

Démarche méthodologique pluridisciplinaire pour l'étude des instabilités de versants : application aux glissements du Rif central (Maroc)

J. EL KHATTABI
C. BOULEMIA
E. HENRY
E. CARLIER

Laboratoire artois
mécanique et habitat
(LAMH)

Équipe hydrologie,
sol et environnement (HSE)
Université d'Artois,
Faculté des sciences
appliquées de Béthune
Technoparc Futura
62400 Béthune

Résumé

Les instabilités de terrain font l'objet de nombreuses études regroupées en deux grandes méthodes : les méthodes naturalistes et les méthodes mécaniciennes. Ces méthodes, qui adoptent une approche qualifiée de linéaire, aboutissent souvent à des résultats partiels, d'où l'intérêt de la mise en place d'une approche transversale. Dans cet article, nous avons formulé une démarche méthodologique pluridisciplinaire qui s'appuie sur une approche transversale. Elle associe à la fois géomorphologie, géologie, hydrogéologie et géotechnique. Le fondement de la méthodologie repose sur une analyse de l'instabilité, suivie d'une modélisation et d'une cartographie.

Pour mettre en pratique la méthodologie, une première expérimentation a été effectuée dans les versants nord du Rif central (Maroc). Les résultats obtenus ont permis d'identifier les facteurs macrodestabilisateurs et les mécanismes microdestabilisateurs à l'origine des instabilités en révélant le rôle du charriage tectonique. L'intégration de ces résultats dans un modèle de rupture nous a conduits à la réalisation de simulations en 2D. Cette méthodologie peut s'avérer particulièrement appropriée pour analyser et modéliser les phénomènes et cartographier les risques en zones rurales ou urbaines implantées dans des sites potentiellement instables.

Mots-clés : démarche méthodologique pluridisciplinaire, instabilités, facteurs macrodestabilisateurs, mécanismes microdestabilisateurs, Rif central.

Multidisciplinary methodological process for the study of slope instabilities : application to landslides in the Central Rif (Morocco)

Abstract

Ground instabilities have been the subject of numerous studies using two main methods : the naturalist and the mechanic methods. Those methods use an approach described as linear often lead to partial results, which makes it necessary to set up a transversal approach.

In this paper we have elaborated a multidisciplinary methodological process, based on a transversal approach associating geomorphology, geology, hydrogeology and geotechnics.

The base of the methodology lies on instability analysis followed by modeling and mapping.

Introduction

Les mouvements de terrain, phénomènes naturels ou liés aux actions anthropiques, sont souvent à l'origine de nombreux dégâts tant matériels qu'humains. La prévention de ces dégâts se concrétise par la réalisation de cartes de risques qui constituent le support de base pour la réalisation des cartes réglementaires, comme par exemple les Plans d'exposition aux risques (PER) en France (Flageollet, 1989). Ces dernières délimitent les zones non constructibles, pouvant le devenir grâce à des aménagements spécifiques.

Les instabilités font l'objet de nombreuses études que l'on peut classer en deux grandes catégories selon qu'elles utilisent des méthodes naturalistes illustrées par les travaux de Milliès-Lacroix (1968) et Van Asch (1980) ou des méthodes mécaniciennes à l'image de l'étude effectuée par Rascon (1984) concernant les glissements sur des plans de stratification. Ces méthodes, qui adoptent une approche qualifiée de « linéaire », aboutissent souvent à des résultats

To test this methodology, our first experiment was carried out on the northern hillsides of the Central Rif (Morocco). The obtained results have made it possible to identify macrodestabilizing factors and microdestabilizing mechanisms responsible for the instabilities by bringing to light the role of the tectonic overthrust. The integration of those results into a rupture model allowed us to carry out simulations in 2D. This method can prove particularly efficient when we need to analyse and modelize phenomena or map the risks for rural or urban areas set on potentially unstable sites.

Key words : multidisciplinary methodological process, instabilities, macrodestabilizing factors, microdestabilizing mechanisms, Central Rif.

partiels. Par contre, les nouvelles méthodes dites interdisciplinaires ou mixtes, développées par plusieurs auteurs (Bogaard *et al.*, 2000 ; Maquaire *et al.*, 2001), offrent une approche plus globale et sont très prometteuses. Cependant, elles ne doivent pas se limiter à une juxtaposition de méthodes, il faut en effet mener une approche transversale dans le cadre d'une démarche méthodologique pluridisciplinaire associant géomorphologie, géologie, hydrogéologie et géotechnique.

La démarche présentée ici repose sur une analyse de l'instabilité des versants, suivie d'une modélisation et d'une cartographie. L'analyse de l'instabilité permet d'identifier les facteurs macrodestabilisateurs et les mécanismes microdestabilisateurs associés, nécessaires à la compréhension de la genèse des mouvements de terrain.

La démarche méthodologique a été expérimentée sur la région du Rif central au nord du Maroc (El Khat-tabi, 2001). Cette région, aux caractéristiques géographiques et géologiques très contrastées, est caractérisée par de fréquents mouvements de terrain endommageant régulièrement l'habitat, ainsi que le réseau routier et ses infrastructures.

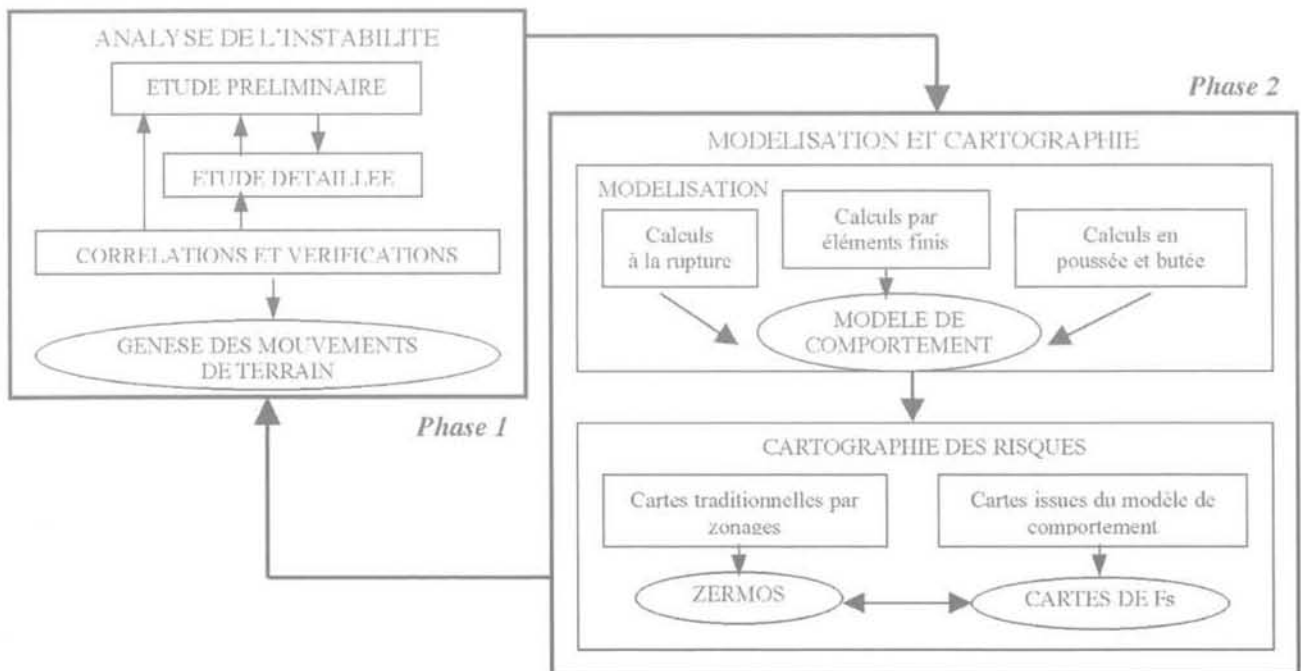


FIG. 1 Schéma global de l'étude des instabilités de versants.
Global chart for the study of slope instabilities.

Principe de la démarche

La démarche méthodologique s'est inspirée de la méthode SADT (*Structured Analysis Design Technic*) dans laquelle l'analyse est menée de manière descendante, hiérarchique et structurée (Lissandre, 1986 ; Boissier *et al.*, 1999).

L'étude de l'instabilité comporte deux phases (Fig. 1) :

- l'analyse de l'instabilité ;
- la modélisation et la cartographie des risques.

L'analyse de l'instabilité est composée de trois étapes : deux études (étude préliminaire et étude détaillée) et d'un ensemble de corrélations et de vérifications. L'étude préliminaire permet de localiser les différents types de mouvements, alors que l'étude détaillée consiste à les analyser en déterminant les facteurs macrodéstabilisateurs et les mécanismes microdéstabilisateurs. Une interaction à double sens entre les deux études est possible.

Parmi les facteurs déterminés, ceux qui participent à l'instabilité sont identifiés par corrélations et vérifiés par la suite, permettant ainsi la compréhension de la genèse des mouvements de terrain.

La phase 2 est composée des deux étapes modélisation et cartographie; son objectif est d'établir dans un premier temps un modèle de comportement qui doit être le mieux adapté aux problèmes d'instabilités soulevés lors de la phase analytique. Par la suite, la cartographie permettra d'illustrer les risques en constituant un support d'aide à la décision (Antoine et Pachoud, 1976).

Secteur d'application : le Rif central

Pour mettre en pratique la méthodologie adoptée, nous avons choisi pour secteur d'application, la région du Rif central située dans le Nord marocain (El Khat-tabi, 2001). Cette région, aux caractéristiques géographiques et géologiques très contrastées, est caractérisée par de fréquents mouvements de terrain endommageant régulièrement l'habitat, ainsi que le réseau routier et ses infrastructures.

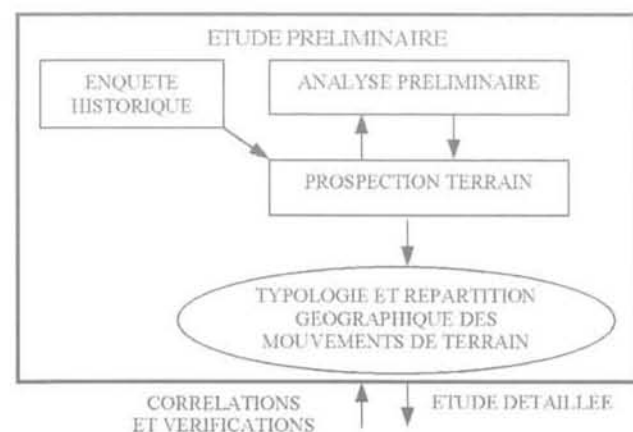


FIG. 2 Composition de « l'étude préliminaire ». Preliminary study.

La géologie de cette région se distingue par la présence de deux domaines : domaine interne et domaine des flyschs (Andrieux, 1971). Notre étude a porté essentiellement sur les glissements affectant le domaine des flyschs marqué par l'empilement des nappes de charriage (Tisirène et Chouamat ; Besson, 1984). Ces nappes sont constituées de niveaux à alternance gréso-schisteuse et de niveaux carbonatés.

Nous allons détailler par la suite comment s'est effectuée l'étude de l'instabilité de la région nord du Rif central et les résultats obtenus en suivant la démarche méthodologique présentée à la figure 1.

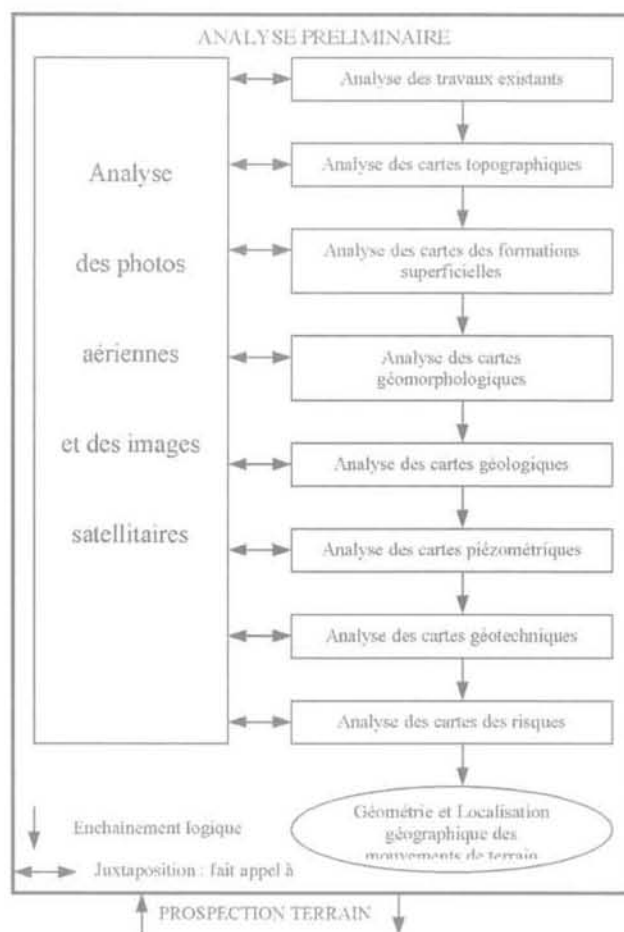


FIG. 3 Détail de « l'analyse préliminaire ». Detailed preliminary analysis.

Analyse de l'instabilité de la région nord du Rif central

L'étude préliminaire

L'étude préliminaire consiste à collecter des informations à partir d'études bibliographiques, de supports cartographiques, photographiques et sur le terrain. Au terme de cette étude, les mouvements sont identifiés suivant leur typologie et sont ensuite cartographiés. Pour ce faire, deux tâches sont nécessaires : l'analyse

préliminaire et la prospection terrain (Fig. 2). Cette dernière est renforcée par l'enquête historique sur les mouvements de terrain.

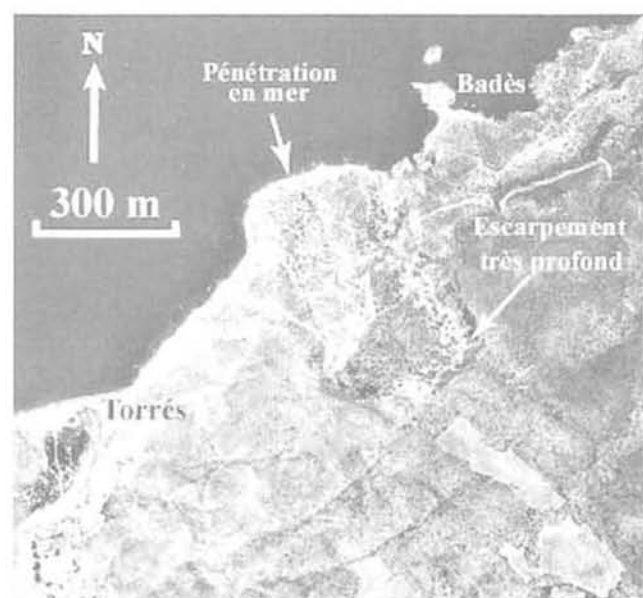


FIG. 4 Glissement de Badès (photographie aérienne 3350, 1966).
The Badès landslide (air photo 3350, 1966).

4.1.1

Analyse préliminaire

L'analyse préliminaire vise à localiser les sites potentiellement instables et de vérifier la géométrie des mouvements. Elle consiste à dépouiller l'ensemble des documents cartographiques et photographiques disponibles pour déceler les indices pouvant être liés à un mouvement de masse. Cette analyse est indispensable dans le cas des études à l'échelle régionale.

L'analyse préliminaire comporte plusieurs tâches caractérisées par une progression en étapes (Fig. 3).

Cette progression peut être linéaire ou itérative (Boulema, 1992). L'absence d'une tâche implique le passage à la suivante.

Sur le site d'application, plusieurs documents ont été utilisés. Il s'agit de fonds topographiques (à l'échelle 1/5 000, 1/50 000 et 1/100 000), de la carte géomorphologique (Maurer, 1965), de la carte géologique (Andrieux et Mégard, 1973) et de photos aériennes (couvertures à 1/18 000, 1966, et à 1/20 000, 1986).

L'analyse des fonds topographiques a décelé des indices liés à une dynamique de versants. Parmi ces indices figurent :

- les irrégularités de la ligne de rivage et la présence des plages (relevées au niveau des cartes à 1/5 000 et à 1/50 000) ;
- les replats et les corniches (relevés au niveau des cartes à 1/5 000 et à 1/50 000) ;
- les conditions hydrologiques (relevées au niveau des cartes à 1/5 000, 1/50 000 et à 1/100 000).

Sur la carte géomorphologique, Maurer (1965) a décrit une activité morphologique très intense. Par la forte densité d'indices liée à la dynamique superficielle, cette carte ne constitue pas un axe majeur d'orientation du choix des sites. Enfin, La photo aérienne a permis de faire les mêmes analyses qu'à partir des cartes topographiques. Elle a révélé plusieurs sites (Fig. 4), comme elle en a confirmé d'autres.

Malgré ces apports sur le plan de l'identification des mouvements, cette analyse ne permet pas à elle seule d'élaborer une typologie des mouvements, d'où la nécessité de la prospection de terrain.

4.1.2

Prospection terrain

La prospection terrain aboutit à la typologie des mouvements (Fig. 5) et peut identifier les matériaux concernés par l'instabilité. Elle repose sur un certain nombre d'observations qui distinguent dans un premier temps la dynamique superficielle de la dynamique profonde. La dynamique superficielle se base sur les

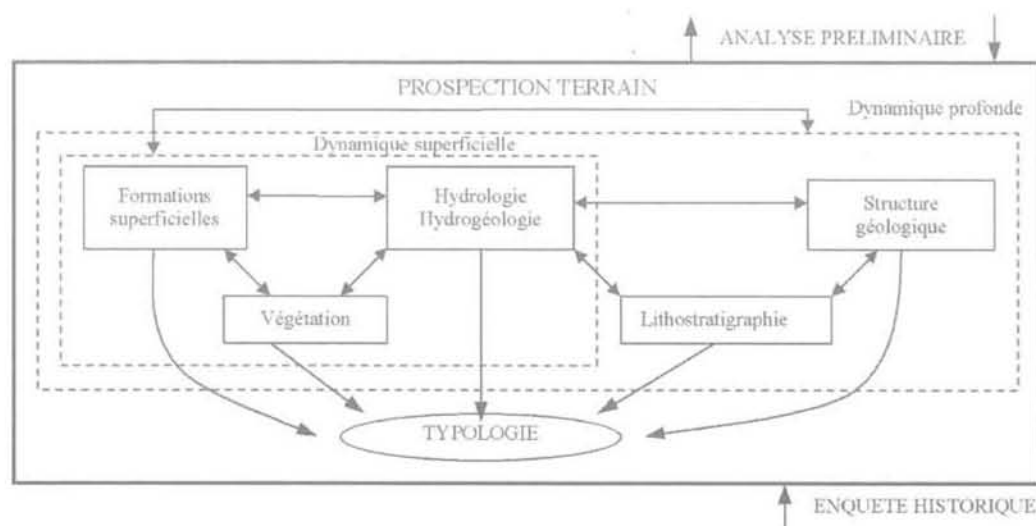


FIG. 5 Schéma de principe de la tâche « prospection terrain ».
The principle of land prospection.

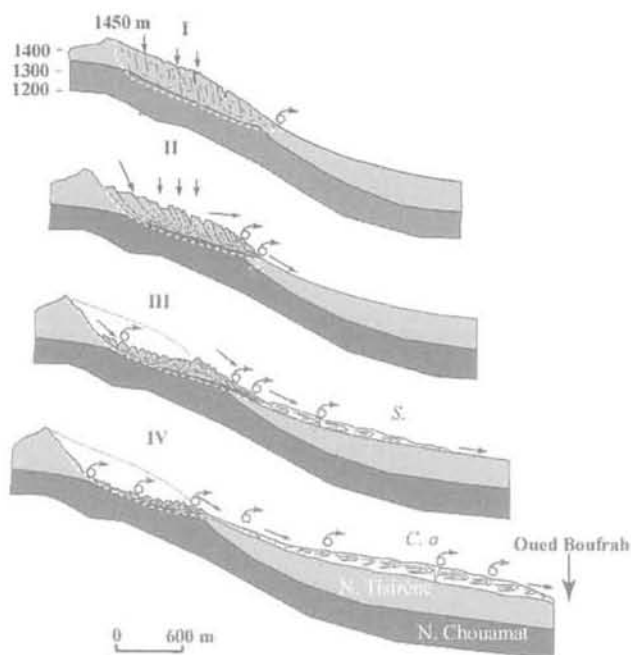


FIG. 6 Illustration d'un glissement situé à l'arrière-pays (inspirée du glissement d'Agni). S : saturation, C. a : coulée active. Section of a landslide situated in the back country (based on the Agni landslide). S : saturation, C. a : active flow.

observations des formations superficielles, de la végétation, de l'hydrologie et de l'hydrogéologie. La dynamique profonde repose sur les mêmes observations que la dynamique superficielle, auxquelles s'ajoutent la lithostratigraphie et la structure géologique.

La distinction des dynamiques des versants et la reconnaissance des types des mouvements sont essentielles pour la suite de l'analyse et pour la modélisation.

Ainsi, dans la région étudiée, il a été démontré (El Khattabi, 2001) que la surface de rupture des glissements se matérialise le long de la zone du charriage tectonique.

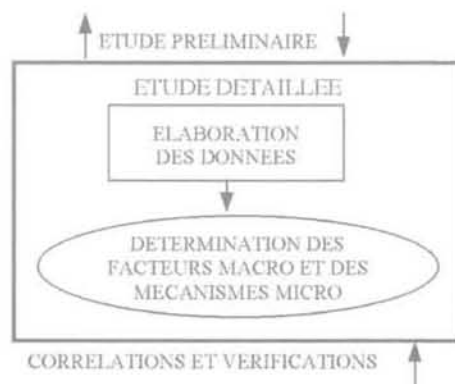


FIG. 8 Schéma de principe de « l'étude détaillée ». The principle of detailed study.

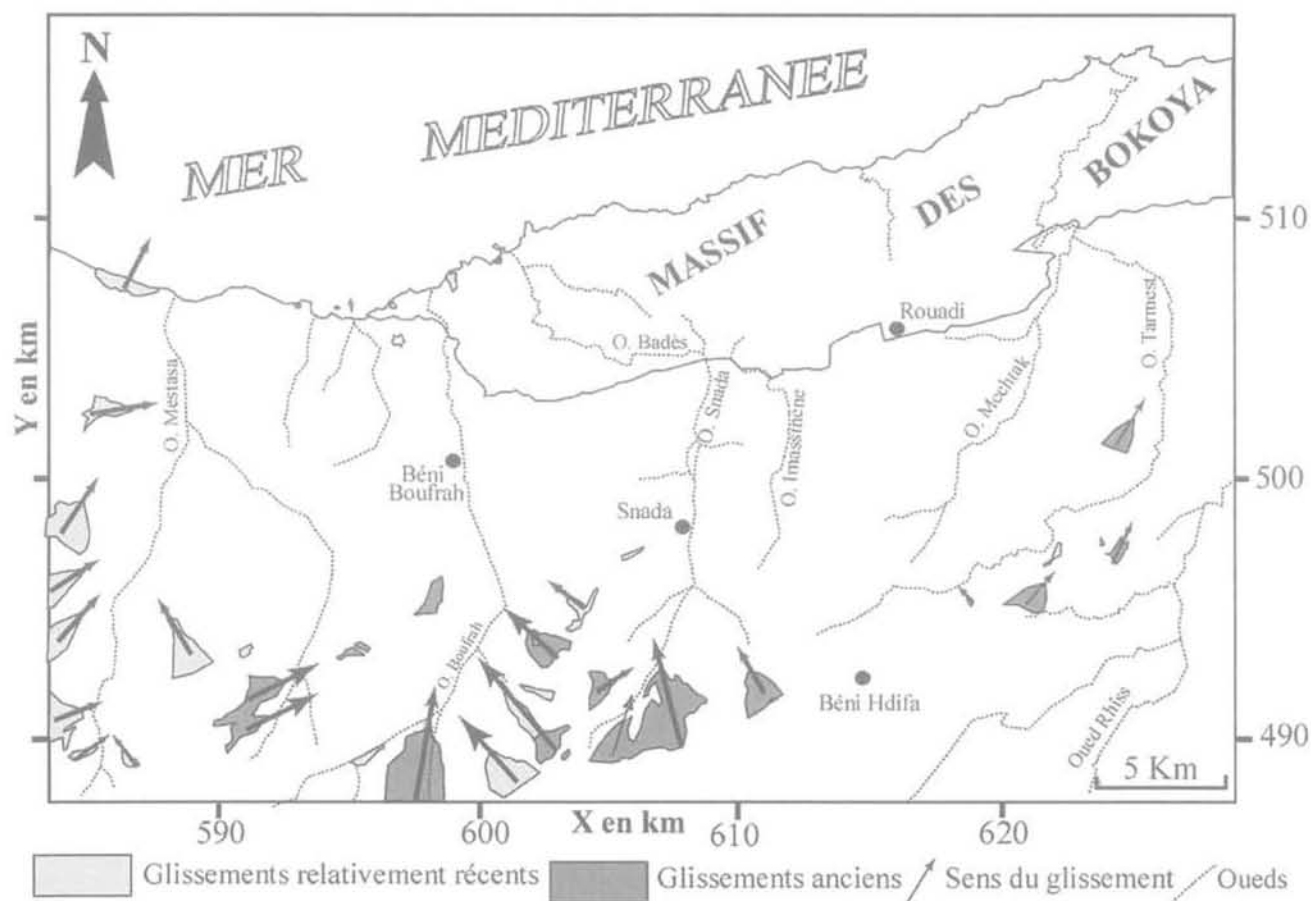


FIG. 7 Répartition géographique des glissements plans profonds dans le Rif central. Geographical breakdown of deep plane landslides in the Central Rif.

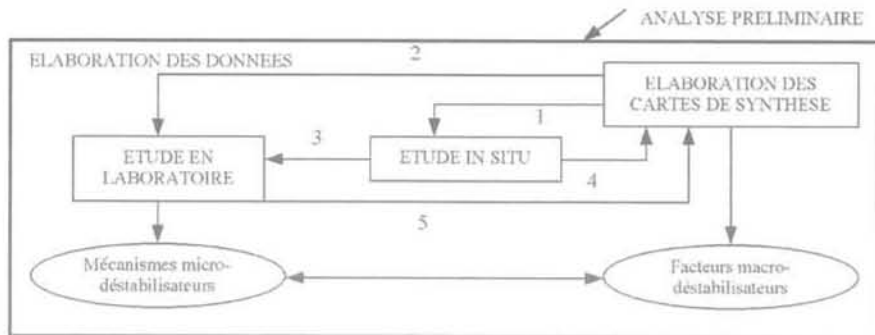


FIG. 9 Élaboration de données.

1 et 2 : permettent de définir une campagne de reconnaissance du site.
 3 : passage vers l'étude en laboratoire : échantillonnage et complément d'information.
 4 et 5 : confortent les résultats et constituent un complément d'information pour l'élaboration des cartes de synthèse.
 Elaboration of data.

Dans le cas du glissement d'Agni, situé à l'arrière pays, le mouvement se transforme en coulée menaçant continuellement les villages sous-jacents. En s'inspirant du modèle établi par Malatrait (1975), nous pouvons suivre sur la figure 6 l'évolution d'un glissement en coulée.

4.1.3

Enquête historique

L'enquête historique a pour objectif d'extraire de la mémoire collective et des sources documentaires (la presse, les archives administratives, la production scientifique) des informations d'ordre régional ou local (Flageollet, 1989).

En raison de l'isolement et de l'ancienneté des mouvements étudiés, l'enquête historique n'a pas révélé d'informations significatives.

4.1.4

Bilan de l'étude préliminaire

Au terme des trois tâches (analyse préliminaire, prospection terrain et enquête historique), une typologie des mouvements et leur localisation géographique peuvent être réalisées. Dans le secteur d'étude, nous avons localisé et cartographié les glissements plans profonds (Fig. 7).

4.2

L'étude détaillée

4.2.1

Principe

L'étude détaillée (Fig. 8) détermine les facteurs macrodéstabilisateurs et les mécanismes microdéstabilisateurs potentiels.

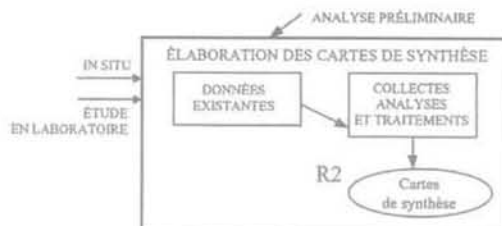


FIG. 10 Schéma de principe de la tâche « élaboration des cartes de synthèse ». The principle of the task : elaboration of synthesis map.

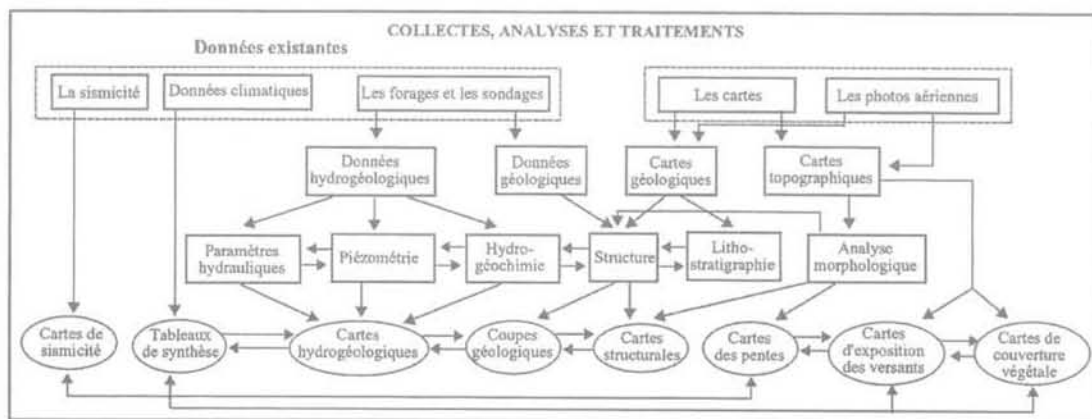


FIG. 11 Détail de la tâche « collectes, analyses et traitements ». Detail of the task : gathering, analysis and processing.

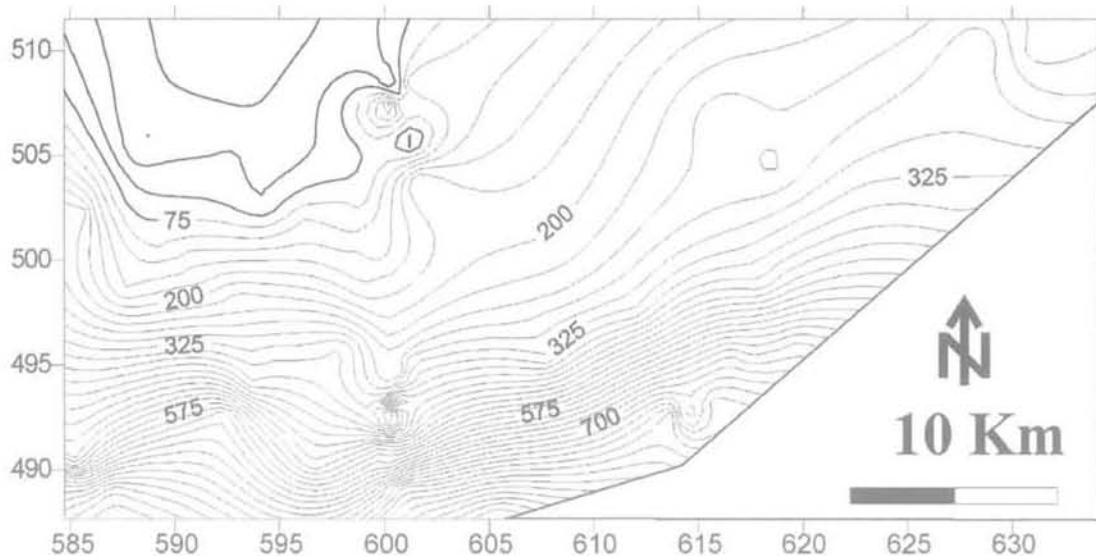


FIG. 12 Carte globale des écoulements souterrains du Rif central.
Global map of underground flow in the Central Rif.

L'étude est constituée de la tâche élaboration des données, qui à son tour se décompose en trois autres tâches étroitement liées (l'élaboration de cartes de synthèse, l'étude *in situ*, et l'étude en laboratoire) et s'appuie sur l'analyse préliminaire (Fig. 9).

Dans un esprit de transversalité, ces éléments de connaissance sont traités de manière complémentaire. Ils participent à des processus fortement itératifs. La tâche élaboration des cartes de synthèse qui détermine les facteurs macrodestabilisateurs, oriente l'étude *in situ* et l'étude en laboratoire. Cette dernière qui dépend de l'étude *in situ*, aboutit à la détermination des mécanismes microdestabilisateurs.

Une confrontation des résultats (facteurs macro et

mécanismes micro) permet de déceler les éventuels liens. Ce choix délibéré de différencier les facteurs des mécanismes, permet d'éviter toute confusion entre le rôle direct d'un facteur et l'ensemble des actions qui lui sont liées. A titre d'exemple, une faille constitue un facteur potentiel d'instabilité; cependant, son rôle ne se justifie pas forcément par son action directe, mais pourrait être lié à des mécanismes dus à la circulation des fluides.

4.2.2

Élaboration des cartes de synthèse

L'élaboration des cartes de synthèse (Fig. 10) aide à la définition des facteurs potentiels d'instabilité et se

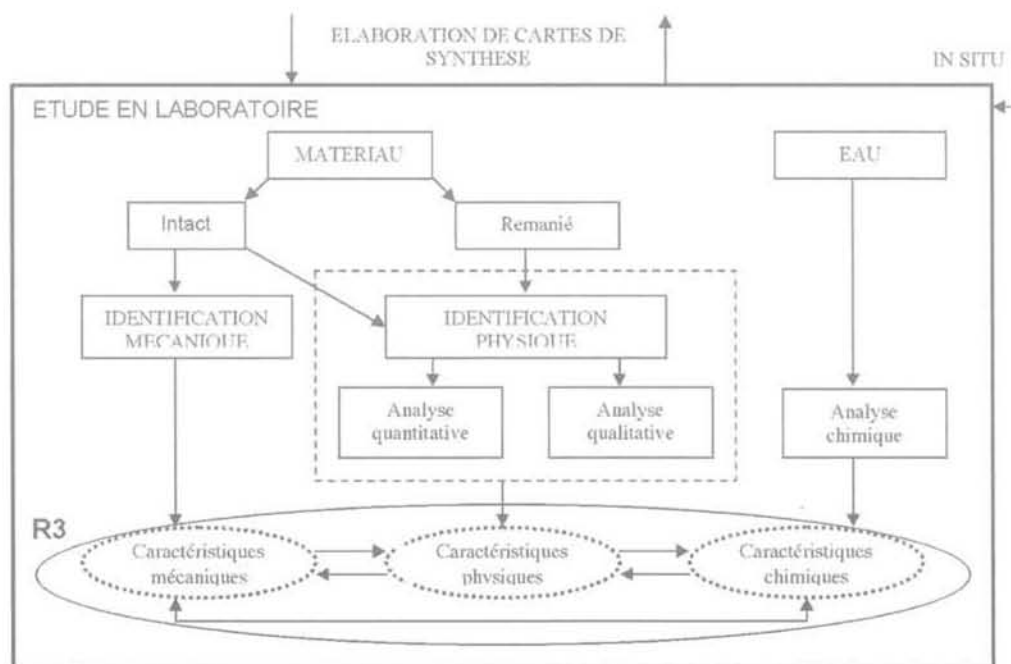


FIG. 13 Schéma de « l'étude en laboratoire ».
The principle of laboratory study.

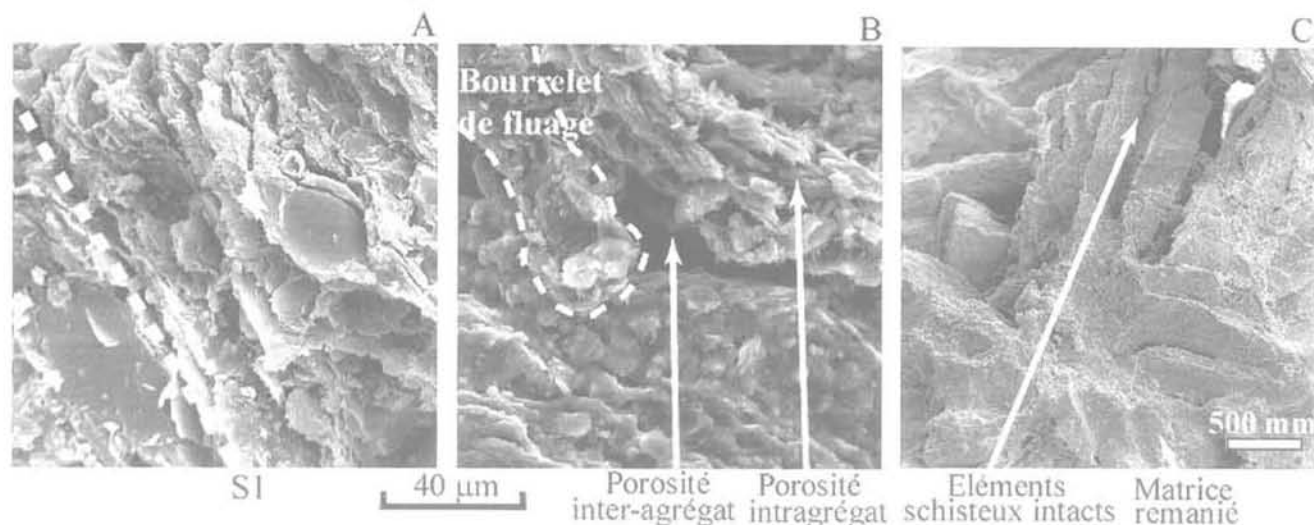


FIG. 14 Différents états des schistes de Chouamat. A : schiste intact (état initial), B : schiste remanié (état final), C : schiste à éléments intacts (état intermédiaire).
Different states of Chouamat schists.

base sur la collecte, l'analyse et le traitement des données existantes (Bouleミア et Boissier, 1993). Elle est en plus renforcée par les résultats obtenus des études in situ et en laboratoire.

La tâche, collectes, analyses et traitements (Fig. 11), repose sur les données existantes (sismicité, données climatiques, données de forages, données de sondages), sur les cartes (topographiques et géologiques) et sur les photos aériennes. Les cartes et les photos aériennes sont issues de l'analyse préliminaire (étude préliminaire).

La tâche, collectes, analyses et traitements, a permis de dégager les facteurs d'instabilités des glissements plans dans le Rif central. Ces facteurs se résument aux pentes naturelles, aux précipitations, à la sismicité, aux conditions hydrauliques (écoulements souterrains (Fig. 12) et gradients hydrauliques), et à la structure géologique (fracturation et morphologie du charriage tectonique).

4.9.3

Étude in situ

L'étude in situ a pour but de réaliser un échantillonnage pour l'étude laboratoire et un certain nombre d'essais qui constituent la tâche « reconnaissance terrain ». Cette dernière n'est pas indispensable, elle peut être abandonnée en fonction de la disponibilité des données. Elle est constituée de plusieurs tâches dont les mesures de terrain (les orientations des couches géologiques, les paramètres climatiques, la sismicité, les mesures par inclinomètres...), la prospection géophysique, les essais hydrauliques et les essais mécaniques.

L'échantillonnage concerne à la fois les matériaux et l'eau. Dans certains cas, les mouvements de terrain sont liés à la dissolution de couches évaporitiques comme le gypse. Cette dissolution se traduit par un taux élevé de sulfates dans l'eau. L'analyse chimique de l'eau peut être donc un indice de repérage dans l'étude des instabilités.

4.9.4

Étude en laboratoire

L'objectif de l'étude en laboratoire est d'arriver, à travers la caractérisation physique et mécanique des matériaux ainsi que la caractérisation chimique des eaux prélevées, à l'identification des mécanismes générant l'instabilité (Fig. 13), qui interviennent au niveau microscopique, d'où la dénomination *mécanismes microdéstabilisateurs*.

Ensuite, on vérifie le lien entre les diverses caractéristiques : un comportement mécanique peut se justifier par les caractéristiques physiques des matériaux et la composition chimique peut s'expliquer par un lessivage des matériaux.

Dans la région d'étude, la zone du charriage se distingue par un remaniement des schistes. Ce remaniement qui se traduit par un changement d'ordre microstructurel, est le résultat d'une transformation progressive des schistes « intacts » en schistes « remaniés ». L'état final se distingue par la disparition de la schistosité S1 et l'apparition d'une porosité inter- et intragrégat à l'image de celle décrite par Delage (1985) pour les argiles sensibles du Canada (Fig. 14).

Ceci s'accompagne d'une chute des caractéristiques mécaniques (Tableau I) et hydrauliques (perméabilité) de ces matériaux facilitant ainsi la rupture. Du point de

TABLEAU I Quelques caractéristiques mécaniques des schistes de Chouamat (essais CU et CD).
A few mechanical characteristics of Chouamat schists (CU and CD tests).

	Schiste intact		Schiste remanié	
	CU	CD	CU	CD
Type d'essai	CU	CD	CU	CD
Teneur en eau Ww (%)	15	17	16	21
Cohésion (kPa)	Cu = 33	C' = 30	Cu = 44	C' = 13
Angle de frottement (degrés)	$\phi_{CU} = 44$	$\phi' = 39$	$\phi_{CU} = 13$	$\phi' = 25$

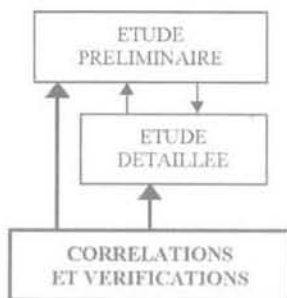


FIG. 15 Schéma de principe des « corrélations et vérifications ».
The principle of correlations and verifications.

vue comportement, les matériaux remaniés sont très sensibles à la présence de l'eau. Ainsi, à l'essai CU le schiste remanié présente une cohésion supérieure à celle du schiste intact; ceci serait lié aux pressions développées par l'eau qui englobe les amas d'agrégats et qui justifie la faible valeur de l'angle de frottement (ϕ_{CU}).

4.2.4

Bilan de l'étude détaillée

Au terme de l'étude détaillée, les facteurs potentiels d'instabilité ainsi que les mécanismes associés sont déterminés. Les différents facteurs correspondent à :

- la sismicité qui se justifie par l'intense activité sismique à laquelle est soumise la région et par la néotectonique décrite par Aït Brahim *et al.* (1990);
- la pluviométrie;
- la pente topographique;
- les conditions hydrauliques, qui concernent les écoulements souterrains et surtout les gradients hydrauliques, très importants au sud (arrière-pays);
- la structure géologique qui se manifeste d'une part par l'intermédiaire d'une fracturation intense dans laquelle interviennent différentes directions et d'autre part, par le pendage du charriage.

La zone de charriage intervient directement dans l'apparition des instabilités. Les matériaux schisteux de Chouamat subissent des transformations d'ordre structural provoquant leur remaniement. Ces changements sont à l'origine d'un affaiblissement des caractéristiques mécaniques et hydrauliques des matériaux. Les mécanismes sont ainsi identifiés. Concernant les facteurs, une corrélation aux glissements est indispensable pour les identifier.

Au stade des corrélations (Fig. 15), les résultats de l'étude détaillée sont superposés à ceux de l'étude préliminaire. Son objectif est d'identifier parmi les facteurs potentiels d'instabilité ceux qui interviennent directement.

4.3

Corrélations et vérifications

Au terme de l'étude détaillée, les facteurs potentiels d'instabilité ainsi que les mécanismes associés sont déterminés. Les différents facteurs correspondent à :

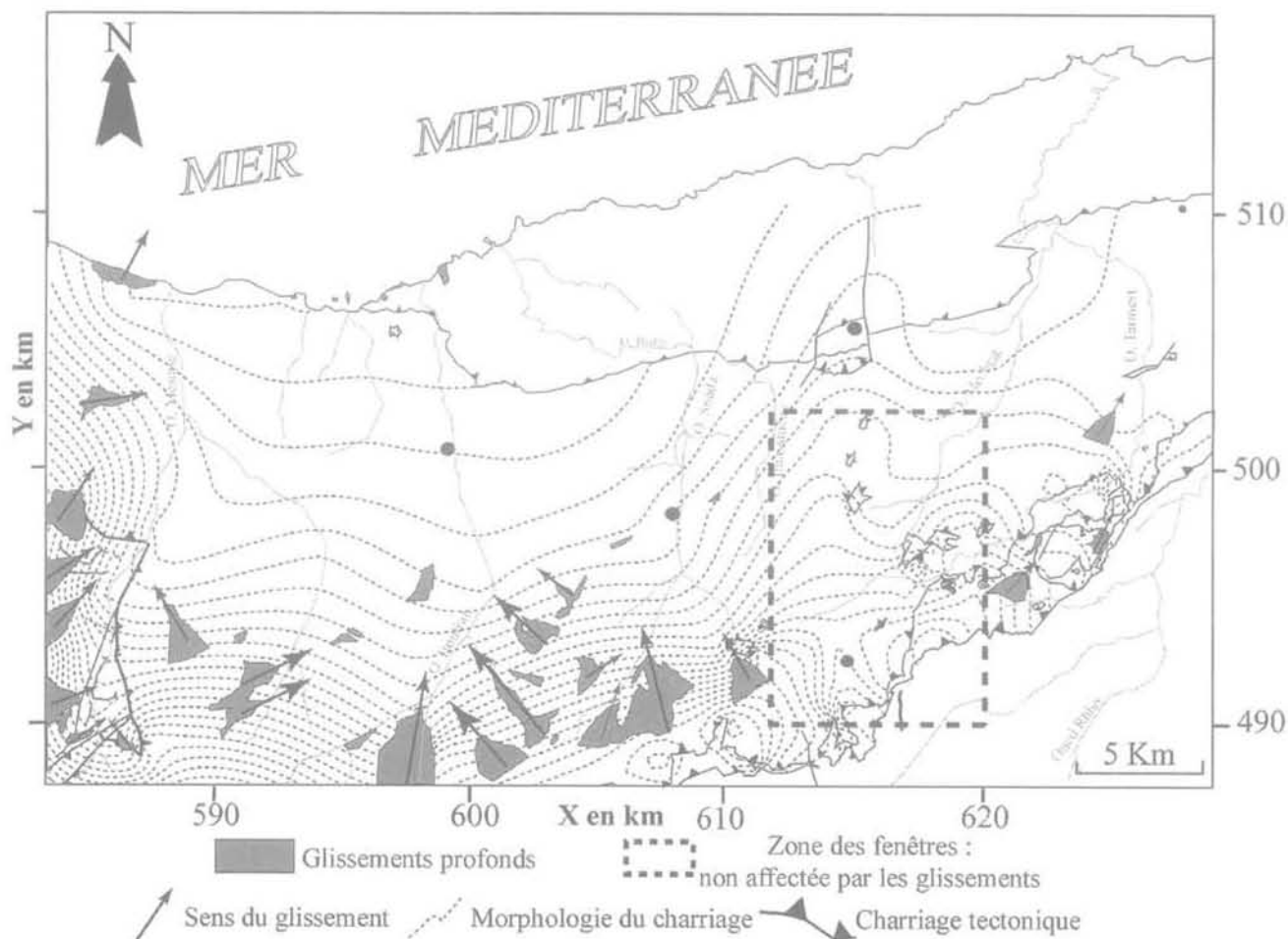


FIG. 16 Corrélation entre les glissements et la morphologie du charriage.
Correlation between landslides and morphological overthrust.

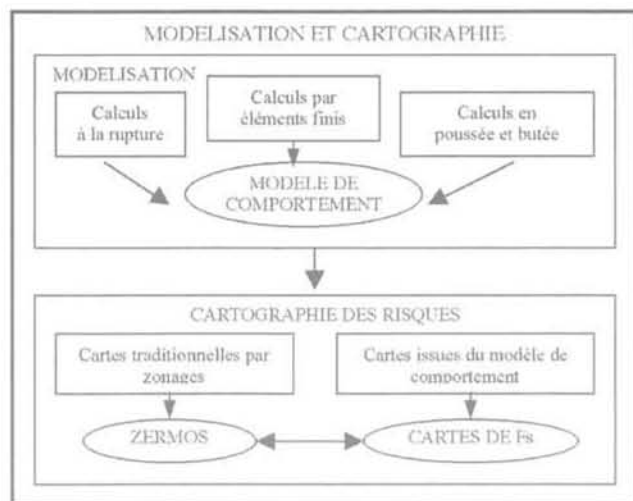


FIG. 17 Schéma de principe de la phase « modélisation et cartographie ». **Fs** : coefficient de sécurité ; **ZERMOS** : Zones exposées aux risques de mouvements du sol et sous-sol. The principle of the modelling and mapping phase.

Le bilan de la confrontation des facteurs à la répartition géographique des glissements plans a permis de révéler ceux qui interviennent directement dans l'instabilité des versants rifains, identifiant ainsi le charriage tectonique comme facteur majeur d'instabilité (Fig. 16). Ce constat est conforté également par les transformations qui s'opèrent à ce niveau.

Finalement on procède à des vérifications qui s'appuient sur des documents existants (analyse préliminaire), élaborés (étude détaillée, par exemple les coupes géologiques) ou elles se font directement sur le site.

5

Modélisation et cartographie

Une fois la genèse des mouvements de terrain comprise à travers l'identification des facteurs d'instabilité et les mécanismes associés, la réalisation d'une modélisation prédictive et d'une cartographie des risques est alors possible (Fig. 17).

La modélisation vise à définir un modèle de comportement à partir de plusieurs types de calculs largement développés : à la rupture (Pilot, 1966), par éléments finis et en poussée et butée.

Les cartes des risques permettent de faire la synthèse de l'ensemble des résultats obtenus. Elles peuvent reposer sur un zonage qui exprime la graduation des zones selon leur degré d'exposition aux risques : les cartes « ZERMOS » (Champetier de Ribes, 1987) ou exprimer les coefficients de sécurité (Lebourg, 2000).

Dans le Rif central, les différents facteurs d'instabilité identifiés lors de l'analyse de l'instabilité ont été intégrés dans un modèle de calcul à la rupture de hauteur finie (Philipponnat et Hubert, 1997). A partir de l'équation globale du coefficient de sécurité (1) des simulations ont été réalisées en tenant compte de la longueur X du glissement et du niveau d'eau hw .

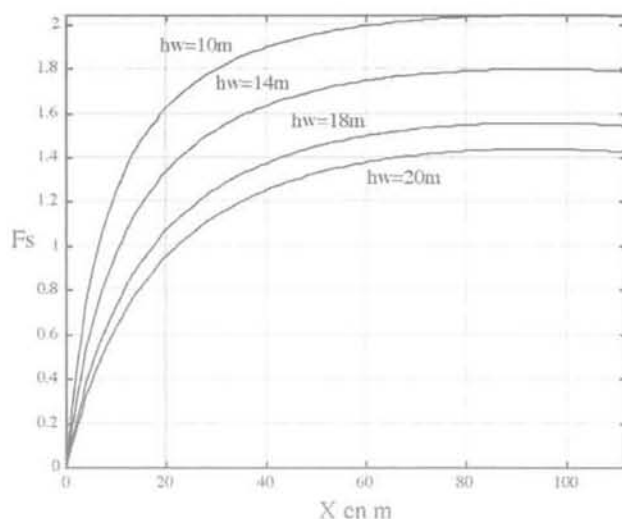


FIG. 18 Évolution de F_s en fonction de X pour un hw , $Z = 40$ m (schiste remanié). Exemple de résultats obtenus pour la zone littorale ($P'p = 0$). Evolution of F_s as a function of X for a hw , $Z = 40$ m (reworked schist). Example of obtained results for the coastal sector ($P'p = 0$).

Le coefficient de sécurité global (F_s) a été déterminé par des approximations successives et s'écrit :

$$F_s = \frac{R + P'p}{T + P'a} \quad (1)$$

avec :

R : force de résistance maximale au cisaillement ;

$$R = \frac{n \cdot b \cdot \left\{ C' \cdot \cos^2 \beta \cdot \tan \phi \left[\gamma \cdot \left(Z - n \cdot \frac{b}{2} \cdot \tan \alpha \right) + hw (\gamma_{sat} - \gamma_w - \gamma) \right] \right\}}{\cos \beta}$$

T : composante tangentielle du poids des terres ;

$$T = n \cdot b \cdot \sin \beta \cdot \left[\gamma \cdot \left(Z - n \cdot \frac{b}{2} \cdot \tan \alpha \right) + h_w \cdot (\gamma_{sat} - \gamma) \right] ;$$

P'_a : force de poussée

$$\frac{1}{2} \cdot \cos \beta^2 \cdot \left[\gamma \cdot (Z - hw)^2 \cdot \tan^2 \left(\frac{\pi}{4} - \frac{\phi}{2} \right) + (\gamma_{sat} - \gamma_w) \cdot hw^2 \cdot \tan^2 \left(\frac{\pi}{4} - \frac{\phi_{sat}}{2} \right) + \gamma_w \cdot hw^2 \right] ;$$

P'_p : force de butée.

$$\frac{1}{2} \cdot \cos \beta^2 \cdot \left[\gamma \cdot (Z - hw)^2 \cdot \tan^2 \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\phi}{2} \right) + (\gamma_{sat} - \gamma_w) \cdot hw^2 \cdot \tan^2 \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\phi_{sat}}{2} \right) - \gamma_w \cdot hw^2 \right] ;$$

et :

ϕ et C : angle de frottement et cohésion de la zone non saturée de Tisirène (respectivement en degrés et kPa) ;

ϕ_{sat} et C_{sat} : angle de frottement et cohésion de la zone saturée de Tisirène (respectivement en degrés et kPa) ;

w : poids volumique de l'eau (kN/m^3).

Les résultats obtenus permettent de compléter ceux de la phase analyse de l'instabilité (phase 1) en distinguant l'ampleur des glissements, plus importante à l'arrière pays qu'au niveau littoral (Fig. 18).

Enfin, nous avons établi plusieurs cartes synthé-

tiques : carte de répartition géographique des glissements plans profonds et cartes des facteurs d'instabilité (les pentes naturelles, les précipitations, la sismicité, les conditions hydrauliques (écoulements souterrains et gradients hydrauliques), et la structure géologique (fracturation et morphologie du charriage tectonique)). Ces cartes constituent une avancée importante.

6

Conclusion

La démarche méthodologique adoptée pour l'analyse des instabilités de versants doit aboutir à une cartographie des risques très complète, nécessaire à tout aménagement. Elle est fondée sur une analyse, menée de manière descendante, hiérarchique et structurée selon cinq étapes (étude préliminaire, étude détaillée, corrélations et vérifications, modélisation et cartographie des risques). A l'intérieur de ces étapes, ont été associés tous les éléments de connaissance provenant de diverses spécialités que l'on classe traditionnellement en deux grandes approches : naturalistes et mécaniciennes. Dans un esprit de transversalité, ces éléments de connaissance sont traités de manière complémentaire. Ils participent à des processus fortement itératifs.

La méthodologie conduit à l'élaboration de cartes

synthétiques essentielles à l'identification des facteurs d'instabilités. Les résultats intermédiaires de la démarche orientent le travail de modélisation en l'optimisant. Cette démarche contribuera à la prévention des risques par l'élaboration de cartes basées non seulement sur le croisement de facteurs, mais aussi sur l'utilisation d'indicateurs d'instabilité. Ce type de document devra concourir à la réalisation des plans d'aménagement des sites en milieu urbain et rural.

Pour valider la démarche, nous avons choisi comme site d'expérimentation la région nord du Rif central. Cette région se distingue par la multitude des phénomènes d'instabilités qui perturbent constamment l'habitat et les réseaux routiers. Les résultats obtenus par application de la démarche ont été très riches et ont permis de comprendre la genèse des mouvements de terrain. Plusieurs facteurs macrodéstabilisateurs ont été identifiés dont le charriage tectonique qui constitue une zone de faiblesse majeure à l'origine des glissements plans profonds. Dans cette zone, les mécanismes microdéstabilisateurs sont liés aux changements d'ordre microstructurel des matériaux schisteux. Ces changements provoquent la chute des caractéristiques mécaniques et hydrauliques de ces matériaux.

Ces conclusions permettront, lors des aménagements futurs, d'éviter ces zones à risques et/ou de cibler les interventions pour les prévenir.

Bibliographie

- Aït Brahim L., Chotin P., Tadili B., Ramdani M. – « Failles actives dans le Rif central oriental (Maroc) ». *Comptes rendus de l'Académie des sciences*, Paris, Tome 310, Série II, 1990, p. 1123-1129.
- Andrieux J. – *La structure du Rif central : étude des relations entre la tectonique de compression et les nappes de glissement dans un tronçon de la chaîne alpine*. Notes et Mémoires du Service géologique du Maroc, n° 235, Rabat, 1971, 152 p.
- Andrieux J., Mégard F. – *Carte géologique : Feuille de Béni Boufrah (Maroc) au 1/100 000*. Sous-Secrétariat d'État au Commerce, à l'Industrie, aux Mines et à la Marine marchande, Direction des mines et de la géologie, Division de la géologie, Éditions du Service géologique du Maroc, Notes et Mémoires n° 217, 1973.
- Antoine P., Pachoud A. – « Enseignements tirés de deux essais de cartographie systématique de glissements de terrain ». *Bulletin de liaison des laboratoires des ponts et chaussées*, Stabilité des talus, 1 : Versants naturels, Numéro spécial II, 1976, p. 31-39.
- Besson F. – *Étude géologique et structurale des nappes de flyschs et des zones externes dans la région de l'oued Rhiss (Rif central, Maroc)*. Thèse d'Université d'Orsay, Paris, 1984, 190 p.
- Bogaard T.A., Antoine P., Desvarreux P., Girraud A., Van Asch T.W.J. – « The slope movements within the mondorès graben (Drôme, France); the interaction between geology, hydrology and typology ». *Engineering Geology*, n° 55, 2000, p. 297-312.
- Boissier D., Henry E., Boulemia C. – « Aide à la conception de fondations de bâtiments : un modèle d'expertise ». *Revue française de génie civil*, 1999, p. 267-294.
- Boulemia C., Boissier D. – « Applications intégrées autour d'une base de connaissances sur le sol ». 4^e Conférence européenne sur les applications de l'intelligence artificielle, de la robotique et de l'imagerie en architecture. Construction, Génie civil et Urbanisme, Delft, Hollande, 21-24 juin 1993.
- Boulemia C. – *Contribution à la prise en compte du sol pour la conception des infrastructures : le système à base de connaissances KBSOL*. Thèse de doctorat de l'Université de Lille I, 1992, 198 p.
- Champetier de Ribes G. – « La cartographie des mouvements de terrain : des ZERMOS aux PER ». *Bulletin de liaison des laboratoires des ponts et chaussées*, Risques naturels, n° 150-151, juillet-octobre 1987, p. 9-19.
- Delage P. – « Microstructure et sensibilité des argiles sensibles de l'Est de Canada. Micromorphologie des sols ». Actes de la VII^e Réunion internationale de micromorphologie des sols, Paris, 1985, p. 487-492.
- El Khattabi J. – *Démarche méthodologique pluridisciplinaire intégrant une approche transversale pour l'étude des instabilités de versants : application aux versants du Rif central (Maroc)*. Thèse de l'Université d'Artois, 2001, 258 p.
- Flageollet J.C. – *Les mouvements de terrain et leur prévention*. Collection géographique, 1989, 224 p.
- Lebourg T. – *Analyse géologique et mécanique de glissements de terrain dans des moraines des Pyrénées centrales et occidentales*. Thèse de doctorat en géologie appliquée, Université de Bordeaux I, 2000, 276 p.
- Lissandre M. – « La méthode SADT. Génie logiciel n° 4 ». *Informatique de gestion : les méthodes*, 1986, p. 58-62.
- Maltraït A.M. – *Mouvements gravitaires dans le territoire couvert par la feuille de Saint-Jean-de-Maurienne (Savoie) au 1/50 000*. BRGM 75, SGN 229 AME, 1975, 218 p.
- Maquaire O., Flageollet J.C., Malet J.P., Schmutz M., Weber D., Klotz S., Albouy M., Descloîtres M., Dietrich M., Guerin R., Schott J.L. – « Une approche pluridisciplinaire pour la connaissance d'un glissement-coulée dans les marnes noires (Super-Sauze, Alpes-de-Haute-Provence, France) ». *Revue française de géotechnique*, n° 95-96, 2^e et 3^e trimestres 2001, p. 7-15.
- Maurer G. – *Carte géomorphologique du Rif central*. Travaux de l'Institut scientifique chérifien, Rabat, Service géographique physique, 1965.
- Millés-Lacroix A. – « Les glissements de terrain, présentation d'une carte prévisionnelle des mouvements de masses dans le Rif (Maroc septentrional) ». *Mines et Géologie*, n° 27, 1968, p. 45-54.
- Philipponnat G., Hubert B. – *Fondations et ouvrages en terre*. Paris, Eyrolles, 1997, 548 p.
- Pilot G. – « Calcul de la stabilité des pentes utilisation de l'ordinateur CAE 510 du Laboratoire central, programme 1.1 et 1.2 ». *Bulletin de liaison des laboratoires des ponts et chaussées*, n° 22, 1966, p. 1-16.
- Rascon R.A. – *Analyse géotechnique des glissements de versants sédimentaires sur des plans de stratification*. Thèse de doctorat de l'Université scientifique, technologique et médicale de Grenoble et l'Institut national polytechnique de Grenoble, 1984, 180 p.
- Van Asch T. W.J. – *Water erosion on slopes and landsliding in a mediterranean landscape*. Thesis, Rijksuniversiteit te Utrecht, 1980, 237 p.