique de performance.

Maximiser Y revient à minimiser 1/Y et, Taguchi recommande d'utiliser la formule suivante :

$$S / N = -10 \log_{10} \left[\frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right) \right] \quad (1.2)$$

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

$$S / N = 10 \log_{10} \left[\left(\frac{\bar{y}_j^2}{s_j^2} \right) \right] \quad (1.3)$$

Avec :

$$S^2 = \sum \frac{(y_{ij} - \bar{y}_j)^2}{N_j - 1} \text{ Et } \bar{y}_j = \sum \frac{y_{ij}}{N_j} \quad (1.4)$$

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

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

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

II.5. ANALYSE DE VARIANCE OU ANOVA

II.5.1 Introduction à l'analyse de variance (ANOVA)

Au cœur du problème de la vérification d'hypothèses statistiques se trouve le fait qu'il est toujours possible d'attribuer à des variations aléatoires une partie des différences observées entre les moyennes des échantillons. Dans une expérience, toutes les sources incontrôlables de variabilité qui affectent la mesure constituent ce qu'il est convenu d'appeler l'erreur expérimentale l'une des sources les plus importantes de variabilité incontrôlable provient des différences individuelles. Une autre source d'erreur provient

de l'erreur de mesure, une mauvaise lecture de l'instrument, une erreur de transcription, un arrondissement, etc. D'autre part, une situation expérimentale n'est jamais parfaitement identique d'un moment à l'autre, puisque le sujet perçoit les deux événements comme étant successifs (mémoire). Il est impossible de créer des situations expérimentales exactement identiques. De plus, ces sources d'erreurs ne sont pas systématiques, elles sont aléatoires et indépendantes des effets du traitement.

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

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

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

CHAPITRE III

L'ESSAI A LA BOITE DE CISAILLEMENT

III.1 PRINCIPE DE L'ESSAI À LA BOITE DE CISAILLEMENT

L'essai s'effectue sur une éprouvette de sol placée dans une boîte de cisaillement constituée de deux demi-boîtes indépendantes. Le plan de séparation des deux demi-boîtes constitue un plan de glissement correspondant au plan de cisaillement de l'éprouvette.

Il consiste à:

- Appliquer sur la surface supérieure de l'éprouvette un effort vertical (N) maintenu constant pendant toute la durée de l'essai;
- Produire sur l'éprouvette sous l'effort (N) un cisaillement dans l'éprouvette selon le plan horizontal de glissement des deux demi-boîtes l'une par rapport à l'autre en leur imposant un déplacement relatif dl à vitesse constante;
- Mesurer l'effort horizontal de cisaillement (T) correspondant.

III.1 EXÉCUTION DE L'ESSAI

III.1.1 CARACTÉRISTIQUES DE L'APPAREILLAGE DE LA BOITE DE CISAILLEMENT

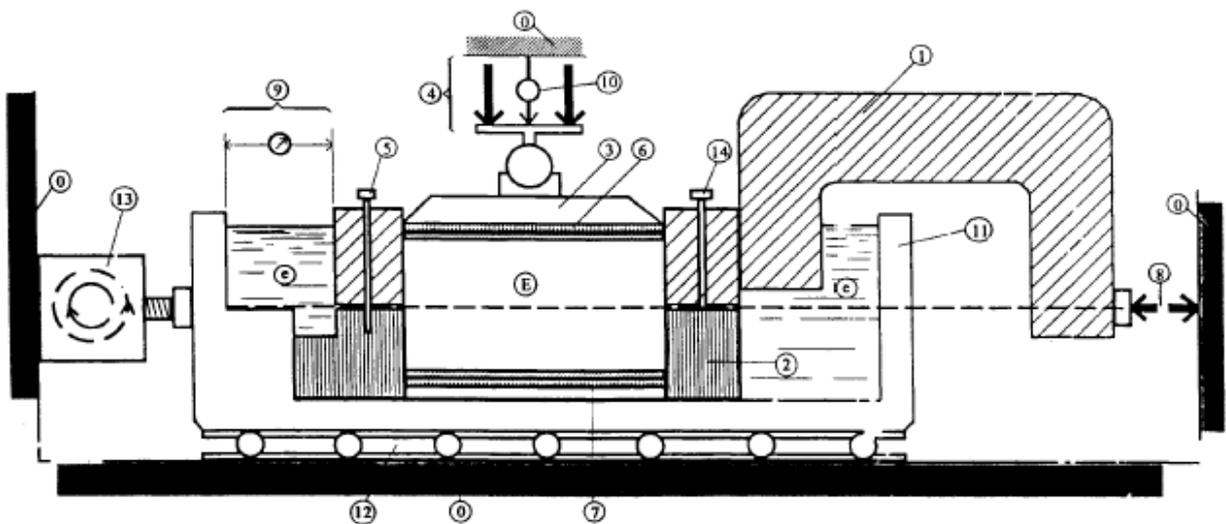


Figure 3.1: Schéma de principe et d'éléments constitutifs de la boîte de Casagrande.

L'appareillage spécifique à l'essai comprend:

- Le bâti
- La boîte de cisaillement
- Le dispositif d'application de l'effort normal sur l'éprouvette
- Le dispositif produisant le déplacement relatif horizontal entre les demi-boîtes
- Le système de mesure des efforts, des déplacements et du temps.

a. Le bâti

Le bâti est indéformable sous l'effet des efforts appliqués. Il supporte la boîte de cisaillement et son châssis et les maintient avec une tolérance de $\pm 1^\circ$.

b. La boîte de cisaillement

Une boîte de cisaillement comporte les éléments suivants:

- Deux demi-boîtes, inférieure et supérieure, cylindriques intérieurement, de même section droite carrée ou circulaire ($L = 60 \text{ mm} \pm 0.1 \text{ mm}$ ou $100 \text{ mm} \pm 0.1 \text{ mm}$) et de hauteur compatible à celle de l'éprouvette définie ultérieurement; la demi-boîte supérieure est équipée de vis permettant un léger soulèvement afin d'éviter le frottement;
- Un blocage ou une solidarisation des deux demi-boîtes de telle façon qu'elles aient le même axe intérieur de symétrie;
- Un châssis étanche support de la demi-boîte inférieure;
- Une plaque drainante à la base de la demi-boîte inférieure;
- Un piston rigide muni à sa base d'une plaque drainante, l'ensemble glissant librement dans la demi-boîte supérieure. Ce piston possède en son centre, à sa partie supérieure, un logement pour rotule transmettant l'effort vertical.

Les plaques drainantes ou non et les pierres poreuses sont planes et reliés à des orifices pour la circulation des fluides. Les matériaux utilisés sont inertes chimiquement vis-à-vis du sol et des fluides qu'il contient. La surface de contact entre les deux demi-boîtes est plane et lisse.

Le dispositif d'application de l'effort normal permet d'appliquer une force suivant une direction verticale, avec une tolérance de $\pm 2^\circ$, et de la maintenir constante. Le matériel est conçu pour transmettre à l'éprouvette une contrainte verticale moyenne d'au moins 0.5 MPa.

Le déplacement possible des deux demi-boîtes, l'une par rapport à l'autre, est au moins 5 mm à une vitesse compatible à la celle maximale 25 $\mu\text{m}/\text{min}$. Cette vitesse est maintenue constante pendant l'essai avec une incertitude qui est la plus grande des deux valeurs suivantes :

- 10% de la valeur lue;
- 0.5 $\mu\text{m}/\text{min}$.

c. Système de mesure

L'intensité de la force verticale constante (N) est connue avec une incertitude de 1/100 de sa valeur.

La mesure de l'effort horizontal (T) s'effectue au moyen d'un capteur avec une incertitude de 1/100 de la valeur maximale lue au cours de l'essai ou à l'aide d'un anneau dynamométrique.

Le déplacement vertical Δh , dans l'axe du piston placé à la partie supérieure de l'éprouvette, est mesuré par rapport à un repère fixe avec une incertitude de 0.05 mm.

Le déplacement horizontal d_l des deux demi-boîtes l'une par rapport à l'autre est mesuré au moyen d'un capteur avec une incertitude de 0.05 mm.

d. Matériels complémentaires

Il comprend:

- Une balance de portée maximale et minimale compatible avec les masses à peser et telle que les pesées sont effectuées avec une incertitude de 1/1000 de la valeur mesurée
- Une enceinte thermique ou étuve de dessiccation à température réglable à 50°C et à 105°C

- Les outils nécessaires au découpage et à la préparation des éprouvettes
- Un chronomètre donnant la seconde.

e. Local d'essai

Un thermomètre de contrôle est placé dans une salle d'essai. La température de la salle d'essai est maintenue à $\pm 5^{\circ}\text{C}$ pendant la durée de chaque essai. L'appareillage est en plus protégé du rayonnement solaire direct.

III.3 MODE OPÉRATOIRE

Les plaques sont saturées avec de l'eau désaérée et tout surplus d'eau en surface est éliminé juste avant leur mise en place. Elles sont recouvertes d'un papier-filtre lorsque des particules de sol risquent de migrer vers les pores des plaques drainantes.

La hauteur des éprouvettes, une fois confectionnées, est définie par:

$$6 d_{\max} \leq h \leq \frac{1}{2}$$

Dans ces conditions, le matériau essayé a des éléments dont la dimension maximale est:

- $d_{\max} \leq 5$ mm dans le cas de la boîte de 60 mm de côté
- $d_{\max} \leq 8$ mm dans le cas de la boîte de 100 mm de côté

III.3.1 Sols cohérents reconstitués après compactage

Les éprouvettes sont taillées de telle sorte que les dimensions de la section droite de l'éprouvette soient ajustées au mieux à celles de la boîte et que la hauteur (h) en mm soit telle que $20 \leq h \leq \frac{1}{2}$. Pour faciliter la prise d'échantillon, une trousse de dimensions égales à celle de l'éprouvette voulue est enfoncée dans le bloc de terre reconstitué et utilisée comme gabarit.

L'éprouvette est ensuite pesée et prise de mesure.

Une plaque drainante (dans le cas des essais CD) ou non drainante (pour les essais CU

et UU), une pierre poreuse et un papier filtre est placée au fond de la demi-boîte inférieure avant d'introduire l'éprouvette dans les deux demi-boîtes solidarisiées au préalable par deux vis.

L'éprouvette est calée dans la boîte de telle sorte que le plan de glissement la partage en deux parties sensiblement égales.

La manipulation des sols pulvérulents est plus aisée. Après solidarisation des deux demi-boîtes et la mise en place des plaques drainantes dans le fond de la demi-boîte inférieure, le matériau est compacté directement dans la boîte qui servira au cisaillement. La masse de sol à introduire dans la boîte est déterminée pour obtenir, après compactage, une éprouvette de masse volumique choisie et pour que le plan se trouve sensiblement à mi-hauteur de l'éprouvette.

III.3.2 Saturation et consolidation

La boîte de cisaillement contenant l'éprouvette est placée dans le châssis étanche fixé sur le bâti, tout en maintenant la solidarisation de deux demi-boîtes:

- Placer le piston muni de sa plaque drainante sur le sommet de l'éprouvette;
- Après fixation du système de mesure de l'effort de cisaillement horizontal (T), et avant l'application des efforts, noter la valeur d'origine du capteur de force (T) ou mettre à zéro le capteur;
- Régler la position du capteur de mesure du déplacement relatif horizontal entre les deux demi-boîtes et noter la valeur d'origine ou mettre à zéro le capteur;
- Positionner le capteur de mesure du déplacement vertical du piston par rapport à un repère fixe et noter la valeur d'origine ou mettre à zéro les compteurs.
- Appliquer l'effort (N) sur la partie supérieure du piston;
- Mesurer le déplacement vertical du piston δh en fonction du temps. Le châssis contenant la boîte de cisaillement est rempli d'eau minéralisée.
- Mesurer le déplacement vertical δh du piston en fonction du temps pendant 1 h au moins sous l'effet de la contrainte (N) et jusqu'à la stabilisation.

La stabilisation est considérée comme obtenue dès que les mesures permettent de déterminer une direction asymptotique indiquée par la figure suivante et trouvant ainsi le temps de consolidation.

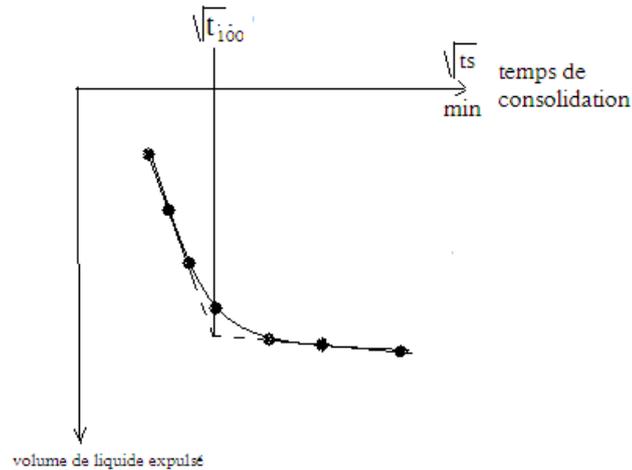


Figure 3.2: Détermination de T100.

III.3.3 Cisaillement

La vitesse maximale de cisaillement est donnée par la relation suivante:

$V_{max} = 125 / T_{100}$ avec $V_{max} < ou = .25$ et exprimée en micromètres par minute.

Où t_{100} est temps de consolidation exprimé en minutes.

Avant de commencer le cisaillement, il faut libérer le système de solidarisation de deux demi-boîtes, agir sur les vis de la boîte supérieure afin de supprimer le contact entre les demi-boîtes et mettre à zéro le compteur de déplacement vertical et celui du déplacement horizontal. Après seulement, le cisaillement est enclenché avec une vitesse constante:

$V < ou = V_{max}$

La valeur de la contrainte τ est déterminée à l'aide de capteur de force ou d'un anneau dynamométrique.

Le cisaillement est arrêté lorsque la variation de l'effort (T), pour un intervalle de mesure correspondant à un déplacement horizontal δl de 0.5 mm, est inférieure à 1/100 de l'effort maximal, ou lorsque le déplacement horizontal δl a atteint au moins 5 mm. Cet intervalle de mesure dépend du type d'essai effectué.

Les lectures de tous les appareils sont effectuées simultanément (en moins de 2 s) à chaque augmentation du déplacement horizontal relatif des deux demi-boîtes d'environ 0.2

mm jusqu'à 2 mm puis tous les 0.5 mm au-delà.

La teneur en eau sera déterminée pour chaque éprouvette à la fin du cisaillement.

III.4 INTERPRETATION DES RESULTANTS

III.4.1 Essai de cisaillement rectiligne direct

a. Réalisation

L'essai comporte le cisaillement d'au moins trois éprouvettes de mêmes dimensions, préparées dans les conditions, cisailées à la même vitesse mais soumises à des efforts verticaux différents.

L'effort (N) est déterminé pour chaque éprouvette en fonction des contraintes normales σ fixées par le responsable.

La contrainte verticale maximale appliquée à la série d'éprouvettes doit être supérieure à la contrainte effective verticale induite dans le sol après la réalisation de l'ouvrage.

Si aucune spécification n'est fournie, les valeurs données à partir du tableau suivant seront prises en compte tout en respectant la condition précédente.

Tableau 3.1: Choix de la pression à appliquer

Contraintes [kPa]	Valeurs [kPa]	Valeurs [kPa]
σ'_{v0}	< 100	>ou= 100
N/A	50	0.5 σ'_{v0}
	100	σ'_{v0}
	200	2 σ'_{v0}

b. Expression des resultants

On calcule pour chaque éprouvette :

- la contrainte normale effective σ' grâce à l'expression $\sigma' = N/A$;

L'effort normal est éventuellement corrigé du poids du piston si sa valeur est supérieure à N/100. Dans les conditions de l'essai, la contrainte normale σ est la

contrainte effective en fin de consolidation.

A: ici représente la surface de l'éprouvette égale à 27.88 cm²

N: est le poids mis sur le palier multiplié par le bras de levier : $N = P * 10$ (P en kg et N en Newton)

- La contrainte de cisaillement τ est donnée par la relation $\tau =$

Les corrections dues à la variation de la section cisailée et au frottement du sol sur le métal de la boîte ne sont pas prises en compte dans la présentation des résultats.

A' est la surface corrigée de la boîte. La surface de la boîte initiale est de 36 cm² (6*6). Puisque les deux demi-boîtes se déplacent, la surface diminue et cette relation est donnée par la formule:

$$A' = l * (l - (\text{déformation}/10))$$

Déformation = temps * vitesse

Où la vitesse est de 0.005 mm/min pour les essais CD et 0.025 mm/min pour les essais UU et CU

Le temps est la durée effectuée à la prise des données.

- La teneur en eau avant l'essai et après cisaillement;
- La masse volumique sèche ρ_d de l'éprouvette avant l'essai, après stabilisation de l'évolution de son épaisseur δh_c sous l'effort appliqué N. Le volume de l'éprouvette à une étape donnée est $V = A (h - \delta h)$.
- L'indice de vide et le degré de saturation avant essai.

Le calcul implique la connaissance de la masse volumique des particules solides ρ_s . Si celle-ci n'a pas été mesurée, sa valeur est estimée et indiquée sur le PV.

On trace les courbes suivantes en utilisant les mêmes échelles pour toutes les éprouvettes:

- La courbe de contrainte de cisaillement τ en fonction du déplacement δl ;
- La courbe du déplacement vertical δh du piston en fonction du déplacement horizontal δl .
-

Déterminer les paramètres de cisaillement:

- $\tau_{f,p}$: valeur correspondant au critère de rupture : pic de la courbe $\tau = f(\delta l)$ lorsque cette courbe présente un pic ;
- $\tau_{f,f}$: valeur correspondant au critère de rupture à l'état final de la courbe ; représenter sur un même graphique $(\sigma' - \tau_f)$, à une même échelle, les couples de points $(\sigma' - \tau_{f,p})$ et $(\sigma' - \tau_{f,f})$.

Déterminer par un ajustement linéaire l'équation de la droite correspondant à chaque critère de rupture (pic, final). Les paramètres de résistance au cisaillement rectiligne sont obtenus:

- A partir de la pente des droites pour les angles β_p et β_f
- A partir de l'ordonnée à l'origine des droites pour les cohésions C'_p et C'_f .

Dans le cas où l'ordonnée à l'origine des droites est négatif, le calcul doit être refait avec un ajustement linéaire sur les couples de points et leurs symétriques par rapport à l'origine des axes de coordonnées. Pour faciliter le calcul, il suffit de trouver l'équation de la droite de régression linéaire pour connaître les caractéristiques.

CHAPITRE IV

Présentation du logiciel PLAXIS et modélisation de l'essai à la boîte de cisaillement

IV.1 PRÉSENTATION DU LOGICIEL PLAXIS

C'est un logiciel aujourd'hui couramment utilisé en bureaux d'études. Conçu par des géotechniciens numériques de l'université de Delft aux Pays-Bas dans les années 1980, le code de calcul éléments finis PLAXIS est un outil pratique d'analyse d'ouvrages et d'essais géotechniques. Si ce code a initialement été développé pour analyser les digues et les sols mous, son champ d'application s'étend aujourd'hui à une large gamme de problèmes géotechniques. Il permet d'analyser des problèmes élastiques, élasto-plastiques, élasto-viscoplastiques en 2D ou 3D et en grands déplacements par la méthode lagrangienne actualisée. Très fiable sur le plan numérique, ce code fait appel à des éléments de haute précision, tels que les triangles à 15 nœuds, ainsi qu'à des pilotages de résolution récents comme la méthode de longueur d'arc.

IV.2 LOIS DE COMPORTEMENT UTILISÉES DANS PLAXIS

Les modèles de comportement de sols sont très nombreux : depuis le modèle élasto-plastique de Mohr-Coulomb jusqu'aux lois de comportement les plus sophistiquées, permettant de décrire presque tous les aspects du comportement élasto-plastique des sols, aussi bien sous des sollicitations monotone que cyclique. Ces modèles ont été développés dans le but d'être intégrés dans des calculs par éléments finis. Dans ce schéma, la modélisation par éléments finis permet de résoudre le problème aux limites en tenant compte, par une loi de comportement réaliste, du comportement réel du sol. Deux difficultés majeures ont empêché la réalisation complète de ce schéma : d'une part les lois de comportement qui décrivent bien le comportement des sols sont complexes, la seconde difficulté est l'intégration de ces lois de comportement dans des codes de calcul par éléments finis, bi ou tridimensionnels. Peu de codes sont opérationnels actuellement, avec des lois sophistiquées. Les modèles de comportement disponible dans PLAXIS sont :

- Modèle élastique linéaire ;
- Modèle de Mohr-Coulomb ;
- Modèle de sol avec écoulement (HardingSoil Model) ;
- Modèle "SSM", pour les sols mous ;

- Modèle "SSCM", pour les sols mous avec effet du temps.

Le logiciel PLAXIS, dispose (depuis la version 8.0) d'une option permettant à l'utilisateur d'implémenter ses propres lois de comportement des matériaux.

IV.2.1 Modèle élastique linéaire

Le modèle élastique 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 de Young non drainé est supérieur au module de 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 $\nu_u = 0.5$) et il est moins courant d'emploi. G est en fait le module mesuré dans les essais pressiométriques. On passe de G à E par la relation :

$$E = 2G(1 + \mu) \quad (4.1)$$

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

IV.2.2 Modèle de Mohr-Coulomb

Le modèle de Mohr-Coulomb demande la détermination de cinq paramètres (Les deux premiers sont E et ν paramètres d'élasticité). Les deux autres sont c et f , respectivement, la cohésion et l'angle de frottement. Ce sont des paramètres classiques de la géotechnique, certes souvent fournis par des essais de laboratoire, mais nécessaires à des calculs de déformation ou de stabilité.

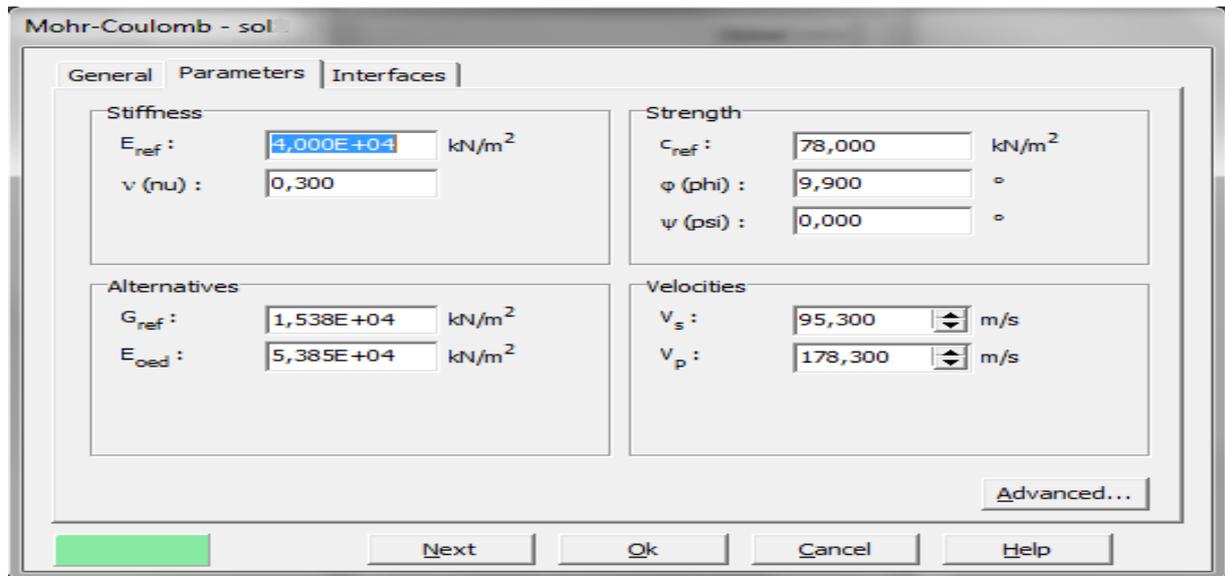


Figure 4.1: Fenêtre des paramètres de Mohr-Coulomb

IV.2.2.1 Module de Young

Le choix d'un module de déformation est un des problèmes les plus difficiles en géotechnique. Le module de déformation varie en fonction de la déformation et en fonction de la contrainte moyenne. Dans le modèle de Mohr-Coulomb, le module est constant. Il apparaît peu réaliste de considérer un module tangent à l'origine (ce qui correspondrait au G_{max} , mesuré dans des essais dynamiques ou en très faibles déformations). Ce module nécessite des essais spéciaux. Il est conseillé de prendre un module "moyen", par exemple celui correspondant à un niveau de 50% du déviateur de rupture (voir figure 4.2). L'utilisateur doit rester conscient de l'importance du choix du module qu'il prendra en compte. Il n'y a là rien d'étonnant et la même question se retrouve par exemple dans tout calcul classique de fondation, par exemple :

Dans les boîtes de dialogues, on peut aussi rentrer le gradient donnant la variation du module avec la profondeur.

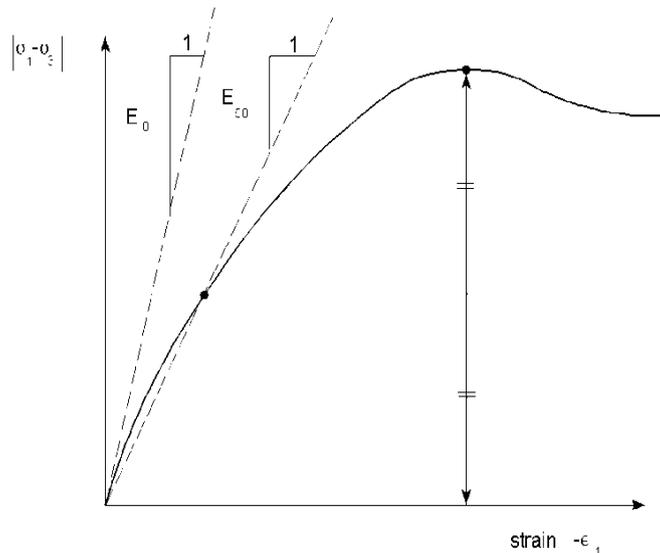


Figure 4.2: Définition du module à 50% de la rupture.

IV.2.2.2 Coefficient de Poisson

On conseille une valeur de 0,2 à 0,4 pour le coefficient de Poisson. Celle-ci est réaliste pour l'application du poids propre (procédure K_0 ou chargement gravitaire). Pour certains problèmes, notamment en décharge, on peut utiliser des valeurs plus faibles. Pour des sols incompressibles, le coefficient de Poisson s'approche de 0,5 sans que cette valeur soit utilisable.

IV.2.2.3 Angle de frottement

PLAXIS ne prend pas en compte une variation d'angle de frottement avec la contrainte moyenne. L'angle de frottement à introduire est soit l'angle de frottement "de pic" soit l'angle de frottement de palier. On attire l'attention sur le fait que des angles de frottement supérieurs à 35° peuvent considérablement allonger les temps de calcul. Il peut être avisé de commencer des calculs avec des valeurs raisonnables d'angle de frottement, quitte à les augmenter dans la suite. Cette valeur de 35° est compatible avec les angles de frottement f_{CV} (à volume constant, au palier).

IV.2.2.4 La cohésion

Il peut être utile d'attribuer, même à des matériaux purement frottant, une très faible cohésion (0,2 à 1 kPa) pour des questions numériques.

Pour les analyses en non drainé avec $f_u = 0$, Plaxis offre l'option de faire varier la cohésion non drainée avec la profondeur : ceci correspond à la croissance linéaire de la cohésion en fonction de la profondeur observée dans des profils au scissomètre ou en

résistance de pointe de pénétromètre. Cette option est réalisée avec le paramètre c depth. Une valeur nulle donne une cohésion constante. Les unités doivent être homogènes avec ce qui a été choisi dans le problème (typiquement en kPa/m). Cette option permet aussi de faire varier le module de déformation E avec la profondeur.

IV.2.2.5L'angle de dilatance

Le dernier paramètre est l'angle de "dilatance" noté ψ c'est le paramètre le moins courant. Il peut cependant être facilement évalué par la règle (grossière) suivante :

$$\begin{aligned} \psi &= \phi - 30^\circ \text{ pour } \phi > 30^\circ \\ \text{ou } \psi &= 0^\circ \end{aligned} \quad (4.2)$$

Le cas $\psi < 0$ correspond à des sables très lâches (état souvent dit métastable, ou liquéfaction statique). La valeur $\psi = 0$ correspond à un matériau élastique parfaitement plastique, où il n'y a donc pas de dilatance lorsque le matériau atteint la plasticité. C'est souvent le cas pour les argiles ou pour les sables de densité faibles ou moyenne sous contraintes assez fortes.

IV.3 MODÉLISATION DE L'ESSAI À LA BOITE DE CISAILLEMENT

IV.3.1 Introduction

Le but de cette partie est de proposer un modèle **numérique** pour l'essai de cisaillement directe pour cela ,on va réaliser l'essai avec application d'une contrainte normale constante sur la demi boite supérieur qui peu se déplacer uniquement dans le sens horizontale, et une contrainte tangentielle variable sur la demi boite supérieur jusqu'à plastification du modèle. Le modèle de référence a été établi et calculé avec le logiciel PLAXIS 8.2.

IV.3.2Définition des données

Pour que logiciel PLAXIS puisse faire les calculs correctement et complètement, on doit lui saisir toutes le données du projet suivantes :

IV.3.3 Hypothèses et géométrie

a. les hypothèses générales données

- Les déformations sont considérées planes.
- L'influence des interfaces est négligeable (la masse volumique des interfaces est différente de celle du sol).

b. la géométrie du modèle

Le projet n'est pas symétrique (figure 5.1), il sera modélisé par un modèle géométrique plan (2D) de 1m de largeur sur 1m de profondeur. Ce modèle est présenté sur la figure 5.1.

Condition aux limites : pour la **demi-boîte** supérieure on permet uniquement les déplacements horizontaux (vertical fixités), pour la demi-boîte inférieure on bloque tout (total fixités).

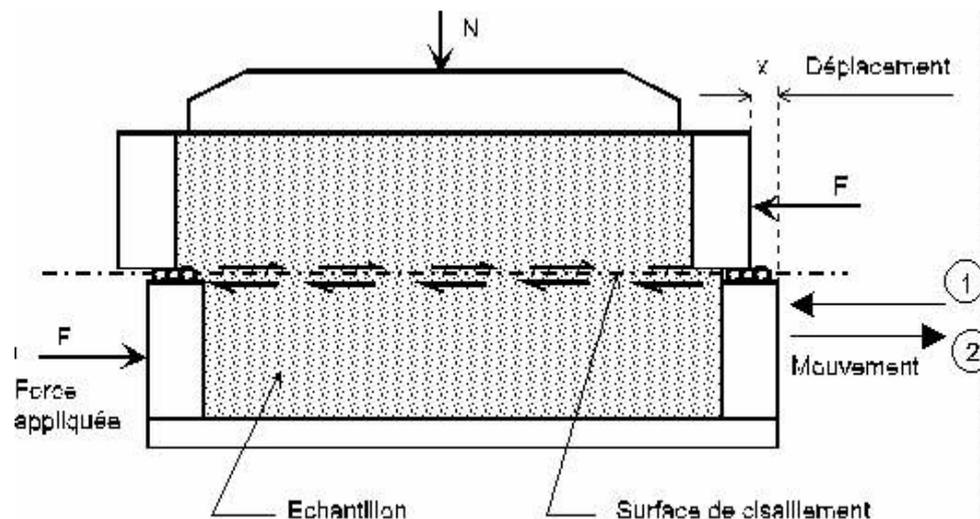


Figure 4.1: Vue en coupe de la boîte de cisaillement.

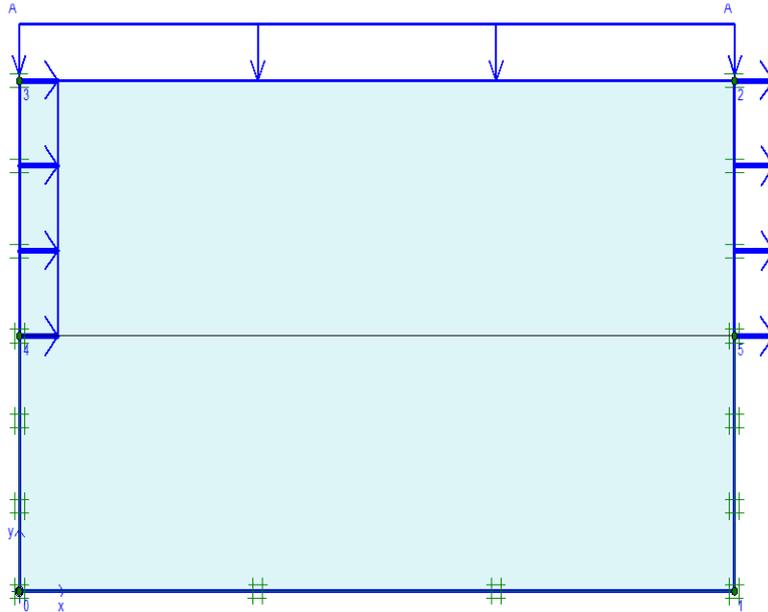


Figure 4.2: Modèle géométrique de la boîte de cisaillement.

La boîte fait 60 mm de largeur ,30 mm de hauteur, composé de deux demi boîte, l'une fixe (inférieur), l'autre se déplace horizontalement (supérieur).

IV.3.4 CARACTÉRISTIQUES DES MATÉRIAUX

Les propriétés de sols et des interfaces sont résumées dans les tableaux 4.1.a :

Tableau 4.1.a : Propriétés du sol (sable).

Paramètres	Nom	Argile	Unité
Modèle type	Model	Mohr-coloumb	-
Type de comportement	Type	Drainé	-
Poids volumique sec	γ_{sat}	$1,474 \cdot 10^{-8}$	kN/m ³
Poids volumique humide	γ_{wet}	$2,0 \cdot 10^{-8}$	kN/m ³
Perméabilité horizontale	k_x	100	m/jour
Perméabilité verticale	k_y	100	m/jour
Module d'Young	E_{ref}	2100	kN/m ²
Coefficient de poisson	ν	0,3	-
Cohésion	c_{ref}	$1,0 \cdot 10^{-7}$	kN/m ²
Angle de frottement	ϕ	30	°
Angle de dilatation	Ψ	0	°
Facteur de rigidité de l'interface	R_{inter}	0,8	-
Perméabilité de l'interface	permeability	impermeable	-

Tableau 4.1.b: propriétés des demi-boîtes de cisaillement.

Paramètres	Nom	Demi-boîte	Unité
Modèle type	Model	élastique	-
Rigidité normale	EA	$7,5 \cdot 10^3$	kN/m
Rigidité de flexion	EI	10^9	kNm ² /m
Epaisseur équivalent	d	1264,911	m
pois	w	10^{-5}	KN/m/m
Coefficient de poisson	v	0	-

IV.3.5 Génération de maillage

Le modèle de référence se fait par des éléments à 6 nœuds. Le nombre d'éléments est de 1325 éléments et le nombre des nœuds est de 3254 nœuds.

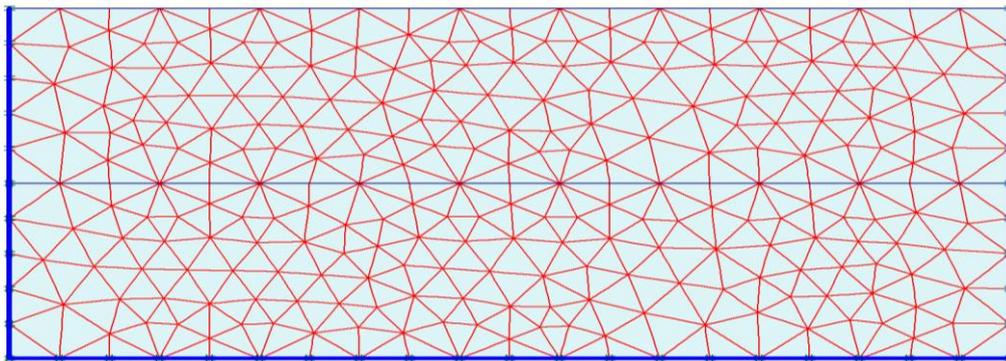


Figure 2: Maillage du modèle.

IV.3.6 Conditions initiales

Les conditions initiales nécessitent la génération des pressions interstitielles initiales ainsi que des contraintes initiales.

a. Contraintes initiales (fig4.4)

Pour le calcul des contraintes initiales, il faut désactiver les éléments structuraux ainsi que l'élément de sol. On génère alors les contraintes initiales en prenant les valeurs de K_0 par défaut la valeur de K_0 est proposée automatiquement d'après la formule de Jaky. On garde le poids du sol à 1, ce qui correspond à une application totale de la gravité.

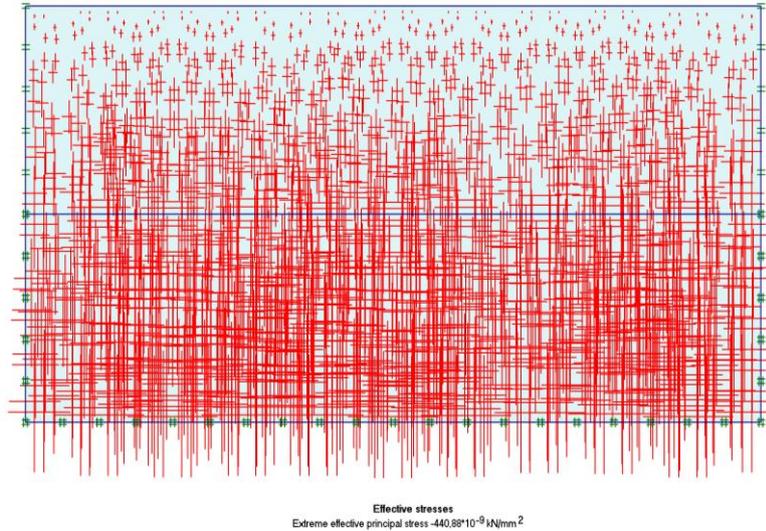


Figure 4.4: Génération des contraintes initiales

IV.3.7 Procédure de calculs

Le calcul du modèle de référence se définit en 2 phases dans l'ordre, on fixe la charge verticale et on fait varier la charge horizontale à l'aide de la procédure (Staged Construction).

IV.3.8 Les principaux résultats

a. Déformation de maillage

La déformation de maillage et du sol sont représentés sur la figure 5.5 ; On note un déplacement total maximum de 400,87 mm.

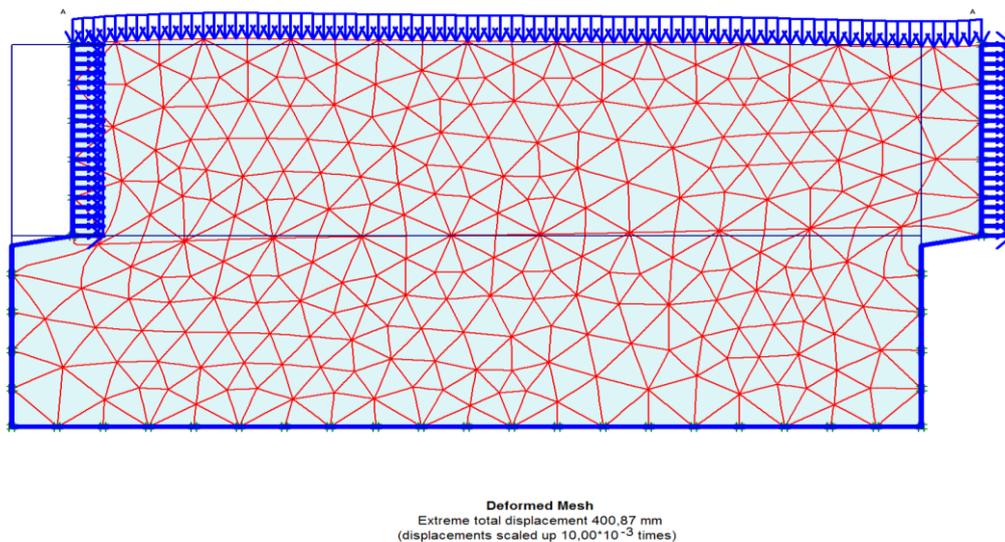
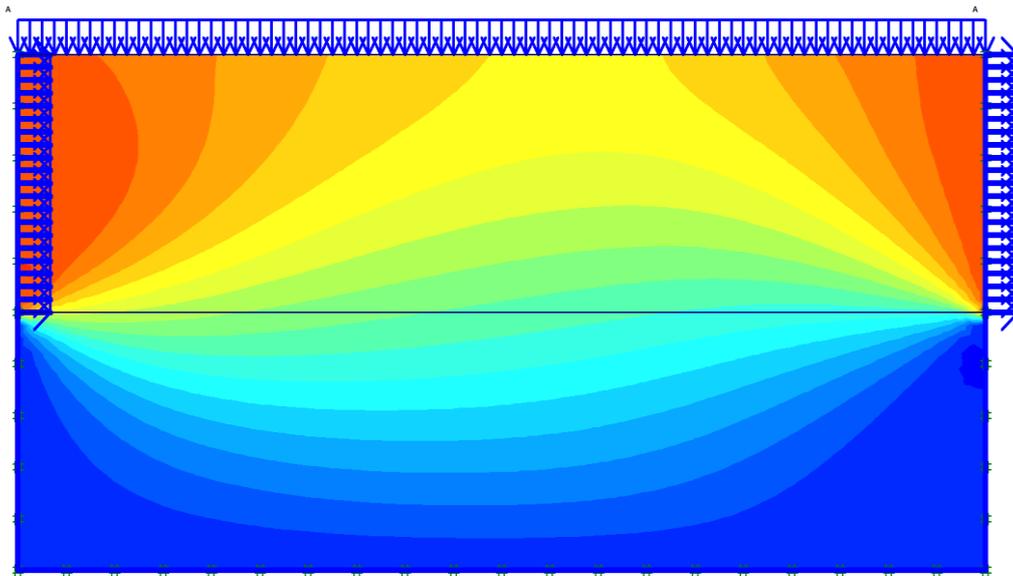


Figure 3: phase 2 : déformation de maillage.



Horizontal displacements (Ux)
Extreme Ux 400,86 mm

Figure 4.6: déplacement maximal.

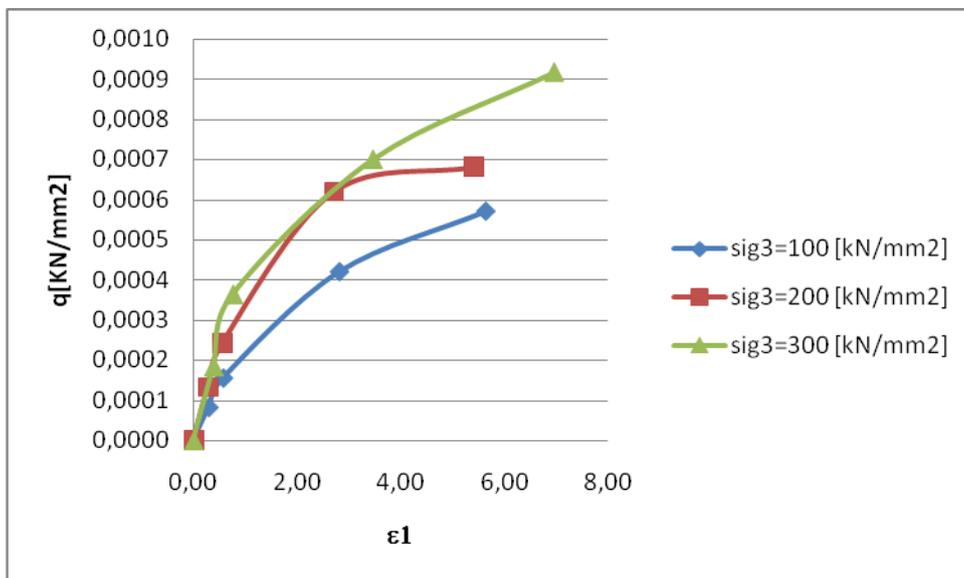


Figure 4.7: Courbe contrainte déviatorique-déformation axiale.

CHAPITRE V

**Optimisation des paramètres du modèle de
Mohr Coulomb à partir des résultats de
l'essai à la boîte de cisaillement**

V.1 INTRODUCTION

Ce chapitre de validation de la méthode d'optimisation proposée a pour objectif de calibrer la loi de comportement de Mohr Coulomb, à partir des résultats de l'essai à la boîte de cisaillement.

Maintenant que le contexte de l'étude est posé, il est nécessaire de tester la méthode afin d'en définir plus précisément le fonctionnement. Pour cela, la modélisation numérique par la méthode des éléments finis de l'essai à la boîte de cisaillement sera adoptée comme support de modélisation, Il s'agit de reproduire numériquement l'essai de la boîte de cisaillement sur un sol argileux, en utilisant le logiciel Plaxis.

La méthode d'optimisation de Taguchi est testée pour identifier les paramètres du modèle, à savoir, le module de Young E , l'angle de frottement φ et la cohésion C , à partir des résultats de la courbe contraintes principales en fonction des déformations principales.

V.2 MODÉLISATION

L'objectif de la modélisation est de reproduire la courbe expérimentale tracée à partir des résultats de à la boîte de cisaillement, par des simulations numériques de l'essai en utilisant un jeu de paramètres approprié selon le plan d'expérience proposé (table de Taguchi).

La modélisation par éléments finis de l'essai à la boîte de cisaillement est représentée dans la figure 5.1. C'est un modèle à deux dimensions en déformations planes, le maillage du modèle numérique a volontairement été choisi moyen pour limiter le temps de calcul, Le modèle est défini par deux phases de calcul, la première représente l'application de la contrainte normale et la deuxième phase représente l'application de la contrainte de cisaillement jusqu'à la rupture.

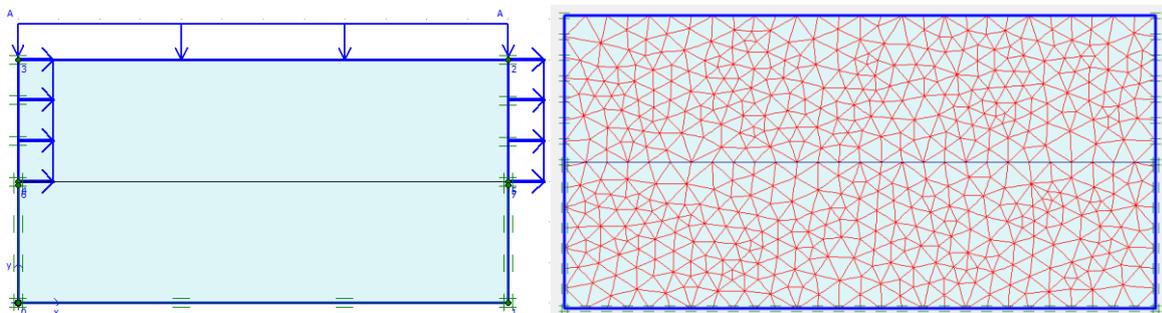


Figure 5.1 : Modèle éléments finis 2D en déformation plane et maillage associé.

Dans ce modèle la loi de comportement de Mohr Coulomb est utilisée pour reproduire le comportement du sol, le tableau 5.1 résume les propriétés adoptées pour ce modèle.

Paramètres	Nom	Argile drainée	unité
Modèle de matériau	modèle	Mohr-Coulomb	-
Poids volumique saturé	γ_{sat}	18,5	[KN/m ³]
Poids volumique sec	γ_{unsat}	18	[KN/m ³]
Module de young	E	1,0x10 ⁴	[KN/m ²]
cohesion	C	60,0	[KN/m ²]
Coefficient de poisson	ν	0,3	-
Angle de frottement	φ	20	[°]
Angle de dilatance	ψ	0	[°]

Tableau 5.1.: propriétés desdemi-boîtes de cisaillement.

Ensuite, on s'intéresse à ce que l'erreur entre les deux courbes (expérimentale et numérique) soit minime le mieux possible. Une fonction erreur est défini comme la surface entre les deux courbes comme mentionnée sur la figure ci-dessous :

Dans notre étude, nous avons adopté une fonction erreur de la forme suivante :

$$\text{Fonction erreur} = F_{err} = S1 + S2 = \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{(U_{ei} - U_{ni})^2}{\Delta U_i^2} \right)^{1/2}$$

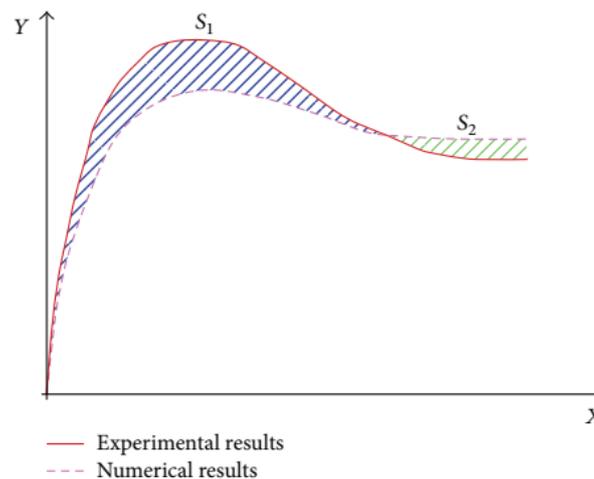


Figure 5.2: Concept de la fonction erreur.

Avec :

$$\Delta U_i = \varepsilon + \alpha U_{ei} \quad , \quad \varepsilon = 0.01 \quad ; \quad \alpha = 1.0$$

Où :

\sum : représente la somme en valeurs absolues sur tous les points N de la simulation.

Pour aboutir à cet objectif, il faut tout d'abord choisir les facteurs et leurs niveaux de variation. Dans notre étude, nous considérons les 3 facteurs du modèle de Mohr Coulomb et affectons 3 niveaux à chacun d'entre eux. Ces facteurs et leurs niveaux sont définis dans le tableau ci-dessous.

Désignation	Repère	Niveau 1	Niveau 2	Niveau 3
Module de Young (E)	A	10000 kPa	20000 kPa	30000 kPa
Cohésion (C)	B	35 kPa	50 kPa	65 kPa
Angle de frottement (φ)	D	5°	13°	22°

Tableau 2.2: Facteurs et niveaux des paramètres du modèle.

V.4. 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 modèle. Dans ce cas d'étude, un plan de Taguchi L9 sera adopté :

Run	Factor 1	Factor 2	Factor 3
	E (kPa)	φ (°)	C (kPa)
1	10000	5	35
2	10000	13	50
3	10000	22	65
4	20000	13	35
5	20000	22	50
6	20000	5	65
7	30000	22	35
8	30000	5	50
9	30000	13	65

Tableau 5.3: Facteurs et niveaux des paramètres du modèle.

Dans ce tableau, chaque ligne correspond à une expérience à réaliser numériquement par le logiciel Plaxis, donc il faut réaliser 9 modèles numériques conformément aux données du tableau ci-dessus :

V.5. RÉSULTATS

Le Tableau 5.4 présente les résultats de la modélisation en terme de la fonction erreur entre les courbes expérimentales et ceux obtenues numériquement. Ces résultats sont obtenus suite aux différentes combinaisons conformément à la matrice de planification des expériences pour un plan de Taguchi L9.

Run	Factor 1	Factor 2	Factor 3	Erreur
	E (kPa)	φ (°)	C (kPa)	
1	10000	5	35	1,9
2	10000	13	50	1,05
3	10000	22	65	0,41
4	20000	13	35	1,29
5	20000	22	50	1,21
6	20000	5	65	1,46
7	30000	22	35	0,97
8	30000	5	50	1,71
9	30000	13	65	1,03

Tableau 5.4: Plan d'expériences L9 en valeurs des paramètres.

Nous pouvons tracer alors à partir des résultats une courbe classique du déviateur des contraintes principales q en fonction de la déformation axiale principale ε_1 . Après l'exécution des 9 modèles, nous obtenons les résultats suivants :

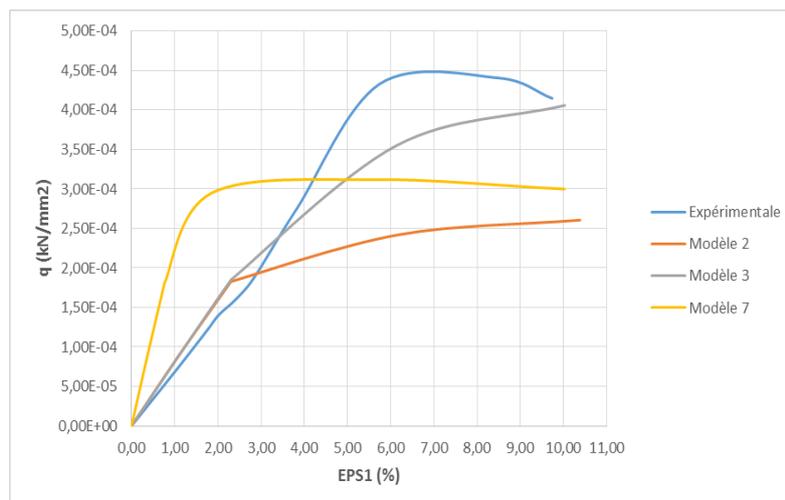


Figure 5.3 : Courbe déviateur de contraintes principales q - déformations axiales principales.

V.5.1. Analyse de variance ANOVA

L'analyse de la variance ANOVA présentée dans le Tableau 5.5, montre que le terme angle de frottement est le facteur le plus important qui affecte la réponse, sa contribution est de 43,30 %, suivie par les terme quadratique PHI^2 avec un pourcentage de contribution de 23,07% puis le terme E^*C , représentant l'interaction entre le module de Young et la cohésion dont sa contribution est de 18,42 %. Le terme quadratique E^2 a une faible contribution de pourcentage égal 6,89%. Le reste des termes ont de pourcentage de contribution inférieur à 5% et par conséquent, ils n'ont pas d'effets significatifs sur le résultat.

Source	Somme des carrés SS	df	Moyenne des carrés MC	F-value	P-value	% de contribution
<i>E</i>	0,00158	1	0,001580	1,93	0,397	0,27
<i>PHI</i>	0,25230	1	0,252296	308,93	0,036	43,30
<i>C</i>	0,00380	1	0,003800	4,65	0,276	0,65
E^2	0,04014	1	0,040139	49,15	0,090	6,89
PHI^2	0,13443	1	0,134430	164,61	0,050	23,07
C^2	0,04302	1	0,043022	52,68	0,087	7,38
E^*C	0,10734	1	0,107339	131,44	0,055	18,42
Modèle	1,54761	7	0,221087	270,72	0,047	99,95
Résiduel	0,00082	1	0,000817			0,05
Total	1,54842	15				100

Tableau 5.5 : Analyse de la variance ANOVA.

V.5.2. Analyse des effets principaux sur l'erreur

De la figure 5.5, il apparaît que l'angle de frottement interne a la plus importante influence caractérisée par une pente remarquable, ce qui est confirmé par l'analyse de variance ANOVA dans le tableau 5.5.

En outre le graphe des effets principaux permet de constater que le module de Young a un effet négligeable sur la réponse.

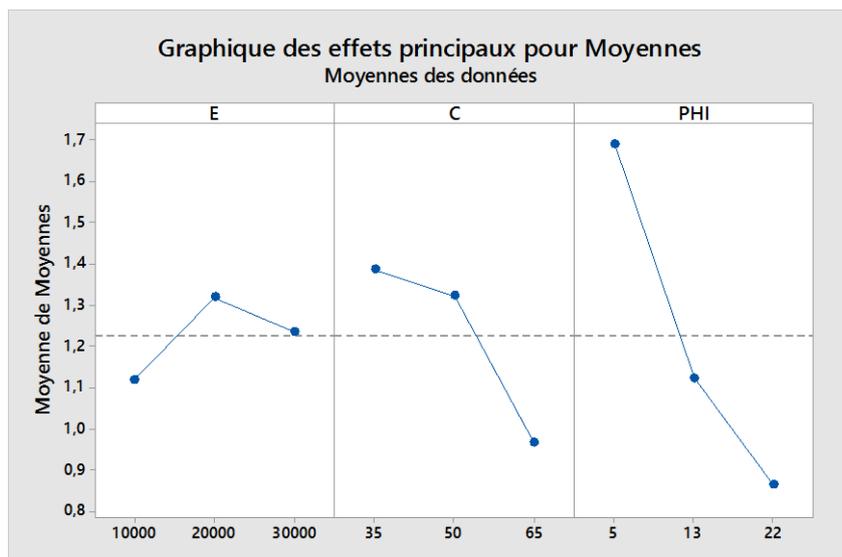


Figure 5.4 : Graphe des effets principaux sur l'erreur.

V.5.3 Analyse de régression

La relation fonctionnelle entre la variable de sortie (Fonction erreur) et les variables d'entrée (E, φ, ψ, v et M) a été exprimés avec un coefficient de détermination ($R^2 = 86,01\%$) 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 (5.1).

$$F_{err} = 2.349 - 0.000015 * E - 0.1425 * \varphi + 0.0203 * C - 0.00001 * E^2 + 0.00398 * \varphi^2 - 0.00065 * C^2 + 0.00002 * E * C \quad (5.1)$$

La comparaison entre les valeurs expérimentales et prédites est présentée dans la figure 5.6. L'analyse de résultats montre que les valeurs prédites et les valeurs numériques sont presque confondues, cela montre la précision du modèle adopté.

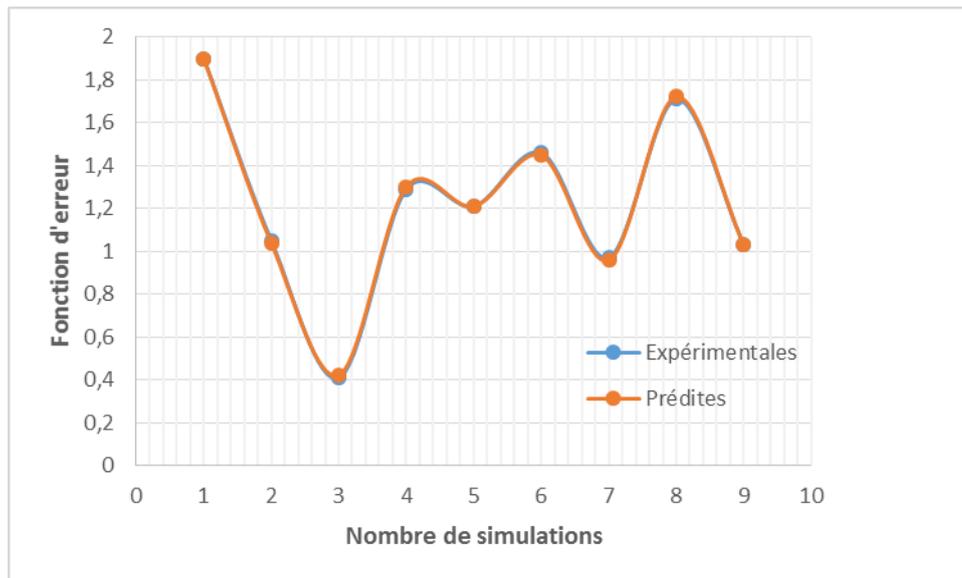


Figure 5.5 : Valeurs expérimentales et valeurs prédites de la fonction erreur.

V.6. OPTIMISATION PAR LA MÉTHODE DE TAGUCHI

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

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

a) L'optimum est une valeur minimale : (plus petit c'est meilleur), la caractéristique de performance Y a une distribution non négative et la fonction de perte augmente avec (y). Soient $y_{1j}, y_{2j}, \dots, y_{Nj}$ les résultats expérimentaux obtenus au point j , Taguchi recommande d'utiliser la fonction représentée par la relation (5.2) :

$$S / N = -10 \log_{10} \left[\frac{1}{n} (\sum_{i=1}^n y_i^2) \right] \quad (5.2)$$

b) L'optimum est une valeur maximale : la valeur cible est égale à l'infini (plus grand

c'est meilleur), on vise la maximisation de la caractéristique de performance. Maximiser Y revient à minimiser 1/Y et, Taguchi recommande d'utiliser la formule (5.3) suivante :

$$S / N = -10 \log_{10} \left[\frac{1}{n} (\sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2}) \right] \quad (5.3)$$

c) L'optimum est une valeur ciblée : la valeur cible est égale à une valeur nominale m_0 (nominal c'est meilleur), la fonction de perte augmente quand (Y) s'éloigne de la valeur nominale m_0 , Taguchi recommande d'utiliser la fonction représentée par la relation (5.4) :

$$S / N = 10 \log_{10} \left[\left(\frac{\bar{y}_j^2}{s_j^2} \right) \right] \quad (5.4)$$

Donc les ratios S/N correspondant seront calculés selon l'équation (5.2).

Pour appliquer l'approche de Taguchi dans notre cas d'étude, nous avons fixé comme objectif d'atteindre l'optimum de notre critère étudié. En d'autres termes, on doit minimiser la fonction erreur le mieux possible.

Les valeurs du ratio S/N correspondant sont illustrées dans le tableau 5.6.

V.6.1. Analyse des effets moyens des niveaux des facteurs

Cette analyse est basée sur le calcul de la moyenne des ratios S/N des résultats obtenus pour chaque niveau des trois principaux paramètres d'optimisation (**le module de Young, l'angle de frottement et la cohésion**). La moyenne des ratios S/N pour un niveau d'un facteur correspond à la somme des valeurs des ratios S/N pour le même niveau du facteur divisée par le nombre des ratios pour le niveau du facteur.

Run	Factor 1	Factor 2	Factor 3	S/N Erreur
	E (kPa)	φ (°)	C (kPa)	
1	10000	5	35	-5,575
2	10000	13	50	-0,424
3	10000	22	65	7,744
4	20000	13	35	-2,212
5	20000	22	50	-1,656
6	20000	5	65	-3,287
7	30000	22	35	0,265
8	30000	5	50	-4,660
9	30000	13	65	-0,257

Tableau 5.6 : Le ratio S/N de la fonction erreur.

Du tableau 9, il apparait que les paramètres d'entrée présentent des effets différents sur la fonction d'erreur. La plus importante influence correspond à l'angle de frottement, avec un effet de 2.118, suivi par la cohésion, avec un effet de 1.400 La plus faible influence est le module de Young avec un effet 0.582.

Niveau	E	C	PHI
1	0,582	-2,507	-4,507
2	-2,385	-2,246	-0,964
3	-1,551	1,400	2,118
Delta	2,967	3,908	6,625
Rang	3	2	1

Tableau 5.7 : Moyenne des ratios S/N (T) pour chaque niveau des facteurs.

Selon l'approche de Taguchi, l'optimum de la valeur la plus élevée de Signal/ Bruit (S/N) représente la meilleure performance qui correspond aux niveaux **E1 C3 PHI3** (les lettres représentent les paramètres de l'étude et les indices représentent les niveaux). Les niveaux des paramètres attendus sous les conditions optimales de la fonction d'erreur sont donc : le module de Young E = 10000 kPa, la cohésion C = 65 kPa et l'angle de frottement PHI = 22° (voir figure ci-dessous).

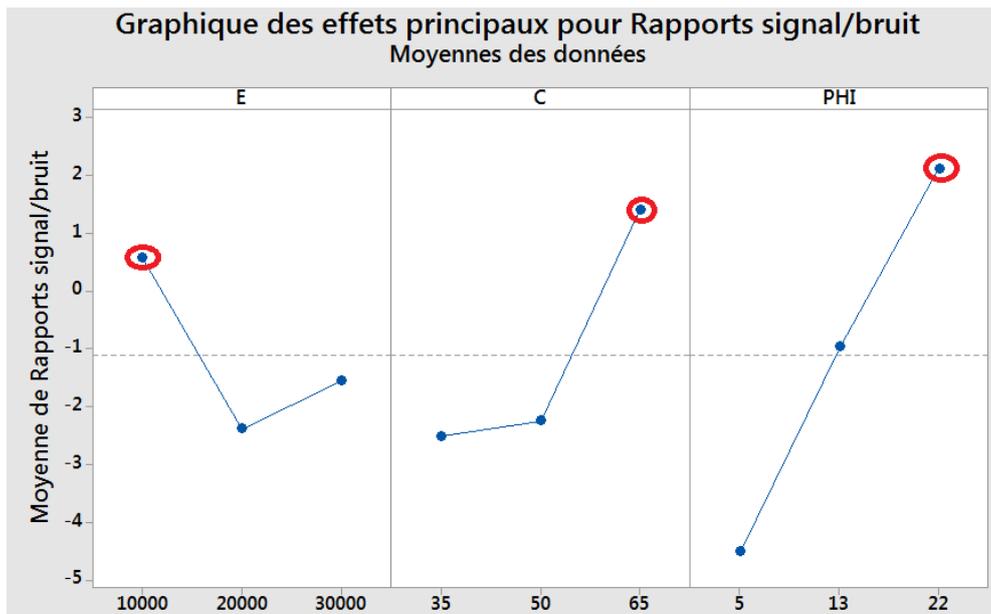


Figure 5.6 : Graphique des effets principaux sur le ratio S/N de la fonction erreur.

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

Paramètres	Valeur expérimentale	Valeur Optimisée
E (Kpa)	10000.00	10000.0
φ(degré)	20.0	22.0
C (Kpa)	60.0	65.0

Tableau 5.8 : Comparaison entre les valeurs des paramètres.

V.7 CONCLUSION

Ce chapitre présente une étude d'optimisation des paramètres de la loi de Mohr Coulomb par la méthode de Taguchi. La méthode d'optimisation proposée ici a permis d'identifier les paramètres du modèle à une différence minimale. Cette application montre que l'application de la méthode (ici, à l'aide de la méthode de Taguchi) 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

L'objectif de ce travail de fin d'études est d'apporter une nouvelle technique, pour la modélisation et l'optimisation des paramètres géotechniques des sols, par le recours unique aux prototypes virtuels, c'est à dire principalement aux modèles éléments finis. 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 et plus particulièrement la méthode de Taguchi.

Le comportement d'un sol est représenté par un modèle constitutif. La réponse d'un modèle à différentes actions mécaniques est définie à partir des valeurs données aux paramètres de ce modèle. Ces paramètres sont souvent évalués à partir d'un nombre limité d'essais de laboratoire ou d'essais en place. Or, à l'heure actuelle, la plupart des essais géotechniques in situ ne permettent pas d'identifier directement les paramètres constitutifs des couches de sol. Les essais de laboratoires quant à eux coûtent chers et ne sont pas représentatifs du massif de sol dans son ensemble.

Le travail présenté dans ce mémoire concerne la détermination des paramètres géotechniques des sols à travers la modélisation de l'essai à la boîte de cisaillement, en se basant sur les modèles proposés par les plans d'expériences de Taguchi et la comparaison de ces derniers avec ceux fournis expérimentalement au laboratoire.

A travers ce travail, nous avons tenté de présenter des modèles numériques en utilisant le logiciel par éléments finis Plaxis, pour modéliser l'essai à la boîte de cisaillement. Les résultats fournis par nos modélisations nous a permis de mettre en évidence une bonne concordance entre les valeurs estimées par modélisation et ceux fournis par l'expérimentation, d'où l'avantage de la technique d'optimisation de Taguchi 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 thème.

- Il est intéressant de tenir compte l'effet de l'interaction entre les différents paramètres du modèle lors de construction des plans de Taguchi.

- Appliquer la méthode de Taguchi pour la modélisation d'autres essais tels que l'essai triaxial.
- La comparaison de cette méthode avec d'autres méthodes d'optimisation telle que la méthode des surfaces de réponses.
- Il est intéressant de tenir compte plusieurs objectifs lors du processus d'optimisation (optimisation multi-objective).
- L'application de la méthode pour des ouvrages réels, en utilisant des lois de comportement plus évoluées.

Références Bibliographiques

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

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

[3] **GRILLIER Jean-Claude.VII-210**, livre «Comprendre les plans d'expériences Taguchi»AFNOR- Janvier 2017-MAJ 62.

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

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

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

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

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

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

[9]Société Internationale de Mécanique des Sols et des Travaux de Fondations. Lexicon in 8 languages, 5th Edition, p. 127-132 (Symbols et définitions). Printed by The Bryant Press Limited, Toronto, Ont., Canada (1981).

[10]BLIVET (J.-C.) et MIEUSSENS (C.). – Détermination de la résistance au cisaillement des sols, en laboratoire. Essais à l'appareil triaxial. Essais de compression simple. Essais de cisaillement direct à la boîte. Essais de cisaillement direct alterné. Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Paris, Projet de méthode d'essai LPC, 83 p. (1990).

[11]BISHOP (A.W.) et HENKEL (D.J.). – The measurement of soil properties in the triaxial test. Edward Arnold Ltd, 2e éd. (1962, réimprimé en 1964 et 1969).

[12]R.B.J. Brinkgreve. Plaxis v8 manuel de référence, Delft University of Technology & PLAXIS by, Pays-Bas, 2003.