

# Rôle de l'eau dans la remobilisation de glissements – coulées (Barcelonnette, France)

G. Le Mignon & R. Cojean

Centre de Géologie de l'Ingénieur, Ecole des Mines de Paris, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées,  
Université de Marne-la-Vallée, France

**RÉSUMÉ :** Les processus de remobilisation de glissements-coulées se réalisant dans les marnes du Callovo-Oxfordien sont étudiés sur deux sites de la région de Barcelonnette : les torrents de la Valette et de Poche. Lorsque ces marnes affleurent avec une pente suffisante pour que le ruissellement génère une érosion particulière, il apparaît un relief de type "bad-lands". Par contre, sur des pentes de faible inclinaison, l'eau imprègne les terrains et les conditions favorables aux phénomènes de solifluxion et de glissement-coulée sont présentes. Les investigations géologiques de terrain ont montré le rôle primordial de la saturation sur les déplacements des masses instables. Les simulations numériques ont illustré le rôle des conditions hydrogéologiques. Des scénarios de remobilisation des coulées boueuses sont identifiés. Ils contribuent à la définition d'une prévention adaptée et nécessaire considérant la vulnérabilité de la région d'étude.

## 1 INTRODUCTION

Les glissements et glissements-coulées se développant dans les matériaux argileux ou marneux représentent souvent une menace importante sur l'environnement. En effet, les volumes mobilisés sont souvent importants et ces mouvements de versant peuvent évoluer rapidement en coulées boueuses dévastatrices.

Deux sites ont été retenus pour réaliser des investigations géologiques et hydrogéologiques, proches de Barcelonnette (Alpes de Haute Provence, France). Ils sont situés dans la fenêtre tectonique de Barcelonnette au sein de l'unité géologique des Nappes de l'Embrunais (Fig. 1). Les glissements-coulées du torrent de la Valette et du torrent de Poche sont étudiés.

Il s'agit de glissements affectant principalement les Terres Noires jurassiques (Callovo-Oxfordien) et mobilisant des volumes considérables de matériaux.

## 2 LES GLISSEMENTS-COULÉES ET COULÉES BOUEUSES

Les glissements étudiés appartiennent à une famille à la frontière entre les glissements stricto sensu et les écoulements.

Généralement, un processus de rupture par insuffisance de résistance au cisaillement se réalise dans un matériau argileux ou marneux saturé. La perte de résistance structurale due au remaniement conduit sou-

souvent à une transformation du matériau sur le plan rhéologique. Ceci explique les scénarios d'évolution en coulées boueuses.

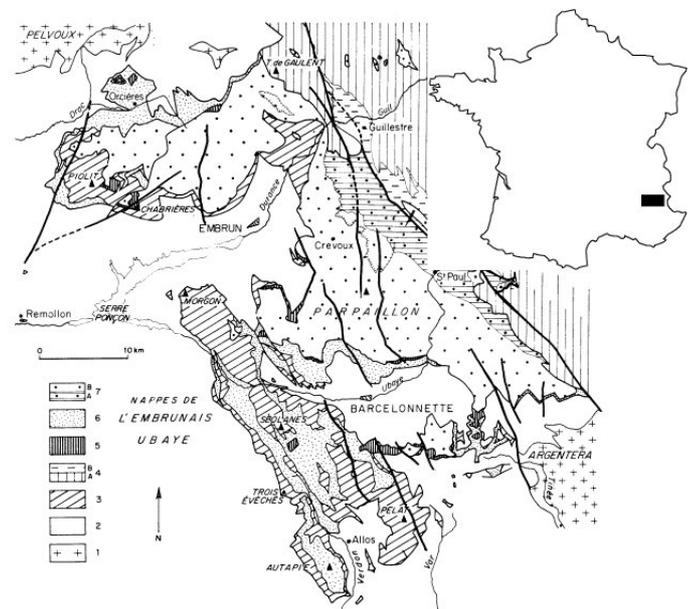


Figure 1. Schéma structural des nappes de l'Embrunais (d'après C. Kerckhove, 1969)

1- Massifs cristallins externes ; 2- Zone externe (autochtones et parautochtones, Trias à Priabonien) ; 3- Zone subbriançonnaise ; 4- Zone briançonnaise (A- permocarbonifère et mésozoïque, B- Flysch nummulitique de la bordure occidentale) ; 5- Ecailles basales de la Nappe du Flysch à Helminthoïdes du Parpaillon ; 6- Nappe de l'Autapie et olisthostromes associés ; 7- Nappe du Parpaillon (A- Complexe schisteux de base, B- Flysch à Helminthoïdes et Grès de l'Embrunais).

Du fait de cette relative complexité des processus qui se développent au cours du temps sur quelques jours ou plusieurs années, il en résulte une nomenclature très diverse suivant les auteurs qui s'y sont intéressés. Le Tableau 1 rend compte de cette diversité en regroupant des phénomènes plus ou moins proches des glissements-coulées que nous étudions.

Tableau 1. Glissements-coulées et phénomènes associés (d'après Dikau et al., 1996)

	Anglais	Français	Italien
Landslide	Rotational slide Slumps Translational slide	Glissement de terrain Glissement rotationnel Glissement par translation	Scivolamento Scorrimento Scivolamento rotazionale Scivolamento traslazionale
Debris slide	Shallow slide Soil slip	Glissement de débris	Scivolamento di detrito
Mudslide	Earthflow (Us)	Glissement-coulée boueuse	Scivolamento di terra
Debris flow	Mudflow (Old) Lahar	Coulée de débris Lave torrentielle Lahar	Colata di detrito
Mudflow	Soil flow Earthflow	Coulée boueuse	Colata di terra
Flow slide		Glissement-coulée	Scorrimento-colata

### 3 LES TORRENTS DE LA VALETTE ET DE POCHE

#### 3.1 Contexte climatique et géologique

Les deux glissements-coulées étudiés se situent dans la vallée de l'Ubaye (Alpes-de-Haute-Provence), ancienne vallée glaciaire orientée E – W. Dans cette région le climat est de type méditerranéen avec une légère influence continentale. Le manteau neigeux est relativement important (> 2 m) à partir des cotes 2000 - 2500 m. A cette altitude il est présent généralement de novembre à mai.

Les données climatiques sont enregistrées à Barcelonnette, en fond de vallée, à 1140 m d'altitude. Le module pluviométrique moyen donné par cette station est de 750 mm. La répartition des précipitations est à peu près uniforme avec un léger maximum en automne. Des pluies orageuses exceptionnelles se présentent parfois en été sur les crêtes aux altitudes 2200 – 2800 m. Un module d'environ 1000 à 1200 mm semble vraisemblable à ces altitudes.

L'Ubaye présente un régime de type nivo-pluvial. Les phénomènes d'érosion sont très intenses dans cette région, en particulier dans les terrains du Callovo-Oxfordien. Une forte érosion torrentielle (produisant des écoulements hyperconcentrés et des la-

ves torrentielles) se manifeste sur l'ensemble du bassin versant.

La région de Barcelonnette, au sein de l'unité géologique des Nappes de l'Embrunais, est caractérisée par la présence des Terres Noires du Jurassique (Callovo-Oxfordien) en fond de vallée et jusqu'à mi-hauteur des versants.

Cette série argilo-calcaire est constituée de marne (60% de CaCO<sub>3</sub> en moyenne) présentant un débit en plaquettes généralement en haut de la série. Des cristallisations abondantes de calcite en filonnets et des minéralisations de FeSO<sub>4</sub> (résultant de l'altération de la pyrite) sont observées. Ces terrains qui peuvent être qualifiés d'autochtones sont recouverts par les nappes de l'Embrunais-Ubaye.

Dans la région considérée, ces nappes sont principalement représentées par la nappe de l'Autapie à la base et par la nappe du Parpaillon au sommet. Les contacts, irréguliers, sont jalonnés d'écaillés tectoniques. Les flyschs créacés constituant ces nappes sont connus sous la dénomination de Flysch à Helminthoïdes.

Ces chevauchements sont bien visibles au niveau de la fenêtre de Barcelonnette. La géométrie des contacts est cependant complexe du fait des écaillages tectoniques et des déformations et fracturations post-nappe. La fenêtre, reconnue comme fenêtre tectonique, laisse apparaître une vaste structure d'anticlinorium de direction NW/SE déversée vers le SW (cette structure a été principalement acquise après la mise en place de la nappe de l'Autapie, mais avant celle de la nappe du Parpaillon).

#### 3.2 Le glissement-coulée du torrent de Poche

##### 3.2.1 Description du glissement

Le torrent de Poche est un affluent rive gauche de l'Ubaye (Fig. 2), situé à 5 km en amont de Barcelonnette. Son bassin versant a une orientation SE/NW, et s'étend entre les cotes 1200 m et 1900 m. La pente moyenne du torrent est d'environ 14°.

Le glissement-coulée, qui se développe dans la partie moyenne du bassin versant, représente un volume de 2 millions de m<sup>3</sup> et est très actif. Il affecte des matériaux constitués de marnes du Callovo-Oxfordien et de quelques dépôts morainiques.

La menace liée à ce glissement-coulée n'est pas directe. Cependant, le scénario d'un barrage partiel de l'Ubaye est possible avec inondation amont (pâturages, habitations) et dommage pour l'aval en cas de rupture. Plusieurs petites coulées terminales ont déjà provoqué des arrivées brutales de matériaux dans l'Ubaye. Le Service ONF-RTM (Office National des Forêts – Restauration des Terrains en Montagne), de Barcelonnette, réalise un suivi topographique bi-annuel au niveau de la partie médiane du glissement. Des déplacements de l'ordre de 5 m par an, avec des maxima pouvant atteindre

maxima pouvant atteindre 20 m (période du 18/11/1992 et 14/04/1994) y sont enregistrés.

Les marnes callovo-oxfordiennes présentes dans ce secteur sont affectées par de nombreux plis et micro-plis très marqués ce qui leur donne une structure particulière. Les nombreux filonnets de calcite traversant ces marnes sont des marqueurs d'une fracturation principalement post-nappe.

Un contrôle structural (direction N 170°) est visible en photographie aérienne.

Des cristallisations de gypse et des efflorescences de sulfates (résultant de l'oxydation des pyrites) blanchissent les matériaux du glissement-coulée en période sèche.

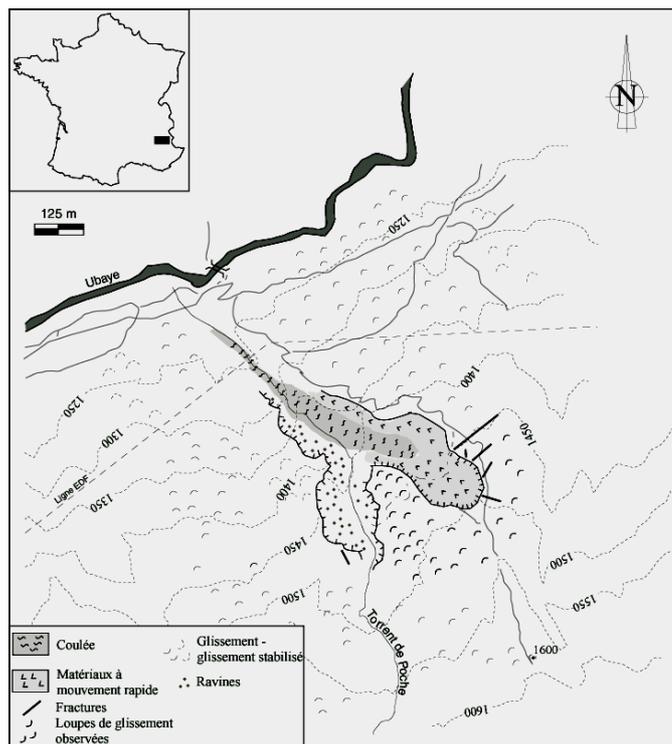


Figure 2. Glissement-coulée du torrent de Poche.

Des figures traduisant le mode d'écoulement de la coulée boueuse terminale sont bien visibles sur le terrain :

- le contact coulée active – terrain stabilisé ou en place est bien marqué par une zone de cisaillement de quelques mètres de largeur se développant en bordure de coulée. Des fentes de tension orientées conformément au modèle de Riedel (Fig. 3) peuvent y être observées ;
- les surfaces de cisaillement marquant les limites du glissement, parfois bien exposées, présentent des stries montrant le sens du mouvement ;
- Localement, des levées latérales de compression (avec phénomènes d'extrusion) sont observables dans des zones de changement d'orientation de la coulée.

De plus, une évolution régressive du glissement-coulée est possible. La tête du glissement présente un escarpement très abrupt de 20 m de hauteur envi-

ron, à partir duquel se développe une érosion régressive.

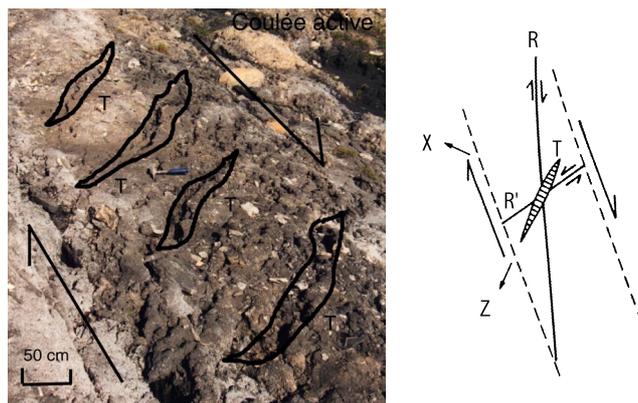


Figure 3. Fractures de tension (T) conformes au modèle de Riedel sur la coulée du Torrent de Poche.

Sur les pentes supérieures du bassin versant plusieurs indices d'instabilités sont visibles: fissures de traction et bourrelets de compression.

### 3.2.2 Les actions de l'eau sur le glissement

De nombreux indices tels que des sources, zones humides ou sagnes confirment la présence d'eau en abondance sur le site du glissement et les pentes voisines. Par ailleurs, des apports d'eau d'origine anthropique (surverses de réservoirs en amont et étanchéité imparfaite de canalisations) se rajoutent aux apports d'eau naturels.

Lorsque les marnes affleurent sur des pentes fortes (de 20 à 45°), la pluie imprègne sur une dizaine de centimètres un matériau micro-fissuré superficiellement et le transforme en une pâte boueuse avant que le ruissellement ne l'évacue. Ces phénomènes de ravinement contribuent à la formation des "badlands". Sur des pentes moins fortes et couvertes de végétation, l'eau s'infiltré et sature les terrains, générant des phénomènes de solifluxion et de glissement.

Une végétation hygrophile est présente : mousses et prêles. Des sources de fort débit, certaines à l'origine de phénomènes de suffosion, sont visibles. Certains de ces écoulements se réalisent avec entraînement de fines argileuses ou silteuses.

A l'évidence des écoulements souterrains, hypodermiques ou plus profonds, contribuent à la déstabilisation de ces pentes.

## 3.3 Le glissement-coulée de la Valette

### 3.3.1 Description du glissement et historique des déformations

Le glissement de la Valette est situé au NW de Barcelonnette (Fig. 4). Ce glissement affecte 9 à 10 millions de m<sup>3</sup> de matériaux et menace une zone d'habitat pavillonnaire sur le cône de déjection du torrent de la Valette, ainsi qu'une route départementale.

rains. Ces fractures constituent des drains au sein du massif et sont à l'origine de sources et sagnes sur le versant.

Le glissement s'est déclenché lors du printemps 1982, à la suite de la fonte des neiges, en partie supérieure du versant (Rocher Blanc, vers la cote 1950 m) au-dessus du contact flyschs - Terres Noires. Cette rupture, de type circulaire, a déstabilisé la masse rocheuse et créé une surcharge sur les terrains aval (marnes et moraines). L'évolution du glissement peut se suivre en mesurant avec les surfaces concernées : 26 ha en 1983, 32 ha en 1984 et 50 ha en 1985. Ensuite, jusqu'en 1988, plusieurs coulées se sont déclenchées depuis le front du glissement à la cote 1400 m pour s'étaler jusqu'à la cote 1200 m, soit sur une longueur de 500 m (volume ainsi déplacé : environ 50 000 m<sup>3</sup>). Il a été alors décidé de réaliser un piège à matériaux en amont de la zone habitée (la Valette) située sur le cône de déjection du torrent. Ce piège (construit au printemps 1988) est destiné à retenir les matériaux de coulée tout en laissant passer les écoulements liquides. La capacité de stockage de ce dispositif est d'environ 100 000 m<sup>3</sup>.

L'évolution, préoccupante, du versant a conduit à la mise en place d'un système de surveillance par caméra infrarouge et levés topographiques réguliers. La caméra est opérationnelle de manière continue et reliée par téléphone aux autorités départementales.

Sur le plan de la protection active, de premiers travaux de drainage superficiel, un remodelage et un ensemencement des terrains glissés, ainsi que la dérivation du torrent de Serre (torrent voisin en rive droite) ont été réalisés en 1988 et 1989. En outre, des forages avec pause de drains subhorizontaux ont été implantés en tête du glissement. Des fossés de drainage et des tubes en PVC permettent d'évacuer les eaux de ruissellement en dehors du glissement. Ces différents travaux sont réalisés par les services ONF-RTM.

Un processus d'évolution régressive de la tête du glissement, dans les flyschs, s'est rapidement développé. Il est toujours en cours.

Les observations de terrain ainsi que l'examen des photos aériennes ont permis de préciser cette évolution régressive.

La série de clichés observés montre que le versant présente des indices d'instabilité (fissures, bourrelets) au moins dès 1971, au niveau de la tête actuelle. Puis les déformations se propagent sur l'ensemble du versant de la Valette. Dès 1982, après la rupture principale l'évolution régressive de la tête commence à être visible pour ensuite s'accroître progressivement et devenir préoccupante aujourd'hui.

Le glissement présente de hautes levées latérales qui témoignent de l'importance du mouvement passé. Aujourd'hui, bien que le glissement soit moins actif, il reste des zones de cisaillement avec des fen-

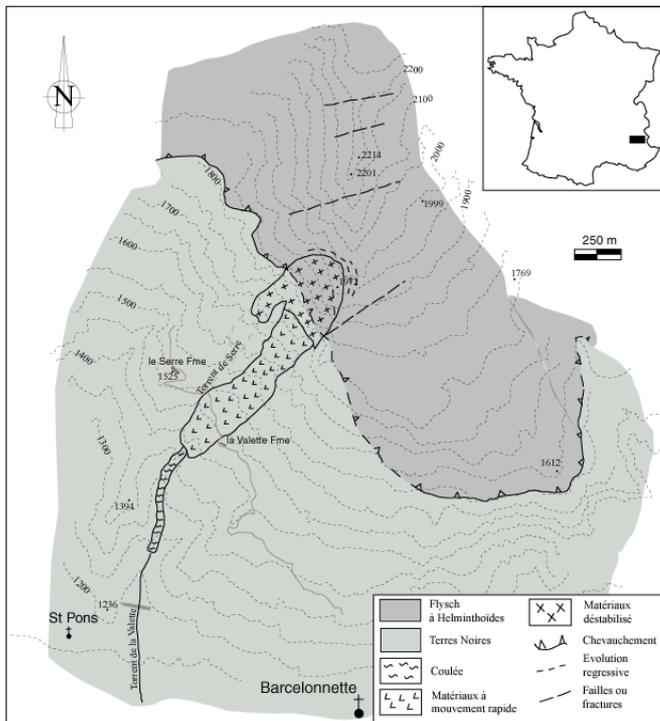


Figure 4. Glissement-coulée de la Valette.

Il occupe une surface supérieure à 50 ha qui ne cesse d'augmenter depuis le déclenchement du glissement, par évolution régressive vers l'amont et extension latérale (Fig. 5).

Le glissement affecte les Terres Noires du Callovo-Oxfordien en partie inférieure du versant et le Flysch à Helminthoïdes de la nappe de l'Autapie en partie supérieure du versant.



Figure 5. Vue d'ensemble du glissement-coulée de la Valette (Barcelonnette) 07/1999.

Les Terres Noires présentent un pendage moyen de 20° N, alors que les flyschs de la nappe de l'Autapie, qui sont affectés par la tête du glissement, présentent un pendage de 30° SE. En outre la tectonique alpine a engendré de nombreuses fractures au sein des ter-

tes de tension analogues à celles décrites sur le glissement du torrent de Poche. La masse affectée par le glissement est aujourd'hui en mouvement très lent ou en équilibre précaire. Sa partie supérieure est constituée de plusieurs unités ou masses glissées. En limite du glissement, des fissures d'extension plurimétrique, témoignent de l'évolution régressive en cours, vers l'amont et latéralement.

Immédiatement derrière l'escarpement sommital des fractures ouvertes parallèles ou obliques au contour actuel de la niche d'arrachement sont visibles. Leur ouverture pluri-décimétrique ne cesse de s'accroître. Certaines de ces fractures semblent résulter de la réactivation de fractures plus anciennes. Il semblerait ainsi que le glissement de la Valette soit une réactivation d'un mouvement de versant plus ancien et plus important.

### 3.3.2 Influence de l'eau sur le glissement

Les marnes du Callovo-Oxfordien retiennent une nappe d'eau qui imprègne les flyschs. Cette nappe donne des sources de déversement qui imprègnent les dépôts morainiques et les marnes altérées. Une végétation hygrophile est présente sur tout le versant et explique l'appellation du site : les Sagnes.

De plus la fracturation tectonique a entraîné la formation de drains profonds au sein du massif. Des analyses en cours des paramètres débit, température et résistivité des sources présentes sur le versant devraient permettre de mieux comprendre le comportement hydrogéologique du massif. Les travaux de drainage, réalisés par ONF-RTM, permettent de ralentir les vitesses d'évolution du glissement, qui sont actuellement d'environ 1 cm par jour (soit 40 fois plus faibles que celles mesurées avant travaux pour une pluviométrie équivalente).

## 4 SIMULATION NUMÉRIQUE DU PROCESSUS DE COULÉE BOUEUSE DE LA VALETTE

### 4.1 Présentation du modèle et des protocoles de calculs

La simulation 2D s'appuie sur des calculs réalisés à l'aide du logiciel FLAC (Itasca, 1998). Un profil de 3200 m de longueur jugé représentatif du glissement-coulée dans sa partie médiane a été choisi. La simulation vise à représenter l'évolution actuelle du glissement-coulée.

La grille réalisée prend en compte plusieurs couches de propriétés mécaniques différentes constituant la structure du glissement de la Valette :

- en partie supérieure du versant : un matériau à mouvement rapide sur un matériau remanié sur substratum ;
- en partie inférieure du versant : coulée boueuse sur substratum.

Les caractéristiques mécaniques de ces différentes unités résultent principalement d'essais de labora-

toire (essais d'identification géotechnique et essais de cisaillement). Ces unités sont séparées par des interfaces présentant un comportement mécanique spécifique.

Le modèle retenu pour le calcul est un modèle élasto-plastique (Mohr-Coulomb). La taille du modèle (comportant 90 000 mailles) et les conditions aux limites ont été déterminées afin d'obtenir des résultats fiables sur le plan numérique.

Le choix de l'état de contrainte initial, dans le cas présent, équivaut à réaliser une "consolidation", c'est à dire à appliquer la gravité au modèle pour obtenir un état d'équilibre. Cette première phase de calcul ne s'effectue pas avec les véritables paramètres mécaniques, mais avec des paramètres surévalués afin d'éviter la mise en déformation plastique des matériaux. Lorsque l'étape de consolidation est terminée, il est alors possible de réaliser les calculs avec les véritables paramètres mécaniques et d'étudier l'influence de diverses conditions hydrauliques sur la stabilité du versant.

Le suivi des calculs, lors de cette phase, s'effectue par visualisation :

- de l'état de contrainte des terrains ;
- des déformations engendrées par chaque nouvelle situation hydraulique ;
- des indicateurs de plasticité.

La figure 6 donne une vue rapprochée d'une zone particulière du modèle géomécanique où la présence d'indicateurs de plasticité rend compte du processus de déformation et rupture progressive en cours.

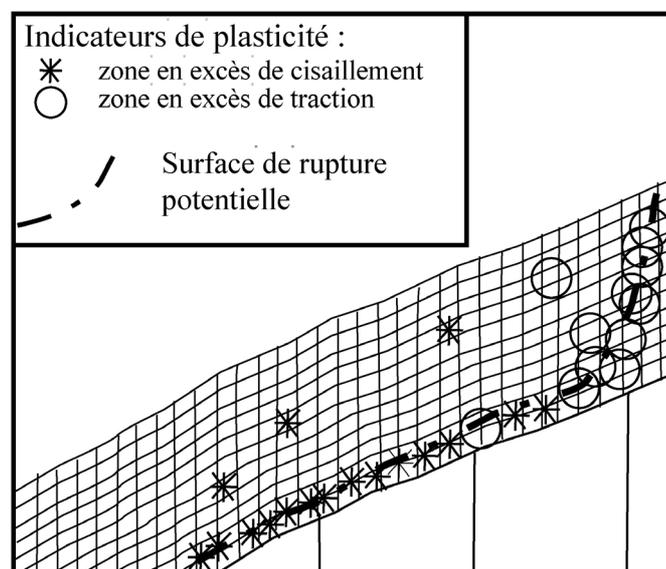


Figure 6. Partie du modèle entrée en plasticité.

Les différentes situations hydrauliques envisagées (montée de la nappe et descente d'un front d'infiltration) ont été réalisées à l'aide d'instructions de calcul qui permettent d'affecter automatiquement, aux unités lithologiques, les densités adéquates en fonction du degré de saturation des terrains.

## 4.2 Résultats

Les premiers calculs ont été réalisés, la surface piézométrique étant en dessous de la coulée. Puis le niveau piézométrique a été relevé par étapes jusqu'à affleurer la surface du terrain naturel.

Des simulations de descente d'un front d'infiltration saturant les terrains superficiels ont également été réalisées.

Le rôle de l'eau comme facteur défavorable à la stabilité ou comme facteur déclenchant la rupture est clairement mis en évidence (Fig. 7).

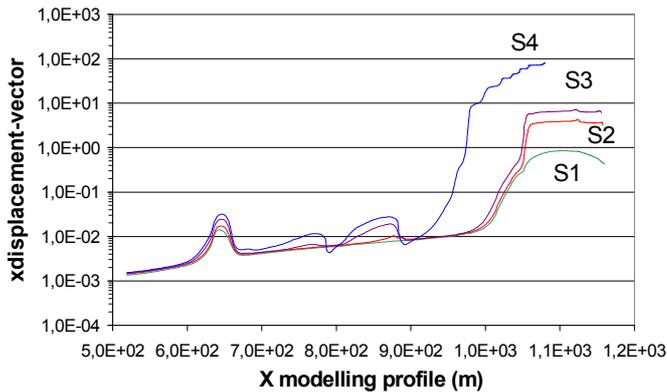


Fig. 7. Graphe présentant les déplacements de la coulée pour un niveau de nappe donné. S1 étant la situation où la nappe est la plus basse et S4 celle où la nappe est affleurante.

Par ailleurs, l'influence prépondérante de la montée de la nappe par rapport à la descente d'un front d'infiltration, est bien visible, surtout pour la partie haute de la coulée.

Des calculs complémentaires simulant le départ de la coulée en partie inférieure du versant montrent que la stabilité des matériaux à mouvement rapide peut être compromise.

Le suivi des indicateurs locaux de plasticité permet de constater l'évolution des processus de déformation et de rupture progressive affectant les terrains. Les zones où la plasticité est la plus marquée correspondent aux zones de plus forts déplacements lors de la montée de la nappe. La définition d'un "indicateur global de plasticité" pour une surface de rupture potentielle (où le processus de localisation progressive des déformations est clairement identifiée) permet d'évaluer l'état de stabilité générale de la pente. Cet indicateur est défini par le rapport : nombre de mailles entrées en plasticité / nombre de mailles concernées par la surface de rupture. Il apparaît que la valeur de cet indicateur global de plasticité augmente avec le niveau de la nappe suivant une allure exponentielle (Fig. 8). La prévision d'une situation critique par simple mesure piézométrique n'est donc pas facile.

Enfin, ces simulations permettent d'illustrer les phénomènes d'évolution régressive en cours.

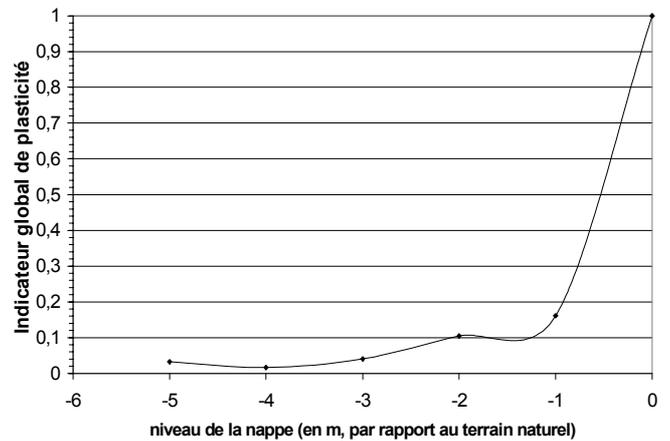


Figure 8. Indicateur global de plasticité en fonction de la montée de nappe.

## 5 CONCLUSION

Les phénomènes de glissements de terrains et coulées boueuses sont souvent associés. Ils représentent un processus classique de déstabilisation des versants modélisés dans les Terres Noires du Callovo-Oxfordien.

Les données de terrain, confrontées aux résultats de simulations, ont permis de mettre en évidence plusieurs points importants :

- le rôle prépondérant de l'eau dans les déclenchements et les réactivations des coulées ;
- des scénarios d'évolution, spécifiques, en particulier une évolution régressive en tête et latérale ;
- l'efficacité de dispositifs de drainage couvrant l'ensemble du versant instable ;
- la nécessité d'établir un modèle de comportement hydrologique et hydrogéologique du versant, utile à la simulation numérique et la définition des procédures de drainage.

## REMERCIEMENTS

Cette recherche a été réalisée avec le soutien de la Fondation MAIF et du service ONF-RTM.

## REFERENCES

- Dikau & al. 1996. Landslide Recognition - Identification, movement and causes. Ed. Wiley.  
 Itasca. 1998. Flac Manual, version 4.0. Ed. Itasca Consulting Group.  
 Kerckove, Cl. 1969. La "zone du Flysch" dans les nappes de l'Embrunais-Ubaye (Alpes Occidentales). Géologie Alpine (45) : 5-204.