

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE
DEPARTEMENT GENIE MINIER



MEMOIRE

En vue de l'obtention du diplôme de
MAGISTER

**Appréciation De La Stabilité Des Bords Et Réouverture
De La Mine à Ciel Ouvert De Kef Essennoun (Djebel
Onk) Algérie Orientale**

Présenté par : MEZAM Mohammed Cherif
Ingénieur d'État en Génie Minier de L'E.N.P

Dirigé par : Docteur M. A. BACHAR ASSED
Maitre de Conférences « A » ENP

Soutenu le 08/11/2015, devant le Jury composé de :

- Pr. A. BALI	Professeur (ENP)	Président
- Pr. M. A. DJEGHLAL	Professeur (ENP)	Examineur
- Dr. M. OULD HAMOU	MC/A (ENP)	Examineur
- Dr. M. A. BACHAR ASSED	MC/A (ENP)	Promoteur
- Mr. M. HASBELLAOUI	Expert	Invité

Année 2015

Remerciement

Je remercie tout d'abord le BON DIEU qui m'a donné le courage et la patience pour achever ce modeste travail.

Je tiens à remercier mon Directeur de thèse **Dr. BACHAR ASSED Mohamed Aguid** pour m'avoir suivi de près pendant la réalisation de ce travail, pour m'avoir donné mes premières notions de la Mécaniques des roches et enfin pour m'avoir guidé par ses conseils scientifiques enrichissants durant toute la période de la réalisation de ce mémoire.

Je tiens à remercier vivement l'ensemble des professeurs du département de Génie Minier, qui nous ont enseigné ainsi que ceux qui ont contribué à notre formation au sein de notre école, et en particulier ceux qui nous ont aidé à l'aboutissement de ce mémoire.

Je voudrais également exprimer toute ma gratitude à l'équipe d'ALGEOS représentée par son directeur **Mr. MOSTEFAOUI Lakhdar**, expert en géologie et en exploitation minière, qui m'avait proposé se sujet et qui avait mis à ma disposition toute la documentation, prodigué tous les informations et les conseils utiles pour terminer ce travail.

J'adresse également tous mes remerciements aux personnels du SOMIPHOS de Bir El-Ater, surtout aux membres de Département d'Etude et de Développement (*D.E.D*), pour leur accueil chaleureux et leur extrême gentillesse. Merci en particulier à **Mr. BELGHITH Ali** l'ingénieur d'étude chargé de l'exploitation au niveau de *D.E.D* pour ses aides multiples qui m'ont facilité les procédures de mon stage. Un très grand merci à **Mr. FARES Sofiane** et aux les géologues de SOMIPHOS, **Mr. ALL. Mohammed et Mr. CHERRAD Ali**, qui, avec une compétence élevée en expérimentation, une forte connaissance de la géologie de la zone d'étude et une longue patience, m'ont fourni d'intenses explications lors de notre visite sur le terrain me donnant ainsi, une très bonne vision sur le gisement.

Je n'oublie pas de remercier tous mes amis de la cité universitaire : **Zaki, Aziz, Mouatez et Faiçal** pour leur soutien moral, aux moments difficiles que nous avons passé durant notre étude à Alger.

Et enfin, j'ai gardé le plus grand et chaleureux des remerciements à mes parents, pour leurs encouragements et prières permanents. Merci de tout mon cœur

المخلص

إن دراسة تماسك المنحدرات خلال التقدم في الأعمال المنجمية السطحية تعتبر خطوة هامة جدا من اجل ضمان سلامة العمال، الماكينات و المخزون المنجمي للمكمن.

في هذا الموضوع سنعالج مشكلة تماسك المنحدر الخاص بمنجم الفوسفات المسمى **كاف اسنون** الموجود بجبل العنق بتبسة، هذا المنجم عرف سنة 2007 انهيار كبير في شقه الشمالي-الشرقي الأمر الذي ألزم غلق هذه الجهة وإعادة توجيه عمليات الاستغلال نحو الجنوب، الغرب و الشمال-الغربي من المكمن، لكن هذه العملية لم تكن ناجحة كليا لأنه و بعد مرور 5 سنوات تم اكتشاف ظهور مجموعة من التشققات الجديدة في الجزء العلوي في الجهة الشمالية و الشمالية-الغربية لأمر الذي ألزم القيام بدراسة مفصلة ومدققة من اجل السير الحسن للعمل في هذه المنطق.

الكلمات المفتاحية: كاف اسنون، المنجمية السطحية، عامل الامان، تماسك المنحدرات، اعادة فتح المنجم.

Résumé

L'étude de la stabilité du talus des gradins, des bords des carrières et des parements des terrils lors de l'exploitation à ciel ouvert des gisements de minerais utiles, est une étape indispensable qui devra se faire au fur à mesure du développement des travaux miniers, pour la sécurité du personnel, des matériels, des réserves et de l'environnement.

Dans notre travail de recherche, nous avons traité le problème de stabilité de la carrière de phosphate de Kef Essnnon dans le champ minier de Djebel Onk situé au Nord-Est de l'Algérie. Cette carrière a fait l'objet d'un grand éboulement en 2007 dans la partie Nord-Est, ce qui a imposé la fermeture de l'ancienne fosse et la réorientation de l'exploitation vers le côté Sud, Ouest et Sud-Ouest du gisement. Cependant, cette nouvelle disposition du front d'exploitation s'avérera, au bout de 5 années, non suffisante et déjà en 2012 le staff technique de la carrière a déclaré l'apparition de nouvelles fissures dans les parties supérieures du coté Nord et Nord-Ouest de la nouvelle fosse d'exploitation. Cette situation de la carrière exige donc, une étude plus approfondie et bien détaillée sur la stabilité des bords en exploitation et liquidation pour la poursuite des travaux d'extraction des minerais.

Mots Clefs: Kef Essnnon, mine à ciel ouvert, Facteur de sécurité, Stabilité des talus, Réouverture de la mine

Abstract

The study of the stability of the embankments Bleachers, the edges of quarries and siding heaps during the open pit mining of useful ores deposits, is an essential step that must be done gradually with the development of mining works for the safety of personnel, materials, reserves and the environment.

In our research, we treated the stability problem of the phosphate Kef Essnnon quarry related to the mining field of Jebel Onk located in Northeastern part of Algeria. This career has been a subject to a major landslide in 2007 in the Northeastern part, which imposed not only the closure of the old pit but the reorientation as well of the operations exploitation to the South, West and Northwest sides of the ore deposit.

However, this new disposal measure of the front's exploitation wasn't sufficient. In fact, after five years, in 2012 the technical board of the quarry declared that new cracks have been appeared in the higher parts of the North and North-West of the new exploitation pit.

This quarry condition requires then, that a further and more detailed study about the edges stability that are on exploitation and liquidation is necessary to continue the extraction operations of the ore deposit.

Key words: Kef Essnnon, Open pit mine, Safety factor, Slope Stability, , mine reopening

Table de matière

Remerciement	2
Résumé	3
Abstract	3
المخلص	3
Table de matière	4
Liste des figures	7
Liste des tableaux	9
Liste des indices	10
Introduction générale	11
Chapitre I : Généralités bibliographiques	13
1. Introduction	13
2. Différentes type de mouvement de terrain	13
2.1. Surface de glissement	14
2.2. Classification des mouvements de terrain.....	14
2.3. Les déformations dans les mines à ciel ouvert	15
2.4. Représentation cartographique d'un mouvement du terrain	15
2.5. Phases du glissement de terrain	16
2.6. Intensité du mouvement du terrain	17
3. Facteurs influençant la stabilité de talus	18
3.1. Genèse des glissements de terrain	18
3.2. Facteurs de préparation	18
3.2.1. Facteurs géologiques	18
3.2.2. Facteurs géomorphologiques.....	19
3.2.3. Facteurs physiques	19
3.2.4. Facteurs anthropiques	19
3.3. Facteurs de prédisposition.....	19
3.4. Facteurs déclenchants.....	19
3.4.1. Rôle des secousses sismiques	20
3.4.2. Influence de l'eau souterraine	20
3.4.3. Effet du gel.....	21
3.4.4. Altération superficielle	21
3.5. Facteurs techniques liés à l'exploitation des mines à ciel ouvert.....	22
3.5.1. Influence de la profondeur de la fosse sur l'angle de la pente général	22
3.5.2. Influence des phases et des méthodes d'exploitation	22
3.5.3. Influence de la géométrie.....	23
4. Méthodes et techniques de surveillances appliquées aux mouvements de terrain	23
4.1. Méthodes de mesures In-Situ	24
4.1.1. Méthodes optiques.....	24
4.1.2. Méthodes mécaniques.....	26
4.2. Méthodes de télédétection	28
4.2.1. Interférométrie RADAR	28
4.2.2. Radar au sol	29
5. Différentes méthodes de calcule de stabilité de talus	31
1.1. Coefficient de sécurité	31
1.2. Choix de la valeur du coefficient de sécurité dans le calcul de stabilité.....	31
1.3. Le choix du type de méthode de calcul.....	32
1.4. Les méthodes d'analyse de stabilité des talus.....	32
1.5. Glissement plan	32
1.6. Les Méthodes basées sur l'équilibre limite	34
1.6.1. Méthode globale.....	34
1.6.2. Méthode des tranches.....	35
1.6.3. Limitations des méthodes d'équilibre limite.....	40
1.7. Méthode des perturbations.....	40
1.8. Les Méthodes numériques.....	40
6. Conclusion	42

Chapitre II: La géologie du gisement de phosphate de Kef Essnnon	43
1. Généralités.....	43
1.1. Historique et méthodologie des recherches géologique au Djebel Onk.....	43
1.2. Nomenclature des roches phosphatées.....	44
1.3. Types de gisements de phosphate.....	44
1.3.1. Les gisements sédimentaires.....	44
1.3.2. Les gisements d'origine Ignée.....	45
1.3.3. Les gisements de phosphates sédimentaires de type guano.....	45
1.4. Genèse des phosphates.....	45
1.5. Utilisation des phosphates.....	46
1.6. Phosphates et environnement.....	46
1.7. Traitement des phosphates.....	46
1. Géologie régionale et locale.....	48
1.1. Situation géographique.....	48
1.2. Géologie régionale de Djebel Onk.....	49
1.2.1. Stratigraphie.....	49
1.2.2. Tectonique régionale.....	52
1.2.3. Paléogéographie.....	53
1.3. Géologie du gisement de Kef Essennoun.....	56
1.3.1. Travaux de prospection effectues.....	56
1.3.2. Stratigraphie.....	56
1.3.3. Tectonique.....	57
1.3.4. Petro-minéralogies des phosphates de Kef Essennoun.....	57
Chapitre III : Les caractéristiques du glissement du bord N-E de 2007	61
1. Introduction.....	61
2. Historique (description) du glissement.....	61
3. Cartographie de la zone glissée.....	62
4. Caractéristique du glissement.....	63
5. Identification du terrain glissé.....	64
6. Emplacement de la surface de glissement.....	64
7. Principaux facteurs déclenchant le mouvement.....	65
7.1. Facteurs géologiques.....	66
7.2. Facteurs techniques.....	66
8. Solutions proposées et reprise des travaux.....	66
8.1. Expertise I (Pr. R. BOUGDAL).....	67
8.1.1. Analyse de phénomène.....	67
8.1.2. Recommandation.....	67
8.2. Expertise II (P. Ph. WEBER).....	69
8.2.1. Analyse de phénomène.....	69
8.2.2. Recommandation.....	69
9. Conclusion.....	71
Chapitre IV : Étude de la stabilité du bord N-O de la carrière de Kef-Essennoun	72
1. Introduction.....	72
2. Cadre géographique de la zone instable.....	72
3. Reconnaissance du site.....	73
3.1. Géologique.....	74
3.2. Géomorphologique.....	79
3.3. Tectonique et structural.....	79
3.4. Fissuration.....	79
3.5. Hydrologique et hydrogéologique.....	80
3.5.1. Climatologie de la région.....	81
3.5.2. Hydrologie de la surface.....	82
3.5.3. Hydrogéologie.....	83
3.6. Géotechnique.....	83
3.6.1. Propriétés physicomécanique des roches.....	84
3.6.2. Propriétés géomécanique du massif rocheux.....	84
4. Surveillance de l'évolution du mouvement.....	85
4.1. Apparition des fissurations récentes.....	85

4.2.	Dispositifs de surveillance	86
4.2.1.	Piqués de mesure (Fissuro-mètre)	86
4.2.2.	Inclinomètre	88
5.	Critique du programme de reconnaissance et des dispositifs de surveillance	89
6.	Conclusion.....	90
Chapitre V: Évaluation de la stabilité du bord N-O à l'aide des outils informatiques de la carrière de Kef Essennoun		91
1.	Introduction	91
2.	Modélisation numérique d'un talus	91
3.	Logiciels utilisés dans l'étude de risque de glissement de terrain.....	91
3.1.	Géo Studio.....	92
3.1.1.	Présentation.....	92
3.1.2.	SLOPE/W.....	93
3.2.	Géo5.....	94
3.2.1.	Présentation.....	94
3.2.2.	Méthodes de calcul.....	95
3.2.3.	Sortie graphique des résultats.....	95
3.2.4.	Compatibilité avec les standards.....	95
3.2.5.	Programme utilisé.....	95
3.2.6.	Fonctionnement.....	95
4.	Application.....	95
1.1.	Choix du profil.....	95
1.2.	Modélisation par SLOPE/W	97
1.2.1.	Résultat de simulation.....	98
4.3.	Modélisation par GEO5	102
4.3.1.	Méthode d'équilibre limite	102
4.3.2.	Méthode des éléments finis MEF	105
5.	Interprétation des résultats	107
6.	Conclusion.....	110
Chapitre VI : Plan de réouverture de la carrière de Kef Essennoun		111
1.	Introduction	111
2.	Situation actuelle de la carrière.....	111
3.	Réouverture du gisement.....	112
3.1.	Remblayage de la fosse	112
3.2.	Piste d'accès et plateforme de travail	118
4.	Développement de l'exploitation	120
5.	Évaluation de la stabilité du bord final considéré	121
6.	Calcul des coûts de l'opération de remblayage.....	122
6.1.	Définition des coûts.....	122
6.2.	Catégories des différents frais de l'opération.....	122
6.2.1.	Amortissement.....	122
6.2.2.	Coûts de combustible (fuel).....	123
6.2.3.	Frais de la main d'œuvre.....	123
6.3.	Récapitulation des coûts.....	124
7.	Conclusion.....	125
Conclusion générale		126
Annexe I.....		128
Annexe I		128
Annexe II		132
Annexe III.....		133

Liste des figures

<i>Figure 1.I: Classification des déformations dans les mines à ciel ouvert.....</i>	15
<i>Figure 2.I: Différentes phases de l'activité d'un glissement de terrain.....</i>	16
<i>Figure 3.I: Vitesses de déplacement du versant en fonction du temps.....</i>	18
<i>Figure 4.I: Variation du Fs en fonction de α pour différentes conditions d'exploitation et de drainage pour une mine à C-O.....</i>	21
<i>Figure 5.I: Variation du Fs en fonction de l'angle générale du talus.....</i>	22
<i>Figure 6.I: Rupture possible d'une pente au cours de l'approfondissement d'une fosse.....</i>	23
<i>Figure 7.I: influence de la géométrie du bord de fosse sur le coefficient de sécurité.....</i>	23
<i>Figure 8.I: Schéma de contrôle géodésique du glissement de terrain.....</i>	25
<i>Figure 9.I: Théodolite en position sur le site et le prisme optique pour théodolite.....</i>	25
<i>Figure 10.I: Extensomètre de forage en place avec ses 5 tiges.....</i>	27
<i>Figure 11.I: Schéma de principe de l'extensomètre de surface.....</i>	27
<i>Figure 12.I: Description d'un système inclinométrique.....</i>	28
<i>Figure 13.I: Différence de phase entre 2 dates (en rouge la phase propre, en bleu la différence de phase).....</i>	29
<i>Figure 14.I: Radar positionné sur site devant un bord d'une mine à C-O et leur station de pilotage.....</i>	29
<i>Figure 15.I: Pente infinie de surface de rupture plane.....</i>	33
<i>Figure 16.I: les forces agissent sur le volume glissé dans la méthode globale.....</i>	35
<i>Figure 17.I: Exemple d'une rupture circulaire.....</i>	35
<i>Figure 18.I: Forces appliquées sur une tranche dans la méthode de Fellenius.....</i>	37
<i>Figure 19.I: Forces appliquées sur une tranche dans la méthode de Bishop simplifiée.....</i>	38
<i>Figure 20.I: Inclinaison des forces dans la méthode Suédoise modifiée.....</i>	39
<i>Figure 21.I: Coordonnées de la surface de glissement pour la méthode de Spencer.....</i>	39
<i>Figure 1.II: Localisation des principaux types de gisements de phosphates (Zapata et Roy, 2004).....</i>	44
<i>Figure 2.II: Schéma de phosphatogénèse selon Kazakov (1930).....</i>	45
<i>Figure 3.II: Schéma de préparation mécanique à l'usine de Djebel Onk.....</i>	47
<i>Figure 4.II: Schéma de préparation du minerai de phosphate de Djebel Onk.....</i>	47
<i>Figure 5.II: Carte de situation géographique des gisements de phosphates de la région de Djebel Onk (Prian et Cortiel, 1993).....</i>	48
<i>Figure 6.II: Colonne stratigraphique de la région de Djebel Onk (Cielensky et Benchernine, 1987).....</i>	51
<i>Figure 7.II: Carte structurale de la région du Djebel Onk à l'intérieur du bassin de Gafsa-Métloui-Onk (Aissaoui, 1984).....</i>	53
<i>Figure 8.II: Situation paléogéographique des gisements de phosphates de la région de Djebel Onk à l'intérieur du bassin phosphatés Gafsa-Mélaoui-Onk (D'après Burolet et Oudin, 1980 ; Fourine, 1980 ; Sassi, 1974 et 1980).....</i>	55
<i>Figure 9.II: Structure de la couche de phosphate dans la zone de Kef Essennoun et localisation des sondages carottés (Prian et Cortiel, 1993).....</i>	58
<i>Figure 10.II: Coupe géologique du gisement de Kef Essennoun (Prian et Cortiel, 1993).....</i>	59
<i>Figure 11.II: Bloc diagramme des types de minerai de phosphate (Mezghache et al, 2002).....</i>	60
<i>Figure 1.III: Photo montant le glissement de 2007 dans la carrière de phosphate de KEF ESSENOUN.....</i>	61
<i>Figure 2.III: Photo montant la fosse de la carrière de kef essnoun avant le glissement de 2007.....</i>	62
<i>Figure 3.III: Coupe géologique de la carrière de KEF ESSENOUN avant le glissement de 2007.....</i>	62
<i>Figure 4.III: Plan Topo de la carrière de Kef Essennoun (mise à jour Septembre 2007) 1/1000.....</i>	63
<i>Figure 5.III: Photo Google de la carrière de KEF ESSENOUN après l'éboulement de 2007.....</i>	63
<i>Figure 6.III: photo représente les caractéristiques du glissement de KEF ESSENOUN.....</i>	64
<i>Figure 7.III: Coupe N-S du glissement de KEF ESSENOUN.....</i>	65
<i>Figure 8.III: Couverture lutétienne calcaire glissée, conservant sa structure tectonique.....</i>	65
<i>Figure 9.III: Plan topographique montrant les sens de reprise de travaux.....</i>	68
<i>Figure 10.III: Coupe Nord-Sud indiquant la bande de sécurité (stot).....</i>	68
<i>Figure 11.III: Schéma d'exploitation avec stot laissé à la base de la couche phosphatée.....</i>	70
<i>Figure 12.III: Détail de la fracturation induite par le glissement.....</i>	70
<i>Figure 1.IV: Plan topographique de la carrière de KEF ESSENOUN 1/1000 (Septembre 2014).....</i>	72

<i>Figure 2.IV: Carte topographique, DJEBEL ONNG, NI-32-XIV-EST, 1/50 000</i>	73
<i>Figure 3.IV: Carte géologique, BIR EL-ATER, 1/50 000</i>	75
<i>Figure 4.IV: plan de localisation des coupes du gisement Kef Essennoun</i>	76
<i>Figure 5.IV: Coupes géologiques transversales du gisement de phosphate de Kef Essennoun</i>	77
<i>Figure 6.IV: Coupe géologique longitudinale du gisement de phosphate de Kef Essennoun</i>	78
<i>Figure 7.IV: Front de taille exposé à la carrière de Kef Essennoun</i>	80
<i>Figure 8.IV: Représente le diagramme ombrothermique de la région de BIR EL-ATER pour la période (1986 à 2014)</i>	82
<i>Figure 9.IV: localisation des Oueds et talwegs dans la carrière</i>	83
<i>Figure 10.IV: Emplacement Des Nouvelles Fissures Du Bord N-O De La Carrière De KEF ESSNOUN</i>	86
<i>Figure 11.IV: Piqué de mesure N°02 et 03</i>	87
<i>Figure 12.IV: Enregistrement des stations de mesure N°06 et N°01</i>	88
<i>Figure 13.IV: Emplacement de deux inclinomètres avec les résultats d'Inc-2</i>	89
<i>Figure 1.V: Fenêtre générale de ce logiciel Géo-Studio</i>	92
<i>Figure 2.V: Menus disponibles sur logiciel SLOPE/W</i>	94
<i>Figure 3.V: Gamme de sous codes du logiciel Géo5</i>	94
<i>Figure 4.V: État actuel de la carrière et l'emplacement de la coupe</i>	96
<i>Figure 5.V: Modèle géométrique retenu pour la simulation avec SLOPE/W et GEO5</i>	97
<i>Figure 6.V: Le modèle géométrique dans l'interface du logiciel SLOPE/W</i>	97
<i>Figure 7.V: FS donné par SLOPE/W (A : sans l'effet des explosifs, B : avec explosif)</i>	98
<i>Figure 8.V: Résultats de la simulation donnés par SLOPE/W (sans l'effet des explosifs)</i>	99
<i>Figure 9.V: Résultats de la simulation donnés par SLOPE/W (Avec l'effet des explosifs)</i>	99
<i>Figure 10.V: Informations pour chaque tranche (Tranche N°:37) (sans et sans l'effet des explosifs)</i>	100
<i>Figure 11.V: Variation des forces résistantes et motrices pour chaque tranche (sans l'effet des explosifs)</i>	101
<i>Figure 12.V: Variation des forces résistantes et motrices pour chaque tranche (Avec l'effet des explosifs)</i>	101
<i>Figure 13.V: Le modèle géométrique retenu dans l'interface du logiciel GEO5</i>	102
<i>Figure 14.V: Le modèle géométrique avec la surface du glissement circulaire donné par GEO5 (sans l'influence de l'explosif)</i>	103
<i>Figure 15.V: Le modèle géométrique avec la surface du glissement circulaire donné par GEO5 (avec l'influence de l'explosif)</i>	103
<i>Figure 16.V: Le modèle géométrique avec la surface du glissement polygonale optimisé par GEO5 (Sans l'influence de l'explosif)</i>	104
<i>Figure 17.V: Le modèle géométrique avec la surface du glissement polygonale optimisé par GEO5 (Avec l'influence de l'explosif)</i>	105
<i>Figure 18.V: Le modèle géométrique retenu dans l'interface du sous code MEF</i>	106
<i>Figure 19.V: Maillage générer par le sous code MEF</i>	106
<i>Figure 20.V: Maillage et degré de déformation du bord donné par le sous code MEF</i>	107
<i>Figure 21.V: Les vecteurs du champ de déplacement</i>	107
<i>Figure 1.VI: Situation actuelle du gisement de phosphate de Kef Essnnoun (Djebel Onk)</i>	111
<i>Figure 2.VI: Coupe NO-SE montrant le niveau de remblayage de la fosse</i>	112
<i>Figure 3.VI: Le Tas de stérile de la carrière de Kef Essennoun (décharge)</i>	113
<i>Figure 4.VI: Opération de chargement dans la carrière de Kef Essnnoun</i>	114
<i>Figure 5.VI: Exemple de camion à benne utilisé dans la carrière de Kef Essennoun</i>	115
<i>Figure 6.VI: État de la carrière après le remblayage et l'ouverture de la plateforme initiale</i>	118
<i>Figure 7.VI: Largeur de la piste en ligne droite</i>	119
<i>Figure 8.VI: Largeur de la piste en courbure</i>	120
<i>Figure 9.VI: Caractéristique de la pente d'une piste</i>	120
<i>Figure 10.VI: Les phases de développement du gisement de Kef Essnnoun</i>	121

Liste des tableaux

<i>Tableau 1.I: Différentes type de mouvement de terrains (D'après Compy M., Macaire J.J., 2003)</i>	14
<i>Tableau 2.I: Représentation cartographique de différents types de mouvements de terrain</i>	16
<i>Tableau 3.I: Exemple d'échelle conventionnelle d'intensité.....</i>	17
<i>Tableau 4.I: Principales méthodes de mesure et de suivi in-situ des mouvements de terrain</i>	24
<i>Tableau 5.I: principales méthodes de mesure et de suivi par télédétection des mouvements de terrain</i>	28
<i>Tableau 6.I: Différents exemples de définitions d'un coefficient de sécurité, LAMBE [1973].....</i>	31
<i>Tableau 7.I: Valeurs de FS en fonction de l'importance de l'ouvrage</i>	31
<i>Tableau 1.II: coordonnées de la zone d'étude dans trois systèmes de projection.....</i>	56
<i>Tableau 1.IV: Précipitation mensuelle moyenne de la région de BIR EL-ATER dans la période 1986/2014 données par la station de Thélidjène.....</i>	81
<i>Tableau 2.IV: Températures mensuelle moyenne de la région de BIR EL-ATER dans la période 1986 à 2014 données par la station de Tébessa.....</i>	81
<i>Tableau 3.IV: Propriétés géomécaniques des roches</i>	84
<i>Tableau 4.IV: Propriétés mécaniques du massif rocheux</i>	85
<i>Tableau 1.V: Centre et rayon de la surface du glissement critique circulaire.....</i>	102
<i>Tableau 2.V: Facteur de sécurité donné par GEO5 pour les différentes méthodes (Surface du glissement circulaire).....</i>	103
<i>Tableau 3.V: Coordonnées des points des surfaces des glissements critiques polygonaux les lignes grises approche avec explosif et les lignes blanches sans explosif</i>	104
<i>Tableau 4.V: Les facteurs de sécurité donné par GEO5 pour les différentes méthodes (Surface du glissement Polygonale).....</i>	105
<i>Tableau 5.V: Récapitulation des résultats donnés par les trois sous codes (les lignes grises approche avec explosif et les lignes blanches sans explosif)</i>	108
<i>Tableau 1.VI: La surface à remblayer et le volume de stérile nécessaire.....</i>	112
<i>Tableau 2.VI: Les facteurs de sécurité après l'opération de remblayage.....</i>	122
<i>Tableau 3.VI: frais d'acquisition des engins et amortissement annuel.....</i>	123
<i>Tableau 4.VI: Les coûts annuel de la consommation de gasoil</i>	123
<i>Tableau 5.VI: Les coûts de la main d'œuvre</i>	124
<i>Tableau 6.VI: Récapitulation des coûts de remblayage</i>	124

Liste des indices

\emptyset :	Diamètre des blocs ;
P_w :	Poussé de l'eau
U :	Pression interstitielle ;
W :	Poids du bloc ;
F_s :	Facteur de sécurité ;
Q :	sollicitation vectorielle ou tensorielle appliquée au massif ;
Q_{max} :	valeur maximale de Q ;
γ :	Poids volumique ;
H :	Hauteur de gradin ;
R :	Rayon de courbure de l'inclinomètre ;
P_r :	Porosité des roches ;
e :	Indice des vides ;
W_m :	Teneur en eau ;
W_v :	Teneur de vide ;
S_r :	Degré de saturation ;
K :	Perméabilité ;
DF :	Célérité Des Ondes Acoustiques ;
I_c :	Indice de continuité ;
S_1, S_2, S_3 :	Coefficient de fissuration linéaire, superficielle, volumique ;
ID :	Degré de fissuration ;
D :	Dureté ;
Ad :	Altération ;
E :	Module de Yong ;
R_c :	Résistance de compression ;
R_{cis} :	Résistance Au Cisaillement ;
σ_{tr} :	Résistance A La Traction ;
φ_{ech} :	Angle De Frottement Interne De L'échantillon ;
φ_m :	Angle De Frottement Interne Du Massif ;
C_{ech} :	Cohésion de l'échantillon ;
C_m :	Cohésion du massif ;
T :	force de cisaillement ;
N :	force normale ;
B :	Angle de talus ;
E_L, E_R :	Composantes des forces horizontales ;
X_L, X_R :	Composantes des forces verticales ;
V_v :	Volume Des Vides Dans La Roche ;
V_t :	Volume Totale De La Roche ;
V_L :	Célérité Des Ondes Longitudinales ;
V_S :	Célérité Des Ondes Transversales ;
k_f :	degré de fissuration du massif rocheux ;
k_w :	coefficient de diminution de la valeur de cohésion à cause de l'humidité ;
K_t :	coefficient de diminution de la valeur de cohésion à cause tu temps.
τ_m :	contrainte de cisaillement mobilisée à la base de la tranche
γ_w :	Poids volumique de l'eau ;
$\delta\theta$	déviation angulaire de l'inclinomètre ;

Introduction Générale

Les mouvements de terrain sont parmi les phénomènes géodynamiques les plus répandus et souvent les plus graves à la surface de la terre. Ils provoquent des modifications naturelles et continues du relief et se produisent ou se réactivent généralement de façon inopinée, notamment lors des tremblements de terre (séismes, explosions souterraines ou sous-marines, etc.), et/ou lors des périodes pluvieuses intenses avec des précipitations prolongées et de l'action conjuguée de facteurs géologiques et géomorphologiques divers. Ils peuvent être brusques, comme ils peuvent s'étaler sur plusieurs mois voire, plusieurs années. Les ruptures se produisent suivant de plans ou de formes vaguement circulaires ou par fois, elles ne présentent, au contraire, aucune caractéristique géométrique particulière. Ces phénomènes sont très destructeurs, en plus des pertes de matérielles et en vies humaines qu'ils peuvent engendrer, les aménagements humains y sont très sensibles et les dommages aux biens sont considérables et souvent irréversibles.

L'apparition de ces phénomènes spectaculaires provoque des déformations à l'intérieur comme à l'extérieur de la croûte terrestre. Ils se développent dans les massifs des roches dures ou de sols argileux tendres et se produisent dans des circonstances très variées, affectant les ouvrages construits par l'homme (déblais, remblais, route, mine et carrière...) ou, tout simplement, des pentes naturelles.

Un mouvement de terrain survient principalement lorsque la résistance des terrains est inférieure aux efforts moteurs engendrés par la gravité et l'eau souterraine ou par les travaux de l'homme, leur dynamique répond naturellement aux lois de la mécanique. L'analyse de la stabilité comporte deux volets essentiels, le premier étant un calcul de stabilité pour déterminer la courbe selon laquelle la rupture est la plus probable, et le deuxième est le calcul du coefficient de sécurité correspondant.

IL existe plusieurs types de calcul de la stabilité :

- Les calculs à la rupture qui supposent que le terrain se comporte comme un solide rigide plastique, ces calculs incluent les méthodes d'analyse limite, et les méthodes à l'équilibre limite, qui sont les méthodes les plus couramment employées. Néanmoins, les calculs à la rupture ne prennent pas en compte les déformations du terrain. Si les terrains sont très déformables ce type de calcul peut s'avérer insuffisant voire erroné ; ils ne permettent pas non plus d'évaluer les déformations et en conséquence les déplacements enregistrés sur les terrains.
- Les calculs en contraintes-déformations permettent de connaître le comportement du terrain en tout point, ils peuvent être approchés par des méthodes numériques telles que les éléments finis, les éléments frontières ou les éléments distincts.
- Depuis quelques années, la modélisation en géotechnique est en constante progression, les méthodes numériques sont devenues aujourd'hui un complément utile voire nécessaire à des méthodes d'équilibre limites, qui elles, souffrent de sérieuses limitations pour l'analyse de la stabilité. Les méthodes numériques sont exécutées par des logiciels spécialement mis en œuvre et adaptés à toutes sortes d'études géotechniques, ces logiciels permettent de traiter des problèmes en deux ou en trois dimensions. Le phasage des travaux peut être suivi, et l'utilisateur peut aussi visualiser, grâce à des sorties graphiques, les résultats tel que le maillage, les champs de déplacements, les contraintes et déformations principales etc.

Dans ce travail, nous intéressons aux pentes artificielles provoquées par l'homme plus exactement, les mines et carrières à ciel ouvert, dans lequel nous pouvons constater à quel point l'homme peut influencer sur la partie superficielle de l'écorce terrestre, considérant par exemple les gigantesques mines à ciel ouvert existant actuellement dans le monde (dont la superficie dépasse quelques dizaines de kilomètres carrés pour une profondeur de plus de 100

m), ces dernières peuvent être extraites des millions et des millions de mètres cubes de minerai et de stérile et pompe plus de 120 000 m³ d'eau chaque jour.

La **stabilité des talus** des mines et des carrières à ciel ouvert reste une des questions principales qui se pose lors de l'exploitation des gisements. La stabilité des talus a une influence directe sur la sécurité du travail dans la mine, les principes technologiques d'exploitation, la profondeur totale de la mine, les problèmes de drainage, etc.

On ne peut sous-estimer le rôle économique d'un problème de stabilité des talus. Avec la profondeur très importante des mines modernes, un changement de l'angle des talus de 3 ou 4° conduit à une modification des volumes des travaux de découverte qui se chiffrent en millions de mètres cubes. D'autre part, des angles de talus trop élevés peuvent conduire à la déstabilisation des talus, au développement de glissements et d'écoulements sur les bords de la mine. Ces accidents causent beaucoup des dégâts matériels aux entreprises et gênent le cycle normal de l'exploitation, sans oublier qu'ils peuvent être dangereux pour la vie du personnel.

La définition des angles de talus qui assurent la stabilité des bords d'exploitation demande une étude détaillée de tous les facteurs géologiques et géotechniques du massif : la lithologie, les conditions tectoniques, les propriétés physiques et mécaniques des roches, la fracturation du massif, la situation hydrogéologique, etc.

La présente étude traite un problème de ce type concernant le calcul de stabilité du bord Nord-Ouest de la carrière de phosphate de **Kef Essennoun** dans la mine de Djebel Onk. Ce gisement se situe dans la Wilaya de Tébessa à la frontière Algéro-tunisienne représente actuellement le cœur de la mine car, c'est le seul gisement en exploitation parmi celles qui existe dans la région. Cette carrière a été l'objet d'un grand éboulement en 2007 qui a mené à la fermeture de la fosse principale et la réouverture d'une autre mais le problème de la stabilité a toujours eu lieu ce qui nécessite une étude détaillée pour la poursuite des travaux d'exploitation.

Notre étude est divisée en deux parties, la première partie bibliographique représentée par le premier *chapitre I* dans lequel, nous avons donné des généralités concernant l'aspect théorique de l'étude de la stabilité des talus et des pentes que ce soit naturel ou artificiel tel que: les différents types de glissement, les principaux facteurs influençant la stabilité des roches, les techniques des surveillances de mouvements des terrains et l'ensemble des méthodes du calcul de facteurs de sécurité.

Dans la deuxième partie notamment les chapitres II, III, IV, V, VI, nous allons essayer d'abord de réaliser une étude approfondie sur la zone d'étude (**Kef Essennoun**) du point de vue géologique, géotechnique, hydrogéologique, climatologique...etc, afin de mettre en évidence tous les facteurs qui peuvent contribuer à l'instabilité de la carrière, ensuite, nous avons analysé le glissement de 2007 qui représente un cas similaire à celui qui risque à se produire dans le côté N-O de la nouvelle fosse, après, on a évalué la stabilité de ce dernier avec des logiciels destinés à ces types de problème (**GéoStudio, GEO5**) qui fournissent des facteurs de sécurité pour les différentes méthodes qui les exploites tel que la méthode de l'équilibre limite (*Bishop, Janbu, Fellenuis, M-P...*) et la méthode des éléments finis, et en fin, nous proposons une méthode pour la stabilisation de la fosse et la réouverture du gisement.

Chapitre I : Généralités Bibliographiques

1. Introduction

Les problèmes de stabilité des pentes se rencontrent fréquemment dans les mines et carrières à ciel ouvert, la construction des routes, des canaux, des digues et des barrages. En outre certaines pentes naturelles sont ou peuvent devenir instables. Ce phénomène pourra être catastrophique et provoquer des pertes en vies humaines et matériels ainsi que des dégâts naturels considérables.

Les mouvements de terrain sont très variés, par leur nature (glissements de terrains, éboulements rocheux, coulées de boues, effondrements de vides souterrains, affaissements, gonflement ou retrait des sols.etc) et par leur dimension (certains glissements, comme celui de la *Clapière* dans les *Alpes Maritimes*, peuvent atteindre plusieurs dizaines de millions de m³).

La nature géologique des terrains tout comme la topographie et la morphologie représente l'un des principaux facteurs d'apparition de phénomènes de mouvement de terrains dont, les matériaux affectés sont très variés (roche marneuses ou schisteuse, formations tertiaires altérées, colluvions fines, moraines argileuses, etc.) mais globalement la présence des formations argileuse en forte proportion est toujours un élément défavorable compte tenu de ses mauvaises caractéristiques mécaniques. La saturation des terrains en eau (présence de sources, fortes précipitation, fonte des neiges brutales) joue aussi un rôle moteur dans le déclenchement de ces phénomènes.

Les méthodes et techniques de surveillances appliquées aux mouvements de terrain ont fait l'objet, depuis une vingtaine d'année, de grandes avancées. Ces progrès ont engendré une instrumentation de plus en plus importante des sites instables.

Le danger de l'apparition d'un glissement peut être pré-estimé par l'analyse de la variation du facteur de sécurité en fonction de la forme et de la position de la surface possible de glissement pour laquelle le facteur de sécurité a la valeur minimum qui représente la surface critique de rupture

Il existe plusieurs méthodes dans la littérature pour l'analyse de stabilité d'un talus que ce soit naturel ou artificiel. Ces méthodes apparaissent en général trop simples et trop figées ou trop élaborées et de maniement délicat. Ces dernières diffèrent entre elles par les conditions d'équilibre statique utilisées et par les hypothèses admises pour annuler l'indétermination statique du problème.

Dans ce présent chapitre, nous présenterons quelques généralité sur les mouvements des terrains : les différents types de glissement, les facteurs influençant leur stabilité, les techniques de surveillances et les divers méthodes de calcul de facteur de sécurité.

2. Différentes type de mouvement de terrain

On regroupe sous l'appellation de " **mouvement de terrain** " tout phénomène affectant une masse de sols ou de roches et le faire déplacer d'un état à un autre. Ces sont des phénomènes d'origines très diverses (naturelle ou anthropique). Annuellement, ils provoquent en moyenne la mort de 800 à 1 000 personnes dans le monde et occasionnent des préjudices économiques et des dommages très importants.

2.1. Surface de glissement

La surface de glissement n'a de surface que de nom, car il s'agit en fait d'un certain volume de remaniement entre le massif glissant (souvent en masse non remaniée) et le terrain qu'aucun mouvement n'affecte. L'épaisseur de cette zone peut varier de quelques dixièmes de millimètre à quelques décimètres.

La variété des surfaces de glissement est très grande, mais on peut les classer en tenant compte de l'homogénéité du terrain quant à sa géométrie interne et à ses propriétés mécaniques. Dans les terrains très homogènes, on observera que les surfaces de glissement sont toujours très proches de figures géométriques simples telles que cercles ou droites, lorsque les terrains sont très hétérogènes, la surface de glissement est associée à cette l'hétérogénéité; dans un terrain sédimentaire présentant une succession de strates de propriétés mécaniques et hydrauliques très différentes, la surface de glissement emprunte généralement une ou plusieurs couches privilégiées.

2.2. Classification des mouvements de terrain [23], [19]

De nombreuses classifications des mouvements de terrain ont été proposées, basées sur des critères tels que le mécanisme des mouvements, la composition des matériaux, la vitesse des processus ou les mécanismes de déclenchement. Afin d'avoir une vision globale de ces mécanismes et d'éviter leurs confusions.

Selon la vitesse de déplacement, deux ensembles peuvent être distingués, les mouvements lents (Éboulement, chute des blocs, coulée.etc) et les mouvements rapides (fluage, Affaissement). Seuls les mouvements rapides sont directement dangereux pour l'homme. Leurs conséquences sont d'autant plus graves que les masses déplacées sont importantes. Pour les mouvements lents les conséquences sont essentiellement socioéconomiques ou d'intérêt public. Nous pouvons résumer les différents types de mouvements de terrains dans le tableau suivant qui contiennent les principales classes de déstabilisation sur les versants en fonction des terrains concernés.

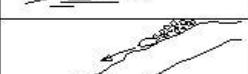
Classe	Types	Schéma	Terrains concernés	Remaniement interne	Vitesse moyenne
Glissements de terrain (sens strict)	Glissement circulaire (loupe)		roches peu cohérentes -marne -alluvions -moraines	Faible	quelque cm à quelque m par jour
	Glissement Plan				discontinue (saisons)
	Glissement de niveau d'altération		Altérites		quelque m par jour
Coulées	Coulée de Solifluxion		Roches meubles	Fort	discontinue (saisons)
	Coulée de boue				Plusieurs m par secondes variable (selon fluidité)
Ecroulements	Ecroulement de Surplomb		Roches cohérentes stratifiées ou non		déclenchement très rapide
	Ecroulement d'aval pendage				chute en quelques secondes
Fauchage				Variable selon le stade	très lent quelques cm par an

Tableau 1-I: Différentes type de mouvement de terrains (D'après Compy M., Macaire J.J., 2003)

2.3. Les déformations dans les mines à ciel ouvert [30], [20]

Une classification des déformations et ruptures appliquée aux mines à ciel ouvert a été proposée par Fissenko. Elle contient cinq types principaux de déformations : Chutes de blocs, Éboulements, Glissements, Mouvements de fluage et Déformations par affaissement. La classification proposée dans la figure 1-I se base sur les mêmes cinq types de déformations, plus 5 autres types provoqués par l'action hydraulique directe. Mais certains types de déformations du premier groupe peuvent quand même être influencés par l'action des eaux.

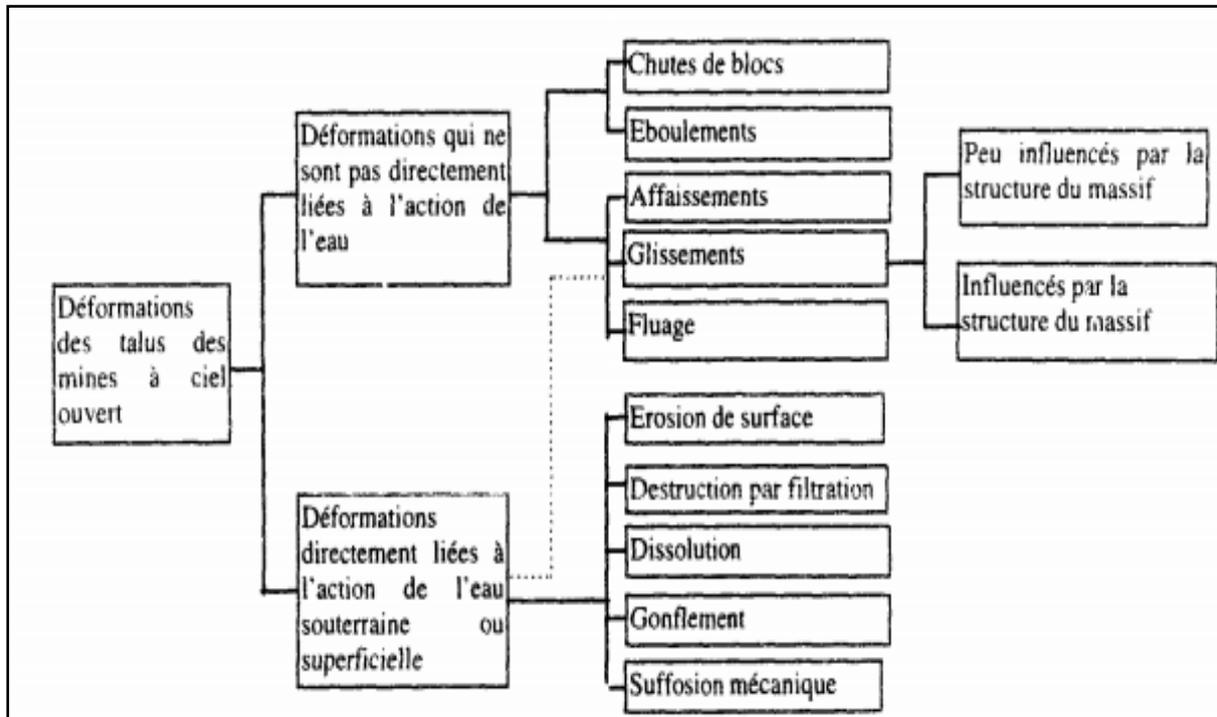


Figure 1-I: Classification des déformations dans les mines à ciel ouvert

2.4. Représentation cartographique d'un mouvement du terrain [36]

Compte tenu de son importance, le recueil de l'information existante pour un mouvement de terrain doit être réalisé de la manière la plus complète possible, sans toutefois prétendre à l'exhaustivité, en fonction des moyens pouvant être engagés. On utilisera dans la mesure du possible toutes les sources d'informations disponibles. Les données ainsi obtenues seront toujours vérifiées et confirmées par l'examen sur terrain ainsi que par l'observation des indices actuels dans les cas des phénomènes évolutifs (déformations de surface, dommages aux ouvrages).

Les informations recensées et validées seront transcrites sur un support cartographique dont l'échelle dépend de leur nombre, de leur ampleur et de leur degré de précision.

On utilisera en général un fond topographique à l'échelle du 1/25 000, éventuellement agrandi au 1/10 000. Dans certains cas particuliers (zone urbaine riche en événements) on pourra utiliser un plan au 1/5000 s'il existe ou les plans cadastraux.

Chaque phénomène pourra être représenté par un symbole ou un contour si son ampleur le permet selon les conventions proposées au tableau 2-I. Sa date d'apparition y figurera le cas échéant.

Afin d'en soigner la lisibilité, on pourra recourir à un fond topographique atténué et on identifiera autant que possible chaque phénomène par un code de couleur conventionnel. Il conviendra également d'indiquer la date d'établissement de la carte.

Phénomène	Indice représentatif	Implantation zonale		Ponctuelle
		Limite connue	Limite supposée	
Affaissements	F			○
Effondrements	F			⊗
Tassements par retrait	D			*
Éboulements, chutes de blocs, chutes de pierres	P			▽
Glissements, fluages	G			∪

Tableau 2-I: Représentation cartographique de différents types de mouvements de terrain

2.5. Phases du glissement de terrain

Les glissements de terrain se caractérisent par des phases d'activité variables : des périodes de vitesse de glissement plus élevée avec des phases de calme apparent (Figure 2-I).

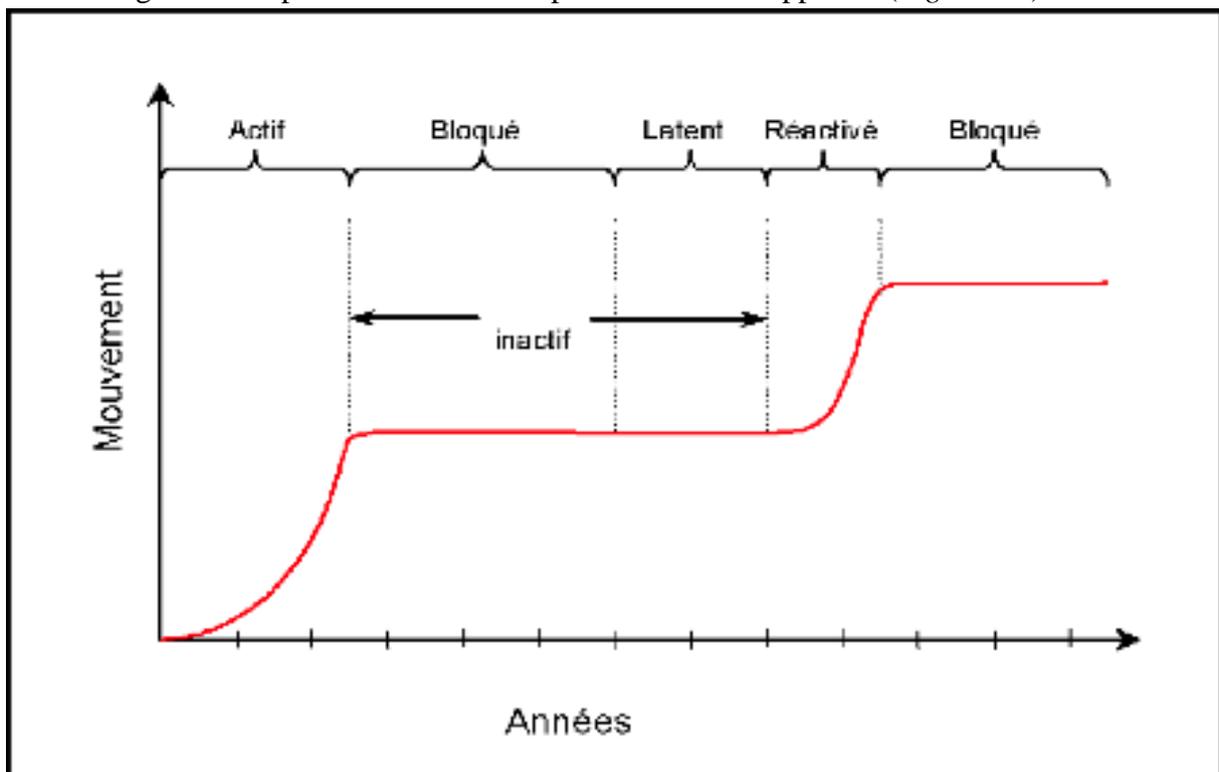


Figure 2-I: Différentes phases de l'activité d'un glissement de terrain

Glissements de terrain actifs :

Un glissement de terrain est considéré comme actif si un mouvement peut être constaté. Le déplacement peut être minime, les déformations de moins d'un millimètre étant toutefois difficilement détectables. Les glissements actifs comprennent les glissements présentant des vitesses plus ou moins constantes à long terme tout comme les glissements avec des phases successives d'accélération.

Glissements de terrain réactivés :

Désigne les glissements de terrain qui quittent une phase inactive pour entrer dans une phase active. Habituellement, les glissements de terrain réactivés se déplacent le long d'une surface de glissement existante.

Glissements de terrain inactifs:

Désigne les glissements de terrain restés immobiles pendant plusieurs années. Ceux-ci se subdivisent en quatre catégories :

- Glissements bloqués ;
- Glissements latents ;
- Glissements abandonnés ;
- Glissements stabilisés.

2.6. Intensité du mouvement du terrain

Vu de la diversité des mouvements de terrain, il est difficile de traduire directement leurs caractéristiques physiques en termes d'intensité, sauf à définir autant que de type de mouvement ce qui rendrait le zonage d'aléa difficilement lisible. Il faut donc recourir à des critères plus globaux permettant de les rendre comparable entre eux et d'en faciliter l'utilisation au plan du zonage réglementaire.

Plusieurs voies sont possibles pour estimer un niveau d'intensité représentatif de l'ensemble des phénomènes :

- L'intensité peut être traduite, comme pour les séismes, en termes de potentiel de dommages. Cependant elle dépend non seulement du phénomène physique, mais également de la vulnérabilité du bâti.
- L'intensité peut être évaluée en fonction de l'importance et de l'ordre de grandeur du coût des mesures qui il pourrait être nécessaire de mettre en œuvre pour s'en prémunir. Des classes d'intensité croissantes peuvent être identifiées selon que ces mesures sont du ressort d'un propriétaire individuel, d'un groupement de propriétaire, d'un promoteur ou d'un aménageur, ou qu'elles débouchent largement le cadre parcellaire et qu'elles nécessitent une intervention et un investissement collectifs.

Le *tableau 3-I* montre que l'importance de ces mesures et notamment les mesures de stabilisation des phénomènes peuvent être directement estimées à partir des caractéristiques des phénomènes physiques et ceci, indépendamment du type d'ouvrage ou de construction à protéger.

Niveau d'intensité	Niveau de d'importance des parades	Exemple de mesure de prévention
Faible	Supportable financièrement par un propriétaire individuel	Purge de quelques blocs instables en falaise, confortement d'une petite galerie par pilier maçonné.
Moyenne	Supportable financièrement par un groupe restreint de propriétaires (immeuble collectif, petit lotissement)	Comblement d'une cavité souterraine, drainage d'une zone instable
Forte	Intéressant une aire géographique débordant largement le cadre parcellaire et/ou d'un coût très important et/ou techniquement difficile	Stabilisation d'un glissement de terrain important, confortement d'un pan de falaise instable.
Majeure	Pas de parade technique	Phénomène de grande ampleur tel que Séchilienne ou la Clapière

Tableau 3-I: Exemple d'échelle conventionnelle d'intensité

3. Facteurs influençant la stabilité de talus [7]

3.1. Genèse des glissements de terrain

Certains facteurs favorisent la dégradation et donc le vieillissement d'un massif rocheux et ceci entraîne généralement la mise en mouvement des terrains. Si nous schématisons le déplacement théorique d'un mouvement de terrain au cours du temps (*Figure 3-I*), on constate que la génération de celui-ci résulte de l'action de facteurs de préparation qui ont un rôle de dégradation et fragilisation des terrains. Ensuite, le mouvement de terrain s'initie par l'action de facteurs déclenchants qui font varier les conditions de stabilité du massif et peuvent engendrer l'apparition prématurée de mouvements de terrain. De plus, il existe les facteurs de prédisposition qui conditionnent le mouvement de terrain dans sa forme, sa durée, sa propagation.

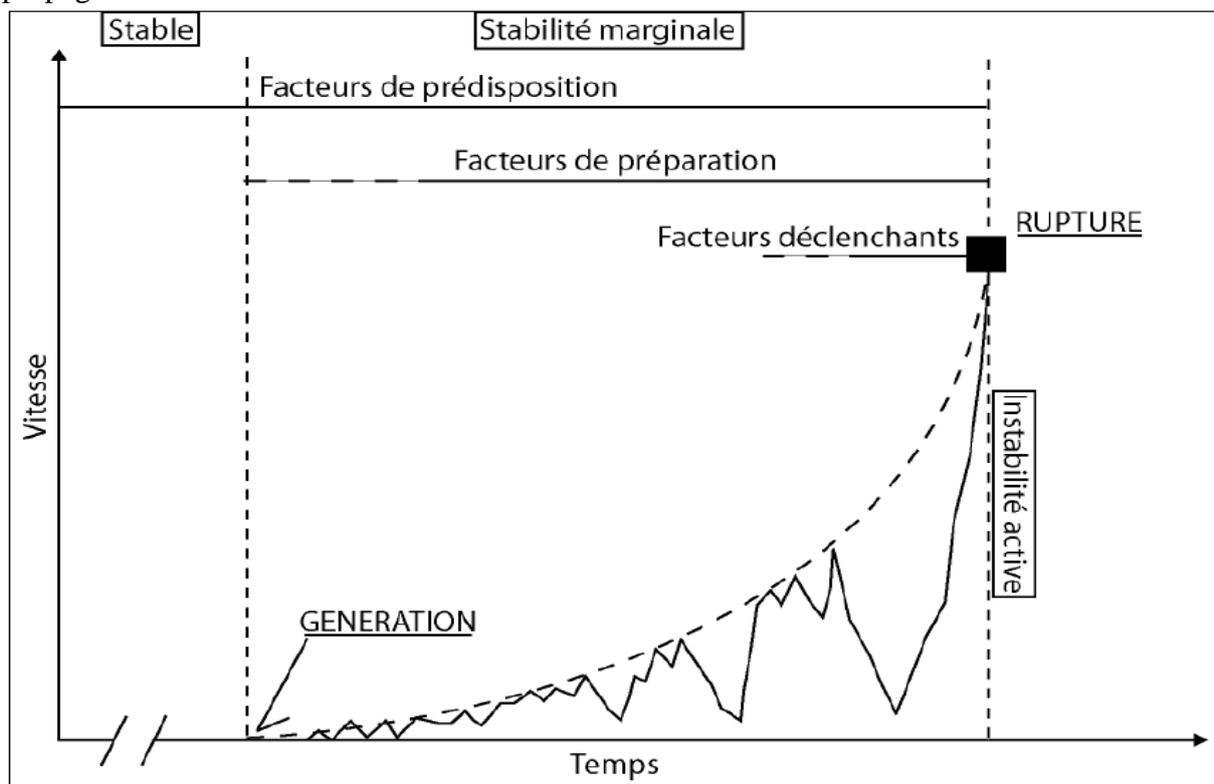


Figure 3-I: Vitesses de déplacement du versant en fonction du temps

3.2. Facteurs de préparation

Avant tout mouvement, il existe un état d'équilibre entre les différentes forces qui en sont responsables. Les causes de ces mouvements doivent donc être recherchées dans les variations de ces forces qui peuvent être modifiées par des facteurs naturels ou anthropiques. En premier lieu, il est nécessaire de comprendre l'évolution naturelle d'un massif ou d'un versant avant le glissement de terrain. Dans le cas d'un massif rocheux, son état de dégradation au cours du temps sera lié à l'action de différents facteurs dits préparatoires, dont leurs interactions entraînent une diminution des caractéristiques mécaniques du massif au cours du temps.

3.2.1. Facteurs géologiques

Les facteurs géologiques sont souvent intrinsèques aux massifs de sols ou de roches, ils affectent sa stabilité mais aussi sa résistance à la dégradation en fonction de la présence de matériaux fragiles, altérés, cisailés ou fissurés qui se nomment matériaux favorables à la rupture.

L'altération est un processus lent qui dégrade les matériaux. La première raison de cette altération est les conditions climatiques, en particulier le rôle de l'eau sous toutes ses formes. Par exemple, la production d'argile d'altération dans un massif rocheux a un impact négatif sur la stabilité de celui-ci.

La tectonique régionale induit d'importantes contraintes dans le massif rocheux, surtout dans les secteurs où il existe de grands accidents du type chevauchement, ou d'importants réseaux de fracture. Les mouvements tectoniques provoquent aussi de nombreux séismes, surtout en milieu montagneux. Ces séismes engendrent la fragilisation des formations rocheuses par l'apparition de fractures.

3.2.2. Facteurs géomorphologiques

La stabilité d'un versant montagneux est liée d'une part, à la nature géologique des formations le constituant et d'autre part, à sa morphologie (pente, escarpement,...). En effet, il existe de nombreux éléments qui interviennent dans la modification de la morphologie d'un versant (érosion torrentielle, érosion glaciaire, érosion météorique, facteurs anthropiques,...). Par exemple, l'érosion glaciaire crée, dans un premier temps, des auges glaciaires qui favorisent l'augmentation de la pente et dans un deuxième temps engendre une diminution de la butée en pied de versant.

3.2.3. Facteurs physiques

En secteur montagneux, la température agit surtout en raison des importantes variations saisonnières et diurnes. En effet, les cycles de gel-dégel provoquent l'éclatement de la roche ainsi que l'agrandissement progressif des fractures préexistantes liées à la tectonique régionale du secteur,

L'eau intervient dans les cycles de gel-dégel, mais aussi lors de sa circulation à travers les fractures (altération, oxydation chimique). En effet, l'eau provoque dans un premier temps, une importante altération de la roche et fragilise le massif. Dans un deuxième temps, elle peut induire d'importantes contraintes mécaniques au sein d'un massif rocheux par augmentation des pressions interstitielles dans les fractures.

3.2.4. Facteurs anthropiques

L'homme, par ses nombreuses interventions lors de travaux d'aménagement, de construction et d'extraction intervient surtout dans la modification morphologique du massif rocheux et des conditions hydrauliques initiales. Le cas le plus fréquent est l'excavation de la butée du massif lors de la construction d'une route, l'exploitation minière et la modification des circulations d'eau par la construction des murs de soutènement ou des barrages.

3.3. Facteurs de prédisposition

Tous les versants sont susceptibles d'aboutir à une rupture pour peu que des structures particulières soit présentes dans le massif. C'est l'existence de ces structures distinctes qui, individuellement ou en combinaison, vont favoriser la rupture des versants et la génération de mouvements gravitaires. Par exemple, c'est l'existence de structures lithologiques ou tectoniques inclinées favorablement par rapport à la pente qui permet les déplacements du versant. De même en vallée, la présence d'un relief caché sous les formations superficielles dit « crypto-relief » peuvent représenter un facteur de prédisposition aux instabilités.

3.4. Facteurs déclenchants

Ils correspondent à l'action naturelle ou anthropique nécessaire au déclenchement d'un glissement de terrain. Cette action déclenchante peut être liée à un ou plusieurs stimuli

externes (pluie intense, séisme, érosion régressive brutale, ...). Cela se traduit par une réponse presque immédiate du versant qui se met en mouvement. Dans cette partie, on traitera des facteurs déclenchants qui sont les séismes et les différentes actions de l'eau. Il faut toutefois noter que ces facteurs peuvent aussi être des facteurs de préparation à la rupture.

3.4.1. Rôle des secousses sismiques

La stabilité d'un massif est fonction du rapport des forces stabilisatrices sur les forces déstabilisatrices. Rappelons, qu'en cas de séisme, il se produit une émission d'ondes sismiques ou ondes élastiques de deux types qui se propagent dans le sol (les ondes de volume dites ondes longitudinales et transversales et les ondes de surface dites ondes de Love et de Reyleigh). Ces ondes sismiques provoquent une sollicitation dynamique supplémentaire. L'équilibre des forces est ainsi modifié, ce qui peut conduire à des mouvements de terrain. Les déstabilisations dues aux séismes peuvent se manifester de différentes façons. Elles peuvent provoquer immédiatement des glissements de terrain, des coulées, des chutes de blocs et d'importantes dégradations des infrastructures à cause de la thixotropie des sols. Elle peut aussi avoir des effets à plus long terme, par augmentation de la fissuration du massif rocheux et diminution de sa résistance mécanique. De plus, les fissures agrandies tendent à plus long terme à augmenter l'infiltration de l'eau dans le massif, à favoriser l'éclatement du matériau à partir des cycles de gel-dégel et, ainsi aboutir à la rupture du massif.

3.4.2. Influence de l'eau souterraine [20]

L'eau joue un rôle très important dans la stabilité des pentes et des talus, aussi il convient de lui accorder un intérêt tout particulier. Un modèle très simple suffit à démontrer l'abaissement du coefficient de sécurité entre le cas d'un écoulement normal et celui où l'exutoire est bouché pour un bord d'une mine à ciel ouvert (figure 4-I).

- Cas 1: exutoire ouvert (C=0):

On calcule: le poids du bloc **W** par la relation suivante:

$$W = 1/2 (\gamma \cdot H^2 \cotg \alpha) \quad (1-I)$$

La poussée due à l'eau **P** :

$$P_w = 1/2 \gamma_w \cdot H^2 \quad (2-I)$$

La pression interstitielle **U** :

$$U = 1/2 \gamma_w \cdot H \cotg \alpha \quad (3-I)$$

L'effort résistant **T**

$$T = (W - U) \tg \varphi \quad (4-I)$$

avec φ angle de frottement interne du massif rocheux.

- Cas 2: exutoire fermé (C=0)

W et P sont les mêmes que précédemment

$$U = \gamma_w \cdot H^2 \cotg \alpha \quad (5-I)$$

Le coefficient de sécurité est donné par $F_s = T/P$

Donc

$$F_s = \frac{W - U}{0.5 \gamma_w H^2} \tg \varphi \quad (6-I)$$

Cas 1

$$F_s = \frac{\gamma - \gamma_w}{\gamma} \left(\frac{\text{tg}\phi}{\text{tg}\alpha} \right) \quad (7-I)$$

Cas 2

$$F_s = \frac{\gamma - 2\gamma_w}{\gamma} \left(\frac{\text{tg}\phi}{\text{tg}\alpha} \right) \quad (8-I)$$

Avec :

- γ : Poids volumique du bloc considéré.
- γ_w : Poids volumique de l'eau.
- H : Hauteur du gradin.

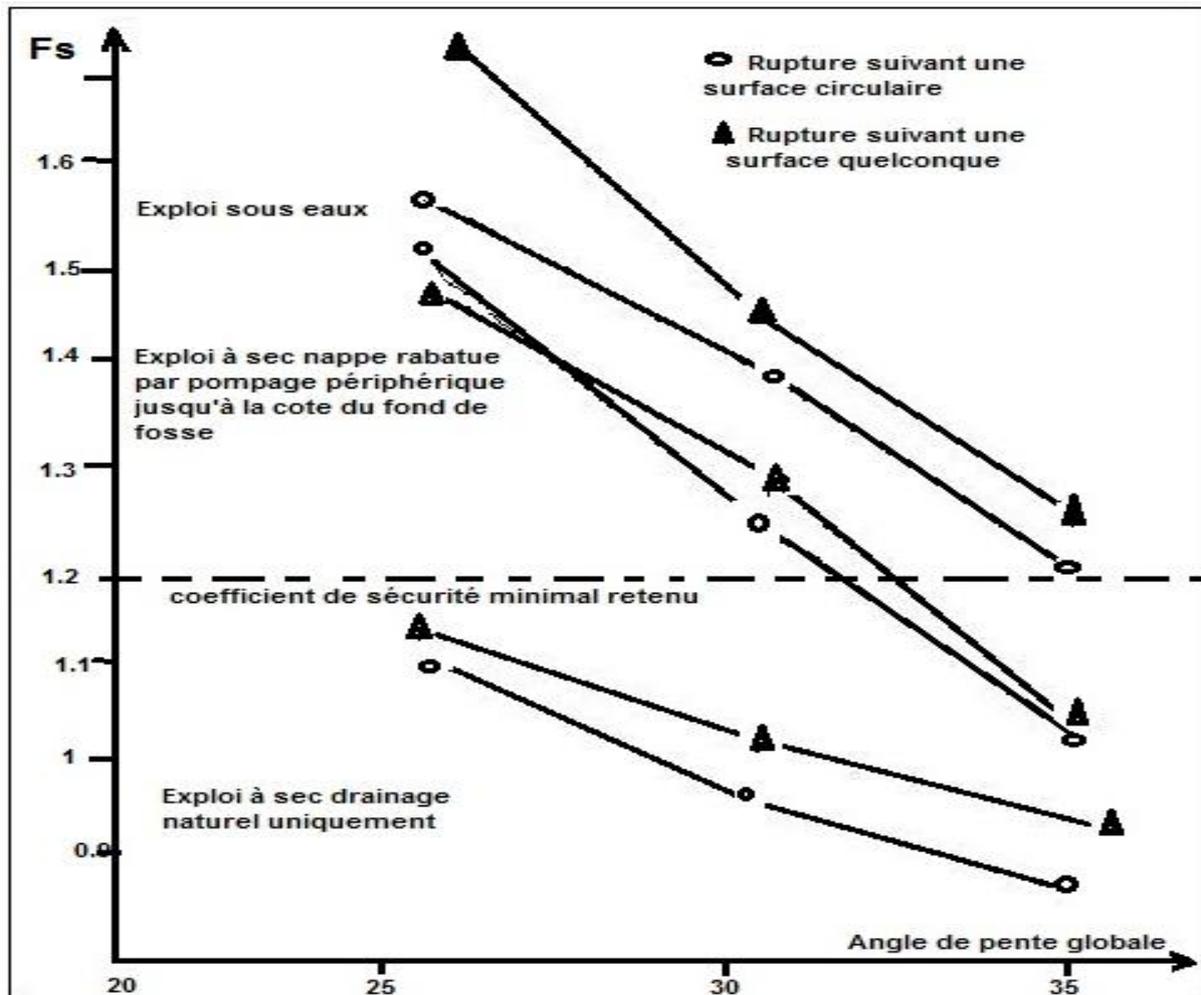


Figure 4-I: Variation du F_s en fonction de α pour différentes conditions d'exploitation et de drainage pour une mine à C-O

3.4.3. Effet du gel

La formation de glace dans les fissures provoque leur ouvrage et leur élargissement. En même temps la cohésion de la roche diminue. Dans des argiles et dans des sols argileux-sablonneux la fonte des lentilles de glace mène à une augmentation de la teneur en eau. Par le gel de la surface le drainage de la pente est empêché, la nappe d'eau augmente, une influence sur la stabilité du talus est possible.

3.4.4. Altération superficielle

Aussi bien l'altération mécanique que l'altération chimique peut diminuer la cohésion de la roche en place. Souvent l'altération chimique de tonsteins par hydratation et échange d'ions a déclenché le glissement de terrains.

3.5. Facteurs techniques liés à l'exploitation des mines à ciel ouvert [20]

L'analyse des processus de glissement des terrains dans les mines à ciel ouvert doit tenir compte de l'influence des facteurs techniques liés à la méthode d'exploitation. Parmi ces facteurs, on peut citer la géométrie de la mine et des stériles, les angles de talus de la mine et des stériles, la méthode d'excavation et de l'abattage de la roche, la structure de la mécanisation des travaux, la présence à proximité de la mine d'excavations souterraines, les méthodes et les paramètres de pompage, etc.

3.5.1. Influence de la profondeur de la fosse sur l'angle de la pente général

La figure 5-I illustre l'influence de la profondeur d'une exploitation de combustible solide en terrain alluvionnaire, sur le coefficient de sécurité minimal vis-à-vis d'une rupture circulaire en fonction de l'angle de pente globale des flancs de fosse. On remarque qu'à sécurité constant, plus une fosse sera profonde, plus son angle sera faible et une même profondeur de la fosse la F_s diminuer avec l'augmentation de l'angle globale de la pente.

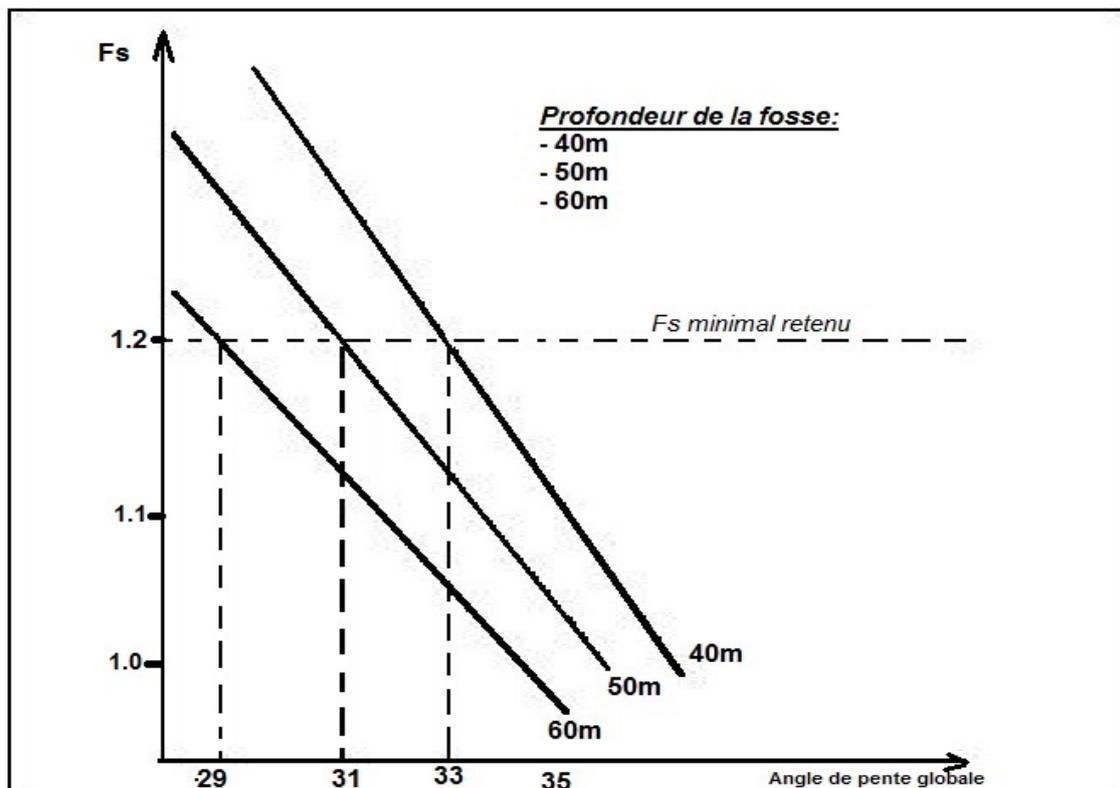


Figure 5-I: Variation du F_s en fonction de l'angle générale du talus

3.5.2. Influence des phases et des méthodes d'exploitation

La stabilité d'une fosse en phase finale n'est pas indépendante de la façon dont elle est creusée, la modification des pressions interstitielles dans des talus en terrain peu perméables entraîne une diminution de la résistance au cisaillement qui peut conduire à des ruptures, parfois de nombreuses années après l'excavation. Dans le cas d'une exploitation à l'aide de roues-pelles et de convoyeurs, les calculs de stabilité des gradins doivent tenir compte des surcharge ponctuelles dues à ces engins, la présence ou le développement de travaux souterrains dans une carrière cause très souvent de graves problème de stabilité liés à la réduction de la résistance au cisaillement de l'ensemble du massif et nécessite dans chaque cas une étude spécifique et un suivi attentif du comportement des terrains. Il est important de signaler que l'approfondissement d'une fosse peut entraîner une rupture des flancs existants,

stable avant approfondissement *figure 6-I*. Les méthodes de calcul de stabilités classiques (par tranche en particulier) ne prennent pas compte de ce genre de phénomène qui est du à l'apparition possible d'une zone plastique en pied du talus de la fosse initial du fait de son approfondissement.

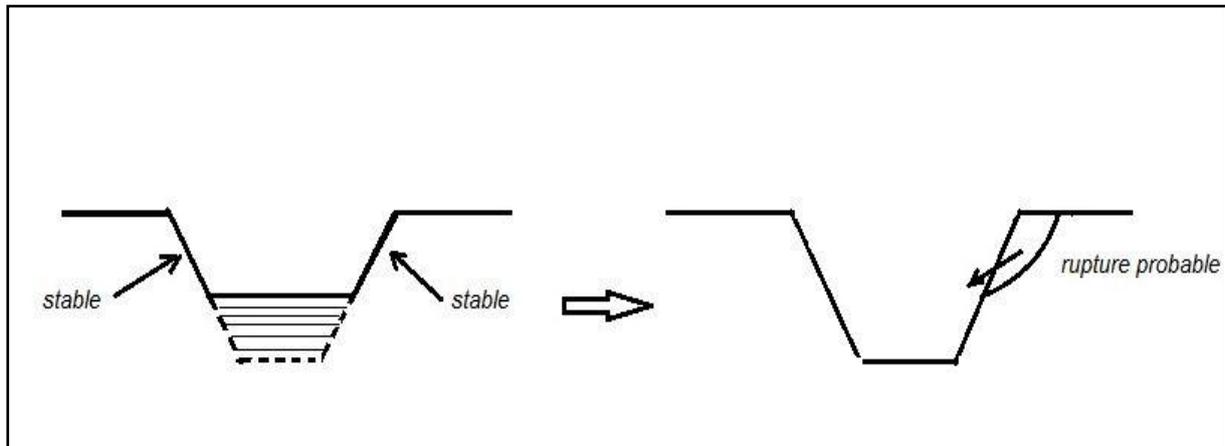


Figure 6-I: Rupture possible d'une pente au cours de l'approfondissement d'une fosse

3.5.3. Influence de la géométrie

Généralement, les bords de fosses réels ne sont pas rectilignes, le plus souvent ils sont concaves, ils peuvent présenter des éperons convexes. L'influence de la concavité ou au contraire de la convexité des bords de fosse sur la valeur réelle du coefficient de sécurité, comparée à celle calculée à partir des méthodes classiques "par tranches", est illustrée par la *figure 7-I*. En raison de l'effet d'arc-boutement dans le plan horizontal, le coefficient de sécurité calculé est en réalité sous estimé, dans le cas où le bord de fosse est concave. Cet effet est d'autant plus important que le rayon de courbure du bord de fosse soit petit. La convexité des bords de fosse induit également une correction du coefficient de sécurité calculé, qui doit être cette fois-ci. Réduit car surestimé par rapport la réalité.

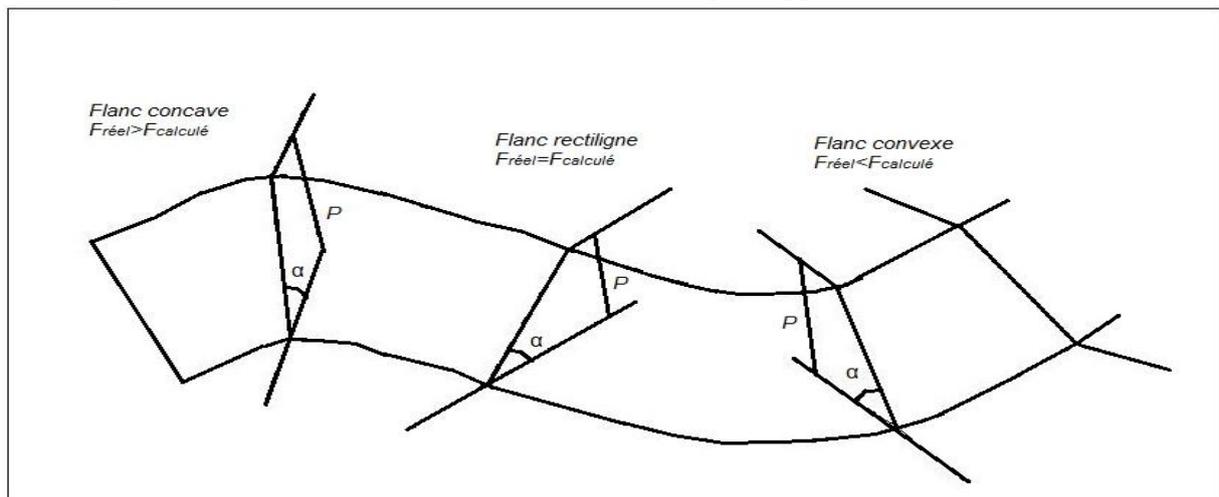


Figure 7-I: influence de la géométrie du bord de fosse sur le coefficient de sécurité

4. Méthodes et techniques de surveillances appliquées aux mouvements de terrain

Le contrôle et l'auscultation du comportement des pentes naturelles ou artificielles (fosse d'exploitation minière ou d'une carrière à ciel ouvert) intègrent les mesures et observations de surveillance pour analyser non seulement les comportements mécaniques et hydrauliques du massif mais également l'influence des phases et des techniques d'excavation et l'efficacité des dispositifs de drainage et des travaux de confortement éventuels. L'objectif principal de cette

auscultation est bien entendu de pouvoir prendre à temps les dispositions nécessaires pour assurer la sécurité du personnel, du matériel et de réserves en cas de risque de glissement et, si possible, d'éviter toute rupture accidentelle. Ceci suppose non seulement que des observations et des mesures soient régulièrement effectuées au fur et à mesure de la progression de l'excavation, mais également, qu'elles soient réalisées avec le plus grand soin et rapidement interprétées.

Généralement le suivi temporel et spatial de ces zones instables ou risque d'être instables se fait de deux manières différentes en fonction des échelles spatiales et temporelles considérées.

4.1. Méthodes de mesures *In-Situ* [28]

Ces méthodes consistent à réaliser des mesures *in-situ* de la topographie et des déplacements de surface ou proche de la surface. Dans ce cadre, une grande variété de techniques pourra être réalisée ; nous avons répertorié les principales en indiquant l'échelle spatiale et leur précision dans le *tableau 4-1* ci-dessous.

Méthode	Utilisation	Mesure	Etendue de mesure	Précision
Nivelle à vis micrométrique	Déplacement angulaire du sol	Da	0.125 rad	4.10-4 rad
Fissuromètre à pige centrale	Mouvement de compartiments	dD	< 20 mm	± 0.1mm
Mire à vernier	Ouverture de petites fissures	dD	<200 mm	± 0.5 mm
Extensomètre à base courte	Ouverture de fissures	dD	25 - 450 mm	± 0.1mm
Distance-mètre à fil d'invar	Déplacement de points mobiles	dD	Jusqu'à 40m	± 0.1mm
Extensomètre à base longue en fil d'invar	Déplacement de points mobiles	dD	Jusqu'à 100m	± 0.5mm
Niveau de chantier	Variation d'altitude	dZ	Variable	2cm
Distance-mètre électro-optique	Déplacement de cibles mobiles	dD	1-10km	7mm±1-5ppm
Théodolite et distance-mètre électro-optique	Déplacement de cibles mobiles	dX,dY,dZ	1-10km	3mm±1-5ppm
GPS	Déplacement de cibles mobiles	dX,dY,dZ	Lignedebase<30km	Milli à centi

Tableau 4-1: Principales méthodes de mesure et de suivi in-situ des mouvements de terrain

Les méthodes des mesures in-situ le plus couramment utilisées sont les suivantes :

- Méthodes optiques pour mesure topographique.
- Méthodes mécaniques (inclinomètre, pendule, extensomètre,...etc.).

4.1.1. Méthodes optiques

Ce sont essentiellement les mesures topographiques faisant appel à des techniques de nivellement et/ou de triangulation réalisées à l'aide d'instruments électro-optique. Les mouvements pouvant à terme conduire à la rupture, seront détectés d'autant plus tôt que les mesures sont plus fréquentes, mais aussi plus précises à la fois dans le plan horizontal et selon le plan vertical. La précision atteinte lors des levés topographiques dépend d'un certain nombre de paramètres tels que l'appareillage utilisé et également du soin apporté aux mesures et à la pose des points de référence.

4.1.1.1. Méthode géodésique

En ce qui concerne la surveillance des pentes et talus, les méthodes géodésiques sont les plus courantes et sont satisfaisantes pour détecter des mouvements de terrains de l'ordre de 5 mm par an : sur la surface d'un talus, un réseau de points de mesure est installé (cibles optiques) (*figure 8-1*), on mesure alors, à intervalles réguliers, le déplacement de ces points à partir de points de référence présumés stables et installés sur les abords du talus. Le géodimètre peut être un appareil efficace pour ce genre de surveillance selon la disposition du réseau. Les méthodes optiques par triangulation peuvent par contre être laborieuses et coûteuses.

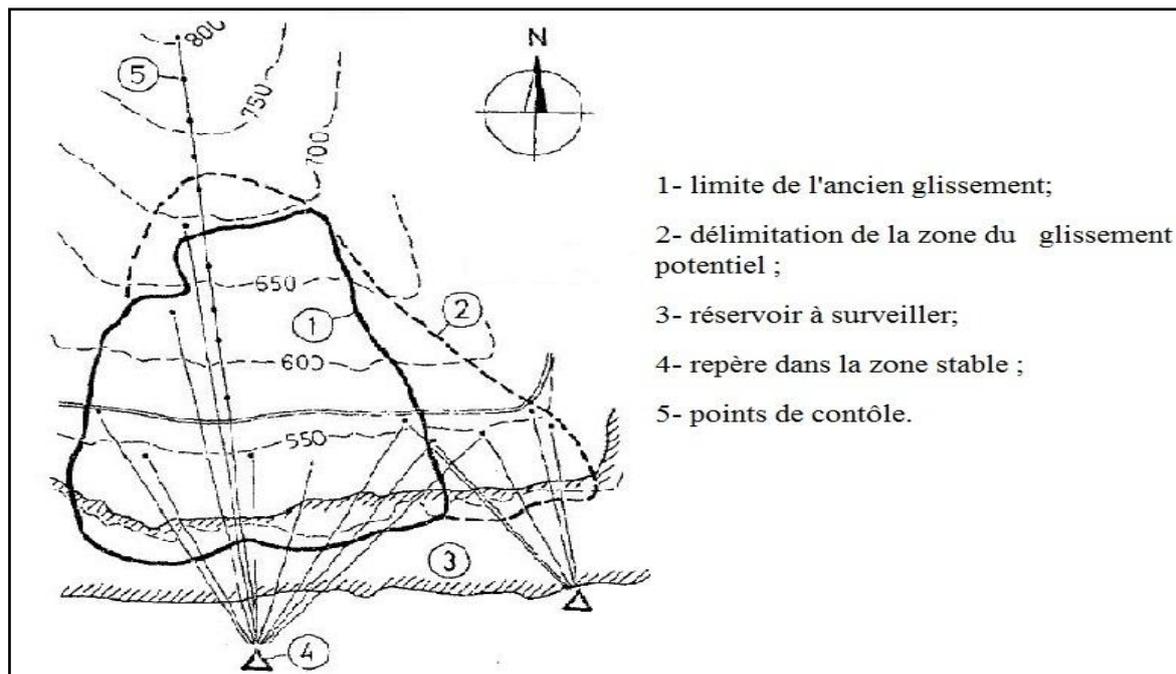


Figure 8-I: Schéma de contrôle géodésique du glissement de terrain

4.1.1.2. Le théodolite [37]

Le théodolite motorisé permet de mesurer les coordonnées polaires de cibles fixées sur l'ouvrage, pour en déduire les mouvements dans le temps selon les directions x, y et z de l'espace. Une ou plusieurs références situées en dehors de la structure concernée sont également mesurées pour donner des déplacements absolus.

Le théodolite est placé à un endroit stratégique du site permettant de balayer l'ensemble des points objets matérialisés par des prismes, puis il effectue une mesure automatique de ces derniers. Cet instrument est relié à une centrale GeoMonitor via une interface et un câble bus. Ce système permet de mesurer automatiquement l'ensemble des prismes fixés à la paroi et d'obtenir l'évolution des déplacements d'une structure. Le logiciel GeoMonitor peut gérer jusqu'à 20 théodolites à la fois; chaque théodolite possédant sa propre interface, qui lui permet de gérer la visée des cibles et de sauvegarder les données indépendamment. Le PC d'acquisition récolte alors ces données une fois le relevé effectué pour les utiliser dans la résolution du problème.



Figure 9-I: Théodolite en position sur le site et le prisme optique pour théodolite

Le théodolite est un instrument parfaitement adapté à l'étude globale d'un site pour permettre de mesurer les déplacements d'ensemble. Cependant il ne donne qu'un aperçu général des déformations d'un massif rocheux et son coût d'achat et de maintenance reste élevé. Son utilisation est requise sur des sites dont le périmètre d'influence des déformations est bien défini.

4.1.1.3. Utilisation du GPS [28]

Le GPS (Système de Positionnement Global) est une technique de positionnement satellitaire largement utilisée pour la mesure des déformations actives de la croûte terrestre. L'utilisation de données de phase permet de déterminer les positions relatives de points situés à plusieurs centaines de kilomètres de distance avec une précision de 2-3 mm en horizontal et 5-10 mm en vertical. Depuis 1994, le système GPS est complètement opérationnel. Les équipements sont moins chers, moins lourds et plus faciles à utiliser. De nouvelles procédures, méthodologies et logiciels ont été développés pour l'enregistrement et le post-traitement des données. Le GPS est ainsi de plus en plus utilisé dans une grande variété d'applications courantes (points de contrôle au sol, positionnement de forages, suivi du trait de côte ou de la morphologie des lits fluviaux. etc.).

4.1.2. Méthodes mécaniques

Les principaux dispositifs mécaniques de mesures de déplacement pour la surveillance d'un talus sont:

- Pendule en sondage ;
- Extensomètres en sondage ;
- Extensomètres de surface sur fissure;
- Inclinomètres en sondage.

4.1.2.1. Pendule en sondage

Il base sur le principe du fil à plomb et indique la verticale. Dans le cas de massif peu cohérent, on utilise des pendules dits inverses. Un fil est ancré au fond d'un forage vertical (1er point de référence) et la tension du fil est assurée par la poussée d'Archimède exercée sur un flotteur placé à tête du forage à partir d'une table de mesure (2ème point de référence). On effectue deux vides quasi orthogonales ce qui permet de mesurer le déplacement horizontal. Les mesures effectuées avec ces dispositifs sont très précises mais en plus d'une mise en place délicate, nécessitant la réalisation d'un forage précis, ils ont d'un prix de revient élevé.

4.1.2.2. Extensomètres [37]

- Extensomètres en sondage

Permettant de mesurer les déplacements relatifs longitudinaux d'un ou plusieurs points d'un forage, ils sont particulièrement bien adaptés pour l'observation de zones où règnent des contraintes de traction.

Les extensomètres multiples permettent, entre autre, de localiser les fissures actives et de préciser leur ouverture.

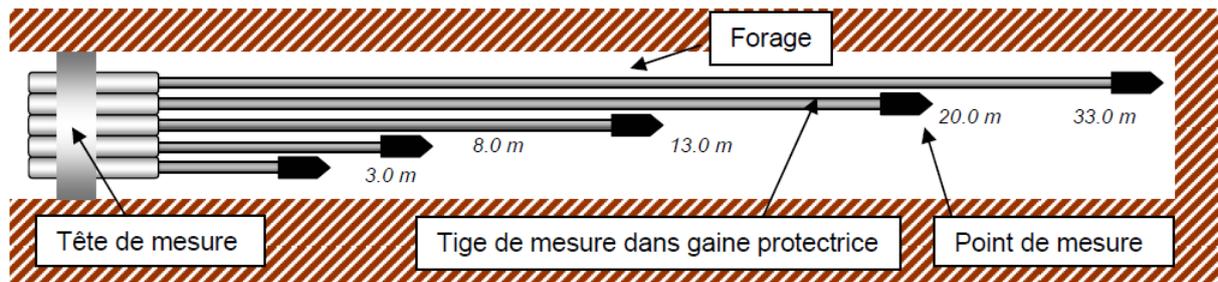


Figure 10-I: Extensomètre de forage en place avec ses 5 tiges

- Extensomètres de surface

Cet instrument permet de mesurer avec précision les déplacements sur des sites où l'accès ou la visibilité des points de surveillance sont délicats. Il convient donc parfaitement à la surveillance de falaises ou de pentes rocheuses. L'extensomètre de surface est un instrument adaptable selon les spécifications du projet ; les longueurs peuvent varier de 0,5 à 5 mètres (grâce à un système de tubes télescopiques). Le capteur de déplacement et le capteur de température éventuel sont protégés dans une enceinte étanche.

L'extensomètre de surface est, contrairement au théodolite, un instrument ponctuel qui mesure les déplacements différentiels d'un massif au niveau d'une zone précise. On a par conséquent un aperçu local des déplacements du massif qu'on ne peut pas généraliser à l'ensemble, d'où de multiples implantations sur des zones stratégiques.

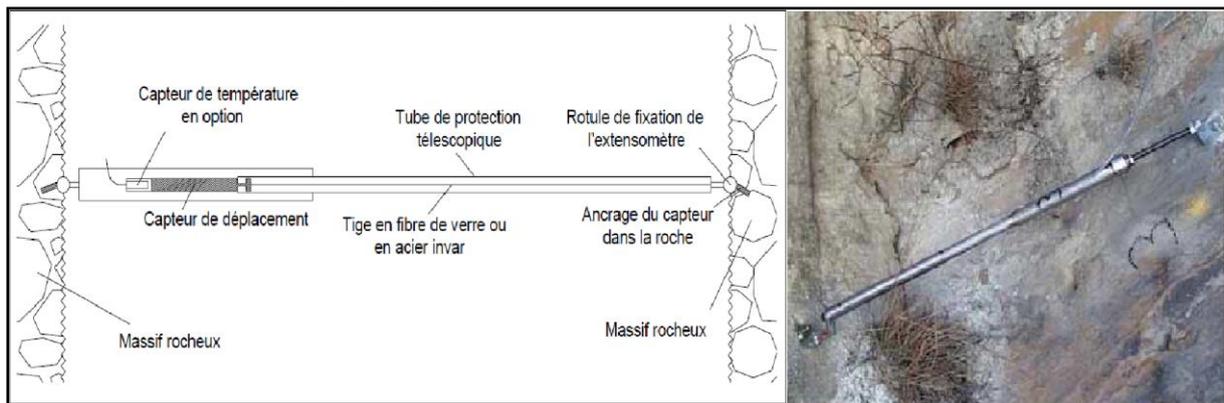


Figure 11-I: Schéma de principe de l'extensomètre de surface

4.1.2.3. Inclinomètres [28]

L'inclinomètre a été développé par Stanley D. Wilson à partir de 1950. C'est un dispositif très utile pour déterminer le début d'un déplacement. Il a aussi la capacité à déterminer la profondeur de glissement et la vitesse d'un mouvement en direction horizontale. Ce système de mesure présente l'avantage de pouvoir différencier les mouvements sur une verticale et déterminer les différents plans de glissement et leur profondeur. C'est un appareil de mesure constitué d'une sonde coulissante guidée par un tube rainuré introduit verticalement dans le sol et ancré dans une tranche de terrain stable ou présumée stable.

La sonde donne l'inclinaison du tube par rapport à la verticale. On peut ainsi suivre sa déformation au cours du temps. Les résultats obtenus permettent de tracer des courbes de déformation en fonction de la profondeur suivant deux directions: transversalement et longitudinalement au sens de déplacement, l'idée étant de faire un suivi temporel des déplacements suivant ces directions en fonction de la profondeur.

Des nombreuses expériences ont montré que plusieurs facteurs influencent la qualité des mesures d'inclinométriques :

- En premier lieu, bien évidemment, la précision du capteur de détection du déplacement,
- la conception et l'état de la roue ;
- l'alignement dans le forage et le diamètre du tube ;
- la répétabilité de la mesure ;
- l'intervalle de profondeur entre les positions de lecture ;
- les effets de la température sur la manipulation de la sonde.

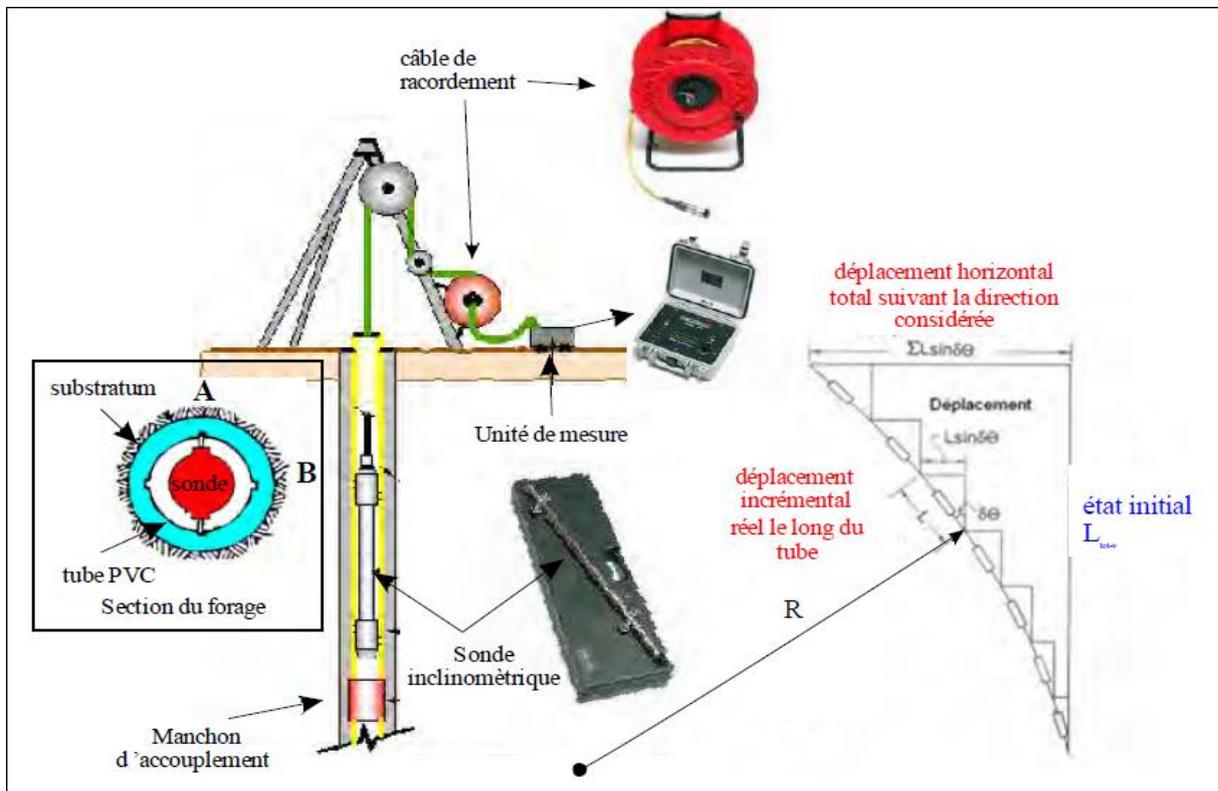


Figure 12-I: Description d'un système inclinométrique

4.2. Méthodes de télédétection [28]

La méthode de télédétection consiste à réaliser des comparaisons multi-temporelles d'images incluant photographies aériennes et images satellites optiques et/ou RADAR.

Cette méthodologie permet de faire un suivi historique d'une zone en faisant un instantané à un instant t que l'on comparera à l'état initial t_0 qui correspond à la première prise de vue et pas nécessairement à l'initiation du phénomène d'instabilité.

Méthode	Utilisation	Mesure	Etendue de mesure	Précision
Photogrammétrie terrestre	Déplacement de cibles mobiles	dX,dY,dZ	<200m	40mm
Photogrammétrie aérienne	Déplacement de cibles mobiles et comparaison de MNT	dX,dY,dZ	H _{vol} <500m	10cm
Interférométrie radar	comparaison de MNT	dX,dY,dZ	Variable	3-5mm

Tableau 5-I: principales méthodes de mesure et de suivi par télédétection des mouvements de terrain

4.2.1. Interférométrie RADAR

Une avancée significative dans l'imagerie de surface en sciences de la Terre, fût liée à la naissance de l'imagerie hyperfréquence (ondes RADAR ou micro-ondes) et la mise en orbite de satellites actifs.

L'acronyme RADAR (Radio Detection And Ranging) désigne aussi bien l'instrument de mesure que la technique s'appuyant sur celui-ci. L'instrument RADAR embarqué sur les plateformes spatiales diffuse latéralement des trains d'ondes électromagnétiques qui

illuminent la terre et qui sont, à son contact, rétrodiffusées tout ou partie en direction du satellite suivant les caractéristiques physiques du sol. Un radar mono-statique aura une même antenne d'émission et de réception, contrairement au radar bi-statique dont les antennes sont séparées.

Cette technique est effectuée en combinant la phase d'au moins deux images radar prises à des moments différents (*figure 13-I*). L'interférogramme différentiel obtenu montre les changements de phases entre deux images séparées par une période temporelle.

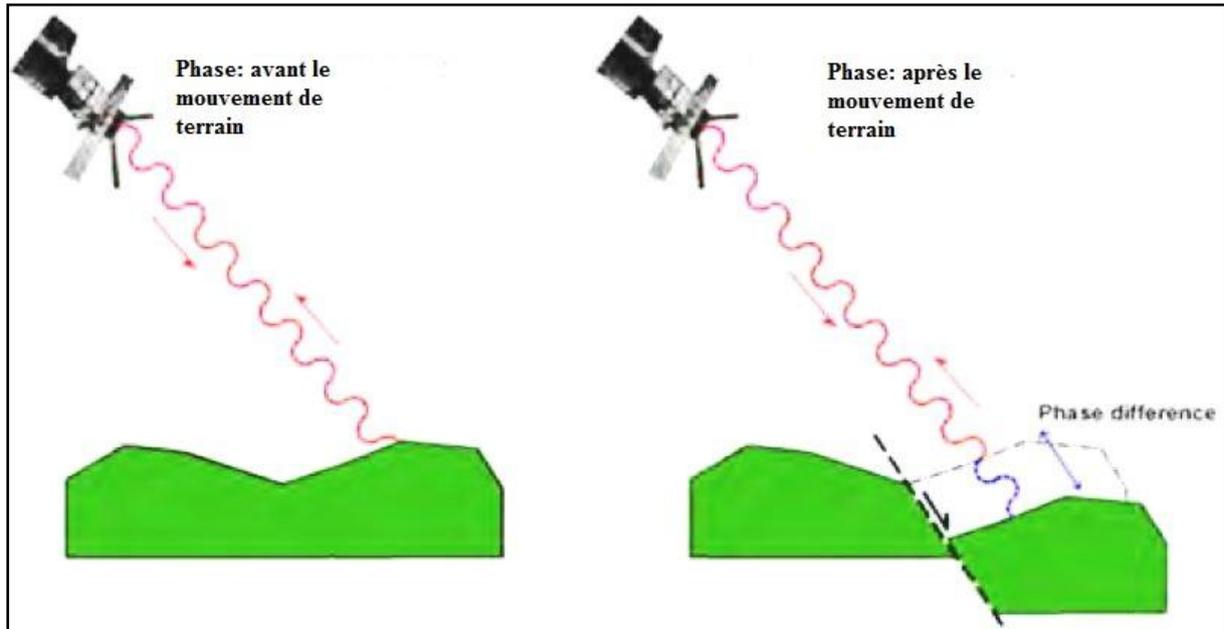


Figure 13-I: Différence de phase entre 2 dates (en rouge la phase propre, en bleu la différence de phase)

4.2.2. Radar au sol

Cette technique appelée aussi *Ground Based SAR Interferometry*. Il s'agit d'une technique dérivée des techniques de mesure de déplacements à partir des données radar satellitaires. Le radar est positionné au sol, face à la surface à surveiller. Elle est particulièrement adaptée pour le suivi des bords des mines à ciel ouvert, les barrages et des autres ouvrages d'une importance spécifique, grâce à sa très longue portée (plusieurs centaines de mètres à 1 km et plus selon l'antenne) et à sa grande précision sur la mesure de distance (de l'ordre de 1 millimètre, voire meilleure que le millimètre).



Figure 14-I: Radar positionné sur site devant un bord d'une mine à C-O et leur station de pilotage

4.2.2.1. Principe de fonctionnement

Une ou plusieurs antennes radar sont montées face à la zone à surveiller et enregistrent des images radar successives de la zone. Une image radar contient, pour chaque pixel, une information sur la phase du signal de retour. En comparant les différences de phase par interférométrie entre des paires d'images collectées à des instants différents, on peut calculer le déplacement de chaque pixel entre les deux images dans la direction de la prise de vue.

On voit ainsi apparaître une des limitations éventuelles de la méthode : entre deux images successives il ne faut pas que le déplacement soit supérieur à la demi-longueur d'onde du système. Les appareils actuels permettent ainsi un mouvement max de l'ordre de 5 mm entre deux images. Toutefois les hautes fréquences d'acquisition de ces appareils (1 à 5min entre deux images) permettent de contourner ce problème.

Des traitements de données supplémentaires sont effectués pour supprimer les interférences atmosphériques. Ces artéfacts sont en général discriminés avec une analyse statistique de la variation de signal dans le temps et dans l'espace.

Le pilotage de l'antenne radar est effectué par un ordinateur physiquement situé à proximité de l'appareil. Les données sont ensuite envoyées à un logiciel de présentation des résultats.

4.2.2.2. Spécifications

La précision de la mesure de distance est excellente, meilleure que le millimètre, ou de l'ordre du millimètre, sur toute la plage de mesure. Et surtout, cette plage de mesure est importante, de 800 mètres à 4km selon les appareils.

Les appareils sont également très rapides par rapport aux autres techniques: selon les appareils, de 1 minute pour la totalité d'une petite zone de disons 200 mètres par 200 mètres, à 5minutes pour une zone complète de 1 km par 1 km.

La taille des pixels est un sujet important. Selon les appareils et la distance à la zone objet, elle peut varier de 0.5 m à 20 mètres. De plus le recalage des mesures en cas de déplacement de l'appareil n'est pas encore très bien géré. On ne surveille donc pas des points précis, mais plutôt une zone.

Enfin, au contraire aux autres techniques qui sont gênées voire empêchées par de fortes précipitations, les mesures avec le *Radar Au Sol* restent possibles dans les conditions météorologiques extrêmes.

4.2.2.3. Avantages et limitations du système

Les principaux avantages de cette technique sont :

- La mesure sans contact et des zones vastes permettant un aperçu global de la zone à mesurer.
- Pas de nécessité d'accéder sur la zone à ausculter pour matérialiser les points à mesurer.
- Capteur tous temps (peu influencé par les conditions atmosphériques).

Les principales limitations sont :

- Les déplacements peuvent être interprétés uniquement dans la direction de la mesure.
- L'appareil est en général positionné dans une zone dite stable. Les logiciels les plus courants ne proposent pas de rattachement à des cibles de référence ; toutefois on peut se rattacher manuellement sur des zones choisies comme stables.
- L'appareil mesure par analyse de différence de phase ; il ne faut donc pas que le mouvement entre deux images soit supérieur à une demi-phase.
- Appareil onéreux et interprétation immédiate difficile.

5. Différentes méthodes de calcul de stabilité de talus [12], [18]

1.1. Coefficient de sécurité

Le principe de calcul de stabilité des talus consiste à déterminer le facteur de sécurité FS 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. Ce facteur peut être écrit de la façon suivante :

$$FS = \frac{Q_{max}}{Q} \quad (9-I)$$

- Q: cette valeur définit la sollicitation vectorielle ou tensorielle appliquée au massif (force H, force V, moment M) ;
- Q_{max}: valeur maximale de Q.

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 6-I*:

Définition	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}

Tableau 6-I: Différents exemples de définitions d'un coefficient de sécurité, LAMBE [1973].

1.2. Choix de la valeur du coefficient de sécurité dans le calcul de stabilité

Le facteur de sécurité minimal FS adopté est assez rarement inférieur à 1,5. Il peut quelquefois être égal à 2, voire à 2,5 pour des ouvrages dont la stabilité doit être garantie à tout prix (grand risque pour les personnes, site exceptionnel), ou pour des méthodes dont l'incertitude est grande (analyse en contrainte totale avec risque d'erreur sur la valeur de la cohésion drainé Cu).

Pour certains sites peu importants ou pour certains ouvrages courants, et lorsqu'il n'y a pas de risque pour la vie humaine, on peut accepter des valeurs plus faibles pendant un moment très court ou pour des fréquences faible : 1,2 voire 1,1. Mais pour pouvoir se rapprocher ainsi de 1, c'est-à-dire de la rupture, il faut être sûr de la validité des hypothèses et des paramètres adoptés, ce qui souvent est difficile en géotechnique.

Le tableau ci-dessous, nous donne les valeurs de FS en fonction de l'importance de l'ouvrage et des conditions particulières qui l'entoure

FS	Etat de l'ouvrage
<1	danger
1.0-1.25	sécurité contestable
1.25-1.4	sécurité satisfaisante pour les ouvrages peu importants sécurité contestable pour les barrages, ou bien quand la rupture serait catastrophique
>1.4	satisfaisante pour les barrages

Tableau 7-I: Valeurs de FS en fonction de l'importance de l'ouvrage

La définition des seuils des facteurs de sécurité dépend de l'approche adoptée, des fréquences de sollicitations, de l'ouvrage en question et du risque créé par la rupture. En condition normale, FELLENIUS propose un seuil égale à 1,25, alors que $FS = 1,5$ pour Bishop (l'approche de FELLENIUS est plus conservatoire que celui de Bishop).

1.3. Le choix du type de méthode de calcul

Un autre choix important, qui dépend des moyens que l'on peut mettre en œuvre, doit être posé entre une méthode modélisant toute la masse de sol (Méthode des Éléments Finis) et une méthode cinématique, définissant une surface de rupture par exemple (méthode d'équilibre limite). Cependant, avec les possibilités d'analyser un grand nombre de courbes de rupture potentielles, les deux approches se rejoignent. Dans le cas d'une méthode intéressant toute la masse, le calcul fournira directement la zone de rupture la plus probable, alors qu'une méthode s'appuyant sur une courbe préalablement définie sera réitérée un grand nombre de fois pour un résultat semblable. Ce choix doit être fait en examinant les moyens disponibles et le comportement global de la pente, mais aussi en s'assurant de la possibilité d'obtenir les paramètres de calcul correspondant au modèle.

Le comportement global de la pente correspond à quatre mécanismes qui se traduisent par des déplacements du sol différemment répartis :

- Pré-rupture, où le comportement du sol est élasto-viscoplastique et où le massif est un milieu continu, sans zone de discontinuité, les déformations sont quasi homogènes;
- Rupture, où une partie du massif se déplace par rapport à l'autre, le modèle de sol est élasto-plastique, voire rigide-plastique ;
- Post-rupture, où une partie du sol se déplace sur l'autre, comme un écoulement visqueux et avec une vitesse appréciable ;
- Réaction, quand la partie du sol ayant déjà glissé et s'étant stabilisée, le mouvement reprend sur une surface, suivant un comportement rigide-plastique;

La distinction entre ces quatre mécanismes est fondamentale pour une étude fiable des pentes, et ceci va bien sûr influencer sur le choix d'une méthode de calcul. Elle permet de choisir entre les types de méthodes rappelés ci-après.

1.4. Les méthodes d'analyse de stabilité des talus [20]

Les méthodes habituellement utilisées sont basées sur une constatation d'expérience, à savoir que lorsqu'il y a un glissement générale de terrain, il y a une séparation d'une masse de sol du reste du massif qui glisse suivant une surface de rupture.

Le calcul à la rupture, on suppose que le terrain se comporte comme un solide rigide-plastique et obéit aux lois classiques de la rupture par cisaillement. Il est utilisé depuis plusieurs décennies et a donné naissance, dans l'hypothèse de ruptures rotationnelles, à plusieurs méthodes de calcul.

Les ruptures planes représentent un cas particulier très simple dans son principe, par contre pour les surfaces de rupture de forme quelconque, le calcul est beaucoup plus complexe.

Pour évaluer la stabilité des talus par une méthode à l'équilibre limite, il existe des méthodes linéaires et non linéaires. Les méthodes linéaires sont des méthodes directes de calcul de FS et les méthodes non linéaires nécessitent un processus itératif.

1.5. Glissement plan

Pendant longtemps, on a préféré croire (par simplicité des calculs) que les surfaces de glissement étaient planes. Or la simple observation sur le terrain prouve que les surfaces sont

courbes. Cependant dans des cas particuliers, on peut admettre des rayons de courbure infinis, ce qui nous amène à des glissements plans. D'autre part, cette méthode est une bonne introduction aux méthodes plus élaborées que nous verrons dans la suite de ce chapitre.

Si on considère une pente infinie, la pente est supposée s'étendre infiniment dans toutes les directions et le glissement est supposé se produire le long d'un plan parallèle à la face de la pente. Car la pente est infinie, les contraintes sont les mêmes sur les deux plans qui sont perpendiculaires à la pente, comme les plans A-A' et B-B' dans la *figure 15-I*.

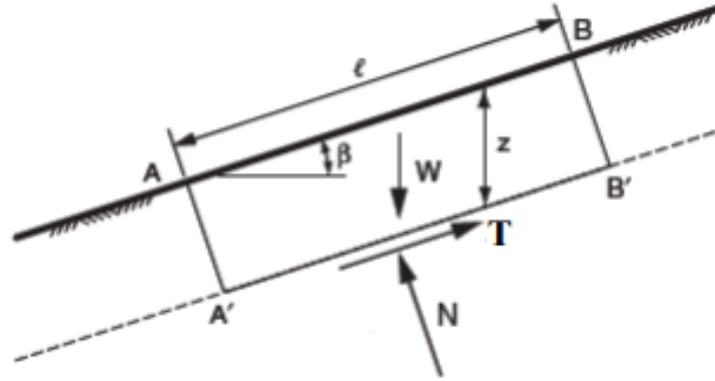


Figure 15-I: Pente infinie de surface de rupture plane

Les équations d'équilibre sont déterminées en considérant un bloc rectangulaire comme celui de la *figure (15-I)*. Pour une pente infinie, les forces sur les deux extrémités du bloc seront identiques en amplitude, en sens opposé, et colinéaires. Ainsi, les forces sur les extrémités du bloc s'équilibrent exactement les uns aux autres et peuvent être ignorées dans l'équilibre des équations. Le résumé des forces dans des directions perpendiculaires et parallèles au plan de glissement donne les expressions suivantes pour la force de cisaillement, T, et la force normale, N, sur le plan :

$$T = W \sin \beta \quad \text{Et} \quad N = W \cos \beta \quad (10-I)$$

Où β est l'angle d'inclinaison de la pente et du plan de glissement, mesuré par rapport à l'horizontale, et W est le poids du bloc. Pour un bloc de l'unité d'épaisseur dans la direction perpendiculaire au plan de la section transversale dans la *figure (15-I)*, le poids est exprimé en :

$$W = z.l.\gamma.\cos\beta \quad (11-I)$$

Où γ : est l'unité de mesure du poids total du sol, l : la distance entre les deux extrémités du bloc, mesuré parallèlement à la pente, et z : la profondeur verticale au plan de cisaillement.

En substituant (11-I) dans (10-I) on aura :

$$T = z.l.\gamma.\sin\beta.\cos\beta \quad (12-I)$$

Et :

$$N = z.l.\gamma.\cos^2\beta \quad (13-I)$$

Les contraintes normales et de tangentielle sur le plan de cisaillement sont constantes pour une pente de longueur infinie et sont obtenues en divisant les équations (12-I) et (13-I) par la surface (l . 1), pour obtenir:

$$\tau_m = z.\gamma.\sin\beta.\cos\beta \quad (14-I)$$

Et:

$$\sigma = z.\gamma.\cos^2\beta \quad (15-I)$$

En substituant ces expressions dans la formule du coefficient de sécurité, on trouve :

$$F_s = \frac{\tau}{\tau_m}$$

$$\tau = C' + \sigma \cdot \tan \varphi'$$

$$F_s = \frac{C + (\gamma \cdot z \cdot \cos^2 \beta) \tan \varphi}{\gamma \cdot z \cdot \cos \beta \cdot \sin \beta} \quad (16-I)$$

En termes de contraintes effectives :

$$F_s = \frac{C' + (\gamma \cdot z \cdot \cos^2 \beta - u) \tan \varphi'}{\gamma \cdot z \cdot \cos \beta \cdot \sin \beta} \quad (17-I)$$

Pour un sol purement pulvérulent ($C, C'=0$), le coefficient de sécurité se réduit à :

$$F_s = \frac{\tan \varphi}{\tan \beta}$$

L'équilibre limite est atteint pour $F_{\min}=1$; soit: $\varphi = \beta$. Ceci exprime bien que l'angle de talus naturel d'un sol pulvérulent est égal à l'angle de frottement interne.

1.6. Les méthodes basées sur l'équilibre limite [25]

Il existe de nombreuses méthodes pour déterminer la surface critique d'une pente et le facteur de sécurité qui lui est associée. Toutes ces méthodes dites d'équilibre limite ont en commun la difficulté qui est de trouver à la fois :

- La surface critique ;
- Les contraintes normales et tangentielles le long de cette surface ;
- Le facteur de sécurité (sur le critère de rupture) en partant des équations d'équilibre.

La mise en équation du problème de l'équilibre d'une masse de sol peut se faire de deux manières :

Étude de l'équilibre de l'ensemble de la zone de glissement. La ligne de rupture est la plupart du temps supposée circulaire. C'est la < méthode globale > (méthode de TAYLOR, CAQUOT, BIAREZ....).

Décomposition du talus en tranche dont on étudie d'abord l'équilibre individuel, avant de globaliser le résultat en faisant intervenir certaines hypothèses simplificatrices, c'est la méthode de tranche (méthode de FELLENIUS, BISHOP.....).

1.6.1. Méthode globale

La méthode globale suppose en principe un milieu homogène et isotope défini par φ , γ , c , et u quand on est en présence d'une nappe aquifère. Le calcul est effectué en admettant que le massif est en équilibre limite. Ce dernier est considéré comme un solide indéformable. L'hypothèse consiste à assimiler la ligne de glissement MA à un arc de cercle de centre O.

Les forces qui agissent

- Le poids **W**
- La résultante **C** des forces de cohésion
- La résultante **F** des forces de frottement
- La pression interstitielle **U**
- Les surcharges éventuelles

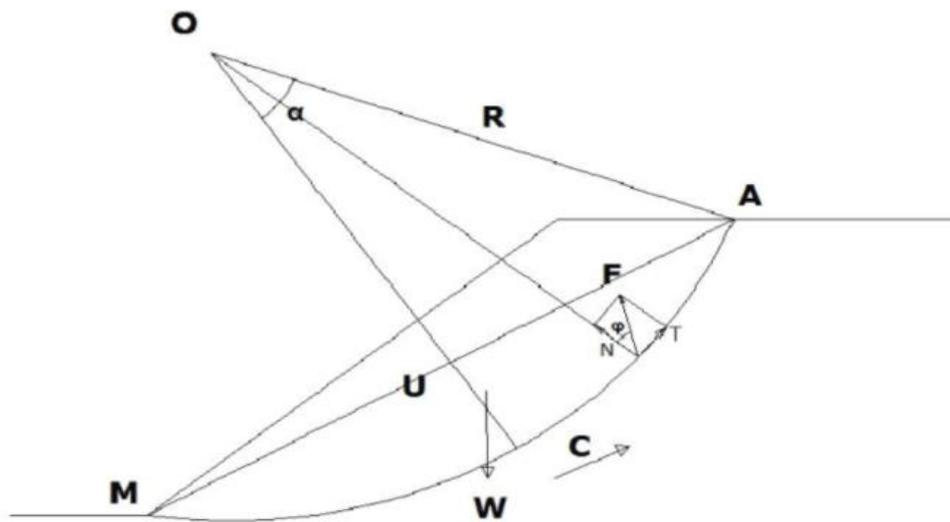


Figure 16-I: les forces agissent sur le volume glissé dans la méthode globale

1.6.2. Méthode des tranches

La méthode tranche ou méthode suédoise due à Paterson en 1916, développée par FELLENIUS pour les ruptures circulaires en 1927 et perfectionnée par Bishop en 1954 étendue pour les ruptures non circulaires par Nonveiller en 1965. Elle se trouve sous deux formes détaillées et simplifiées.

Le principe de base de toutes ces méthodes est de découper le volume de sol étudié en un certain nombre de tranches et d'appliquer les différentes forces comme le montre à titre indicatif la *figure 17-I*. Toutes ces méthodes ont en commun la même difficulté qui est de trouver à la fois:

- la surface critique;
- les contraintes normales et tangentielles le long de cette surface;
- le facteur de sécurité (sur le critère de rupture) en partant des équations d'équilibre.

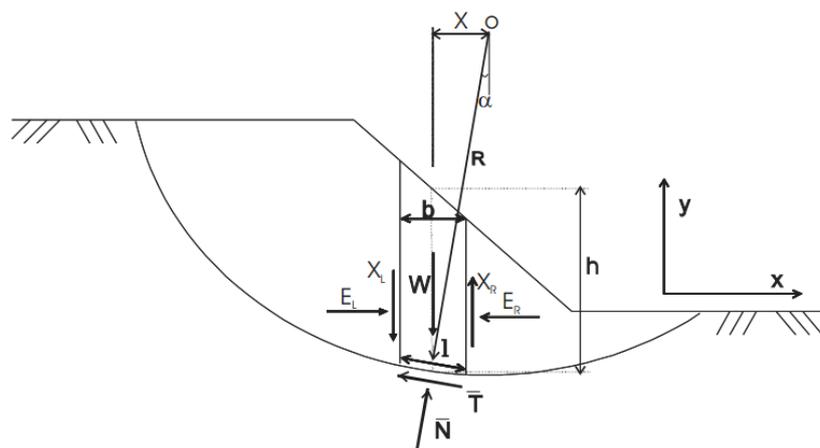


Figure 17-I: Exemple d'une rupture circulaire

Comme on peut le voir sur la *figure 17-I*, les forces agissant sur la tranche peuvent être définies comme suit :

- W** = poids total de la tranche de largeur b et de hauteur h ;
- N, T** = composantes normale et tangentielle de la force agissant à la base de la tranche ;
- X, E** = composantes verticale et horizontale des forces inter tranches ;
- b** = épaisseur de la tranche ($b=l.\cos \alpha$) ;
- α** = angle que fait la base de la tranche avec l'horizontale ;

R = rayon du cercle de rupture de centre O ;
l = longueur du plan de glissement de la tranche ;
x = bras de levier du poids des terres.

En présence d'eau, une tranche (n) est soumise à :

- Son poids $W = \gamma_n \times h_n \times b_n$;
- Les efforts inter-tranches décomposés en efforts horizontaux E_L et E_R et en efforts verticaux X_L et X_R ;
- La réaction R_n du milieu sous-jacent sur l'arc AB (résistance de cisaillement). Elle se décompose en une composante normale et tangentielle ;
- La pression interstitielle U.

Définissons les efforts comme suit:

$$N = \sigma l \text{ et } T = \tau_m l$$

Où

τ_m est la contrainte de cisaillement mobilisée à la base de la tranche qui peut être exprimée par:

$$\tau_m = \frac{\tau}{F_S}$$

Où

- τ est donnée par l'équation de Mohr- Coulomb: $\tau = C' + (\sigma - u) \tan \phi'$
- F_S est le facteur de sécurité par lequel la résistance au cisaillement du sol doit être réduite pour amener la masse de sol dans un état d'équilibre limite.

Il vient alors:

$$T = \frac{\tau}{F_S} l = \frac{1}{F_S} l [C' + (\sigma - u) \tan \phi']$$

Ou

$$T = \frac{1}{F_S} [C' l + (N - ul) \tan \phi'] \quad (18-I)$$

Pour une tranche:

- **En projetant verticalement toutes les forces:**

$$T \cdot \sin \alpha + N \cdot \cos \alpha = W - (X_R - X_L)$$

Si on remplace T par sa valeur dans (18-I), on obtient :

$$N = \frac{[W - (X_R - X_L) - \frac{1}{F_S} (C' l \cdot \sin \alpha - ul \cdot \tan \phi' \cdot \sin \alpha)]}{\text{ma}} \quad (19-I)$$

$$\text{ma} = \cos \alpha \left(1 + \tan \alpha \frac{\tan \phi'}{F_S} \right) \quad (20-I)$$

- **En projetant horizontalement toutes les forces:**

$$T \cdot \cos \alpha - N \cdot \sin \alpha + E_R - E_L = 0$$

Si on remplace T par sa valeur dans (18-I), on obtient:

$$E_R - E_L = N \sin \alpha - \frac{1}{F_S} [C' l + (N - ul) \tan \phi'] \cos \alpha$$

On peut définir le coefficient de sécurité comme suit:

- Soit on le définit à partir de l'équilibre moment de toutes les forces et on va le désigner par F_m ;

- Soit on le définit à partir de l'équilibre global des forces horizontales, les unes tendant à bouger la masse de sol, les autres tendant à la stabiliser, et on va le désigner par F_f .

Équilibre global des moments:

$\sum W \cdot x = \sum T \cdot R$ et si on remplace T par sa valeur et x par $R \cdot \sin \alpha$:

$$F_m = \left(\frac{\sum [c' + (N - ul) \tan \varphi']}{\sum W \sin \alpha} \right) \quad (21-I)$$

Équilibre global des forces:

En absence de tout chargement de la masse de sol étudiée:

$$\sum E_R - E_L = 0 \quad \sum X_R - X_L = 0$$

D'où :

$$F_f = \left(\frac{\sum [c' + (N - ul) \tan \varphi'] \cos \alpha}{\sum N \sin \alpha} \right) \quad (22-I)$$

En général, les deux facteurs de sécurité sont assez proches et BISHOP [1955] montre que F_m est moins sensible aux hypothèses sur les forces inter tranches.

Pour trouver les deux facteurs de sécurité F_m et F_f , certaines hypothèses doivent être posées pour résoudre les équations. A titre indicatif, nous citons certaines méthodes d'équilibre limite et leurs hypothèses:

1.6.2.1. Méthode de Fellenius [26]

Hypothèses:

- La méthode suppose une surface de glissement circulaire et divise le talus en tranches;
- Elle néglige les forces entre les tranches (verticales et horizontales), donc la force normale N devient:

$$\begin{cases} N \cdot \cos \alpha + T \cdot \sin \alpha = W \\ T \cdot \cos \alpha - N \cdot \sin \alpha = 0 \end{cases} \rightarrow N = W \cdot \cos \alpha$$

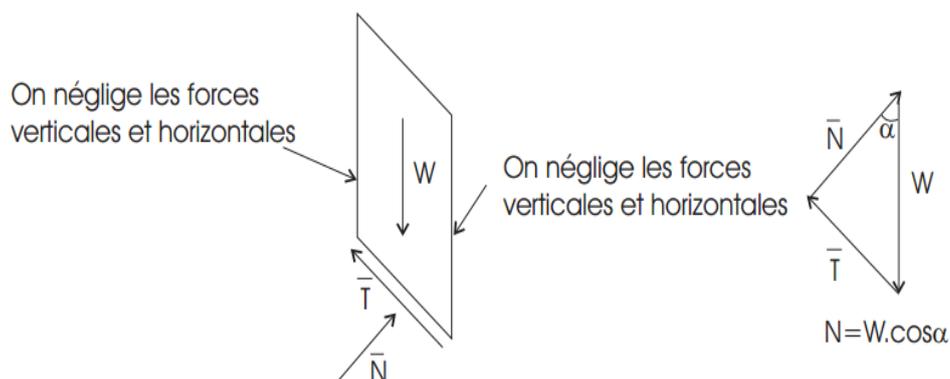


Figure 18-I: Forces appliquées sur une tranche dans la méthode de Fellenius

La méthode de Fellenius vérifie l'équilibre global des moments tout en négligeant les forces entre tranches comme nous venons de le voir, ce qui fait qu'en remplaçant dans l'équation [21-I] N par la valeur trouvée ($N = W \cdot \cos \alpha$), on aura:

$$F_m = \left(\frac{\sum [c' + (N - ul) \tan \varphi']}{\sum W \sin \alpha} \right) \quad (23-I)$$

C'est une méthode moins précise que les autres méthodes des tranches et elle est sûre pour des sols homogènes seulement.

1.6.2.2. Méthode simplifiée de BISHOP [26]

Hypothèses:

- La méthode suppose une surface de glissement circulaire;
- Elle néglige les forces verticales entre les tranches (*figure 19-I*).

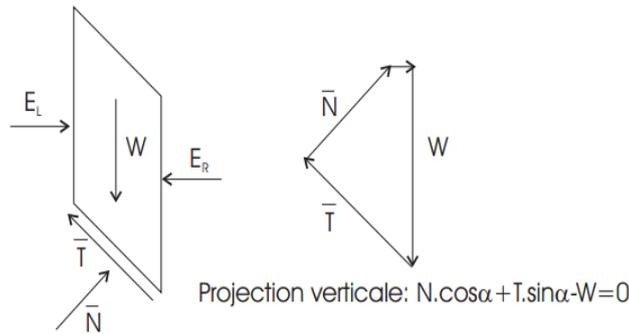


Figure 19-I: Forces appliquées sur une tranche dans la méthode de Bishop simplifiée

La méthode de Bishop vérifie l'équilibre des moments ainsi que l'équilibre vertical pour chaque tranche, mais elle néglige l'équilibre horizontal des forces.

D'après l'hypothèse faite sur les forces entre les tranches ($X_R - X_L = 0$), nous aurons:

$$N = \frac{\left[W - \frac{1}{F_s} (C' l \sin \alpha - ul \tan \phi' \sin \alpha) \right]}{ma} \quad (24-I)$$

Si on remplace N dans l'équation [21-I] nous aurons:

$$Fm = \left(\frac{\sum [C' l \cos \alpha + (W - ul \cos \alpha) \tan \phi'] / ma}{\sum W \sin \alpha} \right) \quad (25-I)$$

Ou

$$ma = \cos \alpha \left(1 + \tan \alpha \frac{\tan \phi'}{F_s} \right) \quad (26-I)$$

Nous constatons que le coefficient de sécurité Fm (dû à l'équilibre moment) se retrouve dans les deux membres de l'équation, et donc, la résolution passe par des techniques itératives. Généralement, on prend la valeur du coefficient obtenue avec la méthode de *Fellenius* comme point de départ de cette itération. Cette méthode est plus précise que celle de *Fellenius* et le calcul se prête particulièrement bien au traitement par ordinateur.

1.6.2.3. Méthode simplifiée de JANBU [27]

Hypothèses:

- La méthode suppose une surface de glissement quelconque (non circulaire);
- Elle suppose que les forces entre les tranches sont horizontales.

La méthode de *Janbu* vérifie l'équilibre des forces horizontales et verticales tout en négligeant l'équilibre des moments, ce qui aboutit à l'équation [22-I]:

$$F_f = \left(\frac{\sum [c' l + (N - ul) \tan \phi'] \cos \alpha}{\sum N \sin \alpha} \right) \quad (22-I)$$

et si on projette parallèlement à la base de la tranche, cette équation équivaut à:

$$F_f = \left(\frac{\sum [c' l + (N - ul) \tan \phi'] / \cos \alpha}{\sum W \tan \alpha} \right) \quad (27-I)$$

Ce coefficient de sécurité F_f est corrigé par un facteur f_0 dépendant de l'allure de la courbe de rupture et des propriétés du sol:

$$F'_f = f_0 \cdot F_f$$

1.6.2.4. Méthode Suédoise modifiée

Hypothèses:

- La méthode suppose également une surface de glissement quelconque (non circulaire);
- Contrairement à la méthode de *Janbu*, elle suppose que les forces entre les tranches sont inclinées parallèlement à la pente moyenne (*figure 20-I*).

Comme la méthode de *Janbu*, elle vérifie l'équilibre horizontal et vertical des forces, mais elle néglige l'équilibre des moments.

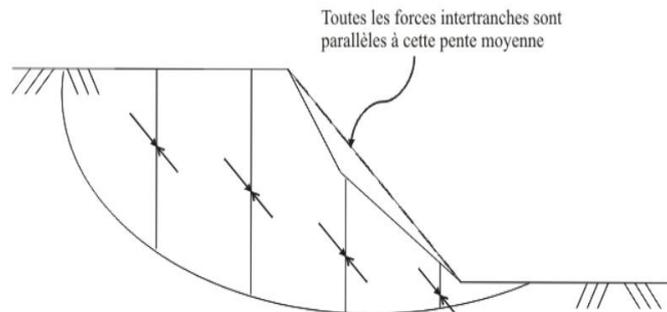


Figure 20-I: Inclinaison des forces dans la méthode Suédoise modifiée

Cette méthode est moins précise qu'une solution avec l'équilibre complet des forces et dépend de l'hypothèse faite sur l'inclinaison des forces entre les tranches.

1.6.2.5. Méthode de Spencer, Morgenstern-Price [26], [27]

Hypothèses:

- La méthode suppose une surface de glissement non circulaire.
- Elle suppose que les forces entre les tranches sont parallèles entre elles afin de rendre le problème déterminé (*figure 21-I*).
- Elle suppose aussi que la force normale N agit au centre de la base de chaque tranche. Cette méthode vérifie l'équilibre horizontal et vertical des forces, l'équilibre des moments en un point quelconque; et détermine également l'inclinaison des forces entre les tranches, ce qui donne une inconnue supplémentaire. Cette méthode est précise et elle est applicable à toutes les géométries et types de sol.

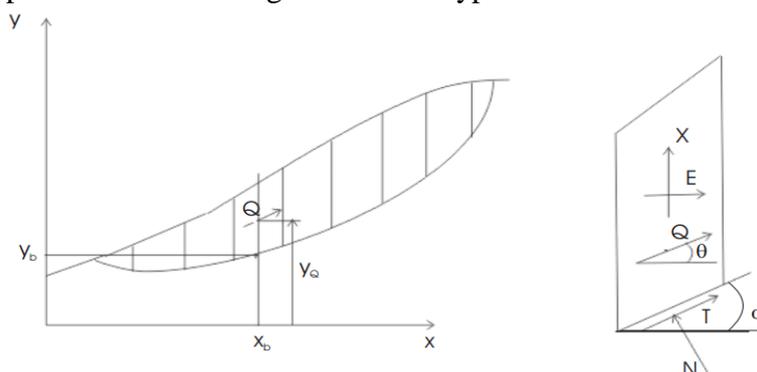


Figure 21-I: Coordonnées de la surface de glissement pour la méthode de Spencer

Pour *Spencer* [1967] l'inclinaison θ est constante et pour *Morgenstern* et *Price* [1965] le rapport $X/E = \lambda f(x)$ où $f(x)$ est une fonction qui varie continuellement le long de la surface de glissement, λ étant le facteur d'échelle.

Dans ce travail, nous ne donnons pas les détails de toutes ces méthodes classiques, qui par ailleurs ont été développées depuis longtemps par beaucoup de chercheurs. Pour beaucoup plus de détails, nous suggérons les références ANDERSON et RICHARDS [1987], et DUNCAN et WRIGHT [2005].

1.6.3. Limitations des méthodes d'équilibre limite [25]

- La difficulté de toutes ces méthodes d'équilibre limite est qu'elles sont fondées sur l'hypothèse de la division de la masse susceptible de glisser en tranches et ceci implique des hypothèses supplémentaires sur les forces entre tranches et par conséquent sur l'équilibre. Pour toutes les méthodes qui satisfont à toutes les conditions d'équilibre, FREDLUND [1977] a montré que les hypothèses faites n'ont aucun effet significatif sur le coefficient de sécurité; par contre, dans les méthodes qui satisfont uniquement l'équilibre des forces, le coefficient de sécurité est affecté d'une façon significative par l'inclinaison supposée des forces entre tranches, c'est pourquoi ces méthodes sont moins utilisées par rapport aux méthodes qui satisfont à toutes les conditions d'équilibre.
- Dans l'analyse de la stabilité par les méthodes d'équilibre limite, le comportement du sol est supposé rigide parfaitement plastique, donc elles ne donnent aucune informations sur les déplacements.
- Le coefficient de sécurité F_s est supposé identique en chaque point du plan de glissement. Or nous voyons sur la figure 21-I que la résistance au cisaillement ultime n'est pas nécessairement mobilisée simultanément le long de la surface de glissement.
- Pour des géométries complexes, il peut y avoir un minimum local qui reste non détecté et des surfaces.

1.7. Méthode des perturbations

La méthode des perturbations est une méthode globale proposée par RAULI (1974) et développée par FAURE. Cette technique permet d'effectuer des calculs en rupture circulaire ou non circulaire. Le massif de terre délimité par une courbe de rupture quelconque est alors en équilibre sous l'effet de son poids propre et de la réaction du sol sous-jacent. Dans cette méthode, on fait l'hypothèse que la contrainte normale σ sur la surface de rupture est donnée par une <perturbation> de la contrainte de *Fellenius* σ_f (FAURE, 2000 et DURVILLE 2003). La loi de Coulomb permet d'exprimer les contraintes de cisaillement maximales. Le coefficient de sécurité est défini classiquement comme étant le rapport du cisaillement maximal disponible au cisaillement nécessaire à l'équilibre.

Le système est résolu globalement à l'aide des trois équations d'équilibre appliquées à tout le massif, ce qui fournit les valeurs des trois inconnues du problème ; qui sont le coefficient de sécurité F et les deux paramètres qui modifient la contrainte approchée (γ et μ). Par ailleurs, cette méthode peut avoir des extensions très intéressantes pour la prise en compte d'inclusions ou pour le développement de méthode en déplacement.

1.8. Les Méthodes numériques [25]

Dans le paragraphe précédent, nous avons passé en revue les différentes méthodes d'équilibre limite pour l'analyse de la stabilité des pentes. Toutes ces méthodes reposent sur le fait de choisir arbitrairement une série de surfaces de glissement et de définir celle qui donne la valeur minimale du coefficient de sécurité. Mais depuis un certain temps, nous assistons à une utilisation intensive de méthodes d'analyses numériques donnant accès aux contraintes et déformations au sein du sol. Ces méthodes ont connu un développement très important dans les bureaux d'études et les centres de recherches en géotechnique. Leur utilisation est aujourd'hui très courante et la conception de grands projets passe forcément par des analyses de ce type afin de vérifier la stabilité des ouvrages en interaction avec leur environnement, de contrôler que les valeurs des déplacements et des contraintes soient admissibles et d'aider au dimensionnement des structures.

La géotechnique utilise une gamme de méthodes numériques diverses et variées qui s'adaptent aux caractères particuliers des terrains (sol et roche). Les comportements de terrains sont souvent méconnus et non linéaires sous des sollicitations induites, ce qui nécessite un effort particulier.

Les méthodes numériques en géotechnique ont pour but de décrire, d'expliquer ou de prédire le comportement d'une structure naturelle ou artificielle sur la base de lois physiques qui relient les variations des contraintes aux déformations et aux déplacements.

Il existe plusieurs types de méthodes numériques parmi les quelles on citera :

Les méthodes de type « éléments limites » (boundary methods), pour lesquelles l'intérieur de la masse rocheuse ou du sol est représenté mathématiquement comme un milieu continu infini ou fini suivant que la frontière est ouverte ou fermée.

Les méthodes des domaines (domain methods), pour lesquelles l'intérieur de la masse rocheuse ou du sol est divisé en éléments géométriques simples, chacun étant doté de propriétés géométriques et mécaniques. Le comportement collectif et l'interaction de ces éléments modélisent le comportement global et plus complexe de la masse.

Parmi les méthodes des domaines, les plus couramment utilisées sont :

- La méthode des éléments finis et la méthode des différences finies, qui traitent les milieux comme un milieu continu.
- La méthode des éléments distincts, qui modélise chaque bloc du massif comme un élément unique.

En pratique, la méthode des différences finies est très proche de la méthode des éléments finis.

La méthode des différences finies (explicite) est une technique numérique qui résout des séries d'équations différentielles, à partir de valeurs initiales et/ou de valeurs limites. Dans cette méthode, chaque dérivée est remplacée directement par une expression algébrique écrite en fonction des variables de champs (c'est-à-dire les contraintes ou les déplacements) uniquement définis au niveau de points discrets dans l'espace.

Par opposition, la méthode des éléments finis (implicite) requiert que les quantités de champs (contraintes, déplacements et leurs dérivées) varient pour chaque élément suivant des fonctions spécifiques contrôlées par des paramètres. La formulation consiste à ajuster ces paramètres afin de minimiser les termes d'erreur ou l'énergie.

Les deux méthodes produisent une série d'équations algébriques à résoudre. Les programmes par éléments finis combinent les matrices d'éléments dans une grande matrice globale dite de « raideur », tandis que la méthode des différences finies opte pour une mise à jour des équations à chaque pas de calcul.

6. conclusion

Dans ce chapitre nous avons essayé de décrire un état des connaissances générales concernant les différents types de mouvement, les facteurs influençant la stabilité de terrains, les techniques de surveillances et l'ensemble des méthodes de calcul de facteur de sécurité.

Pour conclure, nous pouvons dire :

- Un glissement de terrain n'a que rarement une cause unique, c'est le plus souvent l'action conjointe de plusieurs facteurs négatifs qui déclenche un glissement, l'un de ces facteurs intervenant seul n'aurait en général rien produit. Pour analyser le mécanisme d'une rupture, il convient de bien repérer les divers facteurs susceptibles d'être intervenus et de créer une hiérarchie entre eux.
- La détermination des caractéristiques physico-mécanique est indispensable pour toute étude de stabilité du talus que ce soit naturel ou artificiel (mines et carrières à ciel ouvert, route, barrages.etc). Cependant que nous ne pouvons pas baser sur ces caractéristiques calculées au laboratoire qui ne représente la réalité de chose, donc la nécessité de déterminer les propriétés des roches en place. En générale la rupture se produit selon les plans de stratification ou selon les directions principales des fissures c'est donc selon ces directions qu'il faudra effectuer ces essais.
- Les méthodes d'équilibre limite sont les plus classiques en mécanique des sols mais elles nécessitent une prédétermination des lignes de rupture (ou une recherche automatique du minimum parmi un ensemble de courbes). Quant aux méthodes numériques dans laquelle la courbe de glissement la plus probable se déduit naturellement de l'analyse de l'état des contraintes et déformations, elles nécessitent la connaissance des caractéristiques de déformabilité du massif, en plus de celles de résistance.
- Le choix de l'une ou l'autre méthode dépendra donc de la disponibilité des caractéristiques mécaniques et de la bonne appréciation qu'il est possible de faire de la position de la ligne de rupture critique.
- Évaluer une stabilité de pente passe surtout par le choix du coefficient de sécurité qui est associé aux méthodes, ce qui peut poser des problèmes lors des comparaisons. Mais quelle que soit la méthode adoptée, une analyse de sensibilité est recommandée, car il est toujours bon de savoir le rôle de chacun des paramètres afin de déterminer le paramètre prépondérant, celui qui pilote la stabilité. L'étude géotechnique devra en tenir compte et un retour sur le terrain est souhaitable.

Chapitre II: La Géologie Du Gisement De Phosphate De Kef Essennoun

1. Généralités

1.1. Historique et méthodologie des recherches géologique au Djebel Onk [6]

La découverte du phosphore est attribuée à Hennig Brandt en 1669 en Allemagne à partir de l'urine. Cet élément est un matériau blanc luisant dans l'obscurité, et brûlant en produisant une lumière éclatante.

La première découverte des phosphates algériens a été réalisée par Ph.Thomas (1873) à Boghari, vétérinaire de l'armée française, passionné par la géologie.

Entre 1906/1907, L. Joleau a découvert le gisement de Djebel Onk avec la mise en évidence de deux couches phosphatées dans un ravin de l'Oued de Djemi-Djema au Sud de Djebel Onk.

En 1912, M.D. Dussert a présenté les premières informations sur les gisements phosphatés algériens avec des coupes lithologiques détaillées des gîtes de la zone de Djebel Onk.

En 1930, la Compagnie des Phosphates de Constantine a débuté les travaux de prospection systématique et a confirmé l'existence des réserves considérables, ce qui a donné naissance à la société de Djebel Onk (S.D.O) en 1936.

En 1939, Laffitte et Cayeux ont procédé à la reconnaissance géologique régionale des gisements.

En 1951, Visse a étudié les phosphates du Dj. Onk et a calculé les réserves. Selon ses calculs, les réserves étaient de 600 millions de tonnes; dont 110 millions de tonnes appartenant à l'anticlinale de Djemi-Djema. Il a établi la carte géologique au 1/10000 ainsi que les coupes géologiques de la région.

En 1960, des campagnes de prospection géophysique et radiométrique ont été faites. Durant cette même année, le projet d'exploitation des phosphates devenait prioritaire.

En 1963, les études ont été reprises par G. Ranchin qui avait établi des cartes géologiques à l'échelle 1/5000.

En février 1965 démarra l'exploitation de Djemi-Djema en se basant sur les données prévisionnelles de Servajean. Suite à l'aménagement de la carrière, l'intérêt porté à la géologie de Dj. Onk s'accroît. Ces terrains devenaient, alors, l'objet de nombreux travaux, parmi lesquels ceux de Kettouche (1970), Berthiaux (1970), Bentin (1973), Chabou (1975), Ousseddik, Ousmer et Belkhedim (1979), Berats et Fur (1982), Lehotsky (1983/1984), Mezghache (1991).

De 1971 à 1974, la SONAREM (Société nationale des recherches géologiques et minières) a relancé les travaux de recherche et de prospection sur les phosphates de l'Est algérien en s'appuyant sur un levé aéro-radiométrique (Rudowez).

Entre 1985 et 1987, l'ENFERPHOS (Entreprise nationale du fer et du phosphate) a confié à l'EREM (Entreprise de recherches minières) des travaux d'évaluation des ressources en phosphates dans la région de Djebel Onk; 97 sondages implantés en réseau de maille de 300 x 150 et de 600 x 300 m totalisant 10732 m ont été réalisés.

En novembre 1989, l'ENFERPHOS fait connaître son cahier de charge pour des études de développement du complexe de phosphate de Djebel Onk.

En avril 1992, un contrat a été signé entre l'ENFERPHOS et le consultant BRGM (Bureau de recherches géologiques et minières) sur la compilation des éléments techniques et

économique permettant d'arrêter un projet de développement de l'exploitation des gisements de Djebel Onk (BRGM, 1993).

1.2. Nomenclature des roches phosphatées

Dans une optique utilisation internationale, la classification des phosphates a tenu compte des définitions du « Glossary of Géology » publié en 1974 par l'American Geological Institute pour retenir l'emploi des termes « phosphorite » et « phosphatite » avec les significations suivantes :

- Phosphorite : est une roche sédimentaire composée en majorité de minéraux phosphatés pouvant être indifféremment des phosphates de Ca, d'Al, et de Fe ;
- Phosphatite : roche sédimentaire composé en majorité de minéraux de la série de l'apatite. Compte tenu de la variété des teneurs en P_2O_5 dans les roches, une teneur de 18 % a été choisie arbitrairement comme limite entre les roches considérées comme minerai de phosphate ou roche stérile. Dans ces conditions, on ne peut utiliser les termes phosphorite ou phosphatite que pour les roches à des teneurs en P_2O_5 supérieur ou égale à 18 %. Si la teneur est inférieure à 18 % en P_2O_5 , la nomenclature pétrographique à utiliser en premier lieu est celle qui concerne la fraction non phosphatée.

1.3. Types de gisements de phosphate

Dans l'écorce terrestre sous différents types de gisements le phosphate peut être rencontré, selon l'origine et le mode de formation on distingue : Les gisements sédimentaires, les gisements d'origines ignées et les guanos. La *figure 1.II* représente la localisation de différents types de gisement de phosphate dans le monde.

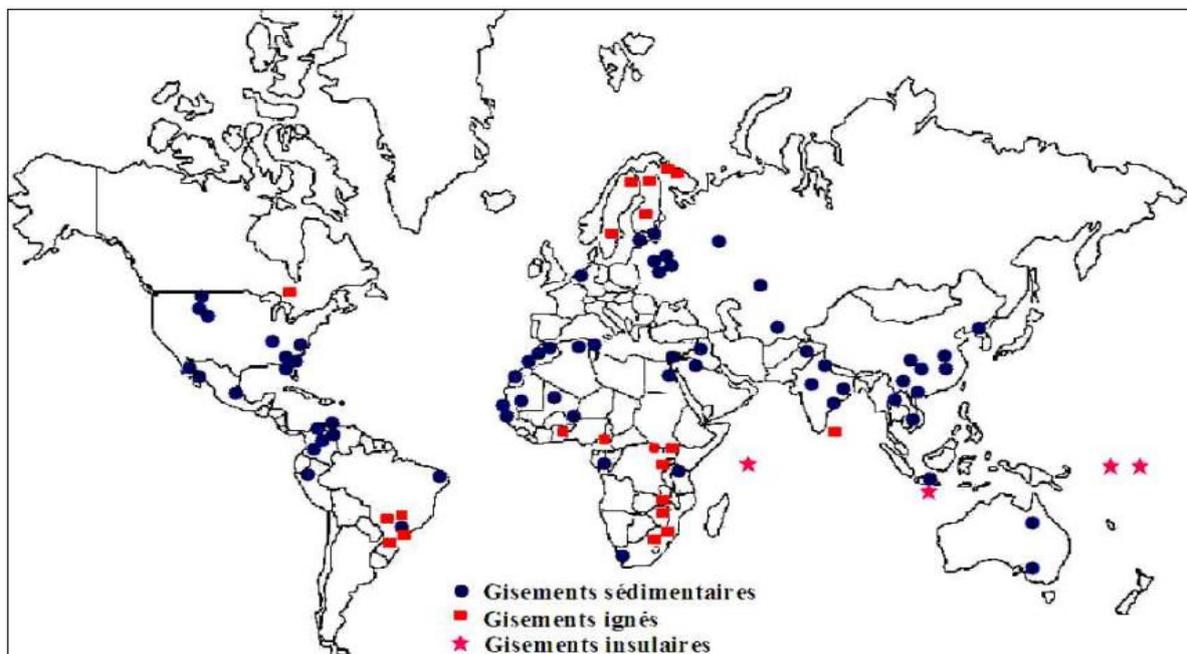


Figure 1.II: Localisation des principaux types de gisements de phosphates (Zapata et Roy, 2004)

1.3.1. Les gisements sédimentaires

D'après V. Smirnov 1982, ce sont les gisements de plateforme et géosynclinaux. Les gisements de plateformes les plus remarquables sont associés aux synclises, quand aux gisements géosynclinaux se sont mis en place sous un climat aride. Les faciès sédimentaires revêtent trois principaux types : les granulo ou pseudoolithes, les nodules les débris organiques (coprolithes et fossiles phosphatisés). Les gisements sédimentaires sont plus importants en nombre et en volume.

1.3.2. Les gisements d'origine ignée

Les roches les plus fréquentes sont la syénite, néphéline, carbonatites. Ces gisements moins importants que les précédents. L'apatite qui se trouve sous une forme disséminée, est souvent associée avec des minéralisations en Cu, Nb, Ta, Zn, etc.

1.3.3. Les gisements de phosphates sédimentaires de type guano

On les trouve dans les îles de Pérou, gisement de faible réserves par rapport aux autres gisements, dont l'épaisseur de la couche peut atteindre 35m leur genèse est encore mal comprise.

1.4. Genèse des phosphates

Il y'a plusieurs diverses théories concernant la genèse des phosphates, une partie adopte une origine organique et l'autre partie adopte une origine non organique.

Selon la théorie d'origine non organique, les phosphates sont le résultat de la précipitation des composés phosphatés directement de l'eau de mer. Par contre selon la théorie d'origine organique, la précipitation des organismes est indispensable pour la formation des phosphates. La théorie de l'auteur A.V.Kazakov fait un progrès sur l'origine des phosphates, cette théorie est basée sur les résultats de la campagne océanographique. Ces travaux ont montré que la teneur en P_2O_5 de l'eau de mer augmente avec la profondeur (le maximum vers 500m) et le minimum se trouve dans la zone de photosynthèse, où le phosphore est consommé.

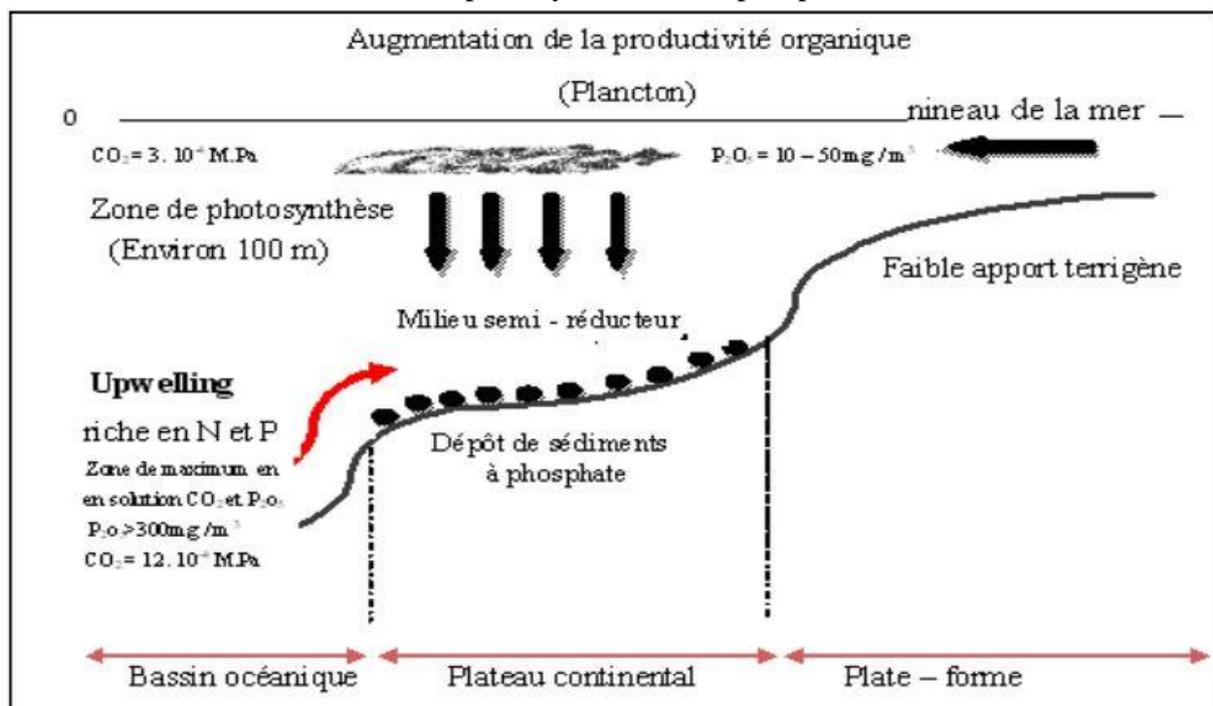


Figure 2.II: Schéma de phosphatogénèse selon Kazakov (1930)

Le phosphore précipite chimiquement sur les bords du plateau continental après y avoir été amené par des courants froids ascendants (figure 2.II). Avec l'échauffement des eaux, il y'a augmentation du pH et diminution de la pression partielle en CO_2 . Cette diminution amène à la précipitation du $CaCO_3$, puis des phosphates. Donc, la sédimentation chimique des phosphates ne peut se produire dans les régions profondes, là où la pression du CO_2 est trop élevée, ni dans la zone de photosynthèse, où le phosphore est consommé. C'est donc entre 50 et 500 m environ que précipitera le phosphate (A. Daasa, 2006).

1.5. Utilisation des phosphates

Les phosphates constituent des composés de base indispensables à toute forme de vie végétale ou animale. Ils sont utilisés surtout pour la fabrication d'engrais mais aussi dans l'industrie des détergents (comme agents anticalcaires), l'alimentation animale et comme stabilisant dans l'alimentation humaine. L'intérêt des phosphates, dont plus de 80% de la production mondiale est utilisée par l'agriculture. Ils se révèlent être indispensables à la vie du monde végétal.

1.6. Phosphates et environnement

Les phosphates naturels contiennent des cations métalliques qui peuvent être valorisés en tant que sous-produits (U, TR, V, Ti...) (Cherniak, 2000 ; Rakovan ; Ogihara, 1999 ; Monir et al, 1999 ; Krea et Khalaf, 2000) ou qu'il convient d'éliminer parce qu'ils constituent un danger pour l'environnement (U, Cd, Mo, Se, As...) par suite de l'utilisation des engrais phosphatés (Nathan et al, 1996 ; Baioumy, 2005 ; Sassi, 1999 ; Baturin et Kochenov, 2000)

Le taux du cadmium dans le sol européen est devenu, ces dernières années, une des principales préoccupations de la CEE. Il a été estimé que 30–60% du cadmium contenu dans les récoltes provient de l'atmosphère et 40 – 70% du sol. Une des sources du cadmium dans le sol est l'engrais phosphaté. Au rythme actuel d'utilisation de ces engrais, surtout dans les pays industrialisés, il y a une accumulation du cadmium dans le sol.

Le phosphore est, avec le nitrate, un des grands responsables du phénomène de l'eutrophisation. Un autre problème environnemental est que les terrils de phospho-gypse découlant de la production industrielle d'engrais contiennent des éléments radioactifs. Pour cela des études de valorisation et de dépollution des phosphates ont été effectuées (Boussen, 2007), dans le but de récupérer certains éléments, tel que l'uranium, ou d'éliminer certains éléments toxiques ou nuisibles tels que le cadmium et les métaux lourds.

1.7. Traitement des phosphates [5]

Généralement, les phosphates doivent subir des traitements avant d'être utilisés. Les traitements sont physiques (broyage, calcination, lavage, séchage) et chimiques (attaque du minerai par l'acide sulfurique). L'enrichissement consiste à utiliser les procédés les moins coûteux possibles pour libérer les constituants minéraux, puis à séparer au maximum les impuretés libres par voie physique et ainsi concentrer les éléments phosphatés.

Pour les minerais d'origine ignée non altérés, le problème de l'enrichissement est généralement résolu par réduction granulométrique suivi de flottation, alors que l'enrichissement des minerais sédimentaires nécessite des solutions originales et parfois assez complexes. Du plus simple au plus compliqué, on peut distinguer :

- Un simple séchage de minerai riche ;
- L'enrichissement par voie sèche ;
- L'enrichissement par voie humide ;
- L'enrichissement par flottation ;
- L'enrichissement par calcination.

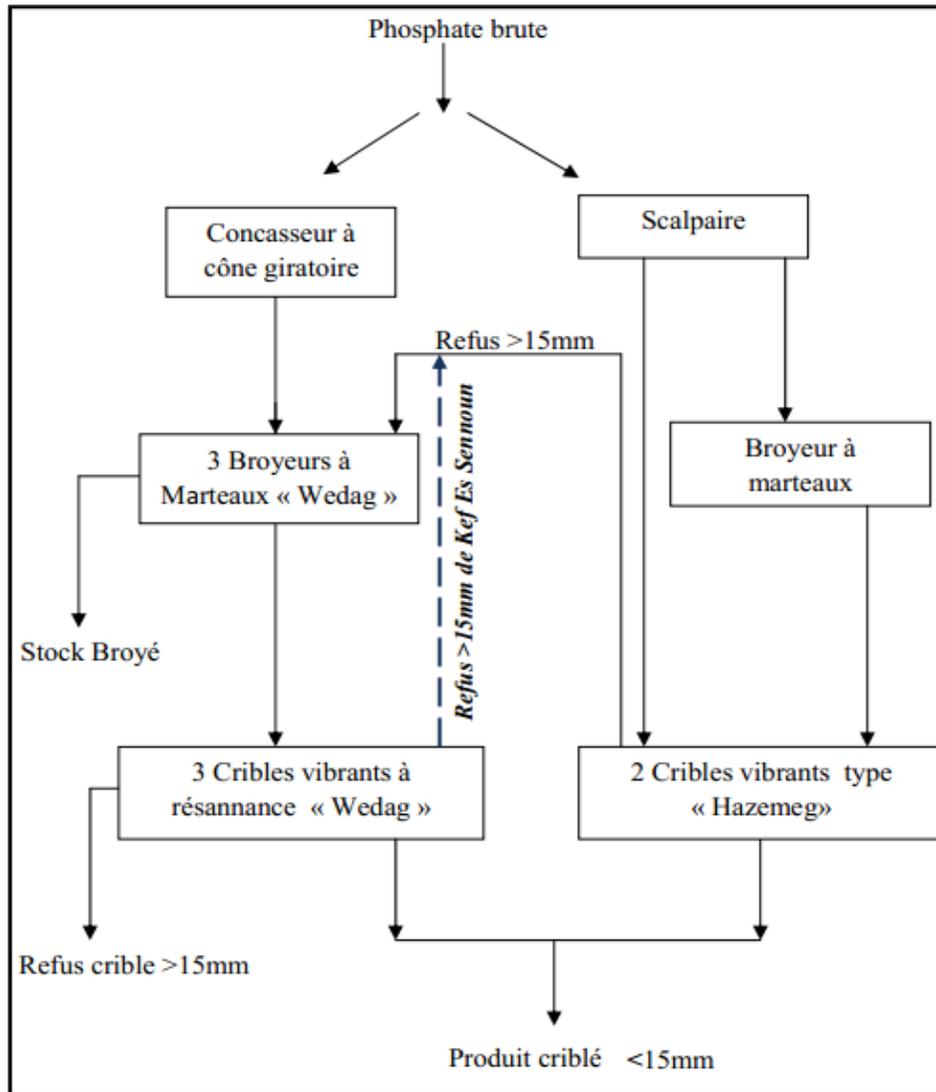


Figure 3.II: Schéma de préparation mécanique à l'usine de Djebel Onk

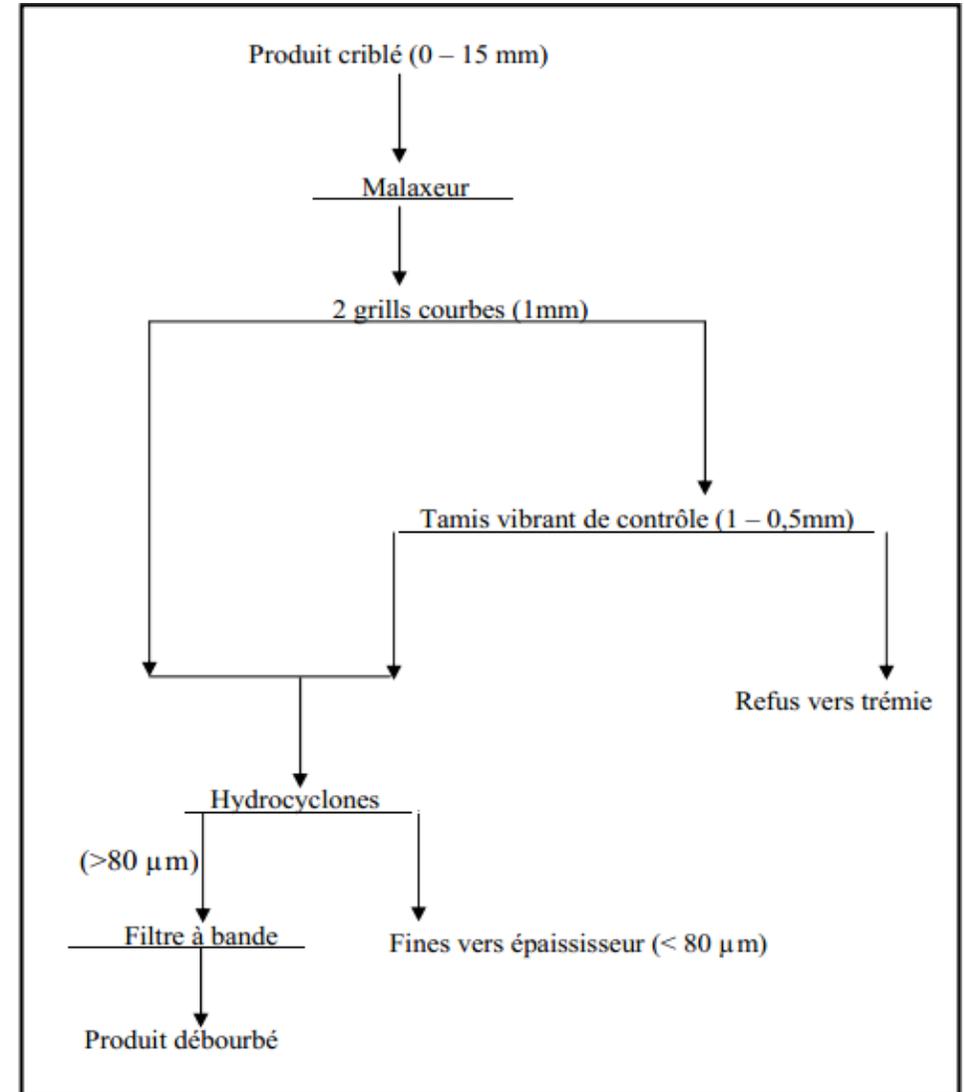


Figure 4.II: Schéma de préparation du minerai de phosphate de Djebel Onk

1. Géologie régionale et locale [6], [14]

1.1. Situation géographique

Le district de Djebel Onk est situé à environ 100Km au Sud de la ville de Tébessa, à l'extrémité orientale de l'Atlas saharien proche de la frontière algéro-tunisienne. Il se présente sous forme d'un massif calcaireux de 20 Km de long et 3 Km de large. Il culmine à 1198 m d'altitude au Djebel Tarfaya. Ce bassin minier renferme plusieurs indices et cinq gisements:

- Gisement de Djemi-Djema ;
- Gisement de Djebel Onk Nord ;
- Gisement de Bled Hadba ;
- Gisement d'Oued Betita.
- Gisement de Kef Essennoun.

Ce dernier, qui est l'objet de notre étude, est situé sur le flanc méridional de Djebel Onk, à environ 09 Km au Sud-ouest de la ville de Bir El Ater (*Figure 5.II*).

Le bassin de Djebel Onk appartient à la zone des climats subdésertiques, caractérisée par deux saisons très nettes : un hiver froid et rigoureux et un été chaud où les températures peuvent dépasser 45°. La pluviométrie accuse des chiffres très faibles et le réseau hydrographique est rarement mis à contribution. L'inconvénient majeur réside précisément dans la brutalité des averses d'orage qui déchaînent les vallées descendantes de Djebel Onk. La violence des pluies périodiques provoque des ruissellements torrentiels qui inondent et peuvent changer l'ancienne allure de quelques ravins. Les vents de sables sont fréquents en saison sèche. La population est peu dense. La situation économique de la région s'est améliorée grâce à l'installation du complexe minier de phosphates à Bir El-Ater ; ce qui a contribué à l'agrandissement et au développement de la ville.

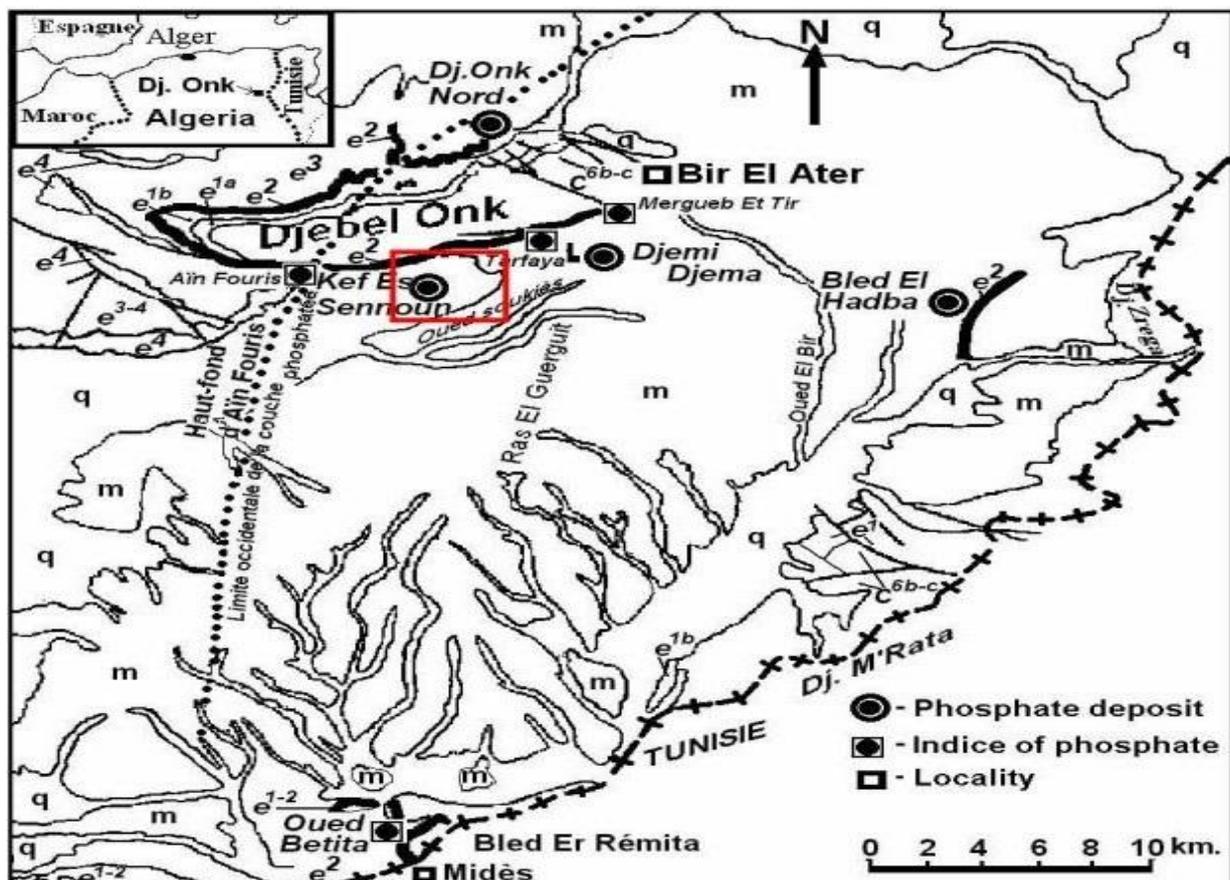


Figure 5.II: Carte de situation géographique des gisements de phosphates de la région de Djebel Onk (Prian et Cortiel, 1993)

1.2. Géologie régionale de Djebel Onk

Les gisements de phosphates de la région de Djebel Onk sont d'âge Thanétien supérieur. La couche phosphatée a une épaisseur de l'ordre de 30 m. Ces terrains sont structurés régionalement en une suite d'anticlinaux et synclinaux fortement asymétriques et faillés dans leurs flancs, d'axes N80°E au Djebel Onk.

La stratigraphie de la région de Djebel Onk a été établie par Visse (1952). La série sédimentaire affleurante de la région comprend une succession stratigraphique allant du Crétacé supérieur (Maestrichtien) à l'Eocène moyen (Lutétien). Cette série marine est d'environ 500 m d'épaisseur. Elle est recouverte en discordance par une épaisse série sablo-argileuse continentale d'âge Miocène, puis Quaternaire comblant les structures synclinales et fossilisant les séries d'âge anté-miocènes (*Figure 6.II*).

1.2.1. Stratigraphie

1.2.1.1. Crétacé

Ce sont les sédiments les plus anciens au cœur de l'anticlinal du Djebel Onk. Tectoniquement, ces formations sont très accidentées. Seuls les dépôts du Maestrichtien y affleurent.

- Maestrichtien

Les sédiments de cet âge sont représentés par des calcaires blancs massifs avec des intercalations marneuses au cœur de l'anticlinal de Djebel Onk. Le sommet est marqué par une surface ferruginisée et taraudée.

1.2.1.2. Paléocène

Il est représenté par des sédiments marins assez épais (350 m).

- Danien

Le Danien est subdivisé lithologiquement en deux sous étages : inférieur et supérieur.

✓ Danien inférieur

Il est représenté par des argiles marneuses et schisteuses, de couleur grise foncée au brun vert, intercalé par des marnes dures et irrégulières. L'ensemble est traversé par des filons de gypse. L'épaisseur du Danien inférieur est de 30 à 40 m.

✓ Danien supérieur

Il est formé par des calcaires durs blancs, très fins souvent à cassures conchoïdales, intercalées de marnes, argileuses et schisteuses. L'épaisseur varie d'une dizaine de centimètre à un mètre.

- Montien

Il est représenté par des calcaires détritiques à lumachelles avec des intercalations de marnes et de dolomie ainsi qu'une faible quantité de silex rencontrée. Il renferme de nombreux niveaux à huîtres de différentes couleurs. L'épaisseur moyenne est de 100 m.

- Thanétien

C'est l'horizon porteur de la minéralisation phosphatée principale. Il se subdivise en deux sous étages.

✓ Thanétien inférieur

Le Thanétien inférieur est représenté par des marnes grises foncées à noires schisteuses. Dans la partie inférieure, on note la présence des conglomérats et de minces lits phosphatés ainsi que deux niveaux de marnes à faunes. Au sommet apparaissent des intercalations phosphatées atteignant jusqu'à 2m, surmontées par des calcaires et des marnes à gros gastéropodes. La puissance varie de 30 à 40 m.

✓ Thanétien supérieur

C'est la couche exploitable dans les gisements de Djebel Onk. Il débute par un niveau dolomitique à gastéropode, la couche phosphatée est de 30m d'épaisseur en moyenne. Cette couche d'âge Thanétien supérieur se caractérise par des variations au terme de l'épaisseur d'un gisement à l'autre dans le bassin de Djebel Onk, notant à titre d'exemple; dans la zone du Djemi-Djema où la couche de phosphate est de l'environ 30 m d'épaisseur, situé entre une série de marnes noires feuilletées au mur, et une formation de dolomie, puis de calcaire à silex en toit. Dans la zone de Djebel Onk Nord, le faisceau phosphaté est moins épais (17 m, au maximum), et il se réduit progressivement vers l'ouest, jusqu'à disparaître complètement (biseau stratigraphique) (Prian et Cortiel, 1993).

1.2.1.3. Eocène

- Yprésien

Il repose directement sur les dépôts du Thanétien et il a une épaisseur de 32m, on note :

✓ Yprésien inférieur

Il est représenté par des dolomies et calcaires dolomitiques. Des intercalations de phosphates très dolomitiques sont bien observées, on note la présence de nombreux débris de silex noirs.

✓ Yprésien supérieur

Il est constitué par une alternance de calcaires, calcaires dolomitiques et marnes.

- Lutétien

Les formations de cet étage recouvrent en concordance les séries Yprésiennes. Elles sont répandues dans la région de Djebel-Onk (270 m d'épaisseur). On distingue de bas en haut :

✓ Lutétien inférieur

Il est caractérisé par une diminution remarquable des calcaires qui sont remplacés par les marnes blanches crayeuses. On note l'existence de géodes de quartz et de nodules de silex, avec une faune caractéristique. Sa puissance varie de 40 à 50 m.

✓ Lutétien supérieur

Ce faciès est évaporitique; il est constitué de gypse et d'argile verdâtre, argile phosphaté verte et bancs de calcaire. A la base, on distingue l'argile verte phosphatée et des bancs de calcaire d'une épaisseur de 10m. Au sommet, des argiles vertes avec banc de gypse intercalé. Son épaisseur est de 65 m. La faune caractéristique est Ostréa Multicostata et Cardia Placunoides.

1.2.1.4. Miocène

Il est représenté par un complexe de roches terrigènes, de conglomérats, des argiles, de sables et de schistes. On distingue trois formations lithologiques :

- Miocène inférieur

Il est représenté essentiellement par des conglomérats, des sables avec des lits minces d'argile siliceuse. La teinte est clair, grise blanchâtre. Sa puissance est de 200 m.

- Miocène moyen

Il est essentiellement argileux de couleur marron, parfois schisteux, avec des intercalations de sables à grains fins et moyens. Sa puissance atteint 250 m.

- Miocène supérieur

C'est une série sablo-argilo-conglomératique. Sa puissance atteint 350 m.

1.2.1.5. Quaternaire

Les formations quaternaires couvrent de vastes surfaces dans la région. Elles sont essentiellement représentées par des éboulis de pente, de dépôts sableux, des graviers, de dépôts éoliens, alluviaux et fluviaux.

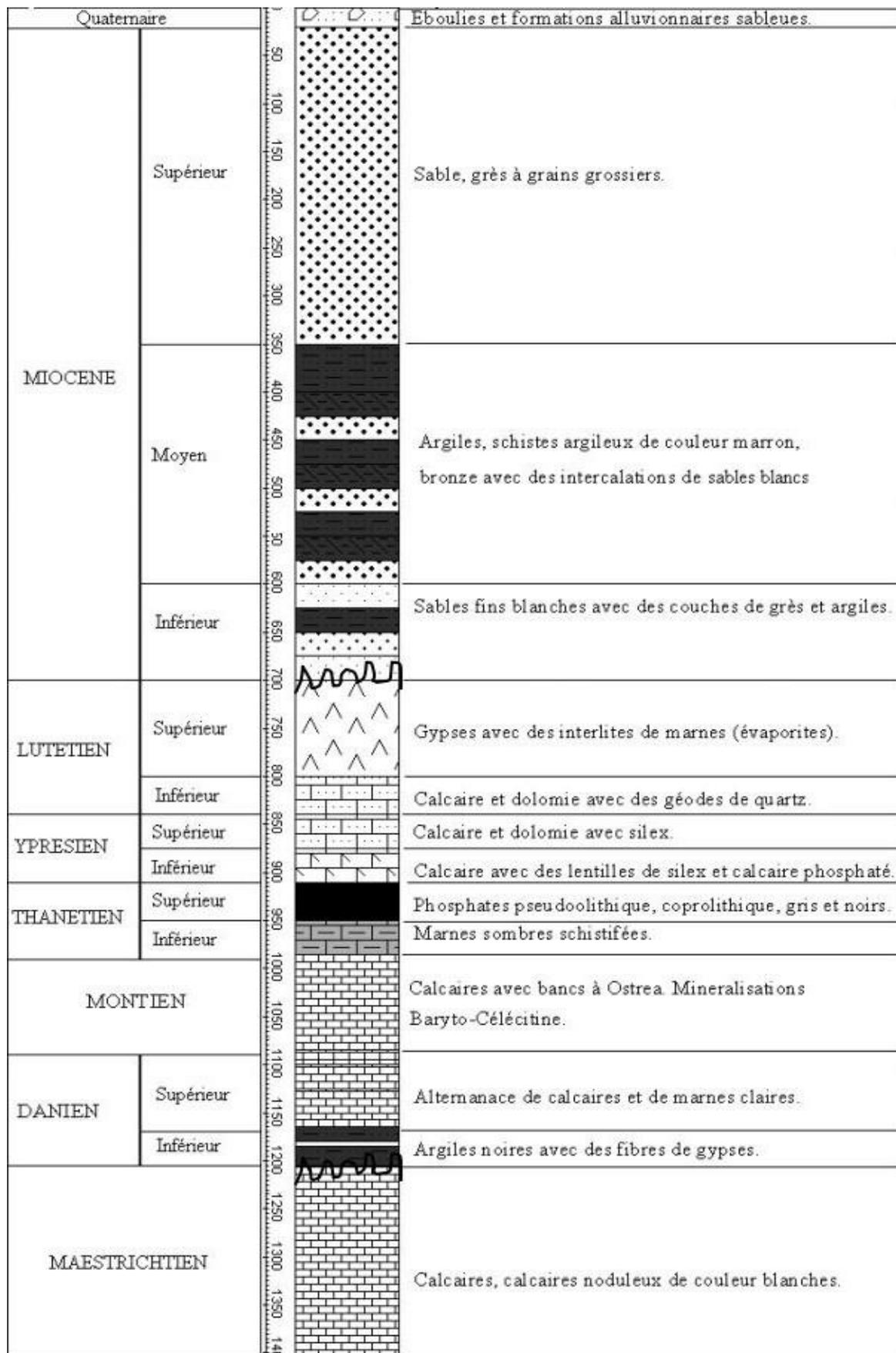


Figure 6.II: Colonne stratigraphique de la région de Djebel Onk (Cielsky et Benchernine, 1987)

1.2.2. Tectonique régionale [10], [14]

1.2.2.1. Tectonique plicative et cassante

La région de Djebel Onk appartient à l'extrémité orientale de l'Atlas Saharien (Ranchin, 1963). La série Crétacé supérieure à Eocène du bassin de Djebel Onk-Gafsa-Métloui est structurée en une suite d'anticlinaux et de synclinaux dissymétriques, généralement faillés dans leurs flancs, d'axe le plus souvent SW-NE et décrochés par des accidents transverses N120° à N140° E.

La principale structure dans la région de Bir-El-Ater est celle de l'anticlinal de Djebel Onk, à cœur du Crétacé supérieur, allongé sur une vingtaine de kilomètres suivant un axe N70°E et large d'environ 3 km. Cet anticlinal fortement asymétrique, décrit par Visse (1951) comme une flexure anticlinal post-pliocène, présente un flanc Nord à pendage faible, inférieur à 10°, supportant le gisement de Djebel Onk Nord, son flanc Sud, par contre, est très raide, parfois vertical et même renversé (*Figure 7.II*).

A 750 m au Sud de l'anticlinal du Djebel Onk, culminant à 1198 m au Djebel Tarfaya, s'individualise le petit anticlinal surbaissé du Djebel Djemi-Djema avec une altitude de 883m. Les deux structures anticlinales du Djebel Onk et du Djebel Djemi-Djema sont séparées par une cuvette synclinale effondrée, d'environ 1 km de largeur.

Les gisements de Bled El Hadba et de l'Oued Bétita présentent des contextes structuraux plus simples. Ces gisements, à stratification faiblement inclinée, appartiennent respectivement aux flancs occidentaux des structures anticlinales du Djebel Zerga et Djebel Birkiss-Djebel Er-Rmita, à cœur de crétacé, qui se poursuivent en Tunisie dans la chaîne de Métloui. Dans ces deux gisements, la couche est perturbée par des accidents transverses.

Les zones anticlinales des Djebel Onk et Djemi-Djema, au Nord, sont séparées de celle des gisements de Bled El Hadba, à l'est et à l'Ouest de Bétita, au Sud, par une zone synclinale de 14 et 28 km de largeur, respectivement, comblée par les sédiments détritiques du Miocène et du Quaternaire.

Les anticlinaux des Djebel Onk, Djemi-Djema et Oued Betita sont localisés à la bordure de la flexure Sud atlasique qui correspond à une zone d'affrontement entre le domaine atlasique mobile et la plate-forme saharienne stable. Plus particulièrement, ils appartiennent à la branche Nord de la flexure, de direction E-W.

La disposition régionale des structures anticlinales et synclinales est liée à des mouvements en cisaillement dextres le long de la faille de Gafsa, orientée N120° E. Les accidents transverses N 110° à 120° E, très abondants dans le bassin de Djebel Onk-Gafsa-Métloui, constituent des structures pérennes ayant fonctionné depuis le Turonien.

1.2.2.2. Chronologie des phases de déformations [5]

La structuration actuelle est une résultante de plusieurs phases de déformations (Prian et Cortiel, 1993) qui sont respectivement:

a- Tectonique synsédimentaire (Paléocène-Eocène)

Cette phase est caractérisée par une instabilité tectonique de la plate forme de sédimentation et une action compressive NW-SE, contemporaine à la sédimentation Paléogène, s'exprimant par des ondulations, des failles synsédimentaire. Cette tectonique précoce induit des lacunes de sédimentations dans la série Paléocène-Eocène et a conduit à l'édification du dispositif paléogéographique en hauts-fonds et sillons, qui vont contrôler le dépôt de phosphates. Ces déformations précoces peuvent être liées à la montée diapirique (Trias), notamment au Paléocène-Eocène.

b- Tectonique post – eocène moyen, tardi – miocène

Elle est contemporaine à l'émergence de la série au Lutétien supérieur. Elle représente la phase majeure du plissement des Aurès et des déformations distensives transverses (failles N120° à 140°E), induisant un début de structuration de la série Crétacé supérieur-Eocène en petits horsts et grabens, allongée suivant des directions N70°E. Ces plissements sont en majorité antérieurs aux dépôts des sables Miocènes.

c- Tectonique tradi – miocène post – burdigalienne à paléocène – pléistocène

C'est la phase majeure de plissement de l'Atlas tunisien. Les plissements de la série crétacée supérieure-paléocène-éocène et miocène en grandes structures antiforme et synformes jouent en horst et grabens dans les structures antérieures; ils forment vers le Sud et sur le flanc inverse des mégaplis de Djebel Onk et Djemi-Djema. Cette tectogénèse est responsable de la structure actuelle de la région du Djebel Onk.

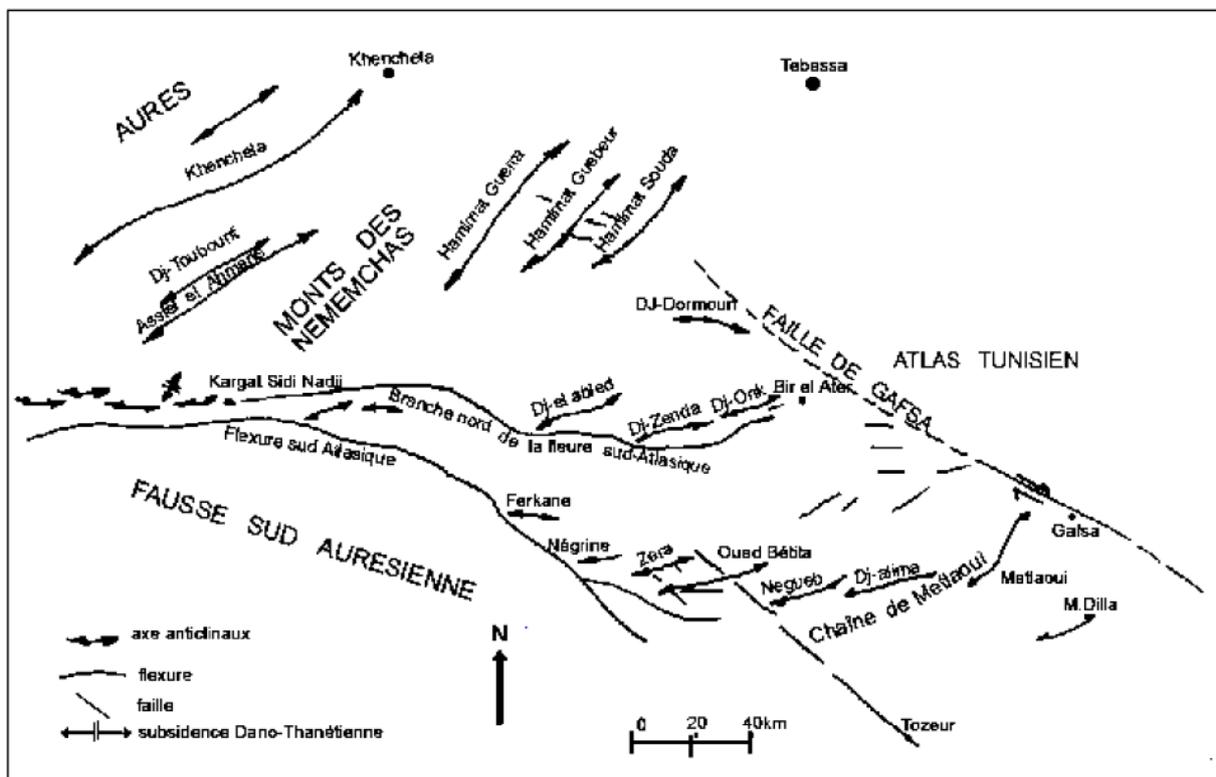


Figure 7.II: Carte structurale de la région du Djebel Onk à l'intérieur du bassin de Gafsa-Métlaoui-Onk (Aissaoui, 1984).

1.2.3. Paléogéographie [6]

Le Bassin de Djebel Onk se veut la partie occidentale du bassin de Gafsa-Métlaoui-Djebel Onk (dénomination de Sassi, 1980) au Paléocène supérieur-Eocène inférieur. Ce bassin était occupé par une mer épicontinentale peu profonde. Cette mer est située entre l'île de Kasserine, au Nord, le môle de Djefra, au Sud, et le haut-fond d'Aïn Fouris, à l'ouest (Figure 8.II).

L'île de Kasserine est d'âge Crétacé supérieur, formait une zone émergée au Paléocène-Eocène. Il est bordé par trois petits bassins phosphatés qui sont: Sra Quartan, au Nord, Maknassy-Mezzouna, à l'Est et bassin Gafsa-Métlaoui-Onk à l'ouest. Ces trois bassins appartenaient à un domaine de plate-forme interne, qui est instable et accidenté. Ils se trouvent en communication au Nord-est par la mer qui venait de l'Atlantique, des circulations

d'eaux riche en phosphore à l'issu de courants remontants, qui se dirigeaient vers la mer intérieure saharienne. Tout autour l'île de Kasserine, ces courants nutritifs ont provoqué une forte productivité organique et le peuplement d'organismes néritiques. Dans le bassin de Gafsa-Métlaoui-Onk, on note l'abondance du nannoplancton (Dinoflagellé), des diatomées et des radiolaires, comme support de grains phosphatés. Par contre, les foraminifères sont rares (Prian et Cortiel, 1993). La paléogéographie de la plate-forme Gafsa-Métlaoui-Onk est complexe. Elle se caractérise par des dispositifs en haut-fond et sillon révélés par les rapides variations d'épaisseur de la série phosphatée, les condensations de série et les lacunes de sédimentation.

La sédimentation argilo-marneuse de couleur noire, confinée notée Formation El Haria, qui précède la sédimentation phosphatée tout autour l'île Kasserine, est interrompue par ce fréquente lacunes de dépôt. Cette sédimentation marneuse indique une fermeture progressive du domaine de sédimentation et une tendance régressive du régime marin. La sédimentation phosphatée sus-jacente est par contre, témoigne d'une réouverture du domaine sédimentaire marquant le retour des influences transgressives. A la fin de la période de la sédimentation phosphatée principale (Thanétien Supérieur), une phase régressive se produit à nouveau. Cette phase est caractérisée par des remaniements de phosphate localement par un horizon conglomératique à galets de dolomie, formé en milieu marin. Cette phase régressive est suivie régionalement par la transgression yprésiennes marqué par la présence de calcaire à silex.

Les variations d'épaisseurs, ainsi que l'homogénéité de la couche phosphatée, elle-même traduisant cette paléogéographie diversifiée. Ainsi, la couche de phosphate, calée entre les marnes noires du mur et les dolomies du toit, est la plus épaisse au niveau des gisements de Djemi-Djema (30 m) et de Kef Essennoun (proche de 50 m) qui caractérise le sillon subsidie (Prian et Cortiel 1993).

Le gisement de Bled El Hadba se caractérise par une couche phosphatée d'environ 30 m d'épaisseur. Cette couche localement intercalée par des phosphates marneux ou lumachelliques qui font parfois chuter les teneurs en P_2O_5 . Comme pour les phosphates du Djebel M'rata, en Tunisie, le milieu de dépôt correspond probablement à des zones moins confinées, plus oxygénés, à niveau d'énergie plus élevé. Ceci favorise à l'édification de petits cordons de lumachelles.

A l'échelle régionale, la répartition, sur la plate-forme sédimentaire, des dépôts phosphatés des gisements de Djebel Onk est contrôlé par les dispositifs paléogéographiques locaux, en haut fond et sillon, par la bathymétrie, les mouvements de fond, ainsi que par le niveau de l'énergie et l'agitation mécanique du milieu (Prian et Cortiel, 1993).

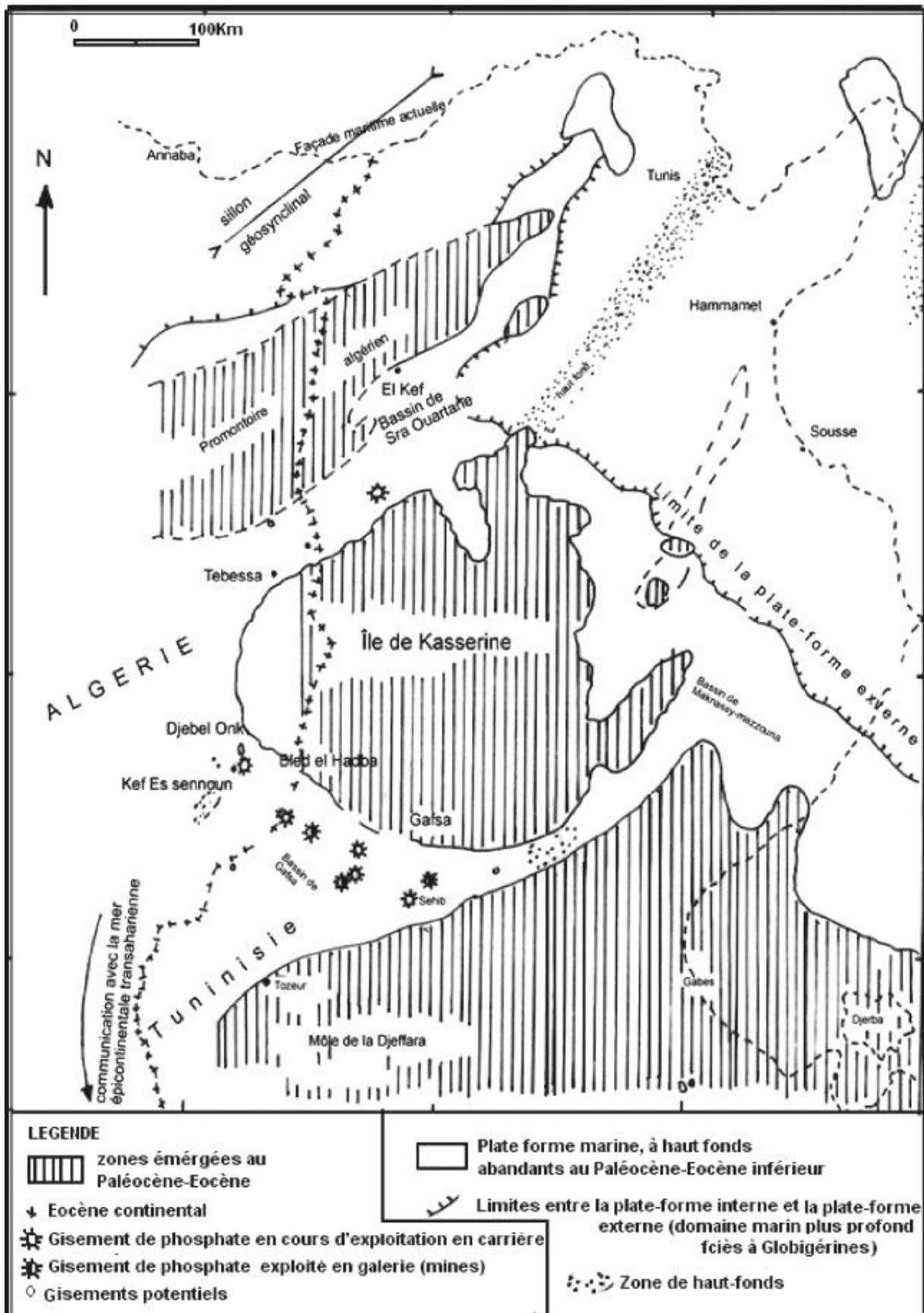


Figure 8.II: Situation paléogéographique des gisements de phosphates de la région de Djebel Onk à l'intérieur du bassin phosphatés Gafsa-Métlaoui-Onk (D'après Buroillet et Oudin, 1980 ; Fourine, 1980 ; Sassi, 1974 et 1980).

1.3. Géologie du gisement de Kef Essennoun [5], [10], [14]

Vu de l'absence des coordonnées officielle fournis par l'état ou par SOMIPHOS pour le périmètre de délimitation du gisement, nous avons essayé de donner ces coordonnées en utilisant Google Earth, le *plan topographique 1/1000 actualisé au Septembre 2014* et la *carte topo DJEBEL ONNG, NI-32-XIV-EST, 1/50 000*. Le *tableau 1.II* représente les coordonnées de quatre points du gisement de Kef Essennoun dans trois systèmes de projection.

Point	X/Y	UTM	LAMBERT	WGS84
1	X	404 000	980 951	404047.13
	Y	3 841 300	170 169	3840992.09
2	X	408 000	984 943	408047.16
	Y	3 841 300	170 426	3840992.09
3	X	404 000	981 086	404047.13
	Y	3 839 200	168 073	3838892.08
4	X	408 000	985 078	408047.15
	Y	3 839 200	168 330	3838892.07

Tableau 1.II: Coordonnées de la zone d'étude dans trois systèmes de projection

1.3.1. Travaux de prospection effectués

Le gisement de Kef Essennoun a été reconnu en détail par l'EREM, au cours de l'année 1986, grâce à 32 sondages carottés, notés S-2 à S-46, implantés suivant des profils de prospection de direction Nord Ouest - Sud Est à la maille de 250 x 300m (*Figure 57*). Le sondage le plus profond est le S-7 (250m), situé au Sud Ouest du gisement. Le plus court est le S-25 (76.1m) implanté à proximité de la bande d'affleurement des dressants de Kef Essennoun. Tous les sondages ont traversé la couche phosphatée jusqu'au mur, à l'exception du sondage S-14 qui n'a recoupé que 13.5 m à cause d'un accident technique survenu au moment du forage. En outre l'EREM a réalisé, dans la zone des dressants 22 tranchées notées Tr22 à Tr44 avec une profondeur de 1.0 à 2.0 m, une largeur de 1.0m et une longueur en fonction de l'épaisseur de l'affleurement de la couche de phosphate.

A l'issue des travaux de l'EREM, il a été établi que la géologie du gisement de Kef Essennoun est relativement simple, les couches de phosphates plongeant monoclinalement vers le Sud (*Figure 57, 58*), ils ont une puissance importante 30m et parfois plus, par contre la zone d'affleurement présente une structure géologique compliquée. Les réserves géologiques totales de Kef Essennoun ont été estimées à 317 millions tonnes de minerai à 26.53% P₂O₅ et 2.61% MgO ; dont 168 millions tonnes de réserves prouvées (Cielsky et Benchernine, 1987), 50 Mt de réserves probables (zone de rupture de pente, au Sud de la table) et 99 Mt possibles dans les parties les plus profondes du gisement.

1.3.2. Stratigraphie

Toute la succession lithologique de Djebel Onk est rencontrée à Kef Essennoun mais s'indifférencie, cependant, par une épaisseur verticale plus importante du faisceau phosphaté (jusqu'à 53 m dans le sondage 7). Le Thanétien qui est l'horizon porteur de la minéralisation est bien développée à Kef Essennoun, il est subdivisé en deux étages: le Thanétien inférieur et le Thanétien supérieur.

- Thanétien inférieur

Il est représenté par une série de schistes marneux de couleur grise foncée à intercalations irrégulières de calcaire. Un niveau conglomératique à Gastéropodes et de minces passées phosphatées sont rencontrés dans la partie inférieure. Dans la partie sommitale, les phosphates sont surmontés par des calcaires et des marnes à gros gastéropodes.

- Thanétien supérieur

Il est représenté par la couche productive.

1.3.3. Tectonique

Le gisement de Kef Essennoun est situé dans le prolongement de la retombée méridionale de la flexure anti-forme de Djebel Onk, dont la structuration majeure est due à la tectonique post-Miocène. Il est caractérisé par une structure simple, qui se présente sous forme d'une table monoclinale à pendage régulier, sous un angle de 5 à 10° vers le Sud (*Figure 57*). Au sud de la table, on aperçoit une zone de rupture de pente où le pendage des couches atteint 20°. Une série de trois failles majeures de direction NNO-SSE, traversent le gisement mais n'engendrent pas de déformations majeures sur la géométrie de la couche phosphatée. Par contre, dans la zone des dressants de Kef Essennoun, allongée N 75° E, la tectonique souple et cassante a entraîné un changement brusque du pendage de la couche phosphatée affleurante où l'angle de pendage est sub-vertical ou fortement incliné vers le sud-est ou le nord-ouest. Ces dressants, représentés par les formations du Paléocène (Danien-Montien et Thanétien) et de l'Eocène inférieur (Yprésien) correspondant à la zone de flexure faille du flanc inverse de l'anticlinal de Djebel Onk. Au Nord-Est des dressants la série est renversée et la couche de phosphate plonge suivant un angle de 30° à 60° vers le Nord-Ouest. Par contre dans la partie centrale des dressants, la couche de phosphate est en série normale et plonge vers le sud

1.3.4. Petro-minéralogies des phosphates de Kef Essennoun

Le faisceau phosphaté a été subdivisé par de nombreux auteurs en fonction de composition chimique, lithologique et des conditions d'exploitation en plusieurs couches. Les principales subdivisions sont :

1.3.4.1. Subdivision du (Prian et Cortiel, 1993)

Prian et Cortiel ont subdivisé le faisceau phosphaté en trois couches constituées, de haut en bas, par la dolomie phosphatée notée minerai IIT, la couche productive notée I et les alternances marnes-phosphates-dolomie du mur notée IIM.

➤ Dolomie phosphatée sommitale (minerai IIT)

Elle est présentée au-dessus de la couche principale, son épaisseur varie entre 0 et 11m, en moyenne elle est de 3m. La dolomie phosphatée est une roche très dure, bien cimentée de couleur grise-noire à granulométrie hétérogène, fine à grossière (moins de 1mm à plusieurs cm). Les faciès peuvent être assez riches en grains de phosphate ou au contraire très pauvres. Les éléments phosphatés comprennent des grains sub-sphériques, de gros débris osseux, des dents, ainsi que de gros coprolithes ; ces derniers sont parois silicifiés. La dolomie phosphatée est séparée de la couche principale par un niveau lumachellique phosphaté à huîtres de 50cm d'épaisseur et séparée des calcaires dolomitiques marneux à silex, du toit par un mince horizon (50cm) de marne verdâtre dolomitique, finement laminé constituant un repère lithologique. Chimiquement, l'assise de dolomie phosphatée se caractérise par des faibles teneurs en P_2O_5 et des fortes teneurs en MgO. Les teneurs en P_2O_5 varient entre 10 et 21%, pour une moyenne de 17.19%. Les teneurs en MgO varient entre 6 et 11%, pour une moyenne de 7.90%. Les teneurs en SiO_2 varient de 1 à 6%, pour une moyenne de 2.73 et qui sont dues à la présence de coprolithes entièrement silicifiés.

➤ Couche principale de phosphates (minerai I)

La couche de phospharénites productive est la principale couche qui constitue le faisceau phosphaté. Son épaisseur varie entre 22m dans la partie Nord-Est du gisement, et de 46m au Sud-Ouest du gisement. Lithologiquement cette assise est constituée par une couche unique de phosphate sombre gris-noire. La partie inférieure est généralement, plus fine que la partie supérieure et peut, en outre, renfermer des lamines bitumineuses. Vers le Nord-Est du

gisement apparaît une couche de phosphate clair, oxydé sus-jacente à la couche de phosphate noir. Les phosphates de la couche productive du gisement de Kef Essennoun titrent de 24 à 27% en P_2O_5 et de 2 à 3% en MgO.

➤ Mur de gisement (minerai IIM)

Cette couche est localisée au mur de la couche productive I, son épaisseur varie de 0 à 4.3m pour une moyenne générale de 1.25m. Elle est constituée par les marnes feuilletées, sombres, du Thanétien. Deux minces niveaux de phosphates d'épaisseur infra métrique qui s'intercale dans la partie supérieure des marnes. Le passage à la couche productive sous-jacente peut être marqué par un banc de dolomie grise (40cm). Chimiquement cette couche présente des faibles teneurs en P_2O_5 (13 à 15%) et de fortes teneurs en MgO (8 à 10%).

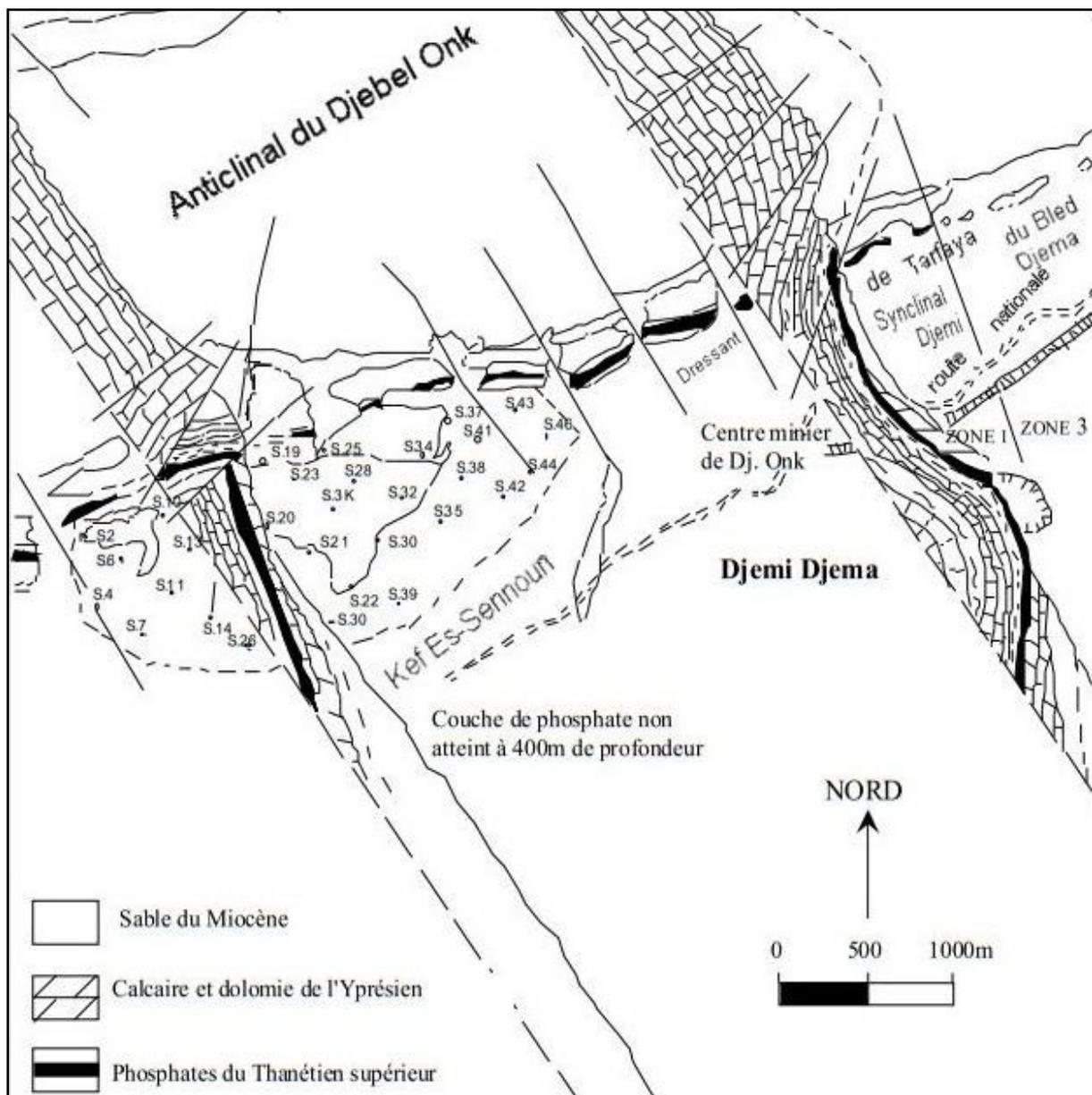


Figure 9.II: Structure de la couche de phosphate dans la zone de Kef Essennoun et localisation des sondages carottés (Prian et Cortiel, 1993)

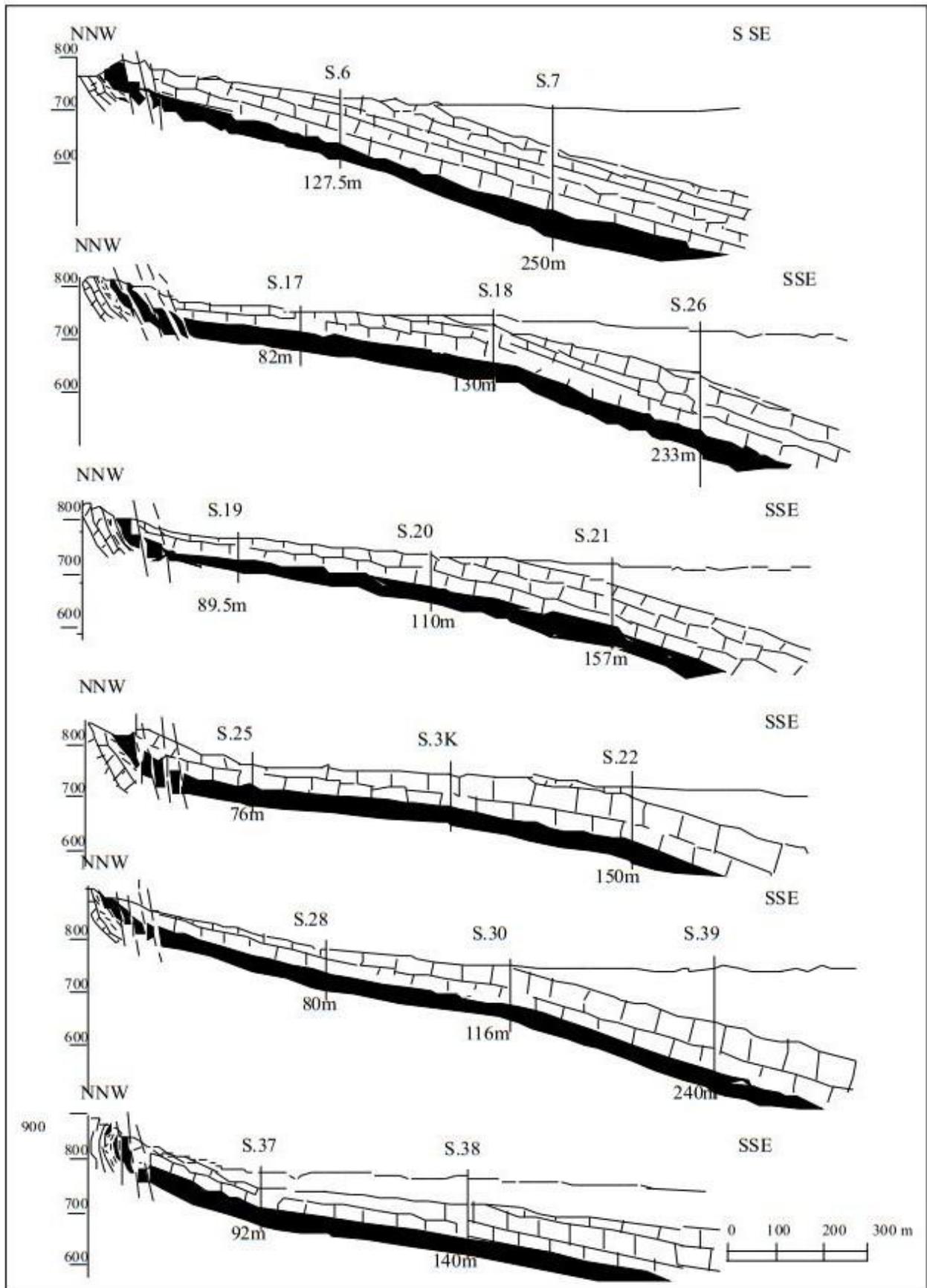


Figure 10.II: Coupe géologique du gisement de Kef Essennoun (Prian et Cortiel, 1993)

1.3.4.2. Subdivision MEZGHACHE (1991) [5]

En plus de ces trois couches, MEZGHACHE s'est basé sur le traitement statistique multi variable des données de carottes des 32 sondages réalisés par l'EREM (1987) et a détaillé d'avantage 5 sous couches noté C13, C14, C15, C16, C18, présentant chacune des propriétés physiques et chimiques différente (Figure 11.II).

➤ Minerai C13 et C14

Ces minerais correspondent à des minerais pauvre en P_2O_5 (17.34 et 19.22%) et très dolomitiques, ils caractérisent les minerais de la dolomie phosphatée sommitale (IIT) et des alternances basales (IIM).

➤ Minerai C15

Ce minerai correspond à un minerai à plus forte teneur en P_2O_5 (27.81%) et plus faible teneur en MgO (1.88%). C'est un minerai noir, coprolithique, à gangue essentiellement argileuse, siliceuse, et riche en matière organique.

➤ Minerai C16

Ce minerai correspond à un minerai toujours à haute en P_2O_5 (26.84%) et plus forte teneur en MgO (2.30%). C'est un minerai pseudolithique noir à marron, à ciment mixte, dolomitique et argileux renfermant es grains de glauconie.

➤ Minerai C18

Ce minerai correspond à un minerai toujours à bonne teneur en P_2O_5 (24.24%), mais plus dolomitique (4.04% MgO). C'est un minerai coprolithique et pseudolithique, de couleur marron et noir, à ciment dolomitique. Ces trois types de minerais (C15, C16, C18) forment la couche principale de phospharénite.

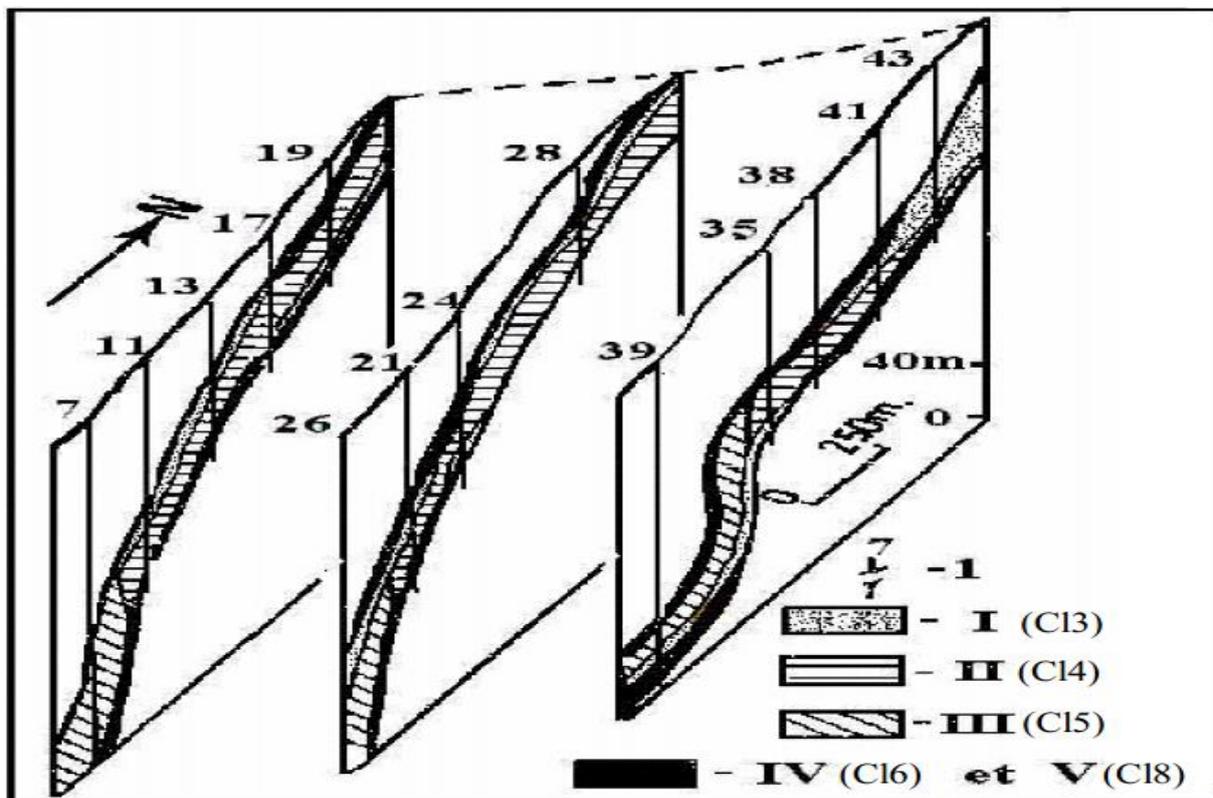


Figure 11.II: Bloc diagramme des types de minerai de phosphate (Mezghache et al, 2002)

Chapitre III : Les Caractéristiques du Glissement du Bord N-E De 2007

1. Introduction

Lors de toute étude d'évaluation du risque de l'instabilité du talus, la réalisation d'une étude rétrospective d'anciens glissements de même type est une phase très importante pour mieux comprendre les vraies causes ou facteurs déclenchant ou influençant la stabilité globale du versant en question.

Dans ce chapitre, nous présentons une étude analytique de l'éboulement de bord N-E de 2007 de la carrière pour laquelle on tire les caractéristiques morphologiques, géologiques, géotechniques et les principaux facteurs susceptibles d'être le moteur de ce glissement, cela nous permettra d'avoir une idée sur le cas étudié, afin de proposer des solutions adéquates et efficaces pour d'une part, reprendre les travaux miniers dans cette zone et de l'autre part, récupérer le maximum des réserves abandonnées suite à cette catastrophe.

2. Historique (description) du glissement

Le 08 septembre 2007, quelques minutes avant le levé de soleil, un évènement spectaculaire s'est produit dans la mine à ciel ouvert de phosphate de KEF ESSNOUN (Djebel Onk). Il s'agit d'un glissement de terrain de très grande ampleur par son volume 7 Mm³ observable à distance. Ce glissement brusque et inattendu a comblé entièrement la fosse en exploitation au niveau de la carrière et entraîné l'arrêt temporaire des travaux d'extraction sur une période prolongée (*Figure 1.III*).



Figure 1.III: Photo montrant le glissement de 2007 dans la carrière de phosphate de KEF ESSNOUN

Avant que le glissement n'ait eu lieu, l'exploitation au niveau de la carrière avait été orientée du Sud vers le Nord avec deux gradins de stériles, dont le premier s'étale sur une longueur de 1778 m avec une hauteur de 14 à 26 m, le deuxième a une hauteur de 30 m pour une longueur de 2130 m, pour la couche productrice de phosphate l'hauteur du gradin a été de 30 m avec une longueur de 1536 m. L'angle d'inclinaison de tous les gradins avait été basculé jusqu'à 85 – 90°. (*Figure 2,3.III*).



Figure 2.III: Photo montant la fosse de la carrière de KEF ESSNOUN avant le glissement de 2007

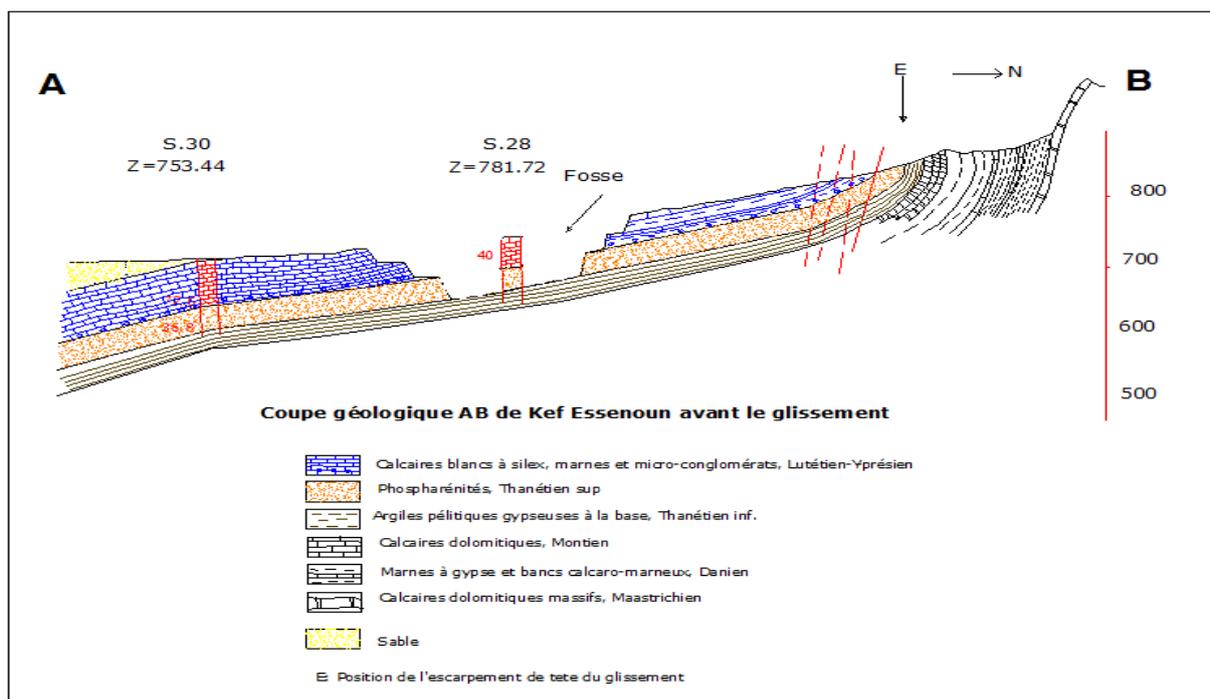


Figure 3.III: Coupe géologique de la carrière de KEF ESSENOUN avant le glissement de 2007

3. Cartographie de la zone glissée

Le gisement de phosphate de KEF ESSNOUN fait partie de l'ensemble de gisement du champ minier de Djebel Onk exploité par SOMIPHOS à l'Est de l'Algérie à la frontière Algéro-Tunisienne. On prend comme référence la carte topographique de l'état major (**DJEBEL ONNG, NI-32-XIV-EST, 1/50 000**) et le plan topographique 1/1000^{ème} de l'avancement du chantier de KEF ESSNOUN mis à jour de Septembre 2007, nous pouvons cartographier la zone glissée. (Figure 4,5.III).

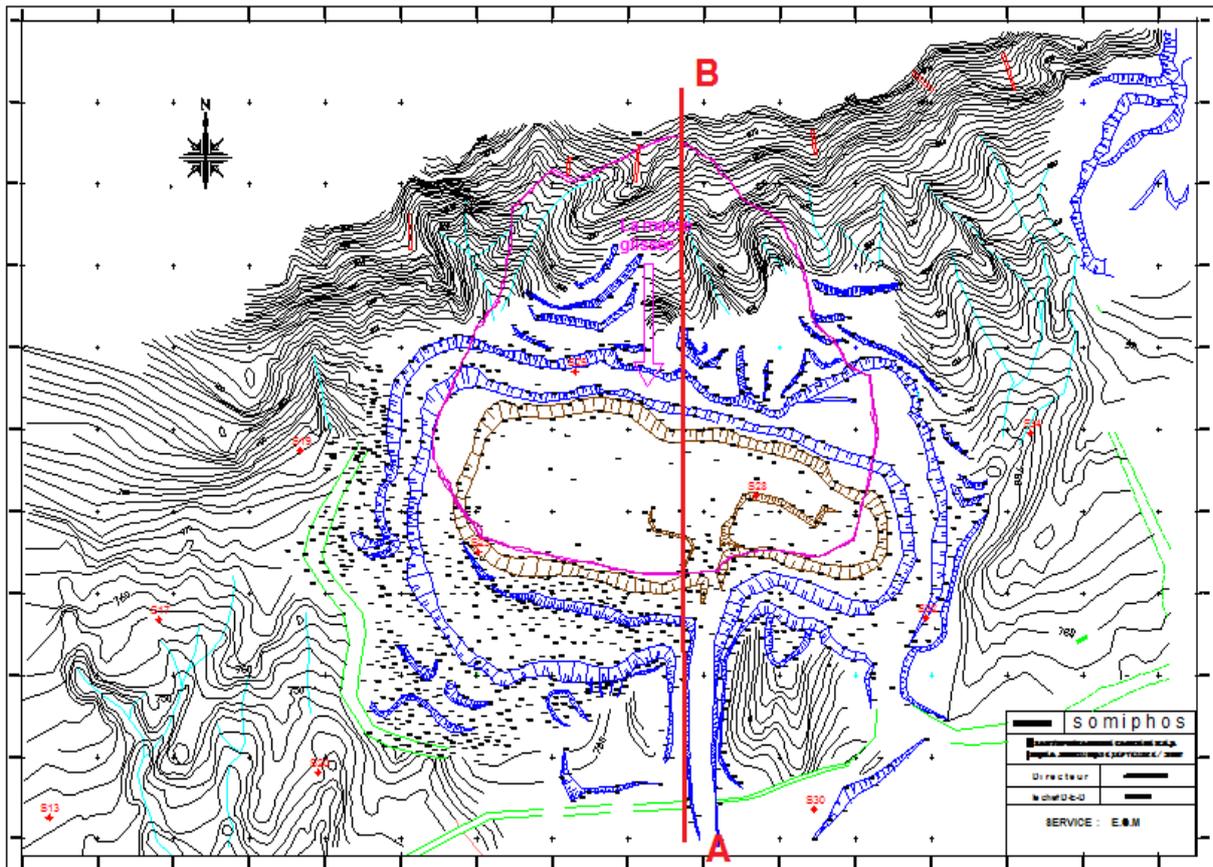


Figure 22 4-III: Plan Topo de la carrière de Kef Essennoun (mise à jour Septembre 2007) 1/1000

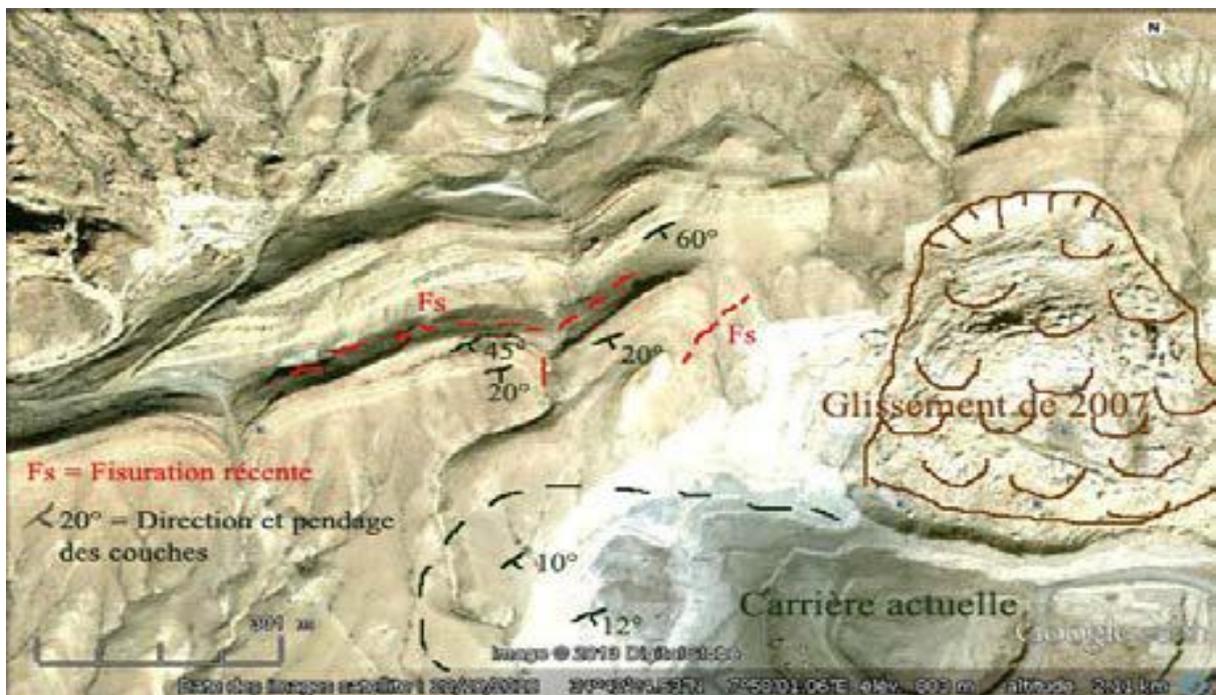


Figure 5.III: Photo Google de la carrière de KEF ESSENOUN après l'éboulement de 2007

4. Caractéristique du glissement

La zone de glissement est caractérisée par un sens inverse à celle de l'exploitation (Nord vers le Sud) avec un escarpement de tête de rupture de 40 à 50 m de dénivelée. La masse glissée couvre une surface de 11 hec avec une épaisseur moyenne d'environ 70m (30m de phosphates et 40 m de terrains sus-jacents) donc, nous pouvons estimer le volume de la masse glissée à 7,7 millions de m³ venant combler presque toute la fosse d'exploitation. (Figure 6,7.III).

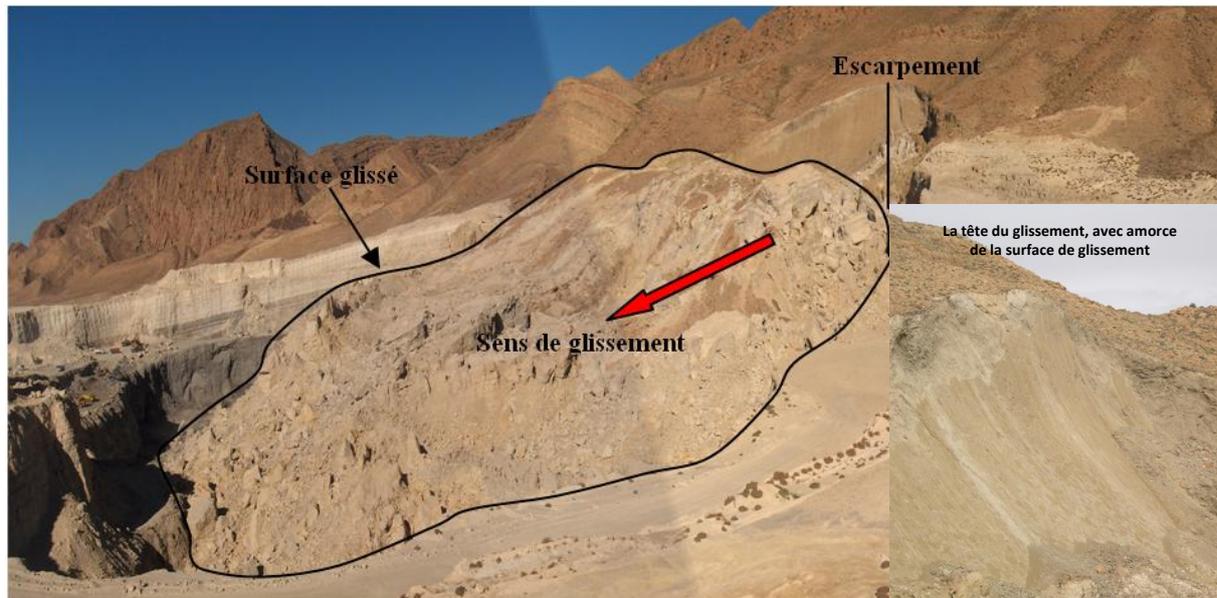


Figure 6.III: photo représente les caractéristiques du glissement de Kef Essennoun

5. Identification du terrain glissé

La coupe géologique montre que les terrains déstabilisés sont constituées de la couche de phosphate surmontée des terrains de recouvrement, composés de marno-calcaires, calcaires à dolomies et bancs de silex de l'Yprésien et du Lutétien peuvent atteindre une épaisseur de 70 à 80m (phosphate 30m et le recouvrement 40 m, (Figure 7,8.III) dans la zone centrale du glissement. Tout autour de ce dernier, une série de fissures concentriques se développe au-delà de l'escarpement principal sur la base des réseaux de fractures préexistant dans la roche.

6. Emplacement de la surface de glissement

La détermination de la forme et l'emplacement de la surface de rupture représente une étape primordiale et indispensable pour caractériser un glissement de terrain naturel ou artificiel (provoqué). Dans le glissement déjà déclenché où il y a eu lieu, la détermination de cette surface est plus aisée que celle supposé en risque de déstabilisation.

La mise en évidence des caractéristiques de la surface de glissement dans le cas de l'éboulement du bord N-E de Kef Essennoun, en se basant sur la coupe géologique NE-SO de la zone glissée (Figure 7.III), les documentations communiquées et les observations directe au terrain, nous pouvons dire que :

- Les terrains concernés par le mouvement sont constituées principalement par la couche de phosphate exploité surmonté par des recouvrements de calcaire marneux;
- L'observation de la forme de terrain glissé montre que la couche de couverture notamment de calcaire a plus au moins conservé sa structure initiale ce qui implique que la surface de glissement est bien plus profond sous cette formation ;
- L'existence à la base de la couche de phosphate la formation Pélimitique et Argileux du Thanicien inférieur qui représente sur le plan géotechnique une résistance faible par rapport à la couche de phosphate ;
- L'escarpement principal du glissement correspond à la base du niveau phosphaté exploité et cette base coïnciderait avec la cote topographique de la fosse au pied du gradin du niveau exploité.

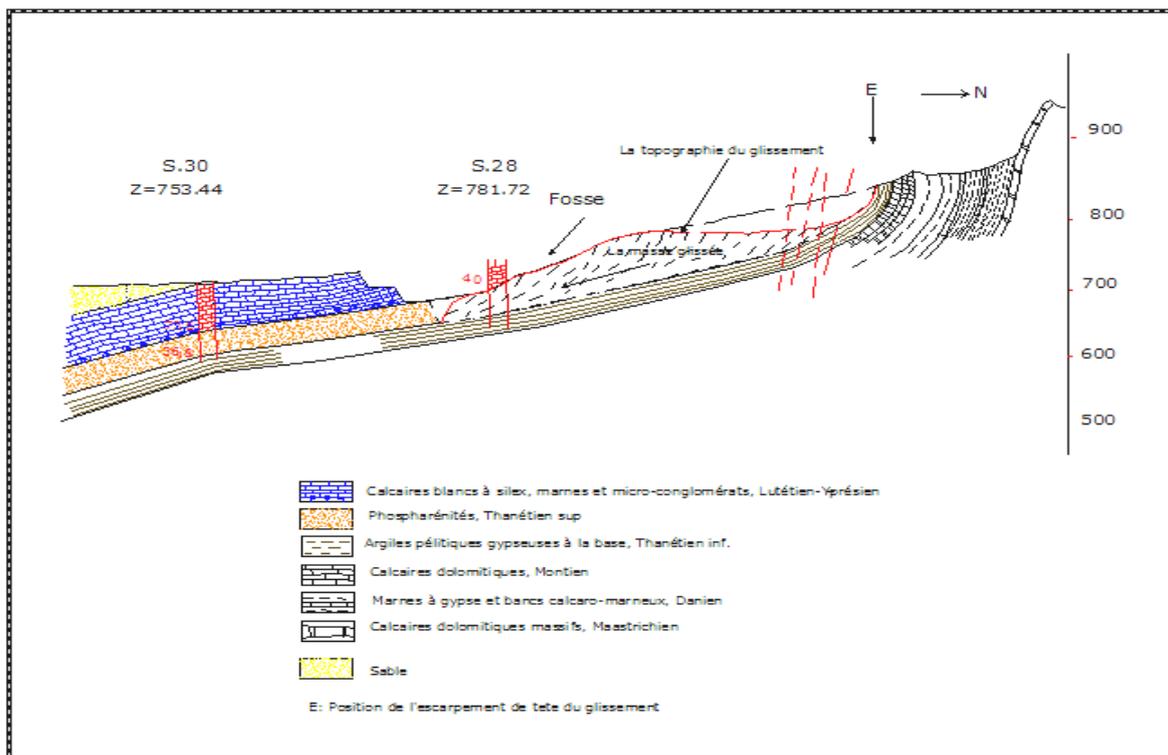


Figure 7.III: Coupe N-S du glissement de KEF ESSENOUN

D'après ce qui précède, il résulte que la surface de glissement correspond à l'interface phosphate/marne et que sa forme suit la topographie de celle-ci, il s'agirait d'un glissement guidé par un plan prolongé vers le Sud avec un angle α/δ de l'ordre de 14 degrés.



Figure 8.III: Couverture lutétienne calcaire glissée, conservant sa structure tectonique

7. Principaux facteurs déclenchant le mouvement

La détermination des facteurs dits moteurs est l'un des objectifs majeurs d'une étude globale d'un glissement de terrain. Ces informations servent à réaliser des études rétrospectives de ce type de phénomènes dans d'autres cas où nous avons les mêmes caractéristiques morphologiques, géologiques et géotechniques.

Pour la catastrophe de Djebel Onk, les principales causes du déclenchement du glissement sont multiples et divers. Ils peuvent être repartis en deux groupes techniques et naturels.

7.1. Facteurs géologiques

- La présence d'une interface phosphates/marnes plastiques à faible frottement à la base de la couche phosphatée. La plasticité et le faible coefficient de frottement de cette formation ait contribué à l'instabilité du bord. (Lorsque l'angle α/δ du plan de glissement atteint la valeur de l'angle de frottement Φ , le glissement devient possible).
- La présence d'un redressement quasi-vertical de la couche, permettant de « découpler » la masse rocheuse du socle constitutif de la montagne. Ce redressement a permis à la masse de se détacher et d'amorcer son glissement sur un véritable « plan incliné ».
- Enfin le caractère fortement tectonisé (plissé et faillé) du massif, à l'origine d'une intense fracturation (fractures nord/sud, fractures nord-ouest/sud-est, parfaitement visibles sur le site). Cette fracturation confère à la masse rocheuse des propriétés mécaniques médiocres, et a permis à celle-ci de « se détacher » du reste du massif, sur ses bordures Est et Ouest.

7.2. Facteurs techniques

- L'endroit de l'ouverture a été mal choisi (au niveau de sondage S.28) c.à.d. au pied du redressement quasi-vertical sans prendre en compte l'avancement des travaux vers le Nord (vers la verticalité des couches). En revanche, selon l'art et les normes de l'exploitation minière à ciel ouvert des gisements en flanc de coteaux, l'exploitation doit commencer d'haut en bas et ne pas l'inverse.
- La constitution d'un talus très redressé (quasi vertical) sur une hauteur d'environ 70 m, 40m pour le recouvrement de calcaire et 30m du phosphate.
- La réduction de la berme de sécurité et de transport à une valeur de l'ordre de quelques mètres seulement pour gagner le minerai (jumelage des gradins).
- Les tirs réalisés à l'aide de l'explosif brisant à la base du front phosphaté, contribuant à l'affaiblissement de la résistance de la roche au pied du gradin. L'effet dynamique lié aux vibrations de tir peut également avoir une incidence sur une masse en équilibre instable.

8. Solutions proposées et reprise des travaux

Suite à ce terrible désastre qui avait imposé l'arrêt des travaux d'exploitation au niveau de la mine, les agents de l'Agence Nationale de Contrôle Géologique et Minier (ANGCM) et après une visite au terrain ont exigé la fermeture définitive de la fosse.

La nécessité de satisfaire et respecter les contrats pré signé avec les clients, l'entreprise a été dans l'obligation de trouver une solution rapide pour la reprise des travaux d'extraction, à cet effet, SOMIPHOS a chargé deux spécialistes (*Ph. WEBER et R. BOUGDAL*) pour réaliser une expertise sur le glissement afin de proposer des solutions et des recommandations concernant la réouverture de la carrière vers les Sud, l'Ouest et le Sud - Ouest.

8.1. Expertise I (Pr. R. BOUGDAL)

8.1.1. Analyse de phénomène

Un glissement de terrain exprime, d'une façon générale, une acquisition d'un nouvel équilibre de versant, qui peut cependant, être précaire. Dans le cas de Kef Essennoun, il était un glissement de piéd de talus dans le quel une grande partie de la masse détachée est venue occuper la fosse d'exploitation. Cette masse jouera un rôle de butée dans la recherche de l'équilibre des terrains glissés situés plus en amont. Compte tenu du foisonnement des terrains déstabilisés, les écroulements susceptibles de se produire en amont de l'escarpement principal (zone fissurée) auront peu d'effet sur la réactivation des masses déjà déstabilisées.

8.1.2. Recommandation

La reprise de travaux d'exploitation au niveau de cette carrière est possible vers la partie Sud, en conservant une bande de sécurité de largeur à bien définir (*STOT*) constitué par la roche phosphaté entre l'ancien front de taille Sud et la nouvelle ouverture, cette bande servira comme une butée pour le volume instable formant la langue de glissement (*Figure 9,10.III*).

La largeur du stot de protection proposé est de 20m mais il reste à préciser car, il doit tenir compte plusieurs facteurs :

- L'effet de poussé hydrostatique et celle de s terres ;
- L'eau météorique qui pourra remplir le vide restait entre la masse glissé et le stot pendant le période de forte précipitation ;
- L'effet de minage qui sera réalisé dans la nouvelle ouverture.

Dans ce sens, nous recommandons de combler le vide restant dans l'ancien fosse pour éviter les chute accidentelle et les accumulations des eaux et aussi dans le bute de renforcer la prochaine stot de protection.

Il est par ailleurs nécessaire de mettre en place une clôture de protection (en grillage ou fil barbelé) de l'ensemble de la zone fissurée qui reste propice aux écroulements.

Il serait enfin judicieux d'examiner la stabilité d'ensemble du versant sud de Kef Essennoun et de ses prolongements oriental et occidental, afin de dégager, une méthodologie d'exploitation optimale du gisement.

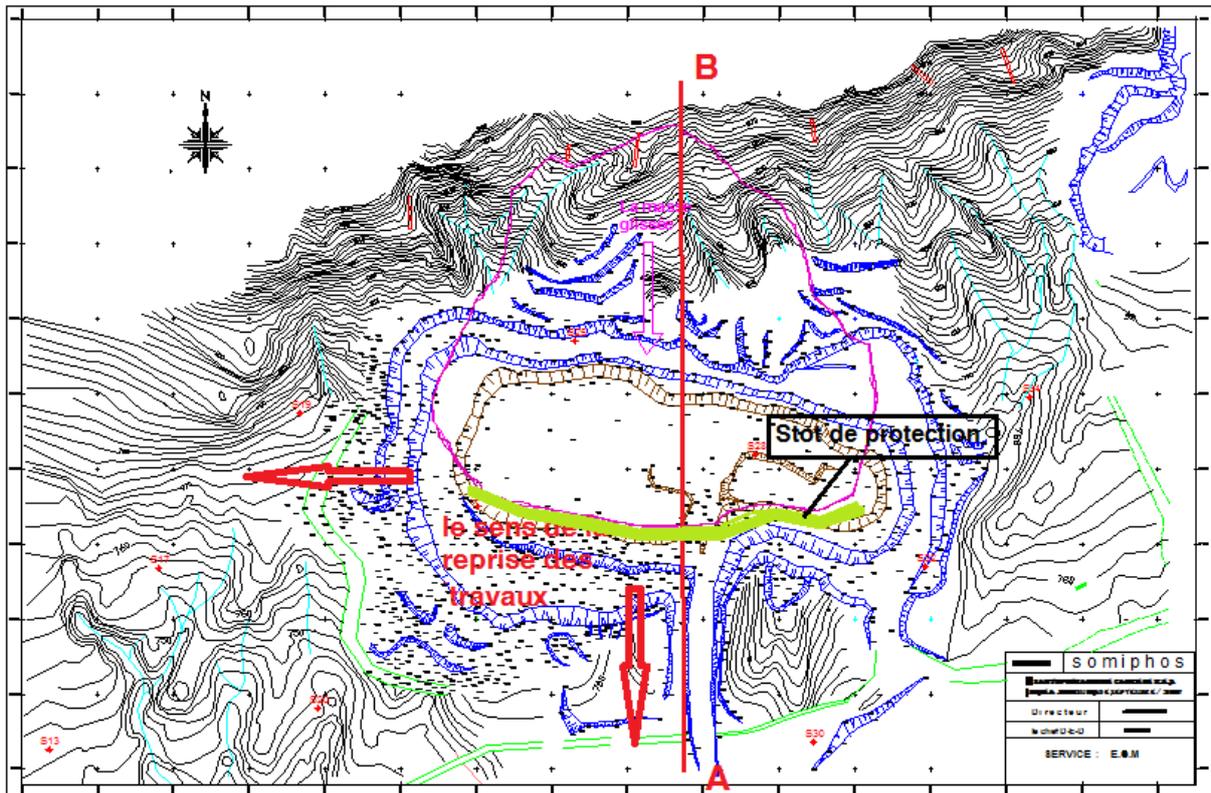


Figure 9.III: Plan topographique montrant les sens de reprise de travaux

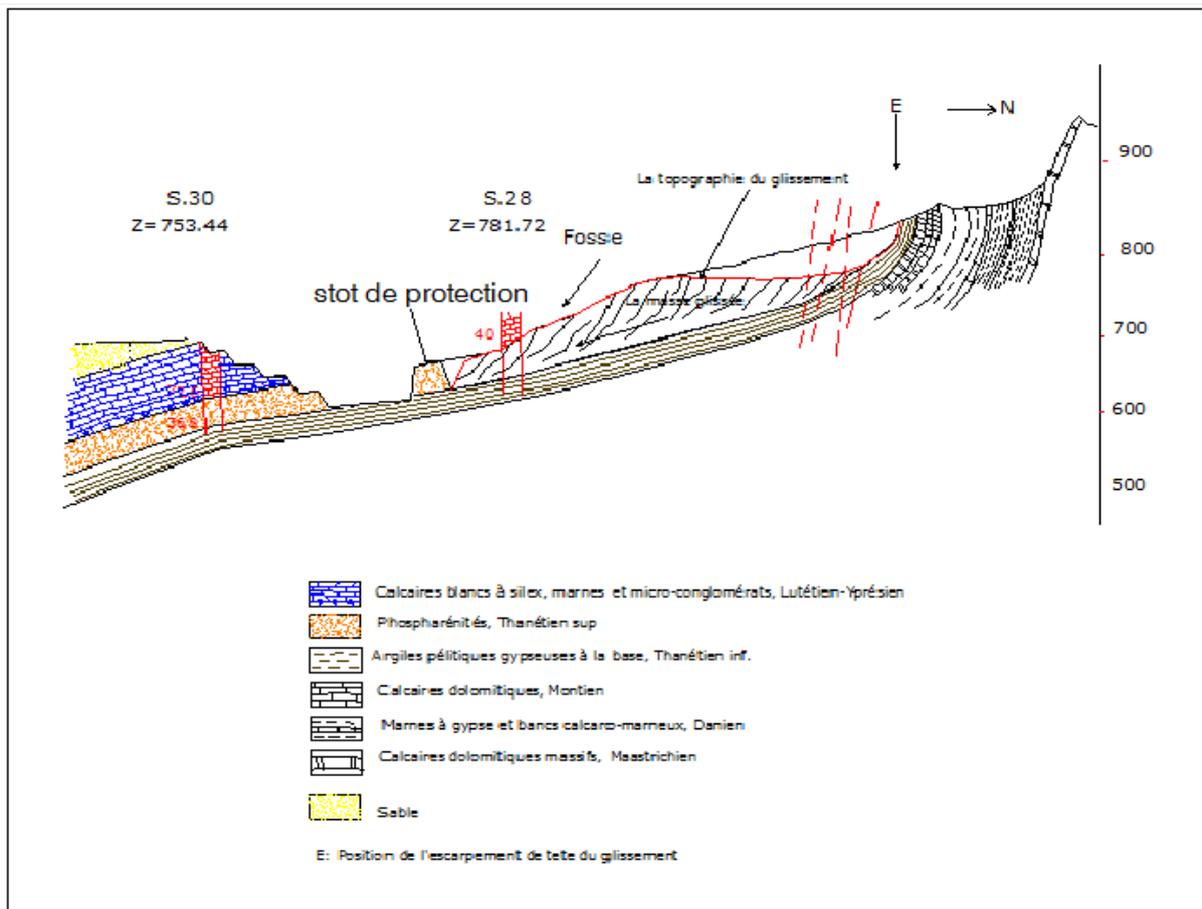


Figure 10.III: Coupe Nord-Sud indiquant la bande de sécurité (stot)

8.2. Expertise II (Pr. Ph. WEBER)

PH. Weber a été sollicité aussi pour faire des concernant les extensions Sud, Ouest, Est, et extrême Est de la carrière, ces recommandation doit retenir les analyses effectuer fondées sur le postulat qui il ne faut, en aucune manière, se mettre dans une situation analogue à celle qui a prévalu au moment de l'accident.

8.2.1. Analyse de phénomène

Théoriquement, si nous voulons reproduire le scénario de rupture qui nous apparaitre le plus plausible, on peut dire que la géologie et la géotechnique du site conduisent à isoler une masse rocheuse, créant une situation d'instabilité potentielle. La masse rocheuse est temporairement retenue par le front de taille, qui joue, en quelque sorte, le rôle d'un « verrou » ce dernier a été éliminer graduellement au fur et à mesure de l'avancement des travaux d'exploitation, entraînant le glissement.

Il est crédible que des signes prémonitoires ont apparu sur le front de taille (*gonflement, apparition de fissure, ...*) juste avant l'éboulement. Mais comme celui-ci a eu lieu dans le jour de week-end (Samedi), les personnel susceptible de faire ces constatations n'étaient pas présents, Aucun signe d'avertissement n'a donc pu être détecté.

8.2.2. Recommandation

- Extension Sud

L'extension vers le sud de la carrière peut être envisagée sans restriction en regard de l'accident, en effet, la masse éboulée s'est d'elle-même stabilisée et ne risque en aucune manière de se remettre en mouvement ni d'influencer les terrains situé à son aval. Les terrains de l'extension sud ne présentent pas de risque d'instabilité puisque la couche phosphatée n'y présente pas de redressement susceptible de provoquer un détachement de masse rocheuse ; elle est régulièrement inclinée en plongeant vers le sud qui représente le même sens de l'exploitation. (*Figure 7.III*)

Il importe, évidemment, de séparer par un stot de protection, l'emprise actuelle de la carrière de son extension envisagée vers le sud, mais la largeur de ce stot sera définie en fonction des seules nécessités de circulation et de manœuvre des engins. En effet, aucune répercussion mécanique du glissement n'est plus à craindre à son aval.

- Extension Ouest

L'exploitant a prévu de laisser un stot de protection dont la largeur reste à préciser. Les travaux d'exploitation du flanc nord de la carrière (exploitation vers la montagne) devront respecter certaines conditions tel que : l'hauteur et l'inclinaison des gradins, la largeur des plateformes et l'opération de tir de minage.

De plus, il est préconisé de laisser en place, en partie basse de la couche phosphatée, une sole de protection d'une épaisseur minimum de 2 à 3 mètres, afin de « bloquer » les *marnes* et de les empêcher de déstabiliser la base du gradin de *phosphate* (*Figure 11.III*).

Nous recommandons par ailleurs de porter une attention particulière au comportement mécanique de cette interface entre phosphate et marnes sous-jacentes : il nous apparait en effet que cette interface joue un rôle important dans le comportement mécanique de l'ensemble.

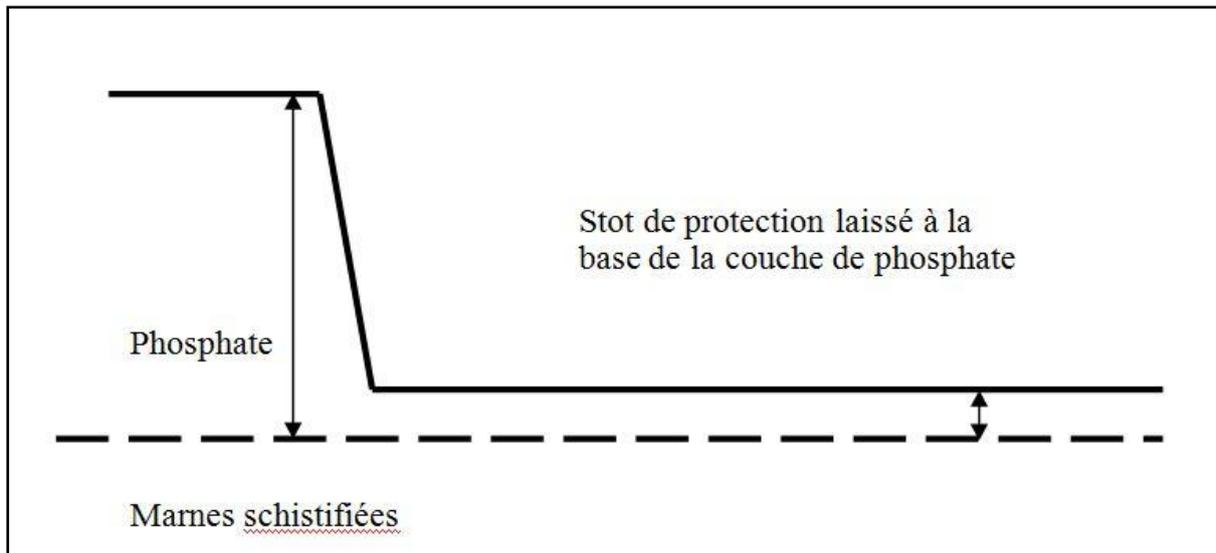


Figure 11.III: Schéma d'exploitation avec stot laissé à la base de la couche phosphatée

- Extension Est

Les travaux d'extension pourront être conduits de manière analogue à ceux de l'extension Ouest. Toutefois, la topographie locale, ainsi que la présence de la « niche », rendent plus malaisé le démarrage des travaux.

La présence de fissures d'orientation Nord-Ouest/Sud-Est, conjuguées avec des fissures Nord-Sud, bien visibles sur le flanc de la montagne au-dessus de la « niche », montrent que les terrains demeurés en place sont influencés par la décompression induite par le glissement (*Figure 12.III*). Cette partie des terrains, fortement tectonisés et décomprimés à la suite du glissement, possède des qualités mécaniques médiocres. Il convient donc de se prémunir de tout risque de mise en mouvement des terrains en laissant en place un stot de protection, dont le dimensionnement doit faire l'objet d'une attention particulière.

De même que pour l'extension Ouest, nous préconisons de laisser en place une « planche au mur » de la couche phosphatée, afin de confiner les marnes et de stabiliser le pied de gradin à la base de la couche.



Figure 12.III: Détail de la fracturation induite par le glissement

- **Extension « extrême Est », à proximité de la station de concassage**

Cette partie de la carrière a déjà donné lieu à des travaux préalables, arrêtés par suite de la présence de la couche de sables miocènes et quaternaires, qui recouvre les terrains calcaires et phosphatés dans cette partie du gisement. L'épaisseur de ce recouvrement de sables est très variable, atteignant par endroit plus d'une centaine de mètres. La présence de ces sables, de très faibles qualités mécaniques, ne permet pas d'envisager une méthode d'exploitation analogue à celle des autres parties de la carrière.

Une méthode de scalpage préalable des sables pourrait être envisagée dans les parties du gisement où la couche de sables n'excède pas quelques dizaine de mètres.

Enfin, il est très impératif de suivre les exigences suivantes lors de l'extension des travaux :

- ✓ Les angles de talus (phosphate et stérile) seront limité à 70° ;
- ✓ Les hauteurs de gradins devront être limitées à 15 m ;
- ✓ Les bermes de sécurité ne seront pas inférieures à 15m ;
- ✓ L'opération de minage doit être bien étudiée dans le but de minimiser les vibrations.

9. Conclusion

Le glissement de Kef Essennoun dans la mine de Djebel Onk représente un vrai catastrophe pour SOMOPHOS quoique, aucun dégât ni humaine, ni matériel n'a été inscrit, la seule annotation est le volume important des réserves abandonnées dans la fosse.

L'absence d'une étude préalable détaillée et bien fondée pour toutes les conditions de déroulement de travaux d'exploitation que ce soit géologique, morphologique, géotechnique est même technique reste le facteur principal de ce glissement.

Les observations de ce chapitre pourront être utilisées pour l'évaluation de la stabilité du bord N-O de la carrière qui sera traitée par la suite.

Chapitre IV : Étude De La Stabilité Du Bord N-O De La Carrière De Kef-Essennoun

1. Introduction

La solution adoptée par SOMIPHOS pour la reprise des travaux d'exploitation a consisté en la réouverture de la carrière dans l'extension Sud, Ouest, et Est avec toutes les précautions nécessaire recommandées par les deux experts (PH. Weber et R. Bougdal) et les cadres de l'entreprise. Cette solution avait donné l'impression qu'elle resterait fiable dans les quelques années qui ont suivi le glissement, cependant, au fur et au mesure de l'avancement des travaux et l'agrandissement de la fosse, des nouvelles fissures ont été apparues en 2012 dans la partie amant du bord N-O (HADJEB LAKHAL) de la carrière. Cette zone a été déclarée par l'ANGCM comme dangereuse et interdite des travaux toutes autour.

Dans ce chapitre, nous allons réaliser une étude analytique de déférentes conditions géologiques, morphologiques, hydrogéologiques, structurales et géotechniques de cette zone dans le but d'évaluer par la suite sa stabilité vis-à-vis l'avancement d'exploitation.

2. Cadre géographique de la zone instable

La délimitation de la masse rocheuse instable représente la phase clé pour évaluer sa stabilité. Cette délimitation reste dans la plupart des cas relative. La zone, objet dans notre étude, est le bord Nord-Ouest de la carrière de phosphate de Kef Essennoun. En prenant comme référence le plan topographique 1/1000 actualisé au Septembre 2014 et la carte topo Djebel Onk, NI-32-XIV-EST, 1/50000, de la carrière, la zone en question se situe au pied de Djebel Onk dans le coté Ouest à une distance de 500 m de l'ancien glissement et elle se caractérise par une longueur de 550m sur une largeur de 440m ce qui fait une surface de l'ordre de 24 hectares.

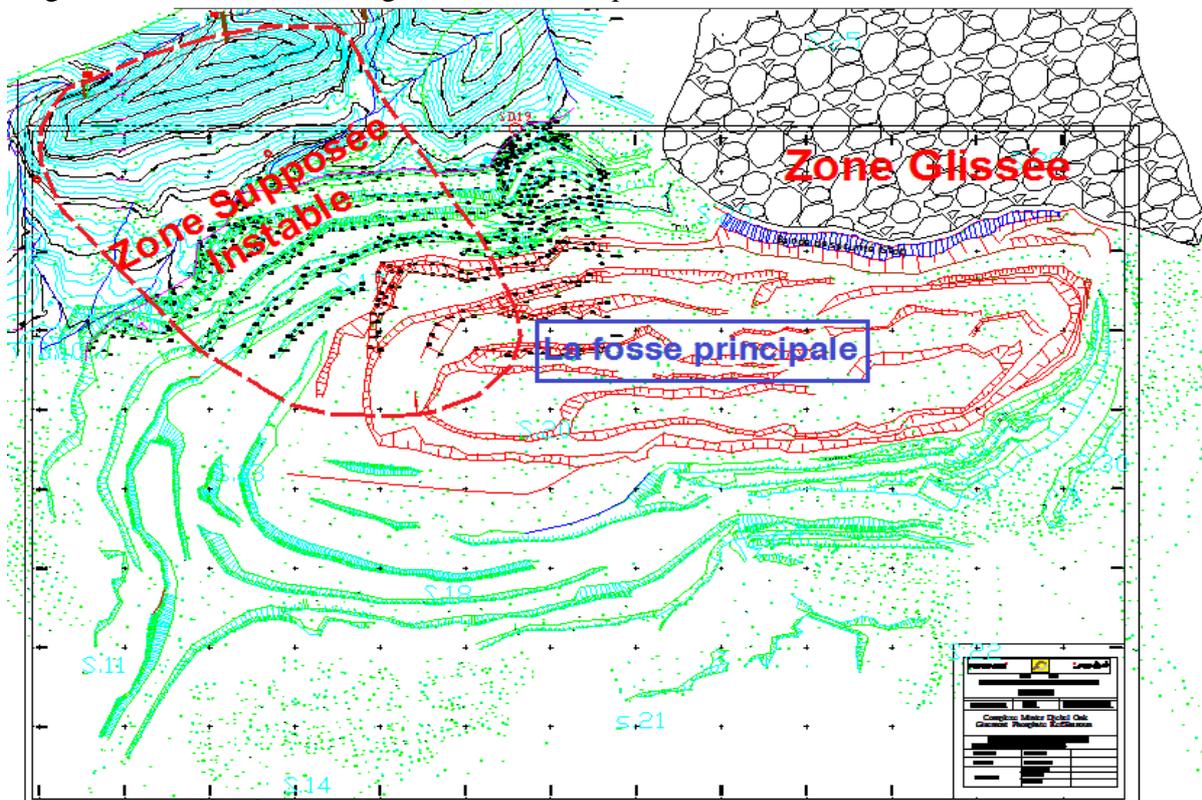


Figure 1.IV: Plan topographique de la carrière de KEF ESSNOUN 1/1000 (Septembre 2014)

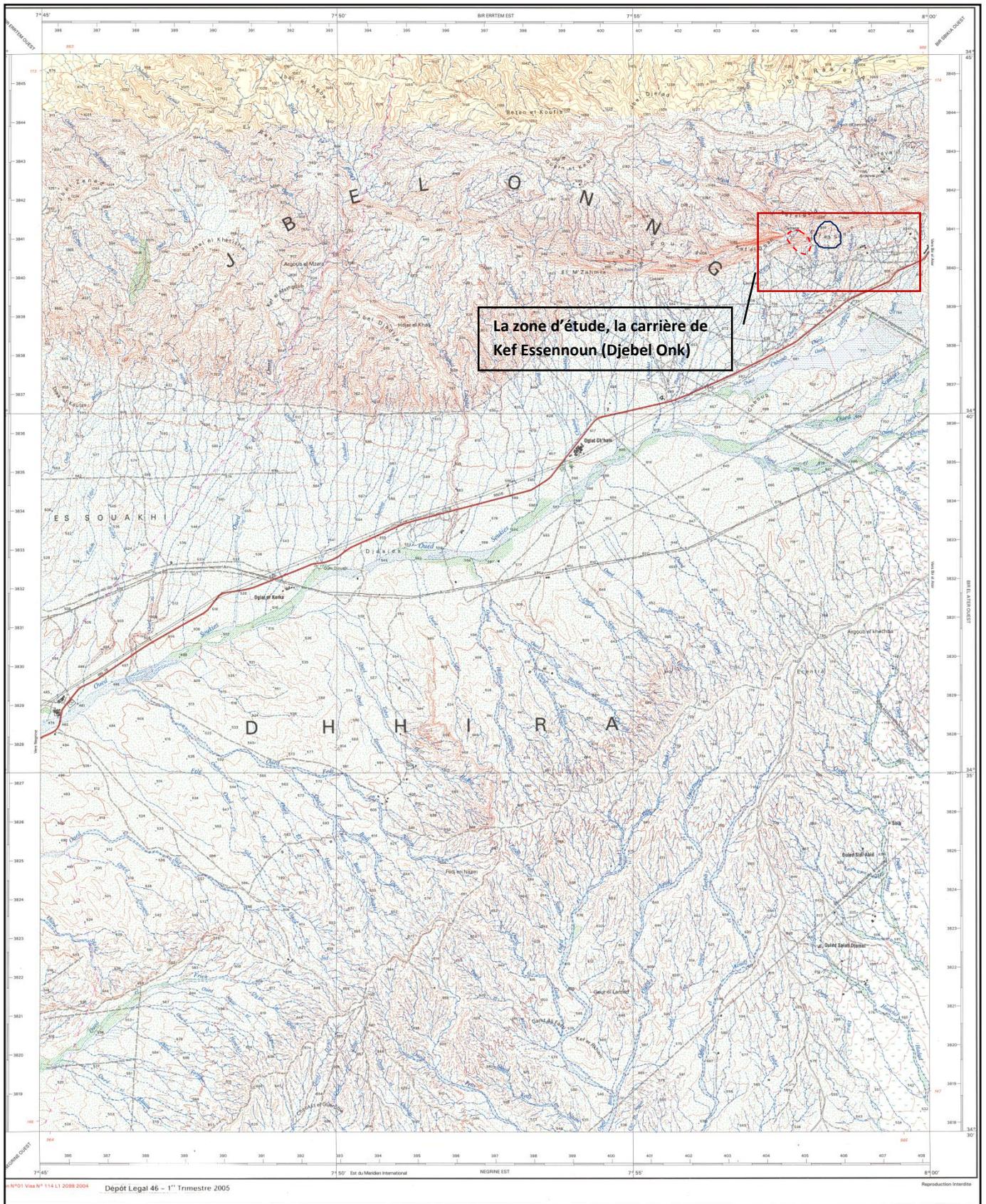


Figure 2.IV: Carte topographique, DJEBEL ONNG, NI-32-XIV-EST, 1/50 00

3. Reconnaissance du site

La reconnaissance a pour but de représenter l'environnement actuel de la zone qui risque de glisser et de fournir les résultats des observations sur les principaux facteurs, susceptibles de contribuer au déclenchement du mouvement.

Primo, il est nécessaire d'établir une carte topographique du site et une carte géologique aussi précise que possible et particulièrement orientée vers l'observation de tous les signes de mouvements antérieurs. La reconnaissance hydrologique est évidemment aussi importante.

Secundo étape, une campagne de reconnaissance par sondages doit être menée sur la base de l'étude précédente et qui doit viser la réalisation des coupes en travers du terrain, la précision de l'hydrogéologie en disposant éventuellement des piézomètres dans les trous de sondages, et en fin le prélèvement d'échantillons intacts pour les essais géotechniques.

En fin, et s'il est jugé nécessaire, on cherchera à parfaire la connaissance géologique et hydrogéologique à l'aide d'essais in-situ. La reconnaissance est alors achevée par des essais au laboratoire sur les prélèvements de sols et des roches effectués (essais d'identification et essais géo-mécaniques).

3.1. Géologique

L'approche géologique est primordiale, qu'il s'agisse du sol ou du massif rocheux dans lequel doivent être excavés des talus. Le géologue identifie la nature pétrographique des matériaux concernés (sols ou roches) ainsi que leur état d'altération et de fracturation. Ces données sont essentielles pour la caractérisation des matériaux sur le plan mécanique. Il apprécie aussi la variabilité dans l'espace de ces matériaux à l'échelle du massif. Le géologue identifie également les structures géologiques présentes dans le gisement, d'où résultent des relations précises entre les différentes unités constituant le gisement et des processus ou mécanismes potentiels de déformation et de rupture prédéterminées. Cette approche géologique, préliminaire, permet d'orienter et d'optimiser les campagnes de reconnaissances géologiques et géotechniques par sondages mécaniques ou méthodes géophysiques.

La figure suivante (*figure 3.IV*), représente la carte géologique de la région de BIR EL-ATER dans laquelle appartient notre zone d'étude (Kef Essennoun) à l'échelle 1/50 000. Cette carte a été publiée en 2000 par l'*Office Nationale de la Recherche Géologique et Minière* (ORGM), division du service géologique de l'Algérie.

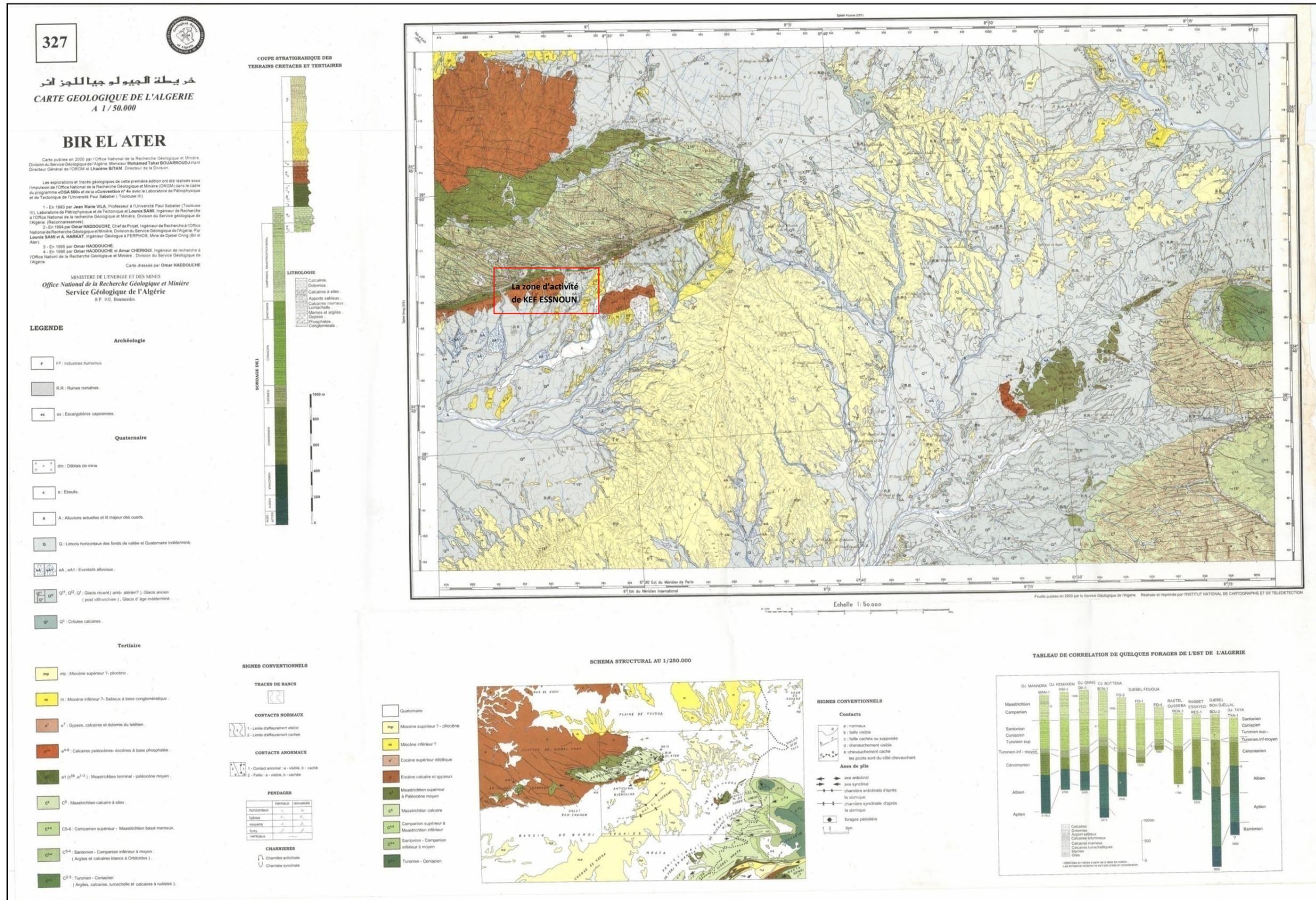


Figure 3.IV: Carte géologique, BIR EL-ATER, 1/50 000

Dans le cas du gisement de phosphate de Kef Essennoun, la structure lithologique est constituée par une stratification des couches qui sont de bas en haut comme suit :

- La formation du Thanétien inférieur : (mur du faisceau phosphaté) elle est représentée par des marnes grises foncés à noire schisteuse et feuilleté.
- La formation Thanétien supérieur : c'est la couche exploitable du phosphate dans le gisement de KEF ESSNOUN, cette couche peut attient plus de 30 m d'épaisseur.
- Yprésien : (Toit du faisceau phosphaté) il repose sur les dépôts du Thanétien sur une puissance de presque 32m, elle est constitué essentiellement par une série de calcaro-dolomitique à silex au dessus de la quelle se dépose localement les calcaire Lutétien.
- Miocène : il est représenté par une complexe des roche terrigène des conglomérats, des argiles, des schistes et essentiellement par le sable qui peut attient par fois le 250m d'épaisseur et en dernier arrive les dépôts récents du quaternaire constitué par des alluvions.

Les coupes suivantes illustrent la structure lithologique du gisement de phosphate de Kef Essennoun (figure 4,5,6.IV).

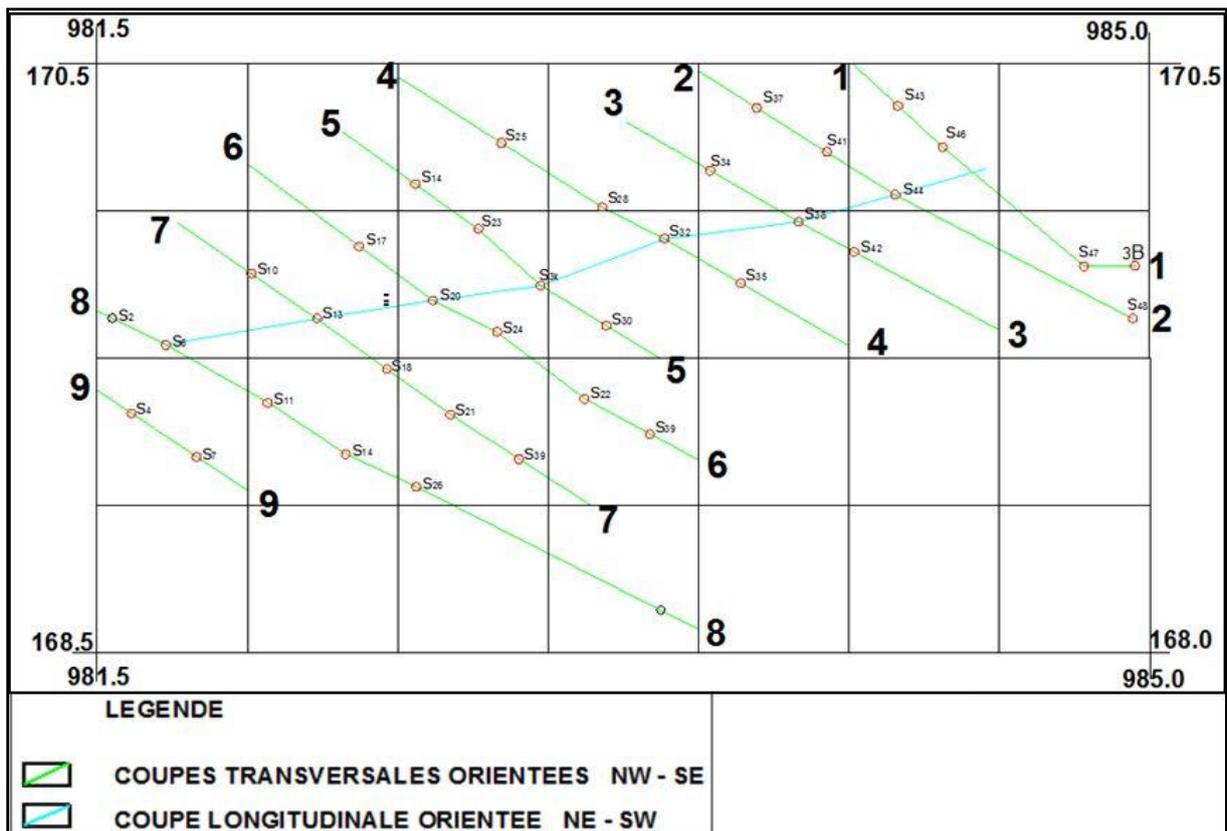


Figure 4.II: plan de localisation des coupes du gisement Kef Essennoun

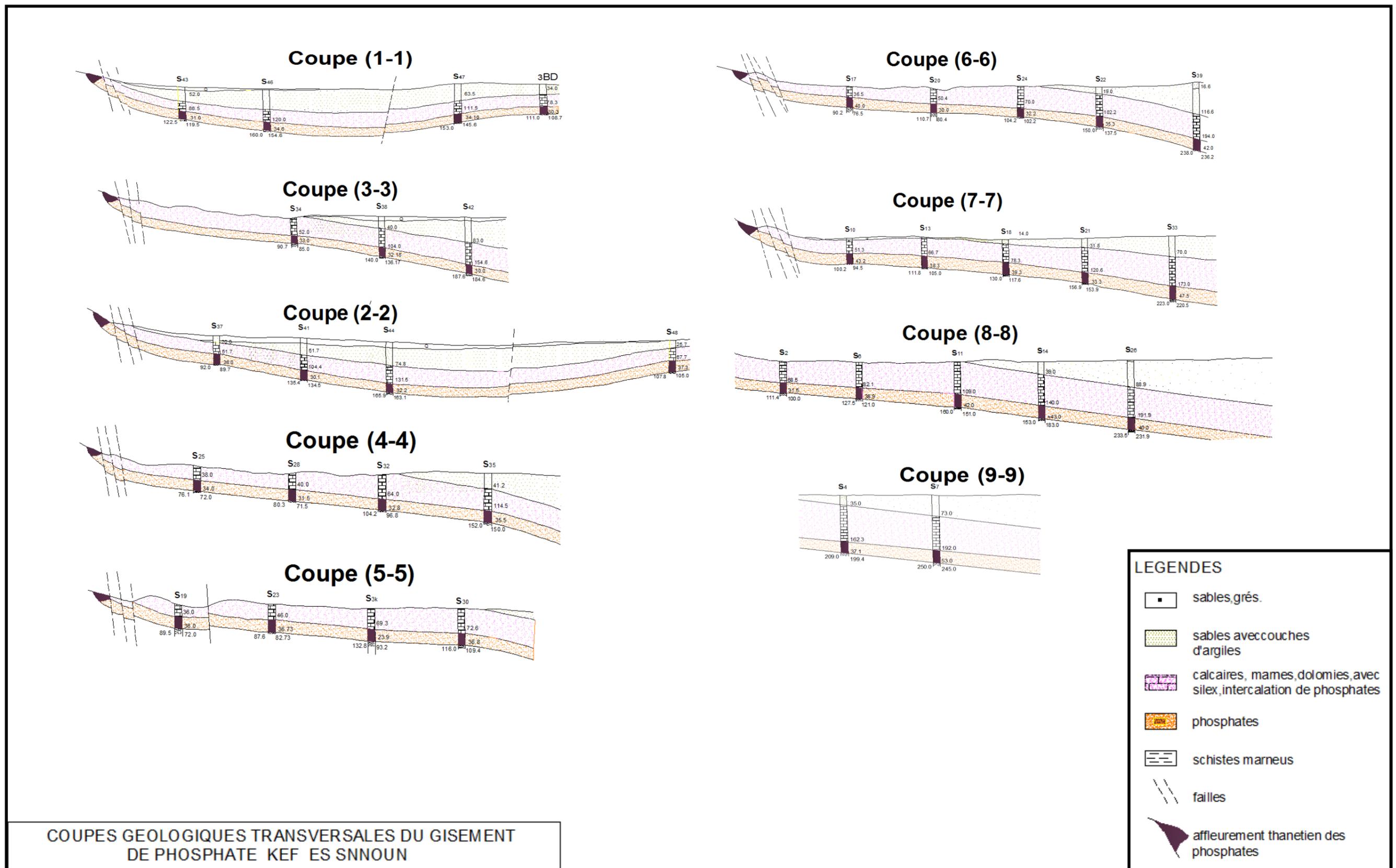
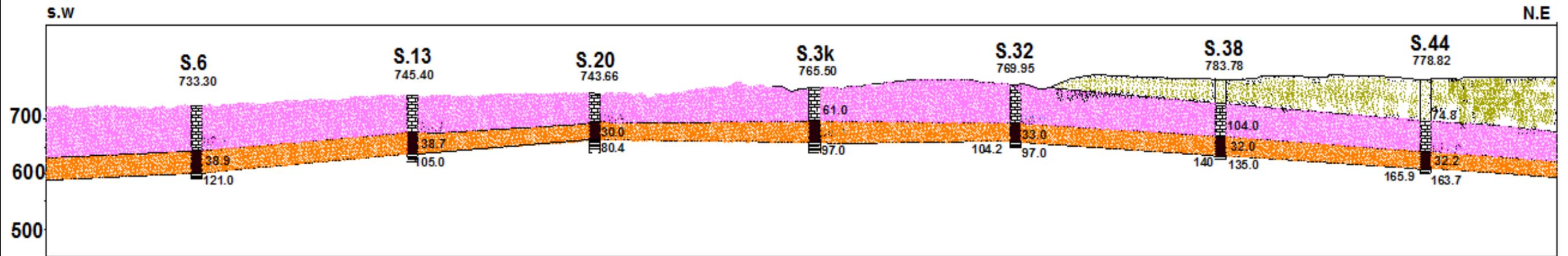


Figure 5.IV: Coupes géologiques transversales du gisement de phosphate de Kef Essennoun

COUPE GEOLOGIQUE LONGITUDINALE DU GISEMENT DE PHOSPHATE KEF ES SNNOUN



LEGENDE

- QUATERNAIRE Sables,grés,sables avec couches d'argile
- MIOCENE Calcaires,marnes,dolomies avec silex
- YPREISEN intercalation de phosphates
- LUTETIEN
- THANETIEN SUP phosphates
- THANETIEN INF Schistes marneux

S.6

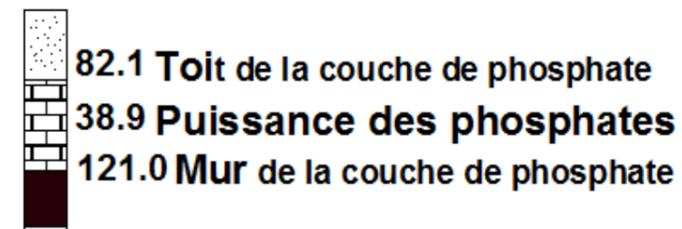


Figure 6.II: Coupe géologique longitudinale du gisement de phosphate de Kef Essennoun

3.2. Géomorphologique

La stabilité d'un versant montagneux est liée d'une part, à la nature géologique des formations le constituant et d'autre part à sa morphologie (pente, escarpement,...). En effet, les facteurs qui interviennent dans la modification de la morphologie d'un versant sont multiples et diversifiés (érosion torrentielle, érosion glaciaire, érosion météorique, facteurs anthropiques,...).

Morphologiquement notre site d'étude est décomposé en deux parties toute à fait différentes. La partie Sud là où se déroulent les travaux d'exploitation est caractérisée par une structure simple et se présente sous forme d'une table (la table de Kef Essennoun) monoclinale à pendage régulier de 5 à 10° vers le Sud.

La partie Nord où se trouve la ligne de crête de Kef Essennoun (900 à 1000m) caractérisée par une morphologie plus ou moins accidentée. Cette crête est constituée par des calcaires massifs de *Maestrichtien* dominant la carrière par une falaise de près de 150m d'hauteur. Cette région est aussi entaillée par plusieurs *talwegs* assez profonds, orientés N-S et NE-SO, en relation avec la fragilité des sédiments et la tectonique qui le caractérisant. Ensuite, on note la présence d'une butte (HADJEB LAKKHAL) suite au renversement des couches qui sont presque casi-verticales à partir de laquelle le versant décline progressivement jusqu'à la fosse d'exploitation.

3.3. Tectonique et structural

L'observation des couches doit nous permettre de comprendre leurs genèses et d'y retrouver les données concernant leur histoire tectonique, toujours complexe. Au cours de cette histoire, les couches traversent plusieurs époques géologiques au cours desquelles diverses phases tectoniques peuvent les conduire dans des niveaux structuraux différents. Pour analyser les systèmes de discontinuités nous devons reconstituer la chronologie relative des différentes phases tectoniques.

Le massif de Djebel Onk est un anticlinal asymétrique en genou, orienté N 80°. Il est situé dans la zone d'affrontement entre le domaine atlasique actif et la plate forme Saharienne stable, leur structure et morphologie résultent d'une cinématique en décrochement dextre-chevauchement dont l'activation a débuté au minimum au *Turonien* dont le jeu s'est prolongé jusqu'au paroxysme *post pliocène*. [CHABOU].

Le site en question se localise dans le flanc Sud de l'anticlinal de Djebel Onk. Une série de trois failles majeures de direction NNO-SSE traversent le gisement mais n'engendrent pas de déformations majeures sur la géométrie des couches. Par contre, dans la zone des dressants de Kef Essennoun, allongée N75°E, la tectonique souple et cassante a entraîné un changement brusque du pendage des couches où l'angle de pendage est presque sub-vertical ou fortement incliné vers le sud-est ou le sud-ouest. Du point de vue de la situation et de l'activité tectonique actuelle, la structure géologique de notre gisement ne subit pas d'activité tectonique moderne.

3.4. Fissuration

La fissuration est un facteur critique et important qui caractérise les propriétés mécaniques des roches, et donne au massif rocheux un affaiblissement structural déterminé, ce qui joue un rôle prépondérant dans la stabilité des talus des gradins et des bords des carrières, ainsi que sur tous autres ouvrages miniers.

Les résistances des massifs rocheux peuvent être sensiblement réduites par rapport à celle des roches intactes en raison de la présence de fissures, des vides et de plans de stratification. Il

est impératif de disposer des données sur la structure fissurées et les plans de stratification pour pouvoir réaliser une analyse détaillée et correcte de la stabilité des talus.

La géométrisation de la fissuration et de la stratification des roches dans des sites particuliers peuvent être disposée sous forme d'un diagramme (Rectangulaire, circulaire, WOOLF) qui représente les fréquences en pourcentage des fissures à l'azimut de la direction donnée.

La densité des fissures peut être exprimée soit par le nombre de fissures sur un mètre de longueur, soit par la distance (en mm, ou cm) moyenne entre les fissures de la même disposition.

L'étude de la géométrisation de la fissuration est très importante pour reprendre les corrections des paramètres géomécaniques et distinguer l'orientation du front de la carrière et des gradins par rapport à l'anisotropie.

Dans notre cas (Kef Essennoun), les fissures et les plans de stratification ont été observés dans les fronts d'exploitation et dans le terrain naturel, cependant, il n'y a pas aucune étude détaillée dans ce sens. Pour prendre en compte ce facteur dans le calcul de stabilité, nous allons utiliser un paramètre correctif lors de la détermination des caractéristiques mécaniques du massif notamment la cohésion et l'angle de frottement interne.



Figure 7.IV: Front de taille exposé à la carrière de Kef Essennoun

3.5. Hydrologique et hydrogéologique

Les variations des conditions hydrogéologiques sont les phénomènes les plus néfastes pour le déclenchement des glissements de terrain, elles peuvent avoir plusieurs origines : une origine météorologique liée aux précipitations et à la fonte de la neige et une origine anthropique liée à la modification de la forme du versant, à la surcharge et au terrassement, ou encore à la modification de l'hydrologie naturelle du massif.

L'augmentation de pression interstitielle diminue la résistance du matériau. Cette augmentation est le plus souvent liée à la pluviométrie. En effet, il existe généralement une forte corrélation entre les événements pluvieux de forte intensité et l'apparition de mouvements de terrain.

3.5.1. Climatologie de la région

L'influence des facteurs climatiques sur les formations géologiques semble très importante, ces facteurs ont un impact d'une façon ou d'une autre, directement ou indirectement sur le relief en modifiant les caractéristiques physiques et chimiques des roches et du sol, cela prouve que la climatologie possède une stricte liaison avec la géotechnique.

La zone d'étude de Djebel El Onk a un climat de transition entre la région semi aride de Tébessa et celui de la région subaride de NEGRINE avec un hiver froid et un été chaud et sec.

3.5.1.1. Pluviométrie et température

La pluie est un facteur climatique très important dans le conditionnement du régime d'écoulement du réseau hydrographique, cependant, l'évaluation du taux de ruissellement, d'infiltration et d'alimentation des réserves aquifère nécessite de connaître le volume de précipitation dans la région, Toutes les études qui ont été faites sur la pluviométrie en Algérie, montrent que le volume de pluie augmente avec l'altitude et diminue à mesure qu'on s'éloigne du littoral, ce qui explique l'appartenance de Kef Essennoun à une région à faible précipitation atmosphérique. Pour concrétiser cette explication, il est nécessaire d'analyser les données pluviométriques de la région sur une série d'observation bien déterminée.

Le manque de station pluviométrique dans la région de Bir El Ater, nous a obligé de utiliser les données de la station la plus proche de la zone d'étude, et qui est celle de THELIDJENE située à 30 km au Nord de Bir El Ater, les données hydrométriques sur une période de 28 ans (1986-2014) donné par cette station de sont présenté dans le *tableau 1.IV*.

Mois	JAN	FEV	MARS	AVR	MAI	JUIN	JUI	AOUT	SEP	OCT	NOV	DEC
Précipitation	25,00	37,41	41,99	39,88	28,81	21,45	14,13	15,30	42,90	46,68	34,63	23,63

Tableau 1.IV: Précipitation mensuelle moyenne de la région de BIR EL-ATER dans la période 1986/2014 données par la station de Thélidjène

D'après les données du *tableau 1*, on constate que dans cette zone la période de faible précipitation n'est que de trois mois (Juin, Aout), par contre la période humide s'étale presque sur toute l'année une pluviométrie moyenne annuelle de l'ordre de 30.98 mm.

3.5.1.2. Température

En ce que concerne la température, Il n'existe aucune station de mesure dans la région, les seules données disponibles sont celles de la station de TEBESSA.

Le *tableau 2.IV* montre bien que les températures présentent des variations Saisonnières très importantes Les mois de Juin, juillet et Août sont les mois les plus chauds avec une température moyenne maximale 38.32°C, Les mois les plus froids sont Décembre, Janvier, Février avec une moyenne de température minimale de 2.19°C.

Mois	JAN	FEV	MARS	AVR	MAI	JUIN	JUI	AOUT	SEP	OCT	NOV	DEC
Tmax	13,44	13,20	17,61	22,85	26,38	32,50	36,35	46,10	30,75	25,75	18,51	14,45
Tmin	2,17	1,80	4,66	7,62	10,24	15,06	17,18	20,12	15,57	11,82	7,58	2,60
Tmoy	7,80	7,50	11,14	15,23	18,31	23,78	26,77	33,11	23,16	18,79	13,05	8,52

Tableau 2.IV: Températures mensuelle moyenne de la région de BIR EL-ATER dans la période 1986 à 2014 données par la station de Tébessa

3.5.1.3. Période de sécheresse :

Selon *BAGNOULS et GAUSEN*, la sécheresse est définie comme étant la période pendant laquelle la précipitation totale du mois est inférieure ou égale au double de la température.

La *figure 8.IV* représente la variation de la température moyenne mensuelle interannuelle et la précipitation moyennes mensuelle interannuelle (*Diagramme Ombrothermique*) de la région d'étude calculées sur une période de 30 ans (1984 à 2014). Ce diagramme montre que la période sèche s'étend sur 5 mois allant de mois de Mai jusqu'à la fin du mois de Septembre, alors que la période humide est la plus longue et s'étal sur les autres mois de l'année (7 mois environ).

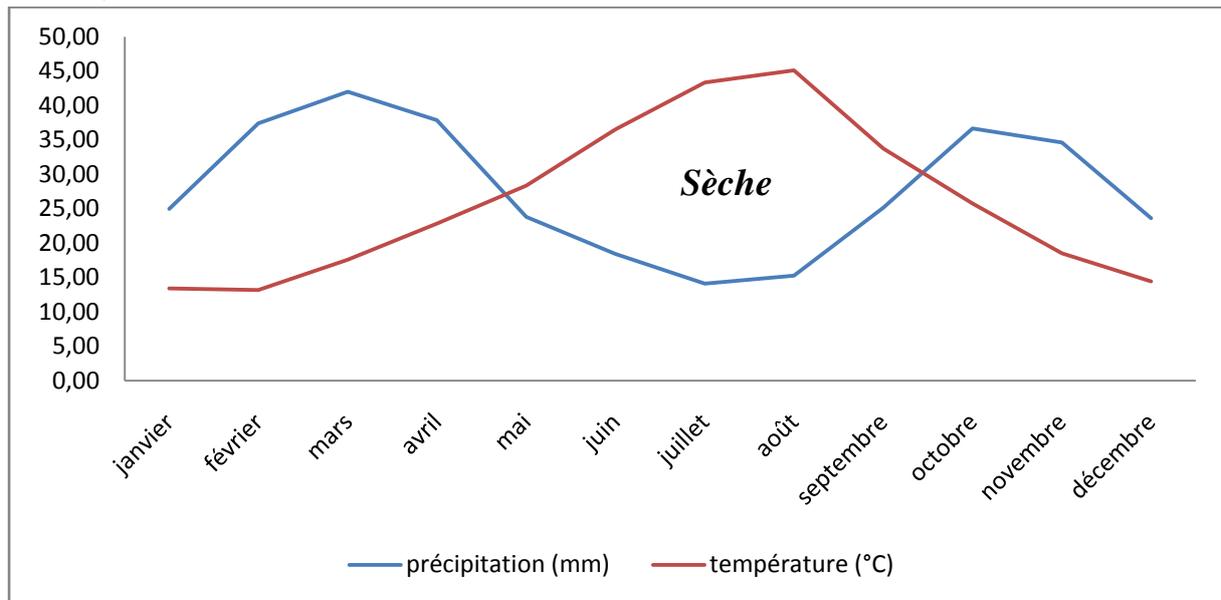


Figure 8.IV: Représente le diagramme ombrothermique de la région de BIR EL-ATER pour la période (1986 à 2014)

3.5.2. Hydrologie de la surface

Le principal but de l'étude des conditions hydrologique est la détermination des sens l'écoulement des eaux sauvage et de repérer les zones d'écoulement préférentiel afin de déceler les points d'infiltration des eaux de surface dans la masse rocheuse (zone de forte perméabilité, fissures, faille....etc.).

Dans la région de Bir El Ater, ce réseau est composé de trois principaux sous bassins versants:

- Celui d'Oued Rheznata, au Nord-Est de la commune Bir El Ater ;
 - Ceux d'Oued Soukiès et d'Oued Horchane, au Sud, dans la zone objet de notre étude.
- [BRGM1992]

Ces sous-bassins versants font partie du bassin versant du Chott Melghir et ils sont affectés par une action conjuguée d'érosion hydrique et éolienne. La faible couverture végétale indique une importante surface d'ablation.

A l'intérieur de la zone d'étude, il y a plusieurs petits oueds (Tarfaya, Abiod, El Bir, Regou, etc.) qui ne coulent que quelquefois durant l'année et pendant quelques heures à chaque fois. Cependant, leurs crues peuvent être violentes et couper les voies d'accès, Compte tenu du caractère intermittent des oueds, il n'existe pas de données sur la qualité de leurs eaux.

D'après ce que précède et en se basant sur les résultats de l'étude hydrométrique qui montre que la région de Kef Essennoun appartient au climat aride à Subaride avec une pluviométrie périodique s'étale de Septembre à Mai et ne dépassant pas le 50 mm/an, donc nous pourrons

dire que le réseau hydrologique du site n'est pas assez développé mise à part de quelques ravins et talwegs dans la partie supérieure qui pourront entraîner l'accélération et le mouvement du versant pendant les périodes de précipitation.

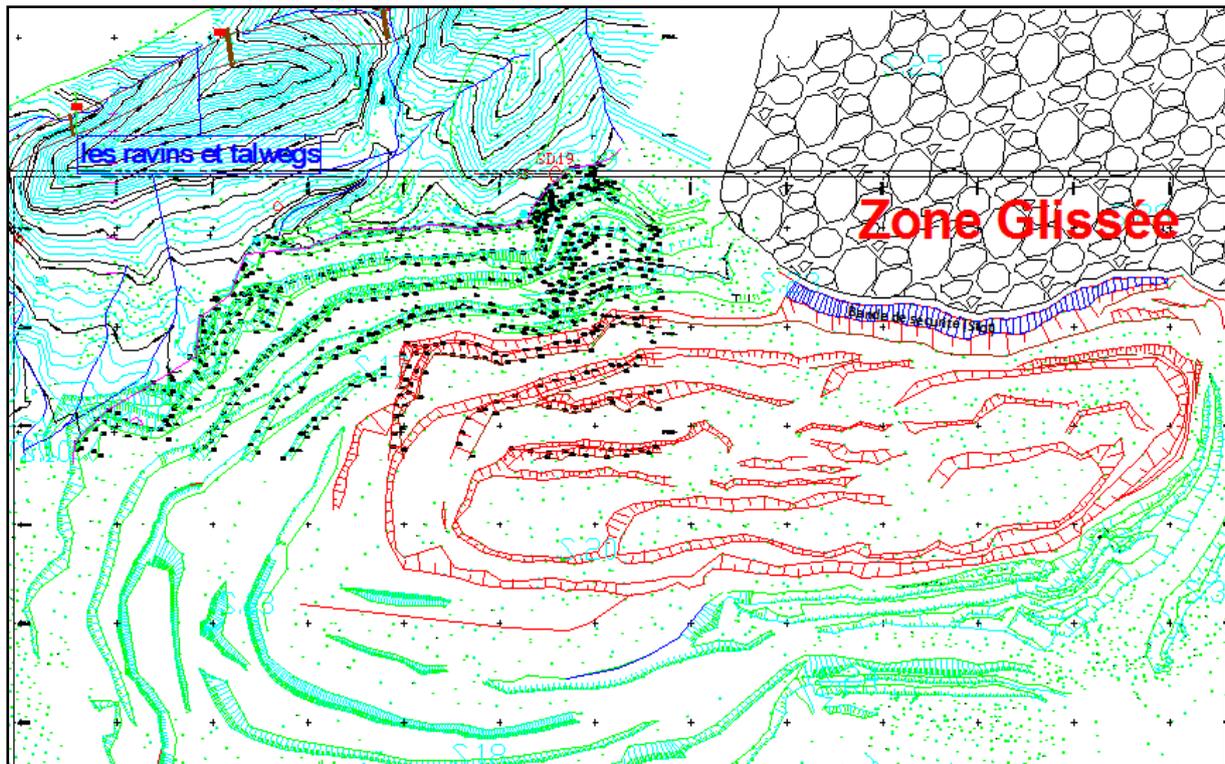


Figure 9.IV: localisation des Oueds et talwegs dans la carrière

3.5.3. Hydrogéologie

La région de Tébessa compte plusieurs aquifères potentiels liés aux divers types lithologiques et qui sont en relation étroite avec le climat et les particularités structurales qui les caractérisent.

L'aquifère le plus important de la région semble se situer dans les grès et sables quartzeux miocènes d'autres aquifères situés dans les calcaires Turoniens et Maestrichtiens sont beaucoup moins connus. La source de Tenoukla, dont le débit est conséquent, est alimentée par les calcaires du Turonien. Les calcaires éocènes sont également aquifères.

Dans la région de Bir El Ater, on distingue la nappe de Chéria (d'où le Complexe de Djebel Onk pompait son eau dans le passé), la nappe d'Elma Labiod, les nappes de Dokkara et d'Oglat Ahmed (sur la frontière Algéro-tunisienne), la nappe de Darmoun (d'où le Complexe de Djebel Onk pompe actuellement son eau) et le Complexe Terminal de Négrine.

Vu de la profondeur des aquifères citées auparavant, les conditions hydrogéologiques n'intimide pas la stabilité du versant de Kef Essennoun.

3.6. Géotechnique

Le type et les caractéristiques des roches constituant une telle formation géologique sont indiscutablement les paramètres les plus importants, qui définissent toutes les autres propriétés de la matrice rocheuse et de la structure géologique. Les propriétés les plus importantes de la matrice rocheuse d'un point de vue stabilité de talus sont :

- La dureté de la roche, qui peut s'exprimer par le paramètre de résistance à la compression simple de l'échantillon ;
- Le caractère et le degré d'altération et de fracturation;

- L'aptitude au gonflement, la plasticité etc. ;
- la solubilité de la roche.

L'objectif primordial de l'étude géotechnique est de définir pour la structure géologique d'une fosse à ciel ouvert, un modèle géotechnique comportant tous les propriétés physique, mécaniques, géomécaniques et intégrant une caractérisation géologique, structurale, morphologique et hydrogéologique de la structure.

L'acquisition des paramètres pétro-physiques et mécaniques nécessaires aux calculs ultérieurs se fait à partir d'échantillons remaniés ou, plus souvent, d'échantillons prélevés intacts, sur lesquels on peut réaliser des essais en laboratoire et déterminer des paramètres pétro-physiques et des caractéristiques de résistance mécanique et de déformabilité: densité, différents modules de déformation, cohésion et angle de frottement interne, paramètres de résistance au cisaillement des discontinuités. Dans certains cas, il peut être utile de mettre en œuvre des essais mécaniques in-situ : en sondage (essais pressiométriques ou dilatométriques, etc.) Ou en surface (essais de cisaillement de matériaux grossiers ou de discontinuités rocheuses, etc.). Tous ces essais sont réalisés selon des directives ou normes proposées par différents organismes ou sociétés savantes (ISRM, ASTM, AFTES, AFNOR, etc).

Finalement, pour créer un modèle géotechnique global, l'ensemble des données recueillies (géologiques, structurales, massif rocheux et hydrogéologique) doit être regroupé et intégré. Les analyses de la stabilité des talus devront reposer sur ce modèle géotechnique global.

3.6.1. Propriétés physicomécanique des roches

Les propriétés physicomécaniques des roches déterminées au laboratoire pour les quatre couches constituant la formation géologique de Kef Essennoun sont présentées dans le tableau suivant (*tableau 3.IV*) :

Propriété	γ (kN/m ³)	γ_{sat} (kN/m ³)	C (MPa)	φ (°)	E (MPa).10 ³	ν
Couche						
<i>Calcaire altéré</i>	22	25	8.24	39	27	0.25
<i>Phosphate</i>	23	24	7.35	39	24	0.28
<i>Marne</i>	20	22.5	1	15	1	0.3
<i>Calcaire substratum</i>	26	27	5.6	33	25.5	0.24

Tableau 3.IV: Propriétés mécaniques des roches

3.6.2. Propriétés géomécanique du massif rocheux

Les propriétés mécanique cités dans le *tableau 3.IV* représente les caractéristique d'un échantillon ramené du site en question, cependant ces valeurs ne représente pas la réalité de la structure du massif rocheux car, elles ne prennent pas en considération quelques facteurs déstabilisants (fissuration, l'eau, temps) donc la nécessité d'introduire des paramètres correctifs parmi lesquels on trouve :

- Facteur de fissuration du massif ;
- Facteur d'humidité des roches ;
- Facteur temps.

La valeur de la cohésion et de l'angle de frottement interne de la formation rocheuse du massif sont donnée par les formules suivantes :

$$C_m = C_{ech} \cdot k_f \cdot k_w \cdot k_t ; \text{ kgf/cm}^2$$

$$\varphi_m = k \cdot \varphi_{ech} ; \text{degré}$$

C_m : cohésion du massif rocheux ;

C_{ech} : cohésion de l'échantillon ;

k_f : degré de fissuration du massif rocheux $k_f = 0.01 \div 1$ on prend $k_f = 0.5$ (grande fissuration) ;

k_w : coefficient de diminution de la valeur de cohésion à cause de l'humidité $k_w = 0.2 \div 1$

On prend $k_w = 0.85$ (influence minime);

K_t : coefficient de diminution de la valeur de cohésion à cause du temps $k_t = 0.7 \div 0.8$ (on prend la moyenne $k_t = 0.8$) ;

φ_m : l'angle de frottement interne du massif rocheux ;

φ_{ech} : l'angle de frottement interne de l'échantillon ;

k : coefficient de diminution de la valeur de l'angle de frottement interne des roches, généralement il est pris égal à 0.8 ($k = 0.8$).

Propriété	C_e (MPa)	φ_e (°)	C_m (MPa)	φ_m (°)
Couche				
<i>Calcaire altéré</i>	8.24	39	2.80	31
<i>Phosphate</i>	7.35	39	2.50	31
<i>Marne</i>	1	15	0.34	12
<i>Calcaire substratum</i>	5.6	33	1.9	37

Tableau 4.IV: Propriétés géomécaniques du massif rocheux

4. Surveillance de l'évolution du mouvement

L'objectif principal de tout système de surveillance est de pré détecter les déformations, leur amplitude et leur direction. Les données recueillies à l'aide de ces systèmes sont également cruciales car elles peuvent être utilisées pour définir la relation entre les mouvements verticaux et horizontaux, pour déterminer l'influence du temps et aussi surveiller et prévoir les dommages induits par les déformations.

4.1. Apparition des fissurations récentes

Suite au gigantesque glissement du bord Nord-Est de la carrière en 2007, les cadres de l'entreprise et sous l'accord des responsables ont pris la décision de reprendre les travaux d'exploitation par l'réorientation des fronts des gradins vers le Sud, l'Ouest et le Nord-Ouest. Cette solution a paru convenable pour la poursuite de la production du phosphate, cependant, des fissures et des fractures ont commencé d'apparaître en 2012 (détectées en 2012) au niveau du sommet du bord Nord-Ouest de la fosse d'exploitation. Ces fractures ont une géométrie comparable aux fissures et plan de mouvement de l'ancien glissement car elles ont été détecté presque dans l'interface de phosphate-marne de la zone d'affleurement.

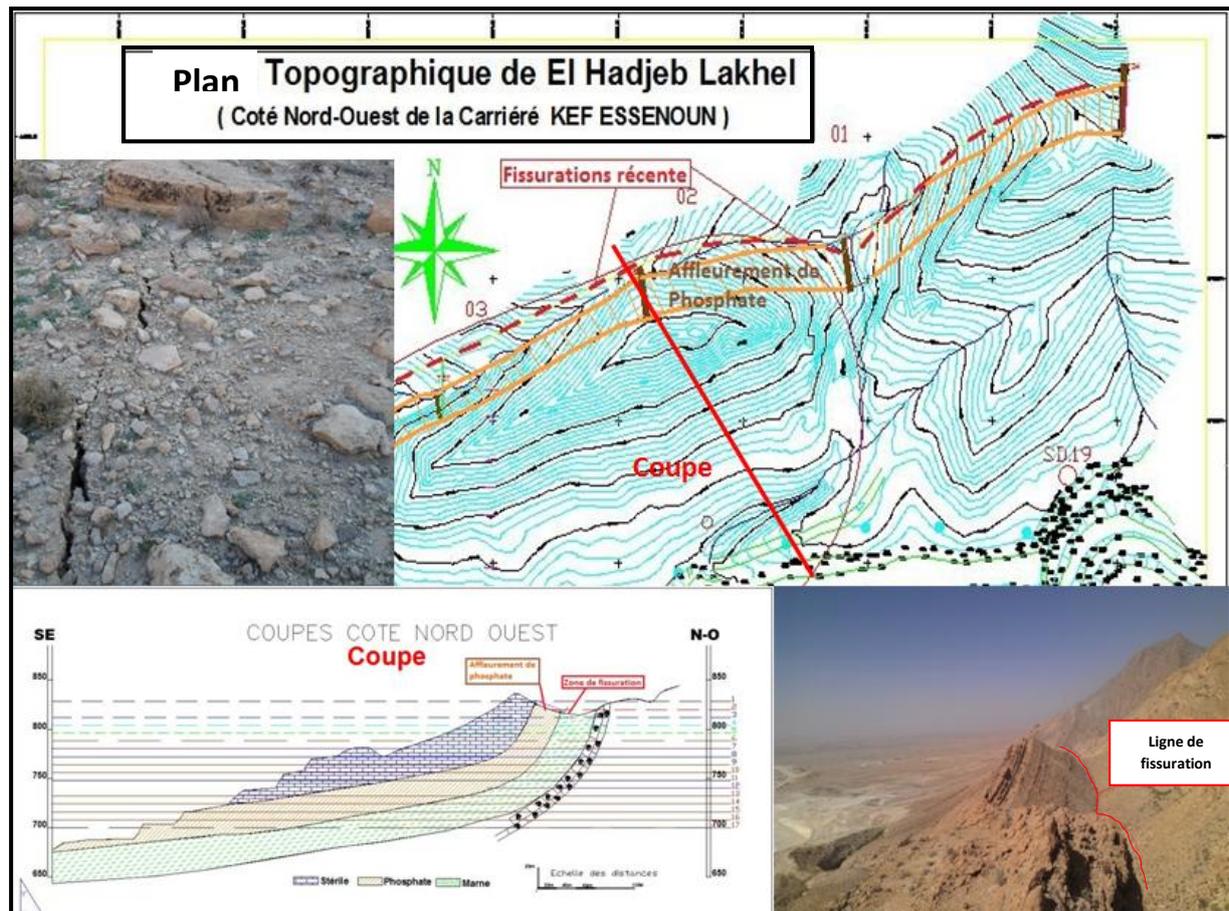


Figure 10.IV: Emplacement Des Nouvelles Fissures Du Bord N-O De La Carrière De KEF ESSENOUN

4.2. Dispositifs de surveillance

La surveillance des talus faisant appel à une large panoplie de dispositifs d'auscultation pourra être utilisée: suivi topographique, fissuromètres, inclinomètre, contrôle de niveaux piézométriques, mesures de déplacements et de déformation en forage, interférométrie par radar etc.

Dans la carrière de phosphate de Kef Essennoun vu de l'insuffisance des matériels qui empêche la réalisation des mesures de surveillance solide, cependant, nous avons mis en place quelques dispositifs pour contrôler la masse rocheuse dite en mouvement.

4.2.1. Piqués de mesure (Fissuro-mètre)

Après la signalisation de l'apparition des nouvelles fissures dans le sommet du bord Nord-Ouest de la carrière de Kef Essennoun (HADJEB LAKHAL), les premiers dispositifs que nous avons proposés sont les stations de contrôle pour surveiller l'évolution des fissures en termes d'écartement. Ces sont des bars en acier bétonnés dans deux point situés de part et d'autre d'une fissure dont le quel on fait des mesures périodique et continue de la distance entre les deux piqués, cette méthode est largement utilisée en raison de leur faible coût et de leur facilité de mise en œuvre.



Figure 11.IV: Piqué de mesure N°02 et 03

Les mesures prises dans ces stations installées en 2013 dans les nouvelles fissures ont mentionné l'écartement des fissures au cours du temps ce qui implique que la masse rocheuse est en mouvement.

La figure suivante représente l'enregistrement de deux stations (N°02 et 03) entre le mois d'Avril 2013 et Août 2014. Ces résultats montrent que cette masse est en mouvement, dont la vitesse moyenne est de 3 à 4mm/an.

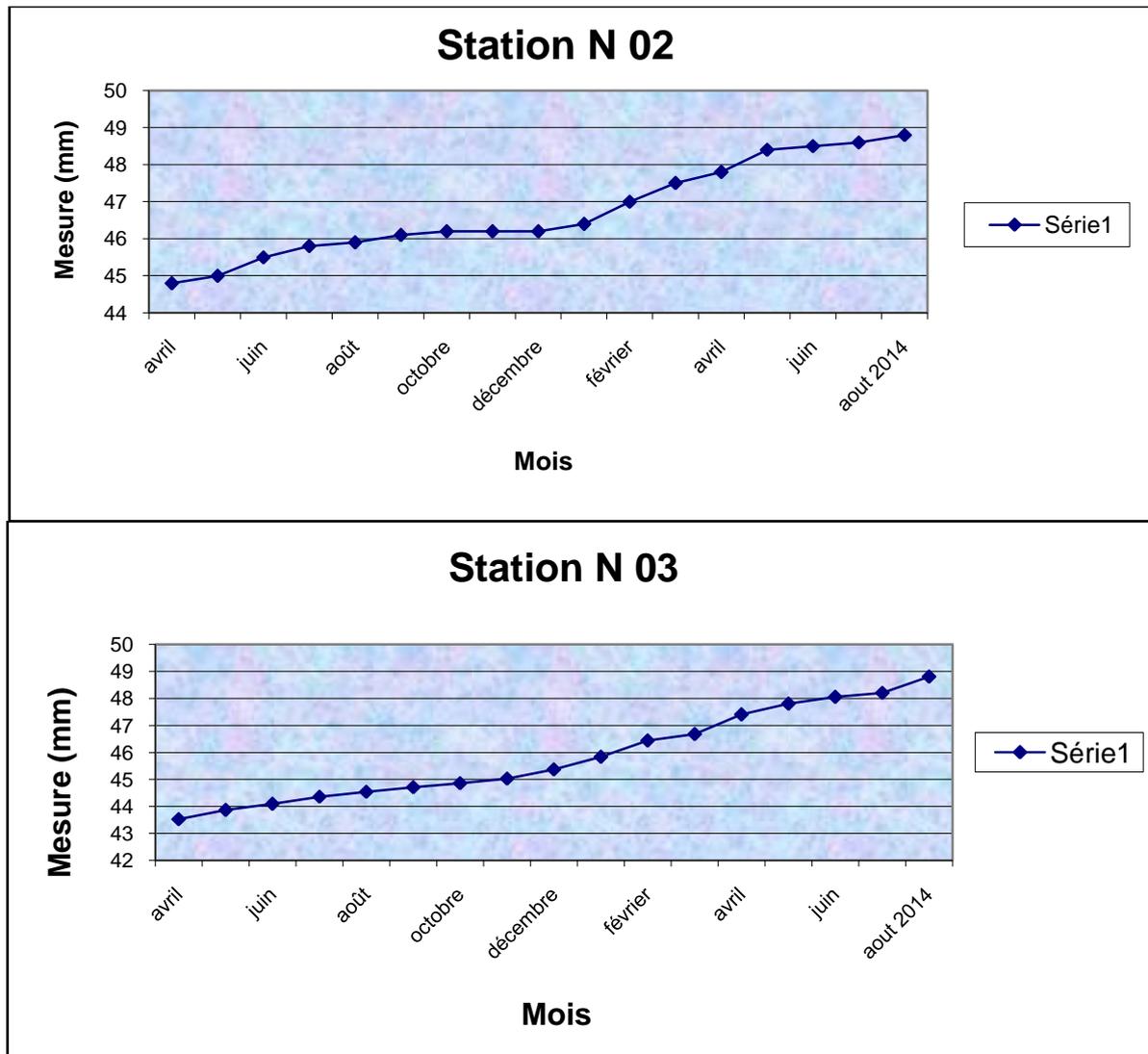


Figure 12.IV: Enregistrement des stations de mesure N°06 et N°01

4.2.2. Inclinomètre

sel inclinomètres sont des outils utilisés pour surveiller le comportement de la masse rocheuse par les mesures du déplacement d'un sondage initialement verticale. Cette méthode c'est une pratique courante et efficace pour identifier le plan de mouvement cependant, si les inclinomètres sont mal positionnés de telle façon le plan de mouvement se situer sous les inclinomètre, il est impossible de l'identifier ou de mesurer la déformation de la masse rocheuse.

Dans notre cas, deux inclinomètres ont été installés en Janvier 2014 dans le but de quantifier le taux de déformation du bord N-O, la position exacte où les coordonnées de ces inclinomètres (X, Y, Z) n'ont pas été mises en évidence et on ne sait pas aussi s'il existe des carottes des sondages de ces inclinomètres. Ce pour cela, on ne peut jamais jugé si leurs emplacements convient au besoin du programme de surveillance et si leurs profondeurs sont suffisantes.

La figure suivante (13.IV) montre la coupe NO-SE du bord étudié avec l'emplacement des inclinomètres.

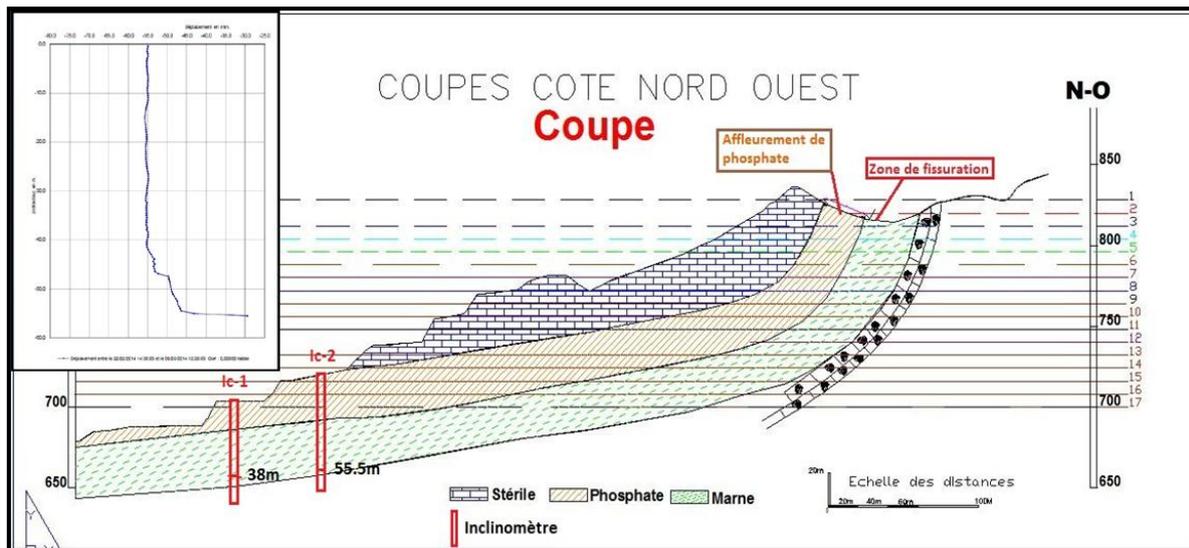


Figure 13.IV: Emplacement de deux inclinomètres avec les résultats d'Inc-2

Les résultats obtenus par les inclinomètres permettent de tracer des courbes de déformation en fonction de la profondeur dans deux directions transversale et longitudinale à l'axe du talus.

Inc-2 :

Les résultats enregistrés entre le 22/02/14 et 06/05/2014 par cet inclinomètre sont présentés par la courbe du graphe cité précédemment, ce dernier montre une déformation de l'ordre de 25 mm à presque 55.5 m de profondeur.

Inc-1 :

Les résultats de cet inclinomètre n'ont pas été communiqués, cependant, d'après les déclarations des géotechniciens, l'Inc1 a détecté un mouvement à 38 m de profondeur qui l'a écrasé définitivement.

Enfin, nous concluons que le plan de mouvement se situe dans la couche des marnes ce qui renforce les résultats des stations de surveillance des fissures.

5. Critique du programme de reconnaissance et des dispositifs de surveillance

Il est évident que la précision d'un tel programme de reconnaissance dans le domaine de calcul de stabilité dépend de la complexité morphologique, structural et géologique ainsi que l'importance de la zone à étudier.

Le programme qui a été établi par SOMIPHOS avait pour but la réalisation d'une étude géotechnique afin de résoudre le problème de l'instabilité du versant Nord de Kef Essennoun ; concernant le contenu et les étapes de ce programme, on a pu dégager certaines remarques qui sont :

- L'absence des sondages géotechnique qui représente la vraie nature des formations existants.
- Manque des essais in situ tel que : les essais au pressiomètre et au pénétromètre qui donnent une bonne idée sur le comportement mécanique des roches surtout pour la couche de marne.
- Les essais au laboratoire sont réalisés sur des échantillons récoltés de la surface.
- Le non mise en place d'une étude détaillé sur l'effet de minage par explosif sur les discontinuités et les plans de stratification.
- L'étude sur les types et la direction des discontinuités et des fissures n'est pas encore effectué donc nous ne pouvons pas dire exactement si elles influent sur la stabilité ou non.
- l'absence d'un levé topographique de la partie supérieure de la zone instable.

6. Conclusion

Les cadres de SOMIPHOS notamment la division d'exploitation ont tombé dans la même erreur que la précédente lors de l'ouverture de la carrière pour la première fois. Ils ont creusé une fosse importante avec des bords de grandes hauteur au pied de l'anticlinal ce qui a créé un état d'instabilité (Appel au vide). Cette situation critique est le résultat de l'absence des plans prévisionnels pour les phases de l'exploitation de la carrière.

En ce qui concerne le programme de reconnaissance et les dispositifs de surveillances élaborés par l'entreprise, nous pouvons dire que, ils n'ont pas répondu aux exigences du programme, cependant, ils nous ont donné une idée sur la stabilité de la zone d'étude qui reste à conformer par la suite avec les outils informatique (logiciel).

Chapitre V: Évaluation De La Stabilité Du Bord N-O De La Carrière De Kef Essesnoun A L'aide Des Outils Informatiques

1. Introduction

Analyser la stabilité des terrains ou des ouvrages est le plus ancien types d'analyse numérique dans l'ingénierie de mécanique de roche.

Est-ce que le ouvrage restera-t-il stable pendant et après la réalisation des travaux? La réponse de cette question devra être mise en évidence préalablement aux travaux de réalisation, car elle représente le point de départ pour la poursuite et la réussite de n'importe quel type de projet (minier, routier, barrage...).

Aujourd'hui, Après le développement de la technologie, l'étude de la stabilité s'abord aisément et avec beaucoup de précision, car les produits sophistiqué de Software nous permettre de modéliser numériquement ce problème, en utilisant diverse : Équilibre limité, MEF, MDF, MED.

Dans ce chapitre, nous allons parler brièvement sur l'utilité des outils informatique dans l'évaluation de risque de glissement, la modélisation numérique d'un talus de gradin et des bords des mines à ciel ouvert, dans ce cadre, nous utilisons les logiciels *GEO STUDIO et GEO5* pour la modélisation du bord N-O de *KEF ESSNOUN*.

2. Modélisation numérique d'un talus

La modélisation d'un talus d'une mine ou carrière à ciel ouvert constitue un moyen efficace pour évaluer leur état de stabilité car le phénomène de glissement dans le secteur a causé une multitude de problèmes aux experts miniers et géotechniciens pendant longtemps. Cependant, l'utilisation de la modélisation pour le traitement de ces phénomènes permet, d'une part une bonne appréciation du comportement des talus et d'autre part, la détermination des techniques de confortement adéquates.

3. Logiciels utilisés dans l'étude de risque de glissement de terrain

L'analyse et l'évaluation de la stabilité des talus et du risque de glissement de terrain notamment la détermination du facteur de sécurité FS peut être effectuée aujourd'hui en utilisant divers logiciels de géotechnique sur ordinateur. Ces logiciels informatiques exploitent plusieurs méthodes et formulations tel que la méthode d'équilibre limite (on trouve principalement *FELLENIOUS, BISHOP, SARMA, CARTER*.etc) comme celles qui les utilise le logiciel *DEGRES, GEOSLOPE (SLOPE/W), GEOTAB*. Ces derniers nécessitent une faible puissance de calcul par contre, le calcul en déformation requièrent en générale l'utilisation des méthodes du type éléments finis qui se base sur les lois constitutives des sols et des modèles appropriés (*FLAC, PLAXIS, FEMUSLOPE*). Il existe d'autres logiciels qui exploitent la méthode des éléments discrets qui sont destiné pour les milieux rocheux fracturés et d'autres qui utilisent plusieurs méthodes au même temps (*GEO5*) pour divers modes de glissements, circulaires ou non circulaires, ce type de logiciel, nous permettons de comparer et vérifier le calcul.

Le domaine de l'utilisation et le développement des logiciels a attiré de plus en plus l'intérêt à la fois des chercheurs et des professionnels. Aujourd'hui, divers types de logiciels basés sur

les éléments finis ou discrets et la limite d'équilibre (EF, ED et EL) sont couramment utilisés dans les calculs géotechniques.

Dans nos calculs de stabilité du bord Nord-Ouest de la fosse de KEF ESSNOUN, nous avons utilisé deux logiciels différents qui sont respectivement **SLOPE/W** (*Géo studio*) et **GEO5**. Le choix de ces deux logiciels a été fait en fonction la disponibilité, la facilité de l'utilisation et qui ils soient convenables pour le cas étudié.

3.1. Géo Studio [16]

3.1.1. Présentation

GEOSTUDIO est un logiciel professionnel, puissant et efficace de calcul géotechnique développé par *GEO-SLOPE International, Ltd*, il permet de résoudre des différents problèmes assez complexe liée au sol comme le glissement des terrains, les infiltrations des eaux, l'effet des séismes sur le comportement des terrains, les digues des barrages et des autres problèmes des géotechnique. Plusieurs programmes sont intégrés dans la fenêtre générale de ce logiciel (*Figure 1.V*), on trouve :

- **SLOPE/W**: Permet de calculer le coefficient de sécurité d'un talus naturel ou artificiel par les méthodes d'analyses classiques.
- **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 Géothermique du sol (Par la méthode des éléments finis)... et autres logiciels.
- **CTRAN/W**: il est utilisé pour modéliser le mouvement de polluants à travers les matériaux poreux comme le sol et les roches.
- **AIR/W**: C'est un module exécutable dans le programme SEEP/W contribue à la résolution de la pression de l'air et la réponse de l'écoulement de l'eau pour les conditions au limite de pression ou le changement le changement de la pression de l'eau.
- **VADOSE/W**: C'est un modèle numérique qui peut simuler mathématiquement le processus physique réel de l'écoulement de l'eau à travers un milieu particulière.



Figure 1.V: Fenêtre générale de ce logiciel Géo-Studio

Ce que nous intéressons le plus parmi ces programmes est *SLOPE/W* qui sera utilisé pour l'évaluation de la stabilité du bord de la carrière.

3.1.2. SLOPE/W [16]

3.1.2.1. Interface de SLOPE/W

Les menus disponibles dans l'interface de SLOPE/W (*Figure 2.V*) et la fonction de chacun sont les suivants:

File:

- Ouverture de nouveaux fichiers ou des fichiers préexistants ;
- Enregistrement des fichiers ;
- Importation ou exportation de fichiers ;
- L'impression du rapport des résultats ;
- La fermeture du logiciel.

Edit:

- Annuler ou revenir à une action qui il a été exécuté ;
- Permettre aussi de copier le dessin dans la Presse-papiers du Windows.

Set:

- la fixation de la dimension de la surface de travail ;
- l'échelle et l'unité de dessin ;
- Définir les paramètres de la grille, le zoom, les axes et de la page.

View (Aperçu):

- Options d'affichage des contrôles, des informations des sols et des points ;

Keyin (menu):

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

Draw (dessin):

- La création de la géométrie du projet par le dessin des régions, lignes ou points ;
- Le dessin de la surface de glissement ;
- Imputer les soles déjà définies à une région.

Sketch (croquis):

- Définit les objets graphiques d'étiqueter, d'améliorer et de clarifier les résultats du problème

Modify (modifier):

- Permet de déplacés, modifier ou supprimés les objets graphiques, les textes et les photos.

Tools :

- Vérifier la justesse du problème par le contrôle et la recherche des erreurs ;
- Le lancement de l'analyse du projet par le calcul de FS, le logiciel utilise de dernier enregistrement dans le calcul.

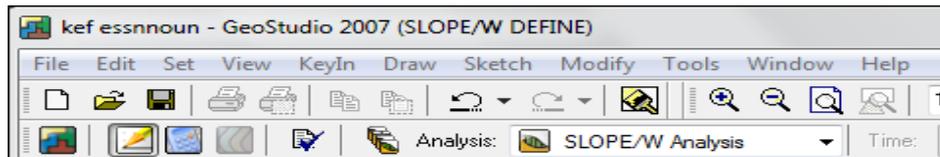


Figure 2.V: Menus disponibles sur logiciel SLOPE/W

3.1.2.2. Domaine d'application de SLOPE/W [16]

Slope/W est utilisé par tout dans le monde et dans divers domaine parmi le quels on trouve le génie civil, génie minier, travaux publique et autre. Ce logiciel peut modéliser et résoudre n'importe quel problème de stabilité y compris :

- Glissement naturel du sol et des roches ;
- Excavation inclinée avec des pentes
- Stabilité des talus, remblai, berge, digue ;
- Stabilité des parois et des bords des mines et carrières à ciel ouvert ;
- Dimensionnement de l'ancrage et les renforcements des structures ;
- La détermination des effets de la surcharge et des vibrations sur une structure.

3.2. Géo5 [15]

3.2.1. Présentation

Le Geo5 Software est un logiciel de modélisation numérique développé et commercialisé par la société FINE pour la conception et l'analyse des problèmes géotechniques dans les différents secteurs, ce logiciel est utilisé dans plus de 90 pays dans le monde, son rôle principal dans l'ingénierie est partout le même, de prouver la stabilité ou l'instabilité des structures et des projets géotechniques.

Geo5 inclut un ensemble de programmes indépendants dont chacun résout un problème géotechnique spécifique (mur de soutènement, ancrage, tonnelle, stabilité des pentes et des roches, tassement, etc.), tous ces programmes sont étroitement liés les uns aux autres et fonctionnent dans le même environnement (Figure 3.V).

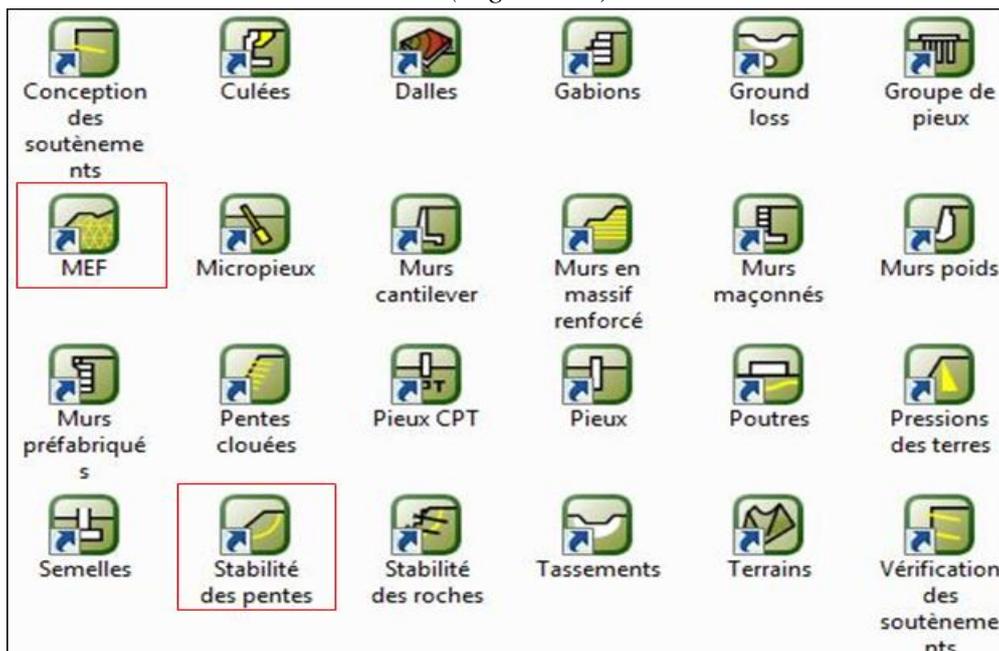


Figure 3.V: Gamme de sous codes du logiciel Géo5

3.2.2. Méthodes de calcul

Le code Géo5 se compose par une large gamme de programmes puissants basés sur les différentes méthodes de calcul tel que l'équilibre limite (*Bishop, Fellenius/Patterson, Spencer, Janbu, Morgenstern-Price, Sarma*) qui effectue le calcul pour différente forme de cercle glissement (circulaire ou polygonale) qui seront définis automatiquement, cette méthode permet aux utilisateurs de concevoir et de vérifier rapidement et efficacement le projet. Le modèle analysé peut être transférée dans l'application **FEM** qui utilise la méthode des éléments finis, cela permet non seulement le gain du temps mais également la comparaison de deux solutions indépendantes, ce qui augmente la sécurité de conception.

3.2.3. Sortie graphique des résultats

L'un des objectifs les plus importants de tout logiciel est de créer une bonne note de calcul en sortie. Les programmes **GEO5** permettent aux utilisateurs de générer facilement une sortie graphique et textuelle claire. Les notes de calcul en sortie peuvent être modifiées selon les besoins spécifiques de l'utilisateur (il est possible d'ajouter le logo de l'entreprise, une image etc.), imprimées ou enregistrées sous format Word ou PDF.

3.2.4. Compatibilité avec les standards

Les approches géotechniques de base appliquées dans les programmes **GEO5** peuvent être utilisées partout dans le monde, même si la plupart des pays adoptent ses propres normes et pratiques. Les programmes **GEO5** appliquent les normes d'une manière unique qui facilite le travail et au en même temps permettent aux utilisateurs de faire la vérification en utilisant tous les approches nécessaires.

3.2.5. Programme utilisé

Dans le cadre de notre étude visant l'évaluation de la stabilité du talus de la carrière de phosphate de Kef Essennoun, nous avons utilisé deux applications du logiciel **GEO5** parmi la gamme exposé dans la *figure 87* qui sont **STABILITE DES PENTES** et **FEM**.

3.2.6. Fonctionnement

L'utilisation du logiciel **Géo5** pour la modélisation numérique d'un problème de stabilité du talus naturel ou artificiel pour une surface de glissement circulaire ou polygonale passe par plusieurs étapes qui sont développés dans **l'Annexe II**.

4. Application

Après avoir présenté les deux logiciels qui seront utilisé pour l'évaluation de la stabilité et le calcul du facteur de sécurité *FS*, on entame la phase de calcul pour la zone concerné, dans cet application nous allons tester la stabilité du bord Nord-Ouest Sud-Est de la carrière en exploitation des phosphate de KEF ESSNOUN (Djebel Onk) par une large gamme des méthodes et approches qui présentent les deux logiciels choisit pour la modélisation pour .

1.1. Choix du profil

Le choix d'un tel profil pour l'étude de stabilité du talus est justifié par les caractéristiques de la zone à étudier et les indices de l'instabilité observés sur le terrain (Observation de certaines signes de glissement au niveau de la crête) et qu'il soit représentatif pour les différentes spécificités surtout la morphologie et la litho-stratigraphie.

Dans le cadre de notre étude, nous avons défini le profil adopté pour la modélisation numérique du bord général de la carrière de Kef Essesnoun, pour obtenir ce profil nous avons utilisé les données cartographiques de délimitation de la zone d'étude présentée dans le chapitre précédent (*Carte topographique DJEBEL ONNG, NI-32-XIV-EST, 1/50 000 et le plan topographique de la carrière actualisé au 31/09/2014*), sur laquelle, nous avons tracé une coupe Nord Ouest –Sud Est. Ensuite, nous avons établi une coupe géologique sur la base des informations disponibles développées dans la reconnaissance géologique du site, à partir de ces deux (profil et coupe géologique), nous avons réalisé notre modèle géométrique retenu pour le **GEO-SLOPE** et **GEO5**.

Il faut noter que le choix de l'emplacement du profil et de la coupe a été fait sur plusieurs considérations dont les plus importants sont l'emplacement et la direction des fissurations et le sens probable du glissement (*Figure 4.5.V*).

Dans le modèle général de la zone objet de cet étude, on trouve un bord hétérogène en exploitation de 650 m de longueur, de 220 m d'hauteur et de pente varie entre 25 à 30%, ce modèle hétérogène est constitué par quatre couches stratigraphiques principales qui sont respectivement de haut vers le bas le calcaire, le phosphate, la marne et le calcaire dolomitique comme substratum. Nous avons aussi présenté l'état d'avancement de l'exploitation de la carrière dont le quel, on a deux gradins dans la couche de phosphate (H~15m et $\alpha= 75$ à 85°) et trois gradins de calcaire stérile (H~10m et $\alpha= 70$ à 80°) (*Figure 4.V*).

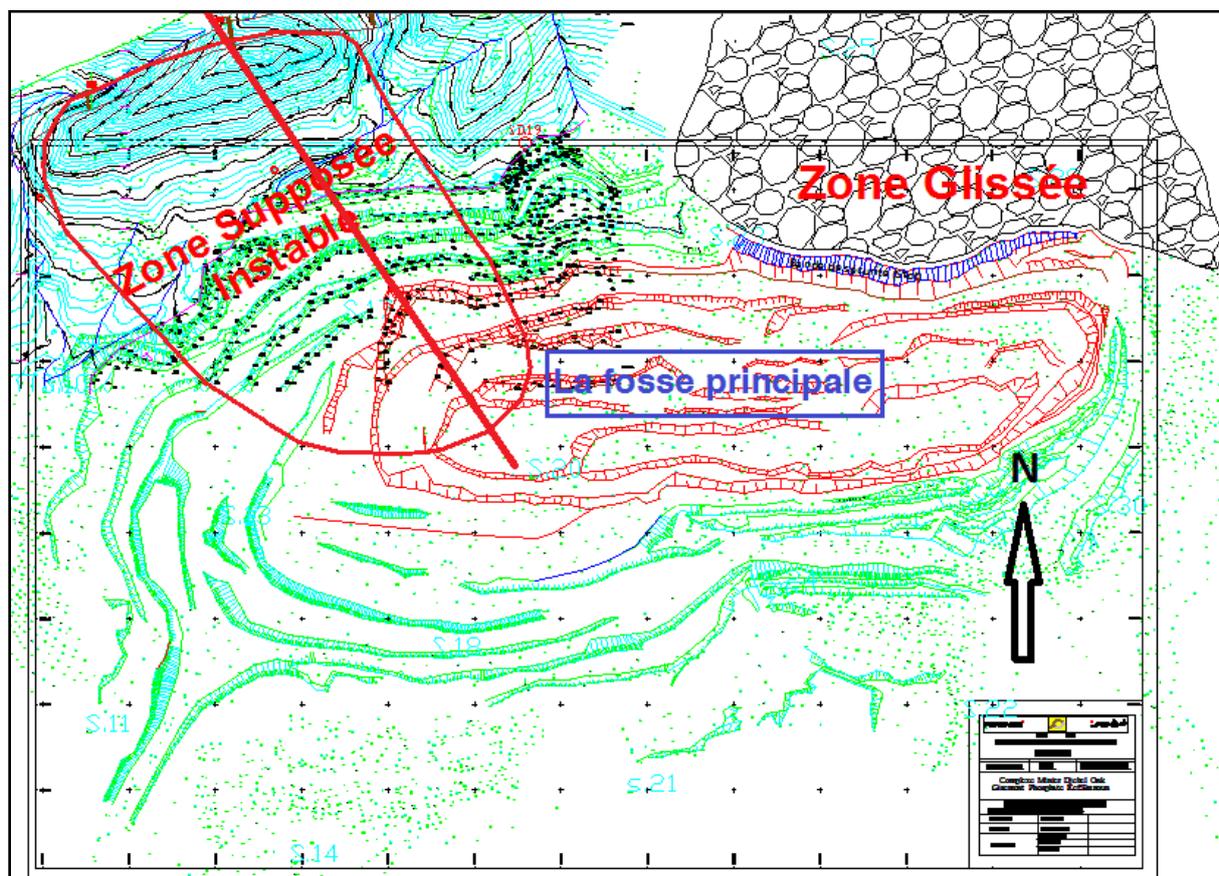


Figure 4.V: État actuel de la carrière et l'emplacement de la coupe

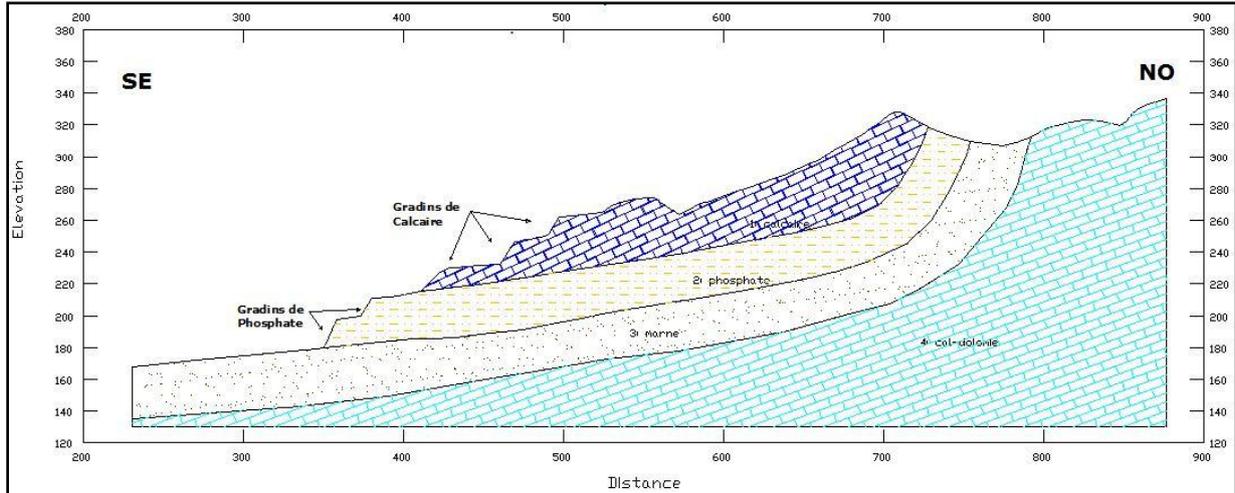


Figure 5.V: Modèle géométrique retenu pour la simulation avec SLOPE/W et GEO5

1.2. Modélisation par SLOPE/W

Une fois notre modèle géométrique du bord est défini, nous l'importons dans le sous code SLOPE/W (Sous code de GEO-SLOPE) après, nous devons intégrés les principales composantes afin de déterminer les facteurs de sécurité FS par les différentes méthodes de calculs et les comparer par la suite entre eux. Ces composantes sont les propriétés du sol à savoir le type de sol, le poids volumique, ses valeurs en contraintes effectives (C' , ϕ'), le niveau piézométrique et la sismicité s'il existe. Dans notre travail, deux approches de calcul ont été considérées dans lesquelles la stabilité du modèle est étudiée sous l'action seul du poids propres du massif, sans nappes, et sans succions, en ce qui concerne la sismicité, nous avons étudié les deux cas sous et sans l'effet de sismicité. Cette dernière est due principalement aux travaux de minage (tir minier) réalisé quotidiennement au niveau de la carrière avec une moyenne de trois tir par jour, deux dans le stérile et l'autre dans le minerai. Les vibrations liées au dynamitage ont été mentionnées dans le rapport d'expertise de M-BOUGDAL par les deux accélérations horizontale et vertical $A_h/g=0.05$ et $A_v/g=0.0125$.

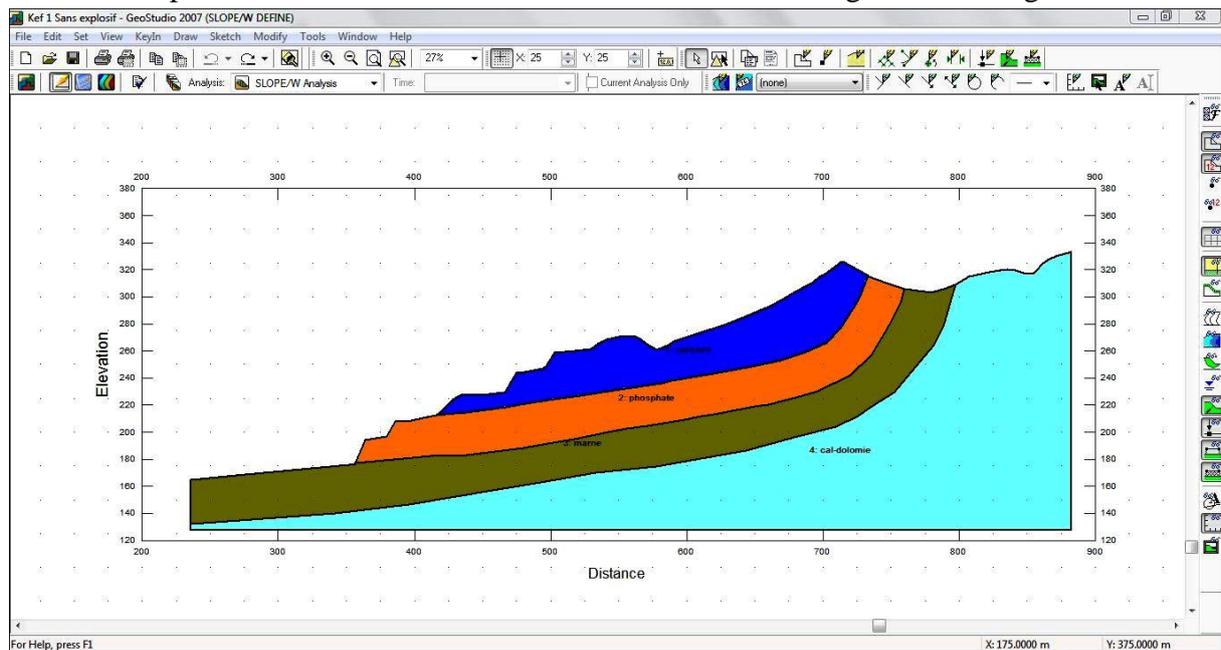


Figure 6.V: Le modèle géométrique dans l'interface du logiciel SLOPE/W

1.2.1. Résultat de simulation

Dans cette partie, nous avons présenté d'une part, les résultats des modélisations en considérant premièrement le bord qu'avec les caractéristiques mécaniques des quatre couches étudiées expérimentalement et deuxièmement, on ajoute les conditions sismiques (les effets du tir minier) comme élément déclencheur, et d'autre part, nous avons présenté l'ensemble des simulations de ce bord et mené une étude de comparaison pour les différentes méthodes de stabilité classiques retenues dans le modules. (*ORDINAIRE, BISHOP, JANBU et M-P*).

1.2.1.1. Facteur de sécurité

Les résultats de la simulation de cette approche notamment les facteurs de sécurité pour les quatre méthodes d'équilibre limité utilisées dans SLOPE/W sont présentés dans la *figure 6.V*.

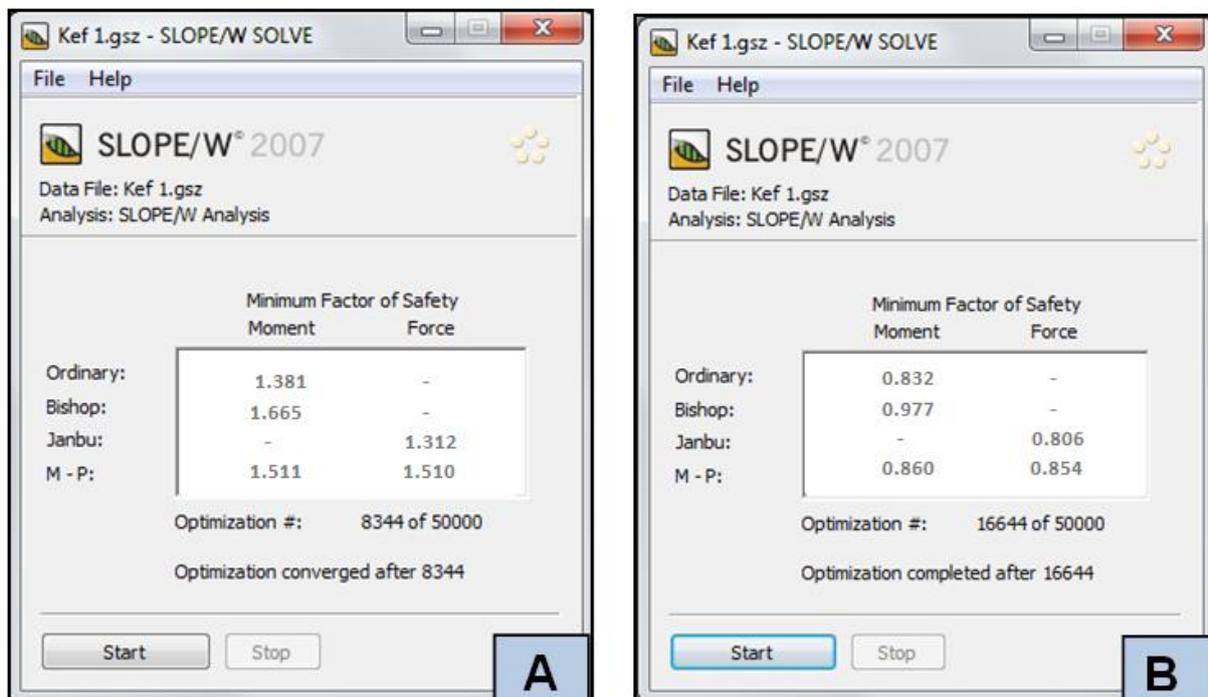


Figure 6.V: FS donné par SLOPE/W (A : sans l'effet des explosifs, B : avec explosif)

D'après la *figure 6.V*, on constate que les facteurs de sécurité donnés par les différentes méthodes pour la première approche dans laquelle, nous n'avons pas pris en considération les effets des tirs miniers sont supérieurs au seuil minimal considéré pour la stabilité du talus ($FS > 1$), ce qui implique que le bord est dans un état de stabilité (*figure A*), en revanche, dans le deuxième cas ou, nous avons introduit les accélérations horizontales et verticales générées par les travaux de minage (d'après M-BOUGDAL $A_h/g=0.05$ et $A_v/g=0.0125$), les facteurs de sécurité sont inférieurs à 1.

1.2.1.2. Surface de glissement

Les figures suivantes présentent la surface de rupture critique pour le facteur de sécurité minimal donné par le logiciel pour les deux cas étudiés avec le tranchage de la masse soupçonnée instable. Dans les deux cas que ce soit avec ou sans explosifs, on remarque que la surface du glissement a une forme non circulaire (polygonale) et se localise dans la couche des marnes, d'un autre côté, on voit bien que dans le premier cas (*figure 7.V*) le volume de la masse rocheuse instable est légèrement inférieur par rapport au deuxième (*figure 8.V*).

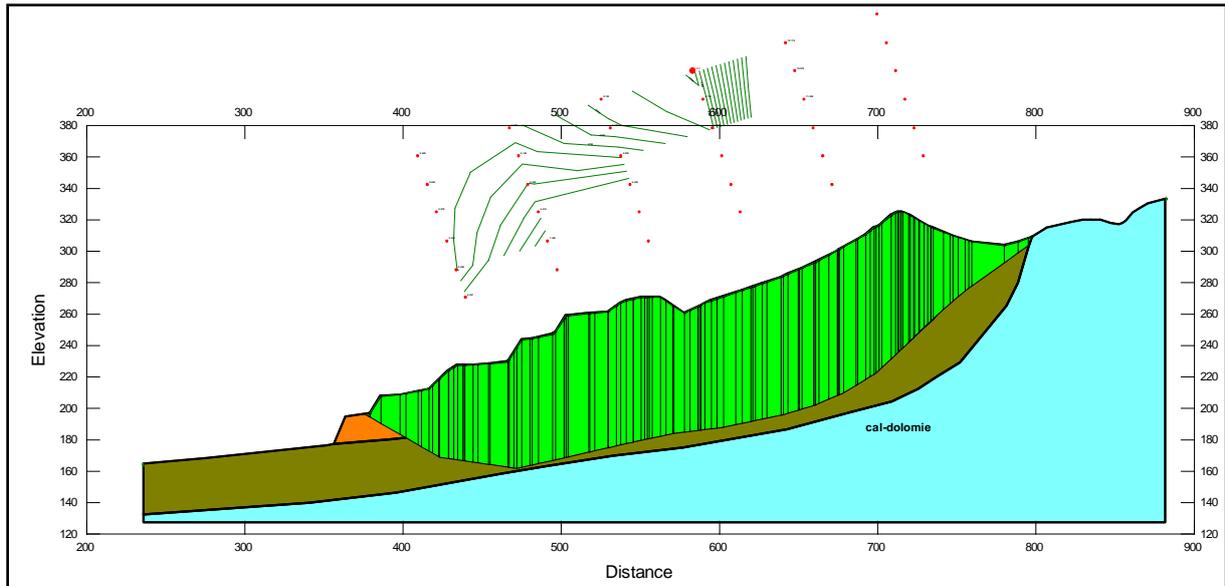


Figure 7.V: Résultats de la simulation donnés par SLOPE/W (sans l'effet des explosifs)

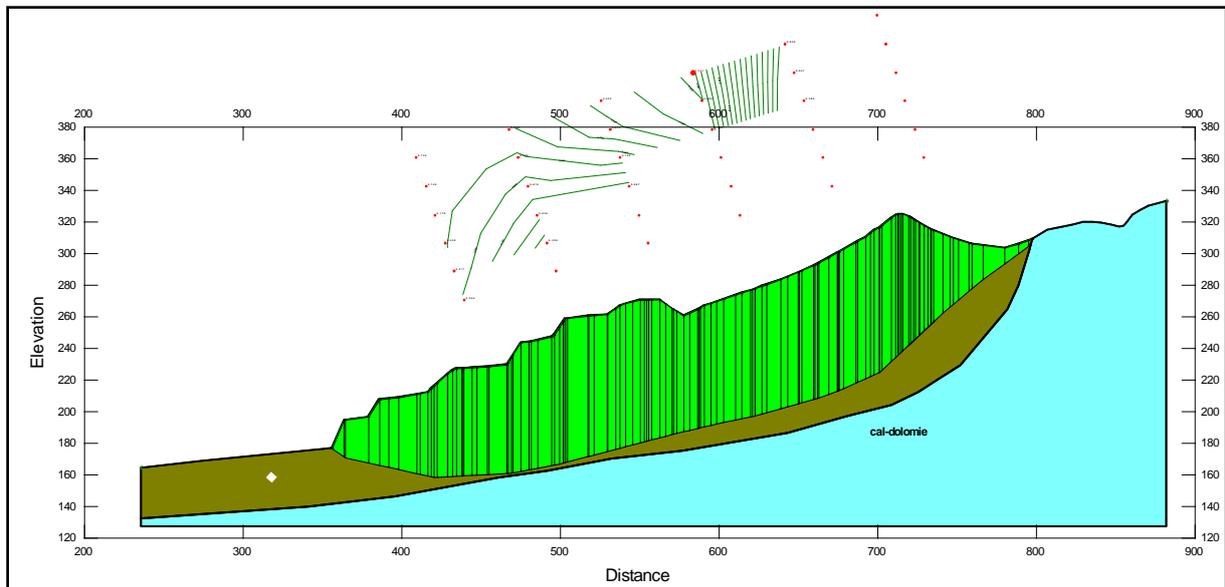


Figure 8.V: Résultats de la simulation donnés par SLOPE/W (Avec l'effet des explosifs)

1.2.1.3. Informations pour chaque tranche

Les forces appliquées sur chaque tranche peuvent être vérifiées en utilisant la commande “*Slice Information*” dans le menu “*View*”, une fois, nous avons sélectionné cette commande, nous pouvons cliquer sur n’importe quel tranche pour avoir son diagramme avec les différentes forces appliquées. Ce diagramme inclut toutes les informations utilisées par SLOPE/W pour le calcul de *FS*.

La figure 9.V représente comme exemple les informations de la tranche N°37 pour les deux cas respectivement sans et avec l’influence des vibrations dues au tir minier. Nous pouvons également tracer la variation des forces motrices et résistantes le long de la surface de glissement avec la commande “*Graph*” dans le menu “*View*”, les figures 11,12.V montre la distribution de ces forces le long de la surface de glissement pour chaque tranche. Nous remarquons que le ratio des forces résistantes et motrices est toujours constant, ce ratio représente le facteur de sécurité local de chaque tranche et qui est lui-même le *FS* globale

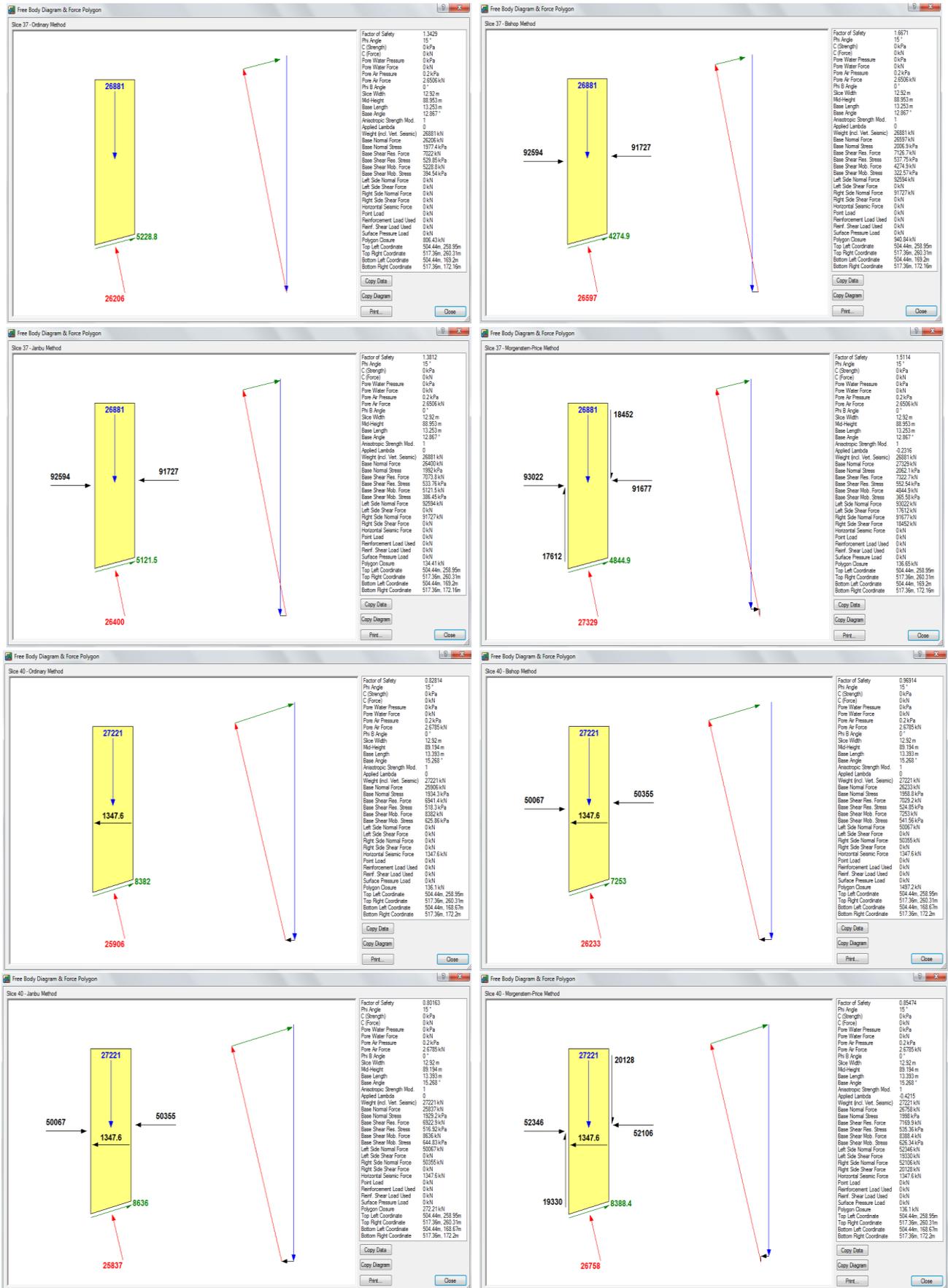


Figure 9.V: Informations pour chaque tranche (Tranche N°:37) (sans et avec l'effet des explosifs)

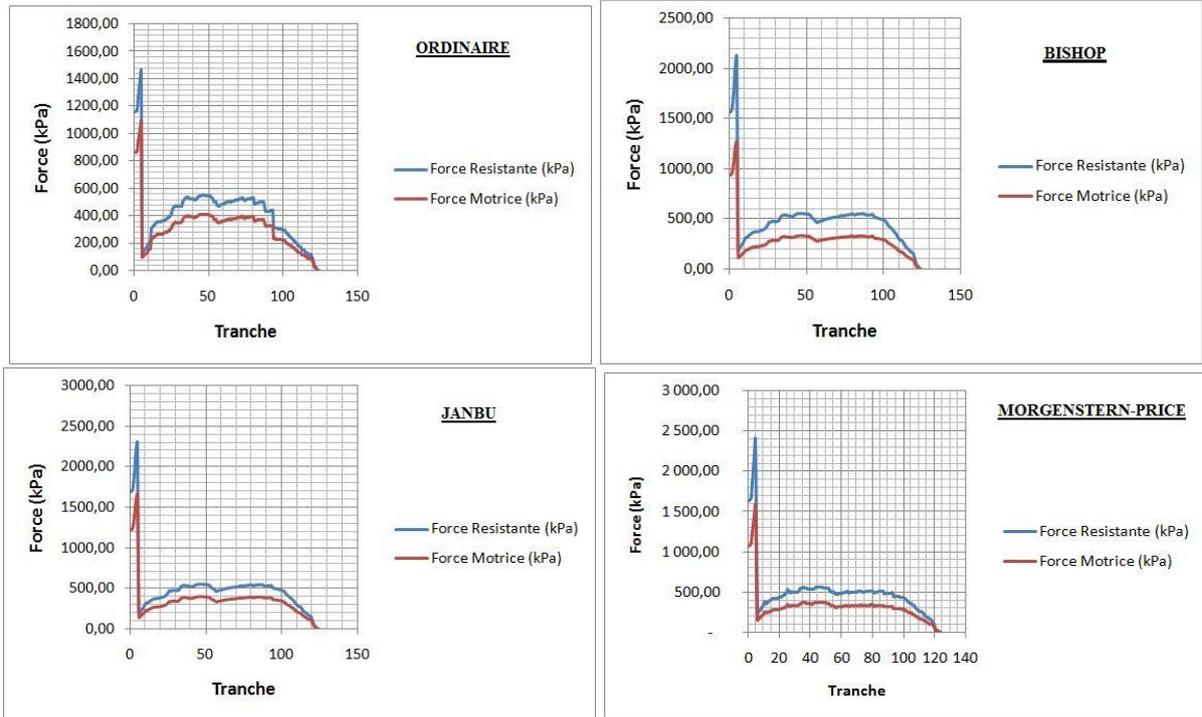


Figure 11-V: Variation des forces résistantes et motrices pour chaque tranche (sans l'effet des explosifs)

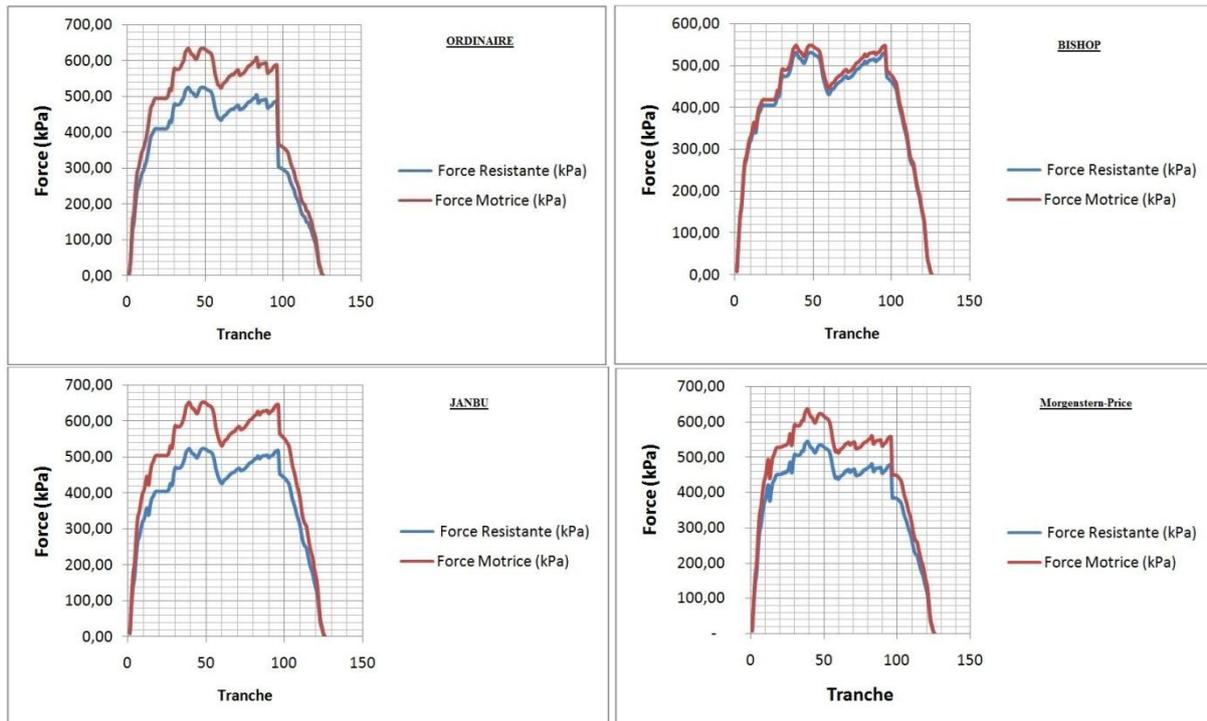


Figure 12.V: Variation des forces résistantes et motrices pour chaque tranche (Avec l'effet des explosifs)

4.3. Modélisation par GEO5

Comme il a été mentionné dans l'introduction du chapitre, le deuxième logiciel utilisé dans la modélisation du bord N-O de Kef Essennoun c'était **GEO5**, le but de cette deuxième modélisation est de conformer et comparer les résultats obtenus avec **GEO-SLOPE**, à cet effet, nous avons introduit le même modèle géométrique avec les propriétés des sols et les conditions du calcul identique que celle utilisés auparavant dans **SLOPE/W**. Autrement, la modélisation avec **GEO5** avait été effectuée avec deux méthodes tout à fait différentes qui sont la méthode de l'équilibre limite et celle des éléments finis MEF.

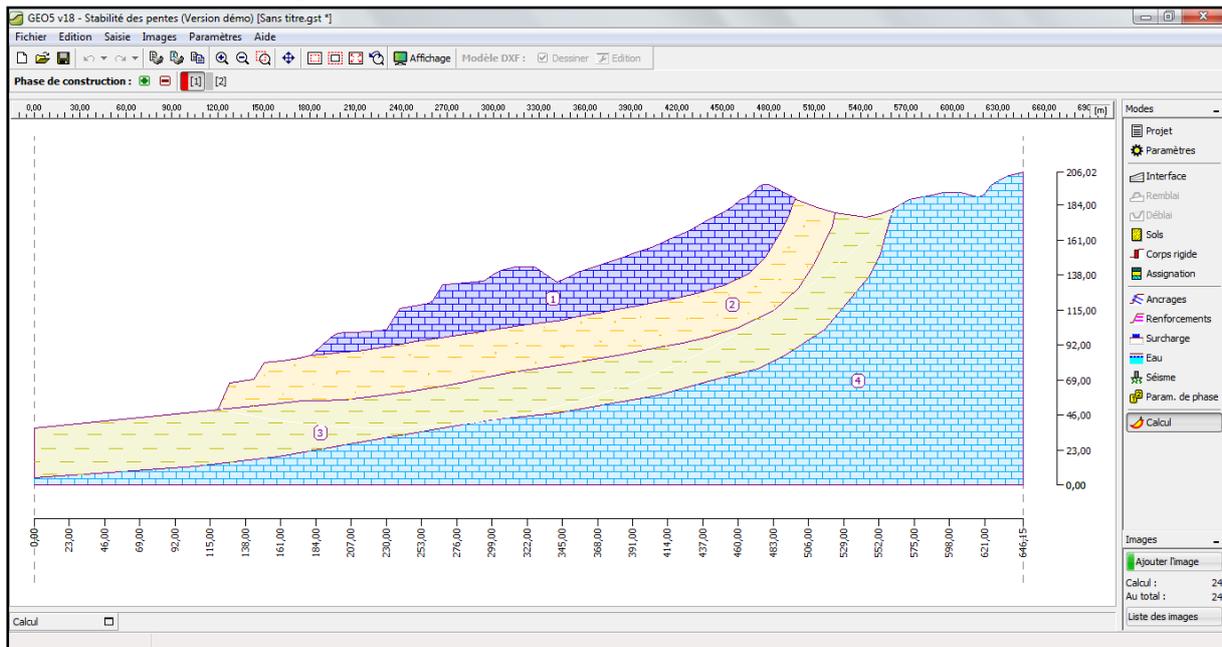


Figure 13.V: Le modèle géométrique retenu dans l'interface du logiciel GEO5

4.3.1. Méthode d'équilibre limite

Au contraire du **SLOPE/W** qui cherche automatiquement la forme et l'emplacement de la surface du glissement, la modélisation numérique avec le sous code *Stabilité des Pentés* de **GEO5** pour les différentes méthodes de l'équilibre limité qui les exploite (*BISHOP*, *FELLENUS/PATTERSON*, *SPENCER*, *JANBU*, *MORGENSTERN-PRICE*, *SARMA*), nous donne la possibilité de choisir la forme de la surface du glissement qui est favorisée par le type de terrain, circulaire ou polygonale afin de trouver la surface critique pour le FS minimal, dans notre cas, les résultats obtenus pour les deux approches traitées (sans et avec explosif) sont :

1.2.1.4. Surface du glissement circulaire

➤ Surface de glissement

Dans ce cas, nous remarquons que les surfaces du glissement sont identiques pour les deux approches (figure 14,15.V) pour l'ensemble des méthodes utilisées et se localisent dans la couche des marnes entre la couche productrice de phosphate et le substratum de calcaire dolomitique, les principaux paramètres de cette surface (*Centre et Rayon*) sont présentés dans le tableau 1.V:

Surface de glissement circulaire		
Centre	X	170.66 m
	Y	647.90 m
Rayon	R	618.11 m

Tableau 1.V: Centre et rayon de la surface du glissement critique circulaire

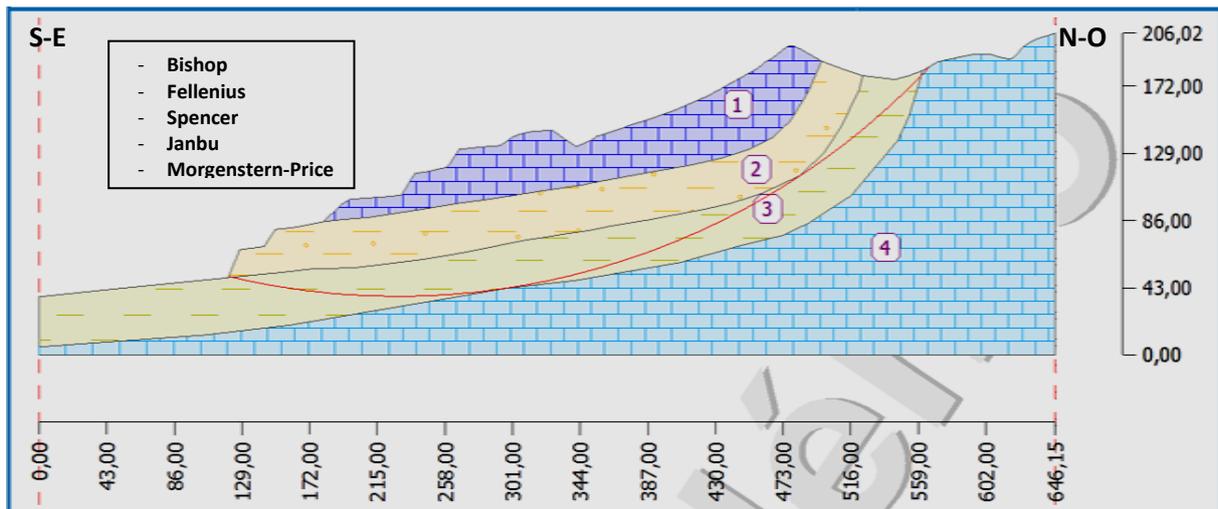


Figure 14.V: Le modèle géométrique avec la surface du glissement circulaire donné par GEO5 (sans l'influence de l'explosif)

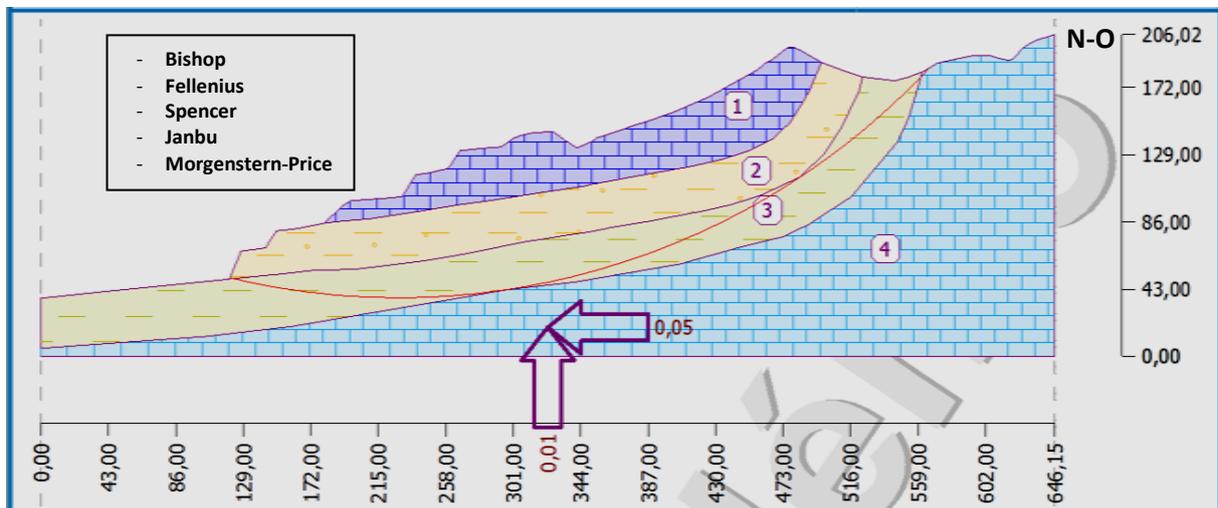


Figure 15.V: Le modèle géométrique avec la surface du glissement circulaire donné par GEO5 (avec l'influence de l'explosif)

➤ **Facteur de sécurité**

Le tableau 2.V contient les facteurs de sécurité obtenus par les différentes méthodes pour les deux cas étudié avec et sans les effets des explosifs, d'après ces résultats, on observe que tous les facteurs de sécurité trouvés par les différentes méthodes dans le cas où nous avons ignoré les vibrations de tir minier sont supérieur à 1, par contre, ils sont inférieurs à 1 dans le deuxième cas la où, nous avons introduit les effets des explosifs.

Surface De Glissement Circulaire				
Méthode	Avec les effets des explosifs		Sans les effets des explosifs	
	FS	Observation	FS	Observation
Bishop	0,96	Non Admissible	1,12	Admissible
Fellenius / Petterson	0,92	Non Admissible	1,07	Admissible
Spencer	0,95	Non Admissible	1,13	Admissible
Janbu	0,97	Non Admissible	1,71	Admissible
Morgenstern-Price	0,97	Non Admissible	1,20	Admissible

Tableau 2.V: Facteur de sécurité donné par GEO5 pour les différentes méthodes (Surface du glissement circulaire)

1.2.1.5. Surface du glissement polygonale

➤ Surface de glissement

Dans le cas de la surface de glissement polygonale représenté dans les figures 16,17.V, nous remarquons que pour les deux approches étudiées (sans et avec les effets de tir minier à l'explosifs), les surfaces de glissements sont légèrement différentes d'une méthode à l'autre. Cette différence a touché principalement la forme, la profondeur et l'escarpement de ces surfaces, cependant, ces dernières sont toujours localisées dans la couche des marnes.

Les coordonnées des points des surfaces de glissement fournies par le logiciel sont données dans le tableau suivant:

Points	SARMA		SPENCER		JANBU		M-P	
	X	Z	X	Z	X	Z	X	Z
1	24,71	39,73	21,58	39,4	97,04	46,99	68,62	44,17
	36,91	41,01	39,99	41,33	100,2	47,31	70,37	44,35
2	115,85	16,15	126,85	16,16	114,63	16,16	123,66	16,16
	115,85	16,15	126,57	16,15	118,33	14,68	122,42	14,68
3	268,37	59,16	266,18	41,05	258,95	52,75	258,5	40,87
	291,28	59,16	287,69	43,88	299,7	56,12	292,71	45,37
4	321,67	68,02	321,67	59,59	302,42	54,7	299,55	54,7
	321,67	68,02	321,67	55,39	320,47	55,39	320,47	55,39
5	523,86	117,64	509,45	117,64	509,45	117,64	509,45	117,64
	523,86	117,64	501,47	117,64	501,47	117,64	501,47	117,64
6	225,49	180,81	558,49	180,81	558,49	180,81	558,49	180,81
	558,49	180,81	562,43	182,46	543,21	176,37	540,18	176,75

Tableau 3.V: Coordonnées des points des surfaces des glissements critiques polygonaux les lignes grises approche avec explosif et les lignes blanches sans explosif

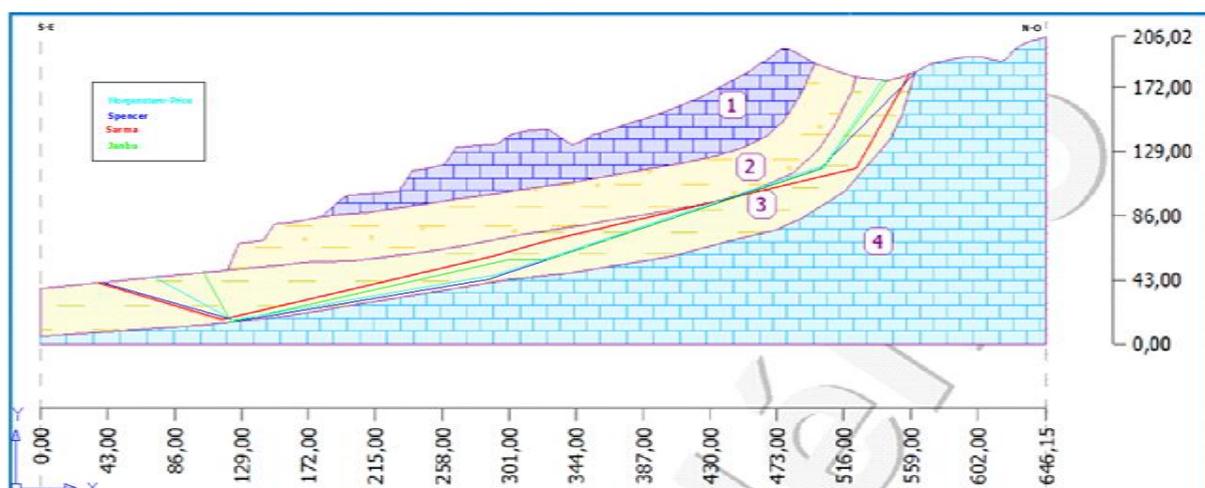


Figure 16.V: Le modèle géométrique avec la surface du glissement polygonale optimisé par GEO5 (Sans l'influence de l'explosif)

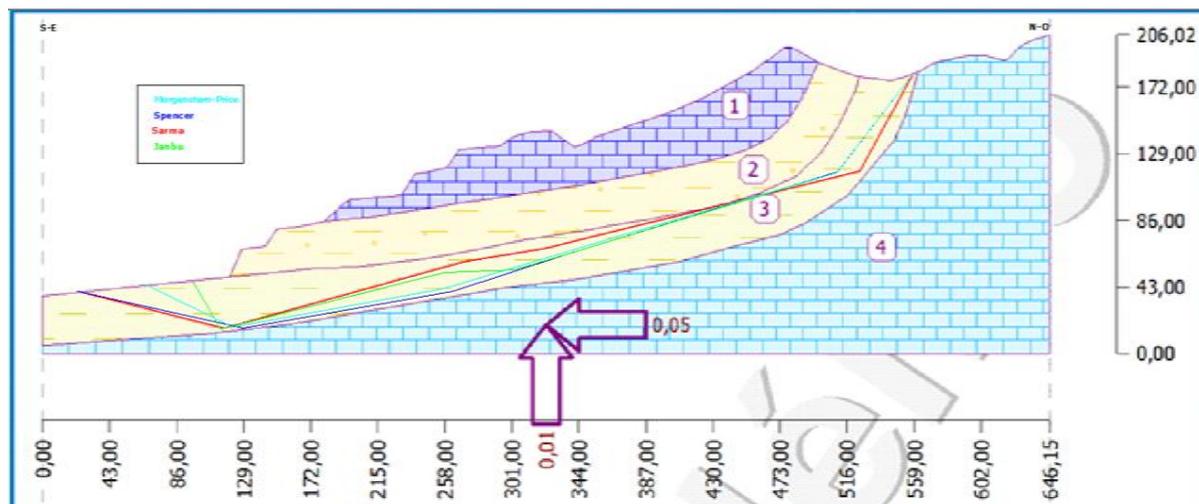


Figure 17.V: Le modèle géométrique avec la surface du glissement polygonale optimisé par GEO5 (Avec l'influence de l'explosif)

➤ **Facteurs de sécurité**

Pour ce cas, les méthodes utilisées par GEO5 sont SARMA, SPENCER, JANBU et MORGENSTERN-PRICE, en comparant les résultats du tableau 4.V avec celles trouvés pour une surface de glissement circulaire, nous pouvons constater que les facteurs de sécurité obtenus sont diminués pour les deux approches avec toujours une influence considérable des tirs miniers. On remarque aussi que les FS donnés par la méthode de JANBU et M-P sont inférieurs à 1 même pour la deuxième approche (FS=0.94 et 0.98):

Surface de glissement polygonale				
Méthode	Avec les effets des explosifs		Sans les effets des explosifs	
	FS	Observation	FS	Observation
Sarma	0,90	NON ADMISSIBLE	1,07	ADMISSIBLE
Spencer	0,87	NON ADMISSIBLE	1,01	ADMISSIBLE
Janbu	0,81	NON ADMISSIBLE	<u>0,94</u>	NON ADMISSIBLE
Morgenstern-Price	0,83	NON ADMISSIBLE	<u>0,98</u>	NON ADMISSIBLE

Tableau 4.V: Les facteurs de sécurité donné par GEO5 pour les différentes méthodes (Surface de glissement Polygonale)

4.3.2. Méthode des éléments finis MEF

Enfin, nous avons transférer le modèle vers le sous code MEF de GEO5 dans le but de recalculer le facteur de sécurité par la modélisation avec la méthode des éléments finis, l'intérêt de cet approche et de bénéficier au maximum de ses avantage à réduire au maximum les erreurs d'évaluation de FS, ainsi que sa capacité à représenter le comportement du massif soumis à des grandes déformations dans les zone exposé aux risques d'éboulements ou affaissements. La figure 18.V représente l'interface de MEF avec le modèle géométrique utilisé pour la modélisation.

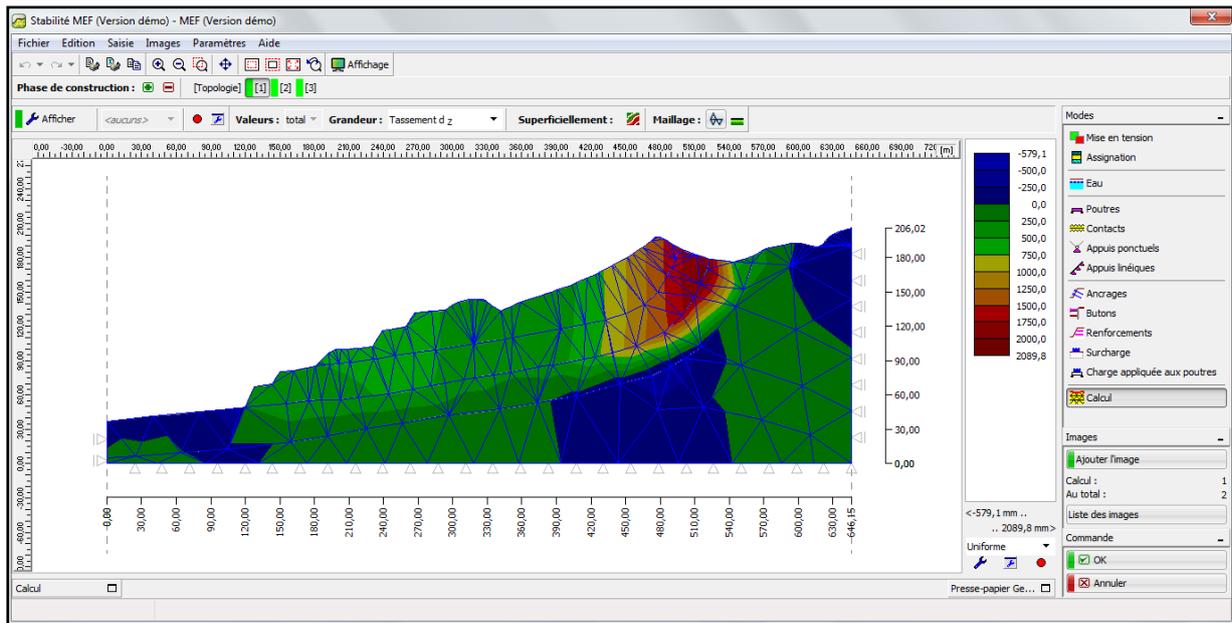


Figure 18.V: Le modèle géométrique retenu dans l'interface du sous code MEF

1.2.1.6. Maillage

La définition des paramètres basiques des mailles est la première étape lors de la génération de maillage, ce dernier représente à son tour la phase principale dans la modélisation avec la méthode des éléments finis MEF car, la forme (triangulaire carré..) et la taille des mailles influent considérablement sur les résultats. Dans notre cas, et comme le montre la figure 19.V, nous avons utilisé un maillage de type triangulaire pour la modélisation du bord N-O de KEF ESSNOUN par la MEF.

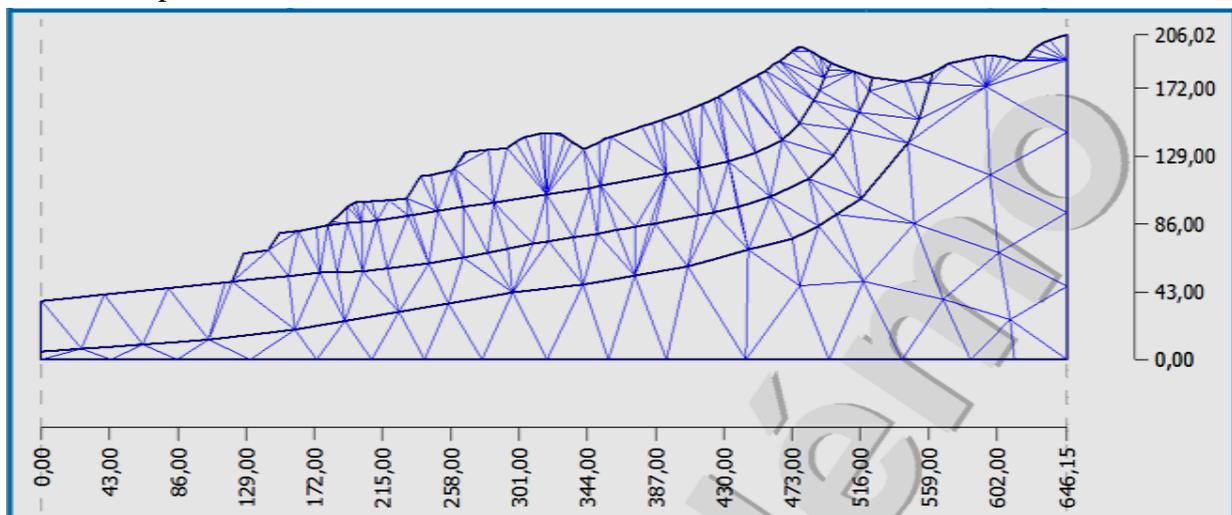


Figure 19.V: Maillage généré par le sous code MEF

1.2.1.7. Facteur de sécurité et degré de déformation

La méthode du calcul de facteur de sécurité exploitée par le sous code MEF lors de la modélisation avec l'approche des éléments finis est celle de **Newton-Raphson**, le FS obtenu par cette méthode est **FS=0.99** qui reste proche des celles obtenus par les autres modélisations dans le cas où, nous prenons en considération l'effet de minage.

Notre logiciel peut aussi donner une prévision sur le degré de la déformation qui pourra être produite avec ce facteur de sécurité (figures 20,21.V).

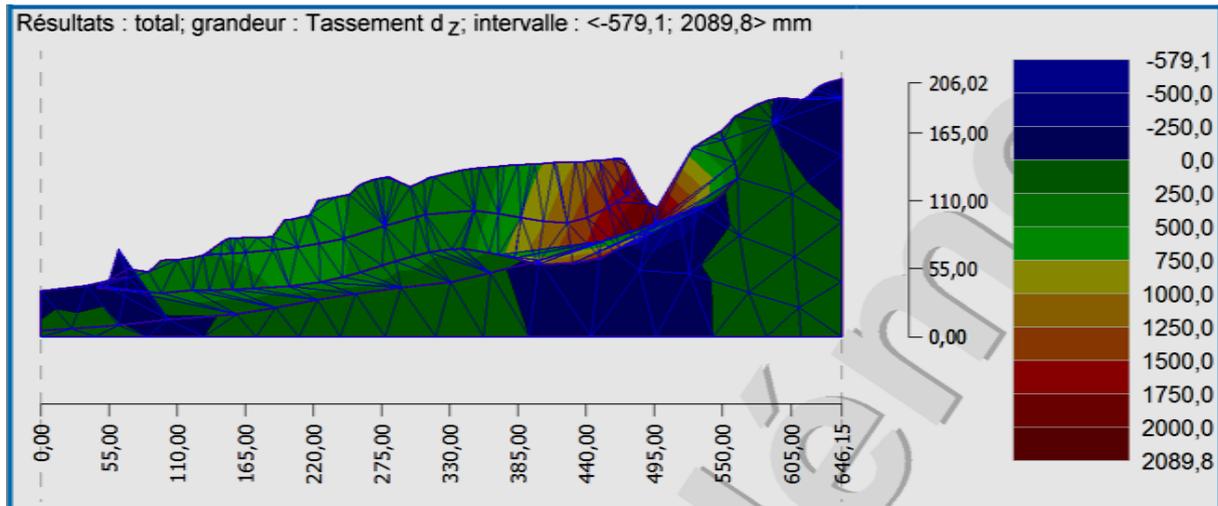


Figure 20.V: Maillage et degré de déformation du bord donné par le sous code MEF

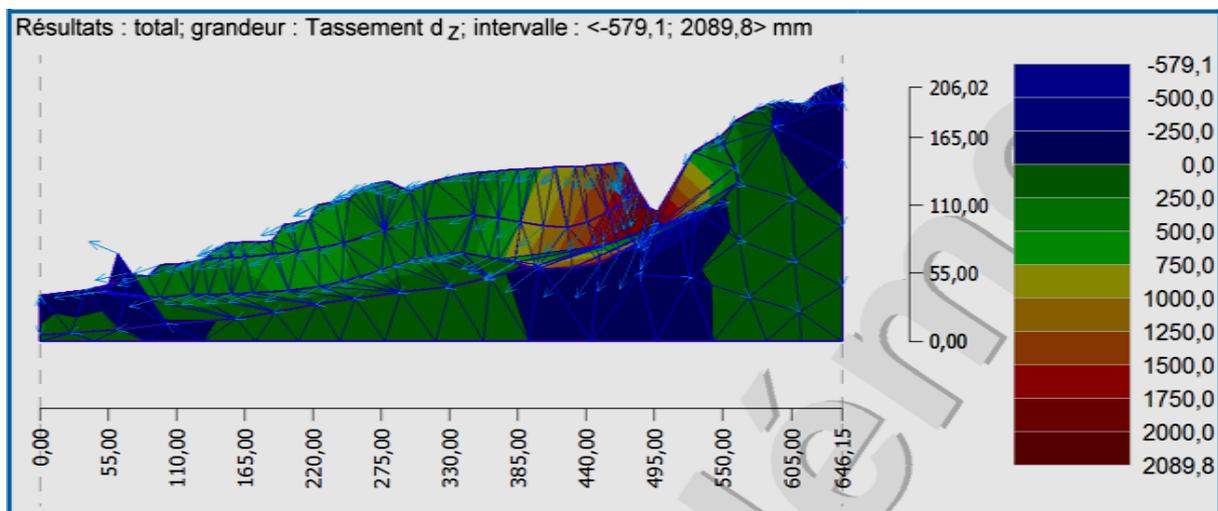


Figure 21.V: Les vecteurs du champ de déplacement

Les résultats fournis par le code **GEO5** suite à la modélisation numérique avec la méthode des éléments finis n'inclut pas la forme et la position de la surface du glissement, cependant, les *figures 20,21.V* qui montrent la déformation probable du bord avec les vecteurs du champ de déplacement donnent une idée sur cette surface dans laquelle, elle apparaît clairement sous une forme polygonale.

5. Interprétation des résultats

Cette étude de modélisation numérique a permis, dans le cadre de notre modèle considéré du bord N-O de la carrière de Kef Essennoun, de réaliser une analyse plus poussée sur l'état de la stabilité de ce bord. Le *tableau 5.V* présente la récapitulation de différents facteurs de sécurité obtenus avec les deux codes utilisés pour l'ensemble des méthodes disponibles.

	GEO-STUDIO	GEO5		
	SLOPE/W	Stabilité des Pentes		MEF
		Surface du Glissement Circulaire	Surface du Glissement Polygonale	
Bishop	0.98	0.96	-	-
	1.66	1.12	-	-
Janbu	0.81	0.97	0.81	-
	1.31	1.71	0.94	-
Morgenstern-Price	0.86	0.97	0.83	-
	1.51	1.20	0.98	-
Spencer	-	0.95	0.87	-
	-	1.13	1.01	-
Sarma	-	-	0.90	-
	-	-	1.07	-
Fellenius	-	0.92	-	-
	-	1.02	-	-
Ordinaire	0.83	-	-	-
	1.38	-	-	-
Newton-Raphson	-	-	-	-
	-	-	-	0.99

Tableau 5.V: Récapitulation des résultats donnés par les trois sous codes (les lignes grises approche avec explosif et les lignes blanches sans explosif)

Les figures présentées ci-dessus ainsi que les résultats de calcul de *FS* avec la gamme des approches réalisées auparavant mènent à constater que :

GEO-STUDIO

Les résultats donnés par ce logiciel pour l'ensemble des méthodes (BISHOP, JANBU, M-P, ORDINAIRE) montre que le bord N-O de Kef Essennoun est instable dans le cas où on utilise les explosifs de dynamitage car, tous les facteurs de sécurité obtenus sont inférieurs à la limite considérée ($FS < 1$), cette instabilité est due essentiellement aux vibrations générées suite à l'usage de cette substance qui joue le rôle d'un facteur déclencheur du glissement, son influence arrive à diminuer le *FS* d'un taux de 40% de sa valeur réelle. Les vibrations sont représentées généralement par une accélération horizontale et verticale qui sont respectivement $A_h/g=0.05$ et $A_v/g=0.0125$ pour les tirs de la carrière de Kef Essennoun. Ces résultats indiquent aussi que la surface du glissement a une forme non circulaire (polygonale) et se localise dans la couche marneuse.

La comparaison entre les valeurs du facteur de sécurité pour les quatre méthodes exploitées par **SLOPE/W** montre l'existence d'une légère différence entre eux que ce soit pour la première ou la deuxième approche :

- Approche 1 (Sans les effets des explosifs)

Dans cette approche tous les facteurs de sécurité sont supérieurs à 1 ce qui signifie que le bord est stable avec un *FS* minimal donné par la méthode de *JANBU* ($FS=1.31$) et maximal obtenu par celle de *BISHOP* ($FS=1.66$), cela se justifie par le fait que, d'une part la méthode de *JANBU* qui ne satisfait que l'équilibre des force et prend en considération les forces normale inter-Tranches donne des valeurs de *FS* plus faible que les autres méthodes

(Résultats médiocres) avec une différence qui varie de 5 à 20%, d'autre part, la méthode de *BISHOP* qui vérifie uniquement l'équilibre des moments a donné un FS surestimé. Nous pouvons remarquer aussi que le résultat obtenu par la méthode de *MORGENSTERN-PRICE* est le plus précis car, cette méthode satisfait toutes les conditions d'équilibre limite.

- Approche 2 (Avec les effets des explosifs)

Comme, il a été mentionné auparavant, l'utilisation des explosifs influe énormément sur l'instabilité du bord surtout dans une structure géologique stratiforme, fissurée et faillée avec l'existence des plans de stratifications et des couches intercalaires des argiles et des marnes qui favorisent le déplacement des ondes verticales et horizontales de la vibration. Toutes ces conditions ont abouti aux facteurs de sécurité $FS < 1$. En ce qui concerne la différence entre les *FS*, c'est presque la même chose qu'avec l'approche précédente.

GEO5

Le calcul effectué par le code **GEO5** rentre dans le cadre de la conformation et le renforcement des résultats acquis par **SLOPE/W**.

- Nous commençons d'abord par les méthodes utilisées dans le calcul qui ne sont pas les mêmes pour les surfaces de glissements circulaires et polygonales, ce qui implique qu'il y a des méthodes destinées pour les glissements circulaires (*BISHOP ET FELLENIUS*), d'autres pour les glissements non circulaire (*SARMA*) et d'autres méthodes calcules les deux types de glissements (*JANBU, MORGENSTERN-PRICE, SPENCER*).
- Les facteurs de sécurité restent toujours inférieurs à 1 pour la deuxième approche dans les deux types de cercle de glissements, par contre, dans la première approche, ils ont pris des valeurs inférieurs à 1 pour une surface de glissement polygonale ce qui signifie que la forme de la surface de glissement est probablement polygonale.
- L'existence d'un taux de variation entre les facteurs de sécurité due aux spécificités de chaque méthodes (Vérification de l'équilibre des forces, des moments, la prise en considération des forces inter-tranches verticales, horizontales).
- Dans le cas d'une surface de glissement polygonale, on observe une légère différence de la forme et la profondeur de ces surfaces d'une méthode à l'autre (*figures 16,17.V*) mais elles restent toujours dans la couche des marnes, ce résultat peut être justifié par les caractéristique géo-mécanique (C, ϕ) médiocre de celle-ci.
- Pour la méthode des éléments finis le sous code **MEF** ne fournis pas l'emplacement et la forme de la surface du glissement, cependant, en se basant sur les deux *figures 20,21.V* qui montrent les vecteurs de déplacements et le degré de déformation du bord, nous pouvons la représenter sous une forme polygonale et elle se localise toujours dans la même couche.

6. Conclusion

A la fin de ce chapitre dans le quel, nous avons utilisé les instruments informatiques pour l'évaluation de la stabilité du bord N-O de la carrière des phosphates de Kef Essennoun à l'aide de la modélisation numérique avec les logiciels **GEO-STUDIO** et **GEO5**, nous pouvons constater ce qui suit :

- L'utilisation des outils informatiques dans le domaine de géotechnique à savoir le calcul de la stabilité des pentes ou des ouvrages a beaucoup simplifier le calcul pour l'ingénieur géotechnicien et il lui a donné la possibilité d'utiliser des méthodes sophistiquées comme celles des éléments finis, méthodes des tranches et les méthodes qui calculent le facteur de sécurité par itération, ces méthodes nécessite des calculs fastidieux et ne peut se faire qu'avec des ordinateurs ;
- La simplicité et l'efficacité de la conception et l'utilisation de ces codes dont lequel, les utilisateurs n'ont pas besoin d'une formation spéciale ;
- Les résultats obtenus par les différentes méthodes exploitées par ces logiciels tel que les méthodes de l'équilibre limite (*BISHOP, JANBU, FELLENUIS, M-P...*) basé sur l'équilibre des tranches ou l'équilibre global et la méthode des éléments finis (*NEWTON-RAPHSON*) ont données des résultats plus ou moins proches de facteurs de sécurité;
- Tous les résultats obtenus par les différentes méthodes notamment les facteurs de sécurité montrent que le bord de Kef Essennoun est instable ($FS < 1$) dans le cas où, nous utilisons les substances explosifs, ces résultats renforcent celles obtenus suite aux travaux de surveillances des fissurations;
- La surface du glissement probable aura une forme polygonale et se localise dans la couche des marnes ce résultat est presque le même que celle trouvé avec le inclinomètre.

Chapitre VI : Plan De Réouverture De La Carrière de Kef Essennoun

1. Introduction

Suite aux résultats obtenus dans le chapitre précédent concernant l'état de la stabilité du bord Nord-Ouest de la carrière, nous recommandons très impératif d'abandonner immédiatement les travaux dans cette zone car, les résultats de l'évaluation de la stabilité ont montré que cette zone est susceptible d'être en mouvement ($F_s < 1$) dans les conditions d'exploitation actuelles. Pour cet effet, nous proposons un nouveau plan de développement de l'exploitation du gisement dont le but de stabiliser les parois de la fosse et la récupération au maximum des réserves existantes en place dans des conditions de sécurité pour le personnel et le matériel.

2. Situation actuelle de la carrière

Au moment de mon stage de terrain, Kef Essennoun était le seul gisement en exploitation parmi les quatre existants dans le champ minier de Djebel Onk (*Kef Essennoun, Djemi-Djema, Djebel Onk Nord, Bled Hadba, Oued Betita*). Le gisement est une mine à ciel ouvert, constituée de plusieurs gradins en forme d'une fosse avec une superficie globale de 35 hectares et une profondeur de presque 60m, cette fosse est constituée par quatre gradins principaux de 15 mètre, deux dans la couche de phosphate et deux autres dans le terrain de découverte.

Dans le Nord - Est de la fosse, nous observons l'énorme éboulement produit en 2007 (estimé à environ de 7.7Mm^3 bloqué par un mur de soutien (STOT) de roche phosphatée laissé en place dans le but d'arrêter le mouvement, dans l'autre côté, on trouve la zone préconisée instable (Flanc Nord-Ouest) et au sud, nous avons le stock de la roche stérile de la mine (Figure 1.VI).

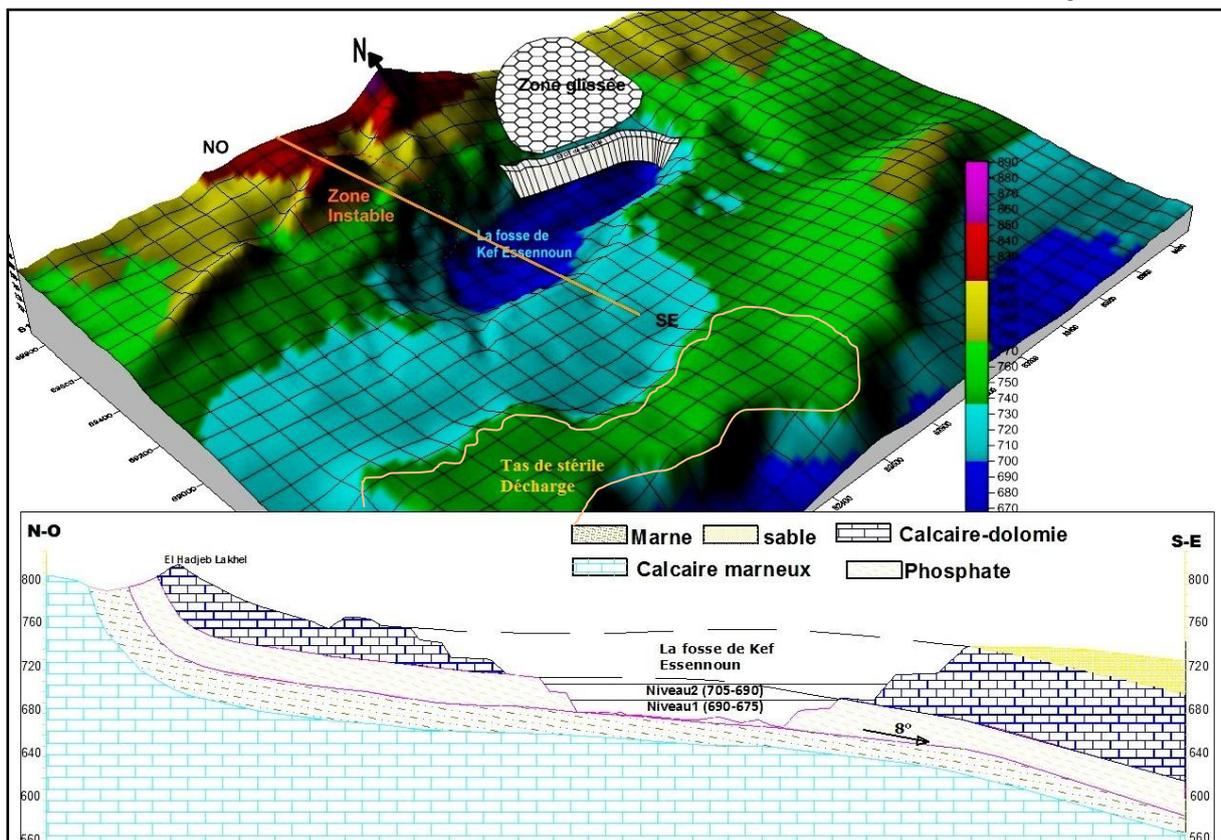


Figure 1.VI: Situation actuelle du gisement de phosphate de Kef Essennoun (Djebel Onk)

3. Réouverture du gisement

La réouverture de ce gisement représente un grand affrontement pour l'ingénieur de mine de trouver la méthode adéquate qui assure la stabilité des parois de la fosse et au même temps la récupération de la totalité du minerai. A cette effet, la réouverture de notre gisement doit passer par quelques étapes dans les quelles on trouve :

- Le remblayage de la fosse ;
- La création d'une piste d'accès au niveau supérieur ;
- L'ouverture d'une nouvelle plateforme ;
- Le développement de l'exploitation de haut en bas.

3.1. Remblayage de la fosse

Nous avons jugé très utile le remblayage de la fosse (*Figure 2.VI*) qui reste une obligation d'un coté, pour stabiliser les parois de la fosse et de l'autre coté, pour la poursuite des travaux d'exploitation dans des conditions normales. Ce choix avait été pris parmi des autres qui ont été discuté lors de la réalisation de ce mémoire.

La faisabilité économique et technique de cette opération nous oblige aussi de bien étudier la surface à remblayer, le type et le volume de remblai, la distance entre le remblai et la fosse et enfin la quantité de phosphate à récupérer.

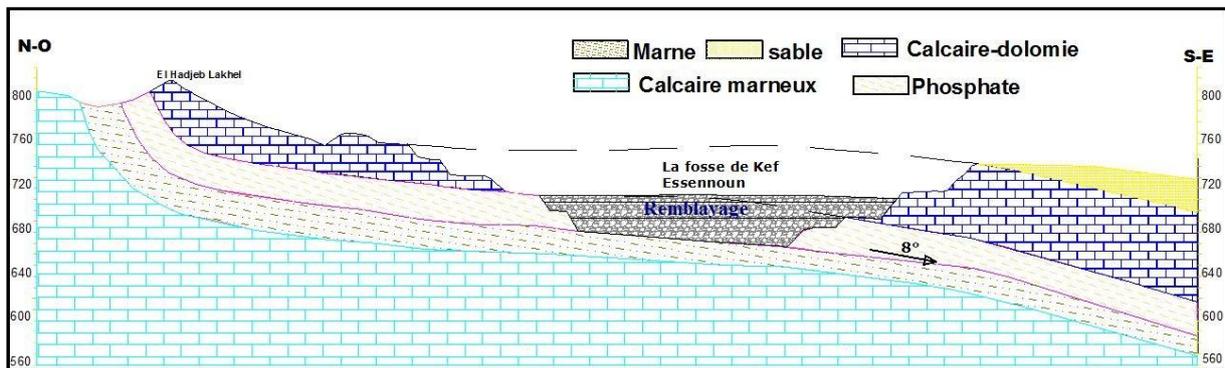


Figure 2.VI: Coupe NO-SE montrant le niveau de remblayage de la fosse

Pour la surface à remblayer, nous recommandons le remblayage partiel de la fosse qui ne touche que les deux premiers gradins avec une hauteur de 30m et un volume de 4.6 Mt le *tableau 1.VI* présente les détails pour la surface de chaque gradin et la quantité de remblai utilisé :

Remblayage de la fosse pilote			
	Surface (m ²)	Hauteur (m)	Volume (m ³)
Niveau-1(705-690)	184 286	15	2 764 290
Niveau-1(690-675)	116 033	15	1 740 495
Total	300 319	30	4 504 785

Tableau 1.VI: La surface à remblayer et le volume de stérile nécessaire

En ce qui concerne la roche à utiliser pour l'opération de remblayage, nous proposons l'utilisation du stérile de la mine stocké au sud de la carrière qui est constitué principalement de calcaire, dolomie et calcaire-marneux (*Figure 3.VI*).



Figure 3.VI: Le Tas de stérile de la carrière de Kef Essennoun (décharge)

3.1.1. Régime de travail

- Nombre d'heures par poste : **8 h/P** ;
- Nombre de Poste : **2 P/J** ;
- Nombre des jours ouvrables **365 j/an** ;
- Nombre d'heures ouvrable : **5840 h/an**.

3.1.2. Chargement

Parmi les engins de chargement utilisés dans les mines à ciel ouvert, on distingue deux types fondamentaux selon leur mode de fonctionnement ou de travail :

- Les engins dont le fonctionnement s'effectue d'une manière cyclique, c'est-à-dire les opérations élémentaires d'un cycle complet d'excavation et de chargement se réalisent successivement. Ce sont des excavateurs à godet unique (pelle mécanique ou hydraulique, chargeuse frontale, dragline)
- Les engins dont le fonctionnement s'effectue d'une manière continue, c'est-à-dire les opérations élémentaires d'un cycle complet d'excavation et de chargement y compris le déplacement se réalisent simultanément. Ce sont des excavateurs à godets multiples (roue-pelle, excavateurs à chaîne à godets)

Le chargement de camions au niveau de la carrière de Kef Essennoun se fait à l'aide de pelles en butte hydrauliques ou de pelles excavatrices de godets de 6 m³. Nous avons constaté que les travaux de chargement sont fluide pendant le cycle « chargement-transport-déchargement-retour » qui sont liés directement à l'expérience du personnel et la facilité des accès.



Figure 4.VI: Opération de chargement dans la carrière de Kef Essnoun

3.1.2.1. Rendement de la pelle

- Caractéristiques de la pelle
 - Marque de la pelle excavatrice : LIEBHERR
 - Capacité du godet: 6 m³
 - État : Bon
- Rendement annuel de la pelle excavatrice

$$R_{ACa} = (N_{sec} \times E_G \times N_J \times N_H \times N_P \times K_U \times K_R) / (T_C \times K_F) \text{ (m}^3 \text{ /an).} \quad (1.VI)$$

- R_{Ap} : Rendement annuel de la pelle excavatrice (m³/an).
- N_{sec} : Nombre de seconde par heure.
- E_G : capacité du godet = 6 m³.
- N_J : nombre de jours ouvrables par an = 365 j /an.
- N_H : nombre d'heures par poste = 8 h /poste.
- N_P : nombre de poste par jour = 2 poste
- K_U : coefficient d'utilisation de la pelle = 0,9.
- K_R : coefficient de remplissage du godet de la pelle excavatrice = 0,85.
- T_C : durée d'un cycle de la pelle excavatrice = 30 secondes.
- K_F : coefficient de foisonnement moyen = 1,1

$$R_{Aca} = 3600 \times 6 \times 360 \times 8 \times 2 \times 0,9 \times 0,85 / (30 \times 1,1)$$

$$R_{Aca} = 2\,884\,198 \text{ m}^3 \text{ /an} \sim 2.9 \text{ Mm}^3$$

- Nombre de pelles nécessaires

Il est déterminé selon la formule suivante:

$$N_p = V_{remb} / R_{ch} \text{ pelles} \quad (2.VI)$$

Où :

N_p : nombre de pelles nécessaires pour le remblayage.

V_{remb} : volume nécessaire de remblai = 4.6 Mm^3 .

R_{ch} : rendement de la pelle = $2.9 \text{ Mm}^3/\text{an}$

Donc :

$$N_{\text{ch}} = 4.6 / 2.9 = 1.58 \approx 2 \text{ pelles}$$

Il ressort des calculs effectués que l'opération de chargement de remblai sera effectuée à l'aide de deux pelles hydrauliques d'une capacité de godet de 6 m^3 et qui seront opérationnelles 16 heures par jour durant une année.

3.1.3. Transport

Le transport établit la liaison entre la carrière et le point de déchargement des produits (stérile et minerai). Il a pour objet non seulement de déplacer des minerais mais aussi des stériles qui représentent souvent la principale partie de la circulation des engins.

Dans l'exploitation minière à ciel ouvert,

L'organisation de transport dans l'exploitation minière à ciel ouvert pose un problème très important, à ne jamais négliger, qui conditionne en grandes parties la faisabilité du projet minier car, les frais de transport atteignent 30 à 40 % des dépenses totales de l'exploitation.

D'une façon générale, on distingue plusieurs modes de transport tel que:

Les transports continus (bande transporteuse, transport hydraulique, transport aérien par câble. etc.)

Le transport discontinu cyclique (locomotive et wagons, camions et engins dérivés des camions, grues à câbles)

Pour déplacer des grandes quantités de stériles à faibles distances, on utilise quelques fois des ponts de transfert qui sont constitués d'un ensemble métallique et d'un convoyeur à bandes.

Dans le cas de la mine de Djebel Onk le transport de stérile et minerai est assuré par des camions à benne, ces derniers seront utilisés pour les travaux de remblayage.



Figure 5.VI: Exemple de camion à benne utilisé dans la carrière de Kef Essennoun

3.1.3.1. Rendement du camion

- Caractéristiques du camion
 - Marque des camions : Caterpillar 773
 - État : Bon
 - Capacité de la benne du camion : 40 m³
- Rendement annuel du camion

$$\mathbf{R_{ATI} = N_{sec} \times E_b \times N_J \times N_p \times N_H \times K_U \times K_R / T_C} \quad \mathbf{(3.VI)}$$

- R_{Ac} : Rendement annuel d'un camion (m³/an) ;
- N_{sec} : Nombre de seconde par heure = 3600 ;
- E_b : capacité de la benne du camion = 40 m³ ;
- N_J : nombre de jours ouvrables par an = 365 j /an ;
- N_p : nombre de postes par jour = 2 p /jour ;
- N_H : nombre d'heures par poste = 8 h /poste ;
- K_U : coefficient d'utilisation du camion = 0,9 ;
- K_R : coefficient de remplissage de la benne du camion = 0,8 ;
- T_C : durée d'un cycle de transport = 15 mn soit, 900 secondes.

$$R_{Ac} = 3600 \times 40 \times 365 \times 2 \times 8 \times 0,9 \times 0,8 / 900$$

$$\mathbf{R_{Ac} = 672\ 768\ m^3/an}$$

- Nombre de camions nécessaires

Il est déterminé comme suit:

$$N_c = P_p / R_{Ac} \text{ camions}$$

Où :

N_c : Nombre de pelles nécessaires pour le remblayage

V_{remb} : Volume nécessaire de remblai = 4.6 Mm³.

R_{Ac} : Rendement annuel d'un camion = 0.67 Mm³.

Donc :

$$N_c = 4.6 / 0.67 = 6.86 \approx 7$$

$$\mathbf{N_c = 7\ Camions}$$

Donc le nombre de camions nécessaires pour transporter le volume de remblai est 7, ces camions pourront déplacer un volume de l'ordre de 4.7 Mm³ dans les conditions normales de la réalisation de cette opération.

3.1.4. Terrassement

Il s'agit de l'ensemble des travaux destinés à modifier la forme d'un terrain dont les engins les plus utilisés dans ce type de travaux sont les Bulldozers. L'équipement d'attaque de cet engin est une lame directement montée à l'avant du tracteur sur chenilles et les mouvements de l'équipement d'attaque sont commandés par un dispositif hydraulique.

3.1.4.1. Rendement du bulldozer

- Temps de cycle du bulldozer:

Le temps de cycle du Bulldozer (t_{cbull}) est composé de 4 temps :

- Le temps de refoulement : c'est le rapport de la distance à parcourir (D_p) par la vitesse d'avancement (V_a) qui doit être techniquement choisie entre 3 et 5 Km/h.
- Deux temps d'inversion de marche ($t_{inv}=10$ s).
- Le temps de recul : qui est le rapport de la distance à parcourir par la vitesse de recul (V_r) incluse entre 5 et 7 Km/h.
- D_p : La distance à parcourir (entre 20 à 25m)

$$t_{cbull} = 2 \times t_{inv} + 3600 \times \frac{D_p}{V_a} + 3600 \times \frac{D_p}{V_r} \quad (4.VI)$$

$$t_{cbull} = 2 \times 10 + 3600 \times \frac{20}{4} + 3600 \times \frac{20}{6}$$

$$t_{cbull} = 70 \text{ s}$$

- Rendement du Bulldozer :

Le rendement du bulldozer est calculé à partir de la capacité de sa lame ($C_L \sim 7 \text{ m}^3$) et de son temps de cycle par la formule ci-dessous :

$$R_{bull} = C_l \times \frac{3600}{t_{cbull}} \times K_{dbull} \times K_{ubull} \quad (5.VI)$$

Où :

K_{dbull} et K_{ubull} : sont respectivement la disponibilité et le coefficient d'utilisation du bulldozer.

Pour le cas de Kef Essnnon on a :

$$R_{bull} = 7 \times \frac{3600}{70} \times 0.85 \times 0.9$$

$$R_{bull} = 275.4 \text{ m}^3/\text{h}$$

Donc pour une année on trouve :

$$R_{bull} = 275.4 \times 8 \times 2 \times 365 = 1.6 \text{ Mm}^3/\text{an}$$

- Nombre de bulldozers nécessaire

Il est déterminé selon la formule suivante:

$$N_{bull} = V_{remb} / R_{bull} \quad (\text{Bull}) \quad (6.VI)$$

Où:

N_{bull} : nombre du bulldozer nécessaires pour le remblayage.

V_{remb} : volume nécessaire de remblai = 4.6 Mm^3 .

R_{bull} : rendement du bulldozer = $1.6 \text{ Mm}^3/\text{an}$

Donc :

$$N_{ch} = 4.6 / 1.6 = 2.87 \approx 3 \text{ pelles}$$

Le nombre des bulldozers nécessaires pour l'opération de remblayage est trois avec les caractéristiques indiqués auparavant.

3.1.5. Durée du remblayage

Le temps projeté pour achever cette opération est estimé à une année avec les matériels décrits auparavant, mais dans le cas où il est jugé que cette période est longue, nous pouvons changer la cadence de déroulement de travaux par l'augmentation de nombre de poste par jour ou bien le nombre de matériel nécessaire.

3.2. Piste d'accès et plateforme de travail

3.2.1. Méthode d'exploitation

Le gisement de phosphate de Kef Essennoun est un gisement sédimentaire stratiforme d'une épaisseur moyenne de 30 m reposant sur une couche de marnes feuilletés souvent bitumineuses avec un pendage de strate varie de 8 à 10° vers le Sud – Ouest.

La méthode d'exploitation proposée pour le développement de ce gisement après les travaux de remblayage est celle de l'exploitation en flanc de coteaux, dans le quel en suivant le pendage de la couche phosphatée de haut vers le bas.

L'exploitation commencera par la création d'une nouvelle piste d'accès vers le niveau supérieur et l'ouverture d'une plateforme de travail dans l'affleurement de phosphate.

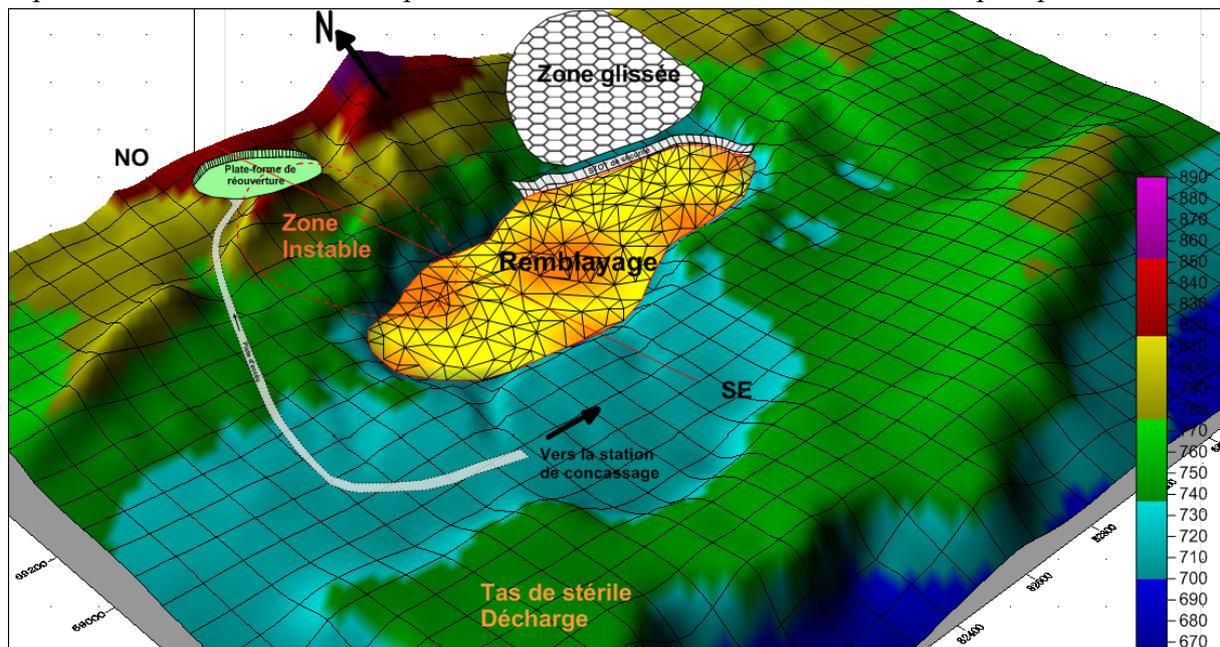


Figure 6.VI: État de la carrière après le remblayage et l'ouverture de la plateforme initiale

3.2.2. Piste d'accès

Dans les mines à ciel ouvert, il existe diverses classifications des pistes de roulage des engins. Les principales ou permanentes utilisées pour une longue durée (plus de six mois) et qui sont généralement destinées pour le transport de minerai et de stérile, elles ont habituellement un revêtement routier et une circulation à double voies. On trouve aussi les pistes provisoires ou temporaires réalisé pour les travaux d'explorations, découvertures, accès entre les niveaux etc.

3.2.3. Caractéristiques géométriques des pistes

Les éléments géométriques des pistes (largeur, rayon de courbure, la pente...) doivent être déterminés en tenant compte de plusieurs paramètres tel que : la topographie du gisement, les dimensions techniques des engins de transport (largeur de la benne), la vitesse de roulage, la production et la durée de vie de la carrière ou mine à C.O

3.2.3.1. Largeur de la piste

Dans les deux types des sections, rectiligne et curviligne, la largeur de piste doit être adéquate pour permettre une bonne manœuvrabilité des engins et pour maintenir la continuation de

roulage. Comme les types des circulants dans la piste sont différents, la détermination de la largeur dépend des plus gros engins à utiliser.

- En ligne droite

Pour une piste en ligne droite à double voie, la largeur est donnée par la formule suivante

$$L = 2A + 3C + R \quad (8-VI)$$

Ou :

R : largeur de la rigole d'évacuation d'eau (R= 0.5 à 1m);

A : largeur de la benne d'engin ;

C : largeur de la bande de sécurité (C= 0.5A).

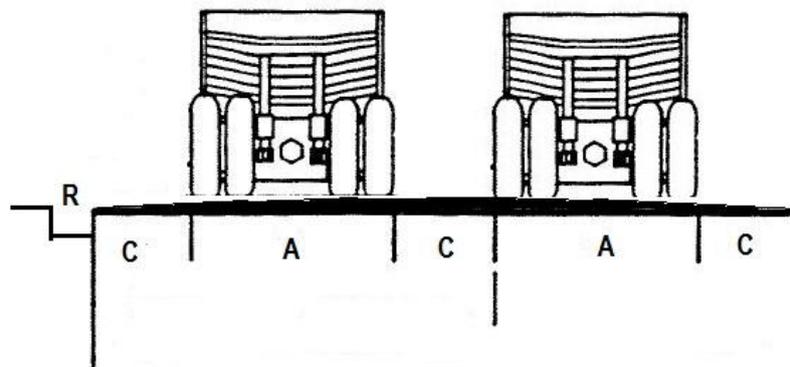


Figure 7.VI: Largeur de la piste en ligne droite

Pour le cas de Kef Essnoun, les engins les plus gros sont les camions **Caterpillar 773F** qui ont une largeur des bennes de **4.7m**, on aura donc :

$$L = 2A + 3C + R$$

$$L = 16.95 \sim 17m$$

- En courbure

Pour des sections curvilignes (virage), la berme de sécurité de droite et de gauche doit être augmentée à cause de surplomb des engins et de leur croisement. Donc la largeur est donnée par l'expression suivante :

$$L_C = 2(A + F_a + F_b + Z) + C \quad (9.VI)$$

$$C = Z = 0.5 (A + F_a + F_b)$$

$$C = Z = 3.35m$$

Ou :

A : La largeur du camion; (A= 4.7m pour CAT 773F)

F_a: La largeur de surplomb avant ; (1m)

F_b: La largeur de surplomb après ; (1m)

C : Berme de sécurité ;

Z : largeur supplémentaire due à la difficulté de conduite en virage.

Donc on trouve pour notre cas: $L_C = 23.45 \sim 24m$

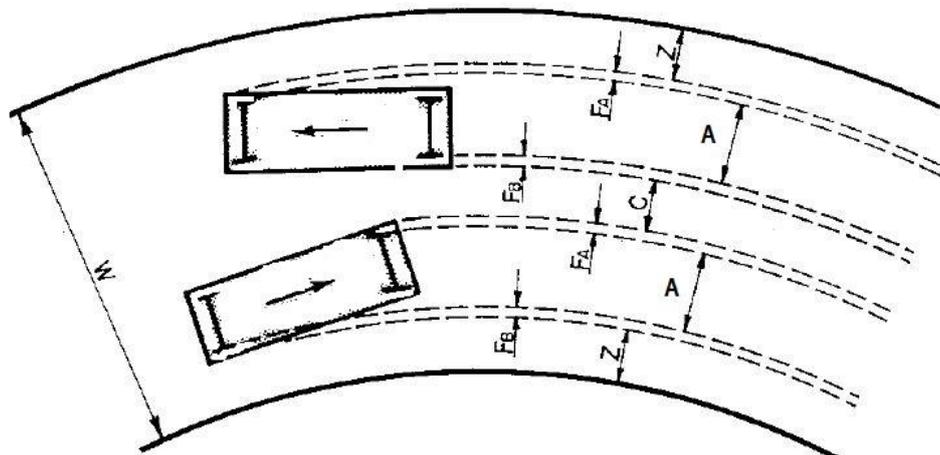


Figure 8.VI: Largeur de la piste en courbure

3.2.3.2. Pente maximale

La pente de la piste est un facteur économique qui influe sur le rendement des engins et donc le coût de revient de l'opération de transport, et elle est au même temps un facteur sécuritaire pour les bonnes conditions de travail. Pour la carrière de Kef Essnoun la pente de la nouvelle piste à ouvrir ne doit pas aller au-delà de 10% en ligne droite et 5 à 6 % dans les virages.

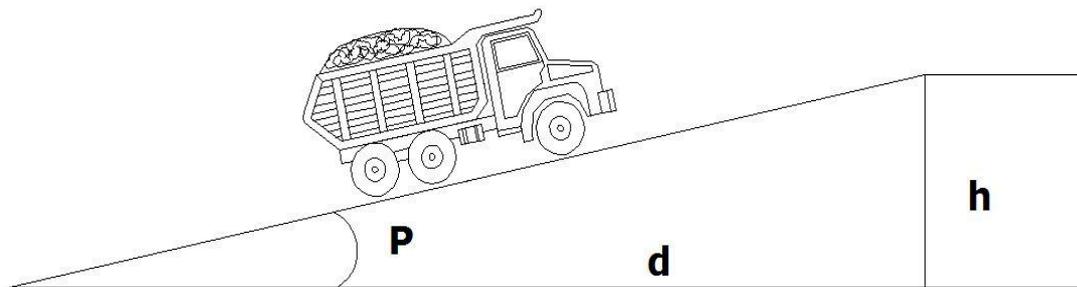


Figure 9.VI: Caractéristique de la pente d'une piste

4. Développement de l'exploitation

Le développement des travaux d'exploitation passe par deux étapes principales de haut vers le bas, dans lequel, nous commencerons par l'ouverture d'une plateforme initiale et l'élimination de la roche stérile (Hadjeb Lakhal) dans le but de diminuer la charge au-dessus de la zone instable (figure suivante), ensuite, on continue l'exploitation niveau par niveau dans le sens de pendage de la couche phosphatée avec des gradins ne dépassant pas le 12 m d'hauteur et une inclinaison β_g de 70° , en ce qui concerne les bermes de sécurité et de nettoyage (b_s , b_n) on prend une largeur minimale de 8 m, ces paramètres nous donne un bord final maximal ne dépasse pas 41° (Figure 10.VI).

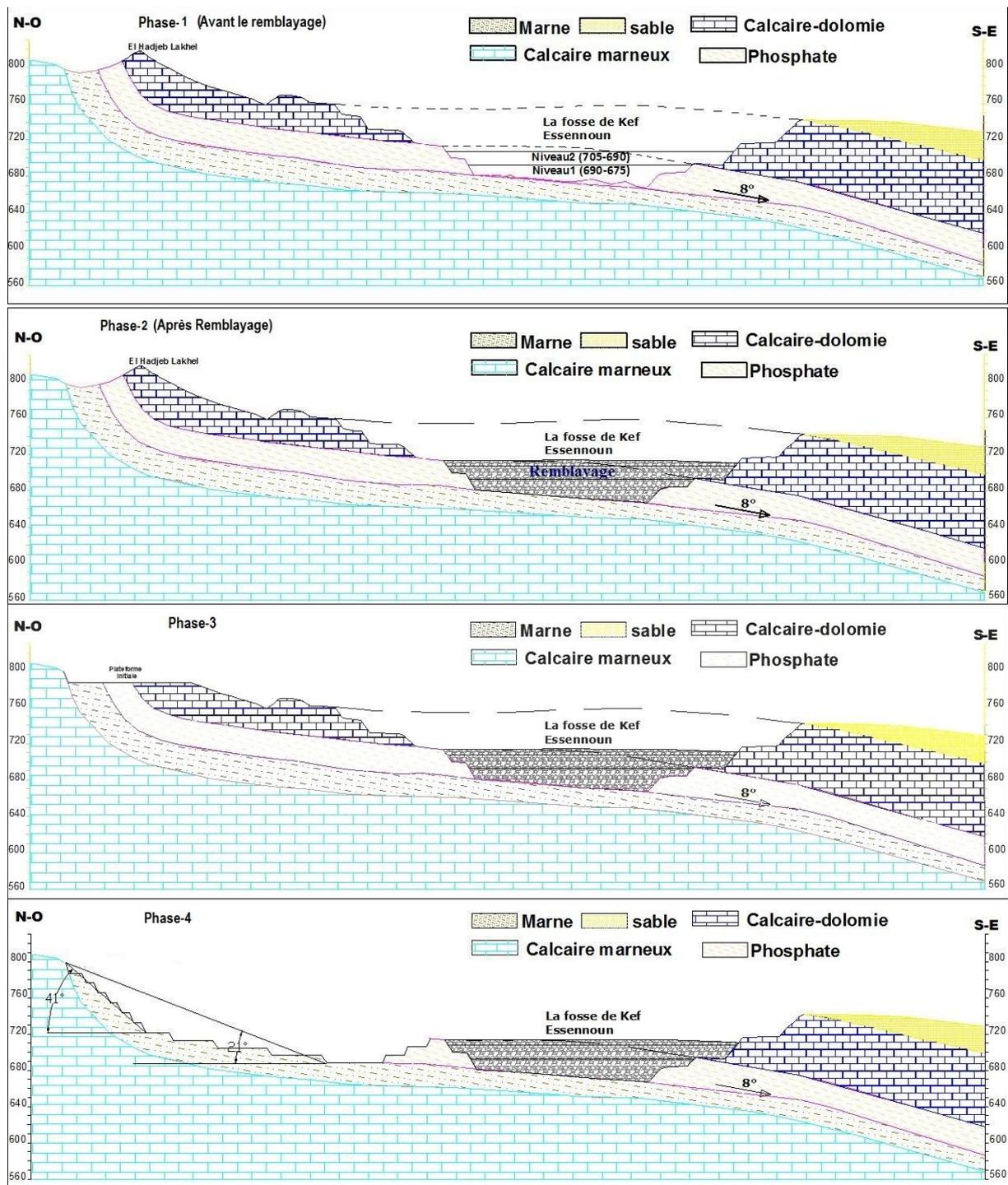


Figure 10.VI: Les phases de développement du gisement de Kef Essennoun

5. Évaluation de la stabilité du bord final considéré

L'évaluation de la stabilité du flanc de la fosse au fur et à mesure de l'avancement des travaux d'exploitation représente une opération primordiale pour se garder de toutes situations critique de la stabilité des parois de la carrière.

Le *tableau 2.VI* illustre les facteurs de sécurités du bord N-O de la carrière de Kef Essnnoun avant, après le remblayage et au cours de l'exploitation, ces facteurs de sécurités avaient été estimés à l'aide du logiciel **GEO5** pour diverses méthodes (*Morgenstern-Price, Janbu, Spencer, Sarma, Bishop, Fellenius*)

Méthode	Avant remblayage		Après remblayage		Phase - 3		Phase - 4	
	Cercle	Polygone	Cercle	Polygone	Cercle	Polygone	Cercle	Polygone
<i>Bishop</i>	0.96	-	1.67	-	1.98	-	1.73	-
<i>Fellenius</i>	0.92	-	1.61	-	1.94	-	1.74	-
<i>Spencer</i>	0.95	0.87	1.67	1.61	1.98	2.02	1.68	1.71
<i>Janbu</i>	1.12	0.81	1.66	1.59	1.98	1.99	2.16	1.81
<i>M-p</i>	0.97	0.83	1.66	1.59	1.98	1.99	1.73	1.71
<i>Sarma</i>	-	0.90	-	2.38	-	2.69	-	1.88

Tableau 2.VI: Les facteurs de sécurité après l'opération de remblayage

D'après les résultats du tableau 2.VI, nous constatons les suivants :

- L'influence remarquable de l'opération de remblayage sur la stabilité du flanc de la carrière dont lequel, les facteurs de sécurités avaient augmenté avec un taux de 40% pour une surface de glissement circulaire et de 51% pour une surface polygonale.
- Tous les facteurs de sécurités donnés par les différentes méthodes après le remblayage sont largement supérieurs à 1 ce qui signifie que le bord en question est stabilisé.
- Pour les deux Phases de développement du gisement (Phase 3,4), tous les facteurs de sécurités sont supérieurs à 1, par conséquence, il y aura aucun risque d'instabilité des terrains au cours des travaux d'exploitation, à condition que nous respecterons les paramètres techniques d'exploitation recommandés ($hg \leq 12m$, $\beta_g \leq 70^\circ$, $b_s, b_n \geq 8m$).

6. Calcule des coûts de l'opération de remblayage

6.1. Définition des coûts [2]

Les coûts désignent l'ensemble des charges et des dépenses liées à une opération définie.

6.2. Catégories des différents frais de l'opération

Dans notre cas, les coûts de l'opération de remblayage sont liés seulement aux frais de l'utilisation de matérielles (Chargeurs, Camions, Bulldozers). Ces coûts peuvent être repartis en deux catégories :

- Coûts fixes

Ce sont les frais qui restent les mêmes que l'engin soit en service ou pas. Ils sont indépendants du nombre d'heures d'utilisation de l'engin. En effet, un engin au chômage se déprécie comme s'il était en service. Ils sont représentés essentiellement par l'amortissement annuel du capital investi pour son achat.

- Coûts variables

Ce sont les frais qui sont inhérentes au fonctionnement de l'engin, c'est-à-dire de la main d'œuvre pour la conduite de l'engin, des matières consommables (Gasoil), lubrifiants, maintenance.etc

Donc, nous pouvons résumer les couts d'utilisation des engins mécanique dans les travaux de remblayage aux: *Amortissement d'engin, fuel (litres/engins/poste), personnel (ouvrier/ poste)*

6.2.1. Amortissement

Après avoir établi les frais d'acquisitions et caractérise la période dépréciation à envisager, les frais d'amortissement représente la répartition du coût de l'engin sur la durée probable de son utilisation et il est donné par l'expression suivante :

$$A = \frac{Fa}{N} [DA] \quad (10.VI)$$

Où

Fa : est les frais d'acquisition de l'engin en DA ;

N : la durée de vie de l'engin en Année ;

En général, la durée de vie des amortissements est comptée en termes d'unités d'œuvre (Année, mois, jour, heure) et ce pour mieux exprimer le rythme de consommation des avantages économiques attendus. Pour notre cas, nous avons choisi l'année comme unité d'œuvre et qui est de 10 ans pour les différents engins utilisés (**N= 10ans**).

Opération	Type d'Engin	Marque	Fa unitaire (KDA)	Nb d'engin	Fa globale	Durée de vie	Amortissement annuelle
Chargement	Pelle	LIEBHERR	15500,00	2	31000,00	10	3100
Transport	Camion	CATERPILLAR	46200,00	7	323400,00	10	32340
Terrassement	Bull	CATERPILLAR	18500,00	3	55500,00	10	5550
Total	-	-	80200,00	12	409900,00	-	40 990

Tableau 3.VI: frais d'acquisition des engins et amortissement annuel

Il ressort du *tableau 3.VI* que le coût annuel due à l'amortissement des engins est de l'ordre de 40 990 KDA.

6.2.2. Coûts de combustible (fuel)

Les frais de combustible dépendent du prix de carburant et de la quantité consommée. Le premier de ces facteurs varie selon les pays et la situation des chantiers. Il est influencé aussi par les taxes, les distances, le mode de transport et les conditions de stockage.

La consommation de carburant d'un engin est fonction de son rendement énergétique. Ce type de données étant en général fourni par le fabricant, il suffit de multiplier le nombre des heures de marche de l'engin par sa consommation horaire de gasoil.

Engin	C _{comb} (L/jour)	C _{comb} (L/an)	Nb d'engin	C _{comb} globale (L/an)	Prix de gasoil (DA/L)	Coût annuel de gasoil (KDA/an)
Pelle	600	219000	2	438000	13	5 694.00
Camion	550	200750	7	1405250	13	18 268. 25
Bull	400	146000	3	438000	13	5 694.00
Total	1550	565750	12	2281250	-	29 656. 250

Tableau 4.VI: Les coûts annuel de la consommation de gasoil

Donc les frais annuel de consommation du carburant sont de 29 656. 250 KDA.

6.2.3. Frais de la main d'œuvre

Pour le service de ce genre de machine, on dépend fortement du travail personnel de l'opérateur ou du conducteur. Ce poste doit tenir compte de l'échelle locale des salaires et doit comprendre toutes les charges sociales et charge accessoires liés aux salaires.

Pour ce projet (Remblayage) le nombre des employés, leurs postes et leurs salaires sont représentés dans le tableau suivant :

Poste	Salaires mensuel unitaire (DA)	Nombre des employés	Salaires mensuel global (DA)	Salaires annuel global (KDA)
Surveillant de projet	70000,00	2	140000,00	1680,00
Conducteur pelle	60000,00	4	240000,00	2880,00
Conducteur Camion	60000,00	14	840000,00	10080,00
Conducteur Bull	60000,00	6	360000,00	4320,00
Total	250000,00	26	1580000,00	18 960,00

Tableau 5.VI: Les coûts de la main d'œuvre

Le coût global d'une année de la masse salariale des employés destinés à l'opération de remblayage sont de 18 960 KDA.

6.3. Récapitulation des coûts

Dans cette partie, nous allons résumer l'ensemble des coûts de l'opération de remblayage afin de déterminer le prix de revient d'un mètre cube du remblai déplacer vers la fosse principale à partir de la décharge de stérile.

Engin	Amortissement Annuelle (KDA/an)	Coût annuel de gasoil (KDA/an)	Masse salariale (KDA/an)	Autre (KDA/an)	Coût globale (KDA/an)
Pelle	3100,00	5694,00	3440,00	3000,00	15234,00
Camion	32340,00	18268,25	10640,00	5000,00	66248,25
Bull	5550,00	5694,00	4880,00	2000,00	18124,00
Total	40990,00	29656,25	18960,00	10000,00	99 606,25

Tableau 6.VI: Récapitulation des coûts de remblayage

D'après le *tableau 6.VI*, le coût globale de l'opération de remblayage de la fosse de Kef Essnnon est de 99 606.25 KDA, pour trouver le coût unitaire (C_u) pour un mètre cube, il suffit de diviser le coût global sur volume total à déplacer comme suite :

$$C_u = \frac{\text{Coût global de remblayage}}{\text{Volume global à déplacer}} \text{ (DA/m}^3\text{)} \quad (11.VI)$$

D'où

$$C_u = \frac{99\,606\,250}{4\,504\,785} = 22.11 \text{ (DA/m}^3\text{)} \quad (12.VI)$$

Donc le coût unitaire de cette opération est de 22.11 DA pour un mètre cube du remblai, ce coût reste à confirmer par la suite par une étude économique solide.

7. Conclusion

Dans ce partie du mémoire, nous avons étudié la situation actuelle du gisement et remarqué son un état d'instabilité. Pour stabilisé les parois de la fosse ensuite nous avons expliqué la méthode de stabilisation des parois de la fosse, il faudrait procéder à son remblayage. La réouverture de la carrière exige certaine étapes bien définie.

Dans l'ensemble, l'étude du phénomène de la stabilité et nécessité de poursuivre l'exploitation nous ont percées D'aboutir aux conclusions suivantes :

- La nécessité d'abandonner les travaux d'exploitation dans cette zone pour des raisons sécuritaire.
- L'obligation de commencer l'opération de remblayage dans le plus rapide possible.
- Cette opération nécessite de déplacer un volume d'environ 4.6 Mm³ ce qui demande un matériels lourds et une main d'œuvre expérimenté pour qu'elle ne prend pas longtemps.
- La réouverture du gisement doit se faire de haut vers le bas pour ne pas tomber dans la même erreur.
- Le coût unitaire pour le mètre cube du remblai a été estimé à de l'ordre de 22.11 DA qui reste un coût moyen pour l'opération de remblayage.

Conclusion Générale

Le gisement de Kef Essennoun faisant partie de l'ensemble des gisements du champ minier de Djebel Onk (*Djemi-jema, Djebel Onk Nord, Bled El Hadba, Oued Betita, Kef Essennoun*), situé à environ 100 km au Sud de la ville de Tébessa, à l'extrémité orientale de l'Atlas saharien proche de la frontière Algéro-tunisienne (Algérie orientale), il avait été mis en exploitation en 2001 après l'extinction des réserves de *Djemi-Jema*. En 2007, le quartier de Kef Essennoun avait été l'objet d'un grand éboulement du flanc Nord – Est, il s'agit d'un glissement de une grande ampleur (7.7 Mm³) comblant la fosse principale d'exploitation. Cependant, cette catastrophe n'avait pas entravé la reprise des travaux dans les parties Ouest, Sud, et Sud-Ouest du gisement en laissant un Stot de sécurité d'environ 20m au N-E pour bloquer la masse rocheuse glissée.

La raison de ce glissement se base sur la géologie, les conditions du gisement et des couches, l'emplacement des fronts et la technologie d'exploitation.

L'objectif de ce mémoire était de réaliser une étude d'appréciation de la stabilité du bord Nord-Ouest de la mine sujette au glissement et de proposer une méthode d'exploitation adéquate qui garantirait la récupération maximale des réserves et la sécurité du personnel et des équipements.

Au cours de la réalisation de ce travail, nous nous sommes confrontés aux plusieurs obstacles et difficultés liés à l'absence:

- D'une étude géologique, structural, hydrogéologique, géotechnique approfondies.... ;
- De documentation et du traitement de la question de glissement de Kef Essennoun ;
- De possibilité en raison de sécurité de ramener des échantillons au laboratoire.

Aussi, nous sommes contents du rapport géologique édité par ERM en 1986 pour étudier et cadrer géologiquement le gisement.

D'autre part, en utilisant les photos satellites, les cartes topographiques de l'état major et le plan d'arpentage de mine mise à jour de la carrière pour situer la zone, l'ampleur et la direction de glissement.

Le constat de l'éboulement, caractérisé par un escarpement d'environ 40 à 50m de dénivelée et couvrant une surface de 11 hectares avec une épaisseur de 70 m constituée principalement par la couche de phosphate et les terrains de recouvrement, dont la surface de glissement correspond à l'interface phosphate/marne, nous a conduit à mettre en relief les principaux facteurs de déclenchement de phénomène du glissement. Il s'agit de :

- ✓ La structure stratiforme du gisement et la présence d'une interface plastique *phosphate/marne* à faible frottement à la base de la couche de phosphate.
- ✓ Le redressement quasi-vertical des couches au Nord du gisement ce qui favorise le détachement de la masse rocheuse de la montagne.
- ✓ Le choix de l'endroit de l'ouverture du gisement (S.28) au pied de la montagne.

- ✓ La réduction des bermes de sécurité et le jumelage des gradins pour gagner le minerai.
- ✓ Les effets des tirs miniers réalisés à la base du front phosphaté.

Le plan proposé par SOMIPHOS pour le développement des travaux miniers dans le gisement, après le glissement du bord Nord - Est n'était pas non plus fiable, car au fur à mesure de l'agrandissement de la fosse, de nouvelles fissures apparaissent au flanc Nord-Ouest de la carrière.

L'étude et le procédé adoptés pour apprécier la stabilité du bord de la carrière de Kef Essennoun, nous ont conduits à entreprendre les démarches suivantes :

- La mise en place des dispositifs de surveillance des nouvelles fissures qui ont montré que ces dernières s'écartent au cours du temps avec une vitesse moyenne de 3 à 4 mm/an, dont la surface de glissement correspond aussi à l'interface phosphate/marne.
- La modélisation numérique l'aide des deux logiciels (*Géoslope et Géo5*) du bord, sujet au glissement, réalisée à travers d'un profil géologique, orienté NO-SE. Ce profile a une longueur de 650m, une hauteur de 220m et traverse le centre de la zone instable.

Les résultats obtenus sur la base de ces deux démarches ont montré que le flanc en question est sensible aux travaux de tir miniers et stable dans le cas inverse.

Compte tenu de ce constat, nous proposons :

- Le remblayage de la fosse pilote de la mine, jusqu'aux deux premiers gradins (30 m d'hauteur), avec un volume de roche stérile de environ 4.6 Mm³. Cette opération entrainerait à l'assurance de la stabilité, en augmentant les valeurs de facteurs de sécurités avec un taux de 40% pour la surface de glissement circulaire et de 51% pour une surface de glissement polygonale, de ce fait, le remblayage influe donc positivement sur la stabilité de la fosse.
- La reprise des travaux d'exploitation de haut vers le bas reste la méthode adéquate pour ce type des gisement qui assurera la stabilité de la carrière pendant et après l'exploitation.

Bibliographies

- [1] A. ASROUN, J. L-DURVILLE, stabilité des massifs rocheux fissurés, Revue français de Géotechnique N°112, 3eme trimestre 2005.
- [2] AISSA M.H (2011) - Analyse et modélisation d'un glissement de terrain. Cas de Sidi Youcef (Béni Messous, Alger), centre universitaire de khemis Miliana.
- [3] ALLOUCHE Samir (2005)- Mise Au Point D'une Application De Contrôle Des Coûts Opérationnels Dans Une Carrière (Exemple : Carrière de MEFTAH), Mémoire de fin d'études, École Nationale Polytechnique.
- [4] AMELIE-JULIE LAFLAMME (2010) Analyse Intégrée De La Stabilité Des Pentés De La Fosse Portage Du Projet Minier Meadowbank, p.16.
- [5] BOUDRIES AMEL (2008) - Étude géologique et géostatistique de l'Uranium (U) dans le gisement de phosphate de Kef Essennoun, Mémoire Magister, Université Badji Mokhtar-Annaba, p. 16-40.
- [6] Brgm (1993) -Rapport de l'expertise sur les travaux de prospection et d'évaluation des réserves du district minier de Djebel Onk.
- [7] BRUNO Martins (2005) - Le rôle des facteurs géologiques et mécaniques dans le déclenchement des instabilités gravitaires : exemple de deux glissements de terrain des Pyrénées Atlantiques (Vallée d'Ossau et Vallée d'Aspe), p. 46-50.
- [8] Bureau des Mines et de l'Énergie (BME), (2006) - Rapport De Reconnaissance Géologique Sur Le Glissement De Terrain Survenu A Mahotièrè (Kenscoff), Haïti.
- [9] CARTIER Gilles - Recherches et études sur les glissements de terrains, Bull, liaison Labo. P. et Ch. -115 - sept.-oct. 1981 - Réf. 2621.
- [10] Chabou-Mostefaï. S (1987)- Étude de la série phosphatée tertiaire du Djebel Onk, Algérie, Stratigraphie, Pétrographie, Minéralogie et Analyse Statistique, Thèse Doct, Univ. Droit, d'Économie et des Sciences d'AIX-MARSEILLE, 376 p.
- [11] Comité Français De Mécanique Des Roches(2004)-Manuel De Mécanique Des Roches tome 2.
- [12] DJERBAL Lynda (2013) – Analyse Des Mécaniques De Déformation Et De La Rupture Progressive Du Versant Instable d'Ain El Hammam, thèse de doctorat Université Mouloud Mammeri De Tizi-Ouzou, p. 18-22.
- [13] Duncan C. Wyllie, Christopher W. Mah (2005) — Rock Slope Engineering 4th edition, Institute of Mining and Metallurgy, p. 218-219.
- [14] EREM. (1985-1987) - Travaux de prospection et d'évaluation des phosphates dans de Bir El Ater. Rapport EREM, 2 tomes : géologie, 50p. , prospection d'évaluation, Biblio, 53p.
- [15] Géotechnical software GEO5, Version 12 (2011) - Engineering manuals for GEO5 programs Part 1.
- [16] GEO-SLOPE International Ltd, Stability Modeling with Slope/W (2004) - Chapter 3: Slope/W tutorial.
- [17] GREFFIER Gérard, RESTITUITO Jacques - Aspects géomorphologiques et stabilité des versants au sud de Clermont-Ferrand, Bull, liaison Labo. P. et Ch. -107 – Mai -Juin 1980 - Réf. 2440.
- [18] GUEYE Ismaïla (1993)- Résistance Au Cisaillement Des Sols Non Saturés Et Stabilité Des Pentés, Thèse de doctorat, École Polytechnique Fédérale De Lausanne, p. 30-36.
- [19] GUERFI Houcemeddine Stabilisation Des Talus Renforcés Par Pieux Mémoire Magister, Université El Hadj Lakhdar Batna, p. 16-17.

- [20] HAMIDI .M (1994) - Études Géotechnique De La Stabilité De Talus Dans Le Quartier Zerga De La Mine De L'Ouenza, Mémoire Magister, École Nationale Polytechnique, Alger, p.4, 5, 24.
- [21] J. BERTHIER (1964) - Stabilité Des Talus Dans Les Roches Stratifiées, Bull. Liaison Labo P. et Ch. n° 10. Nov.-Déc. 1964 - n° 241.
- [22] Jean-Alain Fleurisson (2014) Conception géo-mécanique des talus de mines à ciel ouvert, Rock Slope Stability 2014, Marrakech – Maroc 2014.
- [23] K.M'ZOUGHEM W.CHENAFI (2006) - Étude géotechnique de la stabilité des talus dans la carrière d'Ain El Kebira (Sétif), Mémoire De fin d'étude, Université FERHAT ABBAS, p.14.
- [24] LAGHOUAG.S.A BOUKHARIA (2008) - Étude D'un Glissement De Terrain Sur Le CW8 Reliant La Ville De Médéa À L'Université
- [25] MASEKANYA Jean-Pierre (2008)- Stabilité des pentes et saturation partielle Étude expérimentale et modélisation numérique, Thèse de doctorat, Université De Liège p.38,39,49.
- [26] MEDJITNA NASRI LAMIA (2008) - Les glissements de terrains en 2D et 3D Étude Comparative entre Flac et Plaxis, Mémoire Magister, université de Skikda, p.22-24,40.
- [27] MENDJEL DJENATTE (2012) - Analyse Inverse Dans Le Calcul Géotechnique Application Au Calcul De La Stabilité Des Talus, Thèse de doctorat, Université Badji Mokhtar-Annaba.
- [28] NGUYEN Anh Tuan (2013)- Mesure du champ de déplacement associé aux glissements de terrain par des études combinées de corrélation optique et de mesures in situ sur un exemple remarquable : le glissement Tena (Espagne), Thèse Doctorat, Université De Toulouse. P 49,50, 59.
- [29] P. Cochonat, G. Damy (1990) - Stabilité des Pentes - Études géotechniques – Prélèvements d'échantillons, Colloque.
- [30] POROKHOVOÏ Evgueni (1995) - Stabilité À Long Terme Des Talus De Mines À Ciel Ouvert Dans Les Massifs De Roches Basiques Et Ultrabasiques, p. 35-37.
- [31] Philippe DELMAS, Gilles CARTIER et Pierre POUGET - Méthodes d'analyse des risques liés aux glissements de terrain, Bull. Maison Labo P. et Ch. - 150/151 - juil. - août / sept.-oct. 1987 • R é f. 3225.
- [32] Pierre ANTOINE, Jean BIAREZ - Les problèmes posés par la stabilité des pentes dans les régions montagneuses.
- [33] R.M. Faure - Méthodes de calcul en stabilité des pentes, Cours Mécanique Des Sols.
- [34] SEDDIKI Ahmed (2008) - Analyse De La Stabilité Des Pentes Sous Séisme, Mémoire Magister, Université De M'sila, p. 32-35.
- [35] TAHIRI Abdel-Ouahed (1992) - Modélisation Des Massifs Rocheux Fissurés Par La Méthode Des Éléments Distincts, thèse de doctorat, École Nationale Des Pont Et Chaussées, p.37.
- [36] Ministère de l'aménagement du territoire et de l'environnement (France) 1999 -Risques de mouvement de terrain, Guide méthodologique, p. 19.
- [37] Laurent Bernard 2009- Mesures géotechniques et surveillance lors de la construction des tunnels Val d'Infern.

Annexe I

Annexe I: Fonctionnement Géo- SLOPE

Dans cet annexe, nous introduisons étape par étape la procédure de fonctionnement du logiciel pour une analyse de stabilité de pente durant le quel, nous expliquons comment définir le problème, le calcul de FS et l'affichage des résultats.

SLOPE/W 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 :

A- Définir le problème :

Cette étape est très importante car durant laquelle on définit le problème et on introduit les différentes données et paramètres spécifiques au problème en vigueur.

- 1- Fixer la surface de travail : la surface de travail représente l'espace utilisable pour définir le problème, sa taille peut être inférieure, égale ou supérieure à la taille de la page d'impression.

*//choisissez "**Page**" dans le menu "**Set**"//* une boîte de dialogue va apparaître pour définir la largeur, la longueur et l'unité de travail.

- 2- Fixer l'échelle et l'unité : le bon choix de l'échelle et de l'unité sont très importants pour que le dessin soit suffisamment visible et qui il s'ajuste avec les marges de la page.

*//choisissez "**Unit and Scale**" dans le menu "**Set**"//*

- 3- Fixer l'espacement de la grille : c'est une grille de point en arrière-plan qui nous aide lors de dessin de la géométrie du problème.

*//choisissez "**Grid**" dans le menu "**Set**"//*

- 4- L'enregistrement du problème : le problème doit être enregistré pour autoriser les fonctions SOLVE, CONTOUR qui l'on utilise pour calculer FS et afficher les résultats.

*//choisissez "**Save**" dans le menu "**File**"//*

- 5- Dessiner un croquis du problème : durant la définition du problème de stabilité, il est très utile de préparer d'abord un croquis pour les dimensions de problème.

*//choisissez dans le menu "**Sketch**" les différentes outils (ligne, poly ligne, cercle)//*

- 6- Spécifier la méthode et les options d'analyse : choisissez "**Analysis Setting**" à partir du menu "**KeyIn**" vous obtiendrez une boîte de dialogue pour faire les changements nécessaire concernant la méthode et les options d'analyses.

- 7- Définissez les propriétés des sols : les caractéristiques et les propriétés du sol sont les paramètres principaux dans l'étude de stabilité. Les paramètres basiques dans Slope/W sont le poids volumique, la cohésion C et l'angle de frottement ϕ .

*//choisissez dans le menu "**KeyIn**" la fonction "**Material**"//*

- 8- Dessin des régions : la géométrie et la stratigraphie du sol sont définis par des régions dont lequel chaque type du sol doit être défini par une région limité.

*//choisissez "**Regions**" dans le menu "**Draw**"//*

- 9- Dessiner du rayon de la surface de glissement : pour contrôler la localisation des surfaces de glissement, il est nécessaire de définir les lignes ou les points qui vont être utilisé dans la détermination du rayon du cercle de glissement.

//choisissez "**Slope Surface**" dans le menu "**Draw**" et sélectionner "**Radius**"//

- 10- Dessiner de la grille de la surface de glissement : la grille du centre de rotation doit être définie pour spécifier et contrôler la localisation du centre de la surface de glissement.

//choisissez "**Slope Surface**" dans le menu "**Draw**" et sélectionner "**Grid**"//

- 11- Affichage et insertion des propriétés de sol : la définition du problème a été complète, vous pouvez insérer graphiquement les propriétés de chaque type de sol avec la région correspondante.

//choisissez dans le menu "**KeyIn**" la fonction "**Material**"//.

- 12- Vérifier le problème : les paramètres du problème prédéfinis doivent être vérifiés pour assurer s'ils ont été correctement définis. Dans le cas où il y'avait une erreur le programme va l'afficher sur la boîte de dialogue.

//choisissez "**Verify**" dans le menu "**Tools**"//

B- Résolution de problème :

La seconde partie de l'analyse est la résolution du problème et la représentation des résultats graphiquement.

- 1- Résoudre le problème : pour résoudre le problème c.à.d. le lancement du logiciel pour calculer automatiquement le facteur de sécurité FS.

//choisissez "**Solve Analyses**" dans le menu "**Tools**"//

- 2- Affichage des résultats : la fonction **CONTOUR** nous permet de observer les résultats de l'analyse de problème sous forme graphique.

Pour afficher les résultats, on clique sur le bouton "**CONTOUR**" que l'on trouve dans la barre d'outils standard du logiciel.

- 3- Affichage des forces des tranches : Après le calcul de la surface de glissement correspondant au FS minimum, nous pouvons représenter schématiquement les forces qui subissent chaque tranche (poids, réaction, cisaillement, inter tranche...)

//choisissez "**Slice information**" dans le menu "**View**"//, vous aurez une boîte de dialogue et avec le curseur sélectionnez n'importe quelle tranche.

Annexe II

Annexe II : Fonctionnement Géo5

A. Donnés de bases

Dans la première étape, nous choisissons le type de facteur de sécurité utilisé dans le calcul. Allez vers l'instruction "**Paramètres**" dans le menu "**Saisie**" dans la boîte de dialogue cliqué sur "**Sélectionner les Paramètres**" et choisissez "**Standard-coefficient de sécurité**".

B. Géométrie du modèle

Nous commençons d'abord par la fixation des dimensions de l'espace de travail ensuite la géométrie de la zone d'étude avec les différentes couches stratigraphiques.

- L'espace de travail

C'est la surface dans laquelle nous allons dessiner le projet.

Allez vers l'instruction "**Interface**" dans le menu "**Saisie**" dans la boîte de dialogue cliqué sur "**Gamme**" et introduire les dimensions adéquates.

- Dessin du modèle

Il existe deux méthodes pour le dessin de la géométrie du modèle, soit en introduisant manuellement les coordonnées des interfaces soit, nous les importons sous format Autocad.

Allez vers l'instruction "**Interface**" dans le menu "**Saisie**" dans la boîte de dialogue cliqué sur "**Ajouter**" et introduire les coordonnées des points.

Allez vers l'instruction "**Importer**" dans le menu "**Fichier**" et insérer le fichier du format DXF.

C. Propriété des roches et des sols

Après l'insertion du profil géologique avec de la zone d'étude, on définit les propriétés physiques et mécaniques de chaque couche, les principaux paramètres à introduire dans le logiciel Géo5 sont :

- ✓ Poids volumique ;
- ✓ Poids volumique saturé ;
- ✓ Angle de frottement interne ;
- ✓ Cohésion.

Allez vers l'instruction "**Sols**" dans le menu "**Saisie**" cliquez sur "**Ajouter**" et faite les modifications nécessaire, ensuite, nous assignons les types des roches aux chacune des couches constituant le profil géologique.

D. Paramètres déstabilisateurs

Dans cette phase, nous ajoutons les autres paramètres déstabilisateurs qui peuvent être existés comme les caractéristiques hydrogéologiques, sismiques et les conditions de surcharges qui l'on considère permanent.

Allez vers le menu "**Saisie**" et cliquez sur l'instruction "**Surcharge, Eau ou Séisme**".

E. Calcul de facteur de sécurité

Après avoir terminé la modélisation du profil géologique, nous commençons la phase du calcul du facteur de sécurité pour les différentes formes du cercle de glissement et avec n'importe quelle méthode.

Allez vers l'instruction "**Calcul**" dans le menu "**Saisie**" dans la boîte de dialogue choisissez la forme de la surface de glissement, son emplacement peut être choisi soit manuellement en introduisant les coordonnées du centre et le rayon, soit directement avec la souris sur l'écran. Enfin, on lance le calcul.

F. Présentation des résultats

Finalement, nous pouvons obtenir les résultats détaillés de notre calcul dans un rapport fourni par le logiciel sous format PDF.

Allez vers l'instruction "**Impression de la note de calcul**" dans le menu "**Fichier**" et enregistrer le document.

/Nb : dans la version Démo du logiciel, vous ne pouvez pas ni enregistrer ni copier les résultats. /

Annexe III**Annexe III : Sondages de Kef Essennoun**

N	LONG	X	Y	Z	INCL	AZMT
S2	102	81559,53	69184,89	745	90	0
S6	120	81763,82	69055,27	734	90	0
S4	205	81659,45	68783,8	724,04	90	0
S10	100	82028,04	69279,77	749,52	90	0
S13	105	82232,21	69109,43	745,4	90	0
S11	154	82051,99	68867,67	731,91	90	0
S17	70	82349,96	69348,95	758,2	90	0
S18	112	82451,72	68956,64	732,67	90	0
S19	77	82568,56	69558,36	783,04	90	0
S23	85	82773,04	69434,3	781,5	90	0
S25	74	82901,07	69654,2	803,69	90	0
S20	85	82563,66	69164,28	743,66	90	0
S24	115	82834,67	69034,72	751,87	90	0
S21	152	82677,7	68797,39	734,24	90	0
S28	75	83139,65	69502,85	781,72	90	0
S32	101	83364,64	69370,02	769,95	90	0
S30	110	82216,9	69121,94	753,44	90	0
S22	115	83066,38	68884,32	733,49	90	0
S37	100	83695,97	69865	812	90	0
S34	90	83530,91	69594,65	785,52	90	0
S41	135	83901,37	69761,89	797	90	0
S38	140	83769,01	69431,28	783,78	90	0
S35	154	83573,31	69250,37	772	90	0
S43	123	84089,55	6997,11	805	90	0
S46	158	84304,028	69800,23	791	90	0
S7	174	81946,56	68655,76	714	90	0
S26	235	82533,73	68548,59	719,24	90	0
S33	224	82933,57	68639,34	728,91	90	0
S39	239	83364,95	68746,68	752,23	90	0
S44	167	84163,35	69523,12	778,82	90	0
S42	188	84009,44	69279,53	772,06	90	0