

Glissement et coulée de La Valette dans les Alpes de Haute-Provence

Présentation générale et modélisation de la coulée

Gérard COLAS

Chef du service Géologie-terrassements
Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées d'Aix-en-Provence
CETE-Méditerranée

Jacques LOCAT

Professeur
Groupe de recherche en Géologie de l'ingénieur
Université Laval, Québec, Canada

RÉSUMÉ

Situé dans la vallée de l'Ubaye, le glissement de La Valette intéresse environ 9 millions de mètres cubes de matériaux issus de dépôts glaciaires imbriqués dans les Terres noires.

Plusieurs études ont été réalisées pour mettre en oeuvre des mesures de protection afin de protéger à l'aval un lotissement et une zone artisanale. Drainage, barrages dans le torrent, terrassement ont été mis en oeuvre.

Un plan d'évacuation a été élaboré et le glissement est surveillé par caméra infrarouge. Parallèlement, l'université du Québec a étudié deux différents modèles de propagation de la coulée boueuse pouvant naître de ce glissement : comportements de type fluide ou de type frottant. L'analyse paramétrique a permis d'estimer l'influence des conditions initiales et des caractéristiques rhéologiques sur la vitesse et la distance de propagation de la coulée.

MOTS CLÉS : 42 - Glissement (terrain) - Vallée - Modélisation - Télécommunication - Surveillance - Caméra - Infrarouge - Mouvement - Matériau - Risque - Prévention - Prévision.

Introduction

Le glissement de terrain de La Valette se situe au nord-ouest de la ville de Barcelonnette, dans la vallée de l'Ubaye. Ce glissement se développe sous le sommet de Soleil Bœuf et menace en contrebas un important lotissement installé de part et d'autre du torrent de La Valette, soit 170 logements, avec des commerces, un centre aéré, une gendarmerie, un abattoir.

Le glissement se compose de trois parties bien distinctes (fig. 1 et 2) :

- au sommet, un important écroulement rocheux de plusieurs centaines de milliers de mètres cubes ;
- au milieu, le glissement *stricto sensu* pouvant lui-même être décomposé en deux parties : une partie très active ou glissement rapide et une partie plus lente ;
- la partie inférieure, qui se transforme en coulée boueuse, aussi appelée coulée fluide, dans le vallon du torrent de La Valette. Le torrent traverse le lotissement précédemment décrit avant de se jeter dans l'Ubaye.

Après une présentation sommaire de ce phénomène d'ampleur remarquable et des mesures prises pour lutter contre ce risque naturel, on expose une étude plus détaillée de la coulée, dont l'objectif était de mieux prévoir le point d'avancée maximale de celle-ci.

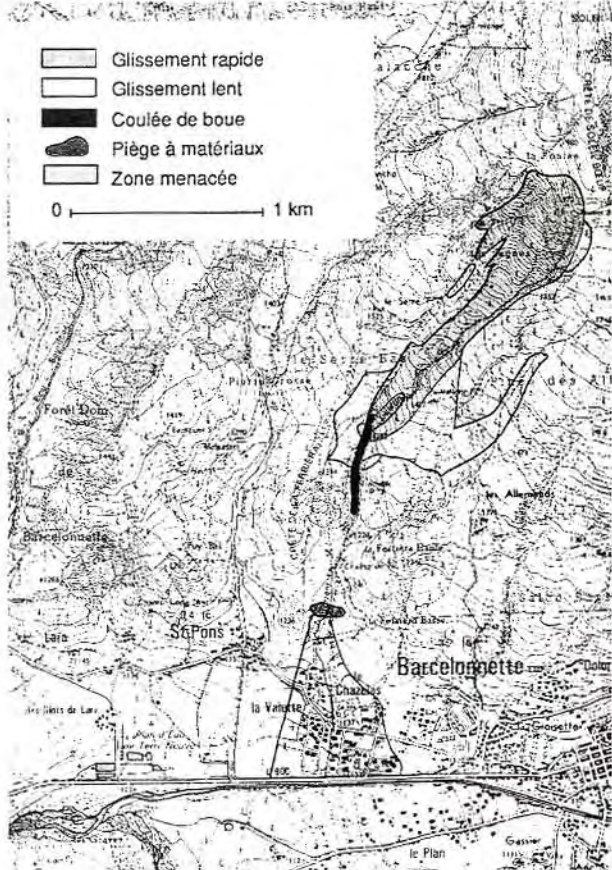


Fig. 1 - Carte du glissement (d'après fonds topographique de l'IGN).



Fig. 2 - Vue générale du glissement et de la coulée.

Géologie

Le glissement se situe en bordure de la structure géologique dite de la fenêtre de Barcelonnette, composée de deux ensembles structuraux :

- un **autochtone**, formant une vaste dépression à relief tourmenté du type « bad-land », empâtée de moraines et modelée par l'ancien

glacier de l'Ubaye dans les terrains marneux tendres des Terres noires d'âge jurassique. Le pendage moyen est de 20° vers le nord-est ; près du contact avec les nappes sus-jacentes, ces Terres noires sont très redressées, très altérées, et recouvertes de dépôts morainiques. Les instabilités de versant sont nombreuses [Légier, 1977] ;

- un **allochtone**, correspondant à des nappes de charriage, nappe de l'Autapie et nappe du Pelat reposant en contact direct sur l'autochtone, contact très souvent discordant. Le pendage moyen est de 30° vers le sud-est. Cet allochtone est constitué de calcaires, de grès et de flyschs, très tectonisés.

Le glissement de La Valette se situe à la limite entre l'autochtone et l'allochtone (fig. 3). La zone où s'est produit l'éroulement supérieur était dénommée Les Sagnes, ce qui signifie zone marécageuse. De part et d'autre de l'éroulement naissent deux ruisseaux, le Serre et La Valette dont les sources se trouvent au niveau du contact anormal, sous la nappe de l'Autapie qui constitue un véritable réservoir au-dessus des Terres noires. Ces deux ruisseaux se rejoignent vers la cote 1 300 pour former le torrent de La Valette qui se jette ensuite dans l'Ubaye.

Description et mécanisme du phénomène

Au début de la fonte des neiges de mars 1982, après une période très pluvieuse sur un manteau neigeux, le mouvement de terrain a pris naissance dans la partie supérieure du versant, vers 1 950 m d'altitude (fig. 4). À cette date s'est produit un éroulement rocheux qui a totalement désorganisé le terrain situé en dessous en le surchargeant. Cette désorganisation du terrain a évolué graduellement jusqu'en janvier 1988. Initialement (1983), le glissement descendait jusqu'au chemin reliant les fermes de La Valette et du Serre, petit à petit, le pied de versant s'est déstabilisé et en janvier 1988, à partir de l'étranglement du ruisseau de Serre, une coulée boueuse s'étira de l'altitude 1 400 m à l'altitude 1 200 m environ, sur une distance approximative de 500 m (fig. 5) ; son volume est d'environ 50 000 m³. Le volume total déstabilisé à cette date fut estimé à environ 6 millions de m³. Les surfaces désorganisées étaient de 26 hectares en 1983, 32 ha en 1984, 50 ha en 1985.

Le mécanisme général du glissement s'explique par :

1. un effondrement rocheux qui surcharge les Terres noires altérées et les moraines ;
2. une déstabilisation lente mais continue des terrains de l'aval ;
3. le barrage des torrents qui entraîne une imbibition des terrains, d'où transformation du glissement en coulée boueuse dans le torrent de La Valette.

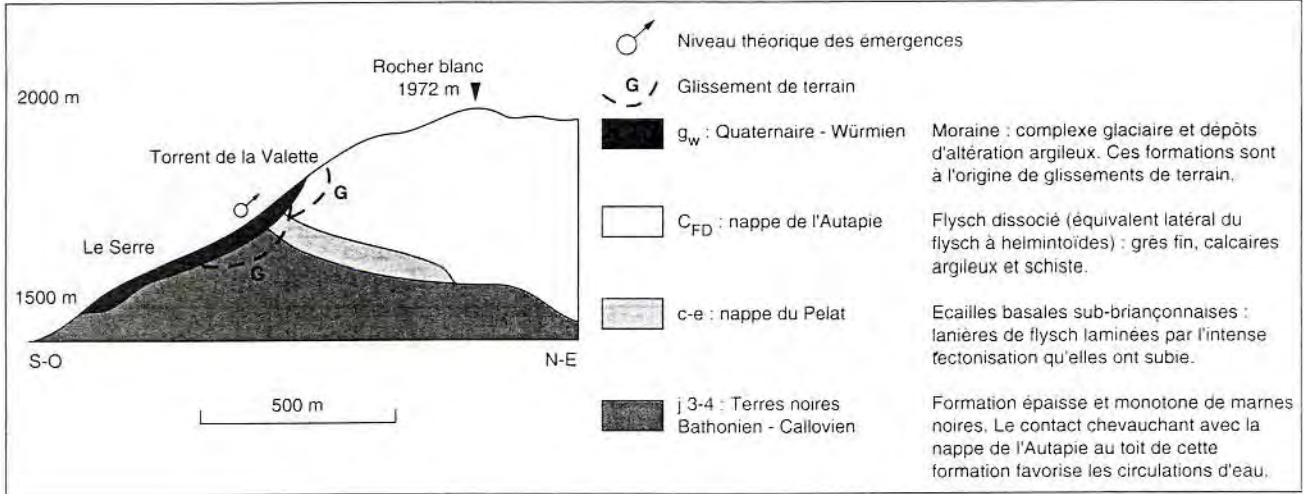


Fig. 3 - Schéma géologique.

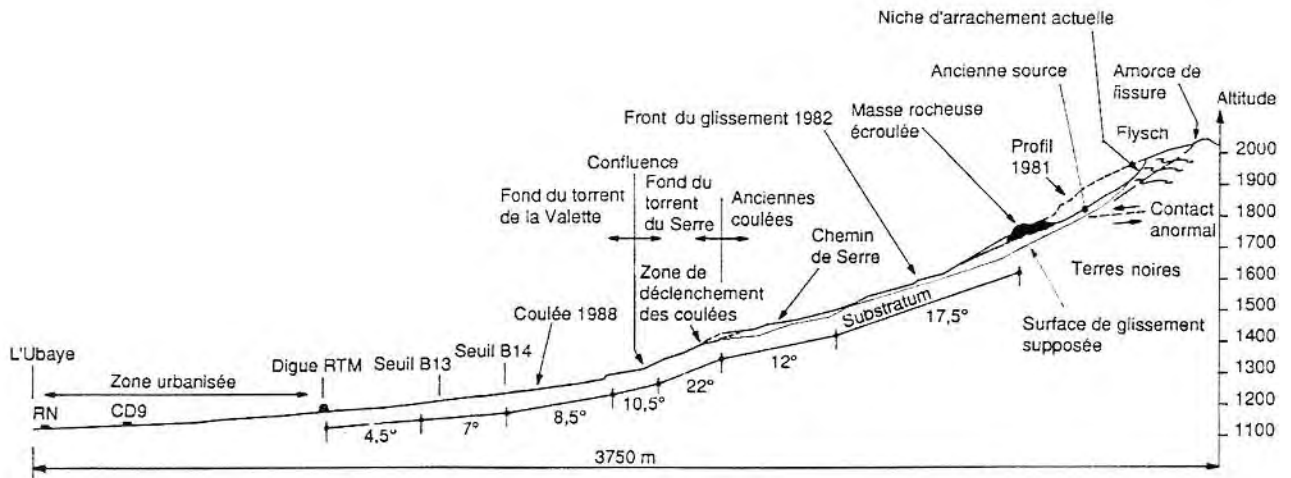


Fig. 4 - Profil en long du glissement et du torrent de La Valette.

Les études et les travaux

Les études

Les premières études (1), effectuées à la demande du service de Restauration des Terrains en Montagne (RTM) de Digne en 1983, étaient assez optimistes puisque le versant n'était désorganisé que jusqu'au chemin de La Valette. Elles supposaient que les terres à l'aval offraient une butée suffisante pour que le glissement ne gagne pas vers le torrent.

En fait, le versant continuait à se désorganiser et une coulée boueuse se produisait dans le torrent de La Valette au printemps 1988. Une seconde étude (2) concluait à la nécessité de réaliser un réseau de drainage en surface et proposait la réalisation d'une galerie drainante sous



Fig. 5 - La partie aval de la coulée, avec ses repères. Au fond, la partie haute du glissement.

- (1) Réalisées par le LRPC d'Aix-en-Provence.
- (2) Réalisée par l'ADRGT, en 1989.

le glissement, vers la cote 1600 m, c'est-à-dire dans la partie la plus étroite du glissement.

Les reconnaissances pour la galerie comprenaient des profils géophysiques et trois sondages carottés. Les sondages ont montré une épaisseur moyenne de 11 m de terrains remaniés, glissés et gorgés d'eau. En dessous, on trouve des Terres noires altérées nécessitant la réalisation d'une galerie bétonnée avec un radier.

Les calculs de stabilité (1) montraient qu'une galerie implantée à la cote 1600 m ne suffisait pas pour améliorer d'une façon probante le coefficient de sécurité. Le coût de cette galerie était estimé à 6 millions de francs. Il fallait soit en réaliser plusieurs, soit la creuser plus à l'amont ce qui multipliait sa longueur par 3,5 et son coût d'autant.

Il fut donc décidé de se limiter à améliorer les systèmes de drainage en surface, à réaliser quelques drains subhorizontaux au contact anormal flysch/Terres noires dans le secteur Est où coulait anciennement la source et à mettre sous surveillance le pied de la coulée.

Notons qu'un profil de suivi des mouvements par levé géométrique avait été mis en place le long du chemin de La Valette. Ce profil permet de mettre en évidence une parfaite corrélation entre les précipitations et le volume de matériaux transitant au droit du profil (fig. 6). Ainsi en 1989, pendant la période pluvieuse du mois d'avril, la vitesse maximale du piquet le plus rapide était de 40 cm par jour.

Les travaux réalisés par le service de RTM

1982 : confortement de deux barrages dans le lit du ruisseau de La Valette.

1984 : construction d'un nouveau barrage et curage du lit du torrent.

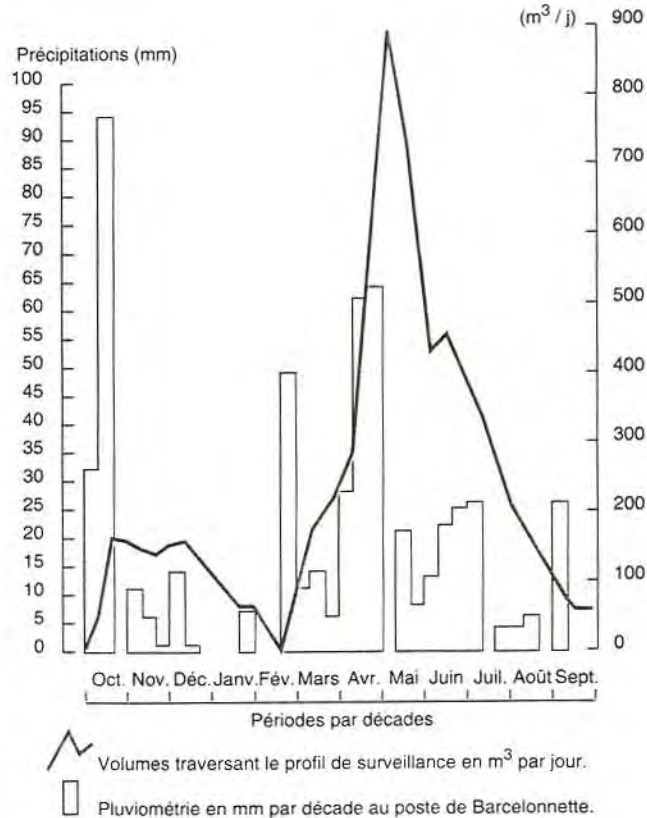
1985 : construction d'un radier dans le lit du torrent pour faciliter le transit de la coulée de boue dans la partie aval ; réparation du pont sur la RD 900 et amélioration de l'entonnement.

1988 : devant le risque d'une embâcle et l'arrivée de gros blocs dans le lotissement, construction d'un barrage écrêteur et servant de piège à matériaux (environ 150 000 m³) sur le torrent de La Valette (fig. 7) ; parallèlement, début de la mise en place du drainage de surface.

1989 : nivellement de 9 hectares de terrains, amélioration des drainages de surface.

1990 : nivellement de 9 autres hectares, réalisation de 3 km de fossés, foration de 1500 m de drains subhorizontaux vers la cote 1700, enherbement des zones nivelées, mise en place d'une télésurveillance.

1991 : amélioration des drainages, enherbement des zones nivelées.



du lotissement situé à l'aval était donc important ; pour se donner le temps de réagir, un barrage avec plage de rétention fut réalisé en première phase.

Un périmètre de risque (Art. R111-3 du code de l'Urbanisme) fut délimité, interdisant toute nouvelle construction dans la zone menacée.

Il fallait également être alerté dès la naissance ou le redémarrage de la coulée boueuse pour pouvoir réagir. Une télésurveillance fut mise en place avec installation d'une caméra infrarouge, donc opérationnelle jour et nuit, reliée à une ligne téléphonique. Il s'agit d'une caméra Philips CCD, noir et blanc haute définition. Cette caméra montée sur un mât (fig. 8) vise des cibles de plus de 2 m de hauteur, ancrées dans le sol au front de la coulée (voir fig. 5). La ligne téléphonique est reliée au Centre Opérationnel de la Direction de la Sécurité Civile (CODISC) en préfecture de Digne (90 km de distance), où est assurée une veille permanente.

Un décodeur relié à un écran de télévision permet d'interroger la caméra par appel téléphonique, de visualiser le secteur de la coulée (fig. 9) et d'imprimer une image (imprimante thermique) pour vérifier que les cibles n'ont pas bougé.

Une image de la scène est envoyée toutes les 20 à 30 s sur l'écran du CODISC, la caméra fonctionnant en continu. Les cibles sont réglées afin qu'un déplacement de 3 m déclenche l'alerte au CODISC ; en cas d'alerte, le surveillant, après avoir vérifié sur l'écran qu'il ne s'agit pas d'une fausse alerte (passage d'un animal par exemple), prévient les autorités responsables.

Ce système de surveillance a été inspiré des systèmes mis au point par le Centre Régional d'Information Routière de Marseille et la Société d'Études et de Réalisation Électrotechniques et Électroniques (Nice) pour la surveillance à distance de la circulation.

Parallèlement à la mise en place de ce système de surveillance, une concertation des différents partenaires (Préfecture, Mairies, Responsables du lotissement, RTM, Direction Départementale de l'Équipement, Délégation aux Risques Majeurs, Laboratoire des Ponts et Chaussées d'Aix-en-Provence) permettait de mettre au point une plaquette d'information avec un document de recommandations en cas d'alarme, diffusée à tous les habitants du lotissement (fig. 10 : extrait de la plaquette).

Étude de la coulée

L'aléa lié à une coulée de débris telle que celle de La Valette présente deux composantes : temporelle (quand la coulée se remettra-t-elle en route ?) et spatiale (jusqu'où la coulée se propagera-t-elle ?). Pour tenter de répondre à cette dernière question, deux modèles de dynamique de la coulée sont présentés dans cette



Fig. 8 - Caméra de surveillance de la coulée.



Fig. 9 - Visualisation sur l'écran du CODISC de la coulée avec ses repères.

partie. Ces modèles nécessitent la connaissance de différentes propriétés mécaniques du matériau, que l'on tente d'estimer dans les paragraphes ci-dessous.

Caractéristiques minéralogiques et physicomécaniques

Un échantillon a été prélevé dans la coulée boueuse fluide. Afin de procéder aux diverses analyses, le sol a d'abord été tamisé au tamis de 60 μm avant de subir les divers essais prévus au programme. Les principaux résultats d'essais, réalisés à l'université Laval en 1992, sont présentés au tableau I en comparaison avec d'autres obtenus sur des échantillons provenant du glissement.

CONDUITE À TENIR
EN CAS DE MENACE D'INONDATION
OU DE COULÉE DE BOUE SUR LA VALETTE

- DES MISES EN GARDE PAR LES AUTORITÉS MUNICIPALES -

1 - GARDEZ VOTRE CALME, car :

- vous disposez de plusieurs heures pour quitter votre logement, si nécessaire ;
- le niveau du piège à matériaux est constamment surveillé ;
- tous les services de secours et de sécurité sont sur place.

2 - INDIQUEZ AU CENTRE D'INFORMATION INSTALLÉ DANS LES MAIRIES DE SAINT-PONS OU DE BARCELONNETTE :

- le nombre de personnes à héberger (en précisant s'il y a des cas sociaux, handicapés...) ;
- le volume de mobilier à mettre à l'abri ;
- vos moyens automobiles.

3 - PLACEZ :

- dans une première VALISE :
 - vos documents d'identité et bancaires ;
 - vos objets précieux ;
 - des vêtements de rechange.
- dans une seconde VALISE :
 - draps et couvertures.

4 - RESTEZ À L'ÉCOUTE DE RADIO MONTE-CARLO

qui vous donnera des informations et des conseils notamment en ce qui concerne le moment où il faudra fermer EAU - GAZ - ÉLECTRICITÉ.

TABLEAU I

Caractéristiques physico-mécaniques de la matrice de la coulée boueuse de La Valette

Paramètres	Essais sur fraction < 60 μm (étude de 1992)	Essais sur fraction < 100 μm (étude de 1989)
Teneur en eau (%)	—	> 23
Limite de plasticité (%)	21 — 25	19 — 23
Limite de liquidité (%)	37 — 41	30 — 40
Indice de plasticité (%)	16 — 17	11 — 17
Surface spécifique (m^2/g)	25 — 26	—
Fraction argileuse (%)	25 — 35	20
Poids volumique (kN/m^3)	17 (estimé)	—
Angle de frottement ($^\circ$)	30 (estimé)	22 — 24
Cohésion (kPa)	—	0

L'échantillon analysé à l'université Laval a des caractéristiques physico-mécaniques semblables à celles qui sont déjà obtenues pour des matériaux du même secteur. Une bonne partie de la différence est liée au fait que le sol analysé à Laval était légèrement plus fin que celui prélevé en 1989. La matrice est considérée comme peu plastique avec une valeur de l'indice de plasticité de 17 %, ce qui permet d'estimer l'angle de frottement à environ 30° . La surface spécifique, mesurée à l'aide de l'essai au bleu, varie entre 25 et 29 m^2/g ; de tels résultats sont compatibles avec l'indice de plasticité mesuré.

La minéralogie telle qu'elle est estimée à partir d'un diagramme de diffraction-X est dominée par la présence de quartz et de calcite, avec un peu de feldspath. Les minéraux argileux sont principalement de la chlorite (mise en évidence par la disparition du pic à 14 Å lors du chauffage) et de l'illite, avec la possibilité d'interstratifiés mais en faible concentration. En résumé, le sol correspond à un matériau relativement peu actif, inorganique et au comportement physico-chimique plutôt normal vis-à-vis des caractéristiques granulométriques et minéralogiques obtenues.

Caractéristiques rhéologiques

Les caractéristiques rhéologiques du matériau ont été obtenues avec des échantillons à des teneurs en eau qui peuvent apparaître élevées par rapport à celles présumées *in situ*. La limite inférieure de la teneur en eau est directement liée à l'appareil utilisé qui ne permet pas de mesurer la viscosité de boues dont la résistance au cisaillement non drainée est supérieure à 2 kPa.

Le protocole utilisé est le même que celui présenté par Locat et Demers (1988) ; l'essai est

réalisé à l'aide d'un viscosimètre de type Haake-Rotovisco RV-12. L'éprouvette est placée dans un double cylindre et subit des alternances entre la vitesse désirée et un retour temporaire à une vitesse maximale de 512 t/min afin d'assurer une préparation préliminaire du sol équivalente pour chaque vitesse de rotation désirée. Ces essais sont appelés essais de réponse dynamique et la courbe obtenue donne la résistance (couple) à l'écoulement en fonction de la vitesse de déformation en cisaillement (fig. 11). Les essais ont été réalisés à une température de 7°C et pour une plage de teneur en eau comprise entre 60 et 101 %. Selon la viscosité et le seuil d'écoulement, il a fallu utiliser deux appareils dont l'un permet d'atteindre des vitesses de cisaillement du double de celle de l'autre. Il est à noter ici qu'une vitesse de déformation en cisaillement de 100 s^{-1} correspond à peu près à une vitesse tangentielle de 10 m/s sur site réel, ce qui est une mobilisation dynamique de l'ordre de grandeur observé pour des coulées boueuses répertoriées ailleurs.

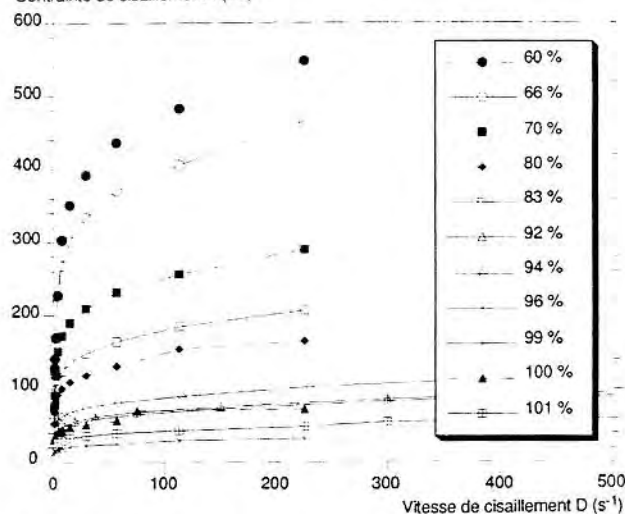
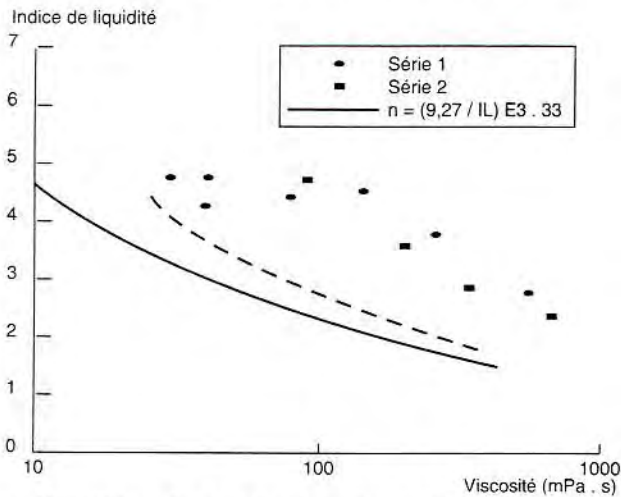
Contrainte de cisaillement τ (Pa)

Fig. 11 - Courbes vitesse-contrainte de cisaillement pour différentes teneurs en eau.

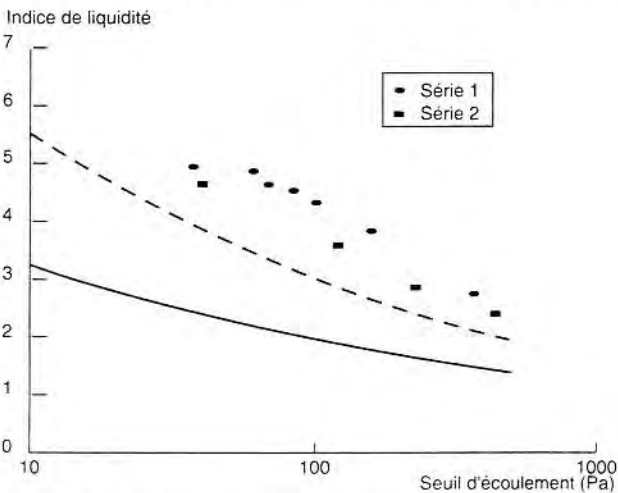
La viscosité est calculée en considérant que le mélange se comporte comme un fluide de Bingham. La viscosité (exprimée habituellement en mPa.s) qui correspond à la pente de la courbe (fig. 11) est estimée en traçant une droite reliant les trois derniers points expérimentaux, et l'intercept de cette droite sur l'axe des ordonnées donne le seuil d'écoulement (τ_c , unité habituelle : Pa).

Comme on peut le constater, la viscosité et le seuil d'écoulement varient fortement en fonction de la teneur en eau. À titre de contrôle, les résultats obtenus sont comparés à ceux provenant d'essais sur des argiles de la vallée du Saint-Laurent au Québec (fig. 12 a et b). Pour des teneurs en eau inférieures, on pourra extrapoler ces courbes ou encore (pour la viscosité η) utiliser l'estimation proposée

Fig. 12 - Relations entre les paramètres rhéologiques et l'indice de liquidité pour deux séries d'essais.



a. Viscosité : la ligne en tireté représente la borne supérieure pour les sédiments argileux de la vallée du Saint-Laurent.



b. Seuil d'écoulement : les lignes représentent les limites observées pour les argiles de la vallée du Saint-Laurent.

par Locat et Demers à partir de l'indice de liquidité (I_L) :

$$\eta \text{ (mPa.s)} = (9,27/I_L)^{3,33} \text{ où } I_L = (w - w_p)/I_p.$$

Tout d'abord, on remarque que la viscosité augmente graduellement avec une diminution de l'indice de liquidité sauf aux valeurs élevées de l'indice de liquidité ($I_L > 4$) où la teneur en eau doit être telle qu'il peut y avoir des problèmes de sédimentation et de contrôle de l'homogénéité de l'échantillon. Par contre, on peut noter que les valeurs de la viscosité sont nettement au-dessus des résultats obtenus pour les argiles du Québec. Locat et Demers notent qu'un tel écart est observable pour des matériaux plus silteux, comme c'est le cas ici. La viscosité estimée en prolongeant la relation pour un indice de liquidité de 1 (teneur en eau de 40 %) serait d'environ 2 000 mPa.s. Quant au seuil d'écoulement (fig. 12b), il varie dans le même sens. Pour un indice de liquidité de 1, le seuil d'écoulement serait compris entre 1 000 et 2 500 Pa.

Modélisations

On ne dispose pas de données précises sur la teneur en eau du matériau lors de la coulée, ni sur les vitesses d'écoulement. Tant que de telles données ne seront pas disponibles, il sera difficile de conclure définitivement sur l'approche utilisée ici. Ces paramètres seront donc comparés à des cas semblables connus, voire établis à partir de ceux-ci.

Plusieurs modèles existent dans le domaine de la dynamique des mouvements de masse (Locat et al., 1990 ; Brunson et Prior, 1984). Nous nous sommes arrêtés ici à l'application de deux approches très différentes : l'une considérant un écoulement d'un fluide de type Bingham (Karlsruud et Edgers 1982), l'autre tenant compte des contraintes effectives mobilisées à la base d'une tranche de sol en mouvement (Hutchinson, 1986). Les modèles présentés ci-après sont à une dimension (1D) ; écrits en Fortran, les programmes de calcul sont exécutables sur micro-ordinateur. On utilise le profil en long du talweg présenté sur la figure 4, sur lequel la zone où prennent naissance les coulées est indiquée.

Écoulement fluide de type Bingham : modèle VIFLOW

Le modèle utilisé ici s'inspire de celui proposé par Karlsruud et Edgers et assimile la coulée à un fluide de Bingham, caractérisé par un seuil d'écoulement τ_c et une viscosité η . L'analyse du mouvement est réalisée en tenant compte de la loi de Newton sous la formulation suivante :

$$\gamma' h \sin\beta - \tau = \frac{\gamma' h}{g} \frac{dv}{dt}$$

avec : γ' : poids volumique déjaugé

β : angle de la pente

τ : résistance au cisaillement à la base de la masse en mouvement

h : hauteur de la coulée

g : accélération de la pesanteur

v : vitesse moyenne sur une section de l'écoulement de hauteur h .

La résistance au cisaillement est, au sein du fluide, contrôlée par les paramètres rhéologiques :

$$\tau = \tau_c + \eta \frac{dv}{dy}.$$

Karlsruud et Edgers ont effectué des calculs à rebours afin d'évaluer la viscosité et le seuil d'écoulement de sédiments de coulées survenues dans le passé, en ajustant la vitesse moyenne et la distance de parcours. Les résultats obtenus sur le cas de La Valette,

pour une valeur du seuil d'écoulement de 1 000 Pa, sont présentés sur la figure 13 pour diverses valeurs de la viscosité. On note immédiatement que, pour respecter des conditions telles que la vitesse soit inférieure à 10 m/s et la distance de parcours de moins de 800 m, la viscosité doit être supérieure à 7 000 Pa.s ce qui est environ 1000 fois plus élevé que la valeur estimée en laboratoire. Ce désaccord a déjà été observé par Locat et Demers.

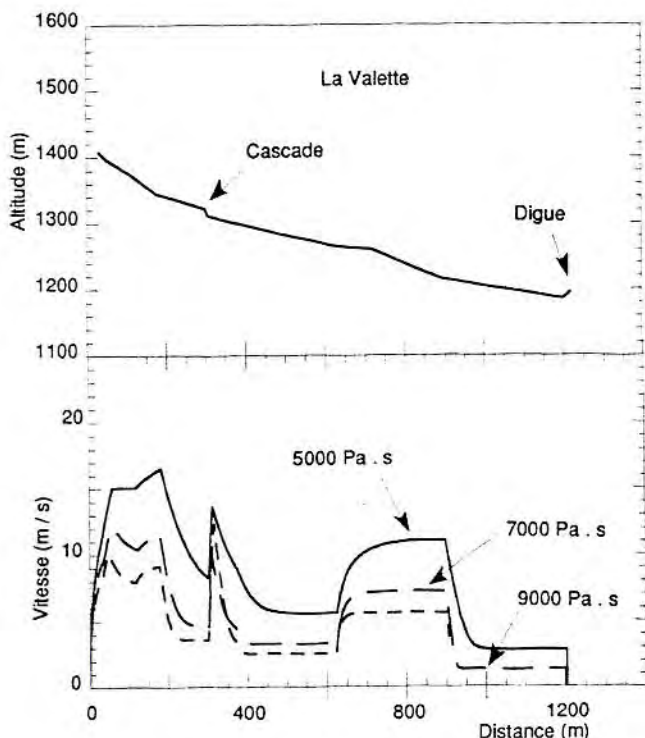


Fig. 13 - Analyse de la dynamique de la coulée boueuse de La Valette à l'aide d'un modèle visqueux de type Bingham (modèle VIFLOW) pour différentes valeurs de viscosité et avec un seuil d'écoulement de 1.0 kPa. En haut est donné le profil topographique du talweg.

Un paramètre important dans l'analyse est aussi le seuil d'écoulement. Les valeurs du seuil d'écoulement utilisées pour ajuster les résultats sont du même ordre de grandeur que celles qui sont obtenues au laboratoire. Le seuil d'écoulement contrôle directement l'écoulement par son influence sur la hauteur critique H_c , c'est-à-dire la hauteur minimale au-dessous de laquelle l'écoulement s'arrête. La relation entre ces deux valeurs est la suivante :

$$H_c = \frac{\tau_c}{\gamma \sin \beta}$$

L'effet de la valeur du seuil d'écoulement est illustré sur la figure 14 qui met en évidence son influence sur la hauteur critique selon divers angles du plan d'écoulement. À La Valette, l'écoulement s'est terminé sur une pente d'environ 8° ce qui suggérerait, pour une épaisseur de 5 à 10 m, un seuil d'écoulement de 5 000 à 10 000 Pa un peu plus élevé que les valeurs expérimentales.

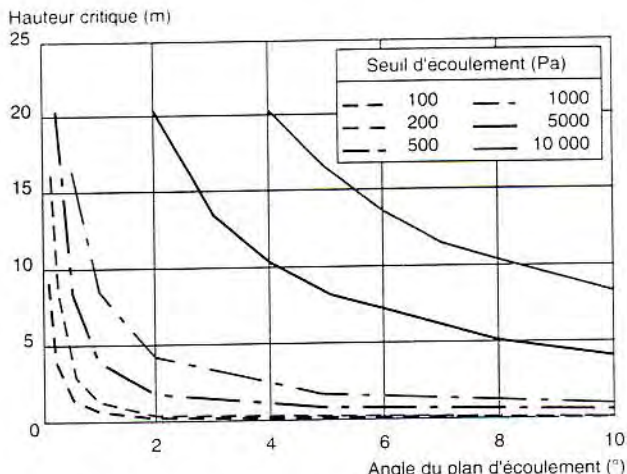


Fig. 14 - Relation entre l'angle du plan d'écoulement et la hauteur critique pour différentes valeurs du seuil d'écoulement (le poids spécifique déjaugé est pris à 7.0 kN/m³).

Propagation avec frottement : modèle glissement-consolidation

Cette approche tient compte de la contrainte effective mobilisée sur le plan de glissement. Elle considère qu'au début du mouvement l'excès de la pression interstitielle est tel que l'angle du versant dépasse l'angle de frottement apparent du sol ϕ^* , de telle sorte qu'il y a instabilité et donc écoulement. La consolidation progressive du sédiment entraîne une diminution de la pression interstitielle à la base et donc une augmentation du frottement mobilisable. L'arrêt du mouvement se produira au moment où l'angle du versant sera en équilibre avec le coefficient de frottement apparent du sol sur le plan de glissement (Hutchinson). La variation temporelle de la dissipation de la pression interstitielle est fonction du paramètre T_v qui s'exprime à partir du coefficient de consolidation c_v , du temps t et de la demi-distance de drainage h :

$$T_v = \frac{c_v t}{h^2}$$

À partir des caractéristiques géotechniques du sol de la coulée de La Valette (tableau I), on peut estimer le coefficient de consolidation (pour un sol ayant une limite de liquidité d'environ 30, c_v peut être estimé entre 2.10^{-5} et 5.10^{-4} m²/s) et l'angle de frottement (un indice de plasticité de 17 correspond approximativement à un sol ayant un angle de frottement de 30°). Les calculs ont été réalisés pour deux valeurs du coefficient de consolidation (fig. 15a et b). On observe qu'à cause des fortes pentes dans la partie initiale du plan d'écoulement, la vitesse est très élevée et la durée totale de l'événement est suffisamment courte pour que le coefficient c_v ait relativement peu d'influence sur les résultats du calcul. En revanche, la valeur de départ du rapport de pression interstitielle $r_u = u/\gamma h$ influence fortement les résultats. Il y a une relation directe entre la valeur de r_u et l'angle de frottement apparent (ϕ^*) du sol :

$$\tan \phi^* = (1 - r_u) \tan \phi$$

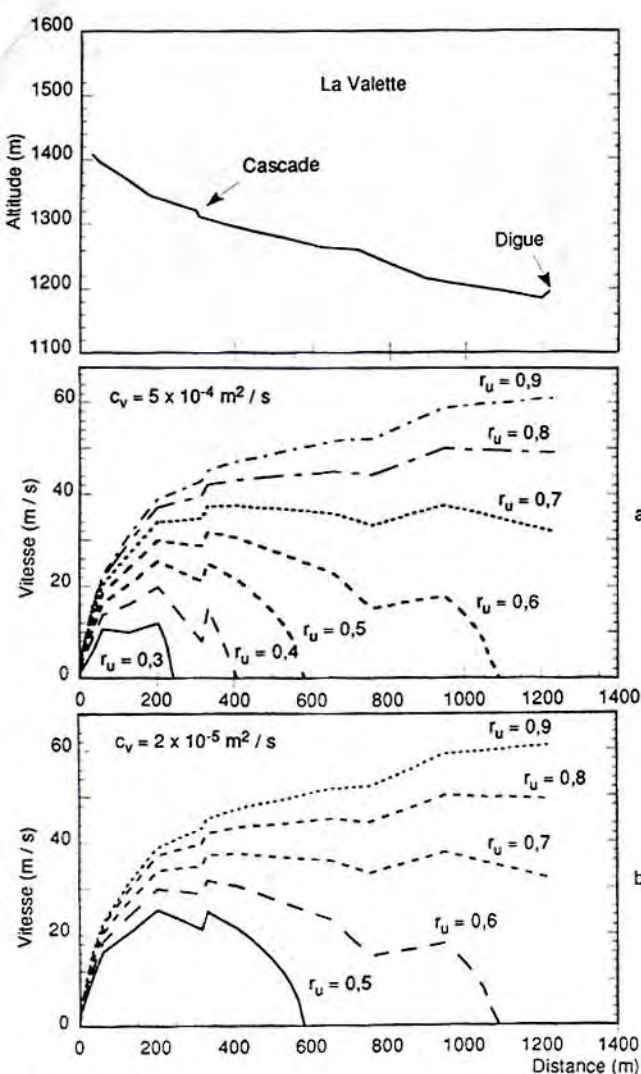


Fig. 15 - Analyse de la mobilité de la coulée boueuse de La Valette à l'aide du modèle « glissement-consolidation » pour différentes valeurs du rapport de pression interstitielle (r_u) et des valeurs du coefficient de consolidation (c_v) de : $5.0 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ (a) et $2.0 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ (b). En haut est donné le profil topographique du talweg.

Toute dissipation de la pression interstitielle entraîne une diminution de la valeur de r_u et donc une augmentation de l'angle de frottement apparent. Pour un sol saturé où la nappe d'eau serait en surface, la valeur de r_u serait proche de 0,6. Une valeur de 0,9 indique un sol fortement liquéfié. On remarque que les résultats du calcul ne sont raisonnables que pour des valeurs du rapport de pression interstitielle inférieures à 0,6, ce qui donne des vitesses maximales inférieures à 30 m/s (dans la partie supérieure du versant). Pour ces valeurs, les distances parcourues sont de moins de 1 100 mètres.

Discussion

Dans un mouvement de terrain comme celui de La Valette, le risque principal provient de la coulée qui se développe à l'aval de la zone en glissement. Même si aujourd'hui le mouvement paraît stabilisé, grâce aux très importants travaux réalisés par les spécialistes de l'aménage-

ment de la montagne, il était intéressant de tester sur ce cas des modèles de propagation de coulées boueuses.

L'analyse de la mobilité de la coulée boueuse de La Valette a été réalisée à l'aide de deux modèles dynamiques simples. Le modèle utilisant une approche par la mécanique des sols apparaît plus cohérent que le modèle issu de la mécanique des fluides : l'analyse par modèle visqueux suppose en effet des valeurs de viscosité environ mille fois supérieures à celles mesurées en laboratoire (le seuil d'écoulement estimé est, en revanche, relativement réaliste).

L'absence de données sur les vitesses observées pour la coulée de boue (fluide) rend difficile l'évaluation des méthodes de calcul. Pour une distance de parcours d'environ 1 000 m, le modèle VIFLOW, calé avec un seuil d'écoulement de 1 000 Pa et une viscosité de 7 000 Pa.s (fig. 13), donne une vitesse maximale de 12 m/s et une vitesse moyenne d'environ 3 m/s dans les derniers segments. Pour des distances de parcours semblables, le modèle « glissement-consolidation » (fig. 15) donne une vitesse maximale de près de 30 m/s et une vitesse moyenne de l'ordre de 15 m/s dans la dernière portion du trajet. D'après les données disponibles dans la littérature pour des phénomènes semblables, des vitesses proches de 10 m/s seraient raisonnables, ce qui ferait alors pencher en faveur du modèle visqueux.

Aucun des deux modèles n'est donc à l'abri de critiques. Malgré leurs imperfections, ces modèles, une fois calés sur des coulées existantes, peuvent permettre une évaluation approchée de la distance maximale susceptible d'être atteinte par une prochaine coulée, et donc de mieux cerner le risque correspondant.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- BRUNSDEN D., PRIOR D.-B. (1984). *Slope instability*. J. Wiley and Sons, New York, 620 p.
- COMBES F. (1990). Le glissement de terrain de La Valette. *Revue de Géologie alpine*. Mémoire hors série, 15.
- COLAS G., PILOT G. (1976). Description et classification des glissements de terrain. *Bull. Liaison P. et Ch.*, spécial II, mars.
- HUTCHINSON J. (1986). A sliding-consolidation model for flow slides. *Can. Geotech. J.*, 23, pp. 115-126.
- KARLSRUD K., EDGERS L. (1982). *Some aspects of submarine slope stability*. In *Marine Slides and Other Mass Movements*, Saxov et Newenhuis, éd., Plenum Presse, pp. 61-81.
- LÉGIER A. (1977). *Mouvements de terrain et évolution récente du relief dans la région de Barcelonnnette*. Thèse 3^e cycle, Université de Grenoble, 163 p.
- LOCAT J., DEMERS D. (1988). Viscosity, yield stress, remoulded strength, and liquidity index relationships for sensitive clays. *Can. Geotech. J.*, vol. 25, 4, pp. 799-806.
- LOCAT J., NOREM H., SCHIELDROP B. (1990). *Modélisation de la dynamique des glissements sous-marins*. Comptes rendus du 6^e Congrès int. de l'AIGI, pp. 2849-2855.