

Méthodologie d'étude des falaises et de cartographie des risques : application à la falaise de Kef El Hendi (cap Bon, Tunisie)

**A. BEN MAMMOU
W. BERRIRI**

Laboratoire des Ressources
minérales et Environnement
Faculté des Sciences
de Tunis
2092 Tunis, Tunisie
Abdallah.benmammou@fst.rnu.tn
berririmw@yahoo.fr

M. SADDEM

Direction
des carrières et explosifs
Ministère de l'Équipement et
de l'Habitat
Cité Jardin
1006 Tunis, Tunisie

Résumé

La falaise de Kef El Hendi du Jebel Korbous (cap Bon, Tunisie) présente des risques potentiels de chute de blocs sur la chaussée de la route régionale 128. Pour évaluer le risque et identifier les zones des éboulements majeurs potentiels, la méthode « Matterock » a été appliquée. La carte des risques, produit final de cette méthode, a été obtenue après un levé géologique détaillé le long de la falaise et une analyse des directions et des plongements des différentes discontinuités (plans de stratification, diaclases et failles) présentes dans les différentes aires structurales.

La confrontation des résultats montre que les aléas d'instabilité sont liés, d'une part, au basculement et au glissement en dièdre se manifestant par simple chute de blocs ou par éboulements majeurs dans les unités gréseuses et, d'autre part, à l'érosion des niveaux tendres. La synthèse des données permet de cartographier les aléas le long de la falaise et de les classer selon la dangerosité. Un tel document permet de planifier et de choisir les actions afin de stabiliser cette falaise et de sécuriser la route.

Mots-clés : méthodologie, falaise, risque, Kef El Hendi, Tunisie.

Methodology of cliff evaluation and hazards mapping : application to Kef El Hendi Cliff (cap Bon, Tunisia)

Abstract

The Kef El Hendi cliff of Korbous relief (cap Bon, Tunisia) shows a potential risk of falling rocks on the 128 regional road. To tackle this study and to detect the potential major collapses, we have applied cliff examination « Matterock » method. To draw up the hazard map, we carried a detailed geological survey and analyzed directions and dips of all discontinuities (bedding planes, joints and faults) of the different structural areas. The comparing results show that the instability hazards are linked on the one hand to toppling or falling blocks and to collapses of the sandy units and on the other hand to the erosion of the tender levels. The data synthesis allows to map the hazards along Kef El Hendi cliff and to classify it according to danger degrees. This document shows how to program and choose the actions to consolidate this cliff and to secure the road.

Key words : methodology, cliff, hazards, Kef El Hendi, Tunisia.

*NDLR : Les discussions sur
cet article sont acceptées
jusqu'au 1^{er} avril 2007.*

Introduction

Les mouvements de terrain sont souvent imprévisibles, de faible probabilité d'occurrence et non maîtrisables; mais une fois déclenchés, leurs conséquences peuvent être catastrophiques sur les plans socio-économique et humain. Dès lors, la seule solution de nature à assurer la sécurité des zones exposées au mouvement de terrain consiste à gérer le risque.

Dans cette contribution, on présente les résultats de l'étude de l'instabilité de la falaise de Kef El Hendi située dans la péninsule du cap Bon au nord de la Tunisie (Fig. 1). Elle a été engagée suite à des chutes de blocs et éboulements successifs sur la chaussée au pied de la falaise qui ont entraîné la fermeture à la circulation de la route régionale RR128 reliant les villes côtières du Soliman Korbus du cap Bon.

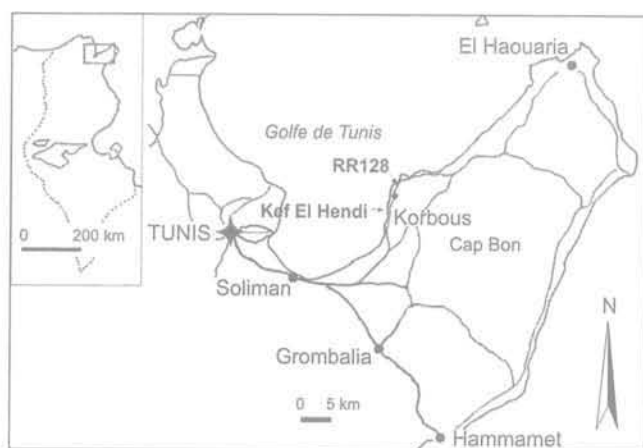


FIG. 1 Localisation géographique de la falaise de Kef El Hendi.
Geographical localization of Kef El Hendi.

Le secteur d'étude se situe sur le flanc occidental de Jebel Korbous. Dans cette région, la route est bordée, du côté ouest, par la mer (golfe de Tunis) et longe, du côté est, le pied de la falaise sur une distance d'environ 500 mètres. La hauteur de la falaise atteint 100 mètres dans la partie nord et dépasse 150 mètres dans la partie sud. Elle présente une succession de pentes raides (talus) formées de grès massifs et de gradins taillés dans des matériaux gréseux plus tendre.

Afin de sécuriser la route, des murs de soutènement et des murs pièges à cailloux en maçonnerie de 10 mètres de hauteur ont été construits au début du XX^e siècle. Ces ouvrages sont construits à différents niveaux dans l'éperon le plus accentué de la falaise et sur une portion de 170 mètres de la route. A l'état actuel, ces ouvrages sont soumis à une poussée due aux blocs détachés des bancs de grès fracturés et aux eaux d'infiltration et ils sont exposés à un renversement potentiel. Ceci se manifeste localement par le démantèlement, la rupture et l'effondrement progressif des contreforts des murs pièges à cailloux (Figs. 2 et 3). Malgré l'existence de ces ouvrages, des blocs de grès de taille différente se sont retrouvés sur la chaussée.

Devant ces signes d'instabilité du rocher et des ouvrages de soutènement et le danger auquel seraient exposés les usagers, la direction régionale de l'Équipement a décidé la fermeture de la route à la circulation.

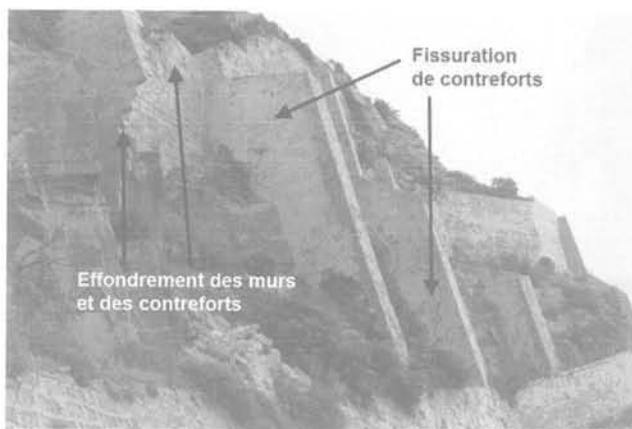


FIG. 2 Murs de protection de la falaise de Kef El Hendi.

Protection walls of Kef El Hendi cliff.



FIG. 3 Chute de blocs de taille variable au niveau de la chaussée en pied de la falaise.

Blocks fall of variable size on the level roadway in foot of the cliff.

Objet et méthode d'étude

Cette étude a pour but de cartographier le risque et vise à délimiter les zones présentant un danger imminent. Elle a été développée pour répondre à deux préoccupations de la direction régionale de l'Équipement :

- l'identification des secteurs instables ou potentiellement instables de la falaise : étude de l'aléas;
- l'évaluation du danger que représentent ces secteurs sur la circulation routière au pied de la falaise : la probabilité d'atteinte d'un tronçon de la route par les éboulements rocheux.

Pour ausculter la falaise et localiser les zones d'instabilité, on s'est basé sur la méthodologie « Mattock » (Rouiller *et al.*, 1998) développée par le Centre de recherche sur l'environnement alpin de Sion (CRE-LALP) suite au grand éboulement de Randa qui s'est produit en 1991 dans les Alpes suisses. Cette méthodologie est adaptée aux massifs rocheux homogènes, pour lesquels le système de discontinuité est à l'origine de processus de rupture de dièdre et plane. Dans le cas de la falaise de Kef El Hendi, formée d'alternance de bancs de grès métriques et d'argiles gréseuses plus tendre, la rupture est liée à la fois à la fracturation des

bancs de grès et à la faible résistance mécanique des niveaux tendre sous jacents provoquant des ruptures de dièdre et des basculements.

Cette étude a été menée en quatre étapes :

- levé géologique et étude structurale de Kef El Hendi ;
- analyse détaillée de l'agencement structural affectant la falaise ;
- délimitation des zones potentiellement instables et évaluation de leur dangerosité ;
- estimation de danger et définition des actions de stabilisation.

3

Géologie de la falaise

Pour mieux approcher les mécanismes de déformation de la falaise, une analyse géologique du secteur d'étude s'est imposée en réunissant des données de diverses natures (topographique, morphologique, lithologique, structurale, etc.).

La falaise de Kef El Hendi constitue la retombée occidentale de l'anticlinal de Jebel Korbous. Elle est constituée des séries détritiques Oligocène-Miocène inférieur (Fig. 4). Elle évolue des alternances de calcaires gréseux et marneux à la base vers une formation essentiellement gréseuse vers le sommet. Les différents niveaux compétents de Jebel Korbous sont affectés par des failles de direction variable, dont les plus importantes sont la grande faille d'effondrement F1 qui longe la côte (faille normale de direction proche de N20 et de pendage fort de l'ordre de 70° vers le NNW) et la faille F2 qui passe au niveau d'Ain Oktor (Fig. 4). C'est une faille de direction proche d'E-W et qui découpe le Jebel de Korbous en deux compartiments bien individualisés dans le paysage (Ben Salem, 1992). D'autres failles normales de direction N80 à N90 et N110 à 130, affectent Jebel Korbous. Il s'agit de failles délimitant des grabens de largeur métrique. De petites fractures de direction variant de N50 à N90 et à rejet généralement décimétrique à métrique affectent le massif.

La falaise de Kef El Hendi d'une hauteur moyenne de 125 m domine sur 500 m la route régionale 128 (RR 128).

L'analyse morphologique détaillée de la falaise montre une succession de pentes raides et de gradins (Fig. 5). Cette disposition est liée à la lithologie et à l'inclinaison des bancs.

La falaise est formée des puissantes barres gréseuses massives constituées d'un empilement de bancs de grès grossiers décimétriques à métriques intercalés avec des niveaux argilo gréseux plus tendres (Fig. 6). La base et le sommet de cette formation gréseuse sont formés par deux niveaux marneux. Les bancs de la falaise de Kef El Hendi présentent une structure monoclinale de direction moyenne N140 avec un plongement vers l'intérieur du massif de l'ordre de 15° NE.

Le front de la falaise de direction subméridienne montre des talus verticaux séparés par des zones moins inclinées, formant une succession de gradins de hauteur de l'ordre de 25 m (Fig. 5). Ces zones sont couvertes par des éboulis de grès de forme et de taille variable. La partie sommitale présente des zones d'arrachement en coin de pendage fort (supérieur à 65°) et orientées vers l'extérieur du massif. Ces coins sont sculptés dans les matériaux gréseux durs et massifs et sont associés à la présence de deux familles de fractures sécantes. A leur base, un sous-cavage s'est

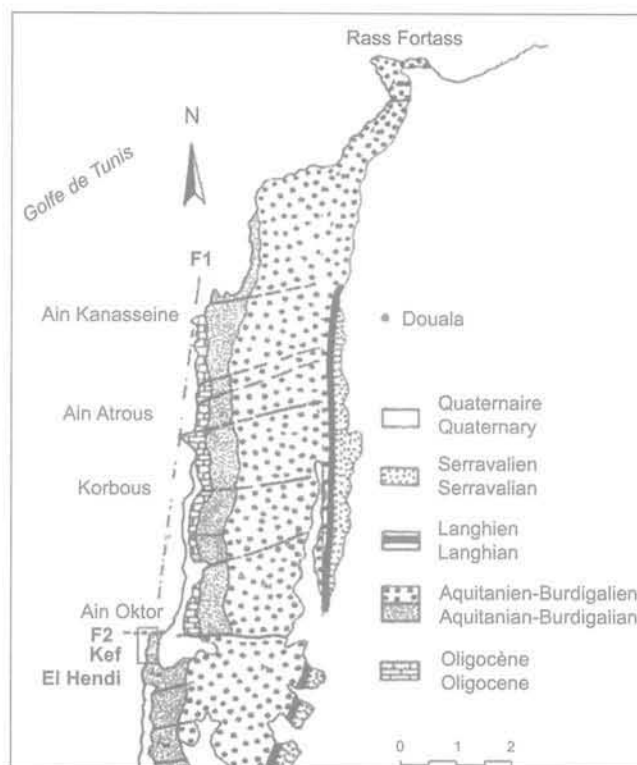


FIG. 4 Carte géologique et structurale du flanc occidental de Jebel Korbous. (Ben Salem, 1992).

Geological and structural map of occidental mountainside of Korbous (Ben Salem, 1992).

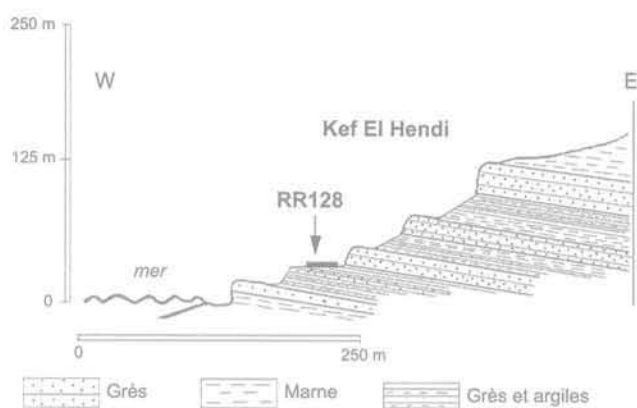


FIG. 5 Coupe géologique de la falaise de Kef El Hendi.

Geological section across part of Kef El Hendi cliff.

développé, il résulte de l'érosion des intercalations tendres. La falaise est marquée par une fracturation assez poussée et très prononcée au niveau des barres gréseuses. Les discontinuités d'origine tectonique apparaissent sous forme de familles de fractures plus ou moins serrées et sécantes. Elles ont des directions plus ou moins orthogonales et subparallèles à celle du front de la falaise et ont un pendage subvertical délimitant ainsi des coins instables (Tableau I).

Les réseaux de fractures relativement denses et complexes affectant les bancs de grès favorisent l'infiltration et la circulation de l'eau à travers les barres de grès. Les niveaux tendres moins perméables sous

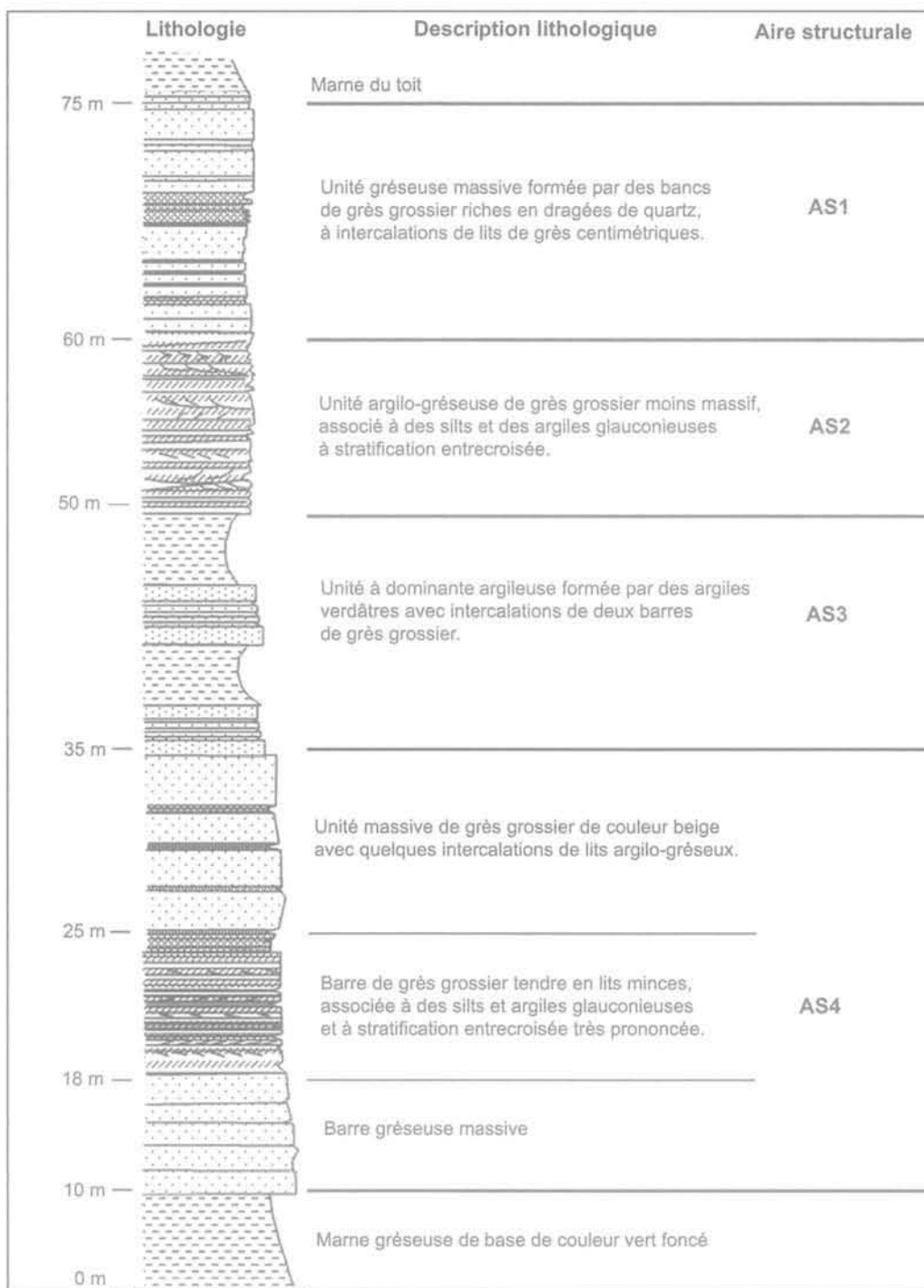


FIG. 6 Log lithologique de la falaise de Kef El Hendi.
Lithological log of Kef El Hendi cliff.

jacents entravent la percolation de l'eau. A la limite de ces deux types de matériaux, l'écoulement de l'eau provoque un sous-cavage qui est accentué par l'érosion superficielle des niveaux tendres. Les vides ainsi créés provoquent le basculement des blocs de grès. La perméabilité d'ensemble de la masse instable semble être très irrégulièrement distribuée. Cette variation de la perméabilité peut produire une augmentation du gradient de charge dans le massif, et donc, le développement de pressions interstitielles importantes (Antoine, 1992). L'humidification a pour effet aussi de diminuer la cohésion le long des surfaces de stratification entre les barres de grès et les niveaux tendres favorisant le glissement des bancs gréseux.

4

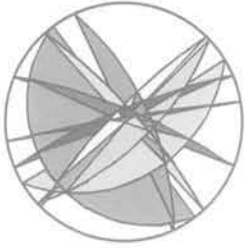
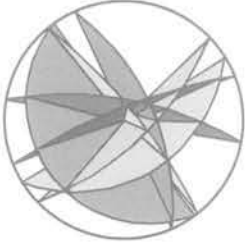
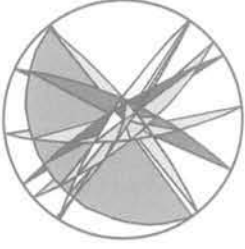
Agencement structural et délimitation d'aires structurales

D'après la méthodologie Matterock (Rouiller *et al.*, 1998) l'instabilité d'une falaise est toujours liée à l'agencement structural. De ce fait, l'étude structurale consiste, en premier lieu, à caractériser les discontinuités affectant la falaise et à visualiser, par l'intermédiaire d'un agencement structural, les rapports géométriques qu'elles ont entre elles, et à rapporter dans une seconde étape chaque agencement structural à des surfaces bien délimitées appelées aires structurales (AS).

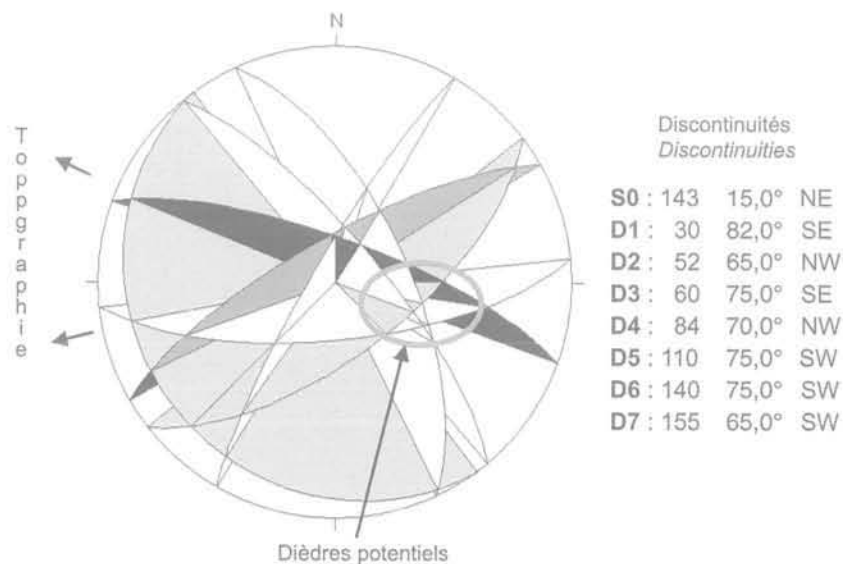
TABLEAU I

Plans moyens et paramètres géométriques des principales familles de discontinuités affectant la falaise de Kef El Hendi.

Average plans and geometrical parameters of the principal discontinuities families affecting Kef El Hendi cliff.

AS	Disc ⁽¹⁾	Direction	Pendage (°)	Esp. ⁽²⁾ moy (m)	Ouv. ⁽³⁾ (cm)	Persis. ⁽⁴⁾ (m)	Stereogramme Schmidt-Lambert
AS1	D1	N 155	65 SW	0,8	0	21,9	
	D2	N 141	80 SW	4	0	20,5	
	D3	N 112	80 SW	1,8	0	20,5	
	D4	N 67	80 SE	1,2	0	20,5	
	D5	N 44	80 SE			20,5	
	D6	N 80	85 SE			20	
	D7	N 46	65 NW	2	0	21,9	
	D8	N 58	40 NW	2	0	32,5	
	S0	N 134	15 NE	0,8	-	77	
AS2	D1	N 156	60 SW	0,8	0	17	
	D2	N 141	80 SW	3,33	0-22	16	
	D3	N 100	70 SW	1	0	10,5	
	D4	N 68	80 SE	2,5	0-15	15	
	D5	N 46	65 NW	2	0	16,3	
	D6	N 58	40 NW	2	0	24,36	
	S0	N 134	15 NE	0,4	-	58	
AS4	D1	N 141	75 SW	1,6	0	36,4	
	D2	N 115	70 SW	1,9	0	36,4	
	D3	N 33	75 SE	3,33	0-22	35,4	
	D4	N 57	75 SE	3,2	0	35,9	
	D5	N 49	70 NW	1,4	0	37,2	
	D6	N 83	70 NW	1		37,2	
	D7	N 34	85 NW	0,8		35,8	
	S0	N 134	15 NE	0,7		135,2	

(1) Disc. : discontinuités, discontinuity ; (2) Esp. : espacement, spacing ; (3) Ouv. : ouverture, opening ; (4) Persis. : persistence, persistence.

FIG. 7 Stereogramme synthétique des discontinuités de la falaise de Kef El Hendi (hémisphère supérieur).
Synthetic stereogram of discontinuities of Kef El Hendi cliff (higher hemisphere).

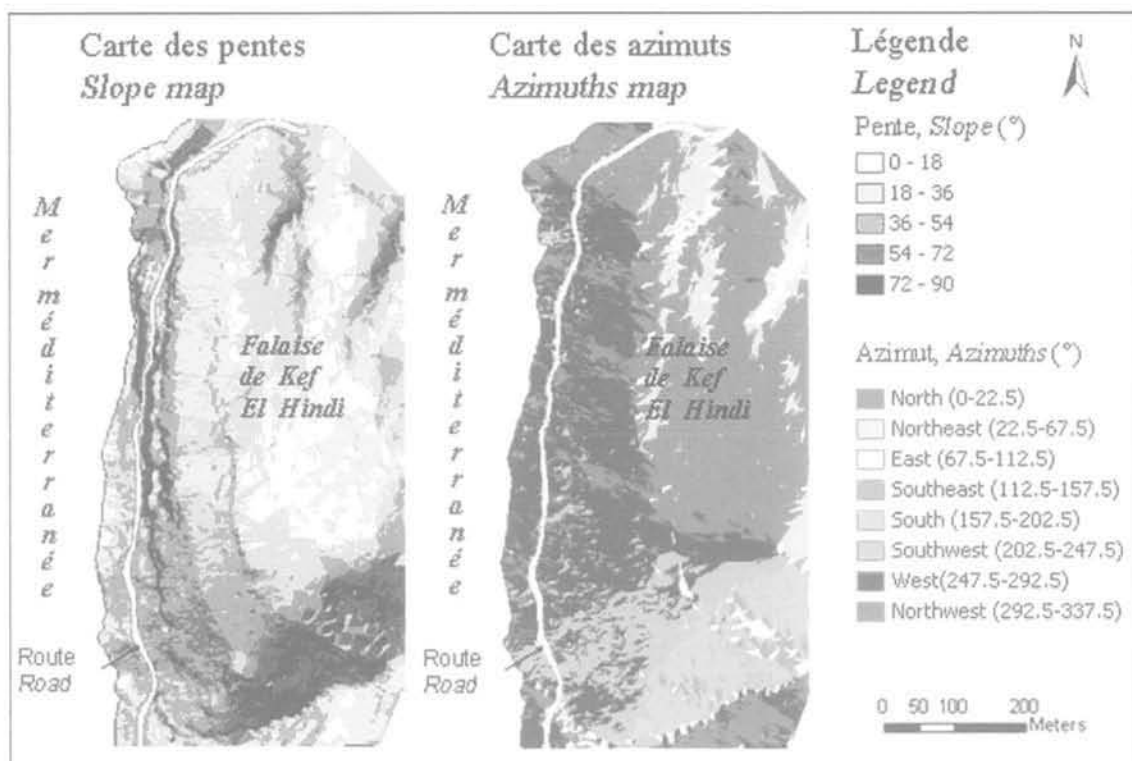


FIG. 8 Cartes des pentes et des azimuts de la falaise de Kef El Hindi.
Slop and azimuths charts of Kef El Hindi cliff.

4.1

Agencement structural

L'agencement structural correspond à la disposition tridimensionnelle des discontinuités dans le massif, les unes par rapport aux autres. Il permet de regrouper les discontinuités en familles ayant des caractères structuraux et géométriques semblables tel que l'orientation, l'ouverture, l'espacement, l'ampleur, le remplissage, etc. (Tableau I).

Les objets structuraux définissant l'agencement structural de la falaise sont :

- la *stratification* (S_0) de direction moyenne N 140 et de faible pendage de l'ordre de 15° vers le NE (Fig. 7);
- les *diaclasses* qui affectent les bancs, elles sont pluridirectionnelles avec un pendage fort. Elles constituent généralement des ramifications des fractures et des failles;
- les *fractures secondaires* ou fracture de décompression liées au basculement de blocs, leur ampleur est égale à celle des barres. Elles sont subparallèles au flanc des différentes barres gréseuses. Ces fractures sont généralement ouvertes avec des rejets faibles à nuls et constituent des réseaux de circulation des eaux d'infiltration;
- les *failles* ont une direction moyenne NE-SW et un pendage moyen de 60° vers le NW. Les crochons des couches indiquent un jeu normal des failles avec un rejet de 10 cm à 1 m.

4.2

Aires structurales

En se basant sur la morphologie, la lithologie, la puissance des couches et la distribution des discontinuités, la falaise a été subdivisée en quatre aires structurales (AS) (Fig. 6) :

- AS1: la barre sommitale de grès massif;
- AS2: le niveau argilo gréseux de grès grossier associé à des silts et argiles glauconieuses;
- AS3: le niveau d'argile avec deux barres de grès massif;
- AS4: les deux barres massives de grès intercalées avec des bancs minces de grès tendre associés à des silts et des argiles glauconieuses.

La projection stéréographique des plans moyens (Schmidt Lambert, hémisphère supérieure) de toutes les familles de fractures des aires structurales (AS1, AS2 et AS4) permet de préciser les paramètres géométriques moyens communs à chaque famille (Tableau I). L'aire structurale AS3, masquée par les éboulis, la végétation et confortée par les murs pièges à cailloux, n'a pas été analysée.

5

ANALYSE DE LA TOPOGRAPHIE

L'analyse de la topographie consiste essentiellement à établir le modèle numérique de terrain, à partir duquel il est possible d'exécuter un certain nombre de traitements des données altimétriques. La *carte des pentes* (Fig. 8) met en évidence les pentes raides, lieux préférentiels des instabilités rocheuses. La recherche des aléas se limite donc à ces pentes raides. Dans les grès massifs, la limite de pente, au-dessus de laquelle les instabilités rocheuses peuvent avoir lieu est de l'ordre de 55°. La *carte des azimuts* (Fig. 8) permet d'identifier les grands traits morphologiques causés par des familles de discontinuités majeures. Dans le cas de la falaise de Kef El Hendi, la carte des azimuts montre que le front de la falaise a été façonné principalement par les discontinuités ayant un plongement vers l'Ouest (NW et SW).

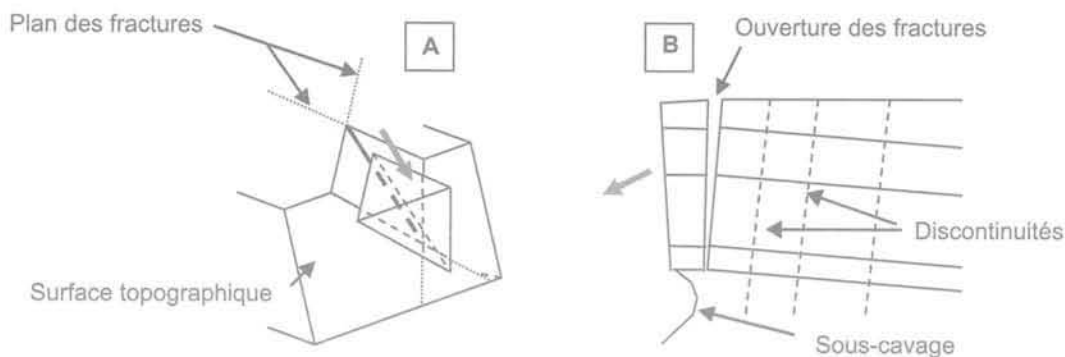


FIG. 9 Mécanismes de rupture caractérisant les aléas dans la falaise de Kef El Hendi. A : glissement en dièdre. B : basculement.
Rupture mechanisms characterizing the hazards of Kef El Hendi cliff. A: Wedge slide, B: Land slide

6

Individualisation de l'aléas et dangerosité

La méthodologie Matterock permet de localiser l'instabilité en fonction de l'agencement structural de la falaise, en particulier des unités massives gréseuses. Sous le nom d'aléas sont alors déterminés les compartiments de falaise propices à ces phénomènes. La localisation des aléas est une démarche prospective, elle vise à analyser les causes structurales de ces phénomènes et les indices associés afin de délimiter les zones à risques. Cette approche implique aussi la prise en compte de tous les mouvements antérieurs qui se sont produits au niveau de la falaise.

L'attribution d'un degré de dangerosité permet d'estimer le danger pour chaque aléa. Ces deux étapes nous ont permis de dresser la carte des aléas de la falaise de Kef El Hendi.

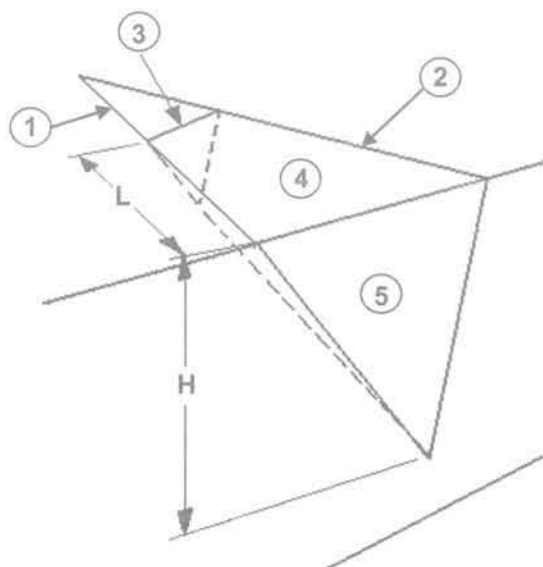


FIG. 10 Géométrie typique du problème de stabilité des glissements en dièdre dans les pentes rocheuses.
Typical geometry of the stability problem of the rock wedge slide in the rock slopes.

6.1

Mécanismes générateurs

L'analyse de l'ensemble des données décrites ci-dessus (géologiques, structurales et topographiques) et la reconnaissance *in situ* des instabilités inventoriées nous ont permis d'identifier deux principaux mécanismes de rupture caractérisant les aléas rocheux dans la falaise de Kef El Hendi (Fig. 9) :

Basculement : les aléas de ce type sont localisés essentiellement au niveau de AS2, ils sont favorisés par la nature lithologique plus ou moins tendre. L'altération et l'érosion des niveaux sous-jacents (AS3) jouent un rôle très important dans le déclenchement de ce mouvement. Elles se manifestent par la création de vides à la base de la masse rocheuse et par l'ouverture progressive des fractures parallèles à subparallèles au front. Les masses rocheuses affectées par ce mécanisme peuvent atteindre quelques mètres cubes.

1-2 Plan de discontinuité Failure planes

3 Fissure de tension Tension crack

4 Surface topographique supérieure Upper ground surface

5 Surface de glissement Slope face

L Distance entre la fissure de tension et la crête, mesurée par rapport à la discontinuité 1.
Distance of tension crack from crest, measured along the trace of plane 1.

H Hauteur du glissement (distance verticale) mesurée par rapport à la discontinuité 1.
Slope height (vertical distance) referred to plane 1.

Glissement dièdre : ce mécanisme caractérise les aléas identifiés dans AS1 et à l'affleurement de AS4 dans la partie sud de la falaise. La fracturation (intense et inter-croisée) est le principal facteur dans l'apparition de ce mécanisme, il existe d'autres facteurs (brutaux ou progressifs) tels que le dégagement des surfaces de rupture ou la disparition des masses d'appui par basculement et/ou érosion des niveaux inférieurs. Les dièdres majeurs sont formés par les familles D2-D3 et D3-D4. La taille des blocs dégagés est variable mais la hauteur de chute reste importante surtout pour AS1.

6.2

Détection des aléas

La confrontation entre l'agencement structural et la topographie permet de détecter les secteurs potentiellement instables. Elle consiste à déterminer les relations spatiales définies par les discontinuités à la fois entre elles et par rapport à la topographie et de déceler où elles peuvent générer des instabilités. En plus, la taille et la forme des dièdres potentiels dépendent essentiellement de la géométrie de la surface topographique (orientation, inclinaison, forme, étendu, etc.) et des principales familles des discontinuités.

La première approche consiste à visualiser cette géométrie à l'aide d'une représentation stéréographique des plans moyens des discontinuités majeures et de la direction topographique (Fig. 7). Pour qu'un glissement soit possible, il faut que la ligne d'intersection des discontinuités, définissant les dièdres potentiels, soit orientée vers le front de la falaise et intercepte la surface topographique. Cette condition permet une première identification des dièdres potentiels et de déterminer les agents structuraux responsables (croisement des familles de direction N52 et N84 vers le SW avec celles de direction N110, N140 et N155 vers le NW).

Hoek et Bray (1981) ont présenté une méthode plus spécifique pour l'analyse des instabilités de type dièdre dans les pentes rocheuses et qui prend en considération l'aspect tridimensionnel du problème (Fig. 10). Cette méthode permet d'évaluer la stabilité des dièdres potentiels par le calcul du facteur de sécurité SF (*Safety Factor*). Plusieurs paramètres interviennent dans le calcul, à savoir :

- la hauteur, l'orientation et les des faces topographiques (sommiteuse et de pente) ;
- la direction, l'angle et les paramètres géomécanique (cohésion, angle de frottement interne) des plans moyens des discontinuités ;
- la géométrie des fissures de tension ;
- les pressions hydrauliques ;
- les forces extérieures et sismiques ;
- l'existence de dispositifs de renforcement (tirants, etc.).

La géométrie tridimensionnelle du problème et le nombre élevé des paramètres impliquent un calcul relativement compliqué. Pour ce faire, on a utilisé le logiciel *Wedge Failure Analysis*⁽¹⁾ qui nous a permis de calculer les facteurs de sécurité pour chaque dièdre potentiel.

⁽¹⁾ Logiciel développé par E. Bane Kroeger du Département du génie minier et des ressources minérales de l'université de l'Illinois de Sud Carbondale. Ce logiciel reprend l'analyse de sécurité des glissements en dièdre ou plan dans les roches massives introduite par Hoek et Bray en 1981.

6.3

La dangerosité

La dangerosité d'un aléa est, par définition, sa probabilité de mobilisation. Plusieurs facteurs interviennent dans l'appréciation de la dangerosité :

- les *facteurs intrinsèques*, sont les plus significatifs, ils sont liés à la roche : lithologie, fractures, comportement géomécanique ;
- les *facteurs dégradants*, à savoir tous les éléments externes qui concourent avec le temps et par le biais de processus physico-chimiques à démanteler la falaise : l'eau, la température et la sismicité de base ;
- les *facteurs déclenchants* qui sont liés aux actions physiques extrêmes intervenant soit à la surface du sol (météo et climat) soit en profondeur (sismicité, pression hydraulique dans les fissures, etc.) et qui, du fait de leur haute intensité, déclenchent l'aléa.

Au niveau de la falaise de Kef El Hendi, les conditions morphostructurales sont très précaires et révèlent d'importants indices d'instabilité (lithologie variée, ouverture des fractures, intenses réseaux de fracturation, érosion différentielle, sous-cavage, pente raide, éboulis...). Les agents dégradants (eau et air) sont très actifs et conduisent à un démantèlement et à une érosion active du front de la falaise et en particulier des niveaux tendres. Les mécanismes déclenchant les instabilités dans la région sont liés essentiellement aux précipitations d'une intensité importante.

L'état général de la falaise apparaît donc très propice au développement des instabilités et fait que la majorité des aléas identifiés ont une probabilité d'atteinte et de mobilisation moyenne à élevée.

6.4

Carte des aléas

Une fois identifiés, les aléas sont définis par un périmètre, un type de mécanisme, un volume maximal mobilisé par chaque événement, un intervalle de la taille des blocs et une dangerosité. En se basant sur ces données et en synthétisant tous ces éléments, nous avons établi la carte des aléas (Fig. 11).

7

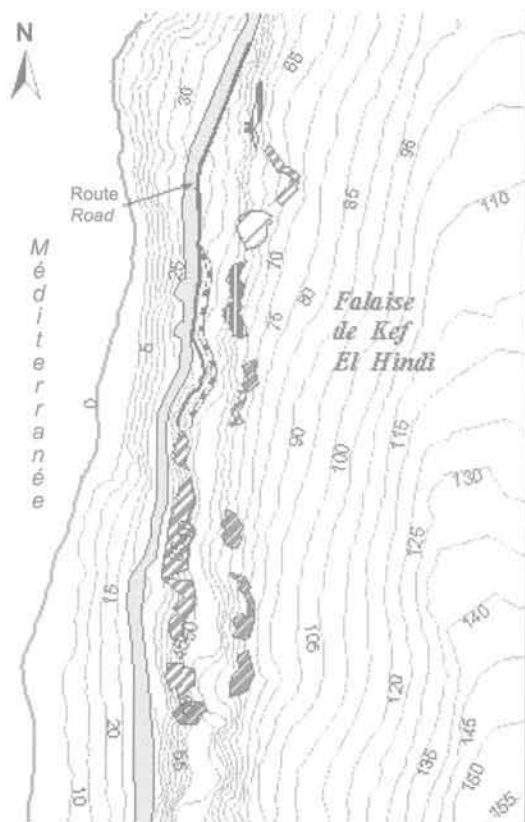
Étude du danger

Cette partie expose l'estimation du danger dans la partie sise à l'aval de la falaise de Kef El Hendi. Chaque aléa se voit attribuer un degré de danger (élevé, moyen et faible) au moyen d'un diagramme intensité-probabilité d'atteinte (I-W) (Fig. 12). Le digramme I-W correspond à une zonation de l'énergie des blocs susceptibles d'atteindre un périmètre donné par unité de temps.

7.1

Probabilité d'atteinte

La méthodologie Matterock permet de définir la probabilité d'atteinte par des classes temporelles au cours desquelles un événement a une forte probabilité de se produire. La probabilité d'atteinte est élevée lorsque qu'elle se situe entre 0 et 30 ans, elle est



Légende/Legend



Mécanisme de rupture/Mode of failure

GD : Glissement en dièdre/Wedge slide
 GB : Basculement/Topping

Degrés de dangerosité/Dangerousness

1 : Faible/Light
 2 : Moyenne/Medium
 3 : Forte/High

Mur de soutènement/Supporting wall
 Mur piège à cailloux/Traps stones wall



FIG. 11 Carte des aléas.
 Hazards map.

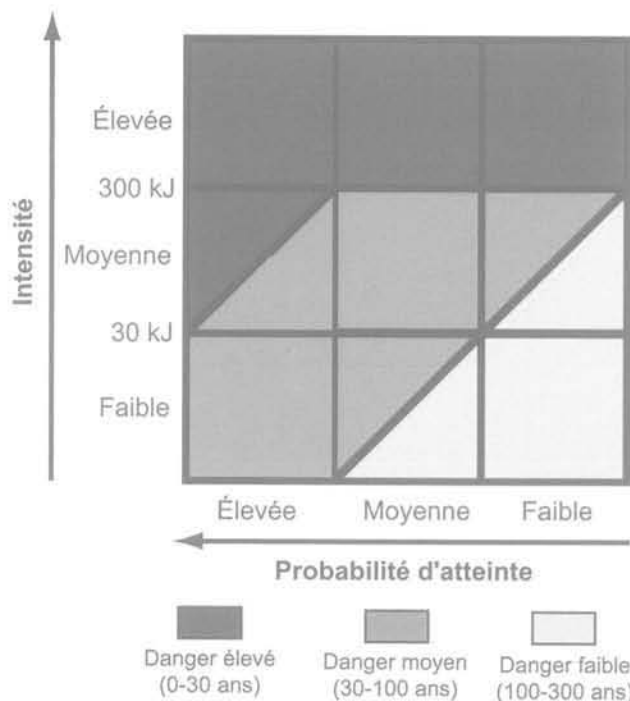


FIG. 12 Diagramme intensité-probabilité d'atteinte.
 Diagram intensity-probability of occurrence.

moyenne de 30 à 100 ans et faible de 100 à 300 ans. La probabilité d'atteinte d'un bloc est évaluée en associant :

- sa *probabilité de rupture* exprimée par la dangerosité de l'aléa ;
- sa *probabilité de propagation*, soit la probabilité qu'un bloc qui s'est détaché atteigne le site considéré.

Pour estimer la probabilité d'atteinte, on s'est basé sur la disposition des éboulis au pied des zones sources. Cette dernière a révélé que les blocs déstabilisés ont une trajectoire aléatoire. Elle a montré aussi que l'extension du phénomène de propagation des blocs est élevée, la distance parcourue par les blocs rocheux est très grande. Pour certains aléas, situés dans AS1 de la partie sud de la falaise, la limite d'atteinte⁽²⁾ « A » atteint la route, elle est dans les autres cas plus en retrait et se limite aux zones de contre bas. Cette grande distance de propagation est due à la taille des dièdres, à la raideur de la pente et à l'absence d'amortissement des chocs.

Seuls les aléas localisés au niveau des murs pièges à cailloux sont caractérisés par une faible probabilité d'atteinte, la limite « A » s'arrête au niveau du mur, ceci est dû à l'amortissement des blocs contre les murs.

7.2

Intensité

L'intensité est donnée par l'énergie (pouvoir destructeur) des blocs à un endroit précis de leurs trajectoires. Elle est exprimée sous forme d'énergie cinétique de déplacement et de rotation et dépend de plusieurs paramètres : taille des blocs mobilisés, hauteur de détachement, pente, obstacle, etc. Selon la méthodologie Matterock, trois classes d'intensité sont distinguées :

⁽²⁾ Les limites d'atteinte (Rouiller *et al.*, 1998) correspondent à la distance parcourue par les blocs provenant d'un point donné jusqu'à leur arrêt. Ils sont matérialisés par trois limites :
 - limite A : 99 % des blocs s'arrêtent en A ;
 - limite B : 10⁻³ des blocs s'arrêtent en B ;
 - limite C : 10⁻⁴ des blocs s'arrêtent en C.

- élevée (> 300 kJ) : destruction partielle ou totale des objets atteints ;
- moyenne (30-300 kJ) : dégâts importants aux objets atteints. Une énergie de 300 kJ correspond à la résistance standard d'un mur en béton armé ;
- faible (< 30 kJ) : les objets atteints sont faiblement endommagés. Une énergie de 30 kJ correspond à la résistance standard d'une barrière en bois de chêne d'environ 30 cm d'épaisseur.

Pour les aléas passés, et à défaut d'une modélisation de la chute des blocs, l'observation des blocs éboulés (taille, répartition dans la pente, traces d'impact, etc.) permet d'estimer sommairement cette intensité. Par contre, pour les aléas potentiels, l'intensité est estimée en calculant la taille unitaire et le volume global des blocs mobilisés en fonction de l'espacement moyen et la persistance des principales discontinuités affectant l'aléa considéré.

7.3

Carte de danger

La carte de danger de la route RR 128 au pied de la falaise de Kef El Hindi (Fig. 13) a été établie sur la base de la carte des aléas et présente une délimitation des périmètres exposés avec estimation graduée du danger. Elle synthétise les résultats obtenus par projection des aléas sources sur le diagramme I-W et prend en considération l'analyse *in situ* des phénomènes : cicatrices, répartition et tailles des blocs.

La carte de danger permet de distinguer, suivant la notion de répétitivité des événements, deux phénomènes :

- *chute de blocs*. Ce phénomène est assez fréquent (lié à pluviométrie) et peut se répéter plusieurs fois au même endroit. L'énergie d'impacte est généralement faible (< 30 KJ vu la faible taille des blocs) et ne prendra de l'ampleur au niveau de la chaussée que si la hauteur de la chute est importante. Le diagramme I-W montre que la majorité des aléas de ce type sont qualifiés d'un degré de danger moyen à élevé ;

- *les éboulements*. Ces phénomènes, pour lesquels l'intensité est toujours élevée, résultent de processus de dégradation lents et irréversibles de la falaise et la notion de fréquence s'y adapte mal. Dans ce cas, la probabilité d'atteinte est estimée par la répartition des arrêts des blocs dans les pentes, et le danger sera visualisé par les limites d'atteinte ou d'arrêt. L'analyse des cicatrices et l'observation des blocs déjà éboulés montrent que la distance de propagation est élevée, ceci s'explique par la grande taille des blocs, la raideur de la pente et l'absence d'obstacles.

Globalement, le danger au niveau de la route apparaît assez élevé. La falaise présente, à plusieurs endroits, des écaïlles et/ou des dièdres fragmentables avec développement de sous-cavage à leur base (et évolue en surplomb). Les blocs déchaussés, dont le volume unitaire peut atteindre 0,1 à quelques m³, induisent un danger permanent notamment en période de pluie. La limite d'atteinte et de propagation des blocs est très grande en raison de la raideur de la pente et du franchissement immédiat de la route.

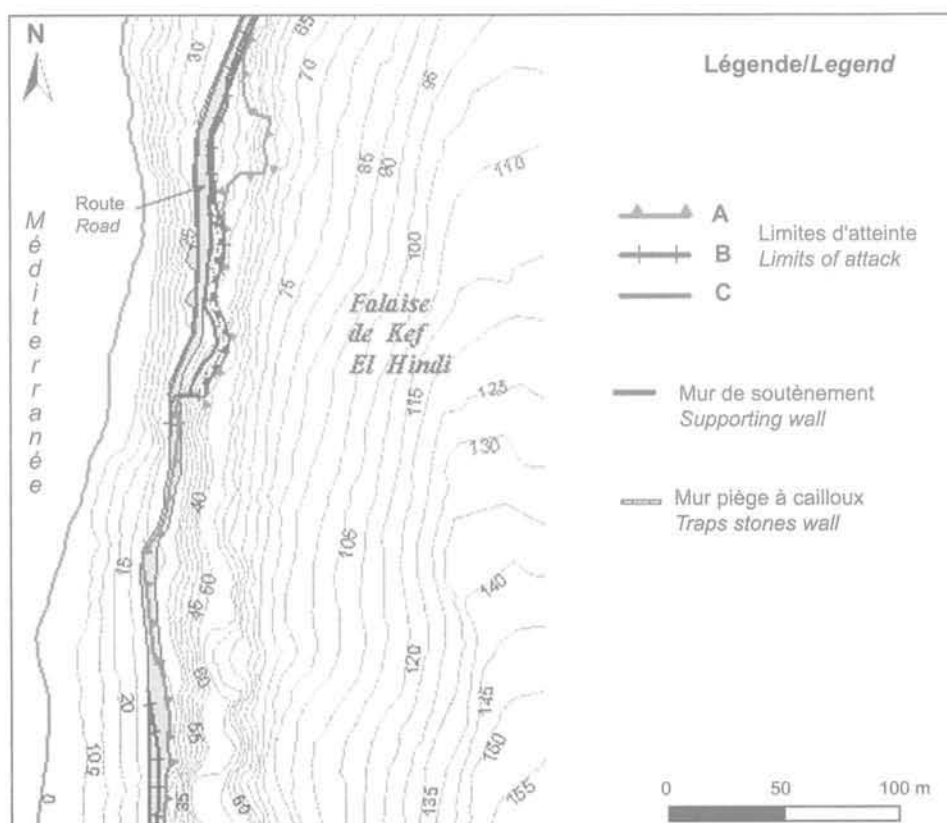


FIG. 13 Carte de danger. Danger map.

Actions de stabilisation et sécurisation de la Falaise

La carte de danger montre différents types de mouvements de la falaise : des glissements de dièdre et des basculements qui se manifestent par simple chute de blocs ou par éboulement. La stabilisation de cette falaise doit être menée selon le type de mouvement et le degré du danger, de ce fait chaque type de mouvement identifié et classé fera l'objet d'une action appropriée. La stabilisation de ces mouvements impose des actions mécaniques pour le curage des blocs instables. La fixation par tirants serait plus sécurisante pour les dièdres volumineux et les éboulements affectant des bancs épais. Le choix entre ces différentes actions dépendra en définitif du coût de l'action du traitement.

Conclusion

L'étude menée a permis de tirer plusieurs renseignements concernant l'état de stabilité de la falaise de Kef El Hendi.

L'étude du risque a révélé que les aléas ne sont en fait que le signe géologique de l'évolution de l'instabilité de la falaise. Les aléas sont liés à des phénomènes de détachement des blocs par éboulement, basculement ou chute simple des blocs. Ils sont le résultat des processus de dégradation lents et irréversibles du front de la falaise et ont pour origines les facteurs morpho-structuraux de la falaise.

La probabilité de mobilisation de ces aléas sources est assez importante, elle est associée à une grande dangerosité, une probabilité d'atteinte relativement élevée et des volumes de blocs assez importants de quelques m³ à quelques dizaines de m³. La limite d'atteinte des blocs est assez grande et dépassé par endroit les murs de soutènement de l'aire structurale 2 (AS2) et les pièges à cailloux.

Toutes ces données font que le tronçon de la route au pied de la falaise de Kef El Hendi est exposé à un risque élevé, ce qui impose des actions immédiates (fixation des blocs basculés ou détachés), à moyen terme (rectification de la pente des talus instables) et à long terme (construction d'ouvrages de protection) pour assurer la sécurité des usagers de la route. Ces actions ont été jugées très coûteuses, une déviation de la route a été décidée assurant définitivement la sécurité et le trafic vers le centre thermo-minéral de Korbous.

Bibliographie

Antoine P. – Les problèmes posés par l'instabilité des versants de grande ampleur - aspects géologiques. Bull. de l'Ass. Inter. de Géol. de l'Ing., n° 45, 1992, p. 9-24.
Baillifard F., Jaboyedoff M., Rouiller J.-D., Tosoni D. – Matterock : une méthode d'auscultation des falaises et de détection des instabilités rocheuses. CREALP, 1998, 16 p.

Ben Salem H. – Contribution à la connaissance de la géologie du cap Bon : stratigraphie, tectonique et sédimentologie. Thèse de doctorat 3^e cycle, Fac. Sci. de Tun., 1992, 203 p.

Hoek E., Bray J.W. 1981. Rock slope engineering. The Institution of Mining and Metallurgy, Landon 1981, 309 p.

Rouiller J.D., Jaboyedoff M., Marro Ch. Philipossian F., Mamin M. – Pentes instables dans le Pennique valaisan. Matterock : une méthodologie d'auscultation des falaises et de détection des éboulements majeurs potentiels. Rapport final PNR 31, Editions df, Zurich, 1998, 240 p.