

**Ministère de l'enseignement supérieure
et de la recherche scientifique
Université Mohamed Boudiaf - M'sila
Faculté de technologie**



Département de GENIE CIVIL

MEMOIRE

**Présenté pour l'obtention du diplôme de
MASTER**

FILIERE : Génie Civil

SPECIALITE : Géotechnique

THEME

**EVALUATION GEOSTATISTIQUE DE LA
STABILITE D'UN REMLAI**

(Application au cas du remblai de l'extension de l'aérodrome d'Ain Arnat - wilaya de
Sétif)

**Présenté par : NEGUEZ Nedjmeddine
DOUADI Zakarya**

Dirigé par :

Mr. KHEMISSA Mohamed, Professeur, Encadreur

Mr. SEDDIKI Ahmed, M.A.A., Co - Encadreur

Promotion : 2018/2019

RESUME

Le travail présenté dans ce mémoire a pour but l'évaluation géostatistique de la **stabilité** d'un remblai

En premier temps on a présenté des généralités sur les remblais, les **remblais** de grande hauteur et leurs modes de déformations.

Ensuite on a exposé les différentes méthodes analytiques en équilibre limite pour l'analyse de la stabilité des remblais.

Un exposé sur la théorie de l'analyse **géostatistique**, le semi-variogramme théorique, expérimental; la modélisation par un **variogramme** théorique empirique; les méthodes d'interpolation déterministes et géostatistique; et le **krigeage**.

On a présenté tous les modules du logiciel GEOSTUDIO, leur mode de fonctionnement, l'introduction des données, la modélisation des phases de calculs, la lecture des résultats.

Et enfin et en exploitant les résultats de l'application pratique de la stabilité du remblai de l'extension de l'aérodrome d'Ain Arnat à Sétif, une évaluation géostatistique numérique, pour la **prédiction** des valeurs du facteur de sécurité en n'importe quel point non mesuré et la détermination de la **variance** d'erreur en utilisant le fameux logiciel Arc GIS.

Mots clés : stabilité – remblai – géostatistique - variogramme – krigeage – prédiction - variance.

ملخص

يهدف العمل المقدم في هذه المذكرة إلى التقييم الجيو الإحصائي لاستقرار ردم ترابي، في البداية، قدمنا عموميات على الردم وأنماط تشوهها.

ثم فصلنا في الطرق الكلاسيكية التحليلية المختلفة المبنية على التوازن الحدي لتحليل استقرار ردم.

ثم قدمنا عرض حول التحليل الجيو الإحصائي، المتباين التجريبي، النمذجة بواسطة المتغير النظري، وطرق الاستيفاء الحتمي والجيو إحصائي والكريجاج.

عرفنا برنامج GEOSTUDIO وطريقة تشغيله وإدخال البيانات ونمذجة مراحل الحساب وقراءة النتائج.

وأخيراً وباستغلال نتائج التطبيق العملي لاستقرار ردم ترابي بعين أرناات ولاية سطيف، فإن التقييم الجيو إحصائي العددي، للتنبؤ بقيم معامل الأمان في أي نقطة غير محسوبة وتحديد تباين الأخطاء باستخدام برنامج ARCGIS الشهير.

كلمات مفتاحية: استقرار - ردم - جيو إحصاء - متباين - كريجاج - التنبؤ - التباين.

ABSTRACT

The work presented in this thesis aims at the Geostatistical evaluation of the stability of an embankment

At first, we presented generalities on embankments, high embankments and their modes of deformation.

Then we exposed the different analytical methods in limit equilibrium for analysis of the stability of embankments.

A presentation on the theory of Geostatistical analysis, the theoretical semi-variogram, experimental; modeling by an empirical theoretical variogram; deterministic interpolation methods and geostatistics; and kriging.

All the modules of the GEOSTUDIO software, their mode of operation, the introduction of the data, the modeling of the computation phases, and the reading of the results were presented.

And finally and by exploiting the results of the practical application of the stability of the embankment of the extension of the aerodrome of Ain Arnat to Sétif, a Geostatistical evaluation numerical, for the prediction of the values of the factor of safety in any which unmeasured point and the determination of error variance using the famous Arc GIS software.

Key words: stability - embankment - geostatistics - variogram - kriging - prediction - variance.

Remerciement

*Nous tenons tout d'abord à remercier Dieu le tout puissant et
miséricordieux, qui nous a donné la force et la patience d'accomplir ce Modeste
travail.*

*Nous tenons aussi à remercier notre encadreur le profisiteur :KHMISSA, et notre co-
encadreur DR: SEDDIKI me permettre de profiter de leurs grandes connaissances du
sujet, leurs compétences et leurs aider à précieux afin de transférer leurs
connaissances et leurs conseils tout au long de ce projet, même dans les moments les
plus difficiles.*

*Nous remercions tous ceux qui, d'une manière ou d'une autre, nous ont toujours
soutenus par leur respect et leur gentillesse.*

Nedjmeddine et Zakaria

Dédicaces

Je dédie ce travail qui n'aura jamais pu voir le jour sans les soutiens indéfectibles et sans limite de mes chers parents qui ne cessent de me donner avec amour le nécessaire pour que je puisse arriver à ce que je suis aujourd'hui.

Je dédie aussi ce travail:

A mes frères : Hocine, Lakhdar et Taher, et à mes sœurs :

Kamla, Nadia et Djamila.

A mes amis: Sidali, Zakaria, Lakhdar, Taher, Mohamed,

A Tous mes collègues et tous ceux qui m'estiment.

Nedjmeddine Nequez

Dédicaces

En signe de respect et de reconnaissance,

Je dédie ce modeste travail à ceux qui sont toujours

présent dans mon cœur.

A mes très chers parents pour leurs soutiens, leurs patiences et leurs

sacrifices.

A ma frère : Mehdi et à mes sœurs : Rima ; Imane

A mes amies : Nedjmeddine ; Lakhdar ; Taher ; Seyfeddine ; Nedjma

; Nesrine ; Ikram ; Warda ; Donia ; et à toute personne ayant

contribué à ce travail de Près ou de loin.

Et à toute la promotion du Master spécialité géotechnique

2018-2019.

DOUADI ZAKARIA

SOMMAIRE

ملخص

RÉSUMÉ

ABSTRACT

REMERCIEMENTS

DÉDICACES

SOMMAIRE

LISTE DES FIGURES

LISTE DES TABLEAUX

LISTE DES NOTATIONS

INTRODUCTION GENERALE 1

Première Partie

SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

Première Chapitre	5
Généralités sur les Remblais	5
I.1. Terminologie de base :	5
I.2 Problèmes posés par la construction des remblais sur sols compressibles:.....	11
I.3 Les remblais de grande hauteur :	12
Deuxième Chapitre	15
Analyse de la Stabilité des Remblais	15
II.1. Notion de coefficient de sécurité:.....	15
II.2. Méthodes de calcul de stabilité des pentes:.....	15
II.3. Autres méthodes.....	18
II.4. Méthode du calcul en plasticité:.....	19
Troisième Chapitre.....	20
Analyse Géostatistique.....	20
III.1 L'histoire de la géostatistique:.....	20
III.2 Définition de la géostatistique:	20
III.3 Domaines d'application de la géostatistique:	20
III.4 Le semi-variogramme:	21
III.6 Interpolation:	27
III.7 Le krigeage.....	28
Quatrième Chapitre	31
OUTILS NUMERIQUE UTILISES	31
IV.1 Le Logiciel Geostudio :	31
IV.1.1 Présentation du Logiciel :	31
IV.5.2 Présentation du logiciel ArcGis	35

Deuxième Partie

SIMULATION NUMERIQUE

Cinquième Chapitre	39
APPLICATION PRATIQUE A L'ETUDE DE LA STABILITE DU REMBLAI D'AIN ARNAT	39
V.1- Présentation Générale Du Site :	39
V.2- Reconnaissance Du Projet :	40
V.3- Mouvement d'eau dans le Sol :	41
V.4- Caractéristiques sismiques considérées	41
V.5- Calcul de la stabilité du remblai :	42
V.6- Calculs de la stabilité du remblai à l'aide du logiciel GEOSTUDIO :	43
V.7- Calculs de la stabilité du remblai pour une série de centre de cercles de glissement :	43
V.8. Analyse Statistique et Géostatistique :	45
V.9. Synthèse :	49
CONCLUSION GENERALE	50
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUE	51

LISTE DES FIGURES

Figure I.1 : Remblai d'un pont routier	5
Figure I.2 : Extraction en couche.....	7
Figure I.3 : Extraction frontale.....	7
Figure I.4 : Action sur la granularité.....	8
Figure I.5: Fragmentation complémentaire après extraction.....	8
Figure I.6 : Aération.....	8
Figure I.7 : humidification	9
Figure I.8 : Traitement à la chaux.....	9
Figure I.9 : Traitement réactifs.....	9
Figure I.10 : Compactage.....	10
Figure I.11 : Remblai d'hauteur moyenne	10
Figure I.12 : Schéma du tassement et du déplacement latéral du sol de fondation.....	11
Figure I.13: Exemple d'ouvrages transversaux dans un grand remblai.....	12
Figure II.1: Surface de rupture.....	16
Figure II.2 : Les forces appliquées sur une tranche.....	17
Figure II.3 : Découpage d'un talus en tranches et les forces agissantes sur une tranche.....	18
Figure III.1: Représentation schématique des points de mesure de la variable.....	21
Figure III.2: Schéma type d'un variogramme.....	22
Figure III.3: Schéma de calcul du variogramme expérimental.....	23
Figure III.4: Ajustement d'un modèle théorique (courbe) à un modèle expérimental (croix).....	23
Figure III.5: Graphe d'un variogramme expérimental et son modèle d'ajustement.....	24
Figure III.6: Semi-variogramme forte irrégularité (pépite pure).....	24
Figure III.7: Semi-variogramme grande régularité (pépite pure).....	25
Figure III.8: type d'un modèle de semi-variogramme exponentiel.....	25
Figure III.9: type d'un modèle de semi-variogramme gaussien.....	26
Figure III.10: Type d'un modèle de semi-variogramme sphérique.....	26
Figure III.11: Principe de l'interpolation numérique	27
Figure IV.1 : Fenêtre de démarrage du logiciel Geostudio 2012	31
Figure IV.2 : Fenêtre d'analyse du module SIGMA / W	32
Figure IV.3: Les régions de domaine et le niveau de la nappe phréatique.....	33
Figure IV.4: Introduction des propriétés des matériaux du domaine	33
Figure IV.5 : Fenêtre du Gestionnaire de résolution.....	34
Figure IV.6: Illustration du placement de remblai par des ascenseurs.....	34
Figure IV.7: Arbre des analyses par des ascenseurs	35
Figure IV.8: Arborecence du logiciel ArcGIS 10.3.....	35
Figure IV.9: Menu "Geostatistical Analyst" d'ArcMap	36
Figure V.1 : Situation de l'aéroport d'Ain Arnat, wilaya de Sétif	39
Figure V.2 : Tronçon de l'extension de l'aérodrome d'Ain Arnat.....	40
Figure V.3 : Limites des zones A et B et position des sondages sur le site	40
Figure V.4 : Section du remblai étudié au niveau du PK2+570 au PK 2+800.....	42
Figure V.5 : Profil retenu pour l'étude.....	42
Figure V.6 : Cercle de rupture critique et valeur du FS sous effet combiné (Méthode de JANBU)	43
Figure V.7 : Définition de la grille uniforme des centres de cercles de rupture.....	44
Figure V.8 : Facteurs de sécurité pour toute la grille des centres de cercles de rupture.....	44
Figure V.9 : Nuée variographique des FS définie dans ArcMap	45
Figure V.10 : Histogramme des valeurs du facteur de sécurité.....	46
Figure V.11 : Détails de la modélisation spatiale ou variographie.....	47
Figure V.12 : Semi variogramme FS en fonction de la distance.....	47
Figure V.13 : Carte de prédiction du FS en tout point non mesuré.....	48
Figure V.14 : Carte des variances d'erreur sur la prédiction du FS en tout point non mesuré	48
Figure V.15 : Lecture de la variance d'erreur de prédiction sur la carte	48

LISTE DES TABLEAUX

Tableau II.1 : Différentes définitions d'un coefficient de sécurité, LAMBE [1973]	15
Tableau V.1 : Les valeurs de coefficient d'accélération et le coefficient sismique horizontal	41
Tableau V.2 : Caractéristiques des matériaux du multicouche.	42
Tableau V.3 : Valeurs de FS sous effet combiné du chargement gravitaire, séisme et de la nappe.....	43
Tableau V.4 : Indicateurs de la série statistique.....	45

LISTE DES NOTATIONS

A	: Coefficient d'accélération de zone
k_h	: Coefficient d'accélération sismique horizontal
c	: Cohésion
c'	: Cohésion effective
c_u	: Cohésion non drainée
c_c	: Indice de compression
φ	: Angle de frottement interne
φ'	: Angle de frottement interne effectif
F_S	: Coefficient de sécurité
U	: Pression interstitielle
U_l	: Effort dû à la pression d'eau latérale
V	: Effort vertical
H	: Effort horizontal
W	: Poids des terres
N, T	: Réaction normal
R	: Réaction de frottement
N_n	: Force normal
T_n	: Force tangentielle
β	: Angle du talus
γ	: Poids volumique
γ_d	: Poids volumique sec
γ_{sat}	: Poids volumique saturé
γ_w	: Poids volumique d'eau
θ	: L'angle de frottement de la tranche
σ'	: Contrainte effective
α	: Inclinaison de la surface de rupture
τ_{max}	: Résistance au cisaillement
τ	: Contrainte de cisaillement mobilisée
a	: Portée du semi-variogramme.
$C(0)$: Palier du semi-variogramme
C_0	: Effet de pépite.
e	: Erreur d'estimation.
h	: Pas du semi-variogramme ou inter-distance moyenne.
G	: Champ ou gisement
$N(h)$: Nombre de paires d'observations séparées par la distance h .
Var	: Variance.
σ^2	: Variance d'estimation.
σ	: Ecart-type.
$\gamma(h)$: Semi-Variogramme théorique.
$\gamma_e(h)$: Semi-Variogramme expérimental
θ	: Angle directionnel du variogramme.
$N(h, \theta)$: Le nombre de paires de points séparés d'une distance h dans la direction θ .

INTRODUCTION GENERALE

La construction de remblais sur sols mous pose des problèmes, associés à la faible résistance de ces sols, qui entraîne des difficultés à assurer leur stabilité et à une forte compressibilité, qui se traduit par des tassements et des déformations importants des ouvrages.

Dans certains cas, la faible perméabilité de ces sols impose des calendriers de construction très étalés dans le temps, des coûts d'entretien et de réparation élevés sur de longues périodes d'utilisation des remblais, ou la mise en œuvre de techniques de confortation ou de drainage des sols complexes et coûteuses.

L'étude des remblais sur sols mous ont été menées à partir de trois types d'études :

- études expérimentales en vraie grandeur ;
- études expérimentales en laboratoire ;
- études théoriques et modélisations numériques.

L'introduction de la méthode des éléments finis dans les études de remblais sur sol compressibles date du début des années 1970.

Les calculs des remblais vus leurs complexités, sont difficiles et dont les résultats obtenus peuvent être incertains. Le choix du type de remblai à mettre en place puis les modèles qu'il faut associer au sol de fondation et au remblai ont une influence non négligeable sur les résultats de calcul.

Le calcul des remblais a longtemps été abordé du point de vue de la stabilité. Toutefois la prise en compte des déformations avant la rupture s'avère de plus en plus nécessaire dans la pratique de l'ingénieur.

Les progrès des ordinateurs et des méthodes d'analyse numérique ont permis de mettre au point des modèles rhéologiques et des algorithmes de résolution, conduisant à des modélisations qui prennent mieux en compte le comportement observé sur le terrain.

La modélisation du comportement des sols est une étape importante qui conditionne la qualité des analyses des ouvrages.

Le travail présenté dans ce mémoire a pour objectif après l'étude de stabilité du remblai de l'extension de l'aérodrome d'Ain Arnat situé à l'ouest de Sétif, l'évaluation géostatistique de la stabilité.

Nous considérerons les coordonnées des centres de cercles de glissement avec les facteurs de sécurité correspondant, comme des variables géolocalisées pour faire une analyse variographique suivi d'une interpolation par krigeage ordinaire afin de prédire les valeurs du facteur de sécurité en tout point non mesuré et d'estimer la variance de l'erreur.

Pour atteindre l'objectif visé, le travail est divisé en quatre chapitres :

Chapitre 1 : *Généralités sur les remblais* ; terminologie de base; Problèmes posés par la construction des remblais sur sols compressibles; Les remblais de grande hauteur.

Chapitre 2 : *Etude de la stabilité des remblais*; Notion de coefficient de sécurité; Méthodes analytiques de calcul de stabilité des pentes.

Chapitre 3 : *Analyse géostatistique*; L'histoire de la géostatistique; Définition de la géostatistique; Domaines d'application de la géostatistique; Le semi-variogramme; Interpolation; Méthodes d'interpolation déterministes et géostatistique; Le krigeage; Propriétés du krigeage; variance d'erreur.

Chapitre 4 : *Application pratique à l'Évaluation Géostatistique de la Stabilité d'un Remblai* situé à Ain Arnat; Présentation générale du site; Calcul de la stabilité du remblai par les deux modules Sigma et Geoslope du logiciel Geostudio 2012.

SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

CHAPITRE PREMIER

GENERALITES SUR LES REMBLAIS

Généralités sur les Remblais

I.1. Terminologie de base :

I.1.1 Définition d'un remblai:

Un remblai est un ouvrage en terre qui provient de la mise en place de matériaux pour rehausser ou niveler le terrain naturel. Il doit pouvoir supporter les sollicitations ultérieures (trafics routier ou ferroviaire, bâtiments, superstructures...) sans déformation préjudiciable (tassements, glissements...). La qualité d'un remblai dépend de la nature des matériaux qui le composent et de leur mise en œuvre. Les matériaux, issus des déblais du site ou d'un emprunt, doivent être mis en place à une teneur en eau correcte (pour assurer une portance suffisante) et compactés (pour garantir leur stabilité).



Figure I.1 : Remblai d'un pont routier

I.1.2 Le remblaiement :

Le remblaiement fait partie des opérations de terrassement destinées à préparer et à modeler un terrain pour lui donner un caractère apte à recevoir la structure. Il peut concerner un terrain pour une construction d'un bâtiment, un jardin, une terrasse ou une route. Le remblaiement est donc très indispensable afin de combler les vides et les tranchées et donner une bonne base à la nouvelle structure.

I.1.3 Type de remblai et leur comportement:

Il existe plusieurs types de remblai. En effet, le remblai peut être constitué de divers éléments adaptés aux conditions climatiques et mécaniques. Ainsi, nous avons :

I.1.3.1 La craie:

Elle se désagrège en sol humide et constitue une pâte qui pourrait occasionner des pressions, empêchant la stabilité de la structure finale. Par ailleurs, en sol très sec, la craie est résistante.

I.1.3.2 Les roches argileuses:

Elles ne sont pas recommandées pour les travaux de remblayage. En effet, ces roches peuvent être réduites en poudre laissant des éléments sablonneux qui gonflent le sol, déstabilisant ainsi la future structure.

I.1.3.3 Les roches siliceuses:

Ces roches sont fragmentables mais sont résistantes.

I.1.3.4 Les roches salines:

La composition en sel de ses roches leur procure un caractère soluble qui ne permet pas de les utiliser comme matériaux de remblai.

I.1.3.5 Les terre de remblai:

Appelé remblai provenant des fouilles, ce sont des terres capables d'être utilisées comme terre de remblai. Cependant, après excavation il est conseillé d'éviter l'utilisation des terres argileuses, sableuse ou trop humides pour servir de remblai.

I.1.3.6 Les matériaux de démolition:

Les débris et matériaux issues d'une démolition peuvent être réutilisés dans le remblai. Nous pouvons citer entre autre, les briques, les parpaings, les blocs de ciment, les mortiers...Cependant certains éléments doivent être enlevés à savoir, les éléments putrescibles, les ferrailles etc....

I.1.4 Les travaux en remblai:

Il existe 2 types de remblais :

- ✓ les remblais ponctuels qui consistent à refermer des tranchées, à boucher des petits trous...
- ✓ et les remblais massifs qui consistent à boucher de grandes fouilles, à combler des zones naturellement en cuvette. Il est conseillé de remblayer et de compacter par couches de 20 à 30 cm.

I.1.5 Les matériaux de remblais:

Les matériaux utilisés pour les corps de remblai se répartissent en trois catégories : les sols, les matériaux rocheux et les sous-produits industriels.

I.1.5.1 Les sols :

Les sols sont des matériaux naturels provenant de la destruction mécanique et/ou physico-chimique des roches. Ils sont constitués de grains de dimensions très variables, de quelques micromètres à quelques décimètres, Les possibilités d'emploi d'un sol pour la construction des remblais sont contrôlées par deux éléments essentiels : la nature et l'état hydrique. On entend par nature du sol les caractéristiques du sol qui ne varient pas, ou très peu, lorsqu'on le manipule, que ce soit à l'extraction, au transport, à la mise en remblai ou au compactage.

I.1.5.2 Les matériaux rocheux :

Dans cette catégorie nous pouvons distinguer deux types de matériaux : les matériaux sains, qui se caractérisent par le fait que leur granulant peut être considérée comme travaux ou au cours de la vie de l'ouvrage. Comme matériaux rocheux non évolutifs, nous définitive une fois l'extraction réalisée, et les matériaux rocheux évolutifs. Le caractère évolutif du matériau est caractérisé par le changement de structure sous l'effet des engins au cours des travaux ou au cours de la vie de l'ouvrage. Comme matériaux rocheux non évolutifs, nous pouvons citer le granite et le basalte, et comme matériaux évolutifs, nous pouvons citer les marnes et la craie. Il faut toutefois être conscient qu'il existe le plus souvent une transition continue entre matériaux sains et matériaux évolutifs.

I.1.5.3 Les sous-produits industriels :

Ce sont des matériaux particuliers dont l'emploi en remblai peut dans certains cas se révéler intéressant du point de vue technique et économique, à condition de ne pas nuire à l'environnement. Toutefois, les critères au travers desquels il convient d'examiner chaque famille de matériaux

entrant dans cette catégorie pour en déduire ses possibilités d'emploi sont à la fois divers et spécifiques à la famille de matériaux considérée.

I.1.6 Conditions d'utilisation des matériaux en remblai

Les conditions d'utilisation des matériaux en remblai sont définies en 6 rubriques :

1. Extraction
2. Action sur la granularité
3. Action sur la teneur en eau
4. Traitement
5. Compactage
6. Hauteur de remblai.

I.1.6.1 Extraction :

Le mode d'extraction des déblais peut interférer sensiblement sur la qualité des remblais.

I.1.6.1.1 Extraction en couche :

L'extraction en couche (épaisseur 0,1 à 0,3 m) permet une bonne fragmentation et un tri relatif des différentes couches de matériaux.



Figure I.2 : Extraction en couche.

I.1.6.1.2 Extraction frontale :

Pour l'extraction frontale, on observe des effets exactement opposés. Elle offre en plus la possibilité dans des formations stratifiées, de sélectionner le niveau présentant la meilleure portance pour le réserver à la circulation des engins de transport.



Figure I.3 : Extraction frontale.

I.1.6.1.3 Action sur la granularité :

On distingue deux actions qui permettent d'agir sur la granularité :

I.1.6.1.3.1. Elimination des éléments :

- a) **> 800 mm** : Cette valeur constitue une limite maximum des blocs admissibles dans le corps d'un remblai compte tenu des performances des compacteurs les plus puissants actuellement.
- b) **< 250 mm** : Cette valeur constitue la dimension maximale des blocs permettant encore un malaxage du sol avec un agent de traitement.



Figure I.4 :Action sur la granularité.

I.1.6.1.3.2 Fragmentations complémentaires après extraction :

Cette modalité s'applique aux matériaux rocheux évolutifs. Les moyens utilisables pour agir sur la granularité sont variés : pétardage, concassage, utilisation d'engins spéciaux.



Figure I.5:Fragmentation complémentaire après extraction.

I.1.6.2Action sur la teneur en eau :

2 grands principes :

- ❖ l'aération;



Figure I.6 :Aération.

❖ l'humidification.



Figure I.7 : humidification.

I.1.6.3 Traitement :

Le traitement s'effectue :

- avec de la chaux :



Figure I.8 : Traitement à la chaux.

- avec d'autres réactifs (ciments, cendres volantes, laitiers ou autres sous-produits industriels) :



Figure I.9 : Traitement réactifs.

Le traitement d'un sol consiste à mélanger différents produits tels que la chaux (éventuellement sous forme de lait de chaux), des liants hydrauliques (ciment, cendres volantes, laitiers, ...) ou des correcteurs granulométriques, pour conférer aux matériaux des performances mécaniques supérieures à celles qu'ils possèdent à l'état naturel, et durables tout au long de la vie de l'ouvrage. Dans le cas du traitement avec de la chaux ou des liants hydrauliques, il convient :

- ↪ de déterminer par une étude de laboratoire le choix du produit de traitement, les dosages nécessaires, pour atteindre les performances mécaniques recherchées et la plage de teneur en eau du mélange sol-liant.
- ↪ de s'assurer de la pérennité des liaisons engendrées par le traitement.
- ↪ les modalités de traitement pour une couche de forme seront beaucoup plus rigoureuses que celles acceptables pour un traitement en remblai.

I.1.6.4 Compactage :

Il s'agit d'une donnée qualitative sur le niveau de compactage requis par les différents matériaux. Trois niveaux d'énergie :

- Faible.
- Moyen.
- Intense.



Figure I.10 : Compactage.

I.1.6.5 Hauteur du remblai

L'utilisation des matériaux est fonction de la hauteur du remblai. On considère les remblais :

- ➔ de faibles hauteurs, limitées à 5 m.
- ➔ de hauteur moyenne, limités à 10 m.
- ➔ de grande hauteur, supérieurs à 10m.



Figure I.11 : Remblai d'hauteur moyenne

I.2 Problèmes posés par la construction des remblais sur sols compressibles:

La construction des remblais sur sols compressibles pose souvent des problèmes difficiles. Il faut d'abord éviter de provoquer la rupture du sol porteur qui peut compromettre la suite de la construction et créer des dommages importants sur les structures avoisinantes. Il se pose ensuite le problème de tassements, aux effets plus lents mais tout aussi néfastes. Lorsque ces tassements sont importants et qu'ils n'ont pas été pris en considération dès le début de la construction, ils peuvent :

- Entraîner une déformation du remblai le rendant inapte à son usage initial ;
- Provoquer des poussées parasites sur des structures enterrées proches (pieux, palplanches, etc.) jusqu'à leur rupture.

I.2.1 Problèmes de stabilité :

La mise en place d'un remblai sur sol mou entraîne une augmentation des contraintes au sein de ce sol. Si cet accroissement des contraintes dépasse un seuil critique qui dépend des caractéristiques mécaniques du sol, ce dernier se rompt en cours de construction en provoquant un affaissement important et brutal du remblai. Parallèlement à cet affaissement, il se produit des déformations du sol porteur qui se traduisent par des soulèvements importants du terrain naturel autour du remblai.

I.2.2 Problèmes de tassement : [01]

À l'inverse de la rupture par défaut de stabilité, le tassement est une déformation lente du sol sous le poids du remblai qui se traduit:

- ↳ Au centre du remblai par un enfoncement vertical ; Sous l'emprise du remblai, par un enfoncement vertical combiné à un déplacement latéral de sol de fondation ;
- ↳ Hors de l'emprise du remblai, par un déplacement latéral de sol de fondation jusqu'à une distance fonction de l'épaisseur de sol compressible.

Les déplacements verticaux ont couramment une amplitude de plusieurs dizaines de centimètres. Pour les couches très molles ou de forte épaisseur, cette amplitude peut atteindre plusieurs mètres. Ces déplacements sont plus importants dans l'axe du remblai que vers les crêtes de talus, ce qui provoque une déformation de la plate-forme. Les déplacements horizontaux sont généralement plus faibles que les déplacements verticaux, le rapport entre les deux étant notamment fonction du coefficient de sécurité, de la géométrie du remblai et de l'épaisseur des sols mous. Néanmoins, des déplacements horizontaux de plusieurs dizaines de centimètres ont été observés. La vitesse des tassements est variable, en fonction de la nature des sols compressibles, de leur épaisseur et de la présence des couches drainantes.

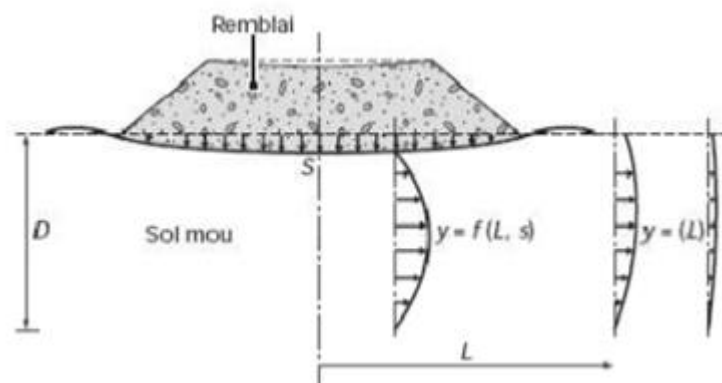


Figure I.I2 :Schéma du tassement et du déplacement latéral du sol de fondation.

I.3 Les remblais de grande hauteur :

Si la hauteur du remblai dépasse 15m, les remblais présentent des particularités techniques qui ne sont plus totalement couvertes par les règles techniques applicables aux terrassements routiers (GTR en France) : Les grands remblais sont plus qu'un empilement de couches bien compactés. Leurs déformations peuvent être importantes et évoluer au cours du temps.

Ils sont souvent hétérogènes parfois constitués de matériaux évolutifs, et toujours soumis à des circulations d'eau.

Le «Guide technique de réalisation des remblais et des couches de forme» propose des règles précises pour définir les sols acceptables en remblai ainsi que les méthodes de mise en œuvre (essentiellement le compactage) à respecter pour s'assurer d'un niveau de qualité démontré comme satisfaisant par l'expérience. Toutefois les précautions du GTR conduisent implicitement à définir les paramètres jugés nécessaires et suffisants pour assurer la qualité du remblai au niveau élémentaire (en fait, au niveau d'une couche remblayée durant un poste), mais ne donne pas d'indications sur la conception globale du remblai (interactions entre couches élémentaires, conditions aux limites vis-à-vis des actions de l'environnement, etc.) conduisant à définir les pentes de talus, les dispositifs de drainage les précautions à prendre dans le cas de sols hétérogènes. Ces dernières indications sont généralement assez secondaires pour des remblais ne dépassant pas une hauteur moyenne, car les dimensionnement correspondant sont le plus souvent déduits de l'expérience locale des géotechniciens sans étude consistante. C'est pourquoi le GTR est considéré comme le document de référence pour des remblais n'excédant pas une quinzaine de mètres de hauteur environ.



Figure I.13: Exemple d'ouvrages transversaux dans un grand remblai.

CHAPITRE DEUXIEME

METHODES D'ANALYSES DE LA STABILITE

Analyse de la Stabilité des Remblais

II.1. Notion de coefficient de sécurité:

Le principe de calcul de la stabilité des pentes consiste à déterminer le coefficient de Sécurité F , qui permet d'apprécier la marge de sécurité vis-à-vis de la rupture.[02]

Pour déterminer le facteur de sécurité F par lequel il faut diviser la résistance de la surface de glissement pour que la masse potentiellement stable soit à la limite de l'équilibre. On distingue deux manières différentes d'utiliser les méthodes de calcul:

- ❖ Dans la première, le glissement a déjà eu lieu, il s'agit d'une valeur de F inférieure ou égale à 1, dans ce cas la surface exacte est connue et on cherche à déterminer, pour $F=1$, les caractéristiques correspondantes.
- ❖ La deuxième, la plus fréquente, consiste à déterminer la marge de sécurité disponible et adopter les solutions adéquates pour améliorer la sécurité de l'ouvrage en répondant à des exigences en fonction de l'emploi des talus.

Pour évaluer la stabilité d'une pente, l'ingénieur doit choisir entre plusieurs définitions du coefficient de sécurité, ce coefficient peut être un rapport de forces, de moments, de grandeurs par rapport à une grandeur limite comme le montre le (tableau II.1):[03]

Tableau II.1 : Différentes définitions d'un coefficient de sécurité, LAMBE [1973]

Definition	Formule
Rapport de contraintes	$F = \tau_{max} / \tau$
Rapport de forces	$F = E_{résist} / E_{moteur}$
Rapport de moments	$F = M_{résist} / M_{moteur}$
Rapport de grandeurs	Par ex : H / H_{max}

Si $F > 1$, il n'y a pas rupture; si $F < 1$, il y a rupture; si $F = 1$, il y a équilibre limite.

II.2. Méthodes de calcul de stabilité des pentes:

Les méthodes de calcul de stabilité des terrains sont basées sur la constatation suivante: lorsqu'il y a glissement de terrain, il y a séparation d'une masse du sol du reste du massif et son glissement se fait suivant une surface de rupture. Ayant défini une surface de rupture « S », on étudie la stabilité de la masse (1) mobile par rapport au massif (2) qui est fixe (Figure II-1).

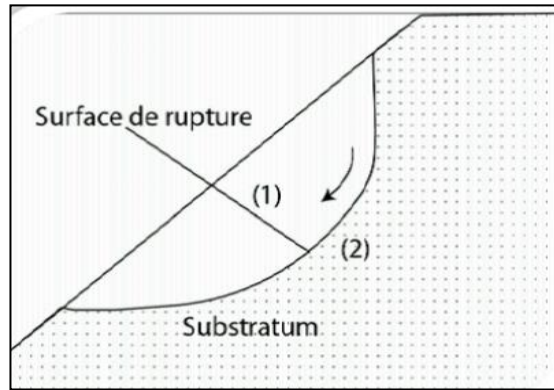


Figure II.1: Surface de rupture.

Les principales méthodes de calcul de la stabilité des talus sont :

- ❖ Les méthodes basées sur l'équilibre limite.
- ❖ Calculs à l'état limite.
- ❖ Les méthodes du calcul en déformation.

II.2.1. Ruptures planes ou multi-planaires (calculs à l'équilibre limite):

Dans le cas de certains versants naturels, une couche ou une interface « guide » le glissement (cas de formations meubles reposant sur un substratum, par exemple): la surface de rupture est alors à peu près plane. Le modèle de calcul est celui d'un massif de sol infini reposant par une interface plane sur un substratum, avec un écoulement parallèle à la pente.

La figure II-2 représente une tranche de sol et les forces qui lui sont appliquées : W le poids du bloc de sol considéré. V et H les efforts sur les coté du bloc, N et T les réactions normale et tangentielle à la base du bloc, U1 l'effort du à la pression d'eau latérale, et U l'effort du à la pression d'eau à la base. Compte tenu de l'hypothèse de pente infinie, on peut admettre que V= 0 et que H et U1 s'équilibrent de part et d'autre. En écrivant que la résultante des forces appliquées est nulle, on peut calculer N et T, ainsi que le coefficient de sécurité $F_s = T_{max}/T$.

Le critère de rupture de Coulomb s'écrit : $T_{max} = c' \frac{dx}{\cos \beta} + (N - U) \times \tan \phi'$

On obtient l'expression suivante pour **F**: $F = \frac{2}{\sin 2\beta} \frac{c'}{\gamma} + \frac{(\gamma h - \gamma_w h_w)}{\gamma h \times \tan \beta} \times \tan \phi'$

Selon le type de matériau et les conditions hydrauliques, cette expression se simplifie :

✓ Pour un matériau purement frottant :

- en l'absence d'eau : $F = \frac{\tan \phi'}{\tan \beta}$
 - lorsque la nappe affleure en surface ($h_w = h$): $F = \left(1 - \frac{\gamma_w}{\gamma}\right) \frac{\tan \phi'}{\tan \beta}$
- Ce qui donne, pour un sol courant ($\gamma = 20 \text{KN/m}^3$) :

$$F = \frac{1 \tan \phi'}{2 \tan \beta}$$

✓ Pour un matériau présentant un comportement purement cohérent :

$$F = \frac{2}{\sin 2\beta} \frac{c_u}{\gamma}$$

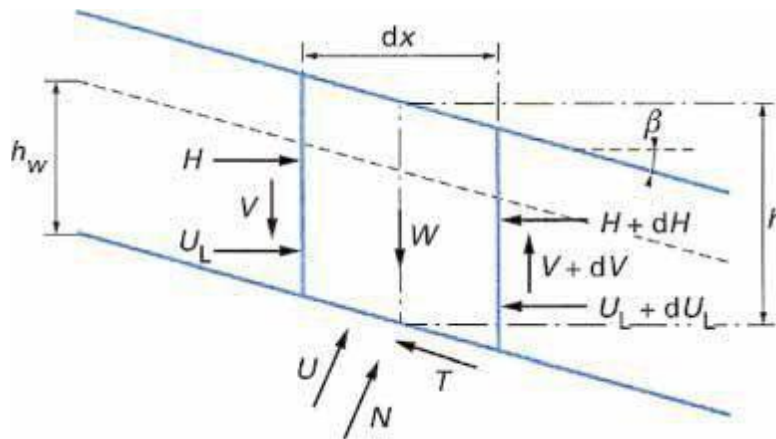


Figure II.2 : Les forces appliquées sur une tranche.

II.2.2. Ruptures rotationnelles (calculs à l'équilibre limite):[03]

Dans des terrains plutôt meubles et homogènes, les surfaces de rupture observées seront souvent circulaires en deux dimensions et ellipsoïdales en trois dimensions, la théorie du calcul à la rupture permet de montrer que pour un terrain homogène la forme théorique est en fait une spirale logarithmique (en 2 dimensions).

La plupart des calculs à l'équilibre limite considèrent que le problème est bidimensionnel nous examinerons dans ce qui suit deux types de méthodes : une méthode dite globale qui permet de déterminer le coefficient de sécurité d'un talus homogène et isotrope et les méthodes de tranches qui permettent d'effectuer des calculs pour une géométrie plus complexe.

II.2.2.1. Méthode globale:

Il est à noter que les premières indications sur la stabilité globale d'un massif homogène peuvent être données à partir de la méthode globale. Cette méthode nous permet aussi d'énumérer d'une manière générale toutes les forces qui peuvent entrer en jeu en sollicitant le corps en question.

La méthode globale consiste à ce que le massif soit homogène et isotrope et il est défini par les caractéristiques suivantes : C , ϕ et γ , si le milieu est aquifère la pression interstitielle U se rajoute à ces paramètres (G. Filliat, 1981 ; J. Costet et G. Sanglérat, 1983).[04]

II.2.2.2. La méthode des tranches:

C'est une méthode suédoise due à Peterson (1916), elle a subi plusieurs adaptations au fil des années tel que son développement par Fellenius en 1927 pour les ruptures circulaires, par Bishop en 1954 et en fin elle a été étendue aux ruptures non circulaires par Nouveiller en 1956.

La méthode des tranches consiste à diviser un volume instable en un certain nombre de tranches verticales et à étudier l'équilibre de chaque tranche indépendamment sur la ligne de rupture, sous l'action des forces et des moments qui la sollicitent. En général, cette méthode peut prendre en compte un maximum de complexités : surface topographique de forme quelconque, surface de rupture non circulaire, hétérogénéité des terrains, forces extérieurs quelconque (charge supplémentaire au talus etc.), écoulement des eaux souterraines.

Elle peut être alors bien adaptée à l'étude des versants naturels qui sont généralement des cas complexes.

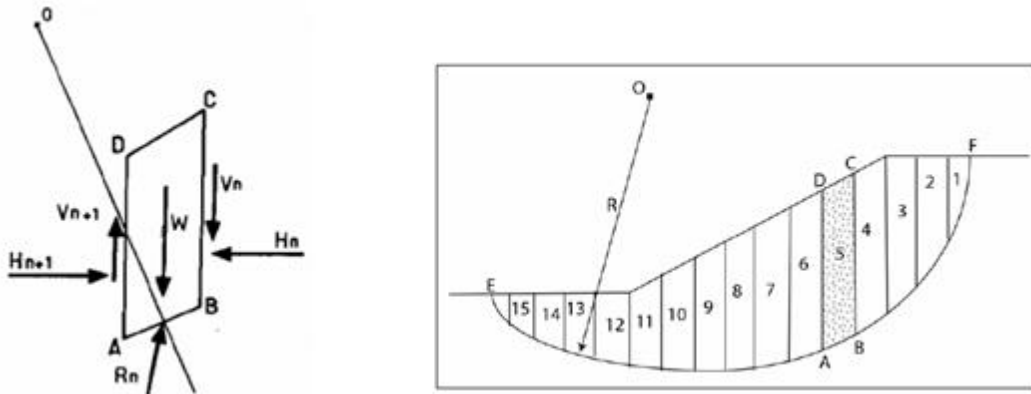


Figure II.3 : Découpage d'un talus en tranches et les forces agissantes sur une tranche.

II.2.2.2.1. Méthode des tranches de Fellenius:

C'est la méthode la plus simple pour l'analyse de stabilité des talus. Considérons un talus constitué d'un certain nombre de couches de sols de caractéristique différentes : c_i, ϕ_i et γ_i . Fellenius suppose que la ligne de glissement soit circulaire, on veut vérifier la stabilité. La méthode consiste à découper le volume du sol concerné (compris dans l'arc EMF) en un certain nombre de tranches limitées par des plans verticaux.

Le coefficient de sécurité est donné par le rapport :

$$F_s = \frac{\sum EF \text{ des moments résistant maximum}}{\sum EF \text{ des moments moteurs}}$$

II.2.2.2.2. Méthodes des tranches de Bishop simplifiée:[05]

En 1954, Bishop a apporté une amélioration à la méthode de Fellenius, et ceci en considérant que pour tout tranche étudiée, $V_n - V_{n+1} = 0$ ce qui permet de considérer les efforts inter-tranches horizontaux uniquement.

Le coefficient de sécurité F, s'exprime par cette méthode comme suit :

$$F = \frac{1}{\sum_{i=1}^{i=n} w \sin \alpha_i} \sum_{i=1}^{i=n} \frac{(w_i - u_i b_i) \tan \phi_i + c_i b_i}{\cos \alpha_i + \sin \alpha_i \frac{\tan \phi_i}{F_s}}$$

Tout les termes sont connus et F est calculé par itérations successives, la première itération est faites en adoptant come valeur F_{s0} , le coefficient de sécurité obtenue par la méthode de Fellenius. La méthode simplifiée de Bishop est généralement utilisée avec traitement par ordinateur. Pour connaitre F réel d'un talus, il faut définir le cercle donnant la valeur minimale de F, c'est en effet, le long de cette surface de glissement que la rupture se produira.

II.3. Autres méthodes

Basées sur des hypothèses différentes : il s'agit, entre autres des méthodes dites de :

- **Janbu** (ligne d'action des forces inter-tranche située au 1/3 de la hauteur des tranches) ;

- **Spencer** (rapport de la composante horizontale à la composante verticale des forces inter-tranches constant) ;
- **Morgenstern et Price** (rapport de la composante horizontale à la composante verticale des forces inter-tranches = $\lambda f(x)$) ;
- **Sarma** (introduction d'un paramètre supplémentaire : accélération verticale) ;
- **Perturbations** (méthode proposée par Raulin du LCPC).

II.4. Méthode du calcul en plasticité:

La méthode des éléments finis permet de discrétiser le plan vertical du talus en des éléments caractérisés par un comportement élasto-plastique, et à propriétés physiques variable dans l'espace. Cette méthode ne tient pas compte de la notion du facteur de sécurité et se propose d'évaluer les contraintes et déformation aux nœuds des éléments.

Le calcul peut être mené par tout programme général d'éléments finis, ou avec le logiciel spécialisé dans la modélisation géotechnique, tel que le Plaxis, César.

TROISIEME CHAPITRE

ANALYSE GÉOSTATISTIQUE

Analyse Géostatistique

III.1 L'histoire de la géostatistique:[06]

Le néologisme "géostatistique" a été inventé par Georges Matheron en 1962. Le préfixe "géo" fait référence au domaine des sciences de la terre, qui est historiquement celui où la géostatistique est développée. Les champs d'application actuels concernent des domaines très variés (géologie minière, hydrogéologie, climatologie, sciences sociales, ... etc.). La désinence "statistique" se réfère à l'utilisation de méthodes probabilistes.

L'originalité de la géostatistique par rapport à la statistique classique est la prise en compte de la dépendance entre les observations lorsque celles-ci sont situées dans l'espace. Toutefois, les méthodes géostatistiques ne sont pas exclusivement probabilistes : il existe une branche, connue sous le nom de "géostatistique transitive", qui ne fait pas appel au concept des processus aléatoires (Xavier Emery, 2001). La géostatistique est connue depuis près de 40 ans dans les mines d'or du Witwatersrand où Daniel Krige proposa une correction statistique à la manière traditionnelle d'estimer la teneur d'un bloc de minerai à partir d'un nombre limité d'échantillons pris autour du bloc à exploiter. La théorie était formulée 10 ans plus tard par Georges Matheron (1971), qui introduisit un outil pour analyser la continuité spatiale des teneurs appelé " le variogramme " et une méthode d'estimation basée sur le variogramme appelée " le krigeage ". L'avenir de la géostatistique semble brillant. Avec toutes les expériences et les développements des trente dernières années.

III.2 Définition de la géostatistique:

La géostatistique est l'étude des variables régionalisées, à la frontière entre les mathématiques et les sciences de la Terre. Son principal domaine d'utilisation a historiquement été l'estimation des gisements miniers, mais son domaine d'application actuel est beaucoup plus large et tout phénomène spatialisé peut être étudié en utilisant la géostatistique.

MATHERON (1971) définit la géostatistique de la façon suivante : "la géostatistique est l'application du formalisme des fonctions aléatoires à la reconnaissance et à l'estimation des phénomènes naturels".

III.3 Domaines d'application de la géostatistique:

La géostatistique est utilisée dans plusieurs domaines parmi lesquels:

- L'environnement
 - Etude des Sites et Sols pollués (pollution métallique ou organique) ;
 - Etude des hétérogénéités des sites ;
 - Etude de la caractérisation de sols pollués dans le cadre de sites présentant un échantillonnage suffisamment dense.
- Estimation des champs de perméabilité
 - Estimation de la charge et de la transmissivité avec prise en compte des conditions aux limites dans la modélisation. Simulations géostatistiques de la perméabilité et autres ;
 - L'interpolation de la charge est effectuée par la méthode dite de krigeage.

- La Géotechnique
 - Etude de la quantification par simulation des incertitudes sur le comportement de gros ouvrages et Simulation géostatistique de paramètres géotechniques.
- L'agronomie
 - Estimation et cartographie de la pluviométrie, application à la classification de sols, composition granulométrique, chimique, ... des sols.
- La modélisation démographique
 - Géostatistique sur les données de recensement.
- Le pétrole
 - Modélisation géométrique: elle consiste à interpoler les surfaces servant de limites ou de surface de référence pour les unités en tenant compte de toutes les informations disponibles: cotes des toits mesurées aux puits, données de pendage et d'orientation et contraintes d'inégalités, facteurs de forme donnés par les couvertures sismiques. L'interpolation de ces surfaces géologiques doit pouvoir utiliser les données provenant de sondages déviés (ou horizontaux) et prendre en compte la structure géologique.
 - Caractérisation de réservoir : Elaborer des méthodes de simulations conditionnelles des variables pétro physiques (porosité, perméabilité) en accord avec la géologie.
- La santé
 - En épidémiologie et hygiène industrielle.

III.4 Le semi-variogramme:[07]

Le semi-variogramme est un outil servant à décrire la continuité spatiale d'un phénomène. Il repose sur l'idée que deux observations séparées par une faible distance, se ressemblent davantage en moyenne que deux observations séparées par une plus grande distance.

Il existe deux types de semi-variogramme :

- Le semi-variogramme théorique ;
- Le semi-variogramme expérimental.

Soit deux variables aléatoires, $Z(x)$ et $Z(x+h)$ mesurées en 2 points "x" et "x+h", la variabilité entre ces deux points se caractérise par une fonction notée $2\gamma(x, h)$ appelée variogramme.

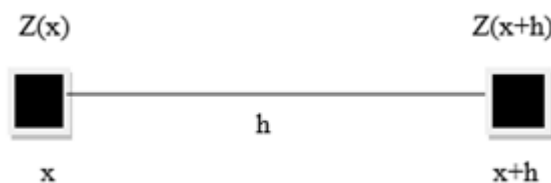


Figure III.1:Représentation schématique des points de mesure de la variable.

III.4.1Le semi-variogramme théorique:

Soit Z la variable considérée distribuée dans un domaine 1D (dimension), 2D ou 3D. La formulation théorique du semi-variogramme $\gamma_{th}(h)$ fait appel à la notion de variance (Var) appliquée à la différence entre deux observations $Z(x)$ et $Z(x+h)$ séparées par une distance h .

Ce qui donne le semi-variogramme théorique, pour tout x dans G :

$$\gamma_{th}(h) = \frac{1}{2}\text{Var} [(Z(X)-Z(X+h))]$$

On peut schématiser l'ensemble des modèles théoriques de semi-variogramme par le graphique de la (Figure III.2). Ce graphique met en avant trois paramètres fondamentaux : l'effet de pépité, le seuil, et la portée. Ces trois paramètres sont brièvement décrits ci-dessous.

III.4.1.1 Effet de pépite :

L'effet de pépite C_0 est défini par la valeur de semi-variogramme au voisinage de l'origine. C'est la limite de cette fonction quand h tend vers 0.

Il représente une discontinuité à l'origine qui est expliquée par d'éventuelles erreurs de mesure ou par la présence d'une microstructure d'une portée plus faible que la maille d'échantillonnage utilisée.

III.4.1.2 La portée :

Dans l'étude de la variabilité spatiale, il est important d'examiner le comportement du semi-variogramme à grande distance. La fonction semi-variogramme peut atteindre une limite à partir d'une certaine distance appelée portée (a). A partir de cette distance il n'y a plus de corrélation spatiale entre les données.

Cette limite est nommée palier et désigne la variance totale $C(0)$. Dans la pratique, la portée est définie par la distance à laquelle le semi-variogramme atteint 95% de la valeur de son palier.

III.4.1.3 Le seuil ou palier : [08]

On appelle seuil du semi-variogramme sa valeur limite pour de grandes valeurs de h . Ce paramètre suscite un intérêt très important dans l'analyse de la régularité des variations locales. En effet, si le seuil d'un semi-variogramme est infini, alors le processus des variations locales n'est pas stationnaire.

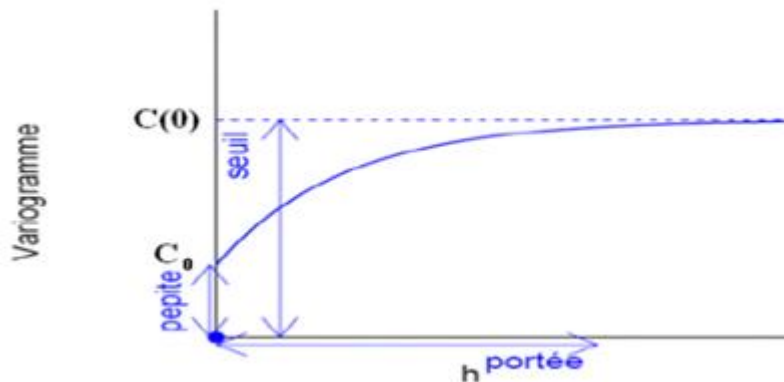


Figure III.2:Schéma type d'un variogramme.

III.4.2 Le semi-variogramme expérimental (γ_e):

Dans la pratique, il n'est pas possible de calculer le variogramme théorique tel qu'il est décrit, car on ne dispose que des échantillons. Pour l'approcher, une expression du semi-variogramme expérimental est plus pratique.

Le semi-variogramme permet de mesurer la variabilité à différentes échelles d'une variable régionalisée $z(x)$, en calculant la différence entre deux échantillons z_1 et z_2 situés en deux points x_1 et x_2 d'un domaine spatial. Cette différence notée γ_e s'écrit :

$$\gamma_e = \frac{(Z_2 - Z_1)^2}{2}$$

Pour voir si l'azimut décrit par les deux points considérés a un effet quelconque, on fait dépendre γ_e de la distance et de l'orientation de la paire de points.

$$\gamma_e = \frac{1}{2} (Z(X) - Z(X + h))^2$$

En formant la moyenne des dissemblances γ_e entre les valeurs pour toutes les $N(h)$ paires de points reliées par un vecteur h donné pour une maille donnée, on obtient la notion de semi-variogramme expérimental.

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_i^{N(h)} [(Z(X) - Z(X + h))^2]$$

Où : N(h) représente le nombre de paires d'observations séparées par la distance h.

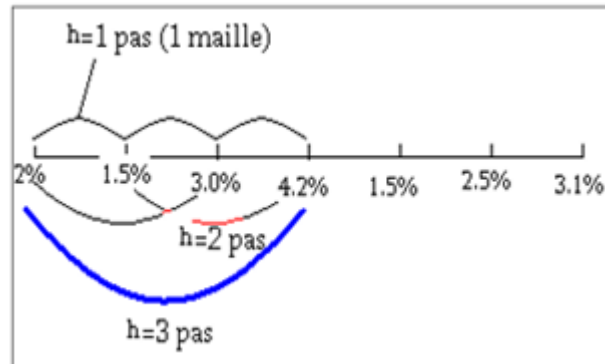


Figure III.3: Schéma de calcul du variogramme expérimental.

On peut aussi calculer le variogramme selon certaines directions spécifiques à l'aide d'une expression particulière du variogramme :

$$\gamma(h, \theta) = \frac{1}{2N(h, \theta)} \sum_i^{N(h, \theta)} [(Z(X) - Z(X + h))^2]$$

Où N (h, θ) : est le nombre de paires de points séparés d'une distance h dans la direction θ .

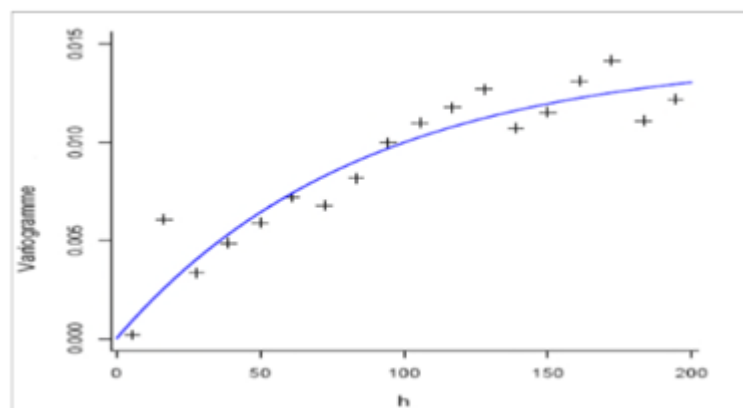


Figure III.4: Ajustement d'un modèle théorique (courbe) à un modèle expérimental (croix).

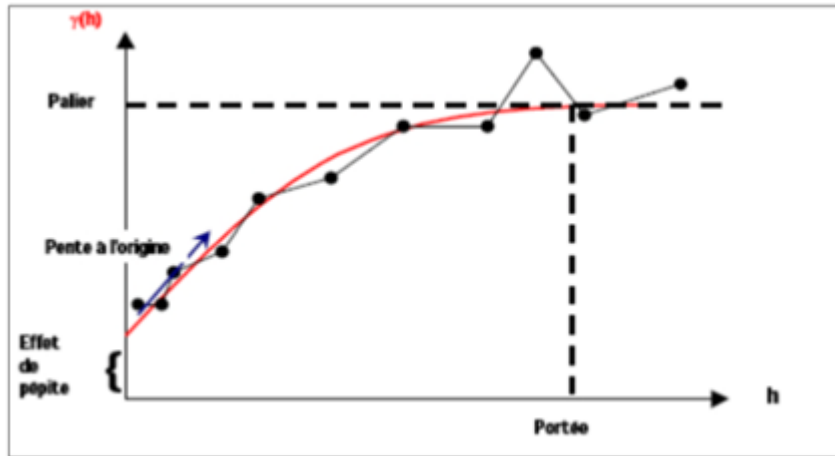


Figure III.5: Graphe d'un variogramme expérimental et son modèle d'ajustement.

III.5 Modèles théoriques de variogramme:

Une fois que le semi-variogramme expérimental a été construit, on passe à l'adaptation du modèle théorique de semi-variogramme aux points obtenus en optimisant le modèle par contre vérification. Le semi-variogramme théorique est recherché par modélisations en utilisant une fonction connue de la nuée variographique. L'objectif est de trouver la courbe théorique qui s'adapte le mieux à la courbe expérimentale.

Les principaux modèles admissibles sont l'effet de pépité, le modèle linéaire, le modèle sphérique, le modèle puissance, le modèle gaussien et le modèle exponentiel. Une combinaison de deux de ces modèles ou plus est également faisable.

III.5.1 L'effet de pépité:

La situation de plus forte irrégularité des variations locales correspond à une absence de dépendances entre des mesures effectuées en des sites différents, ce qui se traduit par l'effet de pépité :

Pour tout $h \neq 0$; $C(h) = 0$, $\gamma(h) = C(0)$.

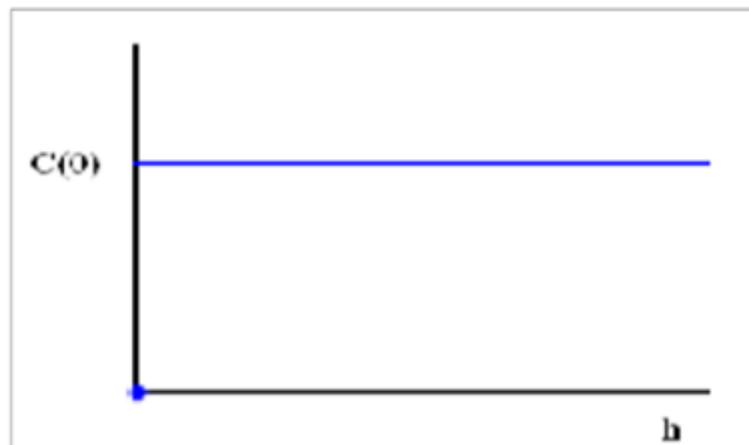


Figure III.6: Semi-variogramme forte irrégularité (pépité pure).

Inversement, la situation théorique de plus grande régularité correspond à des dépendances locales maximales :

Pour tout $h \neq 0$; $C(h) = C(0)$, $\gamma(h) = 0$



Figure III.7: Semi-variogramme grande régularité (pépite pure).

Entre ces deux situations extrêmes, la régularité du processus des variations locales se mesure à la régularité fonctionnelle du semi-variogramme de ce processus au voisinage de 0.

Lorsque le semi-variogramme atteint une limite, on s'intéresse à la valeur de h pour laquelle cette limite est atteinte. En effet, cette valeur, qu'on appelle la portée des variations locales, caractérise l'écart entre les sites de mesures au-delà desquels les dépendances entre les mesures du processus sont nulles.

Les trois modèles suivants constituent trois exemples très classiques de semi-variogramme pour des processus stationnaires se différenciant par leur régularité au voisinage de 0.

III.5.2 Le modèle exponentiel :

L'expression générale du modèle exponentiel s'écrit :

$$\gamma(h) = \gamma_0 + \sigma^2 \left[1 - \exp\left(-\frac{h}{a}\right) \right]$$

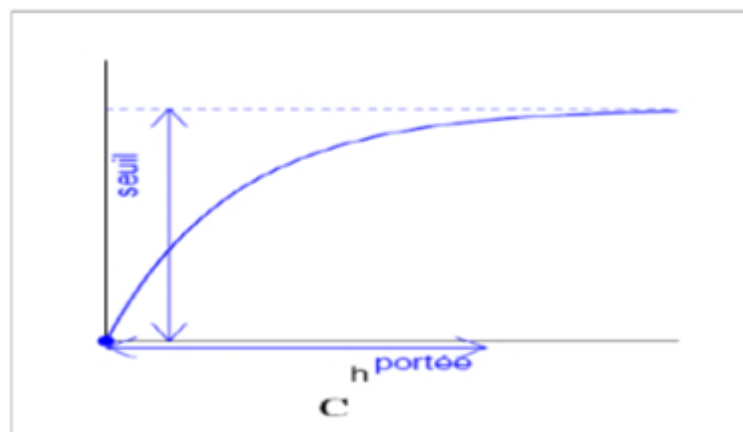


Figure III.8: type d'un modèle de semi-variogramme exponentiel.

III.5.3 Le modèle Gaussien :

L'expression générale du modèle Gaussien s'écrit :

$$\gamma(h) = \gamma_0 + \sigma^2 \left[1 - \exp\left(-\frac{h^2}{a^2}\right) \right]$$

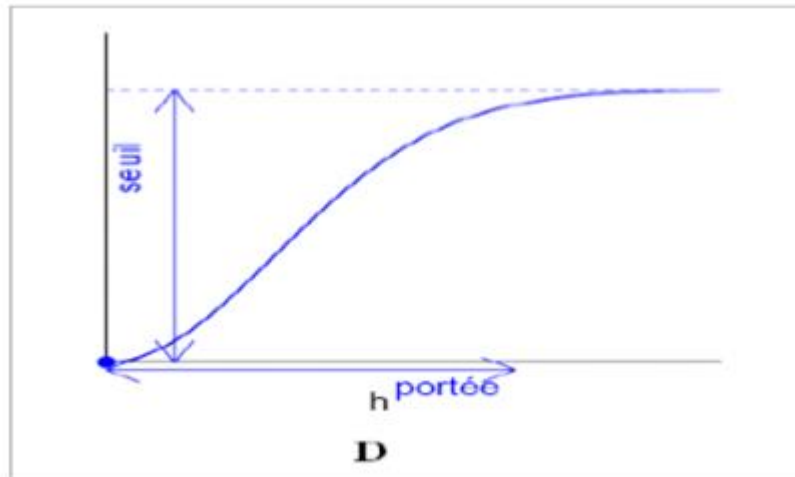


Figure III.9: type d'un modèle de semi-variogramme gaussien.

III.5.4 Le modèle sphérique :

L'expression générale du modèle sphérique (le plus utilisé) s'écrit :

$$\gamma(h) = \begin{cases} c_0 + c \left(\frac{3h}{2a} - \frac{h^3}{2a^3} \right) & 0 \leq h \leq a \\ c + c_0 & h > a \end{cases}$$

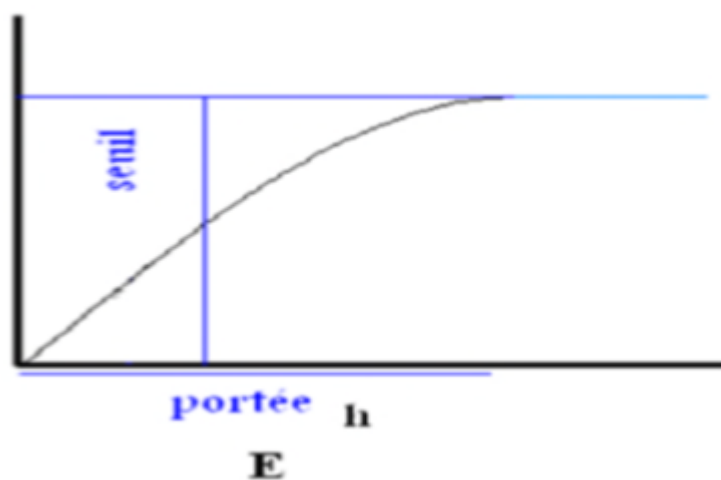


Figure III.10: Type d'un modèle de semi-variogramme sphérique.

III.6 Interpolation:[09]

L'interpolation consiste à utiliser des points avec des valeurs connues ou des points d'échantillonnage pour estimer des valeurs à d'autres points inconnus. Il peut être utilisé pour prédire des valeurs inconnues pour toutes les données de points géographiques, telles que l'altitude, les précipitations, les concentrations de produits chimiques, les niveaux de bruit, etc.

La figure ci-dessous explique le principe d'interpolation numérique, à gauche, un ensemble de données de points contenant des valeurs connues à droite, une trame interpolée à partir de ces points. Les valeurs inconnues sont prédites avec une formule mathématique qui utilise les valeurs des points connus à proximité.

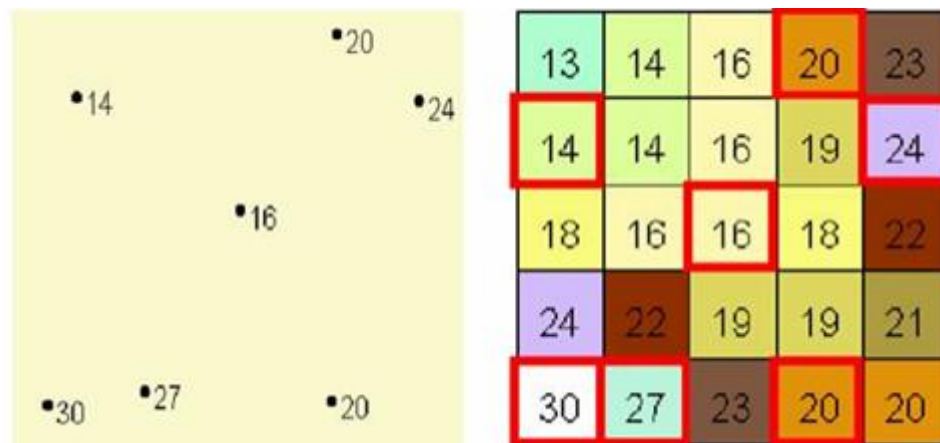


Figure III.11:Principe de l'interpolation numérique

III.6.1 Méthodes d'interpolation déterministes et géostatistique:

Il en existe une multitude, Elles peuvent être classées en 2 catégories de manière générale:

- Les méthodes déterministes/ empiriques / mécaniques;
- Les méthodes statistiques / probabilistes.

Le choix de la méthode adéquate dépend de plusieurs paramètres:

- La connaissance de l'algorithme utilisé :
 - Différence de résultats;
 - Différences d'algorithme;
 - Différence dans le temps de calcul;
 - Différence dans la sensibilité aux erreurs des données de départ.
- Données de départ : points ou lignes ?

III.6.1.1 Les méthodes empiriques:

- ✓ La méthode de l'inverse distance (IDW)
- ✓ Les polygones de Thiessen (Triangles de Delaunay/ Diagramme de Voronoï)
- ✓ La régression sur les coordonnées
- ✓ Les méthodes dites de courbe (spline).

III.6.1.2 Les méthodes statistiques:

- ✓ Le krigeage et le cokrigeage;
- ✓ Les corrélations environnementales;
- ✓ Prévisions à partir de polygones;
- ✓ Les modèles hybrides.

III.7 Le krigeage[10]

Le krigeage est la méthode d'estimation linéaire, sans biais, minimisant la variance d'estimation telle que calculée à l'aide du variogramme pour des données spatialisées dont le covariance spatiale est connue (ou peut être estimée). La variance d'estimation Si Z est la valeur vraie inconnue que l'on cherche à estimer par \hat{Z} , l'erreur commise est $(Z - \hat{Z})$.

Il existe trois types de krigeage :

- le krigeage simple ;
- le krigeage ordinaire ;
- et le krigeage universel.

Le krigeage ordinaire est la méthode la plus générale et la plus couramment utilisée. Il s'agit également de la méthode par défaut. Elle part du principe que la moyenne constante est inconnue. Il s'agit là d'une hypothèse a priori valide, à moins qu'une raison scientifique aille à l'encontre de cette dernière.

La forme matricielle s'écrit sous la forme: $K \cdot \lambda = K_0$

$$\begin{bmatrix} \text{var}(Z_1) & \text{cov}(Z_1, Z_2) & \cdots & \text{cov}(Z_1, Z_n) & 1 \\ \text{cov}(Z_2, Z_1) & \text{var}(Z_2) & \cdots & \text{cov}(Z_2, Z_n) & 1 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ \text{cov}(Z_n, Z_1) & \text{cov}(Z_n, Z_2) & \cdots & \text{cov}(Z_n, Z_n) & 1 \\ 1 & 1 & \cdots & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\text{Avec } \lambda = \begin{bmatrix} \lambda_1 \\ \lambda_2 \\ \vdots \\ \lambda_n \\ \mu \end{bmatrix} \text{ et } k = \begin{bmatrix} \text{cov}(Z_v, Z_1) \\ \text{cov}(Z_v, Z_2) \\ \vdots \\ \text{cov}(Z_v, Z_n) \\ 1 \end{bmatrix}$$

Pour que l'estimateur soit sans biais, il faut que :

$$\sum_{i=1}^n \lambda_i = 1$$

Alors, la solution donnée par : $\lambda = k^{-1} \cdot k_0$

III.7.1 Variance de krigeage :

A pour expression:

$$\sigma_{k0}^2 = \text{var}[z_v] - \lambda \cdot k = \sigma_v^2 - \lambda \cdot k$$

Ou par

$$\sigma_{k0}^2 = \text{var}[z_v] - \sum_{i=1}^{i=n} \lambda_i \text{cov}[z_v, z_i] - \mu$$

III.7.2 Propriétés du krigeage [11]

Les principales propriétés et caractéristiques associées au krigeage sont:

- ✓ Linéaire, sans biais, à variance minimale, par construction.
- ✓ Interpolateur exact. : si l'on estime un point connu, on retrouve la valeur connue.
- ✓ Présente un effet d'écran: les points les plus près reçoivent les poids les plus importants. Cet effet d'écran varie selon la configuration et selon le modèle de variogramme utilisé pour le krigeage. Plus l'effet de pépite est important, moins il y a d'effet d'écran.
- ✓ Tient compte de la taille du champ à estimer et de la position des points entre eux.
- ✓ Par l'utilisation du variogramme, tient compte de la continuité du phénomène étudié (effet de pépite, anisotropie, etc.).
- ✓ Presque sans biais conditionnel. Ceci signifie que lorsqu'on applique une teneur de coupure à des valeurs estimées, on récupérera approximativement la teneur prévue. C'est une propriété très importante pour les mines. Cette propriété implique que l'estimateur utilisé soit plus lisse que la valeur qu'il cherche à estimer, ce qui est le cas pour le krigeage.

QUATRIEME CHAPITRE

OUTILS NUMERIQUE UTILISES

OUTILS NUMERIQUE UTILISES

IV.1 Le Logiciel Geostudio :

IV.1.1 Présentation du Logiciel :

Geostudio: est un logiciel de calcul géotechnique qui permet de traiter les différents problèmes du sol comme le glissement des terrains, le tassement, la consolidation, les infiltrations des eaux dans le corps de la digue d'un barrage et d'autres problèmes liés à la géotechnique. La fenêtre de démarrage du logiciel est schématisée sur la figure IV.1.

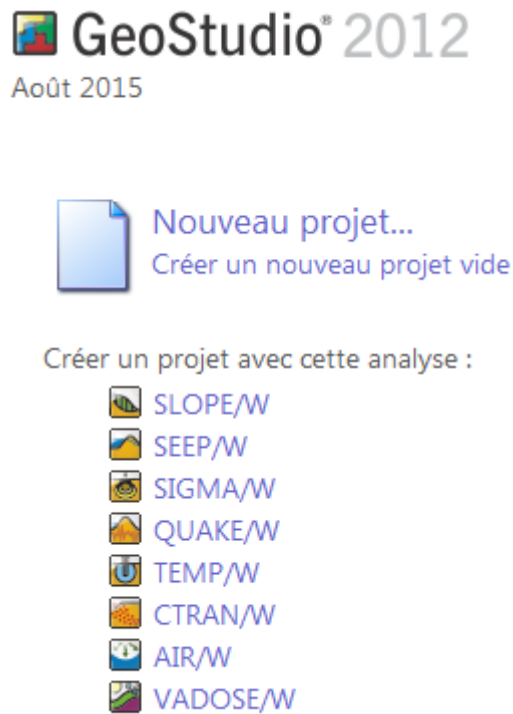


Figure IV.1 : Fenêtre de démarrage du logiciel Geostudio 2012

Le logiciel Geostudio comporte plusieurs modules ou programmes de calculs :

SEEP/W : Permet de calculer les infiltrations des eaux (Par la méthode des éléments finis).

SIGMA/W : Permet d'analyser les problèmes de la relation contraintes –déformations (Par la méthode des éléments finis).

QUAKE/W : Permet de définir le comportement d'un terrain sous l'effet d'un séisme (Par la méthode des éléments finis).

TEMP/W : Permet d'analyser les problèmes géotechniques du sol (Par la méthode des éléments finis). Et autres logiciels.

SLOPE/W : Permet de calculer le coefficient de sécurité d'un talus naturel ou artificiel par les méthodes d'analyses classiques, et c'est le programme qui nous intéresse dans la présente étude.

Le programme de calcul **SLOPE** est un programme d'analyse de la stabilité des pentes, qui permet de calculer un facteur de sécurité en visualisant les résultats graphiques du volume instable correspondant.

Toutes les méthodes de l'équilibre limite de calcul de la stabilité des pentes sont intégrées dans **SLOPE** et entre autres notons la méthode ordinaire ou de FELLENIUS, de MORGENSTERN-PRICE, de JUNBU et celle de BISHOP simplifiée. Elles permettent de calculer un coefficient de sécurité vis-à-vis d'un type de rupture bien défini. Le modèle géométrique est subdivisé en tranches verticales en 2D. Il exécute plusieurs méthodes de recherches automatiques du centre de rotation de la surface de glissement potentiel jusqu'à atteindre le plus faible coefficient de sécurité.

Le module **SIGMA/W** utilise une formulation basée sur des éléments finis pour effectuer des analyses de contrainte et de déformation des structures terrestres. Sa formulation complète contrainte-contrainte permet d'analyser des problèmes simples et très complexes. On peut effectuer une analyse de déformation élastique linéaire simple ou une analyse de contrainte élastique non linéaire hautement sophistiquée, qui peut impliquer des interactions sol-structure, contrainte couplée et réponse à la pression interstitielle, et des considérations de stabilité. Les nombreux modèles de sols constitutifs nous permettent de représenter une large gamme de sols ou de matériaux structuraux. En outre, on peut modéliser la génération et la dissipation de la pression interstitielle dans une structure de sol en réponse à des charges externes.

Ces caractéristiques nous permettent d'analyser presque tous les problèmes de contraintes ou de déformations que vous rencontrerez dans les projets d'ingénierie géotechnique, civile et minière.

IV.5.1.2. Le Fonctionnement du Logiciel :

Le présent logiciel comme tous les autres programmes de calcul sert à fournir des résultats issus d'un nombre défini des paramètres, donc il est nécessaire de suivre les étapes suivantes pour l'achèvement de l'opération de calcul :

✓ Définir:

Cette étape est très importante car on va définir le problème et introduire les différentes données spécifiques au problème en vigueur.

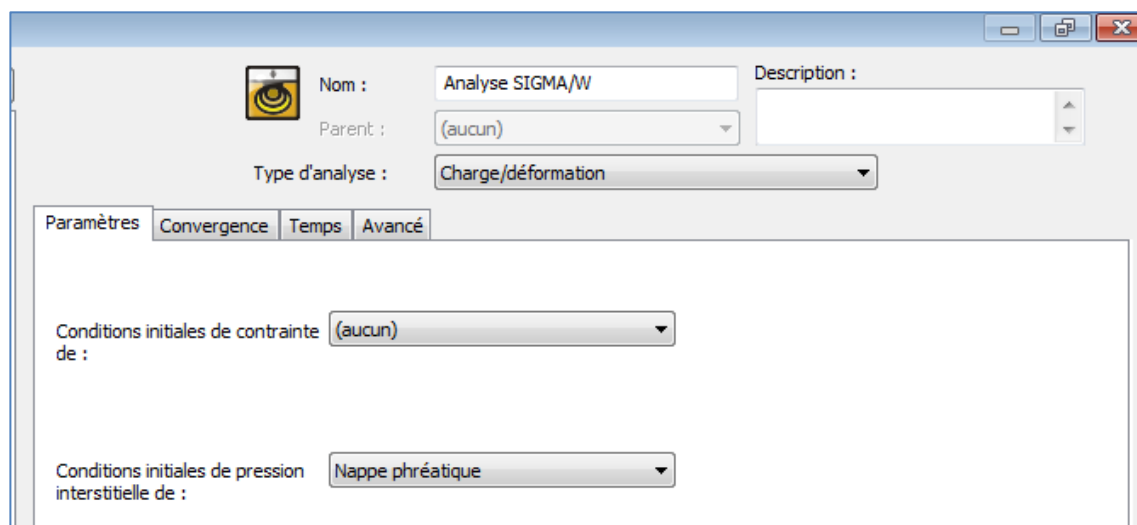


Figure IV.2 : Fenêtre d'analyse du module SIGMA / W

✓ Préférences :

Permet la délimitation de la surface du travail, la définition de l'échelle, la définition des réseaux, la détermination du zoom, la fixation d'axes.

✓ **Entrer et Tracer :**

Permet le l'entrée des points, des régions, des matériaux, la surface de rupture, la ligne piézométrique, les charges comme valeurs ou par dessin à la souris.

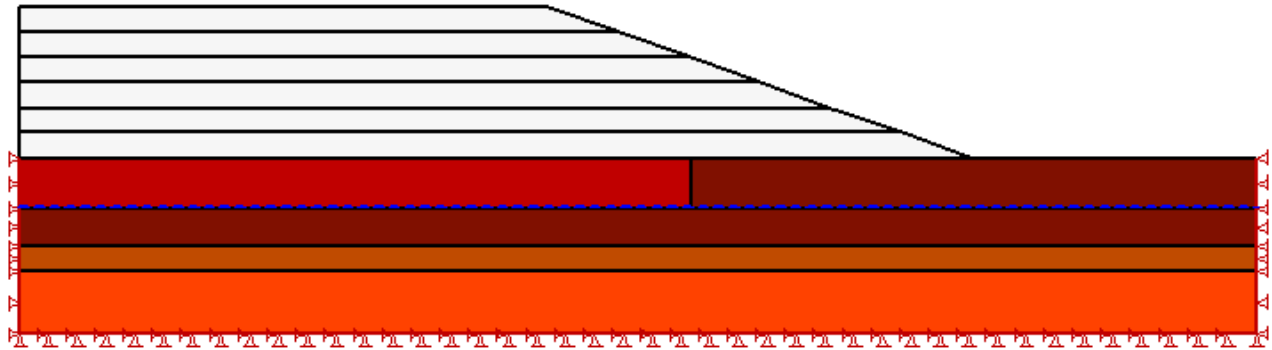


Figure IV.3: Les régions de domaine et le niveau de la nappe phréatique

Permet d'introduire automatiquement à l'aide des tableaux les paramètres géométriques de la pente (coordonnées et couches), les caractéristiques mécaniques des déférentes couches constituant le talus, des conditions complémentaires nécessaires pour le calcul, le niveau de la nappe, de sélectionner les déférentes méthodes de calcul, les surcharges, l'effort sismique confortements.

L'interface de saisie des propriétés des matériaux est présentée dans une fenêtre. Elle contient les champs suivants :

- Nom : Remblai
- Couleur : Définir... (avec un bouton de couleur orange)
- Modèle de matériau : Mohr-Coulomb
- Base (onglet sélectionné) : Succion, Enveloppe R, Liquéfaction, Avancé
- Poids unitaire : 21 kN/m³
- Cohésion : 2 kPa
- Phi : 30 °

Figure IV.4: Introduction des propriétés des matériaux du domaine

SLOPE/W permet de calculer le coefficient de sécurité du talus

✓ **Résolution :**

C'est l'étape de résolution du problème, à l'aide des méthodes classiques et la méthode des éléments finis et a partir des données introduites, on détermine le coefficient de sécurité F_s .

Lorsque le problème est complètement défini, démarrez le processus d'analyse dans la fenêtre **Solve Manager**.

Le gestionnaire de solvabilité affiche la progression de la solution, vous permettant d'annuler ou d'arrêter / redémarrer si nécessaire.

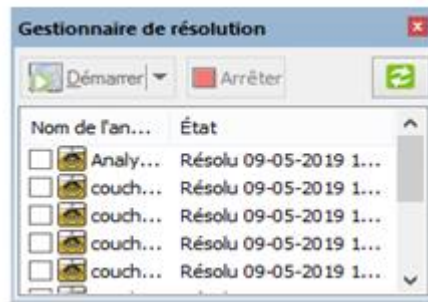


Figure IV.5 : Fenêtre du Gestionnaire de résolution.

✓ **Résultats :**

C'est l'étape permet de traduire et afficher les différents résultats sous une forme graphique.

IV.5.1.3 Spécificité de Sigma/W « Séquençage de construction par étapes » :

SIGMA/W peut être utilisé pour simuler des séquences ou des étapes de construction. Dans la terminologie des éléments finis signifie ajouter ou supprimer des éléments du maillage.

Dans **SIGMA / W**, la terminologie est activée ou désactivation des régions. Le maillage reste le même pour toutes les analyses mais les régions peuvent être activées ou désactivées simuler, par exemple, le placement du remblai ou l'enlèvement du sol pour créer une excavation.

✓ **CONCEPTS DE BASE DE SIGMA/W :**

SIGMA / W peut enchaîner une série d'analyses. Toutes les analyses peuvent être séquentielles en attribuant analyse une durée dans le temps pour former une ligne de temps continue. L'heure de début d'une analyse est l'heure de fin de l'analyse précédente.

Les régions sont activées ou désactivées pour chaque analyse, en affectant un matériau à une région où en supprimant matériel d'une région. Les conditions aux limites sont uniques à chaque analyse.

Les éléments structurels sont ajoutés en attribuant des propriétés de poutre ou de barre à une ligne ou sont supprimés en supprimant les propriétés du faisceau et de la barre à un stade particulier.

✓ **PLACEMENT DE REMPLISSAGE :**

Considérons le cas de la construction d'un remblai en plaçant une série d'ascenseurs. Le remplissage sera placé dans six ascenseurs. De plus, l'intention est de commencer avec un état de stress connu dans la fondation avant de placer tout remplissage. Donc, un total de 5 analyses est requis comme indiqué par l'arborescence de la Figure IV.5.

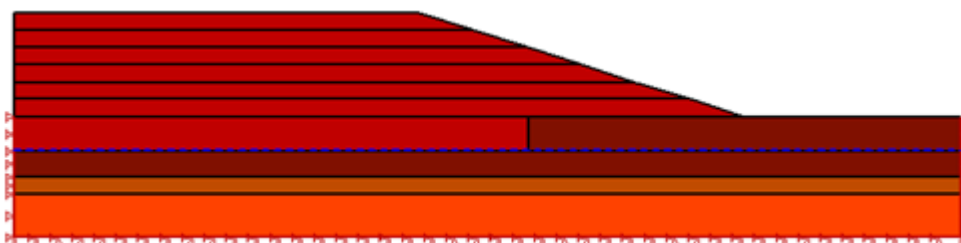


Figure IV.6: Illustration du placement de remblai par des ascenseurs

Le diagramme suivant (Figure IV.7) montre le cas typique de l'arborescence d'une construction de six couches de remblai.

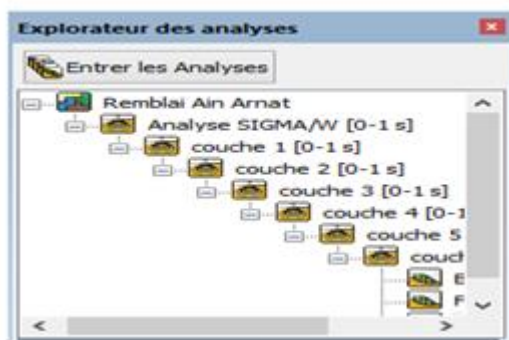


Figure IV.7: Arbre des analyses par des ascenseurs

IV.5.2 Présentation du logiciel ArcGis

Le logiciel ArcGis est un logiciel d'information géographique qui a été développé par la société américaine ESRI.

Composé de plusieurs modules, son utilisation touche tous les domaines scientifique tel que Le bureautique, la cartographie, la topographie, le traitement professionnels et technique des images, les transformations mathématiques, les calculs d'intégrales et de surface, la résolution de tous genre d'équations, les statistiques, la géostatistique etc.

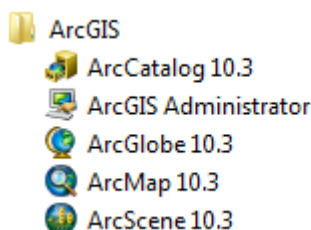


Figure IV.8: Arborescence du logiciel ArcGIS 10.3

IV.5.2.1. ArcGlobe

ArcGlobe fait partie de l'Extension ArcGIS 3D Analyst. Cette application est généralement conçue en vue d'une utilisation avec des jeux de données très volumineux et permet la visualisation uniforme de données d'entité et raster. Elle est basée sur un affichage global, toutes les données étant projetées dans une projection Cube globale et affichées à différents niveaux de détails, organisés en tuiles. Pour obtenir des performances maximales, mettez en cache vos données, ce qui permettra d'organiser et de copier les données source dans les niveaux de détails tuilés. Les entités vectorielles sont généralement rasterisées et affichées d'après le niveau de détail associé, ce qui permet une navigation et un affichage très rapides.

IV.5.2.2. ArcScene

ArcScene est une visionneuse 3D bien adaptée à la génération des scènes de perspective qui vous permettent de naviguer et d'interagir avec vos données vectorielles et raster 3D. Basé sur OpenGL, ArcScene prend en charge une cartographie de texture et une symbologie linéaire 3D complexes, ainsi que la création de surfaces et l'affichage de TIN. Toutes les données sont chargées en mémoire, ce qui permet des fonctionnalités de navigation, de déplacement et de zoom relativement rapides. Les entités vectorielles sont rendues comme vecteurs et les données raster sont affichés avec une résolution réduite ou configurées avec un nombre fixe de lignes/colonnes que vous définissez.

IV.5.2.3. ArcMap

ArcMap, application centrale utilisée dans ArcGIS. ArcMap est l'application où vous affichez et explorez les jeux de données SIG pour votre zone d'étude, où vous attribuez des symboles et où vous créez des mises en page de carte en vue de l'impression ou de la publication. ArcMap est aussi l'application que vous utilisez pour créer et modifier des jeux de données.

ArcMap représente les informations géographiques sous forme d'un ensemble de couches et autres éléments dans une carte. Les éléments cartographiques communs d'une carte incluent le bloc de données contenant les couches de carte pour une étendue donnée, une barre d'échelle, une flèche nord, un titre, un texte descriptif, une légende des symboles, pour ne citer que quelques exemples.

L'outil principal d'ArcMap utilisé en statistique et géostatistique est analyse géostatistique nommé "Geostatistical Analyst".

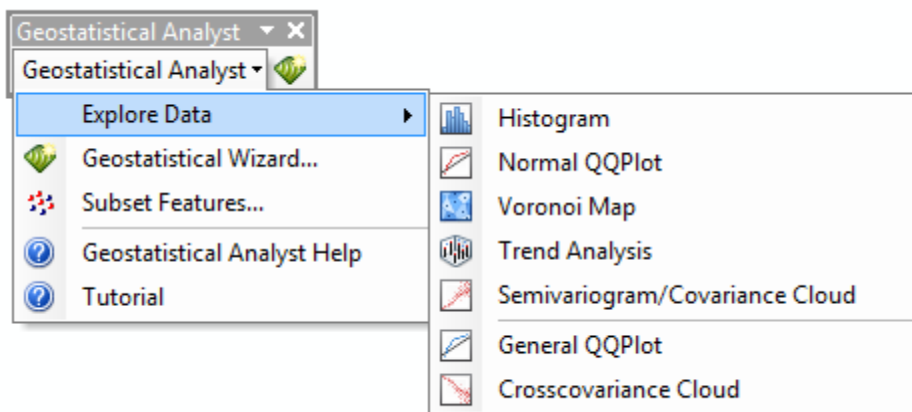


Figure IV.9: Menu "Geostatistical Analyst" d'ArcMap

DEUXIEME PARTIE

SIMULATION NUMERIQUE

CINQUIEME CHAPITRE

APPLICATION PRATIQUE A L'ETUDE DE LA STABILITE DU REMBLAI D'AIN ARNAT

APPLICATION PRATIQUE A L'ETUDE DE LA STABILITE DU REMBLAI D'AIN ARNAT

V.1- Présentation Générale Du Site :

Ain Arnat est une commune de la wilaya de Sétif, est traversée par la route nationale 5 et l'autoroute Est-Ouest, deux kilomètres après l'aéroport. Deux routes de wilayas, la W14 à l'ouest de la ville et la W140 à l'est de la ville.

Ain Amat est l'une des vingt daïras que comptent les 60 communes de la wilaya de Sétif, Ain Arnat s'étend sur 202,55 km² et compte une population de 43551 habitants, selon le recensement général de la population et de l'habitat de 2008, avec une densité de population est de 215 habitants par km² sur la ville.



Figure V.1 : Situation de l'aéroport d'Ain Arnat, wilaya de Sétif

La commune d'Ain Amat Située à 1020 mètres d'altitude, cette commune a pour coordonnées UTM (universel transverse MERCATEOR)

X : 709016.00m

Y : 4006231.00m.

La commune est limitée par les communes suivantes avec leurs distances par rapport à Ain Amat :

- aunord:parlacommune d'AinAbessa13.1km(wilaya de
- àl'est:parlacommunedelOuricia11.1km(wilayadeSétif) ;
- ausud:parlacommunedelMezloug8.6km(wilayadeSétif);
- àl'ouest:parlescommunesd'AinTaghroutetKhelil(wilayadeBordjBouArreridj).

V.2- Reconnaissance Du Projet:

L'extension de la piste de l'aérodrome d'Ain Arnat, comporte la construction d'une plateforme en remblai de 900 mètres de longueur et 150 mètres de largeur, sur un remblai dont l'épaisseur varie de 12 à 26 mètres d'épaisseurs, figure V.2.



Figure V.2 : Tronçon de l'extension de l'aérodrome d'Ain Arnat

Le site est une zone vallonnée en pente douce, traversée par un oued, des écoulements d'eaux usées et comporte une source d'eau potable.

Conditions Climatique :

La région d'Ain Amat connaît des variations importantes de températures (de -7.5 à $+40^{\circ}\text{C}$) et des précipitations annuelles moyennes de 401 mm, pour un maximum journalier de 41 mm

Au plan Géologique :

Les terrains appartiennent à la zone des hauts-plateaux et sont constitués par une forte épaisseur d'argiles rougeâtres denses ; Comportant des horizons sableux ou caillouteux.

Des niveaux alluvionnaires constitués de galets et cailloux à matrice argilo-sableuse témoignent du cours ancien de l'oued sous la surface actuelle du terrain naturel.

Au Plan Géotechnique :

Le site du projet a fait l'objet d'une reconnaissance géotechnique comportant treize sondages carottes, équipés de tubes piézométriques, quatorze sondages au pénétromètre statique et quatre sondages pressiométriques, et d'une étude hydrogéologique. L'analyse de ce remblai distingue deux zones A et B sur le site, en fonction de l'épaisseur du remblai, et prévoit le décaissement du terrain naturel sur une profondeur de 1.5 m à 3m, la construction du remblai par phases et diverses dispositions constructives dont une couche drainante de 1.5 m d'épaisseur, des fosses latérales avec protection des pieds des talus, le captage de la source sous le remblai et la déviation de l'oued et des écoulements d'eaux usées.

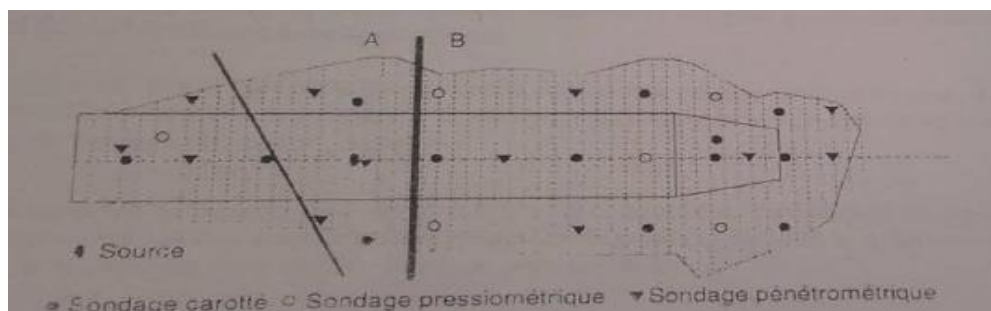


Figure V.3 : Limites des zones A et B et position des sondages sur le site

V.3- Mouvement d'eau dans le Sol :

Eaux superficielles et eaux souterraines :

L'écoulement des eaux sur le site comme ruissellement superficiel ou un écoulement dans les couches superficielles du sol. Dans la mesure où il ne peut y avoir d'écoulement à fort débit dans la masse d'argile dense qui constitue le terrain de fondation de la piste.

La présence d'une source indique qu'il existe un écoulement à quelques mètres de profondeur, dont les sondages donnent à penser qu'il s'effectue dans une couche de galets et cailloux occupant l'ancien lit de l'oued.

La source et les circulations d'eau dans le sol :

La source de l'eau dans le terrain naturel, admet que cette eau ne peut provenir de l'argile dont la perméabilité est trop faible, et qu'elle circule nécessairement dans les alluvions grossières du lit de l'oued ancien, on peut utiliser les indications des différents sondages (carottes, pénétrométriques, pressiométriques) réalisés sur le site.

Captage de la Source et dérivation des écoulements superficiels :

Les solutions envisagées pour, d'une part, capter la source et d'autre part, dériver l'oued et les écoulements d'eaux usées constituent à :

Capter la source sous le remblai et conduire l'eau vers l'extérieur avec un tuyau. Détourner l'oued et les eaux usées dans les fosses latérales du futur remblai.

Le captage de la source sous le futur remblai n'est pas facile à réaliser car les travaux de terrassement risquent de détruire le terrain au voisinage de la source et de perturber l'écoulement de l'eau. Une alternative consisterait à capter l'eau de la source à l'extérieur de l'emprise du projet.

À condition de savoir de quelle façon elle arrive jusqu'à la source, comme évoqué ci-dessus, il est pour cela important de savoir si l'eau provient d'une seule cote ou de deux et ensuite de préciser, par des sondages à la pelle, la géométrie du dépôt de galets et cailloux qui sont supposés guider l'eau vers la source.

Un autre point important est d'assurer qu'il n'y ait pas de pollution de la source par les eaux de ruissellement et qui circulent sur le site. Il faut pour cela éviter le croisement de l'oued, des eaux et de l'alimentation de la source. Cela peut conduire à canaliser les cours (leviers de l'oued et des rejets d'eaux usées) et à bétonner les fosses ou canaux correspondants. Une alternative serait de faire passer ces cours d'eau dans des tuyaux étanches, suffisamment grands pour accepter les débits en période de pluies.

V.4- Caractéristiques sismiques considérées

La commune d'Ain Amat classée dans la zone IIa, zone de sismicité moyenne les valeurs d'accélération de zone et leur coefficients sismiques horizontaux sont définies dans le Tableau V.1.

Tableau V.1 : Les valeurs de coefficient d'accélération et le coefficient sismique horizontal

Groupe	1A	1B	2	3
Valeur de A	0.25	0.20	0.15	0.10
Valeur de K_h	0.125	0.10	0.075	0.05
Valeur de K_v	0.0375	0.0300	0.0225	0.0015

Avec :

K_h : Coefficient sismique horizontal

A : Valeur du coefficient d'accélération de zone

V.5- Calcul de la stabilité du remblai :

V.5.1- Section du remblai étudié :

La géologie au niveau la section PK 2+570--2+800, est marquée par la présence d'une couche de limons noirs à consistance molle, d'une couche d'alternance de limons noirs et d'alluvions, d'une couche d'alluvions d'oued et une assise d'argiles rougeâtres très épaisse.

Le L.T.P.E. Est, préconise au niveau de cette section la substitution de la couche de limons mous sur une épaisseur de 4m.

La hauteur du remblai est de 12m.

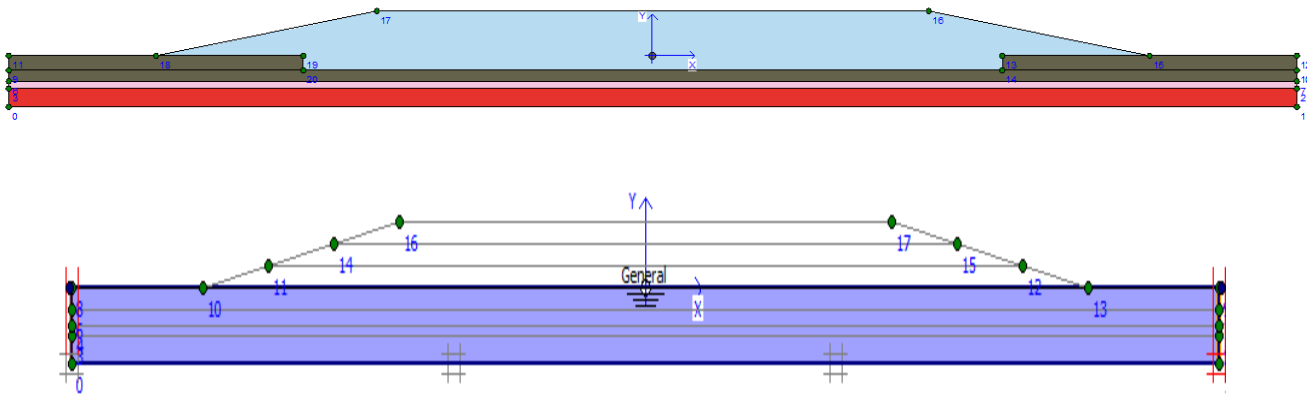


Figure V.4 : Section du remblai étudié au niveau du PK2+570 au PK 2+800

Le remblai repose sur un multicouche, constitué de quatre couches de sol, une couche de remblai de substitution reposant sur une couche de limon noir et alluvions qui elle-même repose sur une couche de alluvions d'oued repose sur une couche de argiles rougeâtres.

Dont les caractéristiques moyennes de cisaillement sont regroupées dans le tableau V.2 :

Tableau V.2 : Caractéristiques des matériaux du multicouche.

Couche de sol	γ (kN/m ³)	c (kPa)	ϕ (°)
Remblai de substitution	21	20	30
Limons noirs et alluvions	17.8	40	11
Alluvions d'oued	20	0	35
Argiles rougeâtres.	16.1	70	15

V.5.2- Profil du remblai retenu :

La section du remblai étant symétrique, nous avons étudié le demi-profil comme représenté ci-dessous sur la figure V.5.

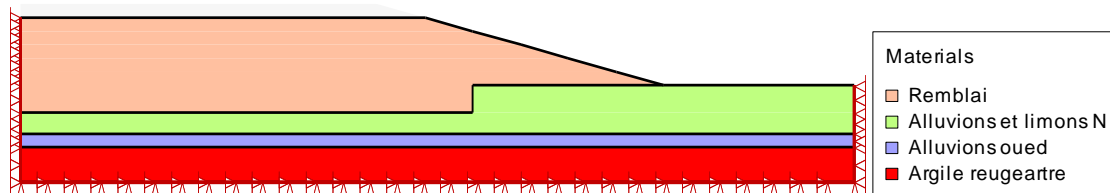


Figure V.5 : Profil retenu pour l'étude.

V.6- Calculs de la stabilité du remblai à l'aide du logiciel GEOSTUDIO :

Un calcul en contrainte déformation par **étapes** sous effet combiné (chargement gravitaire, nappe et séisme) à l'aide du logiciel SIGMA/W, suivi d'un calcul de la stabilité du remblai par les méthodes de calcul à l'équilibre limite à l'aide du module SLOPE/W du logiciel GEOSTUDIO version 2012.

La définition de la ligne de rupture (cercle de glissement dans notre cas) se fait par plusieurs méthodes, dans un premier calcul on a choisi la méthode dite par Entrée – Sortie.

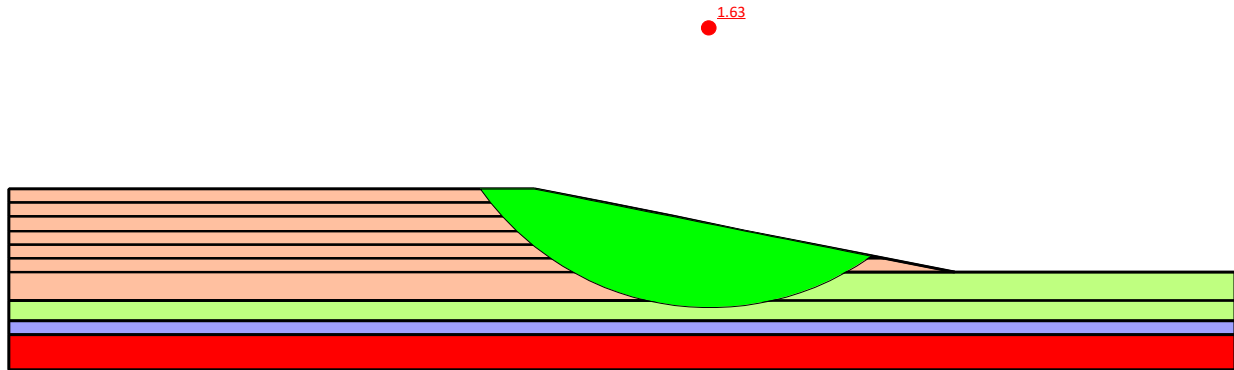


Figure V.6 : Cercle de rupture critique et valeur du FS sous effet combiné (Méthode de JANBU)

Les calculs par trois méthodes de calcul à l'équilibre limite, sous l'effet combiné du chargement gravitaire, du séisme et de la nappe d'eau sont encadré dans le tableau V.3 :

Tableau V.3 : Valeurs de FS sous effet combiné du chargement gravitaire, séisme et de la nappe

Méthode	Fellenius	Bishop	Janbu
FS	1.637	1.841	1.635

Conclusion :

Selon les résultats du calcul par les trois méthodes d'équilibre limite (MEL) on constate que :

- les méthodes de FELLENIUS et JANBU donnent des résultats très proche;
- la méthode de Bishop surestime les valeurs de 11% par rapport à celles de FELLENIUS et JANBU.

V.7- Calculs de la stabilité du remblai pour une série de centre de cercles de glissement :

V.7.1- Définition de la grille des centres de cercles de ruptures:

On retient la méthode de JANBU pour le reste des calculs, car elle donne les résultats les plus faibles pour les valeurs du facteur de sécurité.

La recherche de ligne de rupture se fait par la définition d'une grille des centres de cercles et du rayon.

Pour faciliter le calcul manuel du variogramme la grille est uniforme, de portée 50x50m, le maillage sera régulier et le pas choisi dans les deux sens est de cinq mètres.

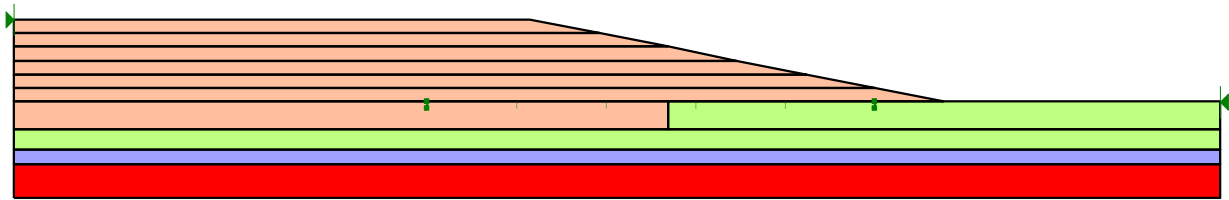
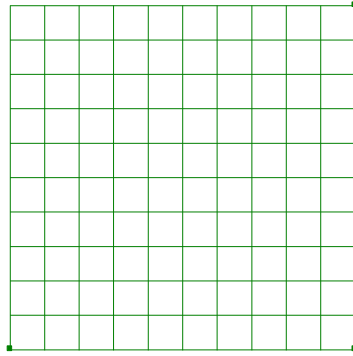


Figure V.7 : Définition de la grille uniforme des centres de cercles de rupture

V.7.2- Résultats des calculs :

Sous effet combiné chargement gravitaire, nappe phréatique et séisme maximal de la zone II, les résultats de calcul par la méthode à l'équilibre limite dite méthode de JANBU, du facteur de sécurité au glissement pour toute la grille des centres de cercles de rupture définie, sont représentés sur la figure V.8.

3.58										
	3.38		3.98							
	3.26	3.17	3.76	3.57	3.63					
3.27		3.08	2.94	3.45	3.15	2.95				
3.42	3.10	2.61	2.86	2.72	3.13	2.75	2.55			
	3.27	2.45	2.48	2.62	2.49	2.82	2.39			1.98
	2.98	2.40	2.36	2.34	2.45	2.23	2.54	2.10	1.97	2.01
3.70	2.78	2.80	2.35	2.28	2.22	2.28	1.98	2.07	1.99	1.63
3.53	2.75	2.71	2.38	2.30	2.21	2.11	2.13	1.83	1.71	1.74

Figure V.8 : Facteurs de sécurité pour toute la grille des centres de cercles de rupture.

V.8. Analyse Statistique et Géostatistique :

Le traitement des données se fait à l'aide du module ArcMap du logiciel ArcGIS 10.3.

Les étapes de passage entre GEOSLOPE et ArcGIS :

- Exporter le fichier des résultats du facteur de sécurité du logiciel Geoslope vers Excel ;
- Créer un nouveau fichier ArcMap dans la définition Système de coordonnées projetées (Nord_Algerie) et la Projection (Lambert Conformal Conic) ;
- Importer du fichier Excel dans ArcMap ;
- Afficher les points dans leur position réelle (x, y) avec le paramètre facteur de sécurité correspondant comme variable aléatoire.

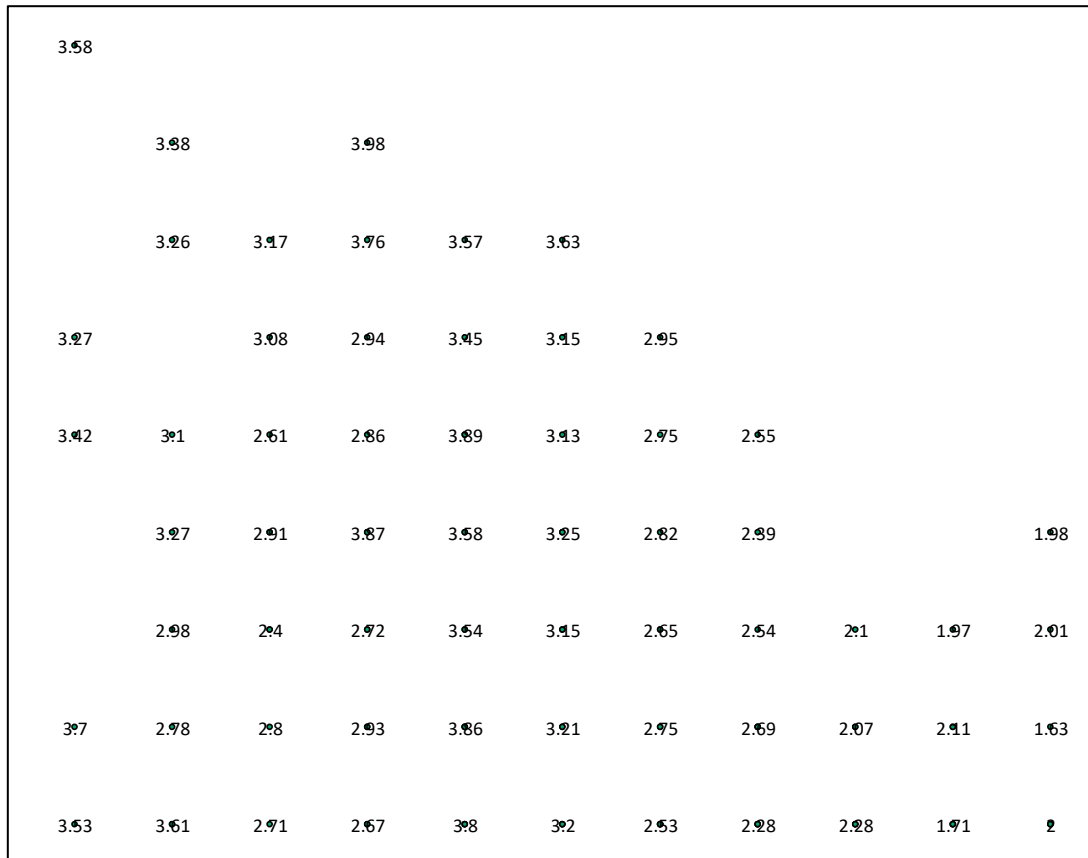


Figure V.9 : Nuée variographique des FS définie dans ArcMap

V.8.1. Analyse exploratoire des données :

A l'aide du module ArcMap du logiciel ArcGIS, et en considérant la valeur du facteur de sécurité comme variable aléatoire, on peut déterminer facilement tous les indicateurs de la série statistique étudié que ce soit les paramètres de distribution centrale ou de dispersion. Les principaux indicateurs sont donnés sous forme de table :

Tableau V.4 : Indicateurs de la série statistique

Variable	Descriptive Statistics				
	Valid N	Mean	Minimum	Maximum	Std.Dev.
FS	98	2.73	1.63	3.98	0.58

L'histogramme des valeurs du facteur de sécurité peut être paramétré facilement en forme et en valeurs selon plusieurs possibilités.

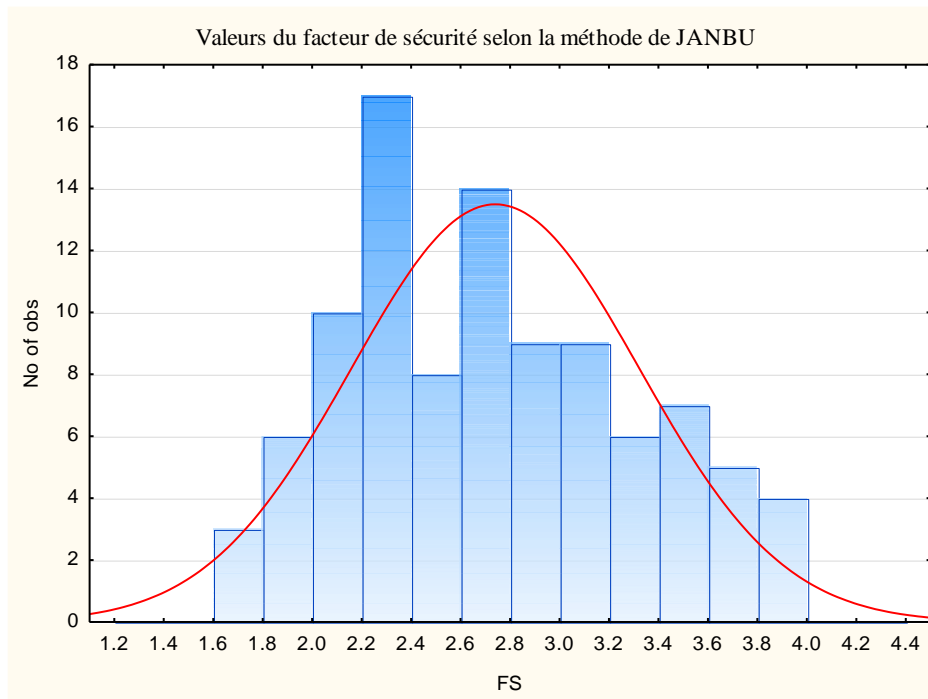


Figure V.10 : Histogramme des valeurs du facteur de sécurité

Les caractéristiques de position (ou de tendance centrale) tel que la moyenne, la médiane ou celles de dispersion tel que la variance ou l'écart type, nous donnent une indication sur la série statistique des valeurs de sécurité au glissement du remblai, mais elles sont insuffisantes pour bien décrire le phénomène étudié.

Les lignes de rupture du glissement sont définies par les coordonnées des centres du cercle de rupture et leurs rayons.

Chaque point de la grille est donc caractérisé par les coordonnées (x, y) et par un facteur de sécurité, donc similaire à des variables Géolocalisées, ce qui nous permet de mener une analyse géostatistique.

V.8.1. Analyse Géostatistique des données :

La prédiction des valeurs du facteur de sécurité se fait par interpolation, la méthode utilisé dans notre cas est le krigeage qui est une méthode d'estimation très précise et sans biais, basé sur les résultats du calcul du variogramme ou du semi-variogramme.

Le calcul manuel ou automatisé du variogramme expérimental permet de déterminer les paramètres du variogramme réel, après modélisation par un variogramme mathématique, théorique.

Les caractéristiques du variogramme modélisé sont:

Type du Modèle : Sphérique

Seuil = 0.597

Pépite = 0.030

Portée = 64.03

Le reste des détails de l'adaptation d'un modèle ou (modélisation spatiale, analyse structurelle ou variographie) sont schématisés ci-dessous.

<input type="checkbox"/> Method	Kriging
Type	Ordinary
Output type	Prediction
<input type="checkbox"/> Dataset #	1
Trend type	None
<input type="checkbox"/> Searching neighborhood	Standard
Neighbors to include	5
Include at least	2
Sector type	Four and 45 degree
Major semiaxis	64.031242374328
Minor semiaxis	64.031242374328
Angle	0
<input type="checkbox"/> Variogram	Semivariogram
Number of lags	12
Lag size	5.335936864527
Nugget	0
Measurement error %	100
<input type="checkbox"/> Model type	Spherical
Range	64.031242374328
Anisotropy	No
Partial sill	0.597371080039

Figure V.11 : Détails de la modélisation spatiale ou variographie

Sur la courbe du semi variogramme tracé directement par le logiciel ArcMap, sont superposés le modèle, la valeur pondérée et la moyenne (Model - binned – averaged), figure.

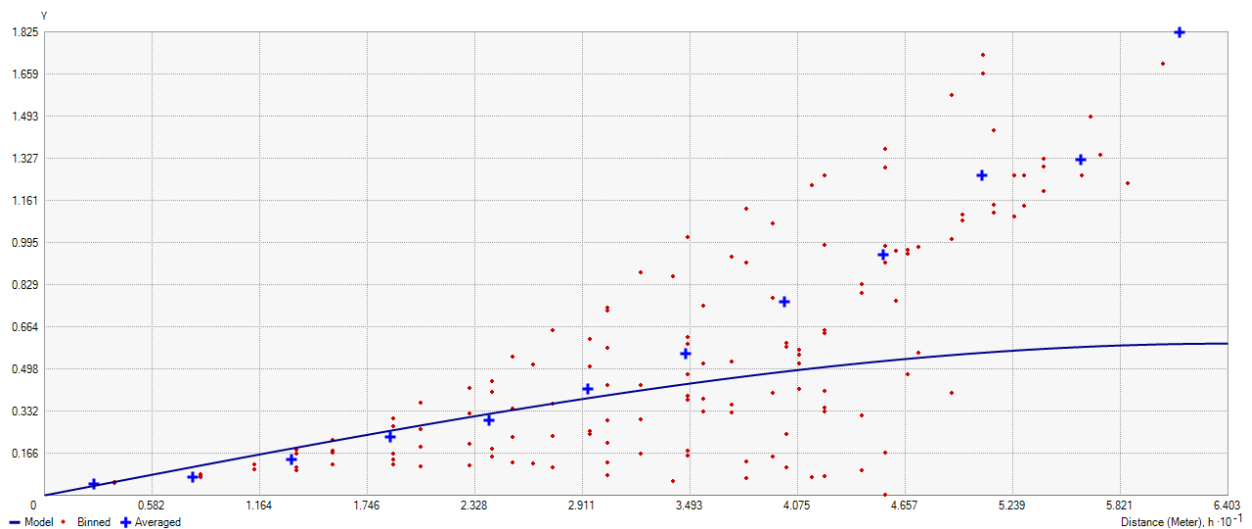


Figure V.12 : Semi variogramme FS en fonction de la distance.

Les valeurs du facteur de sécurité en tous points de la grille choisie, obtenue par krigeage de type ordinaire sont affichés sur la carte de prédiction.

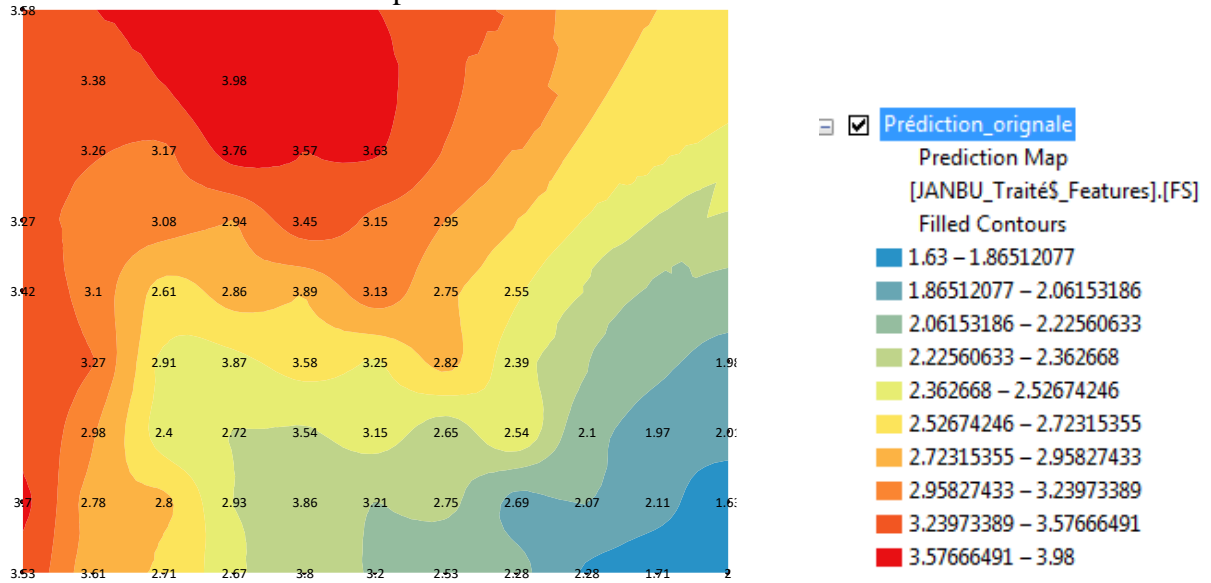


Figure V.13 : Carte de prédiction du FS en tout point non mesuré

Les valeurs de la variance de l'erreur d'estimation du facteur de sécurité en tous points de la grille choisie, obtenue par krigeage de type ordinaire sont affichés sur la carte des variances d'erreur sur la prédiction (figure 14).

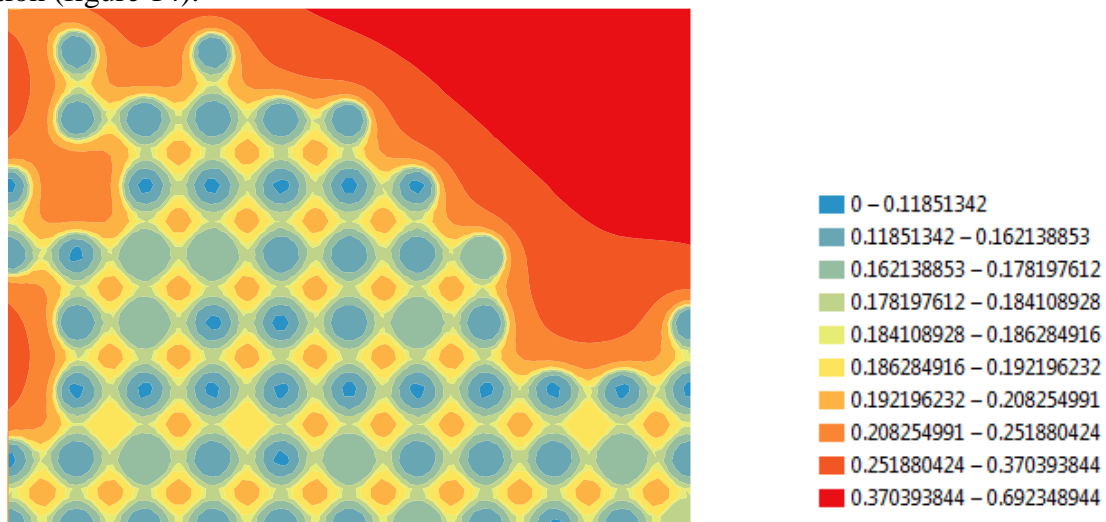


Figure V.14 : Carte des variances d'erreur sur la prédiction du FS en tout point non mesuré

En positionnant le pointeur de la souris en n'importe quelle position on peut lire la valeur du facteur de sécurité sur la carte de prédiction et la valeur de la variance d'erreur de prédiction sur la carte des variances d'erreur, comme exemple sur la figure ci-contre.

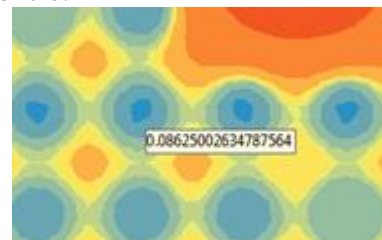


Figure V.15 : Lecture de la variance d'erreur de prédiction sur la carte

V.9. Synthèse :

Grace aux outils numériques utilisés, à savoir les modules Sigma/w et Geoslope/w du logiciel GEOSTUDIO, on a pu vérifier la stabilité général du remblai en prenant en compte les différents cas de chargement possible (chargement gravitaire, nappe et séisme).

Selon les calculs effectués par le logiciel GEOSLOPE, on constate que les méthodes de Fellenius et celle de Janbu donnent les mêmes valeurs du facteur de sécurité, tandis que la méthode de Bishop surestime les valeurs de 11%.

On a exporté les résultats des calculs de stabilité au glissement obtenus par Geoslope, vers un fichier Excel, ce dernier a été importé dans ArcMap et ensuite transformé en un nuages de points (x, y) sous une projection Lambert_Conforme_Conique avec un Datum du Nord Algérie.

Le calcul des indicateurs de position et de dispersion nous ont donné une idée sur la série des valeurs des facteurs de sécurité calculés par Geoslope auparavant.

Les points de la grille des centres de cercles de rupture sont connues par leurs coordonnées cartésiennes (x, y) et avec un troisième paramètre qui est le facteur de sécurité FS, chose qui nous a permis de mener une étude géostatistique en considérant ces points comme des variables Géolocalisées.

Grace au module ArcMap nous avons calculé et dessiner le diagramme du semi-variogramme empirique ce qui nous a permet d'adapter un modèle sphérique caractérisé par une pépite de 0,030 ; un seuil de 0,597et une portée de 64,03.

Le variogramme a été utilisé pour réaliser une interpolation par Krigeage ordinaire sans biais afin de prédire les valeurs des facteurs de sécurité en n'importe quel point non mesurés et de calculer la variance d'erreur sur la prédiction.

Enfin les résultats de prédiction ou de la variance d'erreur sur la prédiction sont récupérables facilement sous forme de tableaux ou de cartes graphique.

CONCLUSION GENERALE

L'étude présentée dans ce mémoire avait pour finalité d'analyser le comportement des remblais vis-à-vis des différents cas de chargement possible avec une étude pratique du cas du remblai de l'extension de l'aérodrome d'Ain Arnat (willaya de Sétif).

Cette étude a permis dans une première étape d'exposer les différentes méthodes de calcul de stabilité, actuellement disponibles (calcul en équilibre limite et calcul en éléments finis) et l'approche de calcul pseudo-statique, en conformité avec la réglementation parasismique algérienne en vigueur (RPA 99, version 2003).

Dans une seconde étape, cette étude a permis de mettre en œuvre deux outils numériques performants : le module SLOPE/w du logiciel GEOSTUDIO pour l'analyse de la stabilité des talus au glissement en ruptures circulaires et non circulaires par un calcul en équilibre limite par la méthode des tranches (Fellenius, de Bishop et Janbu) et le programme ArcMap du logiciel ArcGis pour l'analyse exploratoire statistique et l'évaluation géostatistique.

Elle a permis d'analyser la stabilité du remblai de l'extension de l'aérodrome d'Ain Arnat, en distinguant trois cas de configuration à savoir le calcul sous chargement gravitaire, le calcul sous effet chargement gravitaire en présence et le calcul par l'approche pseudo statique sous effet combiné du chargement gravitaire, de la nappe et du séisme.

Selon les calculs effectués par le logiciel GEOSLOPE, on constate que les méthodes de Fellenius et celle de Janbu donnent les mêmes valeurs du facteur de sécurité, tandis que la méthode de Bishop surestime les valeurs de 11%.

L'export du fichier résultats des calculs de stabilité au glissement obtenus par Geoslope, vers un fichier Excel, nous a permis de faire une évaluation statistique et géostatistique grâce au programme ArcMap d'ArcGIS.

Le calcul des indicateurs de **position** et de **dispersion** nous ont donné une idée sur la série des valeurs des facteurs de sécurité calculés par Geoslope auparavant.

Les points de la grille des centres de cercles de rupture sont connues par leurs coordonnées cartésiennes (x, y) et avec un troisième paramètre qui est le facteur de sécurité FS, chose qui nous a permis de mener une étude géostatistique en considérant ces points comme des variables Géolocalisées.

Grace à l'outil "Geostatistical Analyst" d'ArcMap nous avons calculé et dessiner le diagramme du semi-variogramme empirique ce qui nous a permet d'adapter un modèle sphérique caractérisé par une pépite de 0,030 ; un seuil de 0,597et une portée de 64,03.

Le variogramme a été utilisé pour réaliser une interpolation par Krigeage ordinaire sans biais afin de prédire les valeurs des facteurs de sécurité en n'importe quel point non mesurés et de calculer la variance d'erreur sur la prédiction.

Enfin les résultats de prédiction ou de la variance d'erreur sur la prédiction sont récupérables facilement sous forme de tableaux ou de cartes graphique.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUE

- [01] **MESTAT Ph., PRAT M., BISCH Ph., MILLARD A. et PIJAUDIER-CABOT G. (1999).** Ouvrages en interaction. Hermès Science Publications, Paris, 934 pages.
- [02] **KHEMISSA M. (2005).** Méthodes d'Analyse de la stabilité et techniques de stabilisation des pentes. Actes du Séminaire International sur les risques Naturels liés aux Glissements de Terrain et d'éboulement Rocheux, Université de Guelma, CD-ROM, 15-6 novembre 05, CD.
- [03] **DURVILLE J.L. ET SEVE G.** Stabilité des pentes : Glissements en terrain meubles. Techniques de l'ingénieur, C254.
- [04] **KHEMISSA M., RAHMOUNI Z., MAHAMEDI A. (2003).** Prise en compte de l'action sismique dans les études de stabilité et de renforcement des pentes instables. Cnepru_03_r1.
- [05] **PILOT G.** Stabilité des pentes. Techniques de l'ingénieur, C254.
- [06] **Gilles Guillot.** Introduction à la géostatistique, notes de cours, Institut National Agronomique de Paris-Grignon janvier 2004.
- [07] **Gilles Guillot.** Notes de cours « Introduction à la géostatistique », Institut National Agronomique de Paris-Grignon janvier 2004.
- [08] **Aloui T.** Géostatistique, cours Faculté des sciences mathématiques physiques et naturelles de Tunis.
- [09] **Jacques RIVOIRARD.** Cours C-17 2 de géostatistique multi variable, Ecole des Mines de Paris, Février 2003.
- [10] **Xavier Emery.** Géostatistique linéaire, Ecole des mines de Paris 2001.
- [11] **Isobel Clark.** Practical Geostatistics, Geostokos limited, Alloa Business Centre, Central Scotland FK 10 3SA

Site Internet:

<http://www.geo-slope.com> (2015)

<http://www.esri.com> (2014)

<http://books.geojamal.com>

www.geojamal.com