

Modélisation par éléments distincts du phénomène de fauchage gravitaire. Application au glissement de La Clapière (Saint-Étienne-de-Tinée, Alpes-Maritimes)

V. MERRIEN-
SOUKATCHOFF
X. QUENOT

Laboratoire Environnement
Géomécanique Ouvrages
École des mines de Nancy
Parc de Saurupt,
54042 Nancy Cedex
Veronique.Merrien@mines.u
-nancy.fr

Y. GUGLIELMI

Équipe d'accueil 2642
« Contraintes, Déformations,
Écoulements »
place Leclerc
25000 Besançon
yves.guglielmi@univ-
fcomte.fr

Résumé

Le mécanisme de fauchage gravitaire est l'un des phénomènes évoqués pour expliquer des glissements dans des roches stratifiées, schistosees ou foliées présentant un pendage opposé à la pente du talus. Ce processus est souvent suggéré comme première étape du développement du glissement de terrain de La Clapière dans les Alpes-Maritimes. Des modélisations numériques par éléments distincts ont été effectuées afin de représenter ce mécanisme. Leur but était d'analyser si ce scénario descriptif et qualitatif était mécaniquement admissible et quelles étaient les conditions dans lesquelles il pouvait se réaliser. Des modèles simples, « conceptuels » du phénomène de fauchage gravitaire sont présentés. Ils permettent de mettre en évidence certaines conditions nécessaires pour amorcer le phénomène de fauchage gravitaire. La modélisation bidimensionnelle, par éléments distincts du site de La Clapière est ensuite exposée. Le mécanisme de fauchage n'a pas pu être simulé sur ce versant avec les paramètres introduits dans le modèle. Cette constatation a conduit à s'interroger sur la légitimité de cette hypothèse.

Mots-clés : talus, stabilité, éléments distincts, fauchage, glissement de terrain, UDEC, basculement en flexion, modélisation numérique, La Clapière.

Modeling by distinct elements of gravitational toppling mechanism. Application to the modeling of the landslide of La Clapière (Saint-Étienne-de-Tinée, Alpes-Maritimes)

Abstract

The mechanism of gravitational toppling is often mentioned to explain movements in layered, schistose or foliated rocks with respectively bedding planes, schistosity or foliation dipping steeply into the slope. This mechanism is in particular suggested as the beginning of the « La Clapière » landslide situated in the south part of the Alpes. Distinct elements numerical modelling was carried out in order to represent this mechanism. The aim

Introduction

L'étude des glissements de terrain permet d'identifier des mécanismes d'instabilités récurrents. Le fauchage gravitaire est l'un des scénarios de rupture de grands volumes de versants montagneux que l'on retrouve invoqué fréquemment. C'est le mécanisme, par exemple, proposé comme origine de glissements de terrain alpins de plusieurs millions de m³ comme le glissement du Billan (Isère) situé en rive droite du barrage de Grand-Maison dans le massif de Belledonne, le glissement du Villaret (Isère) situé au-dessus du bassin inférieur de l'aménagement de Grand-Maison (Besson, 1996) et le glissement de La Clapière dans la vallée de la Tinée (50 millions de m³, Follacci, 1988), que nous détaillerons plus loin. Il est également cité par Hoek (1999) comme étant à l'origine de désordre dans le tunnel du projet hydroélectrique du Wahleach, en Colombie Britannique (Canada).

Plus généralement, le fauchage est mentionné comme un trait caractéristique des versants montagneux récents où il semble avoir été provoqué par le retrait glaciaire quaternaire. C'est le cas du fauchage de Goms dans les Alpes suisses (Schindler, 1988). La plupart des versants qualifiés de « fauchés » présentent une rupture de pente qui, dans le cas des vallées alpines, correspondrait à la limite de l'entaille du glacier quaternaire. Les parties basses des versants présentent donc une pente plus raide que les parties hautes. Cette géométrie schématiquement biplanaire serait à l'origine de la déstabilisation et du fauchage de l'ensemble du versant à la fonte du glacier (Agliardi *et al.*, 2001).

Le phénomène de fauchage gravitaire apparaît dans des pentes traversées par des discontinuités (plans de stratification, schistosité, foliation ou fractures) plongeant vers l'intérieur du talus. L'expression « fauchage gravitaire » est utilisée pour différencier des basculements dus exclusivement à la gravité de variations de pendage liées à des mouvements tectoniques. Goodman et Bray cités par Hoek et Bray (1981) distinguent (Fig. 1) le basculement par flexion (*flexural toppling*), le basculement de blocs (*block toppling*) et le basculement par flexion composée de blocs (*block flexure toppling*). Tous ces basculements affectent des pentes constituées de colonnes rocheuses (bancs, macrolithons, espaces entre deux fractures) séparées par des discontinuités ayant un fort pendage vers l'intérieur du talus. Le basculement par flexion (*flexural toppling*) est amorcé par une sape du pied du talus et il affecte des colonnes rocheuses continues qui se rompent lorsque le fléchissement des colonnes devient important. Le

of these simulations was to analyse if the descriptive and qualitative scenario put forward was mechanically acceptable and what were the conditions under which it could have occurred. Initially, simplified « conceptual » models of gravitational toppling are presented. They highlight some of the conditions required to start the gravitational movement. Two-dimensional modelling of the site is then presented. With the geometrical and geotechnical parameters introduced, it was not possible to simulate a toppling phenomenon. This outcome led to the reconsideration of this hypothesis.

Key words : slope, stability, distinct elements, toppling, landslide, UDEC, flexural toppling, numerical modelling, La Clapière.

fauchage progresse par régression dans le massif. Le basculement de blocs (*block toppling*) concerne des colonnes découpées par une famille de joints espacés et perpendiculaires à la colonne. Le découpage de la colonne en gros blocs permet la rotation de ces blocs. Les blocs de pied de talus sont poussés par le poids des colonnes sus-jacentes et leur glissement permet au mouvement de se propager de manière régressive. Ce type de basculement est caractérisé par des contre-pentes liées au basculement des blocs. Enfin le basculement par flexion composée de blocs (*block flexure toppling*) correspond à une pseudo-flexion le long de colonnes rocheuses découpées par de nombreux joints. Il ne s'agit pas d'une flexion pure, mais d'une somme de petits déplacements le long des joints recoupant la colonne. Le déplacement global du versant est la résultante de petits mouvements. Dans ce type de basculement, contrairement au basculement par flexion, il y a peu de zones en traction et beaucoup moins de contre-pente que dans un basculement de blocs.

Des calculs analytiques du phénomène de basculement ont été proposés par Goodman et Bray (1976), Lee (1999), Bobet (1999). Ils sont appropriés au mécanisme de basculement de blocs et prennent en compte les paramètres géométriques et de résistance du matériau. Ils supposent l'existence d'une surface de discontinuité en échelon (base de la succession de blocs) à une certaine profondeur dans le talus et reposent sur des calculs à l'équilibre limite. Dans ces calculs, la surface basale de discontinuité est choisie *a priori* et sa position conditionne le calcul de stabilité. Scavia (1990) a proposé une amélioration de la méthode en générant cette surface et l'orientation des discontinuités de manière aléatoire par une méthode de Monte Carlo. Les conditions de stabilité sont alors évaluées par la probabilité de rupture du talus. Adhikary *et al.* (1996, 1997) ont modélisé le phénomène de basculement par flexion à partir d'un modèle en éléments finis continu homogénéisé basé sur un modèle de Cosserat (1909). Ce modèle reproduit bien les déplacements mesurés dans un modèle physique de talus réalisé en centrifugeuse, mais n'est valide que pour des faibles déplacements (du même ordre de grandeur que l'épaisseur des couches). Il ne permet pas de reproduire des basculements importants, mais les zones de traction maximale dans le modèle numérique correspondent à des fractures planes observées dans le modèle physique en centrifugeuse. Les auteurs remarquent que la distribution des contraintes obtenues dans le modèle numérique par éléments finis permet de considérer que les analyses à l'équilibre limite, qui supposent l'existence d'une discontinuité basale, donnent de relativement bonnes prévisions du phénomène de rupture. Le modèle de Cosserat impose pour cette modélisation bidimensionnelle,

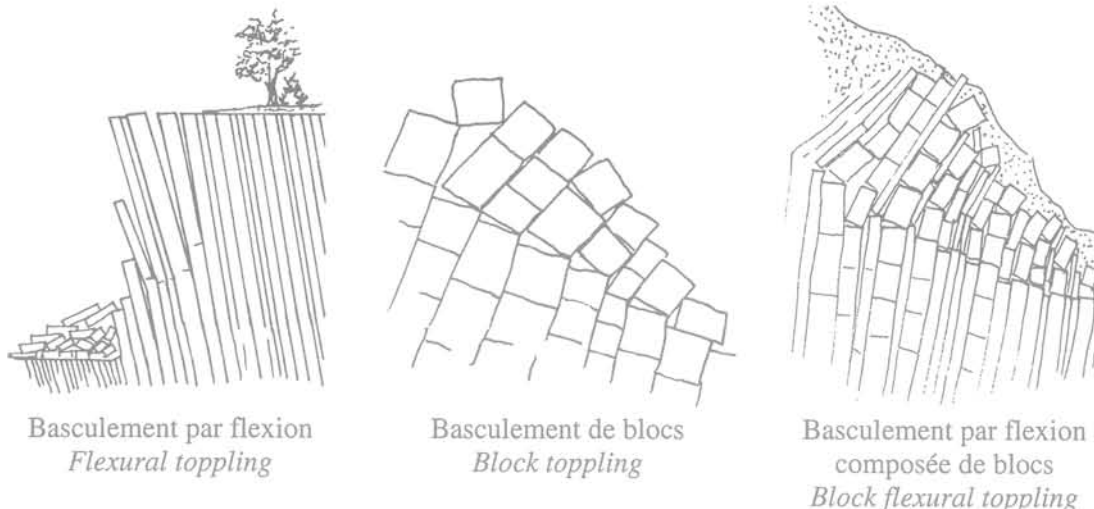


FIG.1 Différents types de basculement d'après Hoek et Bray (1981).
Different types of toppling failure, according to Hoek and Bray (1981).

l'hypothèse d'un état de contraintes planes alors que généralement les calculs bidimensionnels de stabilité de talus considèrent un état de déformations planes.

Des modélisations par éléments distincts du mécanisme de basculement par blocs ont été proposées par Cundall (1971). Ces modélisations qui sont les premières réalisées par la méthode des éléments distincts, considéraient les blocs comme indéformables. Alfonsi *et al.* (1998) présentent également des modélisations par bloc en introduisant des discontinuités régulièrement espacées, perpendiculaires à la direction majeure de discontinuités.

Pritchard et Savigny (1990) ont réalisé des modélisations par éléments distincts cherchant à reproduire un mécanisme de basculement par flexion. Leurs modélisations sont comparées aux solutions à l'équilibre limite proposé par Goodman et Bray (1976), à des modèles réduits réalisés sur table à frottement, puis aux observations réalisées sur le site de la Mine Brenda au Canada. La comparaison avec les modèles réduits montre que les zones où le critère de rupture est dépassé en compression ou en traction dans le modèle numérique correspondent à la zone basculée dans le modèle réduit. Pour le site minier de Brenda, l'utilisation de différentes caractéristiques mécaniques pour la matrice rocheuse et les joints permet, selon les auteurs, de reproduire 2 types de mécanisme : un basculement par flexion et un basculement qualifié de « en graben ». Les comparaisons par rapport au site restent qualitatives, mais le modèle numérique permet d'identifier l'angle de frottement maximal des joints qui conduit à la rupture.

Nous présentons ici, dans une première partie, des modélisations par éléments distincts mises en œuvre pour analyser les conditions géométriques et mécaniques pour lesquelles le basculement par flexion peut se réaliser et dégager les paramètres principaux à l'origine du fauchage. Dans une deuxième partie, nous utilisons les modélisations numériques pour analyser la pertinence (géométrique et mécanique) de ce scénario dans le cas du versant de La Clapière qui est généralement considéré comme un cas typique de fauchage en masse (Follacci, 1988).

2

Analyse du mécanisme de fauchage gravitaire par modélisation : approche paramétrique

Les modélisations effectuées cherchent à reproduire les conditions d'un phénomène de fauchage par flexion dans un cas simplifié. Bien qu'elles soient conceptuelles et en partie applicables à ce mécanisme d'une manière générale, elles ont été induites par le glissement de La Clapière : certaines caractéristiques géométriques et mécaniques sont donc inspirées par ce site que nous décrirons plus loin.

2.1

Type de modélisation entreprise : les éléments distincts et le code UDEC

La modélisation par éléments distincts (qui permet de prendre en compte des discontinuités de manière explicite et des grands déplacements au niveau de ces discontinuités) a semblé la plus apte à reproduire ce type de phénomène réglé par la présence de discontinuités de pendage opposé à la topographie. Le logiciel utilisé est le code bidimensionnel UDEC. Ce code présente en outre l'avantage de permettre de prendre en compte ultérieurement le rôle de l'eau et, en gardant le même principe, de passer à une géométrie tridimensionnelle avec le code 3DEC. UDEC modélise le massif rocheux sous forme d'un assemblage de blocs séparés par des joints déformables. Dans nos modélisations, les blocs sont considérés comme déformables avec un comportement élasto-plastique. Le comportement des joints est élasto-plastique avec un critère de rupture de Mohr-Coulomb. Leur déformabilité en élasticité est caractérisée par une raideur normale k_n et tangentielle k_s qui sont constantes dans les modèles réalisés.

Le calcul effectué par le code UDEC est basé sur

une solution mécanique explicite (Cundall 1988). Il s'effectue selon une procédure séquentielle d'incrémentations de déplacements et de contraintes en fonction d'un temps fictif (représenté par le nombre de cycles de calcul) en réponse à un chargement imposé à l'assemblage de blocs. Si les déplacements et les contraintes se stabilisent après un certain nombre de cycles de calcul, l'équilibre mécanique est atteint et le modèle est qualifié de « stable ». Dans le cas contraire, le modèle est instable, et les déplacements obtenus au bout d'un certain nombre de cycles correspondent à un état instable possible : les déplacements reproduits par le modèle seront probablement rencontrés au cours du déroulement du phénomène dans le temps, mais la méthode ne garantit pas l'unicité de cette solution.

2.2

Présentation des modèles réalisés

La représentation réalisée est bidimensionnelle et considère un massif de 100 mètres de haut et de large recoupé par un talus de pente constante α . Le massif est constitué de « colonnes » d'épaisseur constante (Fig. 2). Tous les blocs rocheux et les joints ont les mêmes caractéristiques mécaniques. Les déplacements verticaux sont bloqués à la base du

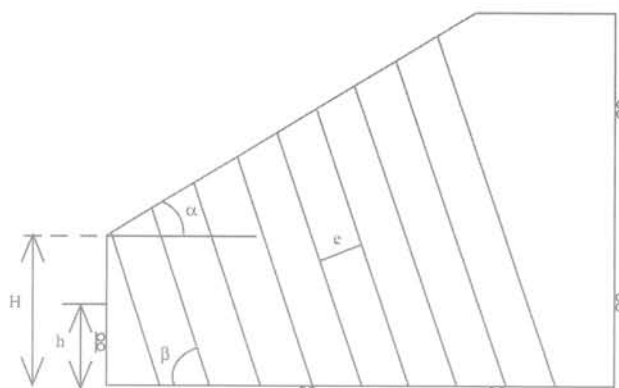


FIG.2 Dimensions géométriques du modèle conceptuel simple.

Geometrical dimensions of the simple conceptual model.

modèle. Les déplacements horizontaux sont bloqués sur le côté droit du modèle et sur le côté gauche jusqu'à la hauteur h (Fig. 2). La hauteur $H-h$ est laissée libre et correspond à la zone « déconfinée » du massif par laquelle se produit l'« appel au vide » qui initie le mouvement. Les paramètres susceptibles de varier sont :

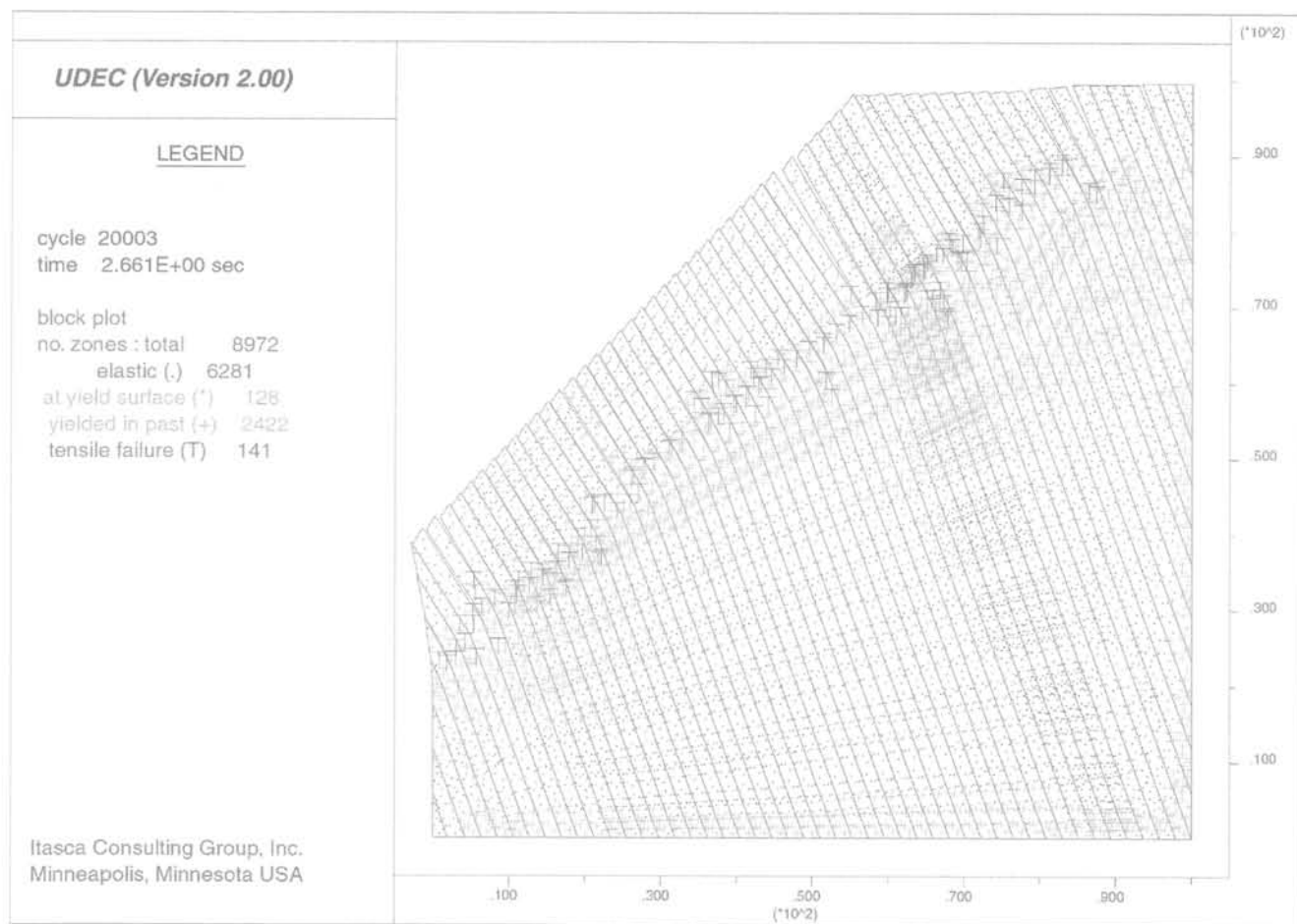


FIG.3 Exemple de cas instable. Caractéristiques géométriques (geometrical characteristics) : $e = 2$ m, $\alpha = 45^\circ$, $\beta = 70^\circ$, $h = 20$ m; $H = 40$ m
Propriétés du matériau rocheux (Block properties) : $E = 20$ GPa, $\nu = 0,2$, $R_t = 1$ MPa, $C = 1$ MPa, $\varphi = 30^\circ$
Caractéristiques des joints (joints parameters) : $K_n = 10^3$ MPa/m, $K_s = 10^2$ MPa/m, $C = 0$, $\varphi = 30^\circ$, $R_t = 0$
Example of an instable case.

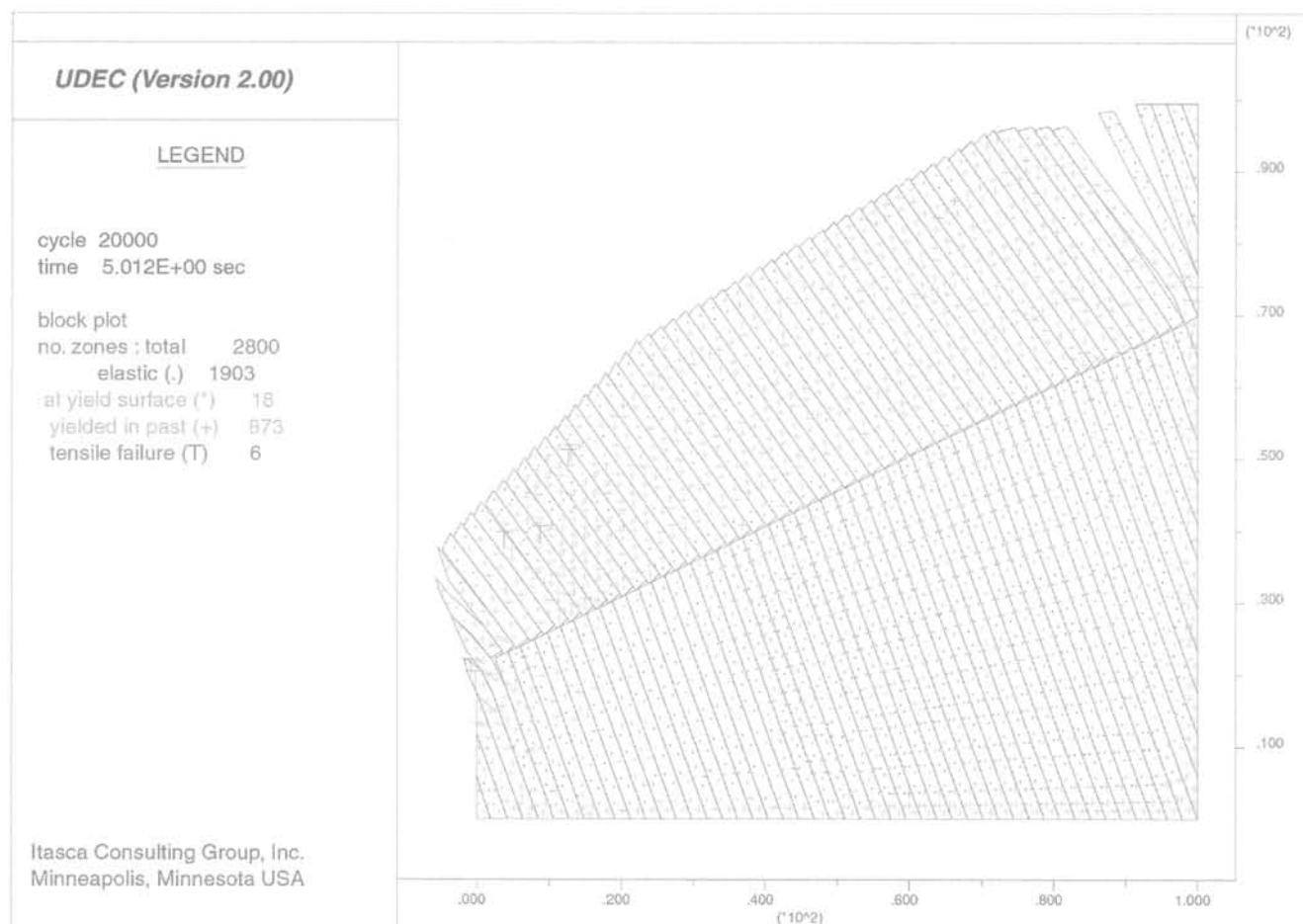


FIG.4 Cas instable avec fracture médiane. Caractéristiques géométriques (geome-trical characteristics) : $e = 2$ m, $\alpha = 45^\circ$, $\beta = 70^\circ$, $h = 20$ m, $H = 40$ m
Propriétés du matériau rocheux (Block properties) : $E = 20$ GPa, $\nu = 0,2$, $R_t = 1$ MPa, $C = 1$ MPa, $\phi = 30^\circ$
Caractéristiques des joints (joints parameters) : $K_n = 10^3$ MPa/m, $K_s = 10^2$ MPa/m, $C = 0$, $\phi = 30^\circ$, $R_t = 0$
Instable case with a median fracture.

- la pente topographique α (des valeurs comprises entre 30° et 45° ont été testées) ;
 - le pendage des discontinuités β (des valeurs comprises entre 60° et 80° ont été examinées) ;
 - les caractéristiques mécaniques des « colonnes » (E , ν , R_t , C , ϕ). Seules quelques valeurs alternatives des propriétés des « blocs » et des joints ont été testées dans une gamme de valeurs compatible avec un matériau de socle. Dans la plupart des modèles, la valeur du module d'Young E a été fixée à 20 GPa. Dans quelques cas, des valeurs alternatives de 2, 16, 24, 40 GPa ont été considérées. Le coefficient de Poisson a été fixé à 0,2, la cohésion et l'angle de frottement ont été pris respectivement égaux à 1 MPa et 30° ;
 - les caractéristiques des joints (K_n , K_s , R_t , C , ϕ). Dans la plupart des modèles, les valeurs fixées pour les raideurs sont $K_n = 10^3$ MPa/m, $K_s = 10^2$ MPa/m. La cohésion varie entre 0 et 1,5 MPa, l'angle de frottement entre 20° et 30° ;
 - l'épaisseur e des « colonnes » (l'espacement des joints). Quatre éventualités ont été testées : 1 m, 2 m, 3 m, 5 m ;
 - trois hauteurs de la zone déconfinée ($H-h$) ont été examinées : 0, 20 et 40 m, avec une hauteur H de 40 mètres.
- Les calculs réalisés ont permis d'appréhender les conditions nécessaires au déclenchement de la mobilité.

L'instabilité repose sur trois conditions principales : l'existence d'une zone déconfinée, un espacement des joints faibles (≤ 3 m) et des caractéristiques des joints faibles (C et $R_t < 0,01$ MPa). Dans tous les modèles, il est cependant difficile de reproduire un basculement important des colonnes rocheuses. En effet, la colonne étant représentée comme un élément continu, elle ne peut subir que de petites déformations. Des hypothèses supplémentaires seraient nécessaires pour reproduire le fauchage.

La figure 3 présente le cas d'un modèle instable au bout de 20 000 cycles de calcul. On remarque que la zone de courbure maximale des bancs est en plasticité. Dans le modèle, seul un critère de plasticité peut être introduit (il n'est pas possible de simuler une rupture), alors que le mécanisme décrit par Hoek et Bray (1981) considère qu'il se produit une rupture par flexion.

A partir de ce modèle de base très simple, des calculs complémentaires ont été effectués pour d'une part provoquer un basculement plus important des colonnes rocheuses, d'autre part analyser l'influence de la forme de la zone déconfinée.

Pour provoquer un basculement important, des discontinuités supplémentaires ont été introduites selon trois modalités :

- soit en positionnant une discontinuité au niveau des zones qui sont en plasticité dans le modèle ne comportant que les joints de foliation. Cette discontinuité cor-

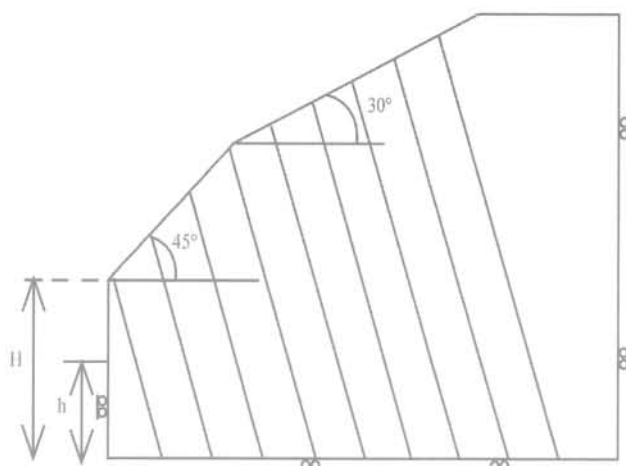


FIG. 5 Modèle biplanaire.
Biplanar model.

respondrait au développement d'une surface de rupture ou d'un ensemble de fractures en échelon ;

- soit des failles verticales en base de versant, qui fragilisent le pied de talus (cette modalité était induite par le cas de La Clapière pour lequel de telles failles existent) ;
- soit les deux (failles verticales et discontinuités dans les zones plastiques).

Dans ces trois cas de figures, la rotation des colonnes rocheuses est plus importante, comme le montre la figure 4 pour le cas d'un modèle avec une discontinuité médiane. Cette constatation semble logique *a posteriori*, mais la modélisation a permis de visualiser ces éventualités. Le calcul numérique a été utilisé ici pour son caractère heuristique : pour tester l'influence de plusieurs types de conditions supplémentaires et suggérer leur existence *in situ*. Il est ensuite nécessaire d'analyser les hypothèses les plus réalistes par rapport au site, car l'adjonction de discontinuités supplémentaires modifie le mécanisme conceptuel modélisé. En effet le phénomène représenté n'est plus une flexion pure, mais se rapproche d'un basculement de blocs.

Quelques calculs ont été réalisés sur des modèles encore relativement simples mais présentant une

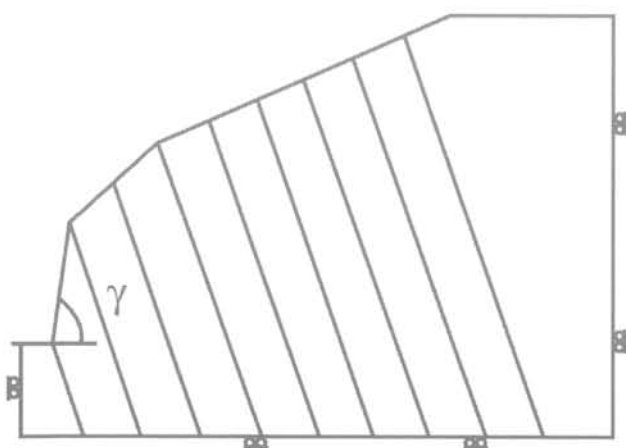


FIG. 6 Modèle de talus biplanaire recoupé par une vallée d'angle γ .
Biplanar model cut by a steep slope (angle γ).

rupture de pente (Fig. 5) car cette configuration favorise *a priori* le mouvement de basculement. Des variantes dans la forme de la zone déconfinée ont été testées (Fig. 6). Notre étude n'a pas été exhaustive, mais les quelques configurations géométriques testées ont servi à confirmer l'importance relative des différents facteurs et la nécessité de quantifier ces valeurs *in situ*. On constate par exemple qu'un modèle présentant une hauteur de déconfinement de 20 m et une pente d'angle $\gamma = 75^\circ$ est stable, alors que pour une hauteur de déconfinement de 50 m et un angle $\gamma = 60^\circ$, le modèle est instable.

2.3

Discussion sur la représentativité des modèles

Les modèles conceptuels simples réalisés ne permettent pas véritablement de reproduire complètement le phénomène de fauchage par flexion. Ils fournissent cependant certaines informations permettant de progresser dans la compréhension de ce mécanisme :

- les modèles stables et instables permettent de séparer les conditions nécessaires au déclenchement du phénomène ;
- les modèles instables reproduisent mal le phénomène puisqu'il est nécessaire de rajouter des discontinuités supplémentaires pour provoquer un basculement important, mais dans ce cas, le mécanisme modélisé n'est plus le même.

Les figures 2 et 3 présentent l'état des modèles après un certain nombre de cycles de calcul. Il est tentant d'assimiler les variations de géométrie présentées par ces modèles à des évolutions dans le temps de la géométrie du massif. Ce sont des variations possibles, mais non certaines. Nous n'avons pas d'arguments pour évaluer la validité d'un état mécanique instable au bout d'un certain nombre de cycles, surtout si cet état montre des grands déplacements.

Dans les modèles présentés, les valeurs de modules d'Young varient entre 2 et 40 GPa (valeurs compatibles avec le matériau de La Clapière) et le basculement des couches n'a pu être obtenu qu'à condition de laisser libre une hauteur importante du modèle (qui a été qualifiée de zone déconfinée). Sjöberg (1999) présente des modèles simulant le basculement pour des discontinuités inclinées à 80° et un angle de talus de 40° , et ne présentant pas de zone de déconfinement. Son article précise qu'une des conditions nécessaires au basculement est une déformabilité importante du matériau, mais la valeur du module d'Young introduite dans le modèle n'est pas précisée.

Notre étude était guidée par le site de La Clapière. La taille du modèle n'est pas représentative des altitudes de ce site, mais un modèle plus large et plus haut aurait conduit à une analyse similaire en adoptant des espacements de joints plus importants. Pour que l'analyse soit plus générale, il aurait été intéressant de définir la géométrie par des paramètres adimensionnels.

Finalement ces modèles simples permettent de suggérer et de tester l'influence de nouvelles hypothèses géométriques et mécaniques. Il s'agit ensuite de vérifier la compatibilité de ces hypothèses avec les observations *in situ*.

La Clapière

Le glissement de La Clapière, situé sur la rive gauche de la rivière Tinée, 1 km en aval du village de Saint-Étienne-de-Tinée (Fig. 7) affecte un versant montagneux (qui culmine à 3 000 mètres d'altitude) entre 1 100 et 1 800 mètres (Fig. 8).



FIG.7 Situation du site de La Clapière.
La Clapière localisation.



FIG.8 Vue sur le glissement de La Clapière en 1998.
La Clapière landslide in 1998.

Présentation du site

La vallée de la Tinée est orientée N140 et le glissement se trouve sur sa bordure est. Schématiquement, le versant présente une pente de 40° à 45° à sa base, puis un épaulement situé 250 m au-dessus de la vallée de la Tinée. En amont de cet épaulement, la pente n'est plus que de l'ordre de 25° (Fig. 9).

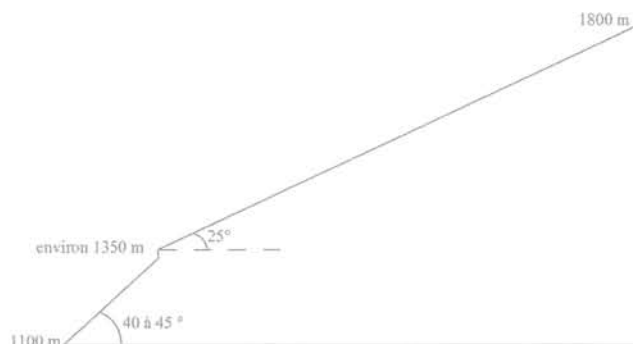


FIG.9 Coupe schématique du versant de La Clapière.
Schematic topographic cross section of « La Clapière » slope.

Le versant est constitué de roches métamorphiques : les gneiss de la série d'Anelle et les migmatites d'Iglière qui sont intercalées dans les gneiss en milieu de versant. La foliation des séries est orientée N140°E en moyenne avec des pendages de l'ordre de 55 à 90° vers le NE.

Trois familles de fractures peuvent être identifiées :

- une famille orientée N140 et subverticale de grands accidents d'extension kilométrique ;
- une famille N35 à 45 qui borde l'Ouest et l'Est du versant instable et délimite différents compartiments dans le glissement ;
- une famille Nord-Sud à pendage Est.

Le versant peut être séparé en trois entités :

- une zone qualifiée de saine où la foliation a un fort pendage vers l'intérieur du versant ;
- une zone « basculée » d'environ 200 m d'épaisseur où le pendage de la foliation diminue pour devenir pratiquement horizontal, mais où les déplacements restent faibles ;
- une zone glissée où la foliation est quasiment horizontale ou renversée et où les déplacements vers la vallée sont importants (ils peuvent atteindre plusieurs dizaines de cm par jour). La zone de glissement correspond à un volume estimé à 50 millions de m³ (Follacci, 1987 et 1999, Interreg 1997) et les vitesses annuelles sont plurimétriques à décimétriques. La zone glissée a progressé horizontalement d'environ 300 mètres à sa base entre 1970 et 2000.

Dans ce glissement, la surface de rupture qui est évaluée entre 60 et 100 mètres (Guglielmi *et al.*, 2001) de profondeur est localisée dans la zone basculée. Des descriptions plus détaillées du glissement ont été réalisées par Follacci (1988), Durville (1992), Programme Interreg (1997), Guglielmi (2000).

TABEAU I Caractéristiques des roches de La Clapière (d'après Serratrice).
Characteristics of the rock material of La Clapière (from Serratrice).

Orientation du chargement par rapport à la foliation	Normale $\perp$	Parallèle //	Oblique
<i>Gneiss d'Anelle</i> Résistance à la compression : Rc (MPa) Résistance à la traction : Rt (MPa)	58,7 8,7	46,9 4,4	23,8 5,0
<i>Migmatites d'Iglière</i> Résistance à la compression : Rc (MPa) Résistance à la traction : Rt (MPa)	110,6 11,7	82,5	74,2 6,8

Il existe très peu de données sur les caractéristiques mécaniques de la roche constituant le versant. Des essais de compression et de traction indirecte (essais brésiliens) ont cependant été réalisés par Serratrice (Interreg, 1997) sur les deux faciès pétrographiques principaux. Ces essais ont été réalisés dans trois directions différentes par rapport à la foliation. Les résistances matricielles de ces roches présentées dans le tableau I sont du même ordre de grandeur que celles proposées par Grolier *et al.* (1991), Jumikis (1983), Jaeger (1978) ou Hoek et Bray (1981) pour ce type de roche.

3.2

Modélisation du site

Un modèle cherchant à représenter le versant de La Clapière a été réalisé. Il s'agissait d'essayer de réaliser un

modèle, compatible avec le scénario d'évolution du versant le plus couramment décrit : partant d'une topographie initiale donnée avec foliation redressée, un basculement de la structure s'est produit, puis un glissement.

La topographie introduite dans ce modèle est une topographie dite « initiale », c'est-à-dire une topographie avant glissement. La topographie initiale réelle est inconnue, mais une topographie plausible a été réalisée en utilisant pour le bas du versant une coupe à l'extérieur du glissement (au nord), pour le haut du versant une coupe au-dessus du glissement, perpendiculaire à la vallée et passant par le milieu du glissement et en raccordant ces deux coupes au mieux, par juxtaposition des parties communes.

Le modèle réalisé représente le versant jusqu'à son sommet pour tenir compte au moins de l'influence de la topographie dans le calcul des contraintes (Merrien-Soukatchoff et Omraci, 2000).

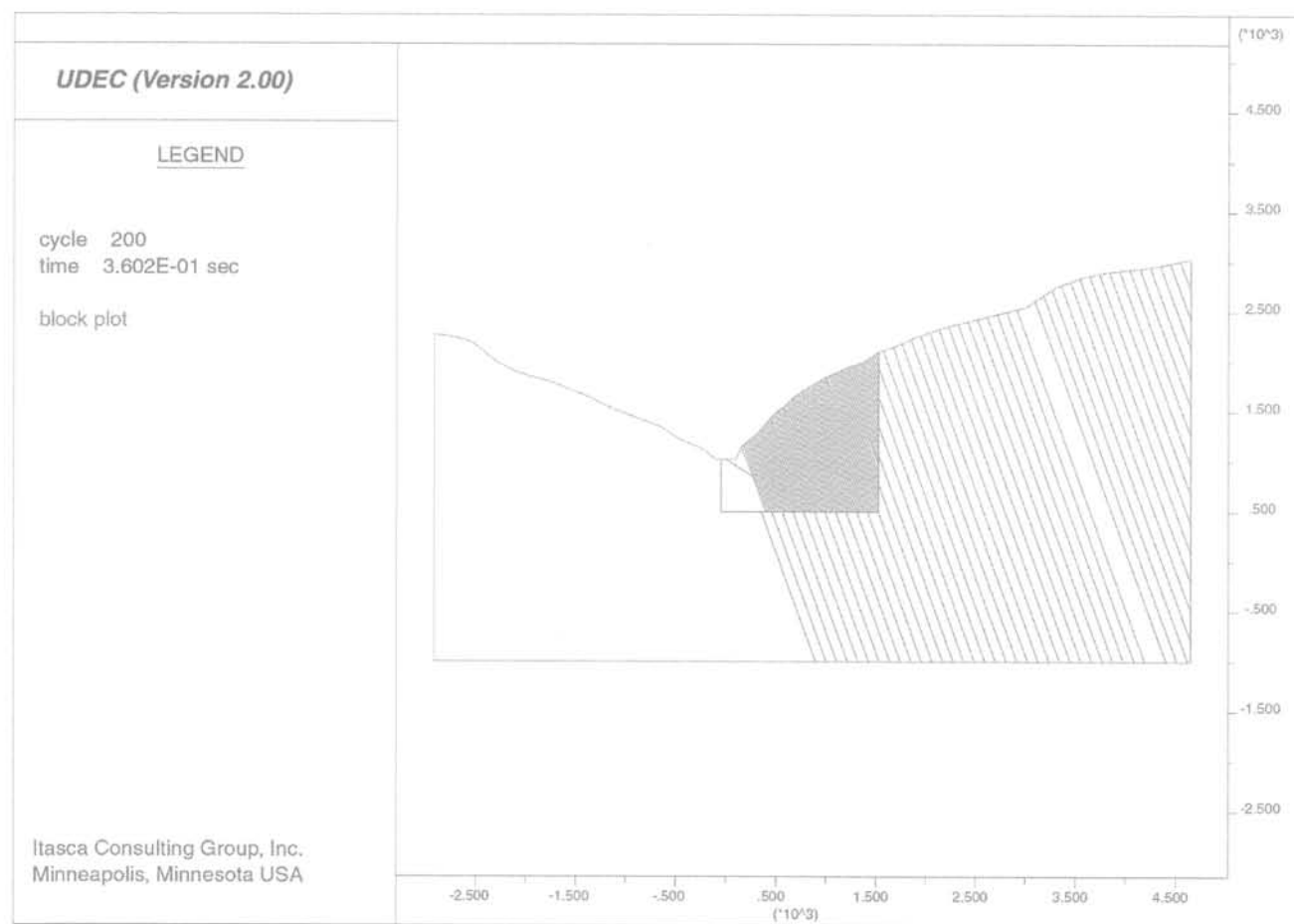


FIG.10 Modèle du versant de La Clapière.
Model of La Clapière slope.

La foliation a été représentée comme un ensemble de discontinuités d'espacement constant. L'espacement d'une foliation est difficile à définir et pour des raisons numériques, l'espacement entre les joints n'a pas pu être très faible (le nombre de blocs dans le modèle devient alors important et l'élancement des blocs nécessite un maillage très raffiné et des temps de calcul très longs). Plusieurs modèles ont été réalisés avec des espacements variables de joints. Pour le modèle présentant la définition la plus fine de l'espacement (Fig. 10), l'espacement entre les joints est de 20 m dans la zone glissée (entre 1 100 et 1 800 mètres d'altitude) et de 100 m dans le reste du modèle.

Compte tenu de l'apprentissage réalisé dans les modèles conceptuels, il paraissait difficile, à partir de cette géométrie, de modéliser le phénomène de fauchage :

- la rupture de pente est relativement faible ;
- la zone déconfinée est pratiquement inexistante ;
- l'espacement des joints est important.

Les modèles réalisés confirment cet *a priori* : ils sont stables.

3.3

Enseignements issus de la modélisation

Le phénomène de fauchage n'a donc pas pu être reproduit par les modèles conceptuels ou ceux représentatifs d'une topographie initiale pour le site de La Clapière, cependant la réalisation de ces modèles a permis de progresser dans l'investigation du site.

Les interrogations soulevées par la difficulté à modéliser le phénomène de fauchage gravitaire ont conduit à réexaminer cette hypothèse. La recherche, sur le terrain, de critères géologiques permettant d'évaluer l'alternative entre un basculement de la foliation de type fauchage gravitaire, et un basculement tectonique plus ancien, est actuellement en cours.

La conceptualisation, la simplification, impliquée par la construction des modèles, obligent à préciser, vérifier, quantifier les hypothèses qualitatives envisagées. Le modèle est ici un moyen supplémentaire « d'investigation » du versant.

Le scénario de fauchage gravitaire, n'est pas exclu par les modélisations mises en œuvre, mais elles conduisent à mieux définir ce scénario. Nous avons, par exemple, exprimé par l'intermédiaire des modèles, la nécessité d'introduire une hauteur de déconfinement suffisante. Il s'agit maintenant de réaliser un scénario qualitatif et quantitatif compatible avec les connaissances géologiques de la vallée de la Tinée. Une hypothèse plausible consiste à considérer que ce déconfinement existait après la période de glaciation, mais qu'actuellement, le remblaiement du pied de versant par les alluvions de la Tinée (estimé à environ 80 mètres de hauteur) l'a fait disparaître. Cette hypothèse pourrait également expliquer que la zone glissée soit située au-dessus de la zone de flexion de la foliation (le remblaiement constituant une butée de pied pour la base du versant). On peut également noter que le rôle de l'eau n'a pas été pris en compte dans ces modèles, alors que les accélérations des mouvements sur ce site sont fortement corrélées aux intempéries. D'après Noverraz *et al.* (1998), la modélisation explicite du rôle des discontinuités montre que, dans certains cas, la déstabilisation d'un versant n'est pas un phénomène « continu »

initié après la relaxation des contraintes postglaciaires et caractérisé par un fauchage évoluant en rupture. Il s'agirait plutôt d'un phénomène brutal déclenché, soit par un changement hydrologique pluriannuel, soit par un séisme. Dans les deux cas, l'impulsion hydraulique ou sismique est transmise au versant via les discontinuités majeures. La modélisation réalisée par Pritchard et Savigny (1990) semble montrer que l'introduction de l'eau dans les modèles ne modifie pas les mécanismes, elle conduit à abaisser l'angle de frottement limite pour lequel les instabilités apparaissent.

Dans les modèles conceptuels instables, la plasticité se localise au niveau de la variation d'inclinaison des colonnes rocheuses, alors que la zone glissée observée à La Clapière se situe au-dessus de la zone de changement de pente de la foliation. Cette constatation et les incertitudes sur la validité du scénario de fauchage gravitaire conduisent à redéfinir les mécanismes et caractéristiques primordiales pour l'évolution du versant. En effet, la méthode des éléments distincts avait été considérée, *a priori*, comme la plus apte à reproduire le phénomène parce que le mécanisme important apparaissait être le basculement, et la caractéristique prédominante, la présence de discontinuités de pendage opposé à la pente du talus. Actuellement, l'origine du basculement est discutée et compte tenu de la difficulté à représenter une structure pénétrative comme la foliation par un ensemble de discontinuités, il paraît plus judicieux de chercher à reproduire le versant par un modèle continu et anisotrope pour comprendre la localisation de la déformation.

Dans la vallée de la Tinée, les instabilités ne se limitent pas au seul site de La Clapière et il existe plusieurs zones de foliation redressée et basculée en bordure de versant (par exemple : cime de Sespoul, site du pont du Riou-Sourd). L'abondance de cette configuration géométrique peut permettre d'étudier son origine et son influence sur la stabilité des versants à des échelles variées.

4

Conclusion

Les calculs par éléments distincts réalisés sur des géométries simples ont permis de cerner les conditions principales pour lesquelles, une série de colonnes rocheuses de pendage opposé à la topographie pouvait être instable. Il s'agit de l'existence d'une zone déconfinée, un espacement des joints faibles et des caractéristiques mécaniques des joints faibles. Pour des caractéristiques mécaniques compatibles avec le site de La Clapière, il est difficile de reproduire un basculement important par flexion. Ce basculement peut être simulé en introduisant des discontinuités supplémentaires.

La représentation du site de La Clapière à travers des modèles conceptuels simples et un modèle reconstituant une topographie initiale a conduit à réévaluer les scénarios d'évolution du versant et les phénomènes prépondérants :

- bien que le mécanisme de basculement gravitaire ne soit pas totalement écarté, il est remis en cause ;
- si le phénomène de fauchage gravitaire se confirme, il est nécessaire de préciser le mécanisme (basculement par bloc, flexion composée...) et de redéfinir les caractéristiques géométriques et mécaniques primordiales pour ce fauchage ;

– si l'origine tectonique du basculement est admise, il est alors nécessaire de s'interroger sur la présence plus fréquente de glissements dans les zones basculées et ceci dans l'ensemble de la vallée de la Tinée.

Les modèles présentés n'ont pas cherché à reproduire le plus finement possible toutes les observations disponibles, mais la modélisation a été utilisée pour tes-

ter différentes hypothèses, comme un outil supplémentaire d'investigation. Cette approche a permis de progresser dans la représentation du site de La Clapière et apparaît comme complémentaire d'autres techniques pour étudier les mouvements de grande ampleur de ce type.

Bibliographie

- Adhikary D.P., Dyskin A.V. – « A Cosserat Continuum model for layered materials ». *Computers and Geotechnics* vol. 20, Issue 1, 1997, p. 15-45.
- Adhikary D.P., Dyskin A.V., Jewell R.J. – « Numerical modelling of flexural deformation of foliated rock slopes ». *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr.* vol. 33, n° 6, 1996, p. 595-606.
- Aglardi F., Crosta G., Zanchi A. – « Structural constraints on deep-seated slope deformation kinematics ». *Engineering Geology* 59, 2001, p. 83-102.
- Alfonsi P., Durville J.-L., Rachez X. – « Quelques applications de la méthode des éléments distincts en mécanique des roches ». *Bulletin de Liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, 214, 1998, p. 31-43.
- Besson L. – *Les risques naturels en montagne. Traitement, prévention, surveillance*. Édition Artès Publialp, 1996.
- Bobet A. – « Analytical solutions for toppling failure ». *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech.*, Elsevier, vol. 36, 1999, p. 971-980.
- Cundall P.A. – « Formulation of a three dimensional distinct element model. Part I : A scheme to detect and represent contact in a system composed of many polyhedral blocks ». *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr.* vol. 25, 1988, p. 107-116.
- Cundall P.A. – « A computer model for simulating progressive, large-scale movements in blocky rock systems ». *Proceedings of the Symposium of the International Society of Rock Mechanics*, Nancy, France, vol. 1, Paper n° II-8, 1971.
- Cosserat E., Cosserat F. – *Théorie des corps déformables*. Paris, Hermann, 1909.
- Durville J.L. – « Mécanismes et modèles de comportement des grands mouvements de versants ». *Bulletin de l'Association Internationale de Géologie de l'Ingénieur* n° 45, 1992, p. 25-42.
- Follacci J.P., Perez J.L., Julian M. – « Crêtes doubles et perturbations de versants dans un domaine de montagne alpine (Mercantour et ses bordures) ». *Colloque Mouvements de Terrains*, Caen 22-24 mars, Documents BRGM n° 83, 1984.
- Follacci J.P. – « Les mouvements du versant de La Clapière à Saint-Étienne-de-Tinée (Alpes-Maritimes) ». *Bulletin de Liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées* n° 150/151, 1987, p. 107-109.
- Follacci J.P., Guardia P., Ivaldi J. P. – « Le glissement de La Clapière (Alpes-Maritimes, France) ». *Proceedings of 5th the International Symposium on Landslides*, Lausanne, Switzerland, July 10-15, Balkema, vol. 5, 1988, p. 1323-1327.
- Follacci J.P. – « Seize ans de surveillance du glissement de La Clapière (Alpes-Maritimes) ». *Bulletin de Liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées* n° 220, 1999, p. 35-51.
- Goodman R.E., Bray J.W. – « Toppling of rock slopes ». *Proceedings of the Specialty Conf. on Rock engineering for foundations and slopes*, Boulder Colorado, ASCE, vol 2, 1976, p. 201-234.
- Grolier J., Fernandez A., Hucker M., Riss J. – *Propriétés physiques des roches. Théorie et modèles*. Masson, 1991.
- Guglielmi Y., Bertrand C., Compagnon F., Follacci J.P., Mudry J. – « Acquisition of water chemistry in a mobile fissured basement massif; its role in the hydrogeological knowledge of the La Clapière Landslide (Mercantour Massif, Southern Alps, France) ». *J. Hydrology*, Elsevier, vol. 229, n° 3-4, 1998, p. 138-148.
- Guglielmi Y., Vengeon J.M., Bertrand C., Mudry J., Follacci J.P., Giraud A. – « Hydrogeochemistry : an investigation tool to evaluate infiltration into large moving rock masses (case study of La Clapière and Séchilienne alpine landslides) ». *Engineering Geology* 2001 (article accepté).
- Hoek E. – *Practical Rock Engineering. Course notes*, Chapter 02. Site Web <http://www.rockeng.utoronto.ca/roc/Hoek/Hoek.htm>, 1999.
- Hoek E., Bray J.W. – *Rock slope engineering*. The Institution of Mining and Metallurgy, London, 1981.
- Interreg I. – *Risques générés par les grands mouvements de versant. Étude comparative de 4 sites des Alpes franco-italiennes*. Édité par le Pôle grenoblois d'études et de recherches pour la prévention des risques naturels (Grenoble), 1997.
- Jaeger C. – *Rock mechanics & engineering*. Cambridge University Press, 2nd ed, 1978.
- Jumikis A.R. – *Rock mechanics*. Trans Tech Publications, 2nd ed., 1983.
- Lee C.F., Sijing Wang, Zhiquang Huang – « Evaluation of susceptibility of laminated rock to bending-toppling deformation and its applications to slope stability study for the Longtan Hydropower Project on the Red Water River, Guangxi, China ». *9^e Congrès international de Mécanique des Roches*, Paris, Balkema, 1999, p. 119-122.
- Martin C.D. – « Deformation of open pit mine slopes by deep seated toppling ». *International Journal of Surface Mining and Reclamation*. vol. 4, n° 4, 1990, p. 153-164.
- Merrien-Soukatchoff V., Omraci K. – « Détermination des conditions aux limites pour un calcul de stabilité de talus ». *Revue Française de Géotechnique* n° 92, 2000, p. 31-39.
- Mestat P., Prat M. – *Ouvrages en interactions*. Paris, Hermès, 1999, 934 p.
- Noverraz F., Bonnard C., Dupraz H., Huguenin L. – *Grands glissements de versants et climat*. Rapport final PNR31, vdf Hochschulverlag AG an der ETH Zürich, 1998, 314 p.
- Pritchard M.A., Savigny K.W. – « Numerical modelling of toppling ». *Canadian Geotechnical Journal* n° 27, 1990, p. 823-834.
- Quenot X. – « Étude du glissement de La Clapière. Modélisation du phénomène de rupture ». Mémoire de DEA, DEA PAE3S, École doctorale PROMEMA, Institut national polytechnique de Lorraine, Nancy, 2000.
- Scavia C., Barla G., Bernaudo V. – « Probabilistic stability analysis of block toppling failure in rock slopes ». *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech.* vol. 27, n° 6, 1990, p. 465-478.
- Schindler C. – « Zones instables en Suisse (conférence spéciale) ». *Proceedings of 5th the International Symposium on Landslides*. Lausanne, Switzerland, July 10-15, Balkema, vol. 5, 1988, p. 1323-1327.
- Sjöberg J. – « Analysis of failure mechanisms in high rock slopes ». *9^e Congrès international de Mécanique des Roches*, Paris, Balkema, 1999, p. 127-130.
- Vibert C., Arnould M., Cojean R., Le Cleac'h J.M. – « Essai de prévision de rupture d'un versant montagneux à Saint-Étienne-de-Tinée, France ». *Symp. Landslides*, Balkema, 1988, p. 789-792.