

# Etude et prévision des mouvements de terrains

par Chahrokh AZIMI, Ph. D. et Pierre DESVARREUX, Ingénieur ECP

## Résumé

La résolution des problèmes posés par les mouvements de terrains, qu'il s'agisse de déterminer des travaux de stabilisation ou de prévoir l'évolution du phénomène, nécessite la compréhension du mécanisme en jeu. Ce mécanisme fait intervenir des caractéristiques purement géométriques comme la forme de la surface de glissement, et d'autres comme les propriétés mécaniques des matériaux, les pressions interstitielles, etc... qui sont en général difficiles à mesurer. C'est pourquoi la connaissance des déplacements du terrain est un des éléments

importants pour la compréhension de ces mécanismes, élément venant en complément de tous les autres.

Le but de l'exposé est de présenter concrètement la mise en œuvre de diverses techniques topographiques (triangulation, mesures de distance, etc...) et leur utilité dans la résolution des problèmes de mouvements de terrains.

On examinera successivement sur des exemples les problèmes de détermination de la surface de glissement, de l'appréciation de l'efficacité de travaux de stabilisation et de la prévision de mouvements de terrains.

## I — POSITION DU PROBLEME

Les mouvements de terrains sont des phénomènes géologiques actuels et complexes, dont l'étude a pour but de fournir une réponse à l'une des 3 questions suivantes :

— Est-il possible de stabiliser cette pente en mouvements et comment ?

— Peut-on construire sur cette pente — apparemment stable — sans en modifier l'équilibre, et comment procéder ?

— Cette pente en mouvements peut-elle devenir dangereuse, et comment prévoir l'évolution de ses mouvements ?

On peut dire que les mouvements constatés sont la réponse du terrain aux diverses sollicitations qui lui sont imposées, ou plus précisément aux modifications de ces sollicitations :

— modification dans la répartition des contraintes, à cause de surcharges, de modifications de forme, ou des mouvements eux-mêmes ;

— modifications dans la répartition des pressions interstitielles (pression de l'eau dans le terrain) sur le pourtour du terrain en mouvement, en particulier sur la surface de glissement ;

— modification des propriétés mécaniques des matériaux sous l'effet de l'altération physico-chimique ou des grandes déformations (caractéristiques "résiduelles").

Pour résoudre les problèmes de mouvements de terrains, il faut donc pouvoir connaître :

— les principales hétérogénéités du terrain ;

— la forme de la surface topographique et celle de la surface de glissement ;

— les caractéristiques mécaniques des matériaux et leur éventuelle évolution ;

— les pressions interstitielles sur la surface de glissement, et leurs variations dans le temps ;

Ceci afin de comprendre le mécanisme des mouvements, c'est-à-dire déterminer quels sont les facteurs influents sur les mouvements. Comme les mécanismes sont souvent complexes, leur étude sera facilitée si on

peut mettre en parallèle les déplacements du terrain avec certaines données comme la pression interstitielle, la pluviométrie, etc.

Les mesures de déplacement du terrain, en particulier à l'aide des techniques topographiques, apparaissent donc comme un élément nécessaire (mais non suffisant) à toute étude sérieuse de mouvement de terrain.

## II — PRINCIPES ET TECHNIQUES

### 2.1. Implantation des témoins

En général, on a toujours intérêt à planter le canevas de témoins mobiles et de bornes fixes le plus tôt possible après le début des études. En effet, si on doit définir des travaux de stabilisation, il est intéressant de pouvoir disposer d'un temps minimum de mesures avant travaux pour bien apprécier l'efficacité de ceux-ci.

L'implantation des témoins et des bornes devrait être faite après une reconnaissance géologique sommaire, destinée à préciser les limites de la zone en mouvement, et, à l'intérieur de celle-ci, de repérer des zones d'activité différente qui doivent donc être surveillées. A notre avis, la meilleure solution consiste à définir cette implantation conjointement entre le topographe et le géotechnicien.

Les bornes fixes doivent être en nombre suffisant, surtout si on n'a pas de certitude absolue sur la stabilité de certaines d'entre elles.

Nous ne rentrerons pas dans le détail de la constitution des massifs de fondation ou de celle des témoins mobiles.

### 2.2. Espacement des mesures

Nous verrons plus loin que la compréhension précise des mécanismes de glissement nécessite pratiquement des mesures en continu (ou à la rigueur 1 mesure par jour), d'où des techniques particulières. Cependant, les mesures "classiques" conservent leur intérêt et leur espacement peut varier de 1 mois à 3 mois, s'il s'agit de mesures en X, Y, Z. S'il s'agit de mesures simplifiées (nivellement seul ou variation de distance), on peut adopter des fréquences plus grandes. D'autre part, en fonction de la connaissance qu'on a des mouvements, on peut adapter la fréquence aux diverses périodes de l'année.

### 2.3. Techniques utilisées

Elles sont très variées et comprennent (cette liste n'est pas exhaustive) :

Association pour le développement des recherches sur les glissements de terrains, 2, rue de la Condamine, 38610 Gières.

— la triangulation classique (ou avec trilatération) pour les mesures en X, Y, Z.

Dans ce cas, le canevas de bornes fixes est vérifié à chaque mesure (3 ou 4 mesures par an) ou 1 fois par an (mesures plus fréquentes) ;

— le nivellement seul qui offre l'avantage de la précision (nivellement direct) et qui est simple à mettre en œuvre, sur des routes par exemple. Mais les mesures ne sont significatives que si le mouvement a une composante verticale non négligeable ;

— les mesures par alignement qui consistent à implanter des témoins sur un alignement défini par 2 bornes fixes (bornes C et D de la fig. 1). On vient ensuite mesurer directement sur le terrain la distance entre le témoin et l'alignement d'origine, la mire étant replacée sur cet alignement. Cette distance est en première approximation proportionnelle au déplacement ;

— les mesures de variation de distance au moyen de distancemètres électroniques. On peut admettre dans certaines configurations que la variation de distance est représentative du déplacement réel (fig. 1) ;

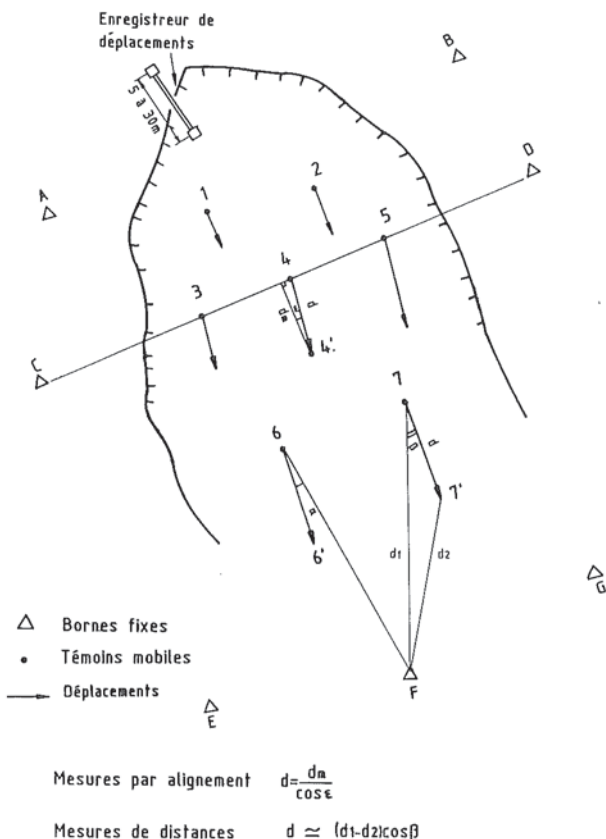


Fig. 1 — Schéma de principe de divers dispositifs de surveillance topographique de glissements de terrains.

— les mesures de variations de distance sur bases courtes (moins de 50 m) au moyen de fils invar installés à demeure ou remis en place à chaque mesure. Ce système peut se prêter à la mesure automatique et à l'enregistrement.

#### 2.4. Remarques

En général, dans la plupart des cas, il est plus important de connaître les variations des déplacements en fonction du temps que leur amplitude exacte.

Lorsque la cinématique du mouvement est simple, la connaissance des déplacements en surface est suffisante pour apprécier les déplacements en profondeur. Pour

mesurer ces derniers, on utilise couramment les tubes inclinométriques qui permettent de reconstituer la déformée d'un forage. Dans ce cas, il est nécessaire de prévoir un contrôle topographique des sommets de tubes. En effet, si les mesures inclinométriques n'indiquent pas de niveau de cisaillement, il faut pouvoir apprécier si ceci est dû à l'absence de mouvements ou au fait que le niveau de cisaillement se situe plus profondément que la base du sondage.

### III — DELIMITATION DE LA ZONE EN MOUVEMENTS

Grâce à des mesures en X, Y, Z, couvrant une période d'activité (3 à 4 mois au minimum), on peut déterminer les zones stables et les zones actives. Parmi ces dernières, on peut parfois distinguer des zones en mouvements plus ou moins rapides.

Si on dispose des vecteurs de déplacement dans des plans verticaux et si la cinématique du mouvement est assez simple, on peut construire géométriquement la forme de la surface de glissement en supposant en première approximation que les vecteurs de déplacements en surface sont parallèles à la tangente à la surface de glissement à l'aplomb du point considéré (fig. 2). Pour réaliser cette construction, on utilise les points de passage connus de la surface de glissement (fissures, bourrelets frontaux, ou tubes inclinométriques).

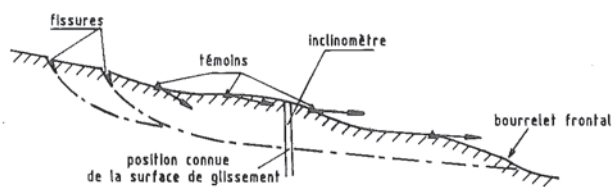


Fig. 2 — Principe de la construction de la surface de glissement.

### IV — APPRECIATION DE L'EFFICACITE DE TRAVAUX DE STABILISATION

On pense paradoxalement assez peu à cette application de la topographie. Lorsque des travaux de stabilisation sont prévus, il est très utile de pouvoir disposer de mesures de déplacements avant et après pour juger de leur efficacité. D'autre part, dans le cas d'aménagements entraînant un risque de déstabilisation (par exemple retenues artificielles), il est très utile, pour éviter les contentieux ultérieurs, d'effectuer des mesures de déplacements des pentes douteuses avant et après travaux.

L'exemple ci-dessous concerne un glissement de terrain affectant le CD 8A entre Monestier-de-Clermont et Gresse-en-Vercors. Ce glissement, connu depuis longtemps, entraînait un affaissement régulier d'une partie de la chaussée sur 30 m de long. La zone en mouvements, large de 20 à 30 m, comprenait une partie supérieure très active (vitesses de déplacement estimées à 50 cm/an minimum) et une partie inférieure moins active sans fissures apparentes (fig. 3).

En juillet 1975, on a réalisé une première tranche de drainage (2 éperons drainants profonds de 3 m) et on a implanté ensuite le système de surveillance topographique. Bien que cette disposition ne soit pas idéale, on a pu faire trois observations intéressantes lors des mesures de déplacement :

— stabilité du témoin 11, ce qui montrait que les observations visuelles sur les limites de zone en mouvements étaient justes ;

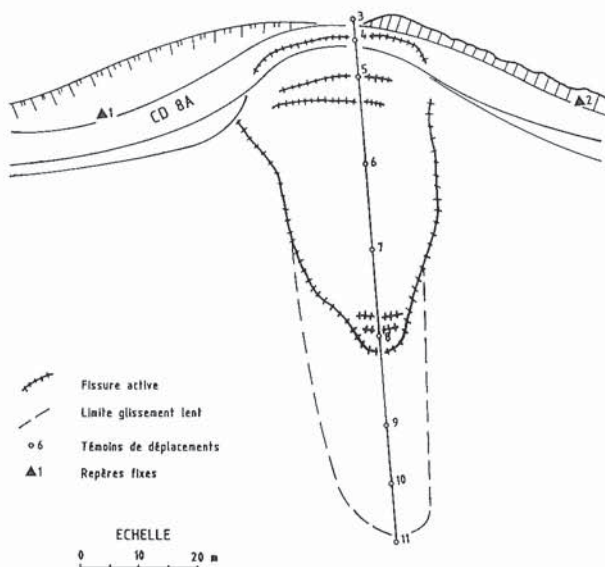


Fig. 3 — Glissement du CD 8A. Implantation des témoins.

— homogénéité dans les vitesses de déplacements des témoins n° 5, 6, 7, 8, 9 et 10 appartenant pourtant à 2 zones d'activités très différentes avant drainage. Le rôle de la 1<sup>re</sup> tranche de drainage a donc été de ralentir les mouvements de la zone supérieure mais pas de les arrêter ;

— après la réalisation de la 2<sup>e</sup> tranche de drainage en décembre 1977, les vitesses moyennes ont été encore ralenties comme le montre la fig. 4 :

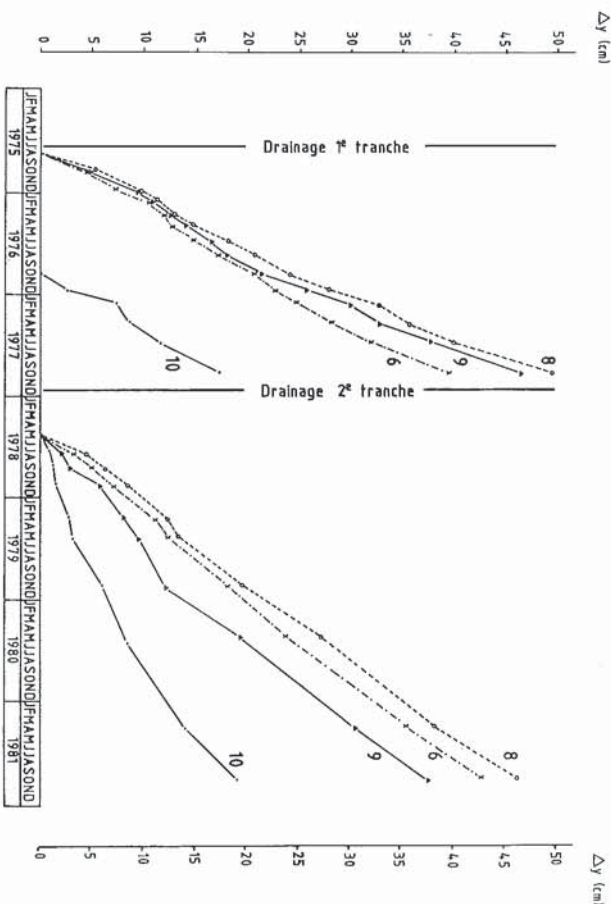


Fig. 4 — Glissement du CD 8A. Evolution des déplacements (planimétrie).

### Vitesses moyennes

Témoïn	Après 1 <sup>re</sup> tranche de drainage	Après 2 <sup>e</sup> tranche de drainage
6	15 - 22 cm/an	11 - 14 cm/an
8	20 - 25 cm/an	12 - 16 cm/an
9	20 - 25 cm/an	8 - 13 cm/an
10	17 cm/an	5 - 9 cm/an

On a donc pu ainsi apprécier l'efficacité du drainage même si la stabilisation complète n'a pu être obtenue. D'autre part, les mesures topographiques ont permis de montrer que des terrains sans fissuration apparente peuvent être sujets à des mouvements de 10 à 20 cm/an.

Enfin, à cause de l'existence de mouvements résiduels, il a été décidé de reprendre la route en estacade sur pieux fondés au-dessous de la zone en mouvements. Ces travaux ont été réalisés en 1983.

### V — ANALYSE DU COMPORTEMENT D'UN GLISSEMENT DE TERRAIN

Le cas du glissement de Léaz dominant la retenue de Génissiat est un exemple caractéristique où la surveillance a pour but de préciser le mécanisme des mouvements, prévoir dans quelles conditions ceux-ci pourraient s'accélérer et juger de l'efficacité des travaux entrepris. On cherche en effet à assurer l'exploitation de la retenue dans des conditions normales de sécurité.

Ce glissement, connu avant l'établissement de la retenue, affecte une épaisseur de 10 à 14 m de matériaux argileux, représentant un volume total de  $1,4 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ .

La retenue n'a aucune influence sur les mouvements, la base du versant, constituée d'alluvions graveleuses, étant stable (témoins 50 et 56 de la fig. 5).

Les mesures de déplacements ont commencé fin 1964 avec la mise en place de 44 témoins mesurés en triangulation et par alignements. Les mesures, de fréquence mensuelle à trimestrielle, ont permis de préciser les vitesses moyennes (5 à 30 cm/an) et l'existence d'une zone plus active (hachurée sur la fig. 5) correspondant à un volume de  $100\,000 \text{ m}^3$ . Elles ont enfin permis de vérifier que l'activité du glissement était saisonnière mais pas de préciser le mécanisme exact. C'est pourquoi depuis 1974 on a adopté le système de surveillance suivant (fig. 5) :

— mesures en triangulation sur 25 témoins à partir des bornes fixées A, C... M<sub>2</sub>. La fréquence est annuelle et permet de vérifier l'activité moyenne des diverses zones du glissement ;

— mesures au distancemètre entre le point fixe M<sub>2</sub> et 11 témoins du glissement. La fréquence moyenne est trimestrielle mais peut être resserrée en cas d'accélération des mouvements. Le but est de vérifier qu'aucune zone du glissement ne dépasse en vitesse la zone la plus active ;

— enregistrement en continu des déplacements d'un point de la zone la plus active avec, depuis 1978, transmission automatique des mesures à la centrale de Génissiat par ligne téléphonique. Le système enregistreur est constitué d'un fil invar  $\varnothing 1,65 \text{ mm}$  de 30 m de long tendu à 12 kg entre un pilier fixe en béton et l'enregistreur proprement dit. Le mouvement de translation de l'enregistreur est converti en mouvement de rotation, lui-même transmis à un codeur numérique angulaire. Le fil invar est protégé par une buse Armco  $\varnothing 800 \text{ mm}$ , posée sur le terrain. Un entretien est nécessaire pour éviter le contact entre le fil invar et la buse et entre cette dernière et le pilier fixe.

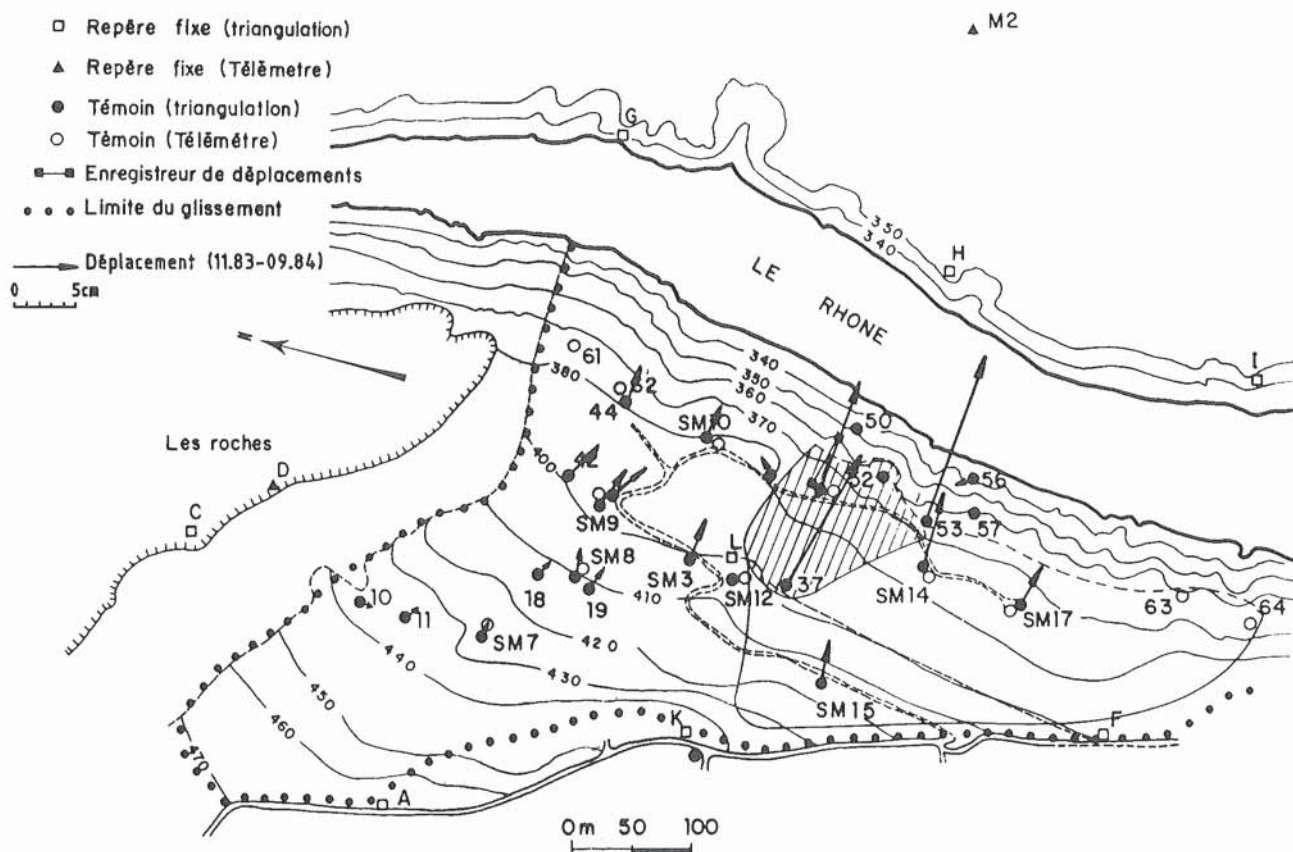


Fig. 5 — Glissement de Léaz. Implantation de la surveillance.

En parallèle avec les mesures de déplacements, on réalise des mesures de niveaux piézométriques et de pression interstitielle dans des cellules, de même que les mesures pluviométriques et de températures.

Sur la fig. 6, on a représenté un exemple de 10 mois d'enregistrements corrélés avec les variations piézométriques à proximité de l'enregistreur. On a ainsi pu mettre en évidence 3 points fondamentaux qui n'étaient jamais apparus clairement auparavant :

— les périodes d'activité sont réduites dans le temps alors qu'on a plusieurs mois d'arrêt par an des mouvements (à 1 ou 2 mm près) ;

— l'activité du glissement se produit lorsque le niveau d'eau dépasse une valeur critique No (ici 369,30 à 369,40 NGF) au sondage FP 13. On a vérifié par la suite que ce niveau était pratiquement constant dans le temps ;

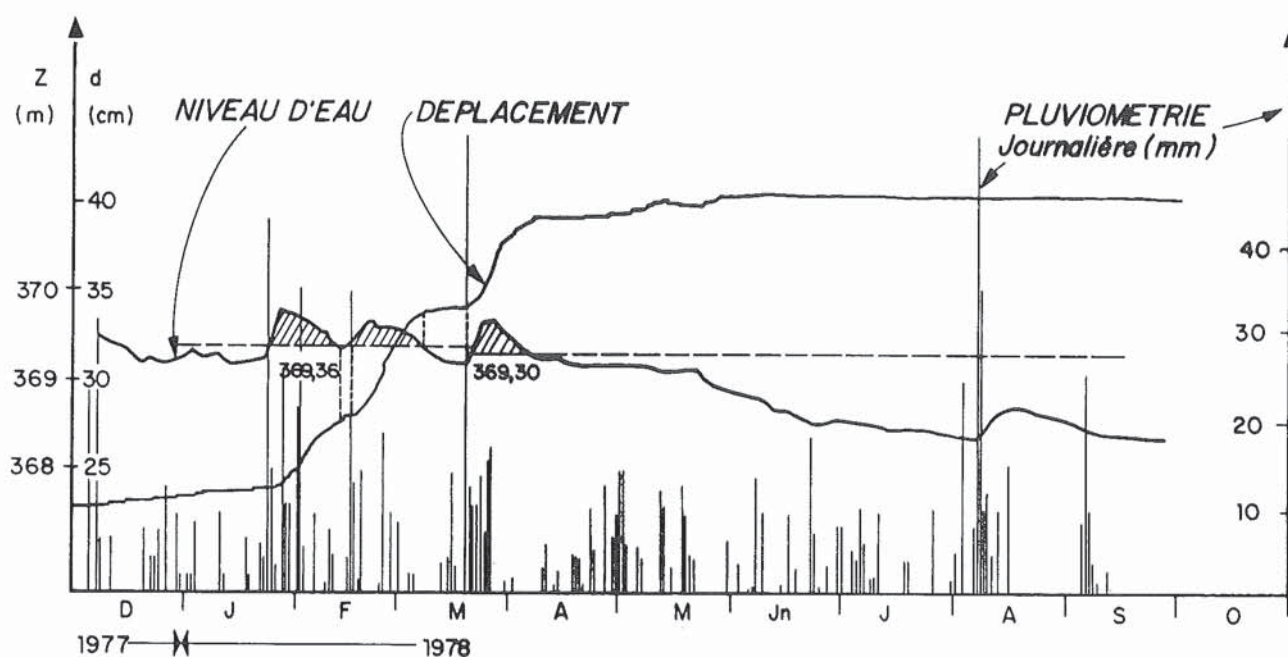


Fig. 6 — Glissement de Léaz. Enregistrement des déplacements de la zone la plus active.

— en phase d'activité, on peut lier la vitesse instantanée des déplacements au niveau d'eau par une formule approchée du type  $V = k (N - N_0)$ .

On a donc pu proposer un certain schéma de comportement du glissement qui permettait de rendre compte des vitesses observées en fonction des niveaux d'eau dans le terrain. Le principe de la surveillance consiste alors à vérifier que les corrélations établies entre vitesses et niveau d'eau, de même que pluviométrie, restent bien les mêmes dans le temps.

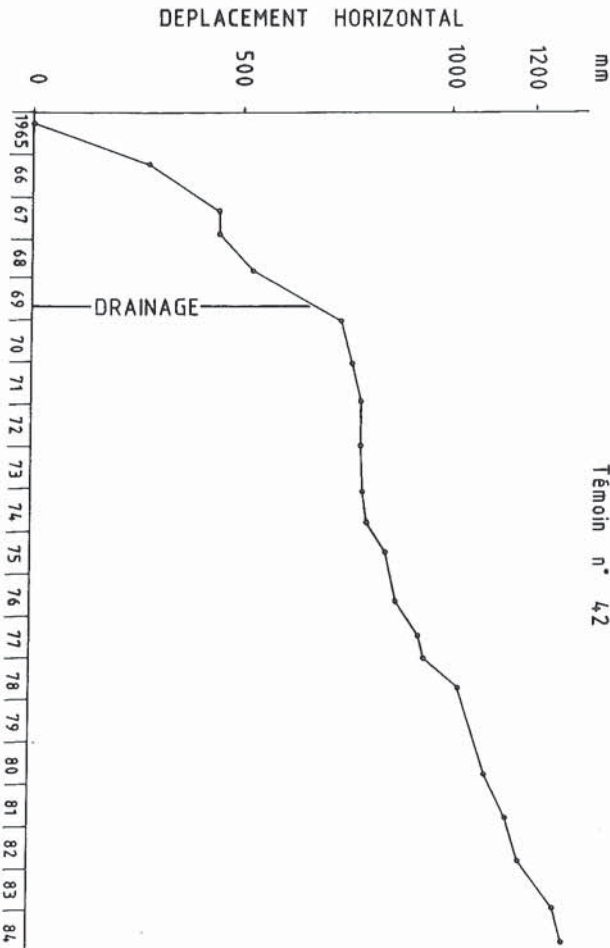


Fig. 7 — Glissement de Léaz. Influence de la réalisation du drainage sur les mouvements.

On doit ajouter qu'on a réalisé en 1969 des travaux de drainage superficiel du glissement représentant 300 m d'antennes drainantes et 1 300 m de collecteurs étanches destinés à empêcher la réinfiltration des sorties d'eau. La fig. 7 permet d'apprécier l'efficacité de ce drainage. Sur la fig. 8, on a reporté les déplacements annuels du témoin 42 en fonction de la pluviométrie totale annuelle corrigée de l'évapotranspiration (pluviométrie "efficace"). On peut constater ainsi que, pour des pluviométries équivalentes, les vitesses de mouvements ont été divisées par 3 ou 4.

Nous voudrions insister sur le fait que les mesures topographiques seules n'auraient pas permis une démonstration aussi nette de l'efficacité du drainage : en effet, les années 1971 à 1976 ayant été peu pluvieuses, on pouvait autant imputer le ralentissement à cette cause.

Enfin, on peut constater que si on parvenait à abaisser le niveau d'eau sous le niveau critique, les déplacements seraient pratiquement nuls. Ceci montre que con-

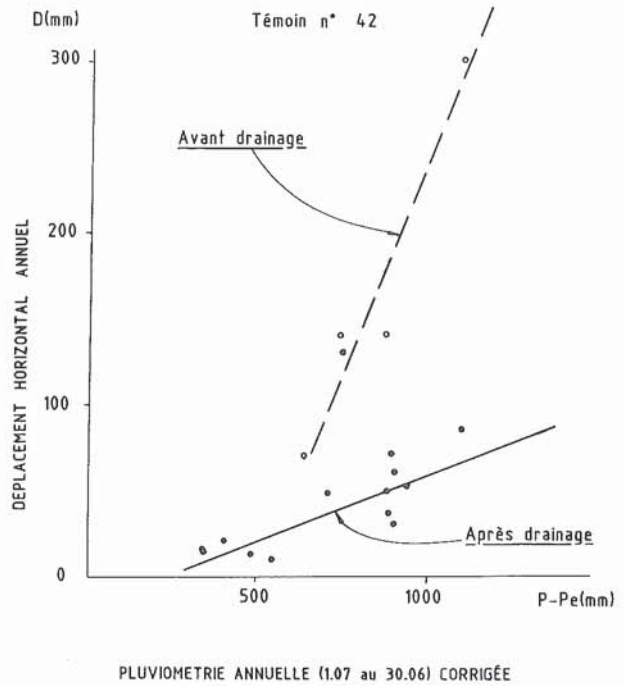


Fig. 8 — Glissement de Léaz. Corrélations comparées avant et après drainage entre la pluviométrie efficace (P-Pe) et le déplacement horizontal annuel.

trairement à une idée souvent répandue, la stabilisation de grands glissements n'est pas impossible dans certains cas, par exemple lorsque ces mouvements sont dus à des variations de pression interstitielle et qu'on peut agir sur cette dernière.

## VI — PREVISION D'ÉBOULEMENT

Ce dernier exemple a pour but de montrer comment on a pu prévoir un éboulement à partir de mesures topographiques très simples.

Fin 1975, suite à un éboulement de l'ordre de 1 000 m<sup>3</sup> dans les gypses en contrebas du CD 926, 2 fissures distantes de 50 m sont apparues dans la chaussée de cette route entre St-Jean-de-Maurienne et St-Sorlin-d'Arves. A cet endroit, le CD 926 domine de 100 m le fond de la vallée de l'Arvan, où se situe le CD 110 (fig. 9).

En février 1976, on a mis en place 10 repères de nivellement dont 4 au-delà des fissures. La fréquence prévue était mensuelle. Ces mesures étaient effectuées par les agents de l'Équipement.

En parallèle, une étude géologique était engagée et, en 1977, on a émis l'hypothèse que les mouvements constatés sur la route étaient vraisemblablement la conséquence d'un mouvement d'ensemble affectant les gypses en contrebas. Cette hypothèse reposait en particulier sur l'observation que certains plans de stratification du gypse (de direction N 110 à 170 avec pendage 48 à 55° vers le N-E) portaient des stries de direction N 85 à 100, biaisées par rapport aux lignes de plus grande pente et correspondant à la direction de l'intersection des plans de stratification avec une famille de diaclases N 60 pendage 60° vers le S-E.

Pour vérifier cette hypothèse, on a fait implanter en avril 1978 7 nouveaux témoins dont 2 sur la route et 5 en contrebas, sur les gypses. Ces 7 témoins ont été levés en X, Y, Z, à partir de 3 bornes fixes situées sur la rive droite de l'Arvan.

Dès le mois d'octobre 1978, on a pu faire les deux constatations fondamentales suivantes :

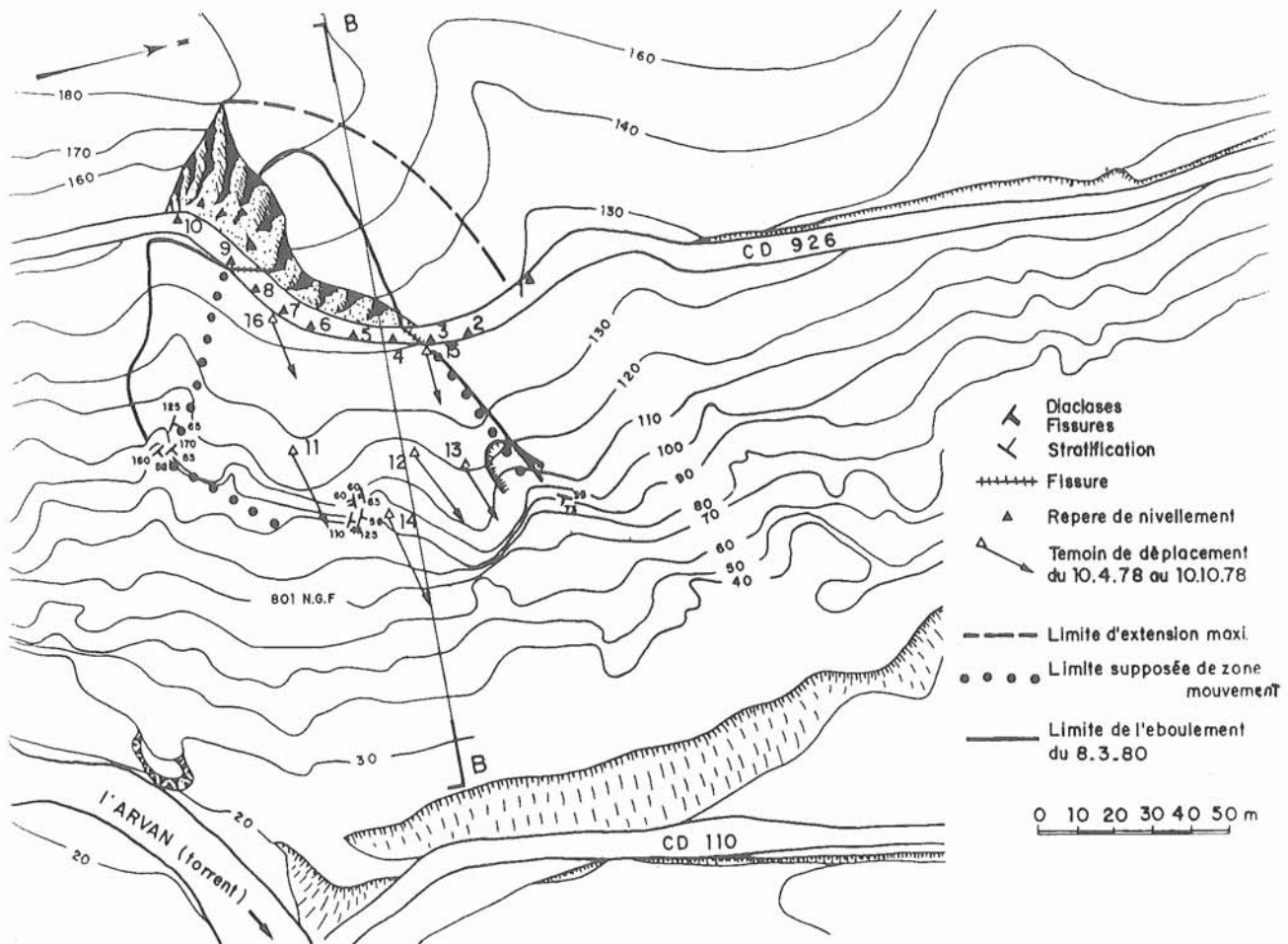


Fig. 9 — CD 926 — Implantation de la surveillance.

— les vitesses de déplacements verticaux des témoins tels que 12 ou 14 étaient les mêmes que celles des repères de nivellement du CD 926, ce qui montrait bien qu'il y avait un mouvement d'ensemble (fig. 11) ;

— les directions des vecteurs de déplacements des témoins 11 à 14 étaient parallèles entre elles, non conformes à la pente topographique, et cohérentes avec les directions et pentes des stries observées sur les plans de stratification (fig. 9 et 10).

On a pu alors, par constructions géométriques, et en tenant compte de l'existence de certaines grandes fissures, estimer les limites du massif en mouvement et son volume. Comme les vitesses d'affaissement vertical ne semblaient pas diminuer, on a incité les services de l'Équipement à étudier préventivement diverses possibilités de déviations situées au-delà des limites maximales d'extension possible.

Sur la fig. 11, on a représenté l'évolution de l'affaissement du CD 926 au témoin n° 7 (mesures de nivellement). Dans le cas présent, on a eu un mouvement vertical à vitesse quasi-constante de 16 cm/an durant 3 ans, puis une accélération début 1980. Ceci a conduit à resserrer les mesures (tous les 10 jours, puis tous les 2 jours, puis tous les jours). Dans le cas présent, l'accélération n'était liée à aucune sollicitation extérieure mais était due au phénomène de rupture progressive.

Au 5 mars 1980, l'analyse mathématique de l'évolution des déplacements a montré que la date la plus probable d'éboulement se situait au 8 ou 9 mars. On a recommandé alors la fermeture du CD 926 et du CD 110 avec **continuation de la surveillance**. A ce moment (6

mars), les vitesses journalières ne dépassaient pas 5 à 7 mm/jour et l'accélération n'était pas décelable à l'œil nu, ce qui fait que l'Ingénieur Subdivisionnaire a rencontré des réticences à la fermeture de la route.

Le 8 mars à 21 h 30 un éboulement estimé à 80 000 m<sup>3</sup> emportait le CD 926 sur 50 m de long et ensevelissait le CD 110. Les limites de cet éboulement ont été sensiblement celles qui avaient été prévues. Grâce à la fermeture préventive des routes, aucune victime n'a été à déplorer.

En août 1980, le CD 926 était ouvert selon un tracé dont l'étude avait commencé en 1979.

## VII — CONCLUSIONS

On peut schématiser ainsi l'utilisation de la topographie dans les études de glissements de terrains :

— sur des sites douteux où des aménagements sont prévus. Les mesures topographiques permettent de vérifier l'existence ou non de mouvements et leur ordre de grandeur (jusqu'à 10-20 cm/an des mouvements peuvent se produire sans fissuration du sol). Cette connaissance est importante pour apprécier la stabilité du site à l'état naturel, car cette dernière peut être modifiée de manière importante par la suite, même par des interventions minimales ;

— sur des sites où les mouvements sont connus, les mesures topographiques servent d'une part à préciser le mécanisme des mouvements (à condition d'être fréquentes et de ne pas être utilisées seules, mais conjointement avec des mesures de pression interstitielle, etc.), d'autre

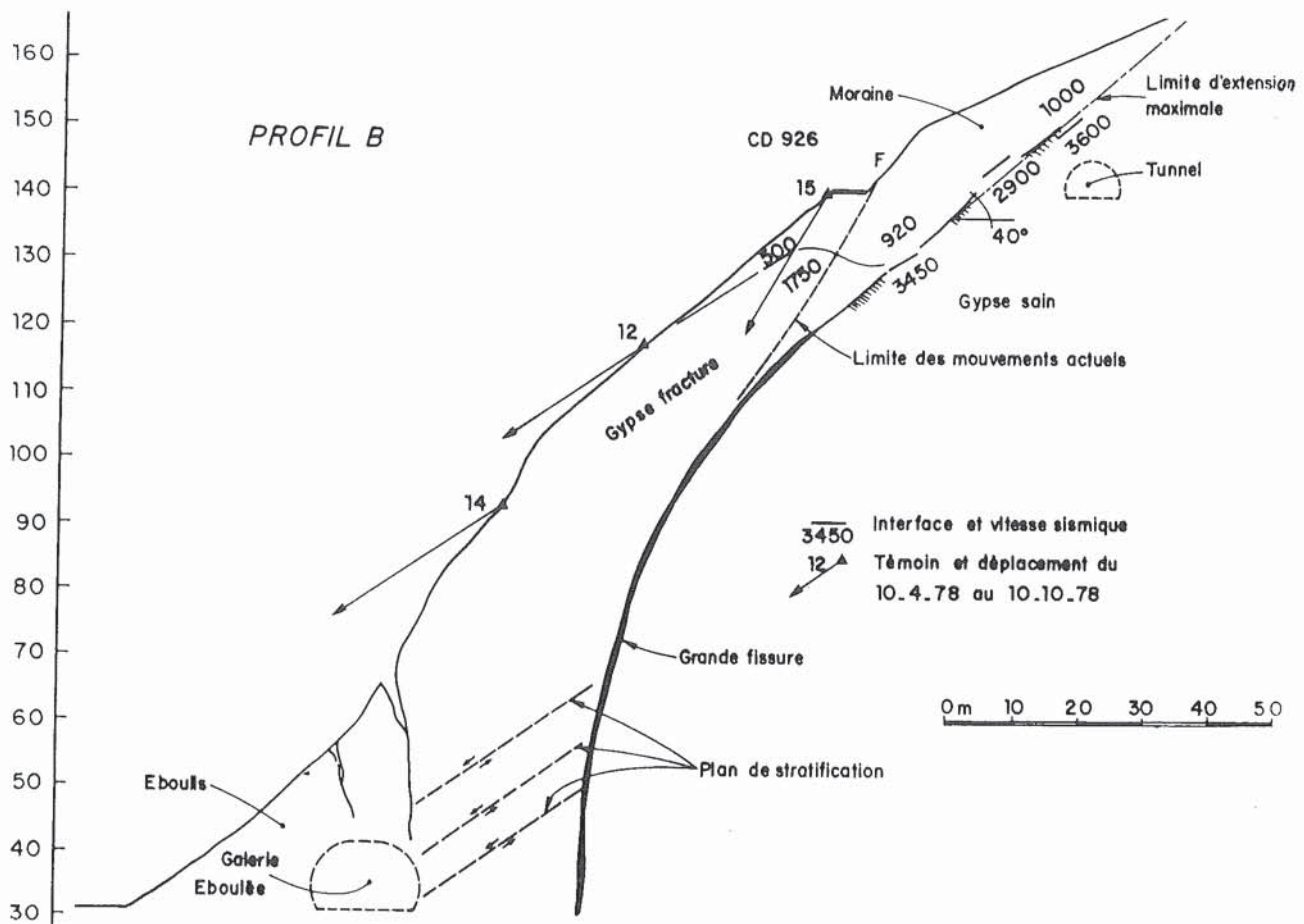


Fig. 10 — CD 926 — Profil en travers dans la masse en mouvement.

part à apprécier l'efficacité de travaux de stabilisation. Dans ce dernier cas, il est recommandé de poursuivre les mesures à fréquence réduite durant plusieurs années car la stabilisation n'est pas toujours instantanée, et au cas où elle n'est pas définitive, la connaissance de la réponse du glissement aux travaux effectués permet de préciser davantage le mécanisme de ces mouvements.

Les qualités demandées aux mesures topographiques sont les suivantes :

- précision en accord avec le but recherché et **définition de l'incertitude sur la position des points** ;

- respect des fréquences prévues et rapidité d'interprétation. Dans le cas du CD 926, nous avons pu prévoir l'éboulement à temps parce que, dans les derniers jours, les mesures de nivellement nous étaient transmises dans les 2 heures qui suivaient leur réalisation.

Nous tenons à remercier :

- la Direction Départementale de l'Équipement de l'Isère — Subdivision de Monestier-de-Clermont ;

- la Compagnie Nationale du Rhône ;

- la Direction Départementale de l'Équipement de la Savoie — Subdivision de St-Jean-de-Maurienne pour leur collaboration dans les exemples cités, et en particulier la réalisation de toutes les mesures de déplacement présentées.

### BIBLIOGRAPHIE

Groupe de travail du Comité Français des Grands Barrages. "Études et travaux réalisés en France en raison de l'instabilité de versants de retenue" — 14<sup>e</sup> Congrès des Grands Barrages, Rio-de-Janeiro, 1982 — pp. 576-579.

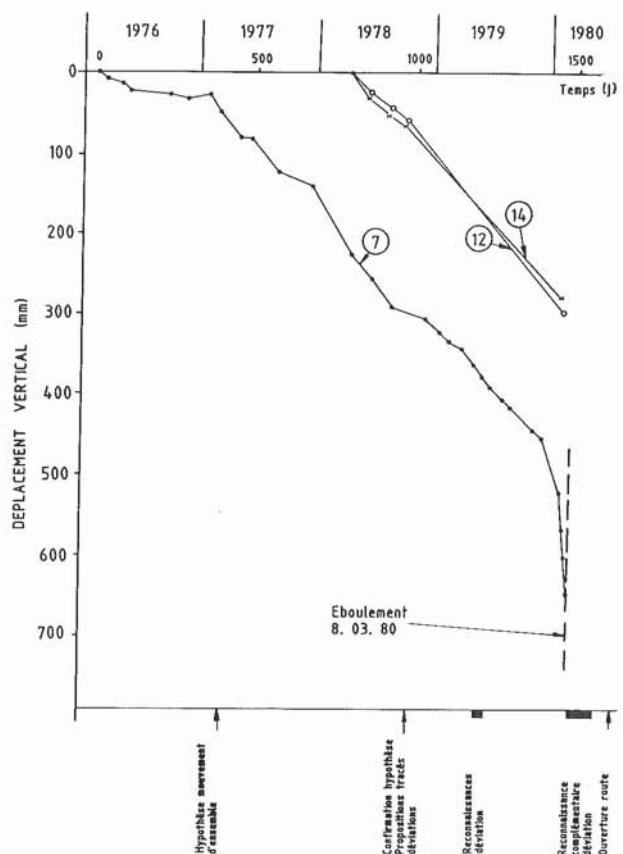


Fig. 11 — CD 926 — Evolution de l'affaissement (mesures de nivellement).