

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

BADJI MOKHTAR –ANNABA  
UNIVERSITY



جامعة باجي مختار - عنابة

FACULTÉ DES SCIENCES DE LA TERRE  
DÉPARTEMENT DES MINES

## THESE

Présentée en vue de l'obtention du diplôme de

## DOCTORAT EN SCIENCES

*Option : Exploitations des mines*

### THEME

**Apport de l'outil géophysique dans la caractérisation  
du glissement du gisement de phosphate de Kef  
Essnoun Djebel Onk Nord - Est de l'Algérie.**

Par :

**SAADAOUI Salah**

**Le 10.03.2024**

**Devant le jury**

Président	Boukelloul Mohamed Laid	Professeur	Université Badji Mokhtar - Annaba
Rapporteur	Nouioua Ismail	MCA	Université Echaid Cheikh Larbi Tébessi - Tébessa
Co- encadrant	Djouama Mohamed Cherif	Professeur	Université Badji Mokhtar - Annaba
Examineur	Fehdi Chemseddine	Professeur	Université Echaid Cheikh Larbi Tébessi - Tébessa
Examineur	Boubaya Djamel	Professeur	Université Echaid Cheikh Larbi Tébessi - Tébessa
Examineur	Berdoudi Said	MCA	Université Badji Mokhtar - Annaba
Invité	Zehri Farid	MCA	Université Ferhat Abbes - Sétif

Année universitaire 2023-2024

## DEDICACES

---

Je dédie ce travail à l'âme de mon père qui reste toujours dans ma mémoire **Elhaj El Hadi**.

Je dédie aussi ce travail à ma chère mère **Hamdaoui Mebarka**, qui reste la bougie qui éclaire mon chemin.

Je dédie ce travail à ma petite famille, ma chère femme qui m'a donné l'aide morale et physique afin de réaliser ce travail et mes chers enfants **Imed, Aisseem et Manel**.

Je dédie ce travail à ma grande famille **Saadaoui**, mes frères et sœurs, sans oublier mes beaux-frères et leurs familles respectives.

**Salah**

## REMERCIEMENTS

---

Les mots sont moins forts pour exprimer mes profonds sentiments et mes sincères remerciements à ceux et à celles qui m'ont aidé, orienté et participé de près ou de loin pour pouvoir accomplir ce modeste travail.

Je tiens à remercier mon directeur de thèse **Dr Nouioua Ismail**, pour ses qualités scientifiques et sa clarté ainsi que ses qualités humaines.

Je tiens à remercier mon Co –encadrant **Pr Djouama Mohamed Cherif**, pour ses orientations et ces critiques sincères pour réaliser ce travail.

Il est de mon devoir de remercier infiniment, le président du jury d'avoir accepté de gérer cette soutenance.

Je tiens à remercier les membres du jury chacun à son nom qui m'ont donné de leurs temps pour lire et relire mon travail que je souhaite à la hauteur de leurs attentes.

Je tiens à remercier le staff du département de Génie minier de l'université Badji Mokhtar Annaba pour leurs encouragements.

Je tiens à remercier aussi mes collègues de l'institut des mines à l'université Cheikh Echahid Larbi Tébessi Tébessa pour leurs soutiens.

Je tiens à remercier mes amis, surtout mon ami et collègue **Dr Djebnougne Brahim** qui m'a donné de son expérience afin de réaliser ce travail, sans oublier **Dr Zerzour Oussama** pour son aide et son encouragement.

En fin, je remercier tout le monde.

**Salah**

## Résumé

---

L'évolution énorme dans la technologie de l'extraction de la matière première donne l'envie aux entreprises économiques et aux techniciens de faire des efforts pour répondre aux besoins des consommateurs. Ces efforts influent directement sur la nature, en créant des vides ou des cavités dans le sol et sous-sol induisant une perturbation de ces derniers qui donne par la suite des dégâts parmi lesquelles les glissements de terrain. Le glissement de terrain du gisement de phosphate de Kef Essnoun qui a été survenu en 2007, a laissé des effets indésirables jusqu'à ce jour, ce qui nous a donné l'idée d'analyser ce phénomène. L'outil géophysique est le plus convenable pour étudier ce problème. Dans notre cas, on a utilisé premièrement **la tomographie électrique** en 2D avec le dispositif Wenner et Schlumberger, avec la réalisation de deux profils électriques ERT1 et ERT2 de direction (E-O) et (S-N) respectivement dans le but de cartographier la zone de glissement en indiquant les valeurs des résistivités électriques de chaque formation géologique, qui sont comme suit : couche végétale argile marneux (  $6,95 \Omega\text{m}$  à  $27,8 \Omega\text{m}$  ), calcaires (  $55,6 \Omega\text{m}$  à  $111 \Omega\text{m}$  ), phosphate (  $222 \Omega\text{m}$  à  $445 \Omega\text{m}$  ), failles et fissures (  $890 \Omega\text{m}$  à  $1303 \Omega\text{m}$  ) qui sont probablement dues au glissement du terrain ainsi qu'à la tectonique de la région.

Et deuxièmement on a utilisé **la sismique réfraction** avec la réalisation de deux profils sismiques SP1 et SP2 superposés sur les profils électriques dans la même direction, afin de connaître les différentes formations géologiques y compris le glissement de terrain en indiquant les valeurs des vitesses des ondes de propagation et l'épaisseur de chaque couche, qui sont comme suit : Une première couche de faible vitesse d'environ  $300 \text{ m/s}$  avec  $0,5$  à  $5 \text{ m}$  d'épaisseur (SP1) et  $0,5 \text{ m}$  à  $2 \text{ m}$  (SP2) correspondant à une couche superficielle meuble et sèche, alluvions sableuse ; éboulis ainsi que les fissures et les failles soit du tectonique (dressants de Kef Essnoun) ou du glissement du terrain.

**Mots clés :** glissement, Kef Essnoun, tomographie électrique, résistivité, sismique réfraction, vitesse, fissure.

## ABSTRACT

---

The enormous evolution in the technology of raw material extraction encourages economic companies and technicians to make efforts to meet the needs of consumers. These efforts directly influence nature, by creating voids or cavities in the ground and subsoil, inducing a disturbance of the latter which subsequently causes damage, including landslides. The landslide of the Kef Essnoun phosphate deposit which occurred in 2007 has left undesirable effects until today, which gave us the idea to analyze this phenomenon.

In our case, we first used 2D electrical tomography with the Wenner and Schlumberger device, with the production of two electrical profiles ERT1 and ERT2 in direction (E-O) is (S-N) respectively with the aim of mapping the sliding zone by indicating the values of the electrical resistivity's of each geological formation, which are as follows: marly clay plant layer (6.95  $\Omega\text{m}$  to 27.8  $\Omega\text{m}$ ), limestones (55.6  $\Omega\text{m}$  to 111  $\Omega\text{m}$ ), phosphate (222  $\Omega\text{m}$  to 445  $\Omega\text{m}$ ), faults and cracks (890  $\Omega\text{m}$  to 1303  $\Omega\text{m}$ ) which are probably due to landslides as well as the tectonics of the region and secondly we used seismic refraction with the production of two seismic profiles SP1 and SP2 superimposed on the electrical profiles in the same direction, in order to know the different geological formations including the sliding of terrain by indicating the values of the propagation wave speeds and the thickness of each layer, which are as follows: A first layer of low speed of approximately 300 m/s with 0.5 to 5 m thickness (SP1) and 0.5m to 2m (SP2) corresponding to a loose and dry surface layer, alluvium sandblaster; scree as well as cracks and faults either tectonic (Kef Essnoun uprights) or landslide.

**Keywords:** landslide, kef Essnoun, electrical tomography, resistivity, seismic refraction, velocity, crack.

إن التطور الهائل في تكنولوجيا استخراج المواد الخام يشجع الشركات الاقتصادية المختصة والتقنيين على بذل الجهود لتلبية احتياجات المستهلكين. تؤثر هذه الجهود بشكل مباشر على الطبيعة، من خلال خلق فراغات أو تجاويف في الأرض وفي باطن الأرض، مما يؤدي إلى اضطراب في هذا الأخير مما يؤدي لاحقاً إلى أضرار بليغة، بما في ذلك الانهيارات الأرضية. لقد ترك الانهيار الأرضي لمنجم الفوسفات كاف السنون الذي حدث سنة 2007 آثاراً غير مرغوبة فيها حتى اليوم، وهو ما أعطانا فكرة تحليل هذه الظاهرة. تعتبر الأداة الجيوفيزيائية هي الأنسب لدراسة هذه المشكلة. في حالتنا، قمنا أولاً باستخدام التصوير المقطعي الكهربائي ثنائي الأبعاد بواسطة تقنية Wenner و Schlumberger، مع إظهار مقطعين كهربائيين ERT1 و ERT2 في الاتجاه (شرق-غرب) و (جنوب-شمال) على التوالي بهدف رسم خريطة منطقة الانزلاق من خلال الإشارة إلى قيم المقاومات الكهربائية لكل تكوين جيولوجي، وهي كما يلي: طبقة الطين المارلي ( $6.95 \Omega m$  إلى  $27.8 \Omega m$ )، الحجر الجيري ( $55.6 \Omega m$  إلى  $111 \Omega m$ )، الفوسفات ( $222 \Omega m$  إلى  $445 \Omega m$ )، الكسور والشقوق ( $890 \Omega m$  إلى  $1303 \Omega m$ ) والتي من المحتمل أنها ناجمة عن إلى الانهيارات الأرضية وكذلك التكتونية في المنطقة.

وثانياً استخدمنا الانكسار الاهتزازي مع إظهار مقطعين اهتزازيين SP1 و SP2 مترابطين على المقاطع الكهربائية في نفس الاتجاه وذلك لمعرفة التكوينات الجيولوجية المختلفة بما في ذلك انزلاق التضاريس مع الإشارة إلى قيم سرعات موجة الانتشار وسمك كل طبقة وهي كما يلي: طبقة أولى ذات سرعة منخفضة تبلغ حوالي 300 م/ث وسمك يتراوح من 0.5 إلى 5

م (SP1) ومن 0.5 م إلى 2 م (SP2) تتوافق مع طبقة سطحية فضفاضة وجافة، الرمل الغرينية؛ وكذلك الشقوق والصدوع إما التكتونية (قوائم كاف السنون أو الانهيارات الأرضية).

**الكلمات المفتاحية:** الانزلاق، كاف السنون، التصوير المقطعي الكهربائي، المقاومة، الانكسار الاهتزازي، السرعة، التشقق.

## Liste des figures

Fig.1 : Les différents types des mouvements de terrains	8
Fig. 2 : Les éléments essentiels d'un glissement de terrain	13
Fig. 3 : Les caractéristiques d'un glissement de terrain dans la formation de Capistrano San Clemente	15
Fig. 4 : Les différents dispositifs électriques	24
Fig.5 : Carte de résistivité électrique obtenue en prospection électromagnétique au moyen du CMD Mini-Explorer, pour un écartement de bobine de 118 cm	27
Fig.6 : Principe de la méthode gravimétrique	28
Fig.7 : Principe de la méthode magnétique	29
Fig.8 : Principe de la méthode de diagraphie	30
Fig.9 : Schéma du dispositif de mesure de potentiel spontané (PS)	31
Fig.10 : Les différents types d'ondes et leurs modes de propagation.	33
Fig.11 : La méthode de réfraction sismique	34
Fig.12 : La méthode de réflexion sismique	35
Fig.13 : Schéma de phosphatogénèse selon Kazakov	41
Fig.14 : Carte géographique de la région de Djebel Onk	43
Fig. 15 : Carte de situation géographique des gisements de phosphates de la région de Djebel Onk	44
Fig.16 : Colonne stratigraphique de la région de Djebel Onk	48
Fig.17 : Carte structurale de la région de Djebel Onk à l'intérieur du bassin de Gafsa – Méthlaoui – Onk	49
Fig.18 : Situation paléogéographique des gisements de phosphates de la région de Djebel Onk à l'intérieur du bassin phosphaté.	51
Fig.19 : Les cinq secteurs miniers de Djebel Onk	52
Fig.20 : Températures moyennes annuelles durant 1991 à 2008, (Station Safsaf El Ouessra de Oum Ali, Tébessa)	55
Fig.21 : Carte de situation géographique de la carrière de Kef Essnoun	57
Fig.22 : Les sites de la carrière de Kef Essnoun	59
Fig.23 : Présentation de la couche phosphatée dans la région de Kef Essnoun et localisation des sondages carottés	60
Fig. 24 : Echantillon d'un sondage carotté (ISO 22475-1:2021)	72
Fig.25 : Facteurs essentielles intervenant dans la valeur du RMR	76
Fig.26 : Echantillons pour essais	84
Fig.27 : Scie à table au laboratoire de l'institut des mines Tébessa	85
Fig.28 : Echantillons préparés	86
Fig. 29 : Écrasement des échantillons au laboratoire par presse hydraulique	86
Fig.30 : Mesures d'espacement entre discontinuités in-situ.	89
Fig.31 : Mesures d'orientation et de pendage des discontinuités in-situ	90
Fig.32 : Diagramme du plan de discontinuité dans la zone 01 calcaire-yprésien	93
Fig.33 : Diagramme du plan de discontinuité dans la zone 02 phosphate	94

Fig. 34 : Diagramme du plan de discontinuité dans la zone 03 marne	95
Fig. 35 : Diagramme du plan de discontinuité dans la zone 04 Calcaire danien-Montien	96
Fig.36 : Diagramme des familles majeures de la discontinuité dans le massif de Kef- Essnoun.	97
Fig. 37 : Sondages carottés Kef Essnoun.	98
Fig.38 : Position du talus par rapport aux plans de discontinuités	105
Fig. 39 : Le glissement de terrain de Kef Essnoun en 2007	109
Fig. 40 : Coupe géologique du glissement de Kef Essnoun avant (A) et après glissement (B).	110
Fig. 41 : Configuration du diapositif Wenner–Schlumberger	111
Fig.42 : Photo montrant le profil réalisé qui traverse la fissure	113
Fig. 43 : Résistivimètre SYSCAL+ une batterie	115
Fig.44 : Electrode	116
Fig.45 : GPS	116
Fig.46 : Résultats d'un levé géophysique (ERT1) et (ERT2) respectivement réalisé sur un glissement de terrain du gisement de Phosphate de Kef Essnoun.	118
Fig.47 : Sismographe DAQLINK III	121
Fig. 48 : Géophone	122
Fig.49 : Plaque +Marteau (position 1)	123
Fig.50 : Plaque + marteau (position2)	123
Fig.51 : Vitesse des ondes de propagation en fonction de la profondeur	127
Fig.52 : Pickwin - Pointage de tir au bout SP1.	128
Fig.53 : Plotrefa -les hodochrones correspondant aux relevés du profil Sismique SP1.	129
Fig.54 : Tomographie sismique des hodochrones théoriques et pratiques correspondant aux relevés du profil sismique SP1.	129
Fig. 55 : Pickwin - Pointage de tir au bout SP 2.	130
Fig. 56 : Plotrefa - les hodochrones correspondant aux relevés du Profil sismique SP2	130
Fig.57 : Tomographie sismique des hodochrones théoriques et pratiques correspondant aux relevés du profil sismique SP2.	131

## Liste des tableaux

<b>Tableau 1</b> : Classification des matériaux par ordre de conductivité thermique	25
<b>Tableau 2</b> : Les réserves géologiques de Djebel Onk	53
<b>Tableau 3</b> : Composition minéralogique de Phosphate du gisement Kef Essnoun	64
<b>Tableau 4</b> : Classifications/description des massifs rocheux	71
<b>Tableau 5</b> : Relation entre le RQD et la qualité de la roche	72
<b>Tableau 6</b> : Système RMR (Bieniawski).	79
<b>Tableau 7</b> : La qualité de la roche selon le système de Z. BIENIAWSKI	80
<b>Tableau 8</b> : Valeur des facteurs du SMR	82
<b>Tableau 9</b> : Description des classes SMR	83
<b>Tableau 10</b> : Propriétés mécaniques des différentes roches	87
<b>Tableau 11</b> : Propriétés physiques des différentes roches.	88
<b>Tableau 12</b> : Les paramètres géométriques des joints	92
<b>Tableau 13</b> : RQD des différents faciès	98
<b>Tableau 14</b> : Valeur du RMR de faciès (Calcaire yprésien)	100
<b>Tableau 15</b> : Valeur du RMR de faciès (phosphate).	101
<b>Tableau 16</b> : Valeur du RMR de faciès (marne).	102
<b>Tableau 17</b> : Valeur du RMR de faciès (Calcaire Danien – Montien).	103
<b>Tableau 18</b> : description de la qualité du massif de Kef-Essnoun.	104
<b>Tableau 19</b> : Orientation des joints et le talus.	105
<b>Tableau 20</b> : Valeur du SMR des différentes formations géologiques	106
<b>Tableau 21</b> : Les vitesses des ondes P, S et les masses volumiques de divers types de terrains	124
<b>Tableau 22</b> : Vitesse des ondes sismiques	125
<b>Tableau 23</b> : Vitesse des ondes longitudinales	126
<b>Tableau 24</b> : profil sismique SP1 (Est - ouest) Kef Essnoun	127
<b>Tableau 25</b> : profil sismique SP2 (Sud- Nord) Kef Essnoun	129

## Table des matières

Introduction générale.....	1
1 CHAPITRE 1 : Généralités sur les mouvements et les glissements de terrain .....	5
1.1 Introduction :.....	5
1.2 Qu'est – ce qu'un mouvement de terrain ?.....	6
1.3 Type des mouvements de terrain :.....	7
1.4 Les glissements des terrains :.....	9
1.5 Chutes des blocs :.....	9
1.6 Ecoulement :.....	9
1.7 La coulée :.....	10
1.7.1 Coulée de débris :.....	10
1.7.2 Avalanche de débris :.....	10
1.7.3 Coulée de terre :.....	10
1.7.4 Coulée de boue :.....	11
1.7.5 Fluage :.....	11
1.8 Epaissement latéral :.....	11
1.9 Les glissements des terrains.....	12
1.9.1 Introduction.....	12
1.9.2 Caractéristiques d'un glissement du terrain :.....	13
1.9.3 Types de glissements de terrains .....	16
1.9.4 Facteurs déclenchant le glissement :.....	16
1.10 Conclusion :.....	18
2 CHAPITRE 2 Apport de la géophysique à l'étude des glissements de terrain	19
2.1 Introduction.....	19
2.2 Les différentes méthodes de prospection géophysique .....	22
2.2.1 La méthode électrique :.....	22
2.2.2 La méthode électromagnétique :.....	26
2.2.3 La méthode gravimétrique :.....	28
2.2.4 La méthode magnétométrique .....	29
2.2.5 La méthode de diagraphie :.....	30
2.2.6 La méthode de polarisation spontanée :.....	31
2.2.7 La méthode sismique :.....	32
2.2.7.1 La réfraction sismique :.....	34
2.2.7.2 La réflexion sismique :.....	35
2.3 Conclusion :.....	363
CHAPITRE 3 : Cadre géologique du site d'étude.....	37
3.1 Introduction.....	37
3.2 Le gisement de Djebel Onk.....	37
3.2.1 Historique du complexe de Djebel Onk .....	37
3.3 Nomenclature des roches phosphatées.....	39
3.4 Types de gisements de phosphate .....	40
3.5 Genèse des phosphates.....	40
3.6 Phosphates et environnement.....	41

3.7	Situation géographique de gisement .....	42
3.8	Aperçu géologique.....	45
3.8.1	Géologie du gisement.....	45
3.8.2	Tectonique régionale .....	49
3.8.3	Paléogéographie.....	50
3.8.4	Lithologie du faisceau phosphaté .....	52
3.8.5	Les réserves géologiques.....	53
3.8.6	Aperçu hydrogéologique.....	53
3.8.7	Facteurs climatiques .....	55
3.8.8	Géologie locale du djebel Onk .....	56
3.8.9	Conclusion :.....	66
4	CHAPITRE 4 Classification géomécanique du massif rocheux de Kef Essnoun .....	67
4.1	Introduction .....	67
4.2	Description des systèmes de classification.....	68
4.3	Degré de fissuration de la masse rocheuse (RQD) .....	71
4.3.1	Les applications du système RQD.....	74
4.4	Système RMR .....	74
	Le groupe spécialisé SACSIR, a affiché le système RMR dans leur journal.....	74
4.4.1	Applications du système RMR .....	79
4.5	Systèmes du SMR .....	80
4.6	Observations sur les systèmes de classification.....	82
4.7	Prélèvements et mesures in-situ.....	83
4.7.1	Essais au laboratoire : Essais de compression uni axiale.....	83
4.7.2	Prise géométrique des discontinuités.....	87
4.7.3	Projection stéréographique.....	90
4.8	Classification géomécanique de massif de Kef Essnoun .....	97
4.8.1	Classification RQD (Rock Quality Désignation).....	97
4.8.2	Classification RMR du massif rocheux Kef-Essnoun .....	98
4.8.3	Classification SMR du massif rocheux Kef-Essnoun.....	104
4.9	Conclusion .....	106
5	CHAPITRE 5 : Etude géophysique par tomographie électrique et sismique du glissement de Kef Essnoun. ....	107
5.1	Application de la tomographie électrique :.....	107
5.1.1	Introduction : .....	107
5.1.2	Conditions générales :.....	107
5.1.3	Technique de tomographie par résistivité électrique (ERT).....	109
5.1.5	Instruments de mesure .....	113
5.1.6	Résultats et discussions : .....	116
5.2	Réfraction sismique .....	118
5.2.5	Application de la réfraction sismique : .....	118
5.3	Conclusion :.....	133
	Conclusion générale et perspectives.....	134
6	Bibliographie.....	136

## Introduction générale

---

L'exploitation abusive des ressources minérales due à la demande progressive du marché mondial, a souvent laissé des effets indésirables. L'extraction de ces ressources est généralement engendrée par des endommagements créés dans le sol et accompagnée par des effondrements d'ouvrages souterrains ou des glissements de terrain dans l'exploitation à ciel ouvert ([Nouioua, Fehdi, Boubaya, Serhane, & Djeleli, 2015](#)). Un glissement de terrain consiste essentiellement dans le déclenchement brusque ou progressif des roches sous l'effet de la pesanteur ([Israil & Pachauri, 2003](#)). Le glissement de terrain de Kef Essnoun survenu en 2007 est un fait accompli mais les fissures qui apparaissent dans le périmètre d'exploitation de la mine restent un danger imprévisible et probablement c'est un indice d'un autre éventuel glissement.

La complexité des phénomènes géologiques est un facteur prédéterminant dans les glissements de terrain ce qui influe négativement sur l'environnement. ([Perone, 2014](#)).

Les conditions géologiques et hydrologiques caractérisent généralement les phénomènes des glissements de terrain ([Sastry,, Mondal, & Pachauri , 2006](#)). L'état intrinsèque du glissement de terrain, autrement dit le comportement interne de ce dernier, joue un rôle primordial et l'état complexe de plusieurs glissements de terrain exige la connaissance de leurs caractéristiques d'une façon approfondie afin de déterminer les conditions réelles de leur stabilité. ([Bichler, et al., 2004](#)).

L'estimation de la création du glissement de terrain, nécessite de connaître profondément les conditions géologiques et géotechniques du glissement de terrain. Par conséquent, les méthodes géophysiques sont très utiles dans l'analyse des glissements de terrain. Ils sont efficaces et précis (Pasierb, Grodecki, & Gwózdź, 2019). L'objectif de la prospection géophysique est de connaître la géométrie des dépôts, au-delà des endroits déjà identifiés, cela nous aide à assimiler l'origine de la zone fossilifère, et de diriger les travaux dans les endroits à prospecter. (Debard, 2004).

Les informations obtenues à partir de levés géophysiques sont utilisées comme données d'entrée pour définir des modèles des glissements de terrain et par conséquent effectuer une évaluation de la stabilité des pentes. (Hussain, et al., 2019)

En géophysique appliquée il existe plusieurs techniques à savoir la réflexion sismique et réfraction (Hack, 2000) la gravimétrie (Gaudio, Wasowski, Pierri, Mascia, & Calcagnile, 2000) (Perrone, A; Piscitelli, S; Lapenna, V, 2012), géoradar (Jongmans & Garambois, 2007), (Borecka, Herzig,, & Durjasz-Rybacka , 2015) et la tomographie de résistivité électrique (ERT) (Fehdi, Baali, Boubaya, & Rouabhia , 2011). Cette dernière est considérée comme une technique géophysique la plus utilisée dans l'étude du glissement des terrains (Sigdel & Adhikari, 2020).

La tomographie de résistivité électrique ou imagerie électrique (Boubaya, et al., 2017) est une technique de prospection géophysique, bien adaptée à l'étude structurale des glissements de terrain et à la compréhension de leurs mécanismes internes de déformation et de rupture (Bouaziz,2015). Elle permet d'obtenir des images de la variation de la résistivité électrique de haute résolution en 2D ou 3D des formations géologiques (Jomard, Lebourg, Guglielmi, & Tric, 2010). Cette technique est basée sur l'hypothèse que les matériaux géologiques du sous-sol présentent des contrastes de résistivité significatifs qui peuvent être identifiés sur la base de mesures en surface (Arjwech & Everett, 2015).

La réfraction sismique a pour but de déterminer les vitesses de propagation des ondes sismiques ainsi que la profondeur des différentes interfaces, l'onde sismique se réfracte sur l'interface et revient aux sismographes qui sont situés à la surface du sol. Le parcours de l'onde réfractée permet de déterminer la profondeur des interfaces. Le but de ce travail est de présenter les résultats des levés géophysiques (tomographie électrique, sismique réfraction) réalisé sur un glissement de terrain du gisement de Phosphate de Kef Essnoun (nord-est d'Algérie) afin de cartographier les différentes formations géologiques (fissures, marne, phosphate, calcaire) en fonction de leurs résistivités, et la vitesse de propagation des ondes.

Notre travail dans cette thèse, comprend cinq chapitres essentiels dans l'ordre suivant :

- **Le premier chapitre** est consacré à donner les différents types de mouvements de terrains d'ordre général avec une explication de chaque phénomène et à avoir une idée sur leurs causes et circonstances avec la spécification de glissement de terrain (étude de cas de glissement de gisement de phosphate survenu en 2007 dans la carrière de Kef Essnoun).
- **Le deuxième chapitre** est basé sur une étude bibliographique sur les méthodes de prospection géophysique et leur utilisation pour détecter et prévenir les catastrophes naturelles telles que les glissements de terrain.
- **Le troisième chapitre** fait connaître les conditions géologiques, hydrogéologiques et géotechniques de la région de Djebel Onk, ainsi que pour le gisement de phosphate de Kef Essnoun dans le but de déterminer les paramètres intrinsèques du massif rocheux.
- **Le quatrième chapitre** Pour que le travail soit achevé, il est nécessaire de faire une classification géomécanique du massif rocheux de Kef Essnoun. Pour cela, on utilise les données précédentes à l'aide des systèmes (RMR, SMR, RQD) afin de déterminer la qualité du massif rocheux.

- **Le cinquième chapitre** Enfin les données sont réunies pour l'application de l'outil géophysique par la tomographie électrique et sismique réfraction afin de faire un diagnostic de l'état du glissement de gisement de phosphate de la carrière de Kef Essnoun à travers deux paramètres cibles qui sont la résistivité électrique et la vitesse des ondes de propagation.

# 1 CHAPITRE 1 : Généralités sur les mouvements et les glissements de terrain

---

## 1.1 Introduction :

L'analyse de l'activité gravitationnelle n'est pas une nouvelle spécialité. Effectivement, dès 1856, Colin a proposé une classification des mouvements du sol, qui a ensuite été développée par d'autres auteurs (Varnes, 1978 ; Antoine, 1992 ; Antoine et Giraud, 1995 ; Gruden et al Varnes, 1996 ; Hantz et al. 2002). Ces différents types sont classés selon plusieurs facteurs à savoir : matériaux impliqués, le mécanisme de rupture, la teneur en eau ainsi que la vitesse des mouvements. Ces glissements de terrain peuvent être caractérisés en fonction de volume, de la surface et la hauteur des sédiments par des investigations géotechniques ou, par des levés géophysiques.

Les glissements de terrain sont des phénomènes souvent intenses et imprévisibles qui peuvent être étendue sur une grande surface.

Le type de mécanisme qui régule l'instabilité du massif dépend des facteurs intrinsèques (géologie, hydrogéologie, topographie, dégradation des propriétés mécaniques, etc.) des facteurs externes (précipitations, séisme, fonte des glaces, gel. . .).

## 1.2 Qu'est – ce qu'un mouvement de terrain ?

Les étapes d'un mouvement de terrain du point de vue cinématique peuvent être divisées comme suit : (Azimi & Desvarreux, 1996)

- La première étape correspond à la stabilisation du bloc. Les sollicitations provoquent une déformation instantanée ou retardée de la masse rocheuse rapidement dispersée,
- La deuxième étape correspond à des mouvements où les déformations sont stables dans le temps et leur vitesse dépend du type de chaque phénomène.
- La troisième étape correspond à l'accélération conduisant à la rupture. Le taux de déformation devient élevé et les dommages au matériau sont irréversibles.

Pour connaître l'ampleur potentielle d'un mouvement de terrain, il est important de se baser sur les mécanismes sous-jacents à cet aléa ainsi que sur sa dynamique. Parallèlement, la dynamique de propagation des massifs rocheux est actuellement peu connue. Les chercheurs dans ce domaine s'accordent à dire que la mobilité événementielle augmente avec l'augmentation du volume impliqué. Au niveau de la rupture, des essais au laboratoire ont montré que l'augmentation des fissures ou failles peut être mesurée grâce à l'émission acoustique produite par ce phénomène (Lockner, 1993).

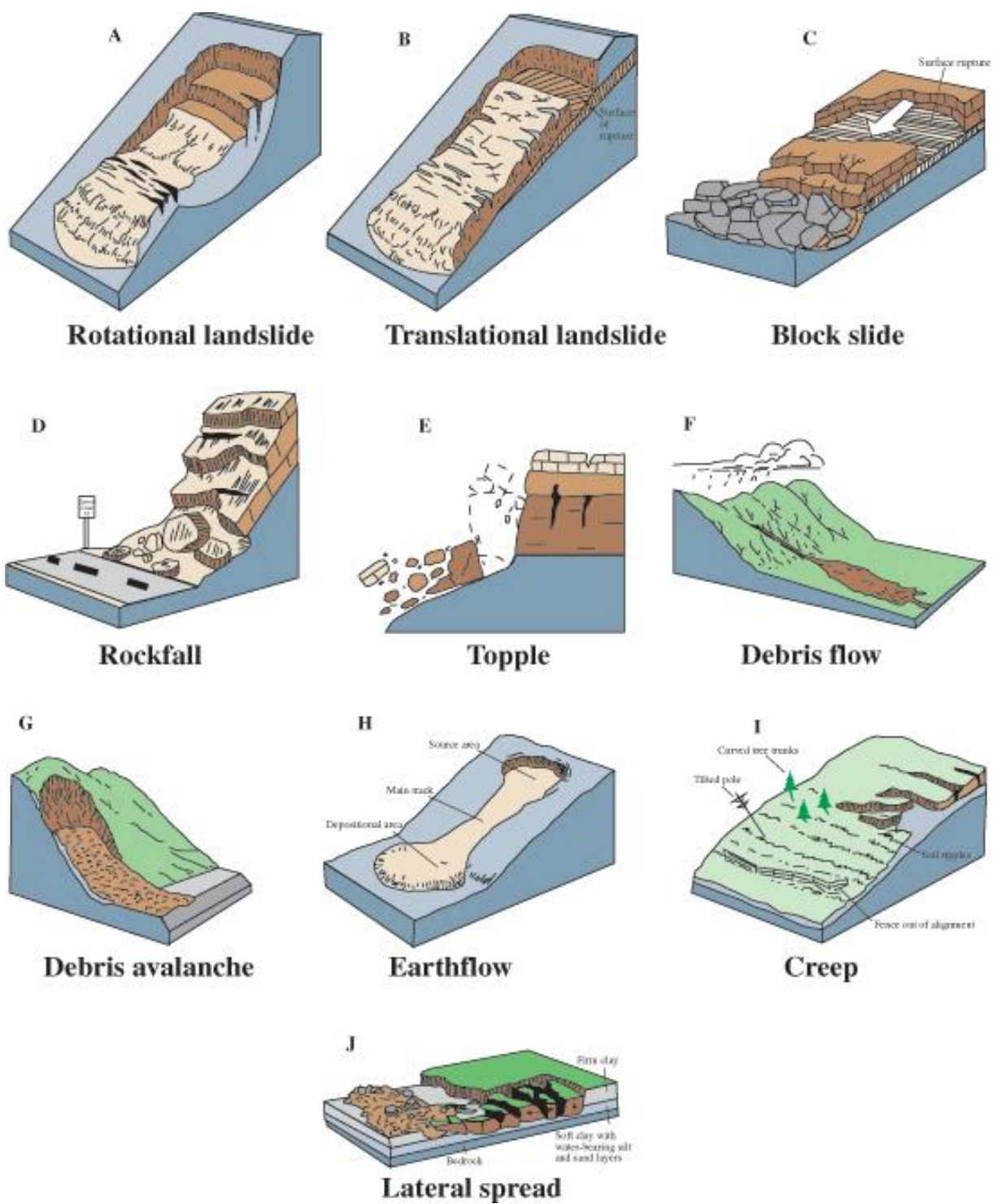
Pour mieux comprendre les mécanismes qui régissent le mouvement du sol, les chercheurs utilisent de plus en plus des modèles numériques pour expliquer les observations. Par exemple, (Nemčok, Pašek, & Rybář, 1972) a proposé d'expliquer les déformations observées par des mesures topographiques de mouvement par des méthodes numériques à facteurs discrets. D'autres modèles ont été appliqués aux mouvements gravitationnels profonds (Merrien-Soukatchoff, Quenot, & Gugliemi, 2001) et (Sornette, et al., 2004).

Ces exemples ne s'appliquent qu'aux mouvements dont la dynamique est connue. Les auteurs ont également tenté de simuler la trajectoire des glissements de terrain à partir d'indicateurs géomorphologiques, comme pour les glissements de terrain à Randa ( [Rouiller & Rey, 1992](#) ) ou à Valpola ( [Crosta, Chen , & Lee, 2004](#) ).

### **1.3 Type des mouvements de terrain :**

La CFGI (Commission française de géologie technique), distingue six types de mouvement :

1. Un glissement de terrain provoqué par une contrainte de cisaillement locale, (Fig1 A –B)
2. L'écoulement représente les mouvements du sol avec des propriétés proches de celles des liquides ; ce dernier couvre un large éventail de phénomènes allant de la dissolution (écoulement lent sans limites) à l'écoulement des boues, (Fig1 F-H-G)
3. Le fauchage correspond à l'inclinaison du haut de la couche vers l'aval, (Fig. 1.I)
4. Le mouvement composé implique en même temps différents types, (Fig1.J)
5. Le mouvement à grande échelle affecte une grande partie de la pente. Il se produit sur des pentes rocheuses fortement fracturées et sont parfois classés comme des glissements de terrain (Fig1. C)
6. Les glissements de terrain sont des mouvements extrêmement rapides dans lesquels des blocs tombent, rebondissent, roulent ou glissent. (Fig1D-E)



**Fig.1** : les différents types des mouvements de terrains

**Sources** : <https://pubs.usgs.gov/fs/2004/3072/images/Fig3grouping-2LG.j>

#### **1.4 Les glissements des terrains :**

Il existe plusieurs types de mouvement de masse inclus dans le terme général « glissement de terrain », une utilisation plus limitée du terme se réfère uniquement au mouvement de masse, dans lequel il existe une région distinctement faible séparant le matériau de glissement du matériau sous-jacent plus stable

Les deux principaux types de glissements de terrain sont les glissements circulaires et les glissements plans.

Pour le glissement circulaire Il s'agit d'un glissement dans lequel la surface de rupture se courbe vers le haut et le mouvement du glissement tourne autour d'un axe parallèle au sol et horizontal au glissement (Fig 1.A).

Dans ce type de glissement de terrain (plans), la masse du glissement de terrain se déplace le long d'une surface presque plane qui peut tourner légèrement ou s'incliner vers l'arrière (Figure 1.B). Un bloc coulissant est un bloc coulissant en translation dans lequel la masse mobile est constituée d'une unité ou de plusieurs unités étroitement liées se déplaçant vers le bas comme un bloc relativement serré (Fig 1.C). ([Interior, July 2004](#))

#### **1.5 Chutes des blocs :**

Une chute de bloc est un mouvement soudain de blocs de matériaux géologiques, tels que des roches et des pierres, qui décomposent des pentes raides ou des falaises (Fig 1.d). La séparation se produit le long des discontinuités telles que les fissures, les joints et les plans de stratification, et le mouvement se produit en raison de la chute libre, du rebond et du roulement. La gravité joue un grand rôle dans les chutes des blocs, l'altération mécanique et la présence d'eau interstitielle ([Interior, July 2004](#))

#### **1.6 Ecoulement :**

Les chutes sur une pente sont caractérisées par la rotation vers l'avant d'un ou de plusieurs éléments autour du point de pivot ou en dessous de l'élément, sous l'influence de la gravité et de la force exercée par les éléments adjacents ou par le liquide dans les fissures. (Fig. 1.E) ([Interior, July 2004](#))

## 1.7 La coulée :

Il existe 5 groupes de flux de base qui diffèrent les uns des autres de manière fondamentale. (Interior, July 2004)

### 1.7.1 Coulée de débris :

Le flux de débris est une forme de mouvement de masse rapide dans lequel une combinaison de sol meuble, de roche, de matière organique, d'air et d'eau est mobilisée sous forme de boue descendante (Fig1.F). Le pourcentage des fines dans les débris est < 50%. Le ruissellement des débris est généralement causé par de forts courants d'eau de surface, les fortes pluies ou la fonte rapide des neiges érodent et déplacent le sol meuble ou la roche sur les pentes abruptes. Les coulées de débris qui se mobilisent également souvent à partir d'autres types de glissements de terrain est se produisent sur des pentes abruptes, sont presque saturés et se composent d'une grande proportion de sable et de matériaux de la taille du limon. Les zones sources de coulées de débris sont souvent associées à des tranchées abruptes, et les coulées de débris sont souvent indiquées par la présence d'éventails de débris à l'embouchure des tranchées. Les incendies qui enlèvent la végétation sur les pentes augmentent la susceptibilité des pentes aux coulées de débris.

### 1.7.2 Avalanche de débris :

Il s'agit d'une série de coulées de débris allant de très rapide à extrêmement rapide (Figure 1.G)

### 1.7.3 Coulée de terre :

L'écoulement du sol a une forme caractéristique de "sablier" (Fig1.H). Le matériau qui se trouve sur la descente se liquéfie et s'écoule, formant un bol ou une cavité au sommet. L'écoulement lui-même est étendu et se produit généralement dans des matériaux à grains fins ou des argilites sur des pentes moyennes et dans des conditions saturées. Mais, il peut également y avoir un écoulement sec de matériau granulaire.

#### **1.7.4 Coulée de boue :**

Un flux de terrain est un glissement de terrain composé d'un matériau contenant un pourcentage important d'eau pour s'écouler rapidement et contenant au moins 50% de particules de la taille du sable, du limon et de l'argile. Généralement on nomme les coulées

#### **1.7.5 Fluage :**

Le glissement est un déplacement lent, régulier et descendant du sol ou de la roche formant une pente. Le mouvement causé par la contrainte de cisaillement est suffisant pour produire une déformation permanente, mais trop faible pour produire une rupture par cisaillement. Il existe généralement trois types de mouvements :

- 1) saisonnier, où le mouvement de la profondeur du sol est influencé par les changements saisonniers de l'humidité et de la température du sol ;
- 2) continu, où la contrainte de cisaillement dépasse continuellement la résistance du matériau ;
- 3) progressif, où les pentes atteignent le point de rupture, tout comme les autres types de mouvements de masse. Les mouvements sont indiqués par des troncs tordus, des clôtures ou des murs de soutènement déformés, des colonnes ou des clôtures inclinées et de petites ondulations ou crêtes dans le sol (Fig.1.I)

#### **1.8 Epaissement latéral :**

Les déformations latérales sont particulières car elles se produisent souvent sur des pentes très douces ou sur des terrains plats (Fig 1.J). Le mode de mouvement prédominant est l'extension latérale accompagnée d'une fracture par cisaillement ou par traction. La défaillance est causée par la liquéfaction, le processus par lequel les sédiments lâches saturés (généralement du sable et du limon) sont transformés d'un état solide à un état liquéfié. Les incidents sont souvent déclenchés par des mouvements rapides du sol, comme ceux qui se produisent lors d'un tremblement de terre, mais peuvent également être provoqués artificiellement.

Lorsqu'un matériau cohésif, qu'il s'agisse de substrat rocheux ou de sol, repose sur des matériaux liquéfiés, les unités supérieures peuvent subir une fracture et une expansion, qui peuvent alors s'affaisser, se déplacer, tourner, se décomposer ou se liquéfier et s'épuiser. L'épandage interne de matériaux à grains fins sur des pentes peu profondes est généralement graduel. Une panne soudaine qui commence dans une petite zone et se propage rapidement. Habituellement, la défaillance initiale est un affaissement, mais dans certains matériaux, le mouvement se produit sans raison apparente. Une combinaison de deux ou plusieurs des éléments ci-dessus est appelée un glissement de terrain complexe. ([Interior, July 2004](#))

## **1.9 Les glissements des terrains**

### **1.9.1 Introduction**

Généralement Les glissements de terrain sont l'un des principaux types des activités de terrain, les autres sont plus précisément les chutes de pierres, les effondrements, les coulées de boue ou encore le fauchage ([Cruden, A Simple Definition of a Landslide , 1991](#)) et ([Cruden & Varnes, Landslide Types and Processes, 1996](#))).

Un glissement de terrain est une activité massive de roches, de débris, de sol ou de boue vers le bas. La pesanteur est un facteur essentiel dans le déclenchement d'un glissement de terrain, ils peuvent aussi être causés par la pluie, les séismes, les éruptions volcaniques, la pression des nappes phréatiques, l'érosion, la déstabilisation des pentes due à la déforestation, la culture et la construction, et la fonte des neiges ou des glaciers. Les coulées de débris, ou glissements de terrain, sont des glissements de terrain rapides qui sont particulièrement dangereux en raison de leur vitesse et de leur masse. La vitesse de certaines coulées de débris peut atteindre des vitesses de plus de 160 km/h. ([ifrc](#))

Le glissement de terrain est considéré comme un phénomène géologique très important et est courant en terrain montagneux. La connaissance des types de glissement ; de l'état intrinsèque ainsi que les éléments déclencheurs minimisent également les dommages à la vie humaine et matériels ainsi qu'aux infrastructures.

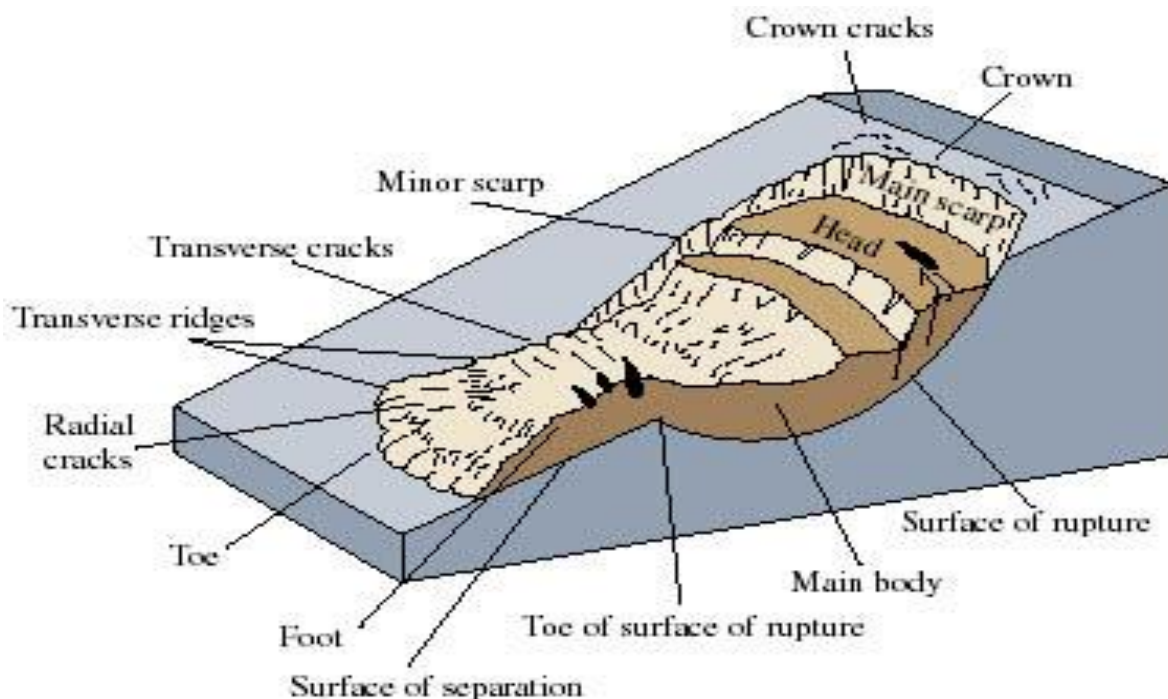
Pour cartographier les risques, des recherches sont utiles dans le but de protéger ces zones.

Les conditions géologiques, géotechniques et hydrogéologiques doivent être préalablement identifiées. (Sid, 2016)

## 1.9.2 Caractéristiques d'un glissement du terrain :

### 1.9.2.1 Définition d'un glissement de terrain :

Un glissement de terrain est considéré comme un phénomène géologique qui correspond au déplacement de sol meuble ou de roche le long d'une surface de destruction. Les glissements de terrain peuvent être provoquée par des catastrophes naturelles entraînant la mort ainsi que le dommage des moyens matériels et aux infrastructures. Ils se produisent généralement dans des matériaux peu cohésifs (marne, argile). Un glissement de terrain se produit lorsque la contrainte de cisaillement, due à des forces appliquées telles que le poids, dépasse la résistance du sol le long de la surface de destruction (AMEUR, 2014) voir figure-2-



**Fig. 2** : les éléments essentiels d'un glissement de terrain.

**Source** : glissement rotationnel transformé en écoulement terrestre (Varnes, 1978,).

### 1.9.2.2 **La surface de glissement :**

Il existe une surface, ou plus, de glissement à faible épaisseur ou une couche épaisse qui sépare la masse rocheuse glissante dans sa propre trajectoire d'une manière continue. La forme de la surface de glissement est convexe, plate, intermédiaire et complexe (Pariaux, 2010).

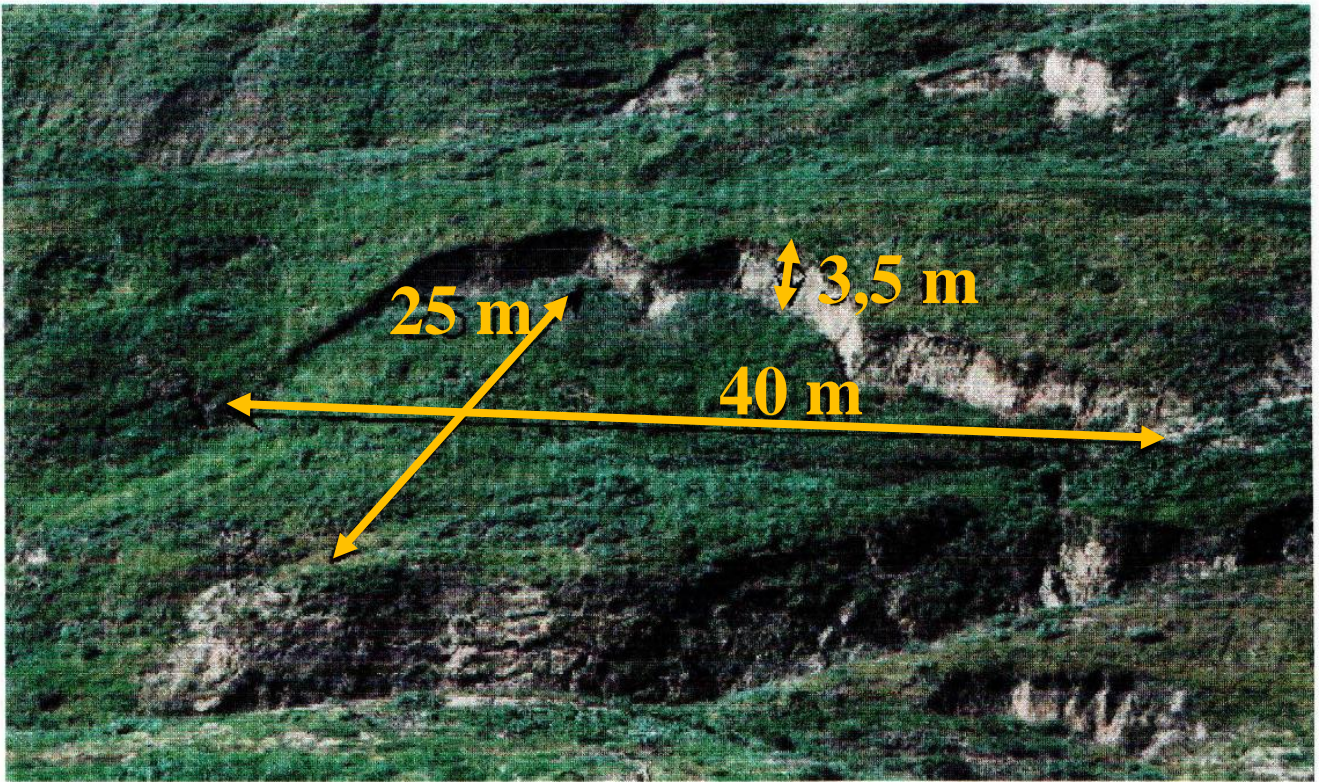
Autrement dit, L'existence d'une ou plusieurs surfaces de glissement minces ou d'une zone de matériau fortement ample qui sépare en permanence le terrain in situ du bloc de glissement lui-même ; les surfaces de glissement peuvent être incurvé (glissement circulaire, figure 1A) ou plates (glissement plane, figure 1B), y compris toutes les formes intermédiaires et complexes ; (Pariaux, 2010).

### 1.9.2.3 **La nature du milieu de glissement :**

Les roches friables d'âge quaternaire qui jouent un rôle primordial dans les glissements de terrain peuvent être trouvées dans les zones de destruction des roches ou aux interfaces du recouvrement. (Pariaux, 2010).

### 1.9.2.4 **Les dimensions :**

La taille d'un glissement de terrain est très variable, allant de quelques mètres carrés à plusieurs kilomètres carrés en surface et de 2 mètres à plusieurs centaines de mètres en profondeur et enfin de quelques mètres cubes à plusieurs mètres cubes des millions ou des milliards de mètres cubes de volume. (Sid, 2016) Voir Fig-3-



**Fig. 3 :** Les caractéristiques d'un glissement de terrain dans la formation de Capistrano San Clemente,

**Source:** California by Damon Nygren December 14, 2000 Senior Thesis 498B, Geological Sciences San Diego State University Advisor: Dr. Pat Abbott

#### 1.9.2.5 l'ampleur:

Le mouvement des terres et leur étendue changent avec le temps. Les glissements de terrain peuvent être intenses ou prolongés selon les conditions géologiques, climatiques ou géotechniques. D'autres paramètres pouvant déclencher ou provoquer des glissements de terrain tels que les séismes (Pariaux, 2010)

### 1.9.3 Types de glissements de terrains

#### 1.9.3.1 Les glissements rotationnels :

Un glissement de terrain dans lequel la surface de la destruction se courbe vers le haut et le mouvement de glissement tourne autour d'un axe parallèle au sol et croise le point du glissement de terrain. ( [Highland & Bobrowsky, 2008](#))

#### 1.9.3.2 Les glissements plans :

Dans ce type de glissement de terrain, la masse de ce glissement de terrain se déplace le long d'une surface presque plane, avec peu de rotation ou d'inclinaison vers l'arrière (Fig 3 B). Le glissement plan est un glissement de transfert dans lequel la masse mobile se compose d'une unité ou de plusieurs unités étroitement liées se déplaçant vers le bas comme un bloc relativement serré. . ( [Highland & Bobrowsky, 2008](#))

#### 1.9.4 Facteurs déclenchant le glissement :

Le déclenchement des glissements de terrain correspond à une combinaison de plusieurs facteurs. On distingue souvent les facteurs qui déterminent la possibilité aux glissements de terrain (géologie, présence d'eau souterraine, pente, etc.) des déclencheurs qui conduisent aux glissements de terrain (précipitations, augmentation de la circulation de l'eau, augmentation de la pression ou la quantité des eaux souterraines, érosion des pieds, etc.). Dans tous les cas, l'eau sous toutes ses formes joue un rôle clé dans de nombreux mécanismes de déstabilisation ([Parriaux, Géologie: bases pour l'ingénieur, 2009](#)). Par conséquent, le potentiel d'impact sur les effets liés à l'eau est une question importante dans le contexte de l'assainissement des glissements de terrain.

La forme et les propriétés des caractéristiques géologiques qui composent le glissement de terrain sont souvent très compliquées, en raison des processus affectant le mouvement de la matière, depuis l'état fondamental en place jusqu'à l'état de glissement de masse. Cette transformation inclut non seulement la composante cinétique, mais également les phénomènes de changement et de dissociation au cours du mouvement. Ainsi, les propriétés du matériau sont réparties de manière non uniforme dans la masse, de manière plus ou moins organisée. Dans le cas du flysch, l'hétérogénéité due au mouvement s'ajoute à l'hétérogénéité originelle du matériau rocheux. En plus de la forme complexe de la masse du glissement de terrain (échelle métrique à décimale), la forme du glissement de terrain (l'échelle de l'hectomètre) présente souvent une forte variation en trois dimensions. Sur le côté latéral, la forme en sablier reflète souvent la transition entre l'ablation et la région d'accumulation. En profondeur, les activités des terrains sont gérées par les lois de la mécanique, les propriétés du terrain et du sol, ainsi que les conditions hydrogéologiques. Ces caractéristiques font ressortir les systèmes tridimensionnels glissants, difficiles à représenter en deux dimensions sans perte importante d'informations. Ceci est d'une grande importance lors de la sélection des outils de modélisation géologique et hydrogéologique. (Bonnard, 1996).

#### 1.9.4.1 **Facteurs géologiques ou morphologique :**

- La formation de la roche
- L'eau
- La sécheresse
- L'érosion
- L'activité sismique
- L'activité volcanique

#### 1.9.4.2 **Facteurs humains :**

- La construction des infrastructures
- Déforestation
- Irrigation
- L'urbanisation
- L'exploitation minière

### 1.10 **Conclusion :**

Les mouvements de terrains avec ses différents genres tels que les coulées de débris, l'éroulement, le fluage, les glissements de terrains, les éboulements sont considérés comme des phénomènes dangereux dans la nature qui doivent être étudié et analysé sérieusement chacun a ses conditions et ses causes, alors les glissements de terrains représentent un risque fatal sur la vie humaine et matérielle.

Le déclenchement de ces mouvements de terrains est souvent imprévisible et instantanés et ne donne pas le temps de réfléchir et de préconiser les interventions et les solutions qu'on peut faire pour minimiser les dégâts inattendus de ces phénomènes.

La connaissance du type de glissement (plan, rotationnel) ainsi que les dimensions, la vitesse, le volume donne une identification réelle de ce phénomène. Donc, l'utilisation de l'outil géotechnique et géophysique est nécessaire dans ce genre de problèmes, et pour mieux comprendre le mécanisme du déclenchement, il faut connaître les facteurs responsables sur le plan géologique, morphologique et humain.

## 2 CHAPITRE 2 Apport de la géophysique à l'étude des glissements de terrain

---

### 2.1 Introduction

Les glissements de terrain sont déterminés grâce à plusieurs méthodes et instruments à savoir :

- (i) Cartographier les différentes formations géologiques (Brunsden, 1985) et (Brunsden, 1993),
- (ii) Interpréter des photographies aériennes stéréoscopiques obliques (API) (RIB & LIANG, 1978) et (Turner & Schuster, 1996),
- (iii) Surveiller la surface et le sous-sol (Lacerda, Ehrlich, & Fontoura, 2004);
- (iv) Une technologie nouvelle de télédétection (Mantovani, Soeters, & Van Westen, 1996) et (UNESCO, 2021), telle que l'interprétation radar à ouverture synthétique (SAR) (Czuchlewski, Weissel, & Kim, 2003) (HILLEY, BÜRGMANN, FERRETTI, NOVALI, & ROCCA, 2004); (Catani, Casagli, Ermini, Righini, & Menduni, 2005), l'utilisation des multi spectral à haute résolution (Zinck, López, Metternicht, Shrestha, & Selem, 2001); (Cheng & Shi, 2004), ou analyser des MNT de haute qualité obtenus à partir des détecteurs dans l'espace ou par voie aérienne (Kääb, 2002); (McKean & Roering, 2003).

L'étude bibliographique des archives, des registres et des journaux, ainsi que l'intervention des spécialistes dans le domaine de mouvements de terrains sont nécessaires pour connaître les glissements de terrain, par conséquent le rassemblement des données et d'informations sont préconisé sur les glissements de terre en question (Guzzetti, et al., 2020).

Pour mieux comprendre et prévoir le développement des glissements de terrain il est nécessaire de fournir des informations quantifiables sur leurs volumes, leurs états de désagrégation et leurs données hydrogéologiques. Les démarches et les expériences sont utilisées afin de faire une étude importante sur les apports et les limites des différentes techniques géophysiques (méthodes électriques, méthodes sismiques,) dans le but de caractériser les mouvements du sol. ( Thirard, 2022)

Un « mouvement de terrain » est le déplacement d'un bloc de roche, de fragments ou de sol vers le bas sous l'effet de la pesanteur ( Varnes, 1978); ( Li & Mo, 2019) . Divers facteurs déclenchent des glissements de terrain, tel que des pluies abondantes, des séismes, une fonte accélérée des neiges et d'autres phénomènes. Les glissements de terrain contiennent des mouvements en forme de liquide, effondrement, de basculement ou de chute. Certains glissements de terrain regroupent un ou plusieurs types de mouvement ( Reichenbach, Rossi, Malamud, Mihir, & Guzzetti , 2018).

Les glissements de terrain sont l'un des phénomènes naturels les plus graves et les plus courants, touchant des zones importantes dans le monde et provoquant des dégâts humains et matériels considérables. Ces risques endommagent les ouvrages motrices (bâtiments, routes, autoroutes, barrages, carrières, mines souterraines, etc.) Ils nécessitent des tests approfondis en raison de leur complexité structurelle et de leur extension topographique. Les conditions de travail difficiles rendent les démarches d'identification difficiles et coûteuses (Kherrouba, Lamara, & Benzaid, 2019) .

La télédétection et prospection géophysiques, y compris les systèmes d'acquisition d'images, les géo capteurs, les scanners laser au sol (TLS), les profils sismiques, tomographie électriques, géo radar, etc. (Margottini, Canuti, & Sassa, 2013); (Zheng, Song, & Meng, 2022) donnent l'explication de ces types d'événements et prévoient le moment de rupture ainsi que leur étendue dans le temps, en définissant clairement la morphologie du glissement de terrain et leur profondeur.

La tomographie électrique (ERT) (Chibani, Hebbache, Mellas, & Mabrouki, 2023), est un dispositif géophysique stimulant couramment utilisé afin d'avoir les différentes formations géologiques en fonction de leur résistivité bien déterminé (Hebbache, Mellas, & Boubaya, 2016); (Cubbage, Noonan, & Rucker, 2017); (Nordiana, Bery, Taquiuddin, Jinmin, & Abir, 2018).

Vue l'utilité de l'ERT dans la reconnaissance des mouvements de terre, un nombre important de travaux de recherches de cas a été annoncé dans le monde (Grandjean, Penetier, Bitri, Meric, & Malet, 2006) et (Bouaziz, 2015).

On utilise l'ERT dans l'étude des mouvements de terre pour leur efficacité dans les zones rocheuse qui contiennent une quantité d'eau importante ainsi que pour les colluvions qui sont des paramètres importants dans le déclenchement des éboulements de terre. Des études faites pour l'évaluation du comportement d'un glissement et le rôle des eaux souterraine dans le déclenchement des glissements de terre par le biais de la conductibilité électrique et d'autres méthodes de prospection sismique (Akpan, Ugbaja, & George, 2013). La résistivité électrique est un paramètre déterminant dans le comportement d'une région de la pente en prédisant l'emplacement de la surface endommagée.

La prospection sismique est basée sur la vitesse de propagation des ondes P et S, en fonction des propriétés mécaniques ou hydrogéologiques (zone de saturation) du milieu.

L'utilisation des méthodes électriques et électromagnétiques est basée sur la mesure de la résistivité selon chaque type de matériau, les discontinuités, de l'humidité et/ou argile et des propriétés chimiques de l'eau.

Le géoradar est basé sur la permittivité diélectrique. ( [EL-QADY, HAFEZ1, A. ABDALLA, & USHIJIMA, 2005](#))

Le principe de la méthode magnétique est basé sur la sensibilité magnétique

Les méthodes gravitationnelles fournissent des données sur la densité du terrain sous-jacent ( [EL-QADY, HAFEZ1, A. ABDALLA, & USHIJIMA, 2005](#))

Nous avons réalisé des profils géophysiques sur le glissement de Kef Essnoun. Les facteurs principaux pour caractériser la morphologie d'un glissement de terrain sont comme suit :  $\rho$  (tomographie électrique), VP (sismique réfraction et tomographie) et VS (sismique réfraction et analyse des ondes de surface).

## **2.2 Les différentes méthodes de prospection géophysique**

### **2.2.1 La méthode électrique :**

La méthode électrique est basée sur la mesure de la différence de potentiel impliquée dans la transmission du courant électrique dans le sol ( [Rønning, Ganerød, & Dalsegg, 2014](#)). Afin de donner une répartition de résistivité des formations étudiées.

Les premières mesures de résistivité ont été réalisées par Conrad Schlumberger en 1920 dans le domaine minier, pétrolier et gazier. Depuis cette époque, l'exploration électrique a été principalement axée sur l'utilisation et l'interprétation du profil électrique (profil vertical 1D KUNETZ, 1966). A partir des années 1970, une évolution de la technique électrique sous forme de tableaux électriques (dimensions 2D, EDWARDS, 1977). A partir des années 1990 l'apparition des outils informatiques, joue un rôle très important dans le développement des méthodes d'imagerie 2D et 3D combinée à des algorithmes d'inversion très avancés (OLDENBURG et al, 1993 ; LOKE et BARKER, 1996 ; TSOURLOS et al., 1998 ; KIM et al., 1999 ; MAURIEL-LO et PATEL-LA, 1999)

Il existe plusieurs outils de saisie en fonction des électrodes implanté de courant pour la mesure de potentiel (par exemple Wenner, Schlumberger, Dipôle-dipôle). Ces profils ont leur propre profondeur de pénétration ( ( Edwards, 1977) ( Dahlin & Zhou, 2004)des coordonnées bien déterminés et des sensibilités. (Loke, 2004). La profondeur de pénétration est déterminée en fonction d'un algorithme dont la structure du sol n'affecte plus les données.

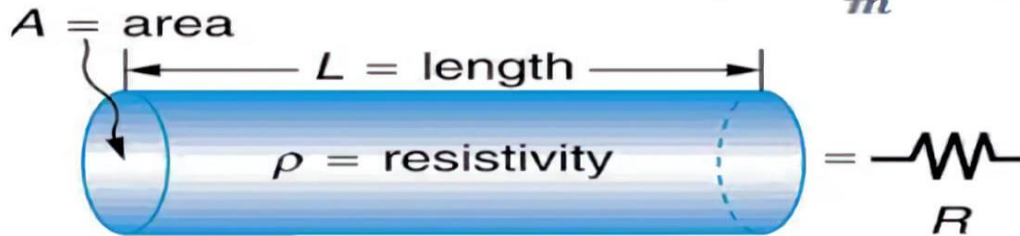
## lois de la résistivité

$$R = \frac{\rho L}{A}$$

$$A \times R = \rho L$$

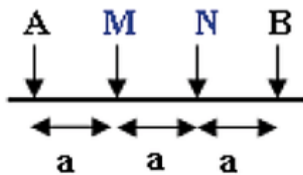
$$\rho = \frac{A \times R}{L}$$

$$\rho = \frac{m^2 \Omega}{m} = m\Omega$$

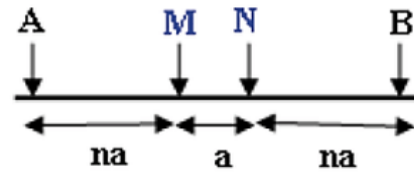


$$R = \rho \frac{L}{A}$$

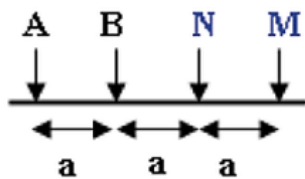
www.aquaportail.com



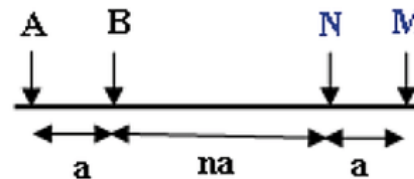
Wenner  $\alpha$



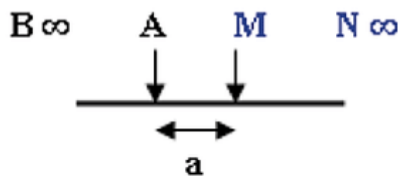
Wenner-Schlumberger



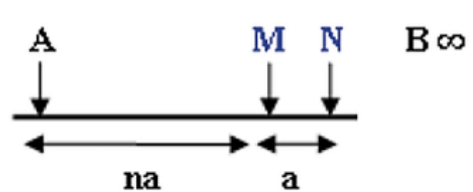
Wenner  $\beta$



Dipôle-Dipôle



Pôle-Pôle



Pôle-Dipôle

**Fig. 4 :** les différents dispositifs électriques

**Sources** : [https://www.researchgate.net/profile/Lea-](https://www.researchgate.net/profile/Lea-Duran/publication/306359482/figure/fig47/AS:582749167206413@1515949636579/D)

[Duran/publication/306359482/figure/fig47/AS:582749167206413@1515949636579/D](https://www.researchgate.net/profile/Lea-Duran/publication/306359482/figure/fig47/AS:582749167206413@1515949636579/D)  
[ispositifs-de-mesure-de-la-resistivite-electrique-dun-sol-avec-C1-et-C2-](https://www.researchgate.net/profile/Lea-Duran/publication/306359482/figure/fig47/AS:582749167206413@1515949636579/D)  
[electrodes.png](https://www.researchgate.net/profile/Lea-Duran/publication/306359482/figure/fig47/AS:582749167206413@1515949636579/D)

Le tableau suivant donne des valeurs de la conductivité thermique des matériaux utilisées dans le domaine des bâtiments.

L'air est un très bon isolant, par contre le cuivre est un parfait conducteur de chaleur.

MATERIAUX DE CONSTRUCTION	CONDUCTIVITÉ THERMIQUE (W · M-1 · K-1)
Air (78% Azote N2 - 21% Oxygène O2 - 0,93% Argon Ar - 0,04% CO2)	0,025
Eau	0,6
Ardoise	2,1
Pierre dure calcaire	2,2
Lave	2,9
Marbre	2,9
Basalte	3,5
Gneiss	3,5
Granite	3,5
Acier inoxydable	16,3
Acier au carbone (0,5 - 1,5% C)	50,2
Fer	80
Aluminium	210
Cuivre	370

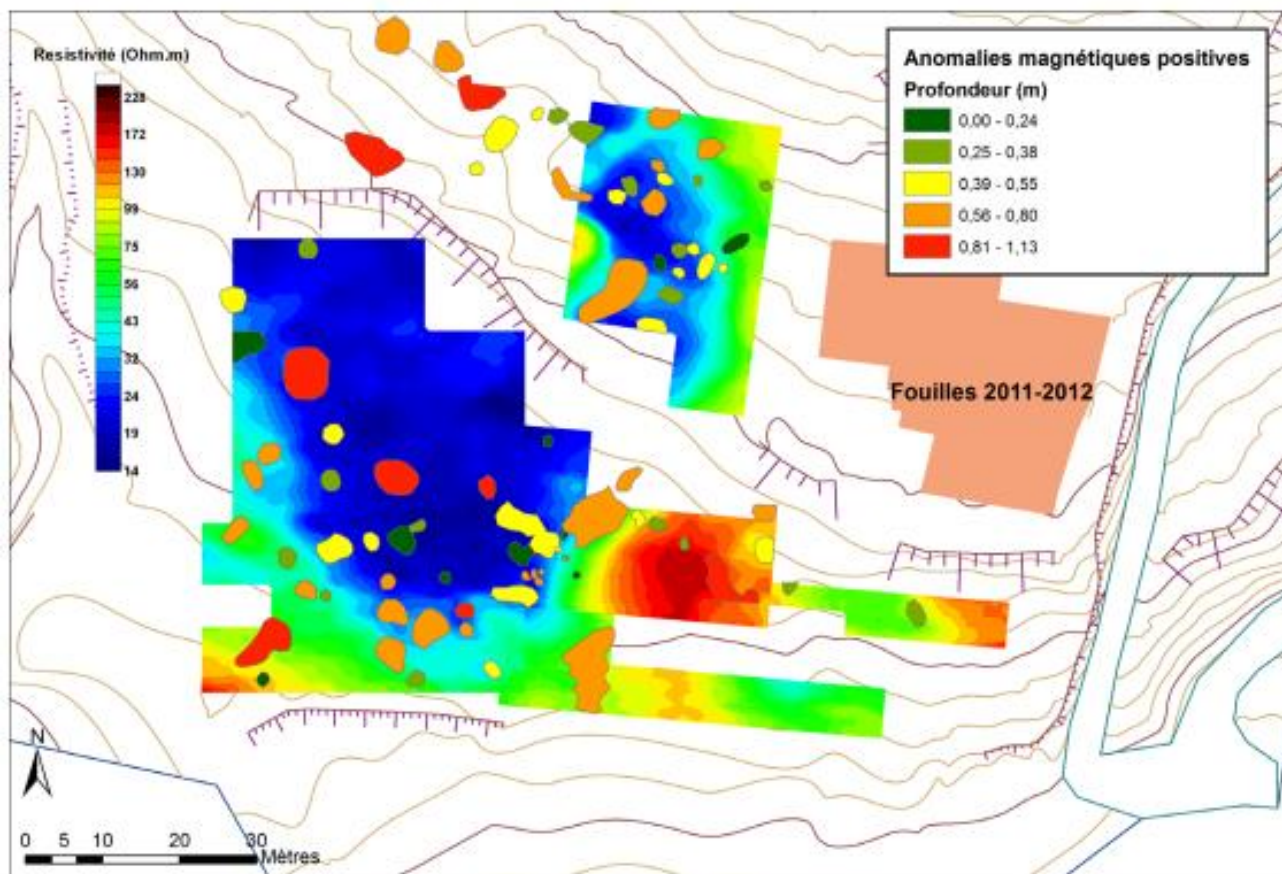
**Tab.1** : Classification des matériaux par ordre de conductivité thermique

**Source** : (<https://bilans-thermiques.fr/energetique-batiments/isolation-thermique/conductivite-thermique-materiaux>)

### **2.2.2 La méthode électromagnétique :**

L'utilité de cette méthode est de donner les paramètres électriques et magnétiques du terrain en calculant en même temps la résistivité électrique apparente, la sensibilité magnétique apparente ( [Tabbagh, 1986](#)).

Il est important de mesurer la sensibilité magnétique apparente parce que, en plus de détecter la structure qui est déjà une difficulté par fois, elle donne aussi une information sur une présence d'une trace humaine dont les propriétés magnétiques changent et ne reflète pas les propriétés magnétiques réelles du terrain ([Hulin , 2016](#)) ( [Benech, Tabbagh, & Denis Vigne , 2015](#)). Cependant, la susceptibilité magnétique est un facteur lié aux sols dont les changements peuvent être d'origine naturelle, géométrique ou géologique, qui peuvent être déterminé sans connaître au préalable une vie humaine.

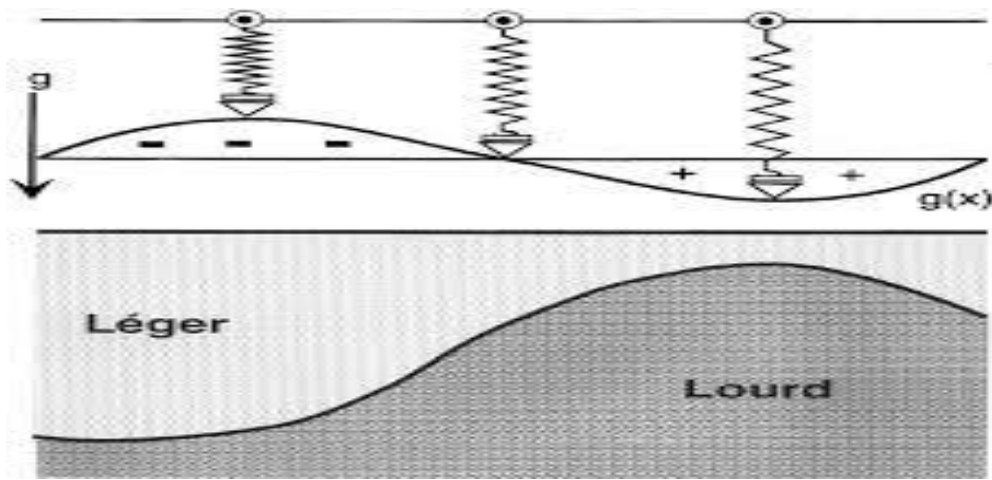


**Fig. 5 :** Carte de résistivité électrique obtenue en prospection électromagnétique au moyen du CMD Mini-Explorer, pour un écartement de bobine de 118 cm

**Source :** (relevé A. Tabbagh ; fond topographique R. Touquet).

### 2.2.3 La méthode gravimétrique :

La gravimétrie est une pratique géophysique qui calcule et étudie les changements dans le domaine de la pesanteur de la Terre. La mesure gravimétrique est un système d'enquête utilisée pour identifier les anomalies de densité dans le sol. Ces petites variations, issues de plusieurs densités différentes des composants de la croûte, en utilisant des outils spéciaux en appliquant des levés gravimétriques (Ground, 2015).

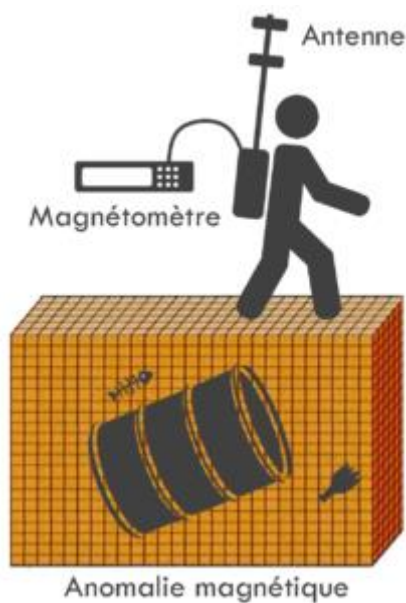


**Fig.6** : principe de méthode gravimétrique.

## 2.2.4 La méthode magnétométrique

Le principe de technique magnétique (inactif) consiste à déterminer les éléments du champ magnétique terrestre et des modifications issues de l'irrégularité de la sensibilité magnétique de la roche ou de ce qui se trouve dans le sol étudié.

Les magnétomètres à résonance protonique emploient de forts champs magnétiques afin d'orienter les protons dans les hydrocarbures, puis détectent la fréquence de résonance des protons due à la résonance magnétique nucléaire (RMN), une fois le champ de polarisation éteint. La fréquence de résonance est proportionnelle à l'ampleur du champ magnétique environnant après suppression du champ de polarisation. ( Marc, 2017)

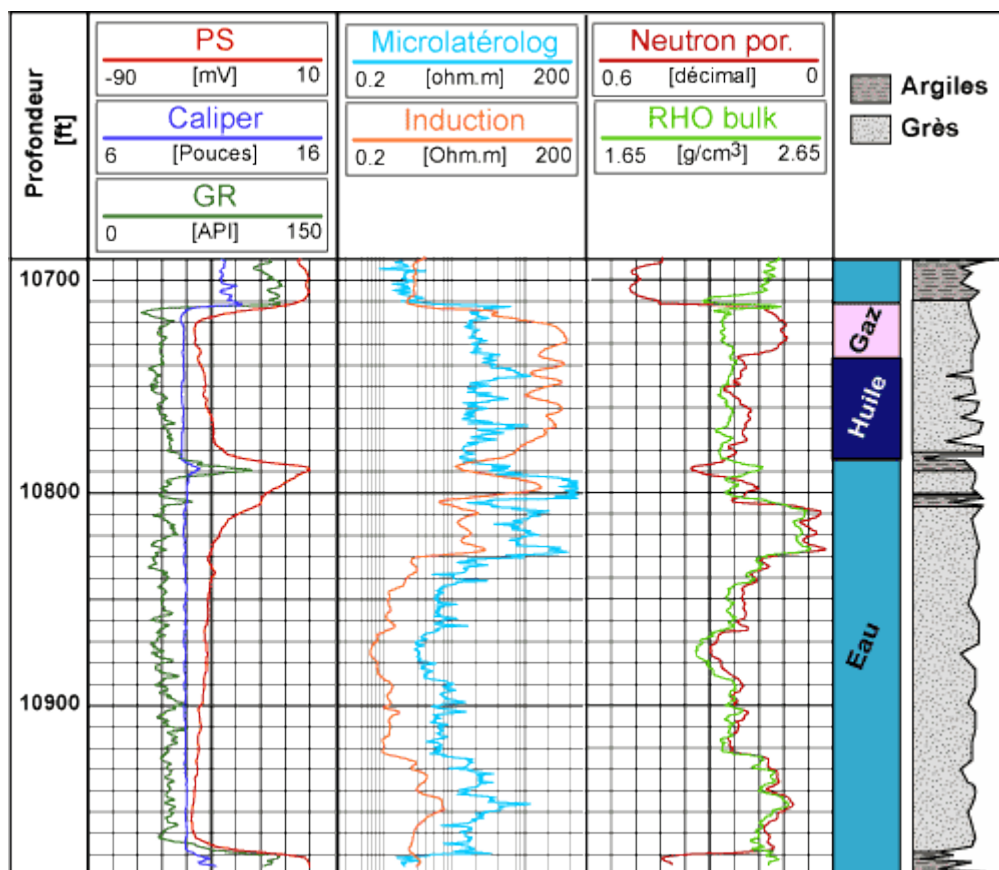


**Fig.7** : principe de la méthode magnétique

### 2.2.5 La méthode de diaggraphie :

La réalisation d'un sondage carottant électrique est réalisée au moyen des sondeuses utilisées à cet effet, elle sert à déterminer les propriétés d'une roche qui passe pendant l'opération d'un forage. Généralement, on nomme diaggraphie tout renseignement en relation avec la hauteur de forage. Autrement, la technique utilisée est un diagnostic de différentes couches percée par l'outil de forage.

Il existe deux types de diaggraphie l'une consiste à signaler les mesures des couches géologiques instantanément c.-à-d. chaque passage de roche et l'autre consiste à saisir les informations des couches géologiques à la fin du sondage. Les mesures (profondeur, densité, résistivité) sont affichées au tableau de bord de la sondeuse, (LAGABRIELLE, 2007).



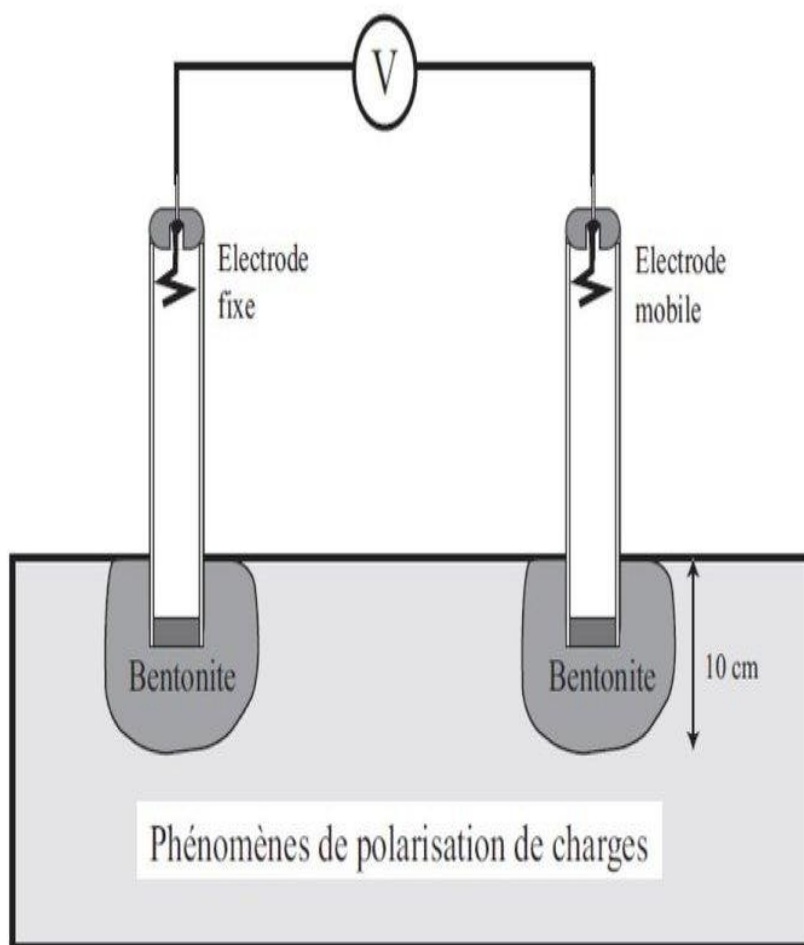
**Fig.8** : principe de la méthode de diaggraphie

Source : <https://www-ig.unil.ch/dia86f.htm> Exemple de log composite Bonanza

(Document Pet Com

### 2.2.6 La méthode de polarisation spontanée :

La technique de polarisation naturelle électrique se fait sans l'utilisation du courant électrique et en calculant la répartition du potentiel électrique dans le terrain. Les informations mesurées dans les différents points peuvent donner un diagramme de potentiel naturel. La réalisation de ces calculs se fait soit au sol ou sous sols d'une manière précisée à court terme (carets et profils) ou à long terme. (Qualité, 2018)



**Fig. 9** : Schéma du dispositif de mesure de potentiel spontané (PS) d'après (Naudet 2004)

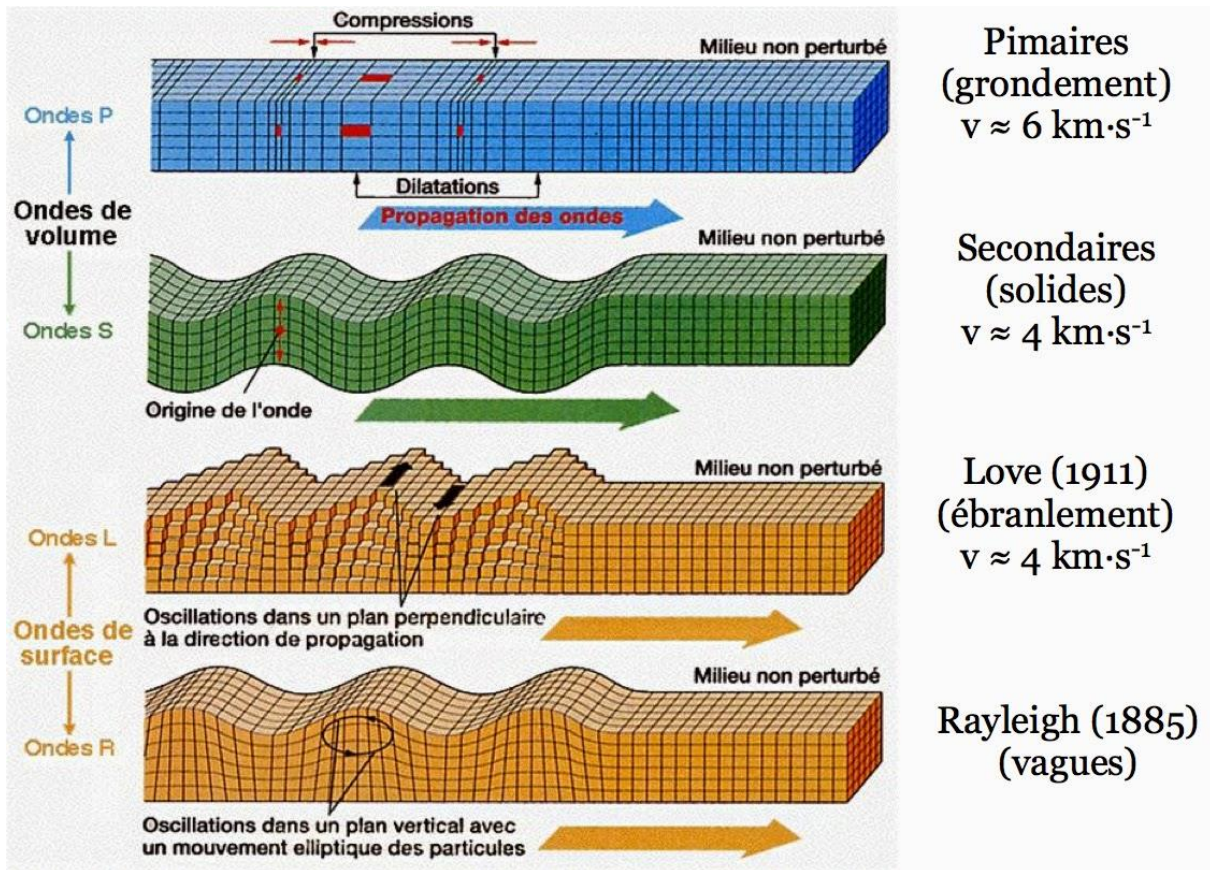
### **2.2.7 La méthode sismique :**

Les techniques d'exploration sismique active appliquent une force de vibration qui peut être créée par un marteau sur une tôle, une explosion d'explosifs, ou aussi les oscillations harmonieuses d'un camion vibrant. Les propriétés mécaniques des roches se produisent par la détermination de la vitesse des ondes élastiques. Il existe différents types d'ondes sismiques dont :

- Ondes de masse (ondes P de compression et ondes de cisaillement S)
- Ondes de surface (ondes de Rayleigh, ondes de Love).

Trois techniques sismiques principales peuvent être utilisées pour obtenir des renseignements sur la répartition des vitesses dans le terrain :

L'étude du temps de première arrivée (sismique réfraction et tomographie), analyses des ondes réfléchies (sismique réflexion) et analyse des ondes de surface. Les deux techniques (réfraction, réflexion) sont pleinement utilisées dans les références bibliographiques ([Telford, Geldart, & Sheriff, 1990](#)).

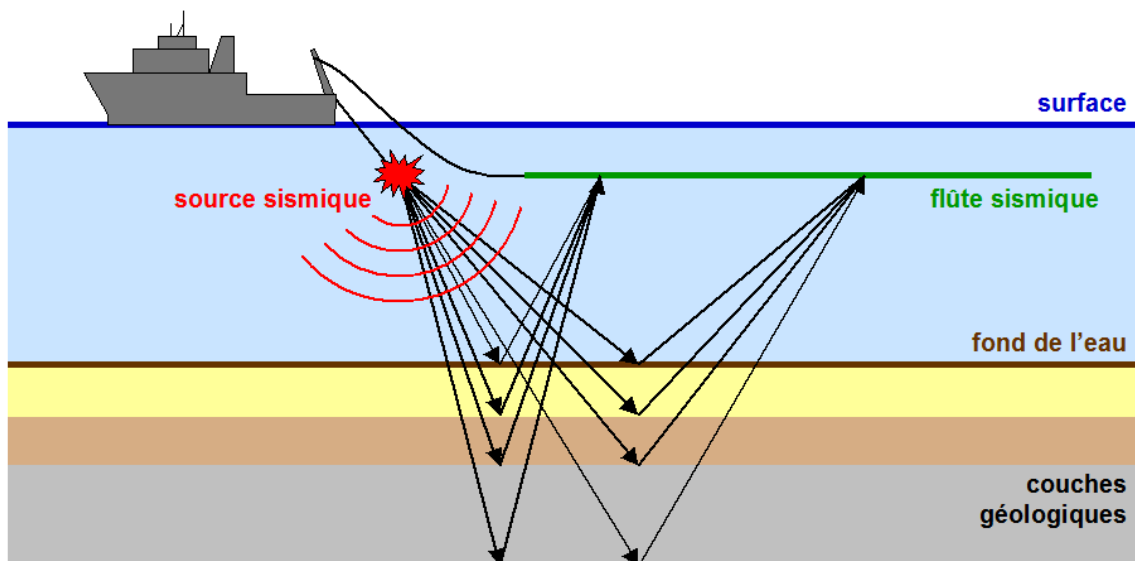


**fig. 10** : les différents types d'ondes et leurs modes de propagation.

**Source** : [https://marchenry.org/wp-content/uploads/2014/05/onde\\_sismic.jpg](https://marchenry.org/wp-content/uploads/2014/05/onde_sismic.jpg)

### 2.2.7.1 La réfraction sismique :

Les ondes de force sont largement employées dans les levés sismiques, en particulier la sismique réfraction, pour évaluer le changement de vitesse dans le sol à mesure que cette vitesse augmente avec la profondeur. La sismique réfraction est appuyée sur l'analyse du temps de parcours des ondes de force (P et S) se dispersé un peu partout à partir du point de départ initiale. L'heure de la première arrivée est tracée d'une manière automatique ou manuelle selon la quantité d'ébranlement mentionnée au départ. On suppose généralement que l'instant d'arrivée se situe au pied de la première onde signalé sur chaque trace sismographique. Dans le centre 1D, les moments d'arrivée forment des lignes rectilignes dont les pentes correspondent à l'inverse de la vitesse dans la couche le long de laquelle l'onde se réfracte. ( Telford, Geldart, & Sheriff, 1990)



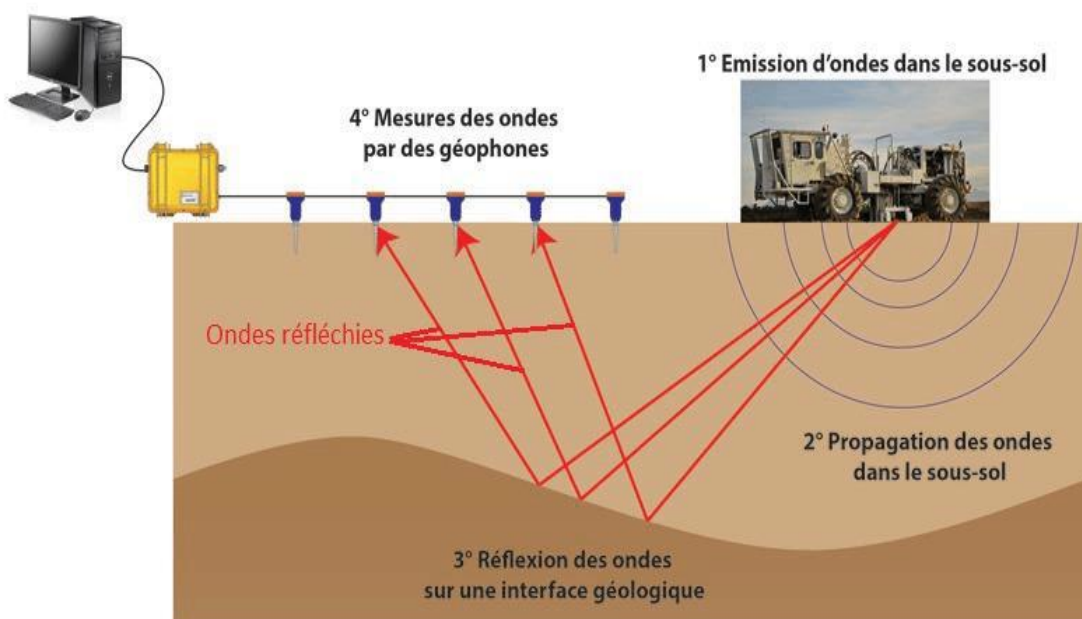
**Fig.11** : réfraction Sismique

**Source** : [https://www.flotteoceanographique.fr/var/storage/images/\\_](https://www.flotteoceanographique.fr/var/storage/images/_)

### 2.2.7.2 La réflexion sismique :

La technique de sismique réflexion est considérée comme une pratique très avancée dans le domaine de géophysique suite à son application dans les grands projets pour la prospection des hydrocarbures. Pour le domaine de génie civil, le principe est le même sauf que l'instrument utilisé soit adapté pour que les résultats soit précise en fonction de la profondeur.

Le principe de la sismique réflexion est basé sur le reflet des ondes sur les surfaces limites entre les couches géologiques. La sismique réflexion peut être donne une seule trace ou plusieurs traces, lorsque la source de vibration est importante. En peut calculer la vitesse de chaque formation géologique percée en fonction de la profondeur de pénétration. Cette technique de sismique réflexion est appliquée pour les profondeurs de plus de 50 m. (<https://ground.geophysicsgpr.com/fr/techniques-de-geophysique-terre>, 2015).



LE PRINCIPE DE LA SISMIQUE REFLEXION

**Fig.12** : réflexion Sismique

**Source** : [https://www.researchgate.net/figure/Principe-de-la-sismique-reflexion-voire-lien-N-4\\_fig15\\_334285340](https://www.researchgate.net/figure/Principe-de-la-sismique-reflexion-voire-lien-N-4_fig15_334285340)

### **2.3 Conclusion :**

Une étude bibliographique est faite sur les différentes méthodes de prospection géophysique qui déterminent le principe de fonctionnement et leur utilisation dans plusieurs domaines que ce soit civile ou miniers. Ainsi que les moyens nécessaires pour chaque type de prospection soit électrique ; magnétique, électromagnétique, diagraphie, polarisation, sismique réfraction et sismique réflexion.

## **3 CHAPITRE 3 : Cadre géologique du site d'étude**

---

### **3.1 Introduction**

Les gisements de phosphate en Algérie sont connus au XIXème siècle avec la découverte et le début d'exploitation de quelques gisements dans la région de l'est du pays tel que (El Kouif, Mzaita, Ras El Oued, Bordj El Ghedir).

Après l'indépendance, en 1962, les autorités algériennes décident d'exploiter un gisement important de phosphate qui se trouve à Djebel El Onk (Brgm, 1993).

Dans cette partie de cette thèse, on va exposer, la géologie de la région de Djebel Onk et précisément le gisement de Kef Essnoun.

### **3.2 Le gisement de Djebel Onk**

#### **3.2.1 Historique du complexe de Djebel Onk**

En 1669, à Hambourg Hennig Brandt a découvert le phosphore à partir de l'urine. Cette substance a une couleur blanche, brillante dans l'obscurité, qui donne une forte lumière lorsqu'elle brûle.

En 1873, Philippe Thomas a découvert le phosphate algérien à Boghari, et le phosphate de la région de Gafsa en Tunisie (1855) et puis Joleau a découvert le célèbre gisement de phosphate de Djebel Onk en 1906-1907 dans la région de Djemi-Djema et au Djebel Onk sud. En 1912, Dussert a fourni les coordonnées initiales avec des coupes lithologiques bien déterminées de la région de Djebel Onk.

En 1930, le groupe de phosphate de Constantine a commencé l'exploration afin de s'assurer de la présence d'une quantité importante de phosphate en termes de réserves, ce qui a permis de créer la société de Djebel Onk (SDO) en 1936. Mais, malgré ces efforts, l'exploitation de ce gisement reste insuffisante à cause de plusieurs facteurs à savoir : le manque de port, la sécheresse de la région, l'absence de l'énergie et de l'eau et le mode d'extraction du minerai primitif.

Les recherches de R. Laffitte (1939), L. Cayeux (1939 –41 – 50), et R. Flandrin (1948) ont beaucoup contribué dans l'amélioration des informations sur la géologie de la région et des gisements.

En 1951, L. Visse a fait des prospections détaillées sur le gisement de phosphate de Djemi – Djema dans le but de déterminer la stratigraphie et d'estimer les réserves environ (110 millions de tonne de minerai avec 24.80 – 25.20 % P<sub>2</sub> O<sub>5</sub>, soit 54 – 55 % TPL, et 600 MT au total dans la région de Djebel Onk.

Au début de 1960, la réalisation du projet de phosphate devient nécessaire dans le but d'avancer l'industrie du phosphate.

A partir de 1961 jusqu'à 1963, le BRGM a fait des recherches avancées en utilisant l'imagerie par rayons transporté par voie aérienne pour balayer la superficie du gisement de Djebel Onk. Les essais ont été confirmé avec succès dans le cas de l'Atlas Tellien sur l'étendue de l'éocène (Vogt et Belhadj, 1963).

En 1963 Ranchin, a relancé les recherches en réalisant les plans géologiques à l'échelle 1 / 5000.

En 1965, la société de Djebel Onk a commencé les travaux d'exploitation du gisement de Djemi-djema en suivant les informations déjà données par Servajeau.

Les travaux réalisés durant l'ouverture de la carrière donnent une importance à la géologie qui ouvrent la voie aux chercheurs de faire leurs travaux, comme ceux de Kettouche (1970), Berats et Fur (1982), Mezghache (1991).

A partir de 1971 jusqu'à 1974, SONAREM a lancé à nouveau les compagnies de recherches et d'explorations sur les phosphates de l'est de l'Algérie en se basant sur le profil apéro-radiométrique (Rudowicz, 1975).

Et durant la période de 1985 à 1987, des travaux de recherches ont été réalisés par l'EREM sur la demande de l'E.N. FERPHOS pour l'estimation des réserves en phosphate dans la région de Djebel Onk en collaboration avec le partenaire soviétique dans le but de faire 97 sondages carottés soit 10732 m de longueur et 64 tranchées de reconnaissance.

En 1989 l'E.N. FERPHOS, a présenté son programme de progression du complexe de phosphate de Djebel Onk.

En 1992, l'E.N. FERPHOS a signé un contrat avec le BRGM / SOFREMINES pour faire une étude technico-économique afin de donner un plan d'exploitation rationnel des ressources minières en phosphates de Djebel Onk (In BRGM, 1993).

En 1993, le BRGM a donné un compte rendu explicatif géologique sur les gisements de Djebel Onk.

En 1998/1999, une approche technico-économique, un plan d'exploitation et une étude de rentabilité du gisement de Bled El Hadba ont été remis par le bureau d'expertise de FERTIBIRIA.

En 2015, l'ORGM a complété un dossier des travaux de recherches géologique.

En 2016 a 2017, le bureau Allemand (DMT) a fourni une approche à long terme de Bled El Hadba. ( Balla & ALI , 2009)

### 3.3 Nomenclature des roches phosphatées

L'institut américain de géologie a publié en 1974 les définitions des phosphates du glossaire de géologie pour conserver les termes « phosphorite » et « phosphatite » dans l'utilisation à l'échelle internationale comme suit :

- **Phosphorite** : est une formation géologique sédimentaire formé des éléments phosphatés avec un pourcentage élevé sous forme indistinctement des phosphates de Ca, d'Al, et de Fe ;
- **Phosphatite** : formation sédimentaire formé la plupart de substances de la série de l'apatite en fonction du taux en P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> dans les roches, le taux de 18 % est considéré comme limite entre les roches de la matière utile et la matière inutile.
- Dans ce cas on appelle phosphorite ou Phosphatite uniquement pour les roches qui contiennent un P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> supérieur à 18%. En S'il est inférieur à 18 % en P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> l'appellation minéralogique à utiliser est la roche stérile. (Brgm, 1993)

### 3.4 Types de gisements de phosphate

Il existe plusieurs types de phosphate dans la croûte de terre, selon leur origine et la façon de formation on peut citer : les gisements sédimentaires, les gisements volcaniques et les guanos. (Brgm, 1993)

### 3.5 Genèse des phosphates

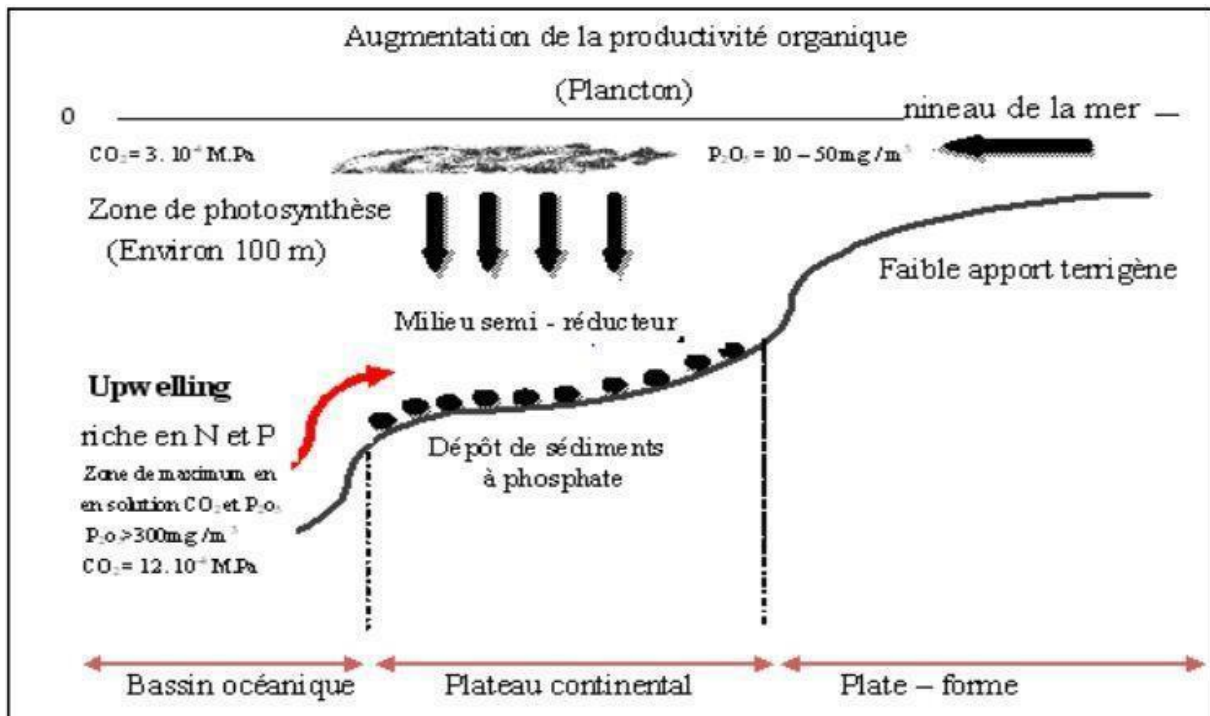
La genèse ou la formation des phosphates est approuvée par une partie à une formation organique et une autre partie approuvée par une formation non organique. Selon l'hypothèse de formation non organique, le phosphate est issu de l'écoulement des éléments phosphatés à partir de l'eau de mer. Et selon l'hypothèse de formation organique, la matière organique est le constituant essentiel dans la formation de phosphate. (Brgm, 1993)

A.V. Kazakov, a donné une théorie innovante sur la formation de phosphate basé sur les enquêtes faites par le groupe des océans. Le principe est basé sur la teneur en  $P_2O_5$  de l'eau de la mer qui augmente avec la profondeur environ 500m en max et le contraire est vraie (la zone de photosynthèse ou la teneur en  $P_2O_5$  diminué).

Le phosphore formé chimiquement sur les contours de la plateforme littorale est transformée par les courants d'air froids ascendants (Figure .13). Dans ce cas l'eau chauffe, le PH augmente et le  $CO_2$  diminue.

La diminution de ce dernier est dirigée vers la formation du  $CaCO_3$ , et par la suite du phosphate.

Alors, la formation chimique de phosphate ne peut se former ni en profondeur, où le taux de  $CO_2$  se trouve en excès, ni dans la zone photosynthèse, où le phosphore est achevé. Donc le phosphate est formé dans la fourchette de 50 m jusqu'à 500m.



**Fig.13** : Schéma de phosphatogénèse selon Kazakov (1930)

### 3.6 Phosphates et environnement

Le phosphate à l'état brut est composé des éléments métalliques qui sont considéré comme éléments secondaires (U, TR, V, Ti...) (Cherniak, 2000) ces éléments sont nocifs pour l'environnement à cause de l'application des produits phosphatés (H Baïoumy, 2005)

La CEE (Communauté économique européenne) exige un pourcentage de cadmium tolérable. Un pourcentage de 30–60% du cadmium qui se trouve dans les récoltes est dû à l'atmosphère.

Un pourcentage de 40 – 70% du cadmium provient du sol (produit phosphaté). Donc, avec l'utilisation abusive de ces produits dans les pays développés, le cadmium devient un élément nocif dans le sol.

La combinaison phosphore et nitrate sont des éléments essentielles qui provoquent la pollution dans l'environnement. Un autre élément nocif après la production des engrais est considéré comme stérile c'est le phosphogypse qui contient des substances radioactifs tel que le cadmium et d'autres éléments lourds. Pour cela des travaux de recherches sont faites pour améliorer le phosphate, et pour capter quelques éléments, tel que l'or, et minimiser quelques éléments nuisibles tel que le cadmium.

### **3.7 Situation géographique de gisement**

La zone de Djebel Onk se trouve au sud-est de l'Algérie, est localisé à 100 Km de chef-lieu de la wilaya de Tébessa et à 20 Km des frontières tunisiennes, et à 340 Km au port de la wilaya d'Annaba et se trouve aussi auprès de la route de Tébessa vers Oued Souf. (Voir fig.14).

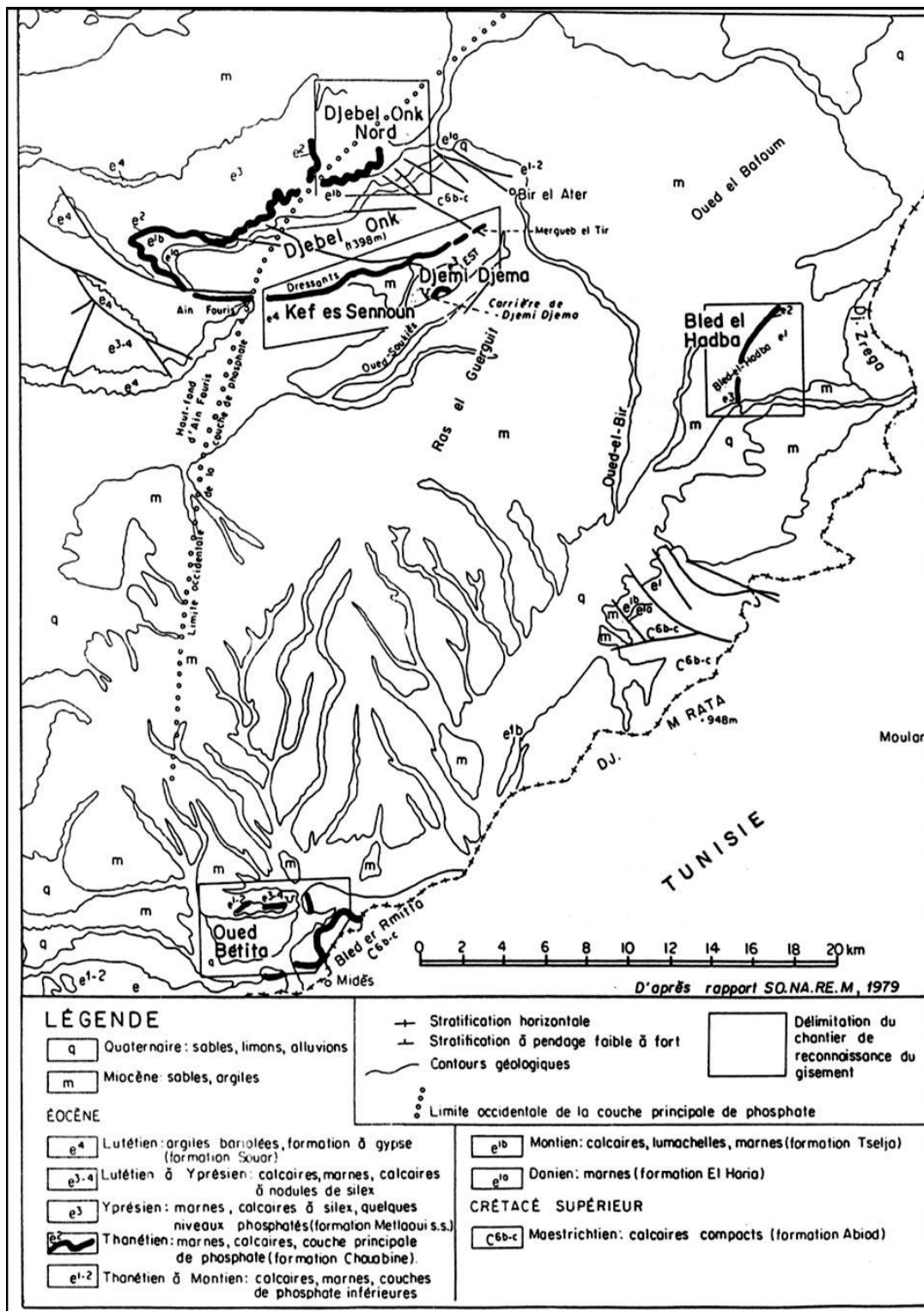


**Fig.14** : Carte géographique de la région de Djebel Onk

La zone de Djebel Onk sépare les hauts plateaux constantinois et la zone saharien.

Sur le plan topographique, le massif rocheux de Djebel Onk constitue un assemblage calcaire de 20 Km de longueur avec une altitude de 1198 m au sommet de Djebel Tarfaya. Ce massif forme la limite Est des montagnes de Nememecha qui étendre vers l'Est des Aurès. Le point le plus basse a Djebel Onk se trouve à 635 m.

On distingue cinq gisements essentiels qui sont : Djemi Djema, Tarfaya et Djebel-Onk Nord, Bled Hadba, Kef Essnoun. (FERPHOS, 2009)



**Fig. 15 :** Carte de situation géographique des gisements de phosphates de la région de Djebel Onk (Prian & Cortiel , 1993)

Le gisement de phosphate de Kef Essnoun est en phase d'exploitation à ciel ouvert par contre le gisement de phosphate de Bled El Hadba il est en phase d'ouverture.

Le climat de la région semi désertique, défini par système continental avec un hiver froid et dur et un été très chaud et la chute de pluie est rare.

### **3.8 Aperçu géologique**

#### **3.8.1 Géologie du gisement**

Le gisement se trouve au long de la descente du cote du sud au plissement anticlinal du Djebel Onk (voir fig. 15), dont la formation de structure principale qui induit au tectonique - post Miocène. ([Dassamiour, 2013](#)).

La colonne lithologique du gisement de Kef Essnoun est formée en ordre ascendante, par une série calcaire dolomitique à silex de l'yprésien et puis par des calcaires marneux du lutétien, les sables du Miocène, et enfin les alluvions du Quaternaire.

Une seule couche de phosphate forme le gisement a une couleur foncée, gris-noir, a l'exception des carbonatée stérile intercalé, il existe dans la direction Nord-Est de gisement une couche de phosphate nette brun-beige oxydé caché à la couche de phosphate noir, le pourcentage est de 75% pour la première, et 25% pour la deuxième. ([FERPHOS , 2009](#))

##### **3.8.1.1 Stratigraphie**

Visse (1952) à réaliser une étude stratigraphique de la zone de Djebel Onk. La colonne lithologique est formée par une série sédimentaire à partir du Crétacé supérieur (Maestrichtien), l'Eocène moyen (lutétien), et enfin une série sablo-argileuse du Miocène et Quaternaire, (voir fig.16).

#### 3.8.1.1.1 Crétacé

A l'intérieur de l'anticlinal de Djebel Onk, la formation géologique est la plus âgée elle est fracturée point de vue tectonique, avec l'apparition de dépôts de Maestrichtien.

##### 3.8.1.1.1.1 Maestrichtien

On trouve à cette échelle des formations géologiques de calcaire à silex et de marne intercalé de 5m à 10m, dont la partie supérieure sous forme foré, rouge, se manifeste facilement à la topographie.

#### 3.8.1.2 Paléogène :

Le Paléocène et l'Eocène forment le Paléogène et constitue des sédiments marins en forme de calcaires, phosphates et gypses. L'épaisseur de paléogène atteint environ de 350 m dans cette zone. Selon la colonne lithologique on distingue les formations suivantes :

##### 3.8.1.2.1 Danien

Il est présenté en deux formations claires telles que le Danien supérieur et inférieur avec une couche d'environ 100 m.

##### 3.8.1.2.2 Montien

Cet étage est marqué par la présence d'une série de calcaire, calcaires détritiques, calcaires à lumachelle avec des intercalations de marne et dolomie, ces sédiments se caractérisent par une absence ou une faible quantité de silex. Les huîtres sont abondantes, en bancs gris à noire. Les *Ostera*, *Ostera off digitilina* du bois, *Pittor*, sont des espèces caractéristiques.

##### 3.8.1.2.3 Thanétien

Cette tranche d'âge contient la substance minéralisée. Il affleure sur le flanc de l'anticlinale de Djebel Onk avec une couche de 72 m. Il est composé de :

- Thanétien inférieur ;
- Thanétien supérieur.

#### 3.8.1.2.4 Yprésien

On le trouve juste sur les sédiments du Thanétien et apparait à Djemi-Djema et au Nord de Djebel Onk et atteint jusqu'à 32 m. Il existe :

- Yprésien inférieur ;
- Yprésien supérieur.

#### 3.8.1.2.5 Lutétien

Dans cette phase de structuration on distingue :

- Lutétien inférieur
- Lutétien supérieur

### 3.8.1.3 **Néogène**

Le Néogène est caractérisé par un faciès sablo – argileuse de type continental d'une puissance avoisinante à 600 m.

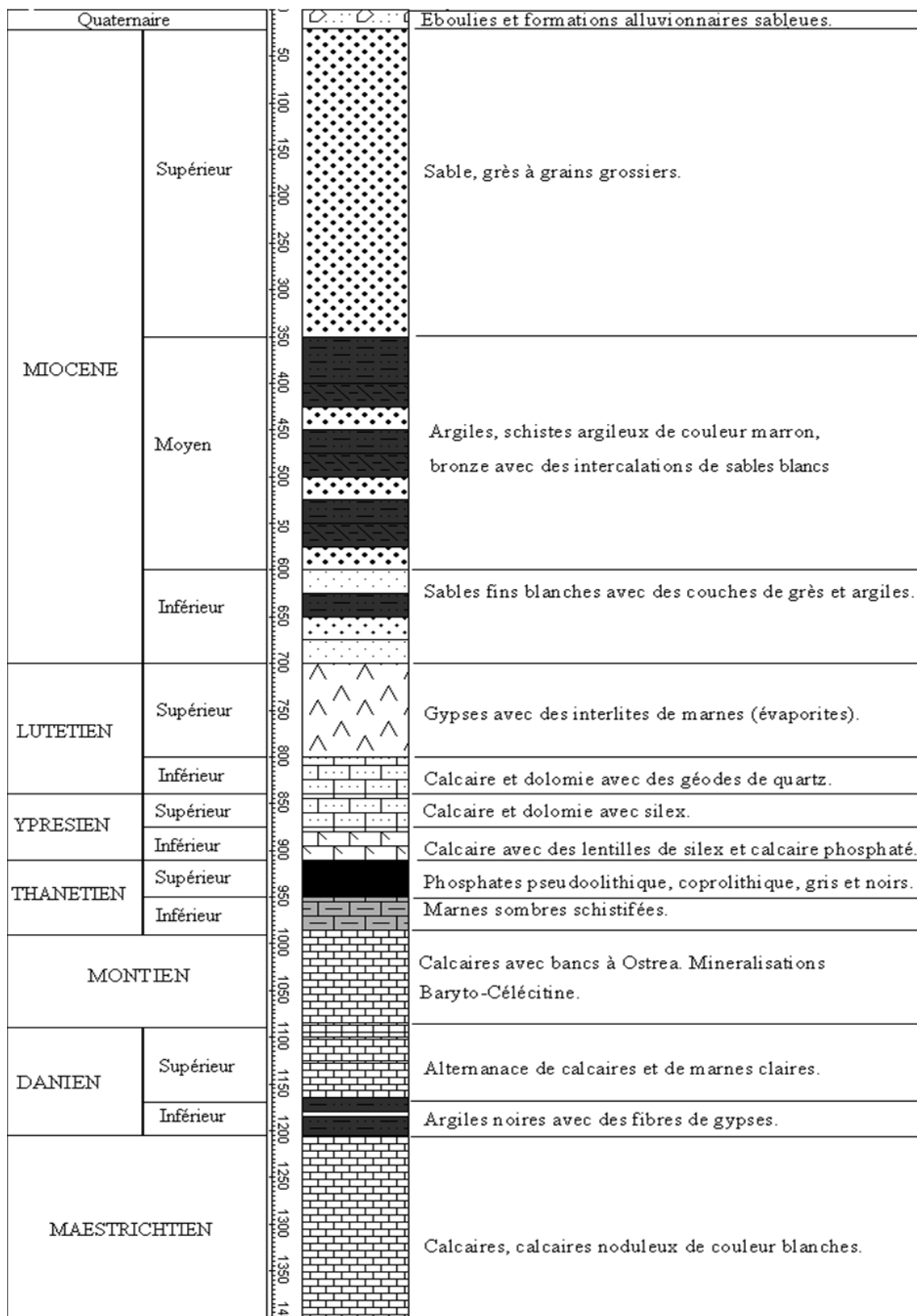
#### 3.8.1.3.1 Miocène

Le Miocène est subdivisé en trois unités de bas en haut :

- Miocène inférieur ;
- Miocène moyen ;
- Miocène supérieur.

#### 3.8.1.4 **Quaternaire**

Les formations Quaternaires couvrent de vastes surfaces dans la région ; elles sont essentiellement représentées par des éboulis, de dépôts sableux éoliens, fluviaux et des dépôts alluviaux.



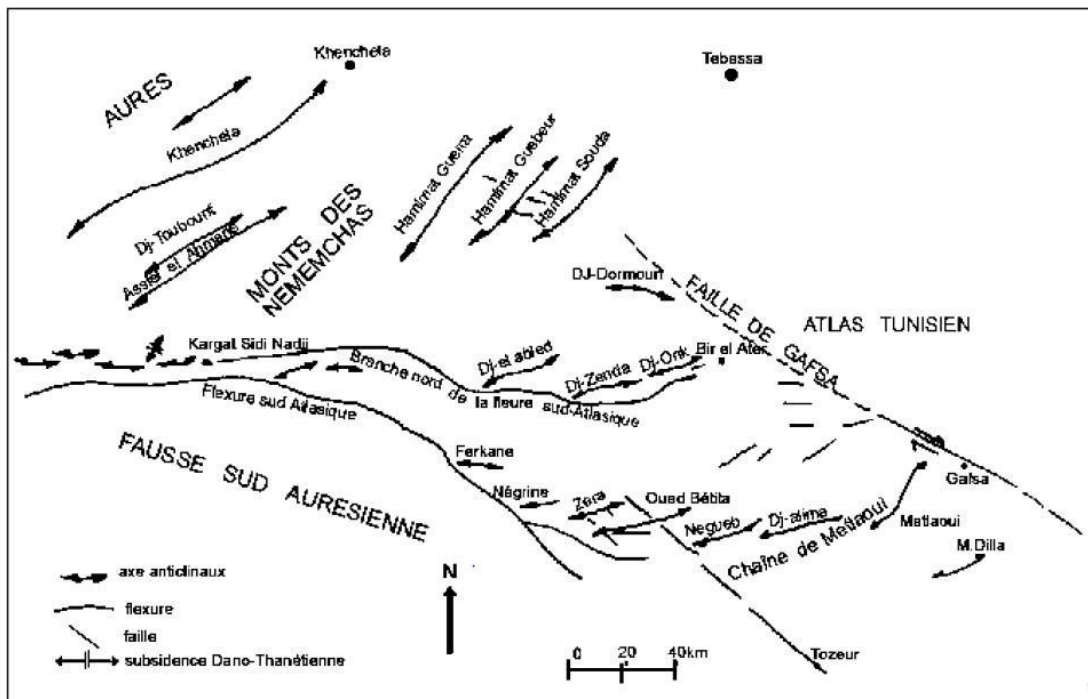
**Fig.16** : Colonne stratigraphique de la région de Djebel El Onk (FERPHOS , 2009)

### 3.8.2 Tectonique régionale

La région de Djebel Onk appartient à l'extrémité orientale de l'Atlas Saharien. La série supérieure à l'Eocène du bassin de Djebel Onk – Gafsa - Métlaoui est structuré en une suite d'anticlinaux et de synclinaux dissymétrique, généralement faillés dans leurs flancs, d'axe le plus souvent SW – NE, et décrochés par des accidents transverses N 120° à 140° E. (voir fig.17).

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

L'anticlinal de djebel Onk prolonge des monts de Nememecha jusqu'à l'Est en périclinal sous les formations du Miocène d'une direction E – NE, cet anticlinal est asymétrique au flanc méridional avec un pendage de 80° et flanc septentrional de 10° (Mezam & Bachar Assed, 2017).



**Fig.17** : Carte structurale de la région de Djebel Onk à l'intérieur du bassin de Gafsa – Métlaoui – Onk (FERPHOS , 2009)

### 3.8.2.1 Phases tectoniques responsables de cette structuration

Trois phases tectoniques d'ampleur très inégales ont marqué leur empreinte sur la région de Djebel Onk : ( [Mezghache & Hani , 2000](#))

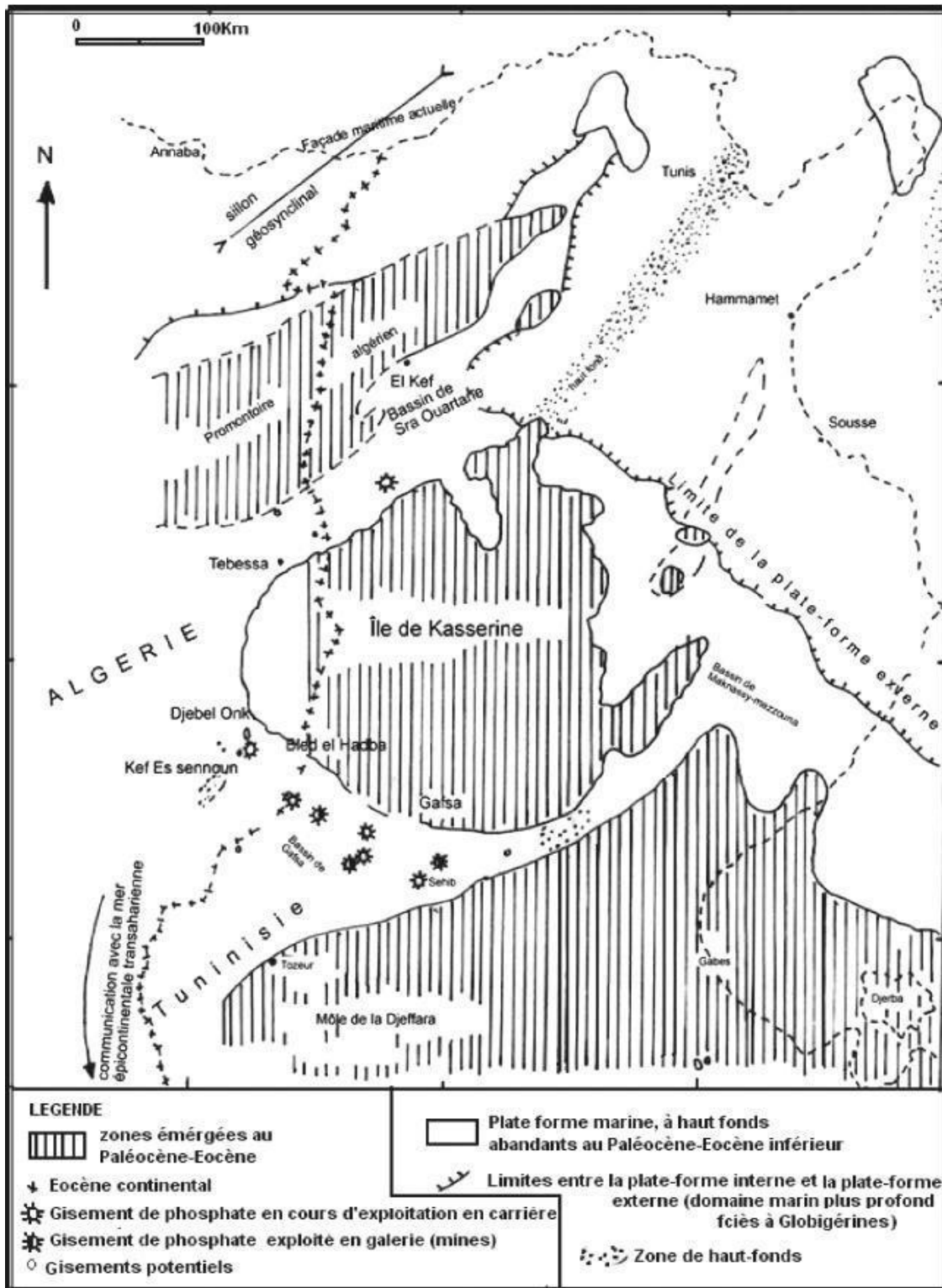
- Tectonique Paléocène – Eocène (syssédimentaire)
- Tectonique post – Eocène moyen et anté – Miocène
- Tectonique tardif – Miocène, post – Burdigalienne, à Pliocène – Pléistocène

### 3.8.3 Paléogéographie

Au paléocène supérieur – Eocène inférieur, la région de Djebel Onk appartenait à la partie occidentale du bassin de Gafsa – Méthlaoui – Djebel Onk (voir fig.18) Il se différencierait cependant par une subsidence plus marquée, ce qui explique le tonnage énorme de phosphate accumulé, mais aussi les teneurs moyennes en phosphates tricalciques plus faibles que celle enregistrées dans le gisement de Méthlaoui. Ce sillon, occupé par une mer épicontinentale peu profonde, était situé entre l'île ou dôme de Kasserine au Nord, le môle de Djeffera au Sud et haut fond de Djebel Fouris à l'Ouest.

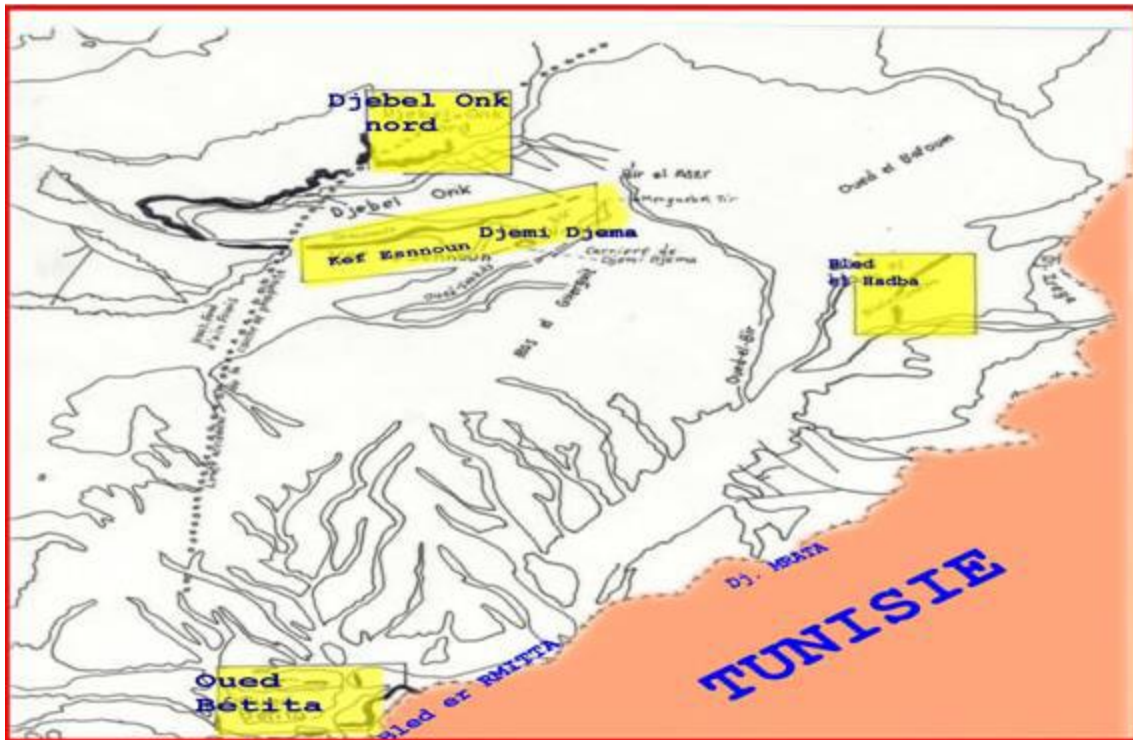
La région a connu au cours de l'histoire géologique de la région, plusieurs étapes de développement bien marquées dans les sédiments :

- Période de sédimentation marine
- Période de sédimentation continentale



**Fig.18 :** Situation paléogéographique des gisements de phosphates de la région de Djebel Onk à l'intérieur du bassin phosphatés (D'après Burollet et Oudin, 1980 ; Fourine, 1980 ; Sassi, 1974 et 1980)

La figure (19), montre la localisation des gisements de Djebel Onk.



**Fig.19** : Les cinq secteurs miniers de Djebel Onk (FERPHOS , 2009)

### 3.8.4 Lithologie du faisceau phosphaté

Le faisceau phosphaté a été subdivisé par de nombreux auteurs en fonction de la composition chimique, lithologie et des conditions d'exploitation, en plusieurs couches.

Prian et Cortiel en 1993 ont subdivisé le faisceau phosphaté en trois couches constituées, de bas en haut, par les alternances marnes-phosphates-dolomies du mur notée IIM, la couche productive notée I et la dolomie phosphatée sommitale notée minerais IIT : (Prian & Cortiel , 1993)

### 3.8.5 Les réserves géologiques

Le potentiel réserve de phosphate en Algérie qui se trouve dans la région de Bir Elatère et plus précisément à Djebel Onk, il est reparti dans plusieurs secteurs à savoir (Kef essnoun, Djmij-djma, Betita, Bled Elhadaba), dont les trois catégories de réserves B, C1, C2. (somiphos., 2020).

Le tableau suivant donne la répartition des réserves géologiques de Djebel Onk :

<b>Gisements</b>	<b>Catégorie de réserve</b>	<b>Carrière à ciel ouvert (tonnes)</b>
<b>Djem Djema</b>	<b>B</b>	<b>68 935 761</b>
	<b>C1</b>	<b>31 000 000</b>
	<b>C2</b>	<b>109 000 000</b>
<b>Kef essnoun</b>	<b>B</b>	<b>153 391 000</b>
	<b>C1</b>	<b>/</b>
	<b>C2</b>	<b>14 000 000</b>
<b>Tarfaya</b>	<b>C2</b>	<b>14 000 000</b>
<b>Total Djebel Onk Sud</b>		<b>390 326 766</b>
<b>Bled El Hadba</b>	<b>B</b>	<b>210 772 096</b>
	<b>C1</b>	<b>232 513 209</b>
	<b>C2</b>	<b>294 497 010</b>
<b>Djebel Onk Nord</b>		<b>31 000 000</b>
<b>Oued Betita</b>	<b>C2</b>	<b>/</b>
<b>Total BH-DN-OB</b>		<b>768 784 315</b>
<b>Total général</b>		<b>1 159 111 081</b>

**Tab.2** : Les réserves géologiques de Djebel Onk année 2022 (somiphos., 2020)

### 3.8.6 Aperçu hydrogéologique

De point de vue hydrologique, selon l'Agence Nationale des Ressources Hydrauliques (ANRH), le gisement de Kef Essnoun se situe dans le grand bassin versant de Chott Melrhir, dont la superficie est de l'ordre de 68751 Km<sup>2</sup> et où il y existe plusieurs stations hydrométriques.

### 3.8.6.1 Les eaux de surfaces

Les eaux superficielles de la région de Kef Essnoun, qui font partie des eaux sahariennes, marquent leur présence uniquement durant la période pluviale par des petits oueds (Tarfaya, Abiod, El Bir, Regou, etc.) qui traverse le gisement en coulant du Nord vers le Sud. (Cieslinski , 1985-1987)

L'étude de la carte du réseau hydrographique nous permet de confirmer, à l'exception de quelques oueds qui prennent leur naissance dans les régions avoisinantes du Nord, que les sources de tous les oueds proviennent du dressant.

Le débit et la vitesse d'écoulement ne deviennent importants qu'après le confluent de tous les oueds dans la partie Sud-ouest de la région au niveau de l'oued El-Abiod car ce dernier draine les eaux vers le Sud jusqu'à la décharge finale Chott Melhir.

### 3.8.6.2 Les eaux souterraines

L'étude hydrogéologique de la région de Bir El Alter a mis en évidence les formations aquifères suivantes : (Cieslinski , 1985-1987)

- Les alluvions du quaternaire ;
- Les sables du miocène ;
- Les calcaires marneux gypsifères du Lutétien ;
- Les calcaires à silex de l'Yprésien ;
- Les calcaires du Danio-Montien ;
- Les calcaires compacts fissurés du Mæstrichtien.

L'alimentation de ces aquifères s'effectue par l'infiltration des précipitations atmosphériques et le drainage des aquifères voisines. Leur importance hydrique est faible dans l'ensemble.

A proximité de Djebel Onk dans la zone de Kef Essnoun, ces formations sont privées d'eau et ne présentent pas d'aquifères.

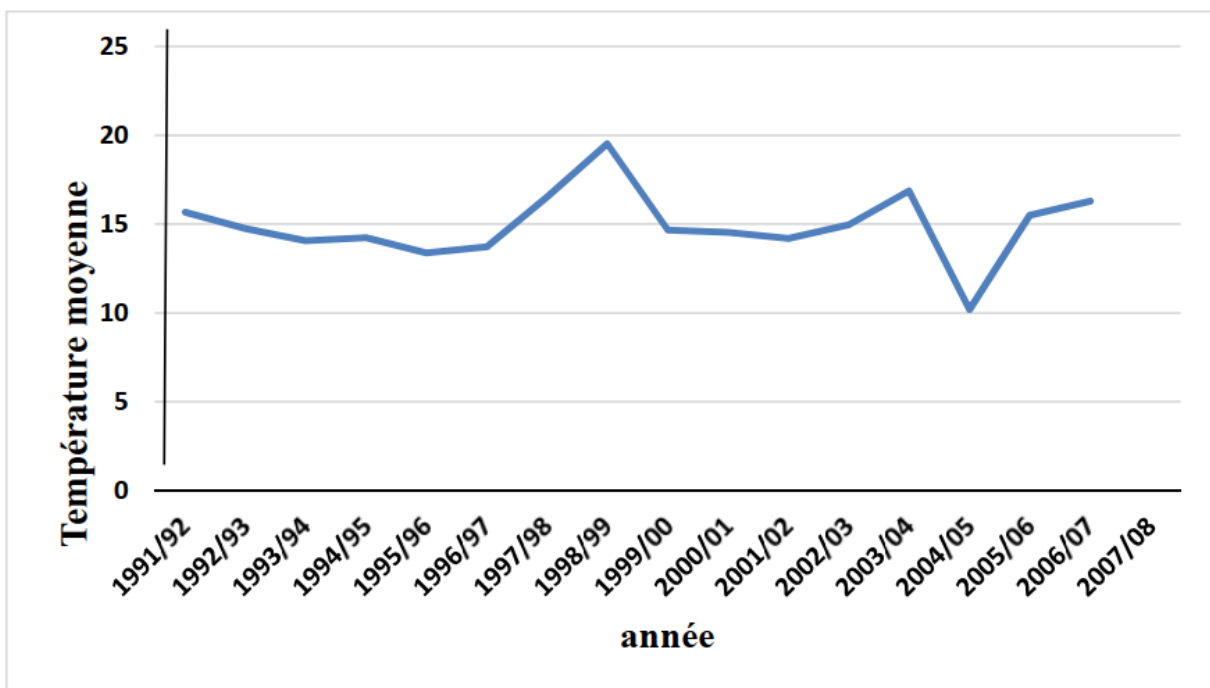
En 1986, L'EREM a réalisé 32 sondages carottés de profondeur allant de 76 m à 250 m et aucun sondage n'a signalé la présence d'eau.

### 3.8.7 Facteurs climatiques

L'observation des données hydrométriques, sur une période de 22 ans (1986-2008), indique que la région de Kef Essnoun est caractérisée par un régime continental avec des variations saisonnières très importantes. Les mois de juin, juillet et août sont les mois les plus chauds avec une température moyenne maximale de 25.94°C et les mois les plus froids sont décembre, janvier et février avec une moyenne de température minimale de 6,22°C. D'où la zone est considérée comme une zone subaride à aride.

La période de sécheresse s'étale sur toute l'année. La pluviométrie moyenne annuelle est de l'ordre de 88 mm/an. L'évapotranspiration est de l'ordre de 87 mm/an ce qui représente 100% des précipitations. (CERAD, 2008)

Tous ces résultats expliquent que le réseau hydrographique de la région est généralement à sec et ne se remplit que durant la période pluviale.



**Fig.20** : Températures moyennes annuelles durant 1991 à 2008, (Station Safsaf El Ouessa de Oum Ali, Tébessa)

### 3.8.7.1 **Pluviométrie**

Les précipitations durant le mois d'été sont extrêmement rares. Les périodes sans pluies pendant plus d'un mois sont fréquentes. Les périodes pluvieuses varient entre 66 et 107 jours /an, tandis que les précipitations sont de l'ordre de 200 à 400 mm/an. Les orages sont importants et fréquents particulièrement durant le mois d'Août et de Septembre. Les neiges et les gels sont rares, mais la température descend souvent en dessous de 0°C en hiver. ([somiphos., 2020](#))

### 3.8.8 **Géologie locale du djebel Onk**

Le Djebel Onk possède dans son ensemble de très grandes réserves de minerai de phosphate, qui s'élèvent à près 2 milliards de tonnes. Sa particularité, est d'avoir une couche de 32 m sans intercalation de stériles. Ce qui lui vaut d'être qualifié de « scandale géologique ».

#### 3.8.8.1 **Gisement de Djemi Djema**

Exploité depuis 1965 par l'EN Ferphos est situé à 7 Km à l'ouest de la ville de Bir El Alter, ville située à 20 Km de la frontière Algéro-tunisienne. Couche anciennement exploitée : épaisseur de 25 à 29 m, potentiel total probable de 62 Mt de minerai à teneur en P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> variant entre 24.3 et 26.2%. ([Prian & Cortiel , 1993](#))

#### 3.8.8.2 **Gisement de Djebel Onk nord**

Est situé à 6 Km au nord du centre minier de Djemi Djema. et à seulement 5 km de la frontière Algérien-Tunisien, et à 9 km de gisement de phosphate de Djebel M'Rarta en Tunisie ; Il présente les meilleures ressources en phosphates dans tout le bassin phosphaté de Djebel Onk. ([Prian & Cortiel , 1993](#))

#### 3.8.8.3 **Gisement d'Oued Betita**

Est le plus éloigné de tous les gisements étudiés, il est situé à 45 Km du sud est du centre minier du Djebel Djemi Djema et n'est distant que de 2 à 4 Km du gîte Midés en Tunisie.

### 3.8.8.4 Gisement de Bled El Hadba

Situé à 14 Km au sud-est des gisements du flanc de Djebel Onk (Djemi Djema et Kef Essnoun) et à 6 Km de la frontière Algéro-tunisienne, Gîte situé à 14 km au Sud-Est du Djebel Onk : couche principale de 6 à 25 d'épaisseur, teneurs de 24 à 27,5% P2O5. (Prian & Cortiel , 1993)

### 3.8.8.5 Gisement de Kef Essnoun

#### 3.8.8.5.1 Situation géographique

Le gisement de Kef Essnoun est situé à environ 02 Km à l'Ouest du gisement de Djemi Djema. Il s'étend sur une longueur de 2,7 Km et une largeur de 0.8 Km, ce qui correspond à une superficie de 2,1 km<sup>2</sup>, (voir fig.21)



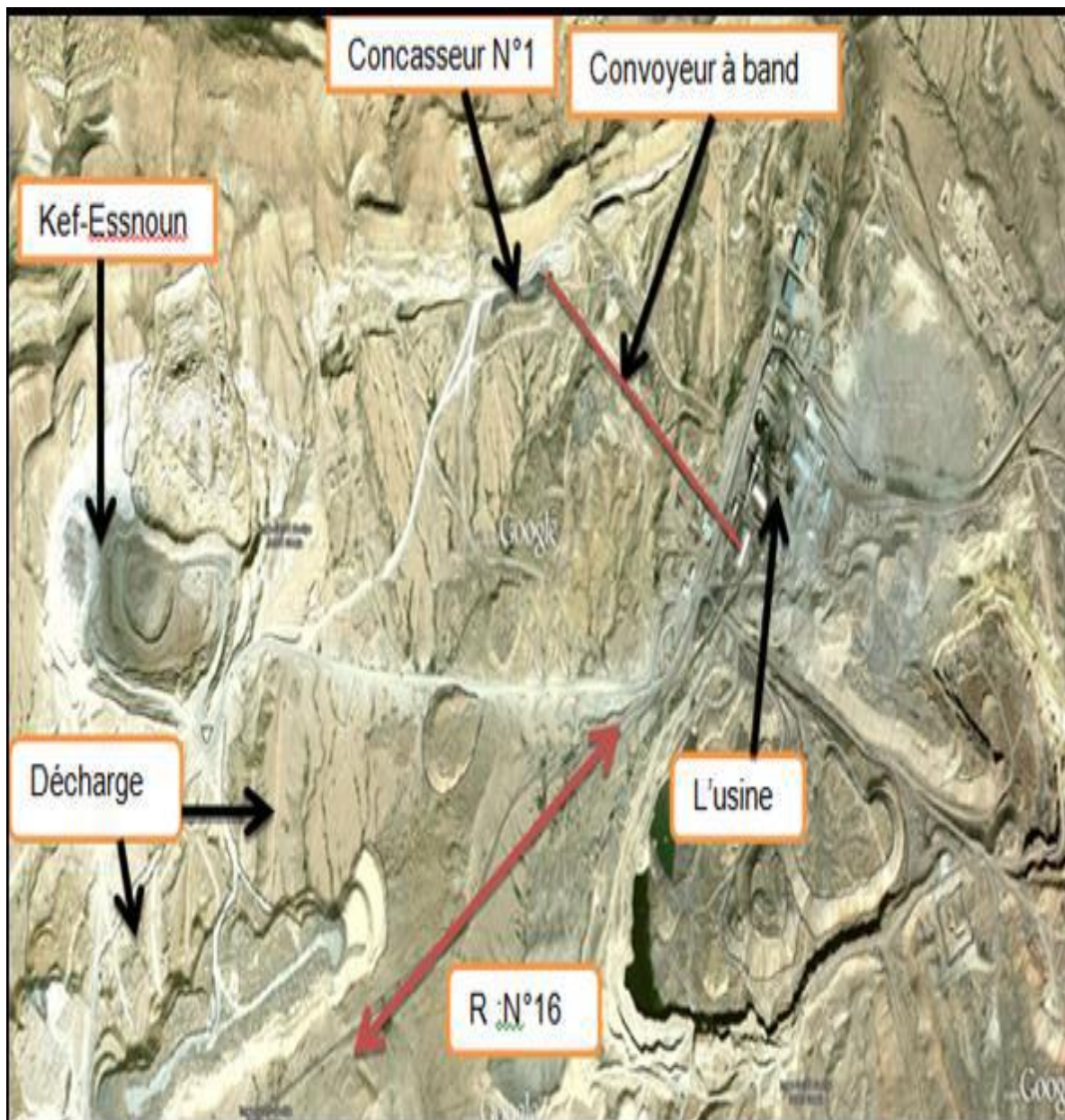
**Fig.21** : Carte de situation géographique de la carrière de Kef Essnoun

#### 3.8.8.5.2 Travaux de recherche réalisés

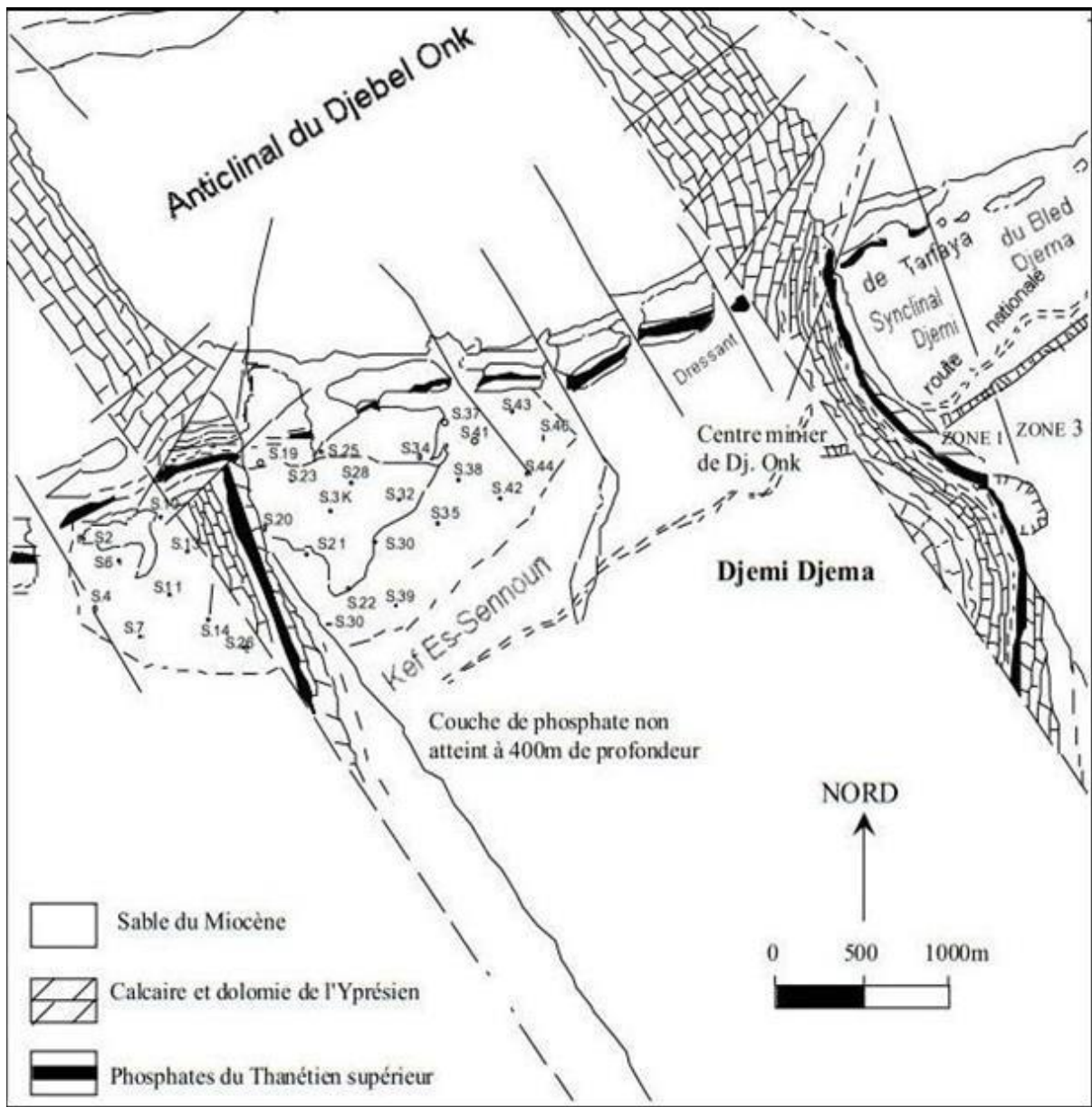
En 1936 G. Ranchin à réaliser (puits, descenderie, tranchées dans le dressant). Autre trois sondages et tranchées sont réalisées dans les dressants par la SONAREM (1977-1979). (Prian & Cortiel , 1993)

La réalisation de 32 sondages carottés était faite par l'EREM sur le gisement de Kef Essnoun, durant l'année 1986, inscrits S-2 à S-46, leur implantation est faite selon des plans géophysiques de direction Nord-Ouest - Sud Est à la maille de 250 x 300m. Le sondage S-7 (250m) est le plus profond, qui se trouve au Sud-Ouest du gisement, et le sondage S-25 (76.1m) Le plus court qui se trouve approximativement de la bande d'affleurement des dressant de Kef Essnoun. 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 trachées 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. (Voir fig.23).



**Fig.22** : Les sites de la carrière de K.E.S



**Fig.23** : Présentation de la couche phosphatée dans la région de Kef Essnoun et localisation des sondages carottés (Prian & Cortiel , 1993)

A l'issu des travaux de l'EREM, il a été établi que la géologie du gisement de Kef Essnoun est relativement simple, les couches de phosphates plongeant monoclinalement vers le Sud, ils ont une puissance importante 30m et parfois plus, par contre la zone d'affleurement présente une structure géologique compliquée.

Son emplacement est déterminé par les coordonnées LAMBERT suivante :

X= 981,500 ----- 984,500

Y= 165,000 ----- 170,000

Les cotes topographiques varient de 720 m au sud-ouest à 810 m au Nord-est (dressant Nord). Le pendage des couches est de 10 à 12 degrés. Au nord le plus élevé atteint 15 degrés.

Du Nord vers le Sud, les gisements sont traversés par un réseau enchevêtré d'Oueds comblés par des alluvions torrentiels du quaternaire tel que : Oued el abloc et Oued EL BIR.

Les phosphates qui y affleurent et les calcaires yprésiens sus-jacents plongent de 45 à 90 degrés et sont traversés par une série des failles directionnelles dont les plans de glissement sont bien visibles.

Le phosphate se trouve sur une profondeur de 0 à 190m dans le sud du gisement et a 60 m dans le nord.

Les altitudes sont d'environ 810m, au Nord-Est, pour 720 au sud-Nord. (Prian & Cortiel, 1993)

### 3.8.8.5.3 Aperçu géologique

#### 3.8.8.5.3.1 Stratigraphie

La séquence rencontrée au gisement de Kef Essnoun de bas en haut est la suivante :

- Calcaires blancs compacts (Mæstrichtien) ;
- Argiles marneuses gris - foncées à vertes intercalées de marnes dures (Danien inférieur) ;
- Calcaires durs, blancs très fins intercalés de marnes tendres, argileuses et renfermant de minces niveaux phosphatés (Danien supérieur) ;
- Couche principale de phosphate gisant sur un niveau dolomitique et recouvert par une alternance de dolomies marneuses et dolomies phosphatées (Thanétien supérieur), Alternance de calcaires marneuses blancs, marnes et dolomies renfermant des nodules de silex et de minces couches phosphatées surmontant un niveau conglomératique (yprésien inférieur) ;
- Alternance de calcaires, calcaires dolomitisés, marnes et marnes phosphatées. Les tous renfermant des nodules de silex (yprésien supérieur) ;
- Calcaires marneux blancs et marnes blanches crayeuses avec la présence de nodules de silex à la mie hauteur de la couche. Plus haut il y a du gypse (Lutétien inférieur) ;
- Alternance de marnes blanches, d'argilites vertes parfois phosphatées renfermant de minces bancs de calcaire et de niveaux gypseux (Lutétien supérieur) ;
- Formation continentale de sable quartzeux à lentilles argileuses (Miocène) ;
- Alluvions et éboulis de pente (quaternaire). ( [Balla & ALI , 2009](#))

### **3.8.8.5.3.2 Tectonique**

Le gisement de Kef Essnoun est situé dans le prolongement de la retombée méridionale de la flexure antiforme 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. 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 (Dassamiour, Mezghache, Raji, & Bodinier, 2021) . Par contre, dans la zone des dressants de Kef Essnoun, 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 (Fredj, Hafsaoui, Boukarm, Nakache, & Saadoun, 2019). 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.

### **3.8.8.5.3.3 Composition chimique**

En analysant les teneurs des minerais nous distinguons deux formations bien marquées :

Au sommet et à la base de la formation phosphatée les teneurs en phosphate sont faibles. (20%).

La partie médiane de la formation qui représente près de 70% de la puissance utile offre un minerai du type 27 à 30 %.

L'ensemble de la formation phosphatée riche présente des taux en Fe<sub>2</sub>O<sub>5</sub> et Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> équivalent à 1 et 1.5%, les matières siliceuses sont généralement assez faibles environ 2% et sont dues à la présence de quartz détritique et aux minéraux argileux, les teneurs en CO<sub>2</sub> ne passent pas 10%, la teneur en CaO est environ 46,60%.

Les MgO est toujours faible et présente des taux inférieurs à 4%.

Le rapport CaO/P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> = 1.76.

D'après cette valeur supérieure à 1.31 nous sommes en présence d'une apatite carbonatée.

#### 3.8.8.5.3.4 Composition minéralogique

La couche phosphatée dans la région de Djebel Onk est d'origine sédimentaire avec des formations superposées distribuée sur le long de la région, et d'une épaisseur de couche allant jusqu'à 28 m. L'élément essentiel dans la composition du gisement de Djebel Onk est le phosphate à gangue carbonatée, dont la famille mère est le fluor apatite carbonaté. On trouve le tableau suivant qui donne la composition minéralogique du phosphate de Kef Essnoun.

Eléments Poids %	Poids %
Eléments phosphatés (matières phosphatée et endo gangue)	82
Exo gangue	10,5
Carbonatée : - Dolomie Ca Mg (CO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	0,5
- Calcite CaCO <sub>3</sub>	0,7
Sulfatée : Gypse*CaSO <sub>4</sub>	0,5
Siliceuse : Quartz*SiO <sub>2</sub> .	4,5
Feldspaths, glauconite, minéraux argileux, divers oxydes et matière organique	1,3
<b>Total 100</b>	<b>100</b>

**Tab.3** : Composition minéralogique de Phosphate de gisement Kef Essnoun

#### **3.8.8.5.3.5 Les teneurs**

Les pourcentages au P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> sont variables dans la majorité du gisement et allant de 24,05 et 26,94 %, avec 25,53% au moyenne dans les sondages réalisé dans la zone d'étude.

D'autres paramètres qui sont très important dans la composition de la couche phosphatée telle que le MgO avec un taux de 2 à 4% (2,61% au moyen) presque stable dans le gisement de Kef Essnoun, et un pourcentage en CaO de 42 % à 48 %, et (une moyenne de 45.89 %)

Un coefficient de 1,73 entre CaO/ P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>.

La couche productive est représentée par des phospharénites grises noires, d'épaisseur variant de 22 m au Nord – Est à 43 m au Sud- Ouest. (Prian & Cortiel , 1993)

#### **3.8.8.5.3.6 Réserves géologiques**

Les ressources géologiques en potentiel phosphate ont été évaluées par le bureau d'expertise allemand (DMT) en septembre 2016 sont de 397.4 MT (309,1 MT estimé à l'intérieur des 32 sondages, et 88.3 MT en dehors des 32 sondages comme des crêtes, des tranchées et des affleurements) : c'est des ressources mesurées et indiquées avec une teneur de 25% P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> et 3% MgO.

Cette estimation des ressources est considérée comme étant conforme aux normes internationales de déclaration de ressources telles que le code JORC. (somiphos., 2020)

### 3.8.9 Conclusion :

La région de Djebel Onk est constituée d'ordre général de plusieurs formations géologiques telles que les calcaires, les marnes ; les dolomies ; des intercalations argileuses ou marneuses, les phosphates selon les âges géologiques (quaternaires, miocène, Thanétien ; maastrichtien, yprésien).

La couche de phosphate qui se trouve dans le Thanétien avec une épaisseur allant jusqu'à 30m avec une composition minéralogique en P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> allant jusqu'à 30% dans la région de Kef Essnoun et 3 % en MgO. Les réserves géologiques sont estimées à 2 milliards de tonne toutes qualités confondues.

# 4 CHAPITRE 4 Classification géomécanique du massif rocheux de Kef Essnoun

---

## 4.1 Introduction

Les classifications géomécaniques sont des outils essentiels dans le domaine minier. Elles permettent de caractériser la stabilité d'un talus, d'anticiper les risques de chutes de blocs et de déterminer les moyens préventifs nécessaires pour assurer la sécurité des travailleurs. Les classifications géomécaniques se basent sur une analyse approfondie des propriétés mécaniques du massif rocheux ainsi que sur l'évaluation qualitative et quantitative des facteurs qui influencent sa stabilité. Dans cette partie, nous allons explorer en détail les différentes classifications géomécaniques utilisées dans le domaine minier.

Nous allons discuter leur application pratique. Pour que ces méthodes soient fiables et donnent des bons résultats, il est nécessaire de connaître en détail le comportement et les paramètres liés au massif. Alors il existe des méthodes empiriques dans le but de déterminer la qualité du massif rocheux et le type de soutènement minier qui convient avec les conditions précédentes, on distingue :

- Indice RQD
- Le système RMR ;
- Le système SMR ;
- Indice GSI.

## 4.2 Description des systèmes de classification

L'évolution des méthodes de classifications des massifs rocheux a progressé dans le temps. L'apport de ces méthodes dans la détermination de la rentabilité d'un projet est très important dans les conditions initiales, surtout avec la non disponibilité des données liées au massif rocheux tels que le comportement du massif, les propriétés mécaniques, les conditions géologiques et hydrogéologiques.

Il existe plusieurs paramètres qui influent sur l'état d'équilibre des massifs rocheux, telles que la résistance du massif rocheux, l'existence de l'eau, et les conditions des joints (familles et leur nombre, rugosité, etc.)

Les méthodes de classification géomécaniques sont les plus utilisées grâce à leur quantification de la matrice rocheuse par un indice de calcul donnant sa qualité par un barème d'échelles de bien jusqu'au mauvais.

L'objectif de ces classifications est :

- Donner d'une façon indirecte les paramètres mécaniques in-situ d'un massif fracturé, notamment le module de déformation, la résistance de compression uni axiale, la cohésion, angle de frottement interne afin de déterminer la qualité de la roche.
- Evaluer la durée de résistance d'une matrice rocheuse sans appui ; Cela donne la valeur d'un paramètre très important qui est la portée d'excavation.
- Apporter des directives pour que les infrastructures soient stables. Singh et Goel 1999 ont donné une classification célèbre qui englobe plusieurs paramètres :
  - C'est un moyen, qui unifie la communication entre les partenaires de métier
  - Les techniciens peuvent bien s'accorder dans l'utilisation et l'interprétation des résultats.
  - Les praticiens aiment les chiffres mieux que les interprétations.
  - Les chercheurs ont fait évoluer de différents genres de classification. Ils ont réuni un nombre important d'entre elles en utilisant plusieurs sources bibliographique (voir tableau .4)

Le tableau est destiné d'une façon empirique à chaque cas d'étude selon le type d'ouvrage à savoir (galerie, semelle, cheminée, talus.)

<b>NOM DE LA CLASSIFICATION</b>	<b>FORME ET TYPE</b>	<b>APPLICATIONS</b>	<b>SOURCES</b>
<b>Le système de Terzaghi</b>	Comportemental Fonctionnel	Conception de tunnels en acier	Terzaghi, 1946
<b>Le temps de portée d'excavation Lauffer</b>	Descriptif Général	Pour contribuer à la conception des tunnels	Lauffer, 1958
<b>La nouvelle méthode autrichienne du creusement des tunnels</b>	Comportemental et descriptif Conception de tunnels	Pour la conception des excavations en terrain incompetent	Rabcewicz, Muller andpacher, 1958-64
<b>Classification des Roches par la mécanique des roches</b>	Descriptif Général	Propriétés mécaniques des roches	Patching and Coates, 1968
<b>Classification des sols et des roches</b>	Descriptif Général	Basé sur les particules et les échantillons	Deere et al, 1969
<b>La qualité de fissuration des roches (RQD)</b>	Numérique Général	Basé sur les données journalières	Deere et al., 1967
<b>Taille – Force</b>	Numérique Fonctionnel	Basé sur m La résistance de la	Franklin, 1975

		roche et le diamètre e de l'échantillon	
<b>La structure de la masse rocheuse rating (RSR)</b>	Numérique Fonctionnel	Pour la conception des supports en acier dans les excavations souterraines	Wickram et al., 1972
<b>(RMR)</b>	Numérique Fonctionnel	Pour les types de soutènements	Bieniawski, 1973
<b>Le système Q</b>	Numérique Fonctionnel	Pour les types de soutènements	Bartn et al. 1974
<b>Typologique</b>	Descriptif Général	Pour un usage général	Matula and Hozler, 1978
<b>Unifie</b>	Descriptif Général	Pour la conception des supports dans les excavations souterrains	Williamson, 1980
<b>Géotechnique de base (BGC)</b>	Descriptif Général	Pour une caractérisation générale et conception soutènement	SRM, 1981
<b>(GSI)</b>	Numérique Fonctionnel	Pour la conception des supports dans les excavations	Hoek, 1994

		souterrains	
<b>Indice de masse rocheuse (RMI)</b>	Numérique Fonctionnel	Pour une caractérisation générale et conception soutènement	Palmstrom, 1995
<p>*) Définitions des mots suivants :</p> <p>Descriptif : l'entrée dans le système est principalement basée sur la description.</p> <p>Numérique : les paramètres d'entrée donnent des notes numériques en fonction de leurs caractères.</p> <p>Comportemental : La saisie des données est basée sur le comportement du massif rocheux dans un tunnel de type général.</p> <p>Fonctionnel : Le système est structuré pour une application spéciale.</p>			

**Tab.4** : Classifications/description des massifs rocheux selon (Palmström, 1995)

### 4.3 Degré de fissuration de la masse rocheuse (RQD)

Deere et al. (1967) ont fait le système du RQD (Deere & Hendron, 1967), pour évaluer le degré de fissuration qui endommage la structure rocheuse par le biais des prélèvements des échantillons à partir des sondages.

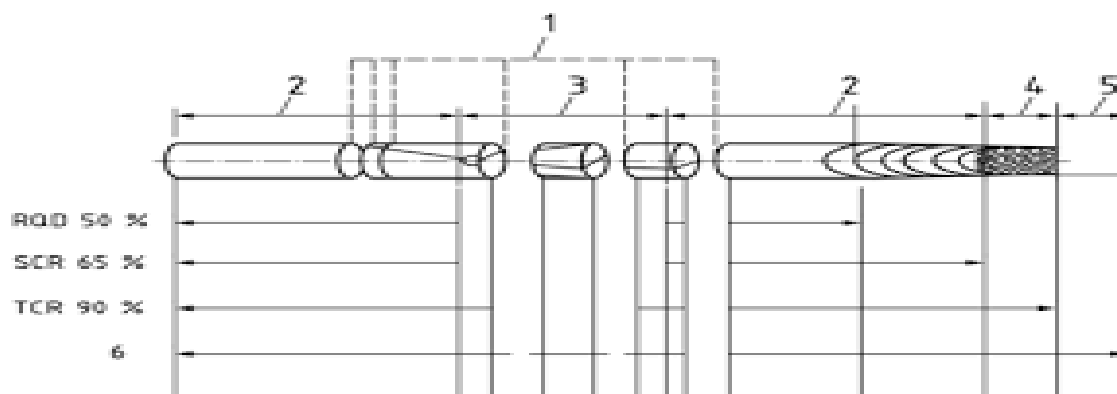


Fig. 24 : Echantillon d'un sondage carotté (ISO 22475-1:2021)

Légende :

1 fractures induites par le forage, 2 au moins un diamètre complet, 3 pas de diamètre complet, 4 non intact, 5 pas de récupération 6 passe carottée.

Le RQD est la somme des parties de longueur supérieure à 10cm sur la longueur totale du sondage carottant.

$$\text{RQD} = (\sum \text{longueur des morceaux} > 10\text{cm} / \text{longueur de forage}) * 100$$

Deere (1968), a fait une approche proportionnelle entre la valeur du RQD et la qualité de la roche qu'il a schématisée sous la forme suivante :

<b>RQD (%)</b>	<b>Qualité de la roche</b>
<30	Très Mediocre
30 – 60	Mediocre
60 – 80	Moyenne
80 – 90	Bien
90 – 100	Parfaite

**TAB. 5 :** Relation entre le RQD et la qualité de la roche (Armatys, 2012)

Le système RQD, malgré sa simplicité de calcul mais la hauteur de forage nécessaire pour estimer cet indice reste à confirmer. Pour cette raison le groupe spécialisé dans ce domaine (ISRM, 1981b), a donné des directives concernant l'estimation du RQD, consiste a effectué une opération de forage selon des longueurs de l'échantillon afin de séparer les formations géologiques. L'avantage de cette technique permet de présenter la carotte selon le forage réalisé par rapport un autre sans anomalie (Deere D. , 1988) , dans le but d'avoir un bon résultat de RQD. La recommandation de 1,5m et plus de forage est nécessaire pour atteindre la valeur réelle de l'indice RQD.

Les dimensions de l'échantillon prélevé du sondage doivent avoir un diamètre NX, le groupe spécialisé (ISRM) donne instructions d'approuvée uniquement les diamètres inférieurs au NX ( $\varnothing$  54,7 mm) avec des sondeuses à double -paroi. Cette limite de diamètre de l'échantillon induit que le RQD estimé donne l'état exact de la fissuration de la roche, par conséquent, on estime que les fissures sont naturelles. Donc, il est nécessaire d'éliminer les accidents des fissures dues au matériel de forage. (Deere D. , 1988).

Le pourcentage de récupération du sondage carottant est très important vue les pertes considérables des formations à cause des accidents des moyens de forage.

Le nombre de joints est en relation avec le volume qui est exprimé par l'indice RQ ( Palmstrom, 1982). Pour les roches qui ne contiennent pas d'argile avec des discontinuités visibles à la surface et dans l'absence des moyens de forage, l'estimation de la valeur de RQD peut être indiquée par la formule suivante :

$$RQD = 115 - 3.3J_v$$

$J_v$  est la masse volumique dans les discontinuités, ou bien le nombre de joints par  $m^3$ , ce facteur donne les dimensions des blocs dans un système rocheux fracturé (Chalhoub, 2006).

L'avantage de l'indice RQD est présenté dans le côté technique (simple et rapide), et dans le coté économique (prix de revient est moindre). L'interprétation de la valeur du RQD ce n'est pas uniquement le degré de fissuration, mais donne aussi l'état interne d'une formation géologique en cas de déformation surtout dans les zones élastiques, ainsi détecter les surfaces de cisaillement dans les endroits très fissurés (Deere.W1988).

### **4.3.1 Les applications du système RQD**

Le système RQD tellement simple est efficace, il y a d'autres applications et utilisation qui sont comme suit :

- La position de forage par rapport à la roche, le RQD donne plusieurs valeurs selon l'angle d'inclinaison du trou.
- La valeur de RQD est distincte en fonction des dimensions des ouvrages, c.-à-d. L'application de ce facteur sur un ouvrage de petite taille (cheminé), sa diffère à un ouvrage de grande taille (recette).
- Lorsque les dimensions des joints sont de 100mm, le RQD devient défaillant. Aussi pour une dimension de 1000mm, il existe uniquement les dimensions de 110mm, le RQD devient excellent, et pour les dimensions des joints de 90mm, le RQD devient nul.
- Les propriétés de la roche jouent un rôle très important dans la qualité de la roche.

### **4.4 Système RMR**

Le groupe spécialisé SACSIR, a affiché le système RMR dans leur journal.

(BIENIAWSKI, 1973) , montre un système de classification générale de la masse rocheuse évalué sur 100 points. La Classification (RMR) est établie à partir des observations et des essais réalisés par le chercheur dans les ouvrages qui ne sont pas profonds dans des terrains de formation sédimentaires.

Dans le début de recherches, 49 approches étaient engagées dans le système d'apparition du RMR. Le système RMR, donne le choix dans la conception de soutènement dans les ouvrages miniers, ainsi que le temps nécessaire de l'ouvrage de supporter sans soutènement.

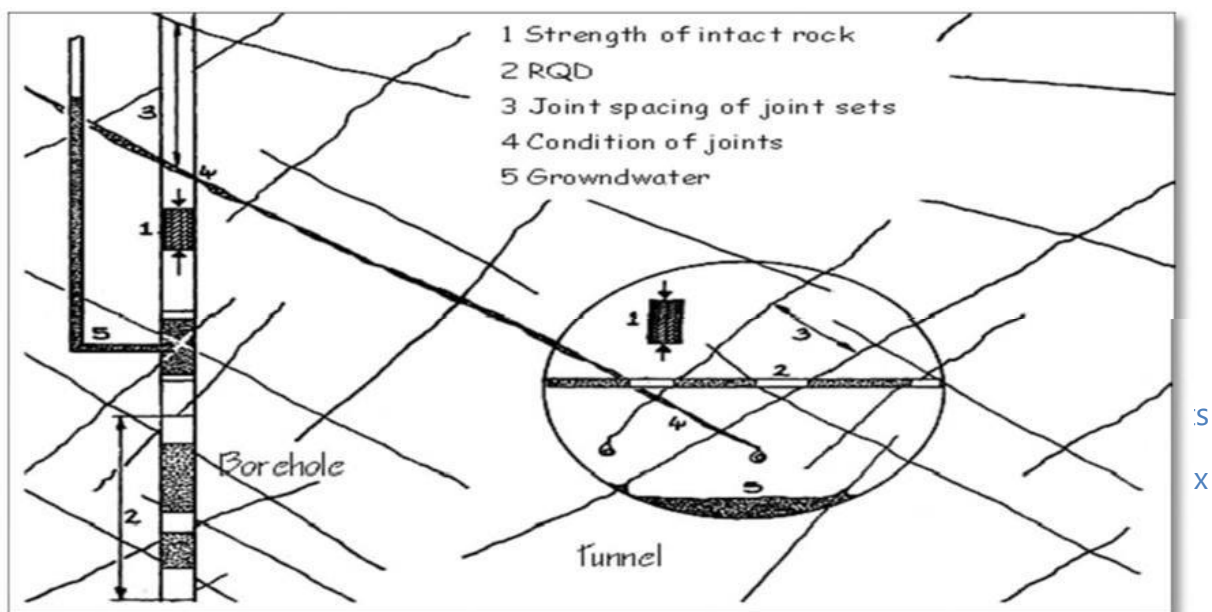
Cet indice peut participer dans la détermination des paramètres mécaniques au laboratoire.

Une évolution était faite par Bieniawski en 1974, 1976, 1979 et enfin en 1989, les publications les plus utilisées sont celles de 1976 et 1989.

(Bieniawski, 1974), présente le premier changement qui est un ajustement des facteurs de la classification. Un nombre de 6 au lieu de 8 facteurs, avec l'attribution des notes calibrées. (Bieniawski, 1976). Un autre changement qui est fait en fonction des moyens de soutènement, implique 5 groupes de classes essentielles de 20 points chacun. Un autre facteur rentre en jeu c'est la rugosité. La note de 100 points reste la même, mais Lors de chaque changement, les valeurs changent aussi pour les autres facteurs. Vu les changements introduits à chaque fois, il est nécessaire de mentionner la méthode utilisée pour classier la roche.

Une autre évolution faite par le chercheur, il induit des graphes bi- démentielle dans le but de déterminer l'apport de la résistance, le RQD, l'espacement des joints.

Le RMR est la somme de 5 notes de description (A1 à A5) et une valeur de  $\sigma_c$ . Les facteurs sont affichés sur la (Fig.25).



**Fig.25** : Facteurs essentielles intervenant dans la valeur du RMR (Chalhouh, Apports des méthodes d'homogénéisation numériques à la classification des massifs rocheux fracturés, 2006)

La distribution des notes est comme suit :

- 70% les joints
- 15% pour l'eau
- 15% pour les paramètres de la roche ([AFTES , 2003](#))

Les paramètres de l'indice du RMR, sont définis comme suit :

- A1 : la résistance à la compression unie axiale du massif rocheux est déterminée à partir de l'essai d'écrasement d'un échantillon, soit par le système force automatique (note : de 0 à 15).
- A2 (RQD) : il indique le degré de fissuration des échantillons de forage par le calcul du taux entre les dimensions supérieures à 10 cm et la longueur totale de la carotte (note : de 3 à 20).
- A3 : on donne le minimum de points pour le cas d'un nombre de familles de fissures le minimum l'espacement des fractures. (Note : de 5 à 20).
- A4 : il indique les conditions des joints l'étendue, l'ouverture, la rugosité, le matériau d'interface et l'altération des épontes des joints (Note : de 0 à 30).
- A5 : il indique l'existence de l'eau dans la matrice rocheuse par la réalisation des quantités de débit de l'eau soit de surface ou du sous-sol (note : de 0 à 15).
- B : c'est un paramètre qui corrige la position des discontinuités par rapport au pendage. (Note : de -12 à 12 galeries, de -25 à 0 semelles et de -60 à 0 talus).
- Il existe le RMR de base, qui contient les 5 facteurs, mais pour la spécification en souterrains, il est nécessaire d'utiliser un paramètre correctif ([Bieniawski 1989](#)).

Le RMR89 s'écrit par la formule suivante :

$$\text{RMR89} = A1 + A2 + A3 + A4 + A5 + B$$

D'après la formule précédente, chaque paramètre aura une note, la somme avec la correction liée à l'orientation (voir tableau 5), donne une quantification de la roche point de vue qualité (voir tableau 6).

PARAMETRES			COEFFICIENTS						
1	Compression (MPa)	Indices Franklin (MPa)	>10	4-10	2-4	1-4	Indice Franklin Non utilisable (MPa)		
		Résistance à la Compression (MPa)	>250	100-250	50-100	25-50	5-2-5	1-5	<1
	Note		15	12	7	4	2	1	0
2	R.Q.D.		90-100	75-90	50-75	25-50	<25		
	Note		20	17	13	8	3		
3	Escapement des Joints		>2m	0,6-2 m	0,2-0,6 m	0,06-0,2m	<0,06 m		
	Note		20	15	10	8	5		

4	Nature des joints		Surfaces très rugueuses Non continue Eponte en contact Eponte non Altérées	Surfaces Légèrement rugueuses Epaisseur <1 mm Eponte non Altérées	Surfaces Légèrement rugueuses Epaisseur <1 mm Eponte Altérée	Surfaces lustrées ou Remplissage <5 mm ou joint ouvert 1 à 5 mm joints continus	Remplissage >5 mm ou joints ouverts >5 mm joints continus
	Note		30	25	20	10	0
5	Venues d'eau	Débit sur 10 m	Aucune venue d'eau	< 10 l/min	10-25 l/min	25-125 l/min	>125 l/min
		Pression d'eau contrainte principale	0	<0,1	0,1-0,2	0,2-0,5	> 0,5
	Hydro-Géologie	Complètement sec	Humide	Suintements (eau Interstitielle)	Pression d'eau modérée	Problèmes sérieux de venues d'eau	
Note		15	10	7	4	0	

**Tab. 6** : Système RMR (Bieniawski). (Bieniawski 1989)

<b>Note totale</b>	100-81	80-61	60-41	40-21	<20
<b>Qualité de la roche</b>	I Excellent	II Bien	III Modéré	IV Médiocre	V Très médiocre

**Tab.7** : La qualité de la roche selon le système de (Z. BIENIAWSKI 1989).

#### 4.4.1 Applications du système RMR

Le système RMR est utilisé beaucoup plus dans le domaine de génie civil, mais il existe quelques applications dans le secteur de génie minier qui sont comme suit :

- Dans le domaine minier, l'utilisation du RMR basique reste insuffisant pour quantifier la qualité de la roche, alors il nécessaire d'utiliser le coefficient correcteur (B), pour donner la valeur exacte du RMR.
- La pression des terrains dans les mines en souterrains sont considérables est dépassent la valeur de 25 MPa qui est utilisé dans le secteur civil, pour cela l'utilisation du RMR reste limité.
- D'autres paramètres qui ne rentrent pas dans l'équation du RMR, les pressions in-situ, la rugosité des fissures, l'angle de frottement du pli de remplissage et les terrains gonflants.
- Le système RMR est appliqué pour les roches résistantes ainsi que pour les roches de discontinuités majeures.

Malgré ça, le système RMR est considéré comme une évolution technologique qui a apporté des solutions immédiates telles que les facteurs géologiques qui sont utilisés par la suite dans la conception des excavations dans les secteurs de génie civile et quelques applications dans le domaine minier (Chalhoub, 2006).

## 4.5 Systèmes du SMR

( Romana, 1985) a développé le SMR par la contribution du système RMR basique en lui ajoutant un autre paramètre d'ajustement qui est en relation avec les joints – talus et un autre facteur lié à la méthode d'excavation:

$$\text{SMR} = \text{RMR de base} + (F1 \cdot F2 \cdot F3) + F4$$

F1, F2 et F3 : facteurs d'ajustement.

- F1 c'est un facteur qui dirige l'orientation des joints est des talus, avec une variation de 1 lorsque les deux sont presque parallèles, et 0,15 lorsque l'angle entre les deux est supérieur à 30° et la masse rocheuse elle est stable.
- $F1 = (1 - \sin A)^2$  A est l'angle entre les directions des joints et du talus.
- F2 est un facteur lié en pendage des joints pour le mode de rupture plan.  $F2 = 1$  (lorsque l'angle d'inclinaison des joints est supérieur à 45°), et  $F2 = 0,15$  (lorsque l'angle d'inclinaison est inférieur à 20°). Dans le cas du toppling, le facteur reste égal à 1. Alors l'équation sera comme suit :
- $F2 = \tan^2 \beta_j$
- $\beta_j$  est l'angle d'inclinaison des joints
- F3 est lié à la relation entre la pente du talus et le pendage des joints. Pour ce paramètre, il y a également lieu de faire la différence entre une rupture plane et une rupture par toppling.
- F4 c'est un paramètre qui est lié la méthode d'excavation. Il est donné empiriquement sur la base des principes suivants :
  - La stabilité des talus vierges est importante à cause de l'érosion à long terme et la végétation qui protège l'état naturel des pentes.
  - La théorie de pré découpage stabilise mieux Les roches.
  - La quantité d'explosif utilisé joue un rôle très important dans la stabilité du talus.
  - L'effort mécanique est un moyen régulateur de la stabilité du talus

<b>SMR= RMR de base + (F1+F2+F3) + f4</b>						
		$\alpha_j$ =Direction du pendage des joints $\beta_j$ =Pendage du joint $\alpha_s$ =Direction du pendage du talus $\beta_s$ =Pendage du talus				
<b>Facteurs d'ajustement liés aux joints (F1,F2,F3)</b>		<b>Très favorable</b>	<b>Favorable</b>	<b>Moyen</b>	<b>Défavorable</b>	<b>Très défavorable</b>
<b>Rupture plane <math>\alpha_j-\alpha_s</math></b>		> 30°	30°-20°	20°-10°	10°-5°	<5°
<b>Basculement <math>\alpha_j-\alpha_s- 180^\circ</math></b>						
<b>Valeur de F1</b>		<b>0,15</b>	<b>0,4</b>	<b>0,7</b>	<b>0,85</b>	<b>1</b>
<b>Relation</b>		<b><math>F1=(1-\sin\alpha_j-\alpha_s)^2</math></b>				
<b><math>\beta_j=</math></b>		< 20°	20°-30°	30°-45°	35°-45°	> 45°
<b>La valeur</b>	<b>Rupture plane</b>	<b>0,15</b>	<b>0,4</b>	<b>0,7</b>	<b>0,85</b>	<b>1</b>
	<b>Basculement</b>	<b>1</b>				
<b>Relation</b>		<b><math>F2=\text{tg}2\beta_j</math></b>				
<b>Rupture plane <math>\beta_j-\beta_s</math></b>		> 10°	10°-0°	0°	0°-(-10°)	< (-10°)
<b>Basculement <math>\beta_j+\beta_s</math></b>		< 110°	110°-120°	> 120°	-	-
<b>Valeur de F3</b>		<b>0</b>	<b>-6</b>	<b>-25</b>	<b>-50</b>	<b>-60</b>
<b>Relation</b>		<b>F3=Ajustement de BIENIAWSKI pour l'orientation de joints 1976</b>				
<b>F4 : Facteur d'ajustement pour la méthode d'ajustement</b>		<b>F4=valeur empirique de la méthode d'excavation</b>				
<b>Valeur de F4</b>		<b>Talus naturels</b>	<b>Prespliting</b>	<b>Smoeth blasting</b>	<b>Explosif ou mécanique</b>	<b>Déficient blasting</b>
		<b>15</b>	<b>10</b>	<b>8</b>	<b>0</b>	<b>-8</b>

**Tab.8** : Valeurs des facteurs du SMR (Romana, 1985).

Le principe d'évaluation de SMR est basé sur le calcul pour chaque formation des joints. Le résultat validé est le plus bas pour la quantification de la totalité du talus.

Description des classes SMR										
Classe	Va	Vb	IVa	IVb	IIIa	IIIb	IIa	IIb	Ia	Ib
Description	Très mauvais		Mauvais		Moyen		Bien		Très bien	
Stabilité	Complètement instable		Instable		Partiellement stable		Stable		Complètement instable	
Rupture	Grand plan		Plan ou grand dièdre		Quelques joints ou beaucoup de dièdres		Quelques blocs		Aucune	
Support	Réexcavation		Importante corrective		Systématique		Occasionnel		Aucun	

**Tab.9** : Description des classes SMR (Romana, 1985).

Les résultats des SMR, reflète la stabilité du talus et donne les moyens de soutènement nécessaires pour chaque cas (bois, acier, béton armé, etc.).

#### 4.6 Observations sur les systèmes de classification

Les systèmes de classifications quantitatives des roches fissurés sont employés largement dans la réalisation des excavations creusée dans les roches. Les données principales de la roche déterminent l'état qualitatif de la roche avec la combinaison multicritère des paramètres liés à la roche afin de donner une note pour son état.

Les systèmes de classification sont utilisés dans la préféabilité du projet. Alors les conditions d'utilisation sont comme suit :

- Les facteurs utilisés dans la classification sont standard pour n'importe quel cas d'étude de la masse rocheuse quel que soient les conditions spécifiques du projet. Surtout leur système anisotrope et son état intrinsèque.
- Les facteurs qui sont liés au système de rupture, déformation et la surface du support avec la roche sont négligés
- Les factures de déformation, résistance sont liés au milieu isotrope.

L'application de ces méthodes dans le secteur des mines reste insuffisante suite à la complexité des données des ouvrages et la précision demandée dans ces conditions pour faire une réaction rapide de rester sans soutènement ou le contraire.

## 4.7 Prélèvements et mesures in-situ

### 4.7.1 Essais au laboratoire : Essais de compression uni axiale

#### 4.7.1.1 Echantillonnage

Afin de décrire le comportement physico-mécanique des formations géologiques constituant le massif rocheux de la mine de Djebel El Onk (carrière de Kef Essnoun), on a pris l'initiative de prélever un nombre suffisant d'échantillons représentatifs pour faire la tâche d'essais au laboratoire dont on a concentré notre travail sur des échantillons ayant un volume considérable où on peut extraire des éprouvettes convenables aux normes internationales. Un exemple de prélèvement est représenté dans la figure suivante :



**Fig.26** : Echantillons pour essais

#### 4.7.1.2 Préparation de la forme géométrique d'échantillons

Afin de préparer des échantillons aux essais mécanique (essais de compression uni axiale), on a utilisé une scie à table (Figure. 27) pour avoir des éprouvettes de forme régulière adéquate aux normes internationales avec des dimensions de 5cm\*5cm\*10cm.(Voir figure .28)



**Fig. 27** : Scie à table au laboratoire de l'institut des mines Tébessa



**Fig.28** : Echantillons préparés.

#### **4.7.1.3 Ecrasement des échantillons**

Pour extraire la valeur de la résistance à la compression uni axiale, une série d'essais a été effectué au niveau de laboratoire des mines sur les échantillons représentatifs de chaque faciès (Voire figure suivante).



**Fig. 29** : Écrasement des échantillons au laboratoire par presse hydraulique

<b>ROCHE</b>	<b>CALCAIRE- YPRESIEN</b>	<b>PHOSPHAT E</b>	<b>MARNES</b>	<b>CALCAIRE DANIO- MONTIEN</b>
<b>La résistance à la compression unie axiale (MPa)</b>	<b>27</b>	<b>6</b>	<b>6.78</b>	<b>26.8</b>

**Tab. 10** : Propriété mécanique des différentes roches.

#### **4.7.1.4 La masse volumique**

C'est un paramètre très important dans le système pétrographique. Ils existent deux types de la masse volumique l'une est absolue est l'autres est apparente.

Pour la première donne la valeur exacte de ce paramètre et nécessite un peu de temps pour sa réalisation. Elle est exprimée par une unité de mesure en en kg/m<sup>3</sup> ou en t/m<sup>3</sup>.

Pour la deuxième donne une valeur approximative à cause de l'erreur remarquable lors de sa réalisation. L'unité de mesure est la même que la masse volumique absolue, mais son mode opératoire est simple et rapide. Il faut réaliser plusieurs essais pour donner une valeur moyenne de la masse rocheuse.

Masse volumique totale = masse totale / volume total

Après avoir fait les essais de la masse volumique de tous les échantillons au laboratoire, on obtient les résultats suivants :

<b>ROCHE</b>	<b>CALCAIRE YPRESIEN</b>	<b>PHOSPHATE</b>	<b>MARNE</b>	<b>CALCAIRE DANIEN- MONTIEN</b>
<b>Masse volumique (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>1.87</b>	<b>1.63</b>	<b>1.21</b>	<b>1.43</b>

**Tab. 11** : propriété physique de différentes roches.

#### **4.7.2 Prise géométrique des discontinuités**

La compréhension de la distribution spatiale des discontinuités dans un massif rocheux est une préoccupation majeure d'un ingénieur des mines. L'identification géométrique du réseau des discontinuités donne une prévision sur la qualité du massif rocheux ainsi que le bon sens des travaux d'exploitation où les ouvrages miniers favorisent la stabilité. Pour cette fin, nous avons effectué un bilan structural qui inclut une liste des différentes mesures exécutées au sein de la carrière de Kef - Essnoun. Afin de réaliser ce travail on a pris une boussole de géologue qui fait l'objet d'une extraction géométrique des discontinuités. La prise d'espacement entre les joints successifs a été effectuée pour avoir la densité linéaire des discontinuités.



**Fig.30** : Mesures d'espacement entre discontinuités in-situ



**Fig.31** : Mesures d'orientation et de pendage des discontinuités in-situ.

### 4.7.3 Projection stéréographique

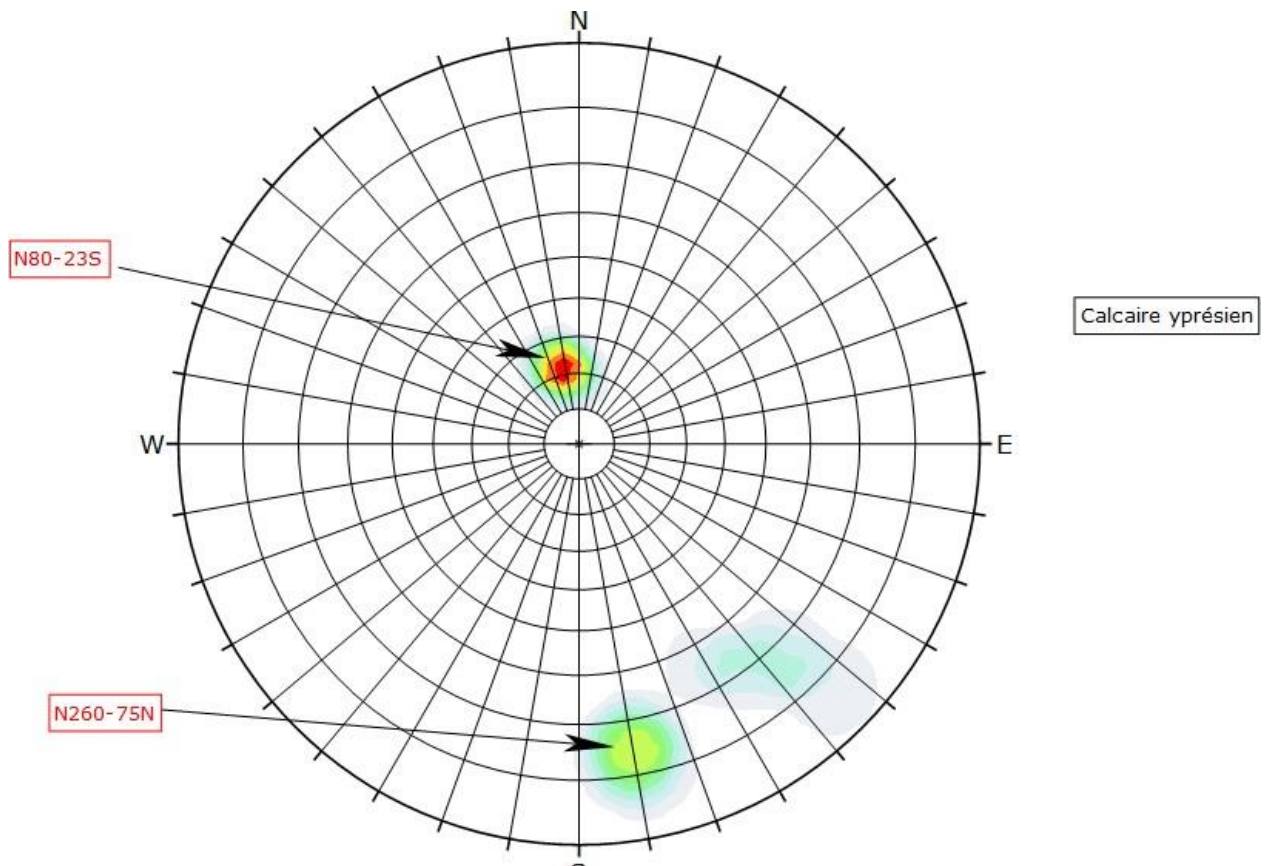
La projection stéréographique est une approche servir de dessiner une sphère privée d'un point sur un plan. On convient souvent que le point dont on prive la sphère sera un des pôles de celle-ci ; le plan de projection peut être celui qui sépare les deux hémisphères, nord et sud, de la sphère, qu'on appelle plan équatorial. On peut

Également faire une projection stéréographique sur n'importe quel plan parallèle au plan équatorial pourvu qu'il ne contienne pas le point dont on a privé la sphère. Afin de regrouper en familles les différentes discontinuités rencontrées au sein du massif rocheux de Kef –Essnoun. On a projeté graphiquement les mesures effectuées à l'aide du code numérique Dips 7.0 en basant sur les paramètres géométriques (pendage, sens de pendage) des joints dont les résultats obtenus pour chaque faciès sont représentés comme suit :

Facies de Calcaire Yprésien		Facies de Phosphate		Facies de Marne		Facies de Calcaire Danien-Montien	
Pendage(°)	Sens de pendage(°)	Pendage (°)	Sens de pendage (°)	Pendage (°)	Sens de pendage (°)	Pendage (°)	Sens de pendage(°)
24	N160	10	N174	64	N174	23	N167
17	N175	09	N172	55	N170	33	N155
22	N172	10	N168	50	N166	72	N162
20	N175	08	N175	58	N169	69	N168
24	N166	05	N172	62	N150	74	N165
22	N163	07	N171	65	N150	67	N155
77	N352	06	N173	75	N150	65	N42
73	N349	10	N173	65	N180	72	N63
79	N348	89	N104	64	N181	67	N76
74	N350	71	N112	54	N154	68	N67
82	N314	80	N108	56	N175	57	N61
71	N315			27	N36	45	N65
64	N331			30	N82	51	N68
70	N323			27	N45	59	N80
				29	N18	50	N70
				25	N20		
				27	N41		
				27	N300		
				20	N45		
				31	N52		

**Tab.12** : les paramètres géométriques (pendage, sens de pendage) des joints.

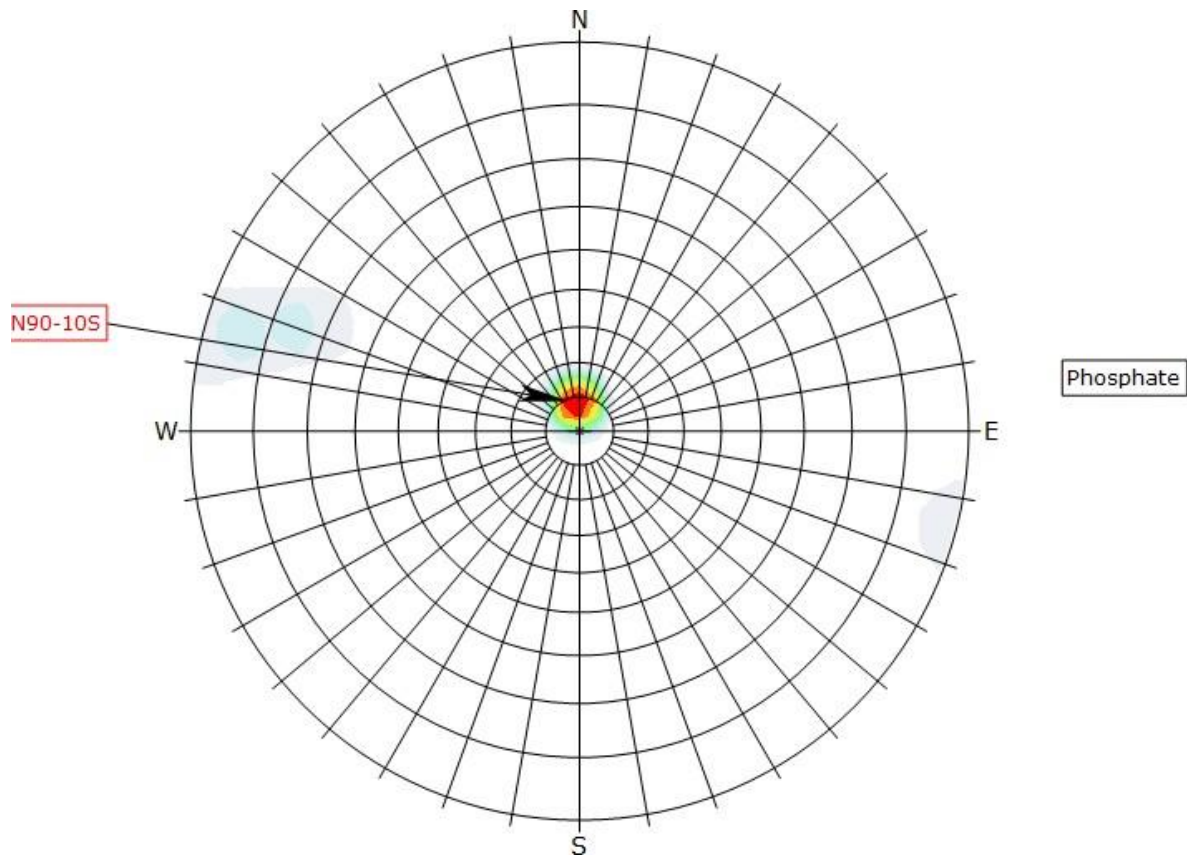
La représentation graphique des mesures est montrée dans les figures suivantes :



**Fig.32:** Diagramme du plan de discontinuité dans la zone 01 calcaire-yprésien.

La projection stéréographique montre l'existence de 2 familles directionnelles de discontinuités.

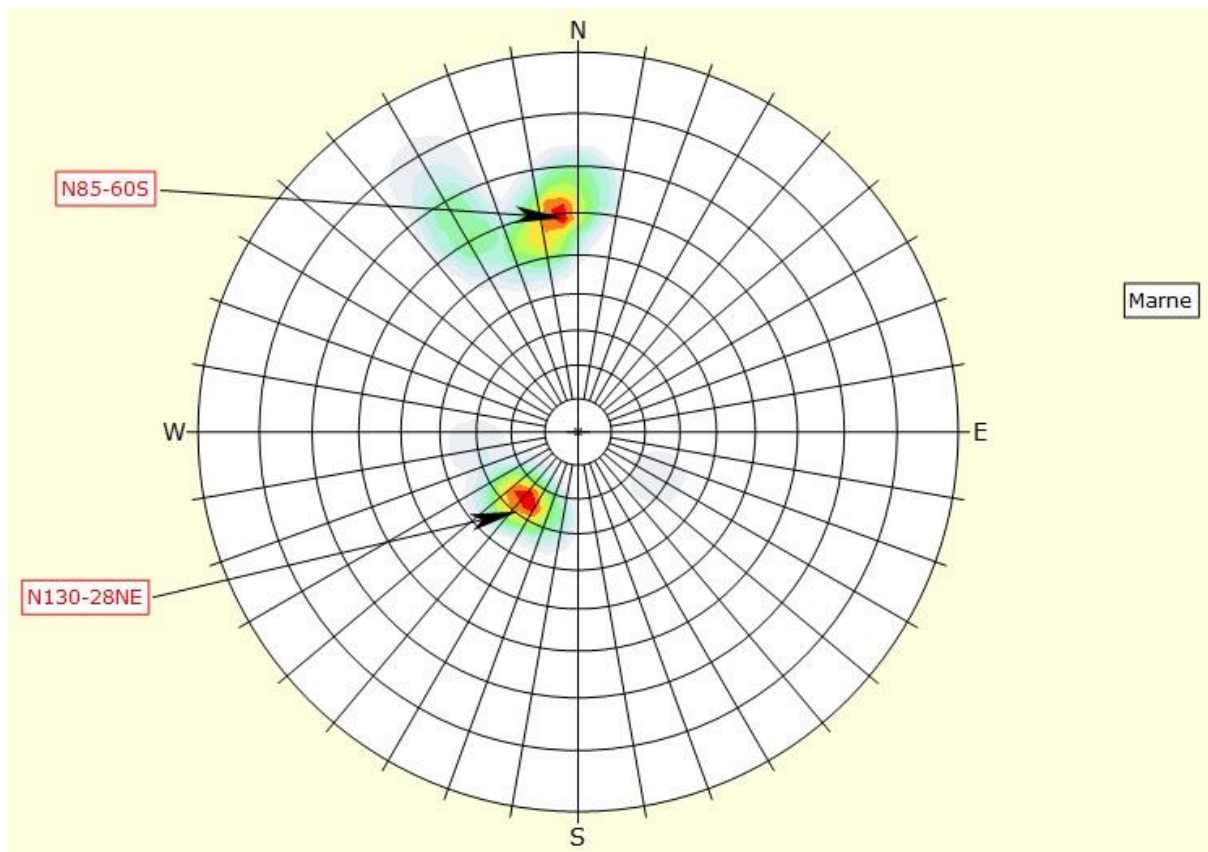
- La première famille est orientée vers N 80 \_ 23°S.
- La deuxième famille est orientée vers N 260 \_ 75°N.



**Fig.33** : Diagramme du plan de discontinuité dans la zone 02 phosphate

La projection stéréographique donne l'existence d'une seule famille directionnelle de joints avec des discontinuités diffuses.

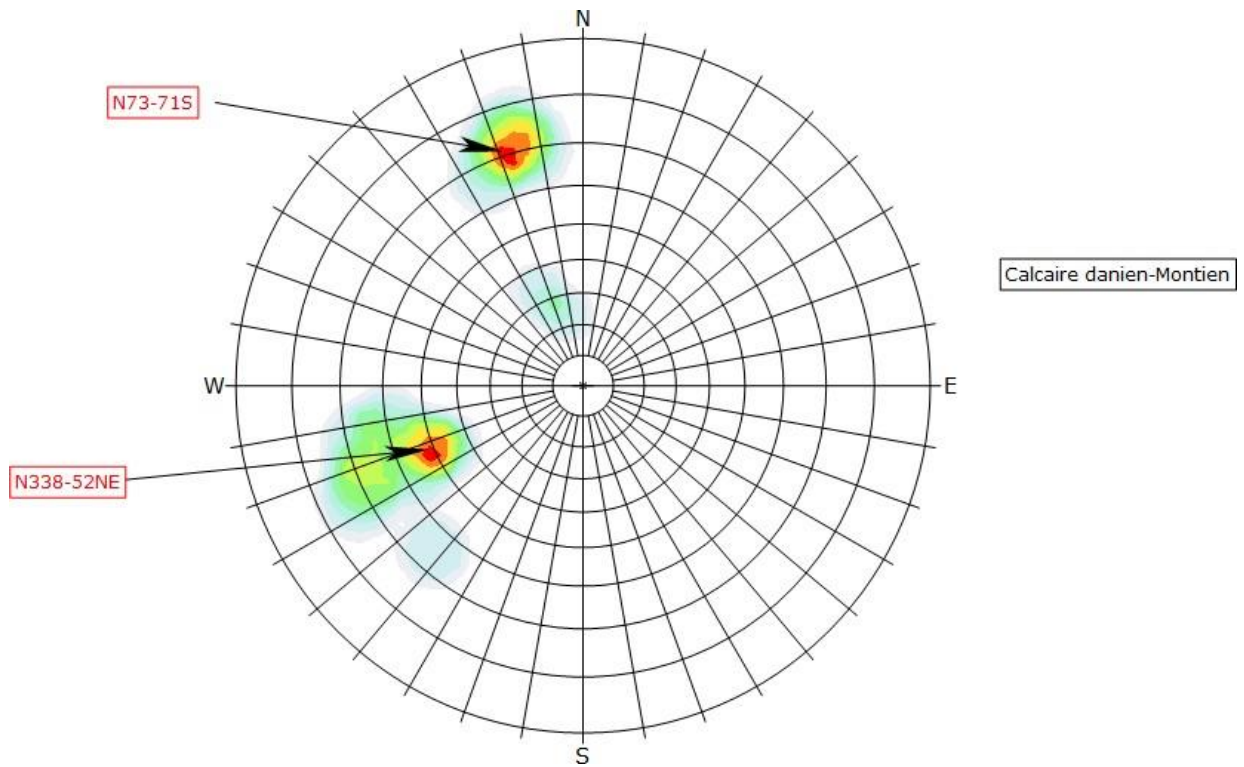
- La famille est orientée vers N 90 \_ 10°S.



**Fig. 34** : Diagramme du plan de discontinuité dans la zone 03 marne.

La projection stéréographique montre l'existence de 2 familles directionnelles de discontinuités avec des discontinuités diffuses.

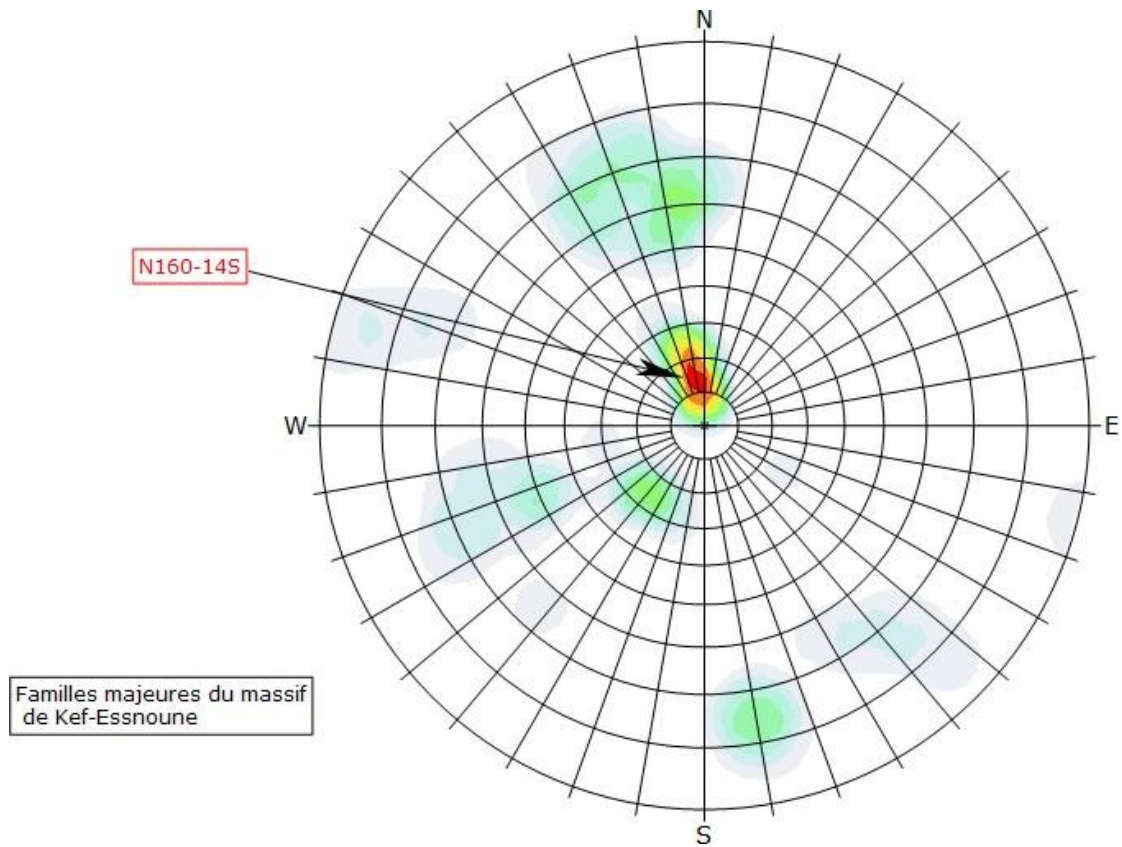
- La première famille est orientée vers N 85 \_ 60°S.
- La deuxième famille est orientée vers N 130 \_ 28°NE.



**Fig. 35** : Diagramme du plan de discontinuité dans la zone 04 calcaire danien-Montien.

La projection stéréographique montre l'existence de 2 familles directionnelles de discontinuités avec des discontinuités diffuses.

- La première famille est orientée vers N 73 \_ 71°S.
- La deuxième famille est orientée vers N 338 \_ 52°NE.



**Fig.36** : Diagramme des familles majeures de la discontinuité dans le massif de Kef-Essnoun.

La projection stéréographique montre l'existence d'une seule famille majeure de discontinuités avec des discontinuités diffuses.

- La famille est orientée vers N 160 \_ 14°S

## 4.8 Classification géomécanique de massif de Kef Essnoun

### 4.8.1 Classification RQD (Rock Quality Désignation)

Afin de classer le massif rocheux de Kef-Essnoun par la méthode RQD, une analyse a été effectuée à la base de différentes carottes extraites dont on a recensé la distribution géométrique des pièces des passes carottées.



**Fig. 37:** Sondages carottés de Kef essnoun (somiphos., 2020)

TYPE DE ROCHE	RQD DANS (%)	QUALITE DE LA ROCHE
<b>Calcaire (Danien-Montien)</b>	84	Bonne
<b>Marne</b>	45	Médiocre
<b>Phosphate</b>	73	Moyenne
<b>Calcaire-yprésien</b>	70	Moyenne

**Tab.13 :** RQD des différents faciès.

D'après les résultats obtenus par l'application de la méthode RQD sur les conditions du massif de Kef-Essnoun, on constate que ce massif se compose de faciès de : bonne qualité (Calcaire danien-Montien), qualité moyenne (Phosphate, Calcaire-yprésien) et qualité médiocre (Marne) avec une note de RQD qui se varie entre 45 et 84. (Voir tableau .13).

#### **4.8.2 Classification RMR du massif rocheux Kef-Essnoun**

L'indice RMR (Rock Mass Rating) de Bieniawski (1989) permet de connaître la situation de stabilité d'un massif rocheux. Elle a été utilisée parce que c'est la méthode de choix dans l'exploitation à ciel ouvert, en raison de sa simplicité et de son cout réduit de réalisation, et parce que c'est celle qui s'adapte le mieux à la réalité du gisement. Dans le cas particulier de Castellans, l'indice RMR a été déterminé pour chaque domaine structurel, défini par les fronts d'exploitation, à partir des paramètres suivants : RQD; résistance à la compression simple; séparation, ouverture, persistance, rugosité, remplissage et altération des discontinuités; présence d'eau.

<b>FACIES</b>	<b>CALCAIRE YPRESIEN</b>					
<b>Paramètres</b>	Rc (MPa)	RQD (%)	Nature des joints	Espacement des joints(m)	Hydrogéologie	RMR base
<b>Mesure</b>	27	70	Surface légèrement rugueuse épaisseur > 1 m m Eponte non Altérées	0.6 – 02	Complètement sec	67
<b>Valeur extrême de classification</b>	25-50	50-75				
<b>Note</b>	4	13	25	10	15	

**Tab. 14 :** Valeur du RMR de facies du Calcaire yprésien.

<b>FACIES</b>	<b>PHOSPHATE</b>					
<b>Paramètres</b>	Rc (MPa)	RQD (%)	Nature des joints	Espacement des joints(m)	Hydrogéologie	RMR base
<b>Mesure</b>	6	73	Surface légèrement rugueuse épaisseur mm Eponge non altérées	0.6 – 02	Complètement sec	64
<b>Valeur extrême de la classification</b>	3-10	50-75				
<b>Note</b>	1	13	25	10	15	

**Tab. 15** : Valeur du RMR de facies du Phosphate.

<b>FACIES</b>	<b>MARNE</b>					
<b>Paramètres</b>	<b>Rc (MPa)</b>	<b>RQD (%)</b>	<b>Nature des joints</b>	<b>Espacement des joints (m)</b>	<b>Hydrogéologie</b>	<b>RMR de base</b>
<b>Mesure</b>	6.78	45	Discontinuités lisses (SLK) ou remplissage < 5 mm d'épaisseurs ou joints ouverts 1 - 5 mm et Continu	< 0.06		39
<b>Valeur extrême de la Classification</b>	3-10	25-50		Complètement sec		
<b>Note</b>	1	8	10	5	15	

**Tab. 16** : Valeur du RMR de facies de marne.

<b>FACIES</b>	<b>CALCAIRE DANIO-MONTIEN</b>					
<b>Paramètres</b>	<b>Rc (MPa)</b>	<b>RQD (%)</b>	<b>Nature des joints</b>	<b>Espacement des joints (m)</b>	<b>Hydrogéologie</b>	<b>RMR base</b>
<b>Mesure</b>	26.8	84	Surface légèrement rugueuse épaisseur > 1m m Eponte non Altérées	0.6 – 02	Complètement sec	71
<b>Valeur extrême De la classification</b>	25-50	75- 90				
<b>Note</b>	4	17	25	10	15	

**Tab. 17 :** Valeur du RMR de facies de la Calcaire Danien – Montien.

<b>FACIES</b>	<b>RMRDE BASE</b>	<b>CLASSE DU MASSIF ROCHEUX</b>	<b>DESCRIPTION DU MASSIF ROCHEUX</b>
calcaire Yprésien	67	II	Bon rocher
Phosphate	64	II	Bon rocher
Marne	39	IV	Rocher médiocre
Calcaire danio-montien	71	II	Bon rocher

**Tab. 18** : description de la qualité du massif de Kef-Esnoun.

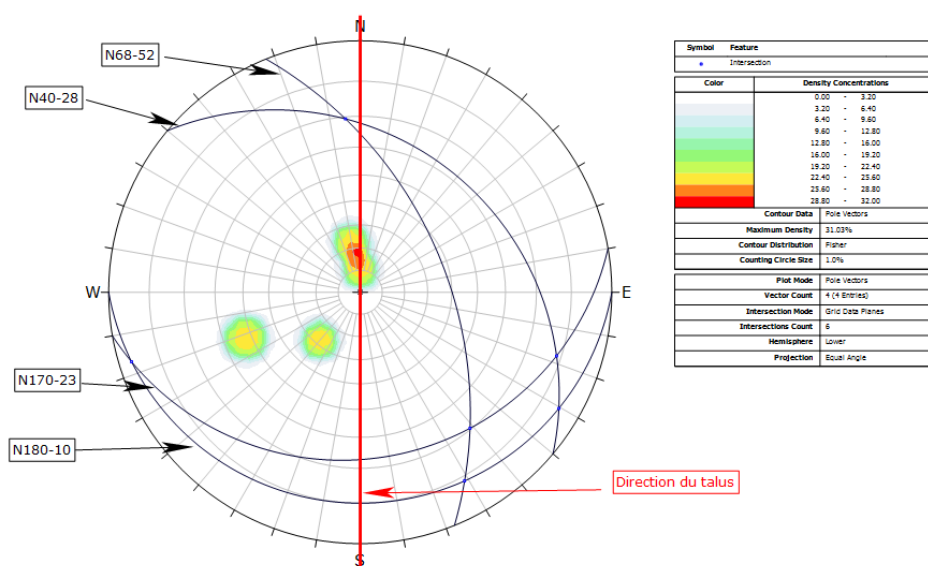
L'interprétation des valeurs du  $RMR_{de\ base}$ , montre que les faciès des calcaires Yprésien, des phosphates et des calcaires Danien-Montien ont une bonne qualité et résistent mieux. En revanche, le faciès des marnes est de qualité médiocre.

### 4.8.3 Classification SMR du massif rocheux Kef-Essnoun

La classification SMR établie à base des observations in-situ, montre que l'état qualitatif de la masse rocheuse varie en fonction des différents faciès (Tab .19-20).

	CALCAIRE YPRESIEN	PHOSPHATE	MARNE	CALCAIRE MONTIEN	DANIEN-
<b>Direction du pendage des joints (<math>\alpha_j</math>) (°)</b>	170	180	40	68	
<b>Pendage du joint (<math>\beta_j</math>) (°)</b>	23	10	28	52	
<b>Direction du pendage du talus (<math>\alpha_s</math>) (°)</b>	270	270	270	270	
<b>Pendage du talus (<math>\beta_s</math>) (°)</b>	75	75	75	75	

**Tab. 19** : Orientation des joints et du talus.



**Fig.38** : Position du talus par rapport aux plans de discontinuités

	<b>CALCAIRE YPRESIEN</b>	<b>PHOSPHATE</b>	<b>MARNE</b>	<b>CALCAIRE DANIEN MONTIEN</b>
<b>RMRde base</b>	<b>67</b>	<b>64</b>	<b>39</b>	<b>71</b>
<b>F<sub>1</sub></b>	<b>0.15</b>	<b>0.15</b>	<b>0.15</b>	<b>0.15</b>
<b>F<sub>2</sub></b>	<b>0.4</b>	<b>0.15</b>	<b>0.4</b>	<b>1</b>
<b>F<sub>3</sub></b>	<b>-60</b>	<b>-60</b>	<b>-60</b>	<b>-60</b>
<b>F<sub>4</sub></b>	<b>-8</b>	<b>-8</b>	<b>0</b>	<b>0</b>
<b>SMR</b>	<b>55.4</b>	<b>54.65</b>	<b>35.4</b>	<b>62</b>
<b>Classe</b>	<b>III</b>	<b>III</b>	<b>IV</b>	<b>II</b>
<b>Description</b>	<b>Moyen</b>	<b>Moyen</b>	<b>Mauvais</b>	<b>Bien</b>
<b>Stabilité</b>	<b>Partiellement Stable</b>	<b>Partiellement Stable</b>	<b>Instable</b>	<b>Stable</b>
<b>Description</b>	<b>Description</b> : rupture possible ; <b>Stabilité</b> : stable ; <b>Rupture</b> : rupture possible au niveau de la couche de marne ; <b>Méthode de confortement</b> : reprofilage.			

**Tab. 20** : Valeur du SMR des différentes formations géologiques.

## 4.9 Conclusion

La connaissance détaillée du massif et sa caractérisation et classification géomécanique empirique, RQD, RMR, SMR permet d'évaluer la qualité du massif qui varie en fonctions de différentes formations géologiques de bonne pour, le calcaire-yprésien, le phosphate, le calcaire Danien- Montien, à moyenne pour les marnes.

D'après les résultats de classification SMR on constate que l'interface marneuse constitue la cause probable d'une instabilité du massif, en raison de sa mauvaise qualité. Les familles de discontinuités présentes dans le massif rocheux influencent son comportement et sa qualité globale. En général, les classifications géomécanique avec les meilleurs résultats d'application sont Bieniawski (RMR de base), Romana (SMR) basé sur l'état de fracturation et la qualité des discontinuités. Le massif rocheux de la carrière "Kef Essnoun" est classé en qualité moyenne.

## 5 CHAPITRE 5 : Etude géophysique par tomographie électrique et sismique du glissement de Kef Essnoun.

---

### 5.1 Application de la tomographie électrique :

#### 5.1.1 Introduction :

Toutes les méthodes de résistivité utilisent une source artificielle de courant qui est introduit dans le sol par électrodes ponctuelles ou contacts à longue ligne ; le dernier arrangement est rarement utilisé de nos jours. La procédure consiste à mesurer les potentiels au niveau d'autres électrodes de la proximité du flux de courant. Parce que le courant est mesuré également. Il est possible de déterminer une résistivité effective ou apparente du sous-sol.

À cet égard, la technique de résistivité est supérieure, au moins en théorie, à toutes les autres méthodes électriques, parce que les résultats quantitatifs sont obtenus en utilisant une source contrôlée de dimensions spécifiques.

En pratique, comme dans d'autres méthodes géophysiques, les potentialités maximales de résistivité ne sont jamais réalisées.

Le principal inconvénient est sa grande sensibilité à variations mineures de conductivité près de la surface ; dans langage électronique, le niveau de bruit est élevé.

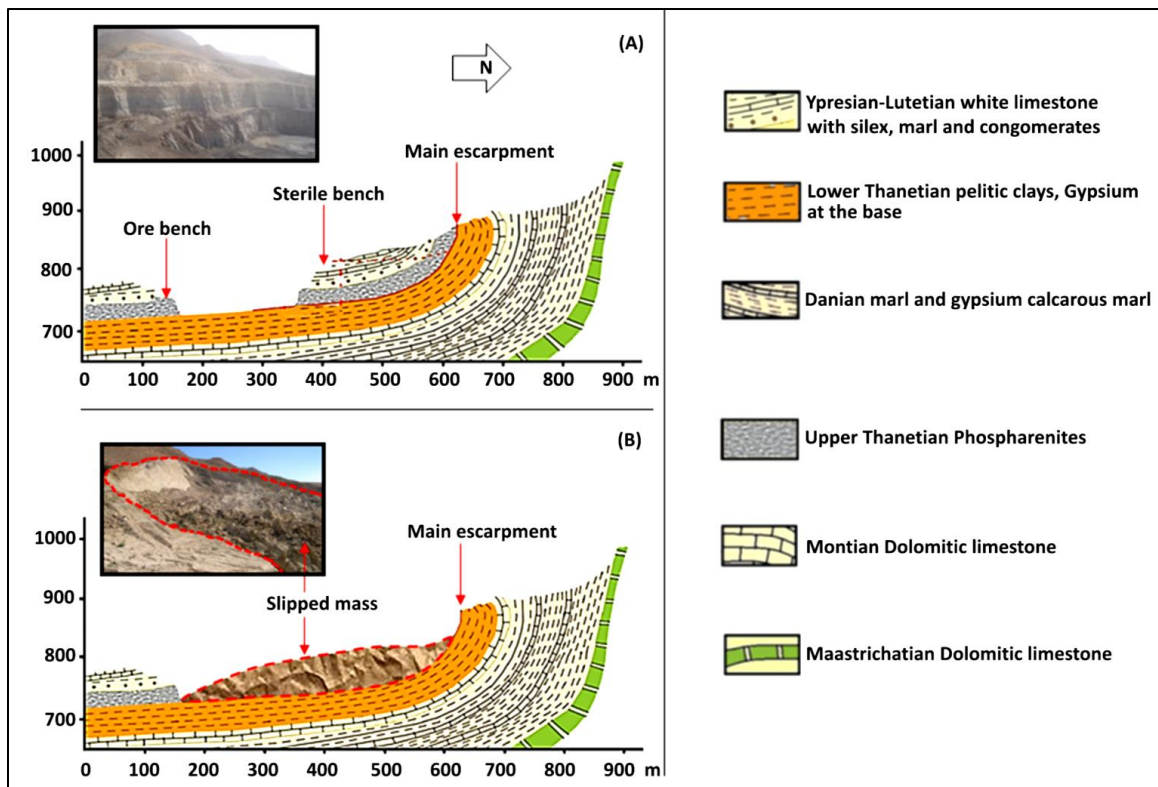
#### 5.1.2 Conditions générales :

Le glissement du terrain de Kef Essnoun en 2007(Fig-39) est le plus dangereux en à ciel ouvert dans l'activité minière en Algérie (Fredj , et al., 2017).Une masse rocheuse est tombée complètement dans la fosse et estimé environ 11 ha dont 30m de la couche productive et 40m des roches stériles de recouvrement (Fredj, 2018).

Selon la forme de la surface de rupture, le glissement apparaît d'abord sous la forme d'un glissement circulaire (Fig.40). Cependant, le mode de rupture qui s'est produit dans la fosse de Kef Essnoun est classé comme un glissement structurel (planaire). (Gadri, et al., 2015).



**Fig.39:** Le glissement de terrain de Kef Essnoun en 2007.



**Fig. 40** : Coupe géologique du glissement de Kef Essnoun avant (A) et après glissement (B). [Fredj et al, 2020]

### 5.1.3 Technique de tomographie par résistivité électrique (ERT)

La technique de tomographie de résistivité électrique est basée sur des mesures de la distribution de la résistivité apparente et des variations du champ électrique qui a été généré artificiellement à travers un système d'électrodes (Mita, Glazer, Kaczmarzy, Dąbrowski, & Mita, 2018). La mesure de la résistivité d'une structure s'effectue en injectant un courant électrique dans celle-ci au moyen d'électrodes d'injection (électrodes de courant) et en mesurant la différence de potentiel créée par le passage du courant au moyen d'électrodes de mesure du potentiel (électrodes de potentiel). Le nombre d'électrodes, ainsi que leur agencement définissent le dispositif électrique utilisé. La configuration du dispositif est choisie selon la problématique de l'étude. Les électrodes peuvent être sur ou sous la surface du sol (Marescot, 2006).

En tomographie 2D de surface, les principaux dispositifs communément utilisés sont le Wenner et le pôle-pôle (Berge & Drahor, 2009), le Wenner-Schlumberger dipôle-dipôle (Hermawan & Putra, 2016).

La Fig.41 est un exemple montre qui une séquence possible de mesures pour la configuration Wenner-Schlumberger avec 20 électrodes, où a est la distance entre deux électrodes, n est le nombre de niveau de mesure, (C1 et C2) sont deux électrodes de courant, (P1 et P2) sont deux électrodes de potentiel.

La résistivité électrique apparente peut être exprimée en fonction de la différence de potentiel ( $\Delta V$ ) et de l'intensité du courant(I), avec un coefficient géométrique (k) lié à la configuration des électrodes (AL-hameedawi, Thabit, & AL-Menshed, 2021) (Bellanova, et al., 2016) :

$$\rho_a = k \cdot \Delta V / I$$

Les valeurs obtenues de la résistivité apparente fournissent une première image tomographique de la structure électrique du sous-sol, appelée "pseudo-croquis". Ensuite, les mesures de résistivité apparente sont traitées à l'aide de méthodes d'inversion pour obtenir un modèle synthétique de résistivité électrique vraie (Perrone, et al., 2006).

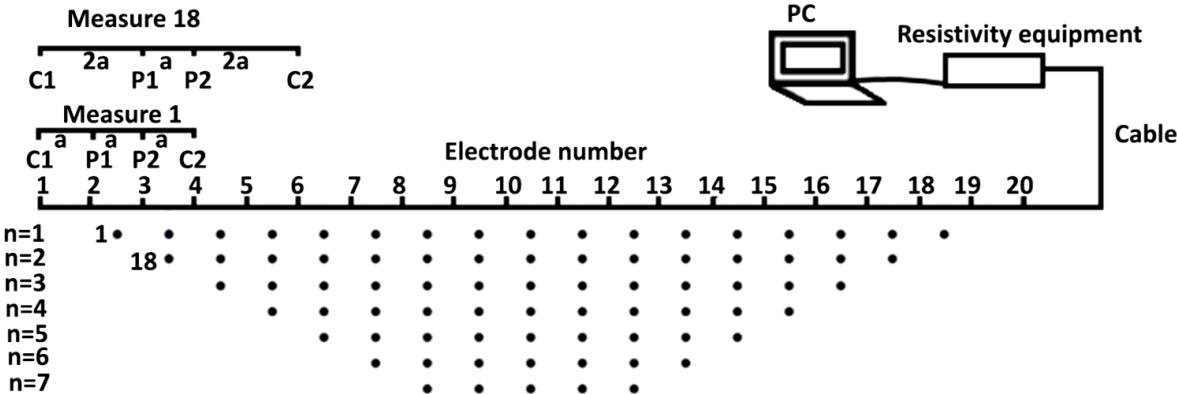
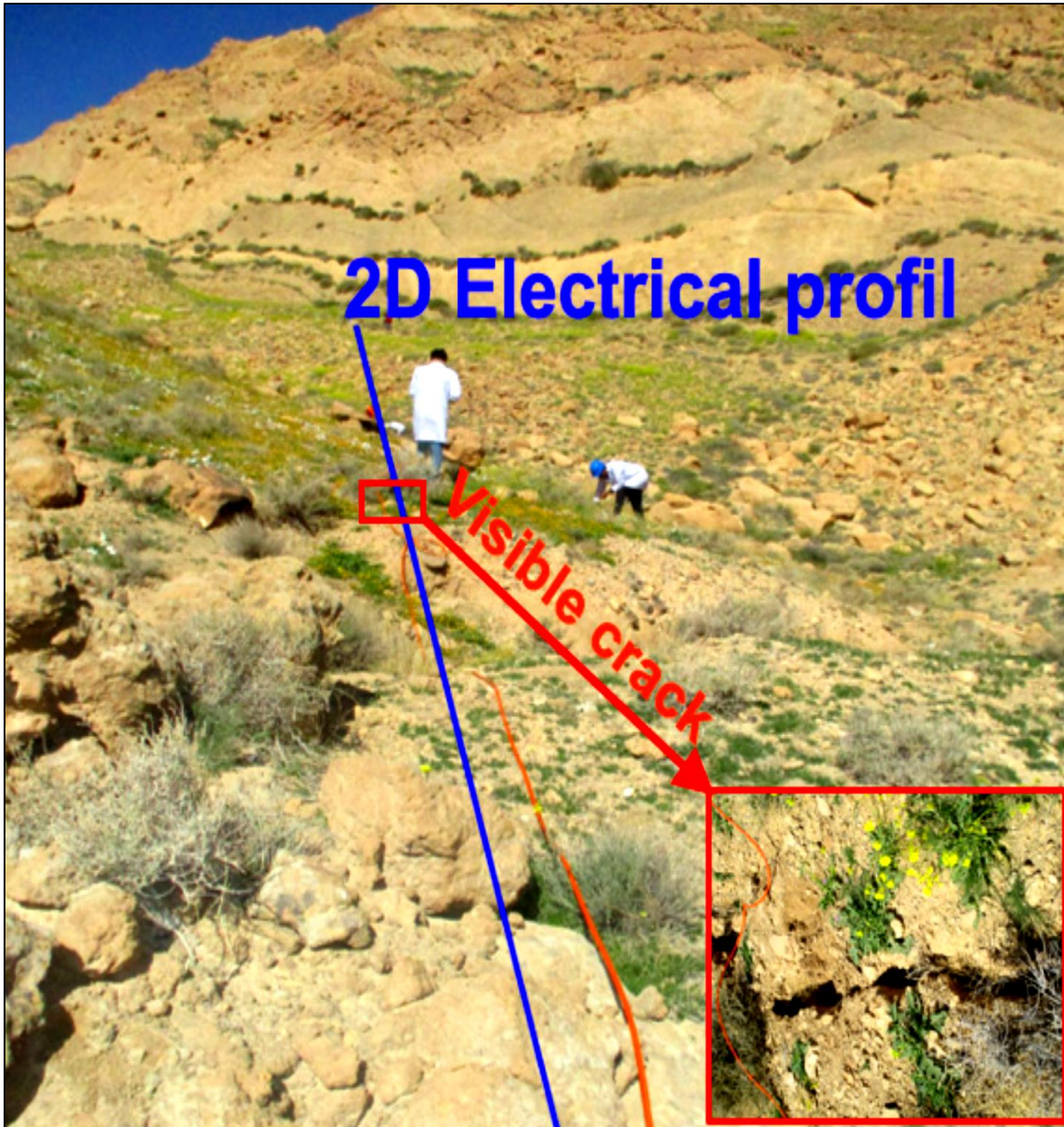


Fig. 41 : Configuration du dispositif Wenner-Schlumberger (Jiang, Dong, & Dai, 2020)

#### 5.1.4 Acquisition tomographie 2D

Une tomographie 2D nécessite un certain nombre d'électrodes connectées à un câble multiconducteurs et placées selon un profil. Un ordinateur portable, dans lequel est programmée la séquence de mesures, est relié à la boîte de commutation électronique et sélectionne automatiquement les électrodes utilisées pour l'injection de courant et la mesure du potentiel. Chaque électrode possède une adresse numérique unique dans le dispositif, ce qui lui permet d'être identifiée par l'ordinateur (Loke, 1999).

Dans notre cas d'étude, on a utilisé le dispositif Wenner-Schlumberger. Ce dernier a été adopté de préférence aux autres configurations en raison de sa bonne résolution verticale et de sa couverture de données horizontale plus large (Aigbogun, Babaiwa, & Mujakperuo, 2020). La séquence est établie avec le logiciel Electre Pro avec un profil est réalisée de manière perpendiculaire à l'axe du mouvement du terrain dans la direction sud-est vers le Nord-ouest sur une longueur de 141 m avec 48 électrodes et un espacement de 3m dont la profondeur d'investigation est de l'ordre de 32 m (Fig. -42). Le profil est réalisé avec un appareil Syscal Pro Switch 48, après transfère des résultats vers Prosys II, les données obtenues sont traitées et interprétées à l'aide du logiciel RES2DINV.



**Fig.42** : Photo montrant le profil réalisé qui traverse la fissure

### 5.1.5 Instruments de mesure

Toutes les mesures (ERT) ont été effectuées avec SYSCAL Pro switch 48. Cette approche de la TRE est composée par 2 câbles de 120 m avec 24 connecteurs chacun avec des électrodes en Inox inoxydable. Le matériel utilisé pour la réalisation de mesure est constitué par les éléments suivants :

- Le logiciel Electre pro, pour la préparation des séquences de mesure ;
- Le logiciel Prosys II, pour le traitement des données d'acquisitions ;
- Le logiciel RES2Dinv, pour l'inversion des résultats obtenus au cours de l'acquisition ;
- Un Résistivimètre SYSCAL (Fig-43) Pro qui mesure la résistivité apparente du milieu ;
- Une batterie de 12V ;
- 48 électrodes en Inox ; (fig.- 44)
- 48 pinces pour relier les électrodes les câbles du système d'acquisition ;
- Un GPS pour les levés topographiques des profils et des points d'eaux (puits/forages) et des morphologies karstiques en surface. (Fig.45)
- Les tensions utilisées peuvent atteindre 800 volts et l'intensité du courant peut atteindre 2.5 A ; mais il est nécessaire d'éviter les risques d'électrocution mortelle.



**Fig.43** : Résistivimètre SYSCAL+ une batterie



**Fig. 44 :** Electrode

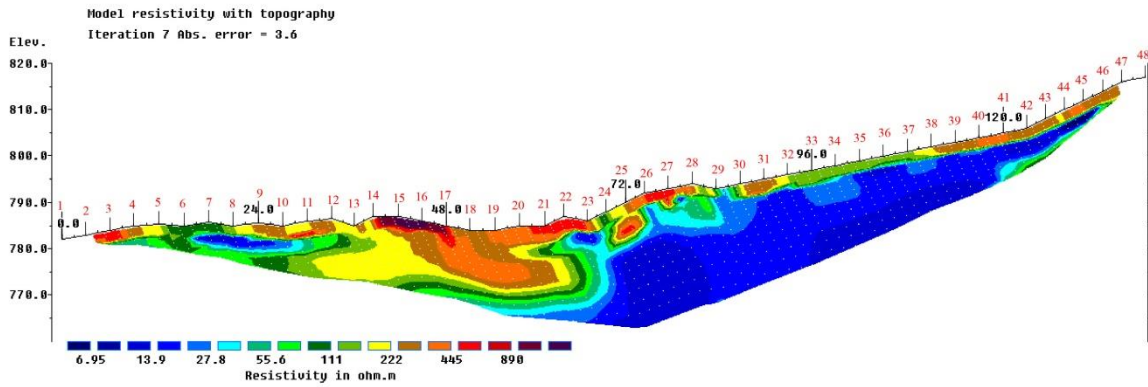
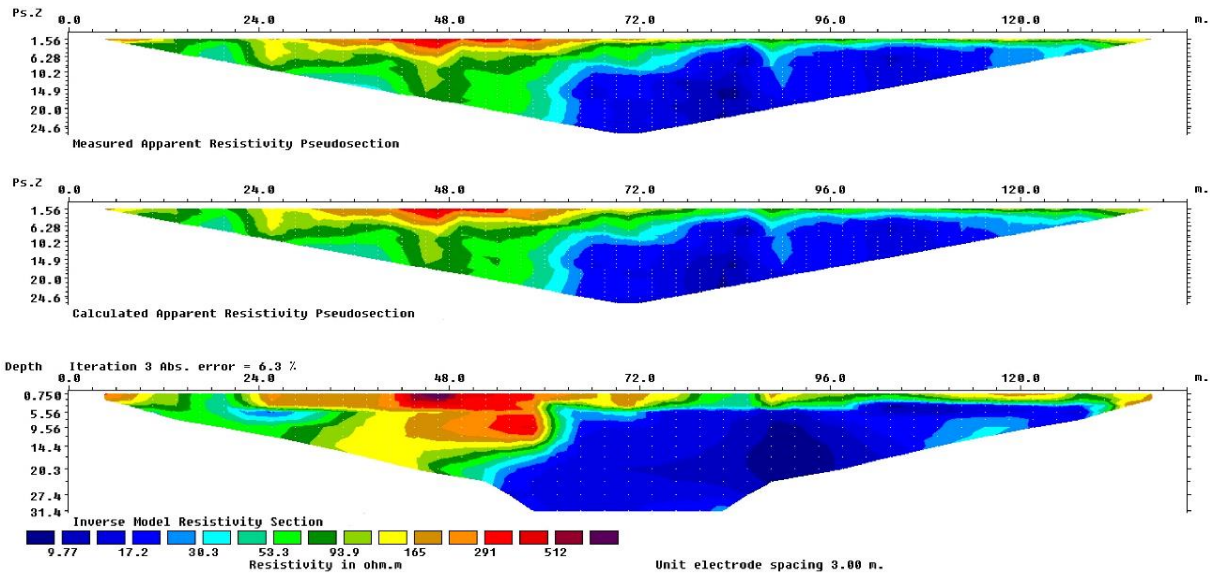


**Fig.45 :** GPS

### 5.1.6 Résultats et discussions :

Après avoir analysé le profil géophysique (Fig.46), nous avons remarqué que les fissures sont confirmées en profondeur par des failles d'origine tectonique à cause du terrain accidenté de la région du flanc nord qui s'appelle les dressants de Kef Essnoun. En plus, le glissement favorise probablement le déclenchement d'un nouveau poste faille. En ce qui concerne la grande faille qui se trouve entre l'électrode 3 et 8 du côté gauche du profil, elle a été remplie par un corps étranger. Ce dernier est probablement des marnes de Thanétien qui pénètrent dans la cavité laissée par les calcaires marneux. Pour la deuxième faille qui se trouve entre l'électrode 22 et 24, on remarque deux phénomènes qui apparaissent au centre du profil, l'un c'est l'effondrement qui est provoqué par deux failles en parallèles et l'autre c'est la pénétration des marnes dans le vide créé par les calcaires marneux. La résistivité de (890  $\Omega$ m) obtenue au niveau des fissures visibles en surface correspond à des vides créés sous l'effet de glissement, les couches de phosphate ont une valeur de résistivité de 222 à 445  $\Omega$ m et de 55.6 à 111  $\Omega$ m pour les calcaires marneux et enfin une valeur de 6.95 à 27.8  $\Omega$ m pour les argiles marneuses. La couche d'alluvions de surface surmonte une couche de marne d'épaisseur importante, ou les fissures deviennent moins détectables par la résistivité, cela est due probablement à la nature de la roche.

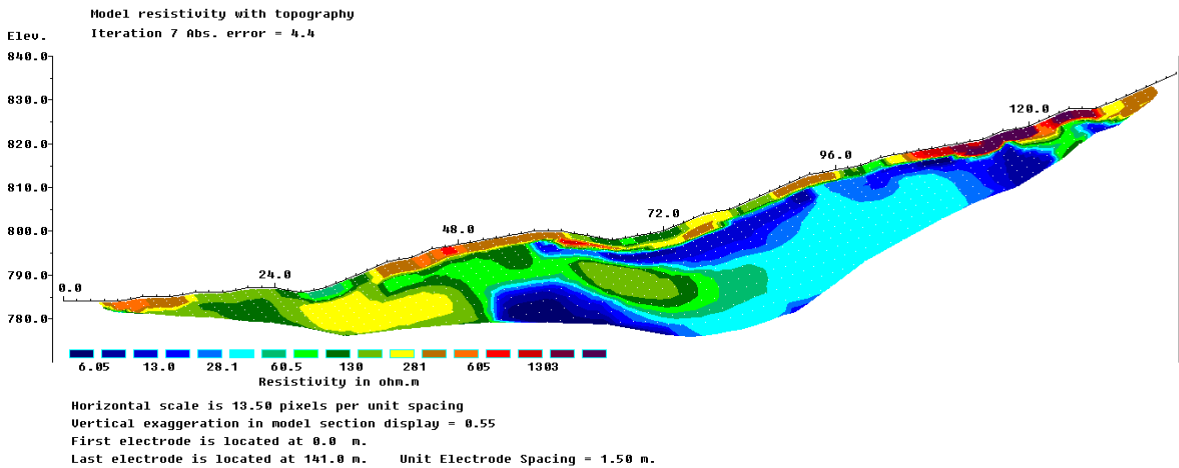
Les glissements des terrains généralement se produisent soudainement mais les indices essentiels qui sont les fissures apparentes en surface qui donne l'idée de faire une prospection géophysique pour connaître la suite et connaître le degré de danger du glissement.



RES2DINV : Display Sections Window - C:\Users\DELL\Desktop\KEF SNOUW\ERT Sismique Saadawi Salah\তোমো কেফ স্নাউ 3 TOPO 1.INV

File Display sections Change display settings Edit data Print Exit

Données tomo kef snoun 3 TOPO.bin



**Fig.46** : Résultats d'un levé géophysique (ERT1) et (ERT2) respectivement réalisé sur un glissement de terrain du gisement du Phosphate de Kef essnoun

## 5.2 Réfraction sismique

### 5.2.5 Application de la réfraction sismique :

#### 5.2.5.1 Introduction :

La création d'un champ élastique d'une façon artificielle c'est le principe de la sismique réfraction, lorsqu'on exerce une force ébranlante en un point, en utilisant une matière explosive d'une quantité de dynamite ou par un effort mécanique (un marteau). L'oscillation des ondes dans un milieu sous l'effet d'un choc fait l'objet d'une étude par la sismique réfraction. On mesure la durée de propagation des ondes sismiques, entre la limite de départ d'ébranlement et les géophones placés à la surface, selon un système bien déterminé auparavant. Il est nécessaire dans ce système de sismique réfraction d'interpréter les ondes réfractées au plan d'intersection entre deux formations avec des paramètres physiques différentes de chaque milieu. L'efficacité de cette technique est mieux pour les profondeurs faibles et moyennes (Dion , 1986).

#### 5.2.5.2 Les données de la réfraction sismique

Les atouts de la méthode réfraction sismique sont confirmés pour l'étude des hétérogénéités de terrain, parfaitement adaptée pour les faibles profondeurs, de moins de 50 mètres.

Cette méthode implique que la vitesse des couches augmente avec la profondeur. La présence de couches rapides en surface, considéré comme une barrière pour l'utilisation de cette méthode. De même, la source d'ébranlement et la hauteur d'investigation sont deux paramètres essentiels qui limitent l'utilisation de cette méthode.

Au niveau du site, nous avons effectué deux profils sismiques réfraction (**SP1 et SP2**) superposable sur les profils ERT1 et ERT2 respectivement. Cette méthode permet d'obtenir une coupe des différentes couches du sous-sol individualisées par leur épaisseur et leur vitesse sismique (vitesse onde P), permettant une meilleure qualification du site.

Dans le site, nous avons réalisé 2 profils sismiques d'une longueur de 70 m, avec 24 géophones équidistant de 3 m chacun, pour une profondeur d'investigation d'une trentaine de mètre, afin d'avoir le maximum des informations en 2D de la géométrie du sous-sol.

### **5.2.5.3 Méthode d'acquisition des données**

Pour l'acquisition des données de la vitesse des ondes de compression P, Nous avons déployé une flûte de 70 m de longueur totale, 24 géophones avec une distance entre géophone de 3 m, branché à un module sismique (sismographe DAQLINK III). L'ébranlement sismique est effectué avec un marteau de 8 Kg comme.

### **5.2.5.4 Equipement de terrain :**

L'équipement de terrain utilisé est composé de :

- Sismographe DAQLINK III (from seismic source) à 24 canaux ; (Fig.47)
- Géophones+ Câble et des capteurs ; (Fig.48)
- Source : marteau avec interrupteur de marteau ; (Fig.49)
- Câble de déclenchement ;
- Une plaque métallique (ou nylon caoutchouc) (Fig.50)



**Fig .47:** Sismographe DAQLINK III



**Fig.48:** Geophone



**Fig.49:** Plaque +Marteau (position 1)



**Fig.50 :** Plaque + marteau (position2)

Voici **Tab-21** les vitesses des ondes P, S et les masses volumiques de divers types de terrains :

<b>TYPE DE ROCHES</b>	<b>VITESSE DES ONDES P [M/S]</b>	<b>VITESSE DES ONDES S [M/S]</b>	<b>MASSE VOLUMIQUE [G/CM<sup>3</sup>]</b>
éboulis, terre végétale	300-700	100-300	1.7-2.4
sable sec	400-1200	100-500	1.5-1.7
sable humide	1500-4000	400-1200	1.9-2.1
Argiles	1100-2500	200-800	2.0-2.4
Marnes	2000-3000	750-1500	2.1-2.6
Grès	3000-4500	1200-2800	2.1-2.4
Calcaires	3500-6000	2000-3300	2.4-2.7
Craie	2300-2600	1100-1300	1.8-2.3
Sel	4500-5500	2500-3100	2.1-2.3
Anhydrite	4000-5500	2200-3100	2.9-3.0
Dolomie	3500-6500	1900-3600	2.5-2.9
Granite	4500-6000	2500-3300	2.5-2.7
Basalte	5000-6000	2800-3400	2.7-3.1
Charbon	2200-2700	1000-1400	1.3-1.8
Eau	1450-1500	-	1
Glace	3400-3800	1700-1900	0.9
Huile	1200-1250	-	0.6-0.9

**Source ;** [https://www-ig.unil.ch/c\\_res33f.htm](https://www-ig.unil.ch/c_res33f.htm)

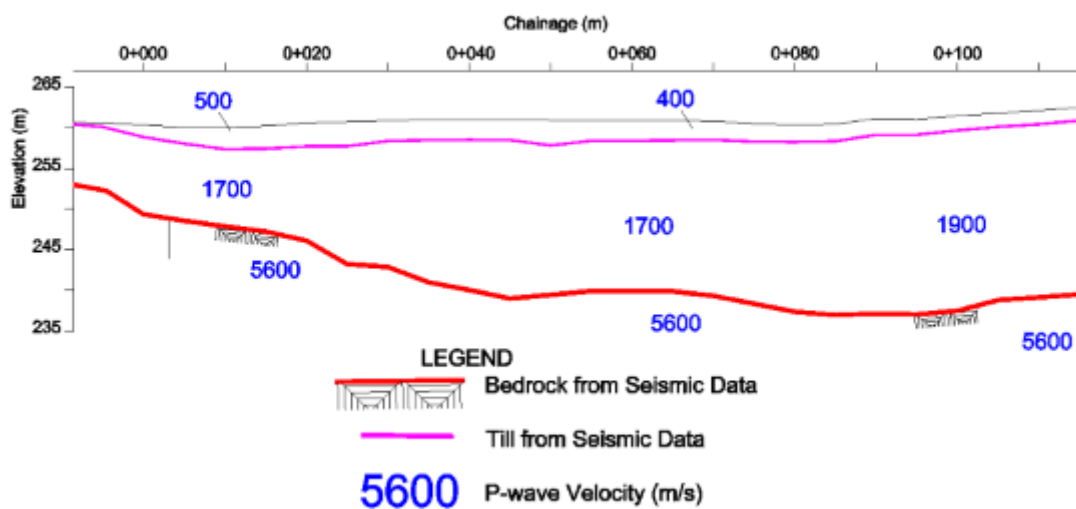
<b>Formations</b>	<b>Vitesse (Km /s)</b>
Air	<b>0,33</b>
Eau douce	<b>1,45</b>
Vases	<b>0,2-0,6</b>
Couche superficielle meuble et sèche	<b>0,2-0,6</b>
Alluvions sèche	<b>0,6-1,2</b>
Alluvions humides	<b>1,6-2,4</b>
Argiles	<b>1,8-2,2</b>
Tufs volcaniques	<b>1,8-2,5</b>
Marnes, craie	<b>2-3</b>
Grés	<b>2-3,5</b>
Laves	<b>2,5-4</b>
Calcaires et dolomies	<b>3-5</b>
Schistes, micaschistes	<b>3-4,5</b>
Gneiss, quartzites	<b>3,5-5,5</b>
Granite	<b>4-6</b>

**Tab.22** : Vitesse des ondes sismiques

**Source** :[https://www.geoforum.fr/uploads/monthly\\_01\\_2010/post-3743-1264170008.jpg](https://www.geoforum.fr/uploads/monthly_01_2010/post-3743-1264170008.jpg)

Formations	Vitesses (m/s)
Couche superficielle meuble et sèche	200-500
Sable et gravier sec	500-1000
Sable et gravier humide	1450-1800
Argile	1350-1600
Schistes	2700-3500
Calcaire	4200-5500
Grès	4300-5200
Gneiss	4800-5500
Granite	4800-5800
Air	300
Eau douce	1450
Glace	3700

**Tab.23:** Vitesse des ondes longitudinales

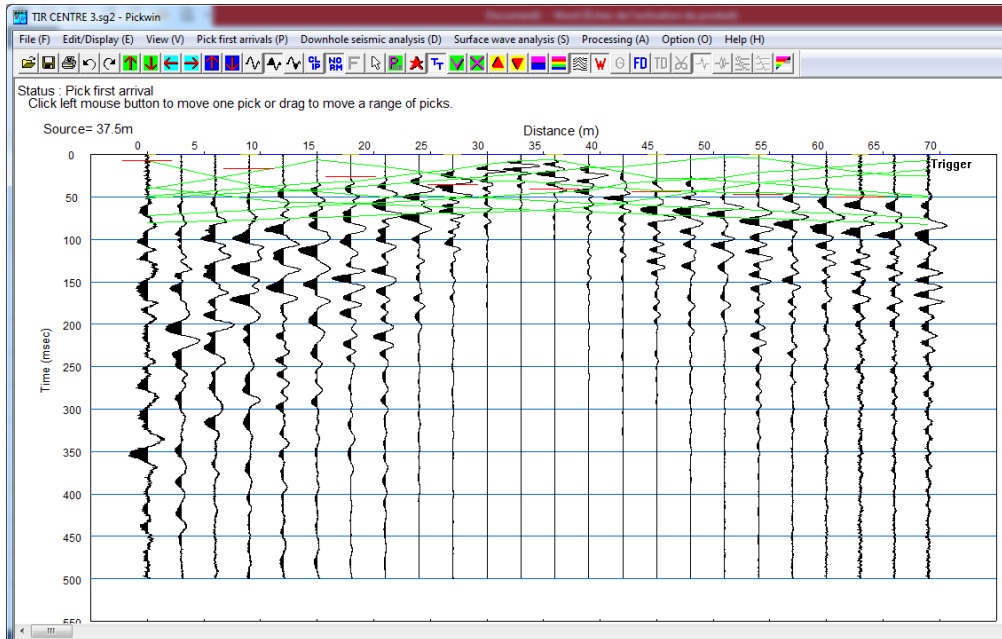


**Fig.51 :** vitesse des ondes de propagation en fonction de la profondeur.

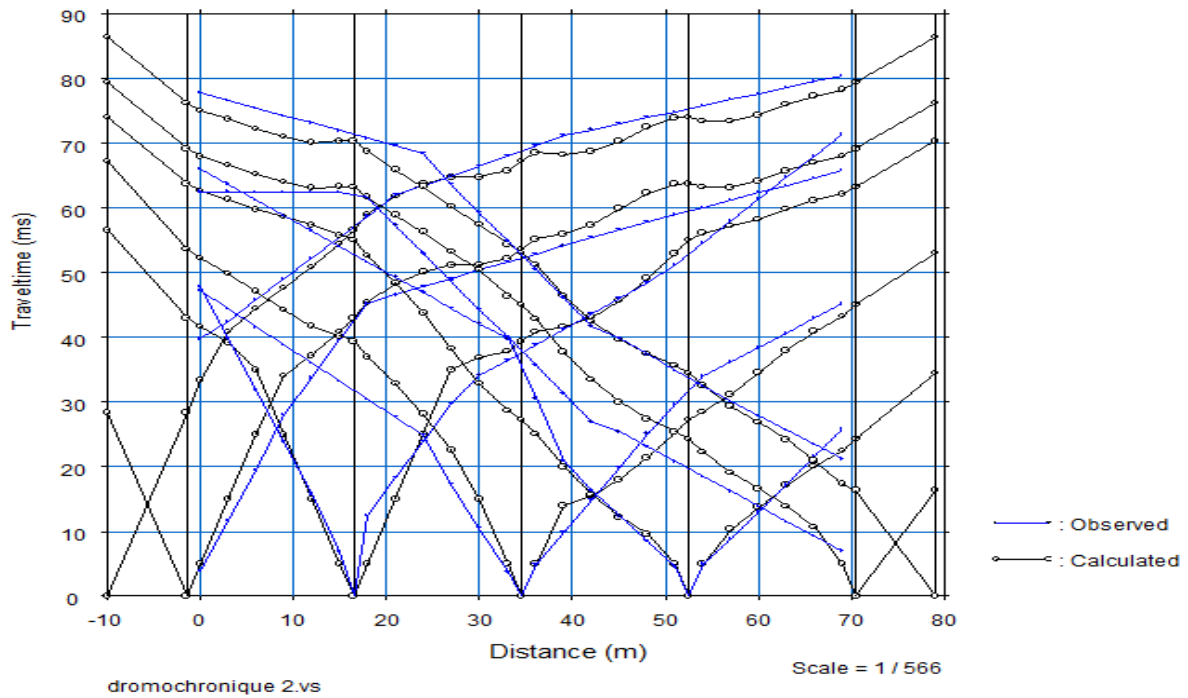
**Source :** [https:// ground -geophysics.](https://ground-geophysics.com)

**Tab.24** : profil sismique SP1 (Est - ouest) Kef essnoun

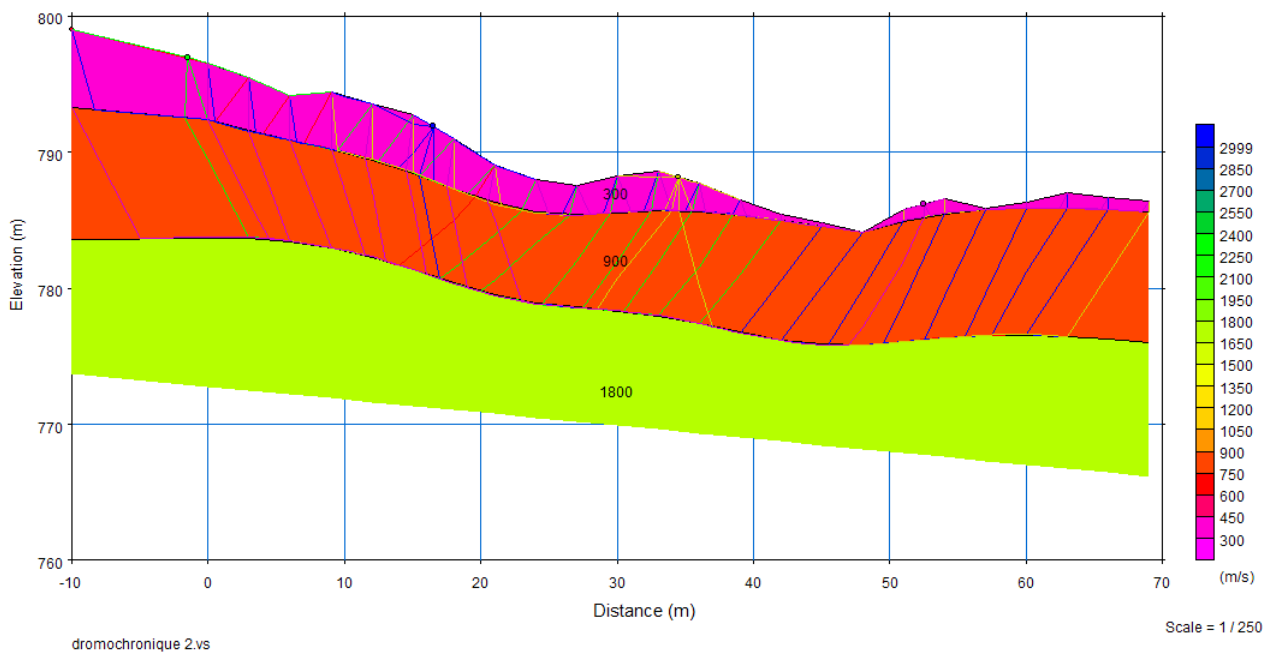
Coordonnées Ouest		Coordonnées Est	
X= 405260 m E	Y= 3841099 m N	X= 405316 m E	Y= 3841058 m N



**Fig. 52** : Pickwin - Pointage de tir au bout SP1.



**Fig.53:** Plotrefa - les hodochrones correspondant aux relevés du profil sismique **SP1**.



**Fig. 54 :** Tomographie sismique des hodochrones théoriques et pratiques correspondant aux relevés du profil sismique **SP1**.

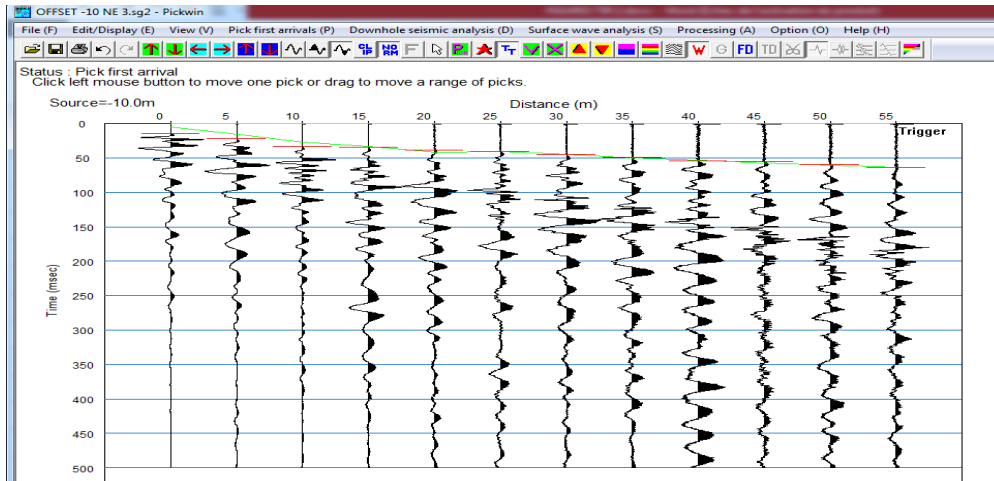
**300m/s Alluvions +vide (0,5m – 5m) v= 2 - 300**

**900m/s calcaire et phosphate (10 m)**

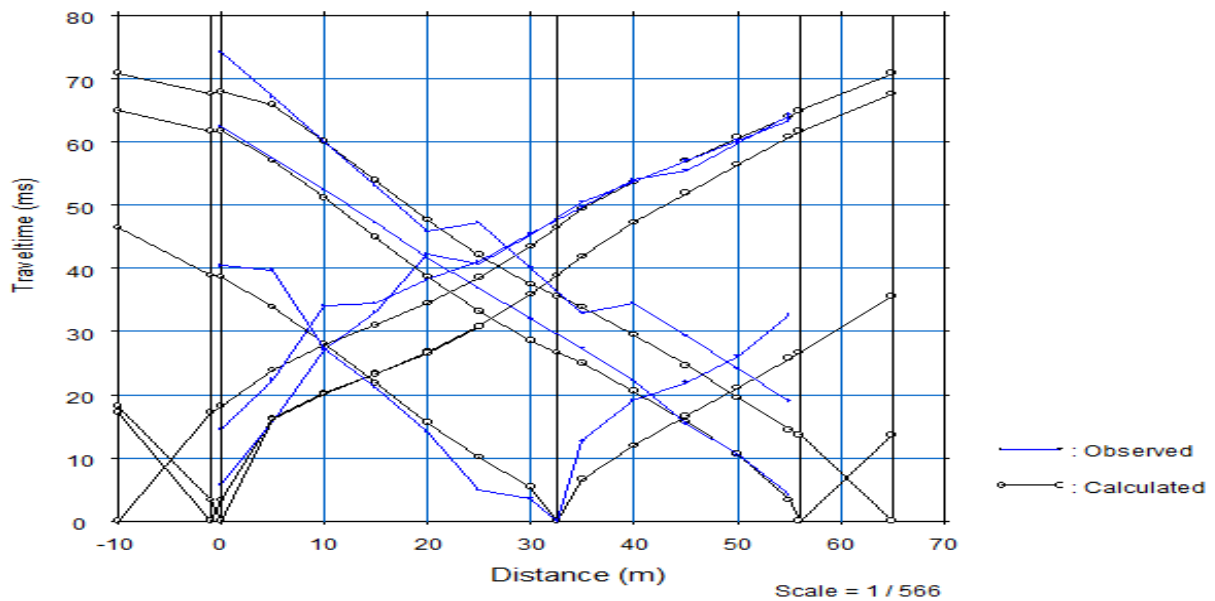
**1800m/s marnes (10 m)**

**Tab.25** : profil sismique SP2 (Sud- Nord) Kef essnoun

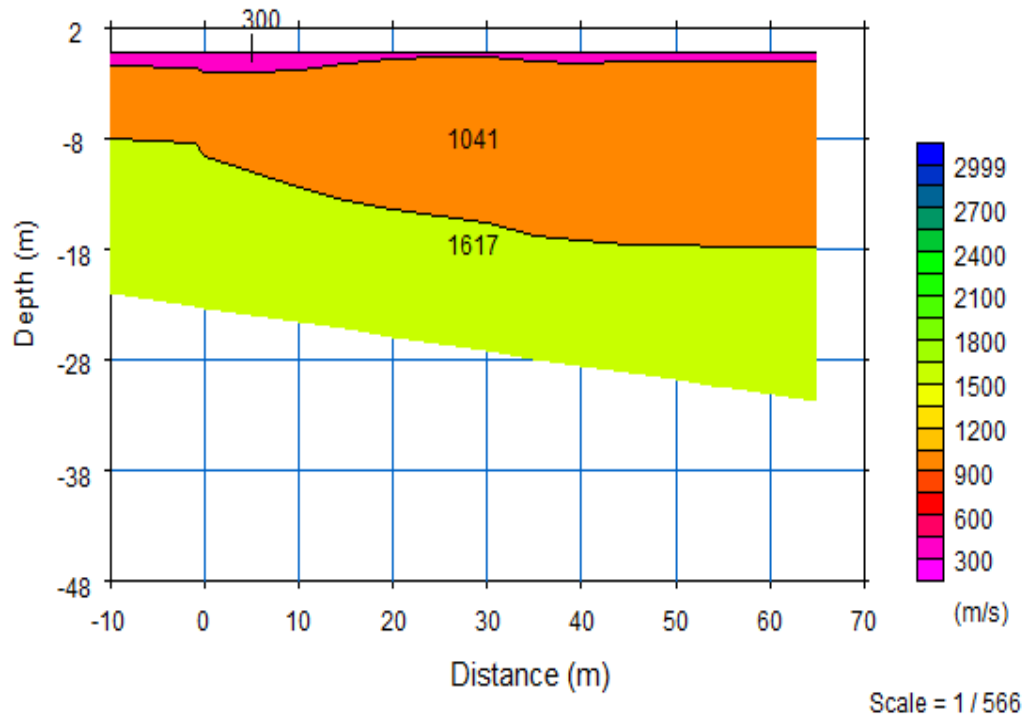
Coordonnées Nord		Coordonnées Sud	
X= 405417 m E	Y= 3841166 m N	X= 405394 m E	Y= 3841120 m N



**Fig. 55** : Pickwin - Pointage de tir au bout SP 2.



**Fig. 56** : Plotrefa - les hodochrones correspondant aux relevés du profil sismique SP2



**Fig.57** : Tomographie sismique des hodochrones théoriques et pratiques correspondant aux relevés du profil sismique SP2.

**300 m/s alluvions (0,5 – 2 m)**

**1041 m/s phosphate et calcaire (12m)**

**1617 m/s marne (12 m)**

### 5.2.5.5 Traitement des données sismiques

L'analyse des résultats est basée sur un schéma distance / temps des premières arrivées appelée dromochronique (Fig. 55-56). Sur ce schéma, la pente correspond à l'inverse de la vitesse sismique. La vitesse des terrains et la durée d'intersection au niveau du point de tir (intercept time) sont connues, on peut calculer les épaisseurs sous tous les tirs. Des méthodes plus sophistiquées permettent de calculer la profondeur du substratum rocheux sous les géophones.

L'imagerie sismique donne des résultats par inversion des modèles complexes impossibles à calculer par les méthodes traditionnelles du traitement de la sismique réfraction. Cette méthode récente est possible grâce à la puissance actuelle des ordinateurs. Le principe est de fournir à l'ordinateur le temps des premières arrivées aux géophones ainsi que la localisation de tous les géophones et des tirs. Le programme Seisimager recherche ensuite au moyen d'algorithmes complexes un modèle de vitesses théorique qui fournirait une dromochronique le plus proche possible des données expérimentales.

Avec cette méthode, il est possible de mettre en évidence des zones lentes au sein des couches rapides ou vice-versa. Les failles sont souvent plus faciles à localiser sur les profils tomographiques qu'en sismique réfraction conventionnelle. Une meilleure qualité du signal induit une bonne facilitation à pointer les ondes P qui sont les premières arrivées.

Pour cela le logiciel **Pickwin** est utilisé pour le pointage, les résultats transférés pour analyse vers le logiciel **Plotrefa** (Réfraction Analysis). Ce dernier nous permet de créer les hodochrones ou pour un faible RMS permettent de réaliser une coupe sismique correspondante à celle lithologique. Les images suivantes montrent quelques étapes du traitement (Fig. 52, 53 et 54).

Deux profils de sismique réfraction ont été réalisés sur site répartis sur les deux orientations orthogonales, Nord-Sud et Est-Ouest. Les profils ont été réalisés à base de profils de 24 géophones espacés de 3m d'une distance de 70m, donc chaque profil est composé de 24 traces.

Le profil **SP1** a été réalisé suivant l'orientation Est- Ouest ; Le profil **SP2**, suivant l'orientation Sud-Nord, composé de 24 traces. Les profils sont réalisés avec deux tirs en bouts avec un offset de 10 m ; Tir direct à 1m du premier géophone, et un tir inverse à 1m du dernier géophone, ainsi deux tirs un-quart et un tir au centre. Totalisant **07** tirs pour l'enregistrement des vitesses des ondes de compression Vp.

L'enregistrement de chaque tir est converti en format. SEG2 à partir du logiciel d'acquisition Vibrascop, pour être exploité par le logiciel Seisimager avec ces divers modules. Le module Pickwin permet de visualiser les enregistrements, mettre à jours la géométrie du dispositif, supprimer les mauvaises traces et essentiellement de pointer les premières arrivées et les enregistrer sous format VS.

Les travaux de géophysique se sont effectués durant la période du mois Mars au mois d'avril. Durant les travaux de prospection, les conditions de terrain ont été favorables au bon déroulement de l'acquisition des données (absence de précipitation et faible vitesse de vent).

### 5.2.5.6 Résultats des données de tomographie sismique

Les temps des premières arrivées enregistrés en \*.vs ont pu être affichés avec le module Plotrefa sous forme de dromochrones. Puis, les vitesses des couches peuvent être calculées. Les dromochrones et les résultats de l'inversion indiquent la présence de trois (03) horizons sismiques (figures 54, 57).

Les vitesses des ondes P mesurées sont très faibles, elles pourraient être expliquées par le type de formation non-consolidée et à l'abondance des fractures apparente du au glissement ainsi que l'âge Quaternaire.

- Une première couche de faible vitesse d'environ 300 m/s avec 0,5 à 5 m d'épaisseur (SP1) et 0,5m à 2m (SP2) correspondant à une couche superficielle meuble et sec, alluvions sableuses ; éboulis ainsi que les fissures et les failles soit du tectonique (dressants de Kef essnoun) ou du glissement du terrain.
  
- Un deuxième horizon sismique avec une vitesse moyenne 900 m/s(SP1) et 1041 m/s (SP2), correspondant à des calcaires gypseux avec phosphates 12 m (SP1) et 12m (SP2).
  
- Une troisième couche avec une vitesse d'environ 1800 m/s(SP1) et 1617 m/s (SP2) correspondant aux marnes. 10 m(SP1) et 12m (Sp2)

### 5.3 Conclusion :

Après avoir réaliser ce travail que nous trouvons utile et intéressant. Nous avons utilisé l'outil géophysique (**tomographe électrique**) pour connaître le sol et le sous-sol dans le cas de glissement de phosphate de Kef Essnoun, qui donne par la suite des résistivités dans les postes failles ou fissures qui allons jusqu'au 890  $\Omega\text{m}$  et 1303  $\Omega\text{m}$  qui considérée comme formation non conductible, par contre les formations marneux et argileux de résistivité de 6  $\Omega\text{m}$  de forte conductibilité. Les failles détectées soient en surface ou en profondeur, sont d'origine due à la tectonique de la région (terrain très accidenté) mais il faut dire que le glissement provoqué en 2007 joue un rôle très important dans le déclenchement de ces failles qui sont déjà prête à se réveiller à tout moment.

L'utilisation de l'outil géophysique par **réfraction sismique** dans le but de cartographier le sol et le sous – sol dans le cas de glissement de phosphate de Kef Essnoun donne des résultats encourageante dans l'aspect formation géologiques des différentes couches de la colonne lithologique de djebel Onk telle que les alluvions de la couche superficielle (sable) , failles et fissures , calcaires (lutétien, yeprtien) , marnes selon des vitesses des ondes de propagation (P) mais les résultats reste insuffisante pour caractériser le glissement du terrain de Kef Essnoun à cause de l'absence des indices ou des images dans les deux profiles sismiques (SP1) et (SP2) qui correspondent à la forme du glissement (failles et fissures ) et même aux failles naturelles de la tectonique de la région ( dressants de Kef Essnoun), la non visibilité des propriétés du glissement du terrain est due essentiellement de la force d'ébranlement du marteau qui pèse 8 Kg qui reste insuffisante par rapport à la force des explosifs .

## Conclusion générale et perspectives

---

L'apport de l'outil géophysique telle que la tomographie électrique et sismique réfraction dans la caractérisation du glissement du gisement de phosphate de Djebel Kef Essnoun donne des résultats pertinentes par la réalisation de quatre ( 04) profils dont deux électrique et deux sismique , il faut noter que la tomographie électrique avec le dispositifs Wenner- Schlumberger dont la profondeur d'investigation allant jusqu'à 32m est le mieux adapté à ces conditions du glissement et les résultats sont clair par rapport au sismique réfraction qui reste insuffisante.

- La tomographie électrique avec la réalisation de deux profils électrique ERT1 et ERT2 dans les directions Est- Ouest et Sud-Nord avec l'utilisation des matériels tels qu'un appareil Syscal Pro Switch 48 avec le transfert des résultats vers Prosys , l'interprétation des données sera traité par un logiciel du type RES2DINV sur une longueur de 141 m , 48 électrodes et 3 m d'espacement et 32 m de profondeur a donné les formations géologiques avec des valeurs de résistivités qui sont comme suit : couche végétale argile marneux ( 6,95  $\Omega$ m à 27,8  $\Omega$ m ) , calcaires( 55,6  $\Omega$ m à 111  $\Omega$ m) , phosphate ( 222  $\Omega$ m à 445  $\Omega$ m ) , failles et fissures (890  $\Omega$ m a 1303  $\Omega$ m ) qui sont probablement due aux glissement du terrain ainsi que a la tectonique de la région .

- La réfraction sismique avec la réalisation de deux profils sismique SP1 et SP2 superposé sur les profils sismique dans les mêmes direction avec un appareil Sismographe DAQLINK III , 24 géophones , marteau 8kg , plaque, batterie , sur une longueur de 70 m , 3m d'espacement et 25 m de profondeur a donné les différentes couches géologiques avec des valeurs des vitesses des ondes de propagation P qui sont comme suit : Une première couche de faible vitesse d'environ 300 m/s avec 0,5 à 5 m d'épaisseur (SP1) et 0,5m à 2m (SP2) correspondant à une couche superficielle meuble et sec ,alluvions sableuse ; éboulis ainsi que les fissures et les failles soit du tectonique (dressants de Kef essnoun) ou du glissement du terrain.

Un deuxième horizon sismique avec une vitesse moyenne 900 m/s(SP1) et 1041 m/s (SP2), correspondant à des calcaires gypseux avec phosphates 12 m (SP1) et 12m (SP2).

Une troisième couche avec une vitesse d'environ 1800 m/s(SP1) et 1617 m/s (SP2) correspondant aux marnes dont l'épaisseur de la couche est de 10m (SP1) et 12m (SP2).

**Perspectives :**

Les perspectives de notre travail pourraient être les suivantes :

- L'adoption d'un modèle combiné avec les techniques GPR, ERT et utilisation d'autres variables et d'outils supplémentaires.
- L'élargissement de l'étendue spatiale de l'enquête du glissement du terrain de Kef Essnoun.
- L'adoption de la technique sismique réfraction avec l'utilisation d'une autre force d'ébranlement telle que la matière explosive en respectant l'aspect sécurité.

## 6 Bibliographie

- AFTES , G. T. (2003). Recommandations sur la caractérisation des massifs rocheux utiles à l'étude et à la réalisation des ouvrages souterrains. Tunnels et Ouvrages Souterrains.
- Aigbogun, C. O., Babaiwa, D. A., & Mujakperuo, J. O. (2020). Application of 2-dimensional tomography to investigate subsurface lithology in Auchi polytechnic, auchi, Edostate , Nigeria . Nigerian Journal of Technology 39(3), 905-910.
- Akpan,, A. E., Ugbaja, A. N., & George, N. J. (2013). Integrated geophysical, geochemical and hydrogeological investigation of shallow groundwater resources in parts of the Ikom-Mamfe Embayment and the adjoining areas in Cross .... Environmental Earth Sciences, 1435-1456.
- AL-hameedawi, M. M., Thabit, J. M., & AL-Menshed. (2021). Some notes about three types of inhomogeneity and thier effect on the electrical resistivity tomography data. Journal of Applied Geophysics 191, 104-360.
- AMEUR, B. (2014). Comparaison entre les méthodes de l'équilibre limite et la méthode de réduction de la résistance au cisaillement pour l'évaluation de la stabilité des pentes renforcées par. Université Mohamed Boudiaf - M'sila.
- Arjwech, R., & Everett, M. (2015). Application of 2D electrical resistivity tomography to engineering projects: Three case studies. Songklanakarin Journal of Science and Technology, 675-681.
- Armatys, M. (2012). Modification des classifications géomécaniques pour les massifs rocheux schisteux. Montreal.: École Polytechnique de Montréal, Montreal.
- Azimi, C., & Desvarreux, P. (1996). Quelques aspects de la prevision des mouvements. Revue Francaise de G'éotechnique, 63-75.
- ALPIN:L'EBOULEMENT DU VAL POLA (Valtellina, Italia). Bull. Murithienne.
- Bellanova, J. G., Calamita, G., Giocoli, A., Luongo, R., Perrone, A., Lapenna, V., & Piscitelli, S. (2016). Electrical Resistivity Tomography surveys for the geoelectric characterzation of the Montaguto lanslide ( southren Italy). Natural Hazardand Earth System Sciences Disscutions , 1-17.
- Berge, M. A., & Drahor, M. G. (2009). Optimum Electrical Resistivity Tomography( ERT) appach using combination of different arrays in archaeological investegations. Archeo Sciences 33, 263-265.
- Bichler, A., Bobrowsky, P., Best, M., Douma, M., Hunter, J., Calvert, T., & Burns, R. (2004). Three-dimensional mapping of a landslide using a multi-geophysical approach. the Quesnel Forks landslide, Landslides, 29-40.
- BIENIAWSKI, Z. T. (1973). ENGINEERING CLASSIFICATION OF JOINTED. THE CIVIL ENGINEER in South Africa.
- Bonnard, C. (1996). Principes d'auscultation des ouvrages routiers soumis à des instabilités de terrain.

- Borecka, A., Herzig, J., & Durjasz-Rybacka, M. (2015). Ground penetrating radar investigations of landslides: a case study in a landslide in Radziszów. *Studia Geotechnica et Mechanica*, 11–18.
- Bouaziz, N., & Melbouci, B. (2015). The supply of electrical tomography in the study of the landslides in Great Kabylia, Algeria. *Rencontres Universitaires de Génie Civil*, 1–8.
- Boubaya, D., Hebbache, K., Gouaidia, L., Baali, F., Fehdi, C., & Guefaifia, O. (2017). 2D Electrical Resistivity Tomography Of An Active Landslide: A Case Study From Ain Torki, Algeria. *Balkan Geophysical Society*, 1–5.
- Brgm. (1993). : Brgm (1993) Rapport de l'expertise sur les travaux de prospection et d'évaluation des réserves du district minier de Djebel Onk.
- Brunsdon, D. (1985). Landslide types, mechanisms, recognition, identification. In: Morgan CS (ed) *Landslides in the South Wales Coalfield. Proceedings Symposium*, 19–28.
- Brunsdon, D. (1993). Mass movement; the research frontier and beyond: A geomorphological approach. *Geomorph*, 85–128.
- Balla, M. M., & ALI, A. M. (2009). Rapport de stage de fin d'étude.
- Benech, C., Tabbagh, A., & Denis Vigne, J. D. (2015). Étude par prospections magnétique et électromagnétique du site de Klimonas (Chypre). *hal.science*.
- Bieniawski, Z. T. (1974). Estimating the strength of rock materials. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*.
- Bieniawski, Z. T. (1989). *Engineering rock mass classifications: a complete manual for engineers and geologists in mining, civil, and petroleum engineering*. [books.google.com](http://books.google.com).
- Bieniawski, Z. T., & Orr, C. M. (1976). *Rapid Site Appraisal for Dam Foundation by Geomechanics Classification*. 12th ICOLD, Mexico.
- Bouaziz, N., & Melbouci, B. (2015). Apport de la tomographie électrique à l'étude des glissements de terrains en Grande Kabylie, Algérie. *HAL science ouverte*.
- Catani, F., Casagli, N., Ermini, L., Righini, G., & Menduni, G. (2005). Landslide hazard and risk mapping at catchment scale in the Arno River basin. *Springer*, 329–342.
- Chalhoub, M. (2006). Apports des méthodes d'homogénéisation numériques à la classification des massifs rocheux fracturés. *core.ac.uk*.
- CERAD. (2008). CERAD (centre de recherche et de développement Service hydrogéologique), [2008], "Travaux hydrique de la région de Djebel el Onk", Ferphos Tébessa. Ferphos.
- Chibani, A., Hebbache, K., Mellas, M., & Mabrouki, A. (2023). 2D electrical resistivity tomography (ER2D electrical resistivity tomography (ERT) investigation of a landslide: A case study from Ali Mendjeli, Constantine, North-East of Algeria. *NRIAG JOURNAL OF ASTRONOMY AND GEOPHYSICS*, 45–57.
- Cieslinski, S. (1985-1987). Cieslinski S. et al. [198 Travaux de prospection et d'évaluation des phosphates de la région de Bir El Ater", EREM. EREM.

- Cruden, D. (1991). A Simple Definition of a Landslide . *Bulletin of the International Association of Engineering Geology*, 27-29.
- Cruden, D., & Varnes, D. (1996). *Landslide Types and Processes*. U.S. National Academy of Sciences, 36-75.
- Cubbage, B., Noonan, G., & Rucker, D. (2017). A Modified Wenner Array for Efficient Use of Eight-Channel Resistivity Meters. *Applied Geophysics* , 2705–2718.
- Cheng, H. D., & Shi, X. J. (2004). A simple and effective histogram equalization approach to image enhancement. Elsevier, 158-170.
- Cherniak , D. J. (2000). Rare earth element diffusion in apatite. Elsevier, 3871-3885.
- Crosta, G. B., Chen , H., & Lee, C. F. (2004). Replay of the 1987 Val Pola Landslide, Italian Alps. Elsevier, 127-146.
- Czuchlewski, R., Weissel, K., & Kim, Y. (2003). Polarimetric synthetic aperture radar study of the Tsaoling landslide generated by the 1999 Chi-Chi earthquake, Taiwan. *Earth surface*, 1-15.
- Dahlin, T., & Zhou, B. (2004). A numerical comparison of 2D resistivity imaging with 10 electrode arrays. *Geophysical prospecting*, earthdoc.org, 379 - 398.
- Debard, É. (2004). Stratigraphy and sedimentological study of the site of Saint-Vallier. *Geobios*, S17-S43.
- Deere, D. (1988). The Rock Quality Designation (RQD) Index in Practice. *astm.org*.
- Deere, D. U., & Hendron, A. J. (1967). Design Of Surface And Near-Surface Construction In Rock. The 8th U.S. Symposium on Rock Mechanics (USRMS).
- Dion , D. J. (1986). La méthode sismique réfraction appliquée au génie géologique. Gouvernement du Québec: Direction générale de l'Exploration géologique et minérale .
- Dassamiour, M., Mezghache, H., Raji, O., & Bodinier, J. L. (2021). Depositional environment of the Kef Essennoun phosphorites (northeastern Algeria) as revealed by P2O5 modeling and sedimentary data. *Arabian Journal of Geosciences*,14(12), , 1-17.
- Dassamiour, M., Mezghache., H., & Elouadi, B. (2013). The use of three physico-chemical methods in the study of the organic matter associated with the sedimentary phosphorites in Djebel Onk Basin, Algeria. *Arabian Journal of Geosciences* 6(2), 309-319.
- Edwards, L. S. (1977). A modified pseudosection for resistivity and IP . *Geophysics*, 1020-1036.
- EL-QADY, G., HAFEZ1, M., A. ABDALLA, M., & USHIJIMA, K. ( 2005). IMAGING SUBSURFACE CAVITIES USING GEOELECTRIC TOMOGRAPHY AND GROUND-PENETRATING RADAR. *Journal of Cave and Karst Studies*, 174–181.
- Fehdi, C., Baali, F., Boubaya, D., & Rouabhia , A. (2011). Detection of sinkholes using 2D electrical resistivity imaging in the Cheria Basin (north-east of Algeria). *Arabian Journal of Geosciences*,, 181–187.
- FERPHOS . (2009). Synthèses géologiques du gisement de Djebel Onk Nord.
- Fredj , M., Hafsaoui, A., Khadri, Y., Riadh , B., Nakache, R., Saadoun, A., & Menacer, K. (2017). Study of bench stability in the phosphate mine (Algeria). In

- International Congress and Exhibition" Sustainable Civil Infrastructures: Innovative Infrastructure. In International Congress and Exhibition. Springer, 101-114.
- Fredj, M., Hafsaoui, A., Boukarm, R., Nakache, R., & Saadoun, A. (2019). Numerical Modelling of Slope Stability in Open Pit Phosphate Mines, Algeria: A Comparative Study. In IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 012.
- Fredj, M., Boukarm, R., & Khadri, Y. (2018). Influence of the failure surface choice on the safety factor value during slope stability studies. *Науковий вісник Національного гірничого університету*, 30-35.
- Gadri, L., Hadji, R., Zehri, F., Benghazi, Z., Boumezbeur, A., Laid, B. M., & Raïs, K. (2015). .. The quarries edges stability in opencast mines: a case study of the Jebel Onk phosphate mine, NE Algeria. *Arabian Journal of Geosciences*, 8987-8997.
- Gaudio, V., Wasowski, J., Pierri, P., Mascia, U., & Calcagnile, G. (2000). Gravimetric study of a retrogressive landslide in south . *Surveys in Geophysics*, 391–406.
- Grandjean, G., Penner, C., Bitri, A., Meric, O., & Malet, J. P. (2006). Caractérisation de la structure interne et de l'état hydrique de glissements argilo-marneux par tomographie géophysique : l'exemple du glissement-coulée de Super-Sauze (Alpes du Sud, France) Characterization of the internal structure and the hydric state o. Elsevier, 587-595.
- Guzzetti, F., Gariano, S. L., Peruccacci, S., Brunetti, M. T., Marchesini, I., Rossi, M., & Melillo, M. (2020). Geographical landslide early warning systems. Elsevier.
- Highland, L., & Bobrowsky, P. (2008). *The landslide handbook—A guide to understanding landslides*. Reston, Virginia, U.S. Geological Survey.
- HILLEY, G., BÜRGMANN, R., FERRETTI, A., NOVALI, F., & ROCCA, F. (2004). Dynamics of Slow-Moving Landslides from Permanent Scatterer Analysis. *Science*, 1952-1955.
- H Baïoumy, H. (2005). Preliminary data on cadmium and arsenic geochemistry for some phosphorites in Egypt. *Journal of African Earth Sciences*, 266-274.
- Hack, R. (2000). Geophysics for slope stability. *Surveys in Geophysics*, 423–448.
- Hebbache, K., Mellas, M., & Boubaya, D. (2016). APPLICATION OF 2D SURFACE ELECTRICAL RESISTIVITY TOMOGRAPHY TO DETECT THE UNDERGROUND CAVITIES A CASE SITE STUDY:TOLGA AREA (ALGERIA). *Courrier du Savoir*, 33-38.
- Hermawan, O. R., & Putra, D. E. (2016). the effectiveness of wenner-schlumberger and dipole-dipole array of 2d geoelectrical survey to detect the occurring of groundwater in the gunung kidul karst aquifer system, Yogyakarta, Indonesia. *Journal of App. Journal of Applied Geology*(2), 71-81.
- <https://ground.geophysicsgpr.com/fr/techniques-de-geophysique-terre>. (2015, Mars). COPYRIGHT Géophysique GPR International Inc.
- Hulin, G. (2016). L'application de la géophysique sur le canal Seine-Nord-Europe. [journals.openedition.org](http://journals.openedition.org).

- Hussain, Y., Cardenas-Soto, M., Martino, S., Moreira, C., Borges, W., Hamza, O., . . . MartinezCarvajal, H. (2019). Multiple geophysical techniques for investigation and monitoring of Sobradinho landslide, Brazil. *Sustainability*, 6672.
- Hussain, Y; Cardenas-Soto, M; Martino, S; Moreira, C; Borges, W; Hamza, O; MartinezCarvajal, H. (2019). Multiple geophysical techniques for investigation and monitoring of Sobradinho landslide. *Sustainability*, 6672.
- ifrc. (s.d.). <https://www.ifrc.org/fr/notre-travail/catastrophes-climat-et-crisis/quest-ce-quune-catastrophe/les-glissements-terrain>. Récupéré sur <https://www.ifrc.org/fr>
- Interior, U. D. (July 2004). *Landslide Types and Processes*. U.S.A: U.S. Geological Survey.
- Israil, M., & Pachauri, A. (2003). Geophysical characterization of a landslide site in the Himalayan. *Journal of Asian Earth Sciences*, 253–263.
- Jiang, F., Dong, L., & Dai, Q. (2020). Electrical resistivity inversion based on a hybrid CCSFLA-MSVR method. *Neural Processing Letters*, 51(3), 2871-2890.
- Jomard, H., Lebourg, T., Guglielmi, Y., & Tric, E. (2010). Electrical imaging of sliding geometry and fluids associated with a deep seated landslide (La Clapière, France. *Earth Surface Processes and Landforms*, 588–599,.
- Jongmans, D., & Garambois, S. (2007). Geophysical investigation of landslides. *Bulletin de la Société Géologique de France*, 101–112.
- Kassatkine, Y., Yahyaoui, A., & Chatilov, S. (1980). The works of prospecting and assessment on phosphate executed in 1976–1978 in the mining district of Djebel Onk. SONAREM (Société Nationale de Recherche et d'Exploration Minière) Internal report, 2. Bir Elater: SONAREM (Société Nationale de Recherche et d'Exploration Minière).
- Kherrouba, H., Lamara, M., & Benzaid, R. (2019). Contribution of electrical tomography to the study of landslides in Texenna Region (Northeast Algeria). Springer International Publishing, 53-56.
- Kääb, A. (2002). Monitoring high-mountain terrain deformation from repeated air- and spaceborne optical data: examples using digital aerial imagery and ASTER data. Elsevier, 39-52.
- Lacerda, W., Ehrlich, M., & Fontoura, S. (2004). *Landslides: Evaluation and Stabilization*. CRC press.
- LAGABRIELLE, R. (2007). *Diagraphies et géophysique de forage*. Techniques de l'ingénieur.
- Lockner, D. (1993). The role of acoustic emissions in the study of rock fracture. *Int. J. Rock. Mech. Min. Sci. Geomech. Abs*, 883–889.
- Loke, M. H. (1999). *Electrical imaging surveys for environmental and engineering studies. . A practical guide to 2D and Surveys Austin*.
- Loke, M. H. (2004). Tutorial : 2-D and 3-D electrical imaging surveys. [researchgate.net](https://www.researchgate.net), 15-17.
- Li, Y., & Mo, P. (2019). A unified landslide classification system for loess slopes: A critical review. Elsevier, 67-83.

- Mantovani, F., Soeters, R., & Van Westen, C. (1996). An inventory is presented of researches concerning the use of remote sensing for landslide studies and hazard zonation as mainly carried out in the countries belonging to the .... *Geomorphology*, Elsevier, 213-225.
- Marescot, L. (2006). Introduction à l'imagerie électrique du sous-sol. *Bulletins des séances de la Société vaudoise des sciences naturelles*, 90(1), 23-40.
- Margottini, C., Canuti, P., & Sassa, K. (2013). [LIVRE] *Landslide Science and Practice: Volume 1: Landslide Inventory and Susceptibility and Hazard Zoning*. Springer Science & Business Media, 2013.
- McKean, J., & Roering, J. (2003). *Operational Accuracy of LIDAR in Mountainous Terrain*. American Geophysical Union.
- Merrien-Soukatchoff, V., Quenot, X., & Gugliemi, Y. (2001). « Modélisation par éléments distincts du phénomène de fauchage gravitaire. *Revue française de géotechnique*, 137.
- Mezam, M. C., & Bachar Assed, M. A. (2017). Étude Rétro-analytique du glissement du bord Nord de la mine à ciel ouvert de Kef Essenoun (Djebel Onk). *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 1307-1320.
- MEZHOUD, L. (2003). La vulnérabilité aux glissements de terrain et les enjeux dans la partie Ouest et Sud Ouest de la ville de Constantine. 39-42: UNIVERSITE MENTOURI CONSTANTINE .
- Mita, M., Glazer, M., Kaczmarzy, R., Dąbrowski, M., & Mita, K. (2018). Case study of electrical resistivity tomography measurements used in landslides investigation. Southern Poland.
- Marc, R. L. (2017). Rapport technique sur les levés magnétométrique et électromagnétique (FDEM) réalisés en février 2017 sur la propriété Ste-Clotilde: (Ste-Clotilde, Qc). Québec.: Centre Eau Terre Environnement.
- Mezghache, H., & Hani, A. (2000). Typologie chimique des phosphates du gisement de Djemi-Djema-bassin de Djebel Onk (Algérie orientale. *Géologie Méditerranéenne*, 95-106.
- Nouioua, I., Fehdi, C., Boubaya, D., Serhane, B., & Djeleli, A. (2015). Mapping underground cracks using 2D electrical resistivity tomography: the case Djebel Onk (northeast of Algeria). *Arabian Journal of Geosciences*, 7731–7738.
- Nemčok, A., Pašek, J., & Rybář, J. (1972). *Classification of landslides and other mass movements*. Springer.
- Nordiana, M., Bery, A., Taqiuddin, Z., Jinmin, M., & Abir, I. (2018). 2-D Electrical Resistivity Tomography (ERT) Assessment of Ground Failure in Urban Area. *Journal of Physics*, 1-9.
- Palmström, A. (1995). Characterizing rock burst and squeezing by the rock mass index. *International conference in design and construction of ....*
- Parriaux, A., Bonnard, C., & Tacher, L. (2010). *Glissements de terrain: hydrogéologie et techniques d'assainissement par drainage. Guide pratique*. Office fédéral de l'environnement, Berne, 128.
- Parriaux, A. (2009). *Géologie: bases pour l'ingénieur*. presse polytechniques .

- Pasierb, B., Grodecki, M., & Gwózdź, R. (2019). Geophysical and geotechnical approach to a landslide stability assessment: a case study. *Acta Geophysica*, 1823–1834.
- Perrone, A; Piscitelli, S; Lapenna, V. (2012). Electrical resistivity tomographies for landslide monitoring a review. *Geologische Bundesanstalt, Wien.*, 129 –134.
- Perrone, A., Zeni, G., Piscitelli, S., Pepe, A., Loperte, A., Lapenna, V., & Lanari, R. (2006). Joint analysis of SAR interferometry and electrical resistivity tomography surveys for investigating ground deformation: the case-study of Satriano di Lucania (Potenza, Italy). *Engineering Geology*, 260-273.
- Perrone, A., Lapenna, V., & Piscitelli, A. (2014). Electrical resistivity tomography technique for landslide investigation. A review, *Earth-Science Reviews*, 65–82.
- Prian, G. P., & Cortiel, P. H. (1993). *Pria Etude de développement du gisement de phosphate de Djebel Onk (Algérie). Rapport d'expertise géologique*, B.R.G.M. France. France: BRGM.
- Palmstrom, A. (1982). The volumetric joint count—a useful and simple measure of the degree of rock mass jointing. *International Association of Engineering Geology. International congress.* (pp. 221-228). BRGM.
- Qualité, A. (2018). *Potentiel Spontané*. ([www.agapqualite.org](http://www.agapqualite.org)).
- RIB, H., & LIANG, T. (1978). Recognition and identification. In *landslides analysis and control*, R.L. Schuster et R.J. Krizek éd., Transport. National Academy of Science, Washington DC,, 34-80.
- Rouiller, J. D., & Rey, J. M. (1992). *LES INSTABILITES DE TERRAINS DANS L'ARC*
- Reichenbach, P., Rossi, M., Malamud, B. D., Mihir, M., & Guzzetti, F. (2018). A review of statistically-based landslide susceptibility models. *Elsevier*, 60-91.
- Romana, M. (1985). *SMR classification*. ISRM Congress,.
- Rønning, J. S., Ganerød, G. V., & Dalsegg, E. (2014). Resistivity mapping as a tool for identification and characterisation of weakness zones in crystalline bedrock: definition and testing of an interpretational model. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 1225–1244.
- Sid, M. (2016). *Reconnaissance Géophysique D'un Glissement De Terrain*. Université Des Sciences Et De La Technologie Houari-boumedièn - Alger.
- Sigdel, A., & Adhikari, R. (2020). Application of Electrical Resistivity Tomography (ERT) survey for Taprang landslide, Kaski district, west-central Nepal. *Journal of Nepal Geological Society*, 103–115,.
- somiphos. (2020). : *PLAN\_D'EXPLOITATION\_FINAL\_2020\_bureau\_d'etude\_somiphos.\_bureau\_d'etude\_somiphos.*
- Sornette, D., Helmstetter, A., Andersen, J., Gluzman, S., Grasso, J., & Pisarenko, V. (2004). Sastry, R., Mondal, S., & Pachauri, A. (2006). 2D electrical resistivity tomography of a landslide in Garhwal Himalaya. *6th International Conference & Exposition on Petroleum Geophysics*, 997–1001.
- Towards landslide predictions: Two case studies. *Physica A*.
- Turner, A., & Schuster, R. (1996). *Landslides: Investigation and Mitigation*. The National Academies Press, Washington DC.

- Tabbagh, A. (1986). Applications and advantages of the Slingram electromagnetic method for archaeological prospecting. *Geophysics*.
- Telford, W. M., Geldart, L. P., & Sheriff, R. E. (1990). *Applied geophysics*.
- Thirard, G. (2022). Glissements de terrain littoraux et rétro-littoraux du Pays d’Auge (Normandie) : caractérisation hydromécanique et modélisation spatialisée de l’aléa dans un contexte de changement global. *Research gate*.
- UNESCO. (2021). L’ingénierie au service du développement durable: réaliser les Objectifs de développement durable. Centre international pour l'enseignement de l'ingénierie.
- Varnes, D. J. (1978). Slope Movement Types and Processes. *researchgate.net*.
- Zheng, Y., Song, D., & Meng, F. (2022). Landslide Hazards in Alpine Region: Mechanics and Mitigation. *Frontiersmedia SA*.
- Zinck , J. A., López, J., Metternicht, G. I., Shrestha , D. P., & Selem , L. V. (2001). Mapping and modelling mass movements and gullies in mountainous areas using remote sensing and GIS techniques. Elsevier, 43-53.
- ZT Bieniawski, Z. T. (1979). The geomechanics classification in rock engineering applications. *ISRM Congress*.