

Glissement de la Chenaula

Autor(en): **Engel, Théophile / Noverraz, Francis / Oboni, Franco**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Ingénieurs et architectes suisses**

Band (Jahr): **109 (1983)**

Heft 22

PDF erstellt am: **27.04.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-74996>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern. Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Glissement de la Chenaula

par Théophile Engel, Francis Noverraz et Franco Oboni

1. Préambule

Le glissement de la Chenaula, situé à l'est de Lausanne, dans les forêts des Monts-de-Pully, couvre une surface de 15 ha. Le tiers de cette surface est toujours actif, déformant périodiquement la route cantonale 773d, qui relie Lausanne-La Rosiaz à Belmont.

Le site a fait l'objet de diverses études, au cours des vingt dernières années (voir bibliographie). Depuis la fin de 1980, le projet d'école « Détection et utilisation des terrains instables » (DUTI), mis sur pied au sein de l'Ecole polytechnique fédérale de Lausanne pour une période de quatre ans, mène une étude scientifique complète sur ce site. Ce travail pluridisciplinaire (aménagement du territoire, géologie et hydrologie, géophysique, géotechnique, mensuration et photogrammétrie, droit, etc.) a pour ambition de parvenir à une compréhension approfondie des phénomènes de glissement propres à nos régions et à l'élaboration de méthodes pour la gestion et la conception des constructions sur des terrains instables.

La phase catastrophique par laquelle ont passé les mouvements sur le site de la Chenaula, en avril 1983, constitue une circonstance exceptionnelle, dans la mesure où le phénomène était en cours d'études suivies lors de la phase destructrice, alors que bien souvent les études commencent après le déclenchement de celle-ci. Aussi, l'article présenté ici se propose-t-il de donner un résumé de l'ensemble des études consacrées à ce site, en exposant plus en détail les données recueillies durant la période ayant précédé le paroxysme d'avril.

2. Contexte géologique et historique

Le glissement originel de la Chenaula, beaucoup plus important que la partie aujourd'hui active, est sans doute ancien de plusieurs milliers d'années, mais aucun élément permettant sa datation précise n'a encore pu être décelé. Il est situé dans une région comportant d'innombrables manifestations d'instabilité résultant le plus souvent de la mauvaise qualité du substratum molassique aquitanien et chattien très tectonisé de la région (proximité de l'importante faille de la Paudèze).

La route cantonale 773d est affectée à divers degrés par une demi-douzaine de ces zones instables entre la sortie du

quartier de la Rosiaz et Belmont, mais la Chenaula constitue sans conteste le cas le plus critique et le plus gênant depuis de nombreuses années: l'affaissement du revêtement consécutif aux mouvements obligeait, faute de travaux d'assainissement, à des fréquentes recharges du tapis.

L'activité de la partie inférieure du glissement (5 ha environ) n'a sans doute jamais cessé complètement, mais elle a probablement été réactivée, suite à l'éboulement de la rive opposée de la Chandelar, le 3 février 1936.

Cet éboulement a déplacé la confluence de la Paudèze et de la Chandelar de plus de 120 m; ce dernier cours d'eau coule depuis lors sur les matériaux glissés aisément érodables de la Chenaula, où il s'est taillé un nouveau cours au long des ans, déstabilisant progressivement le pied du glissement. Il semble que cette déstabilisation soit devenue critique à partir de 1977 surtout: les raisons en sont d'une part la pluviométrie supérieure à la moyenne enregistrée au cours de ces dernières années, d'autre part l'urbanisation des quartiers supérieurs de Lausanne-Epalinges, dont les eaux claires viennent grossir les débits de crue de la rivière, accroissant son pouvoir d'érosion. Un contrôle du débit solide de la Chandelar en amont et en aval du glissement, que nous avons effectué le 21 avril, au cours de la période de mouvements rapides, a montré que la rivière prélevait 70 m³/jour sur ce tronçon long de 200 m, et ce avec un débit certes élevé, mais éloigné des débits de pointe.

A partir du 19 avril 1983, les mouvements sont entrés dans une phase catastrophique durant quelques jours, avec des déplacements journaliers de plusieurs mètres les 20, 21 et 22 avril, avec pour conséquences principales la destruction de la route cantonale, le déplacement et l'obstruction dangereuse du lit de la Chandelar, nécessitant une intervention urgente destinée à rétablir l'écoulement de la rivière.

La vitesse des mouvements a rapidement décru dès le 22 avril, s'établissant progressivement à des valeurs comparables à celles d'avant la catastrophe, quoique encore supérieures.

3. Investigations et équipements

Les études du projet DUTI ont débuté dès octobre 1980 par un levé géologique détaillé qui a permis d'établir pour la

première fois les limites correctes de la partie active du glissement. Sur la base de ce levé, dix forages carottés ont été exécutés, dont huit équipés de tubes pour mesures inclinométriques des déplacements en profondeur, et deux équipés pour l'hydrologie (piézomètre, cellule de prise de pression). Certains tubes ont été transformés en piézomètres ultérieurement. Trois forages complémentaires équipés pour l'inclinométrie et la piézométrie ont été exécutés en 1982 et 1983 (voir tableau 1 et figure 1).

Une campagne de mesure géodésique a été entreprise en vue d'établir la répartition des mouvements en surface sur l'ensemble du glissement. Le réseau mis en place dans des conditions difficiles (forêt) a été ultérieurement étendu et complété par un levé à la planchette de la zone active du glissement; ce levé a permis l'élaboration d'une carte au 1:1000 sur laquelle figure une représentation précise de la topographie telle qu'elle existait avant l'événement catastrophique de ce printemps.

Simultanément, une campagne géophysique a été menée dans toute la zone située entre la route cantonale et la rivière.

Un recensement des sources intéressant le glissement a été effectué avec jaugeage répété et mesures physico-chimiques, ainsi qu'une étude hydrologique de surface comportant la mise en place d'un important équipement.

4. Résultats des études

Un compte rendu complet des études à fin 1981 a été publié dans le cadre du rapport d'activité 1981 du projet DUTI et remis notamment aux services cantonaux et aux communes concernés. Ce compte rendu comportait en outre un regard sur les solutions de stabilisation possibles et adéquates.

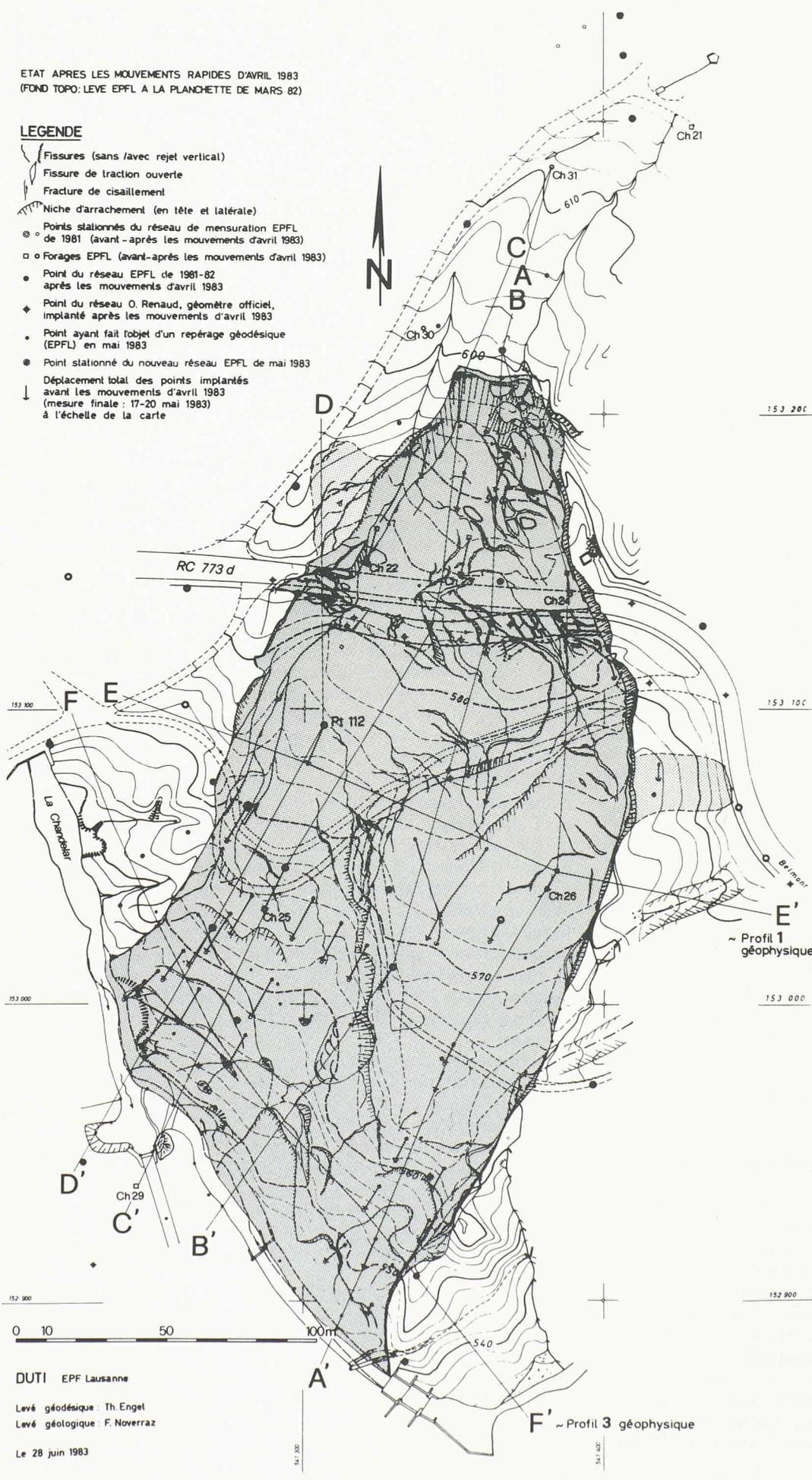
4.1 Données des forages

De manière très résumée, les forages ont montré que le glissement de la Chenaula dans son ensemble est constitué de moraine uniquement, celle-ci montrant peu de signes de remaniement dans la partie supérieure stabilisée, alors qu'elle est fortement remaniée et pétrie, très plastique, dans la zone la plus active; elle glisse directement sur le substratum molassique constitué par la molasse marno-gréseuse aquitanienne. Ces matériaux, bien que saturés d'eau, n'ont jamais fourni de véritables venues d'eau en cours de forage, de toute évidence en raison de leur très faible perméabilité. Il n'a pas davantage été possible d'observer de venue d'eau — en charge ou non — dans le substratum molassique durant la perforation, à l'exception du forage CH 30, où de l'eau fissurale artésienne a été détectée à 12,10 m.

ETAT APRES LES MOUVEMENTS RAPIDES D'AVRIL 1983
(FOND TOPO: LEVE EPFL A LA PLANCHETTE DE MARS 82)

LEGENDE

- Fissures (sans /avec rejet vertical)
- Fissure de traction ouverte
- Fracture de cisaillement
- Niche d'arrachement (en tête et latérale)
- Points stationnés du réseau de mensuration EPFL de 1981 (avant - après les mouvements d'avril 1983)
- Forages EPFL (avant-après les mouvements d'avril 1983)
- Point du réseau EPFL de 1981-82 après les mouvements d'avril 1983
- Point du réseau O. Renaud, géomètre officiel, implanté après les mouvements d'avril 1983
- Point ayant fait l'objet d'un repérage géodésique (EPFL) en mai 1983
- Point stationné du nouveau réseau EPFL de mai 1983
- Déplacement total des points implantés avant les mouvements d'avril 1983 (mesure finale : 17-20 mai 1983) à l'échelle de la carte



DUTI EPF Lausanne
 Levé géodésique: Th. Engel
 Levé géologique: F. Noverraz
 Le 28 juin 1983

Fig. 1. — Carte du glissement d'avril 1983.

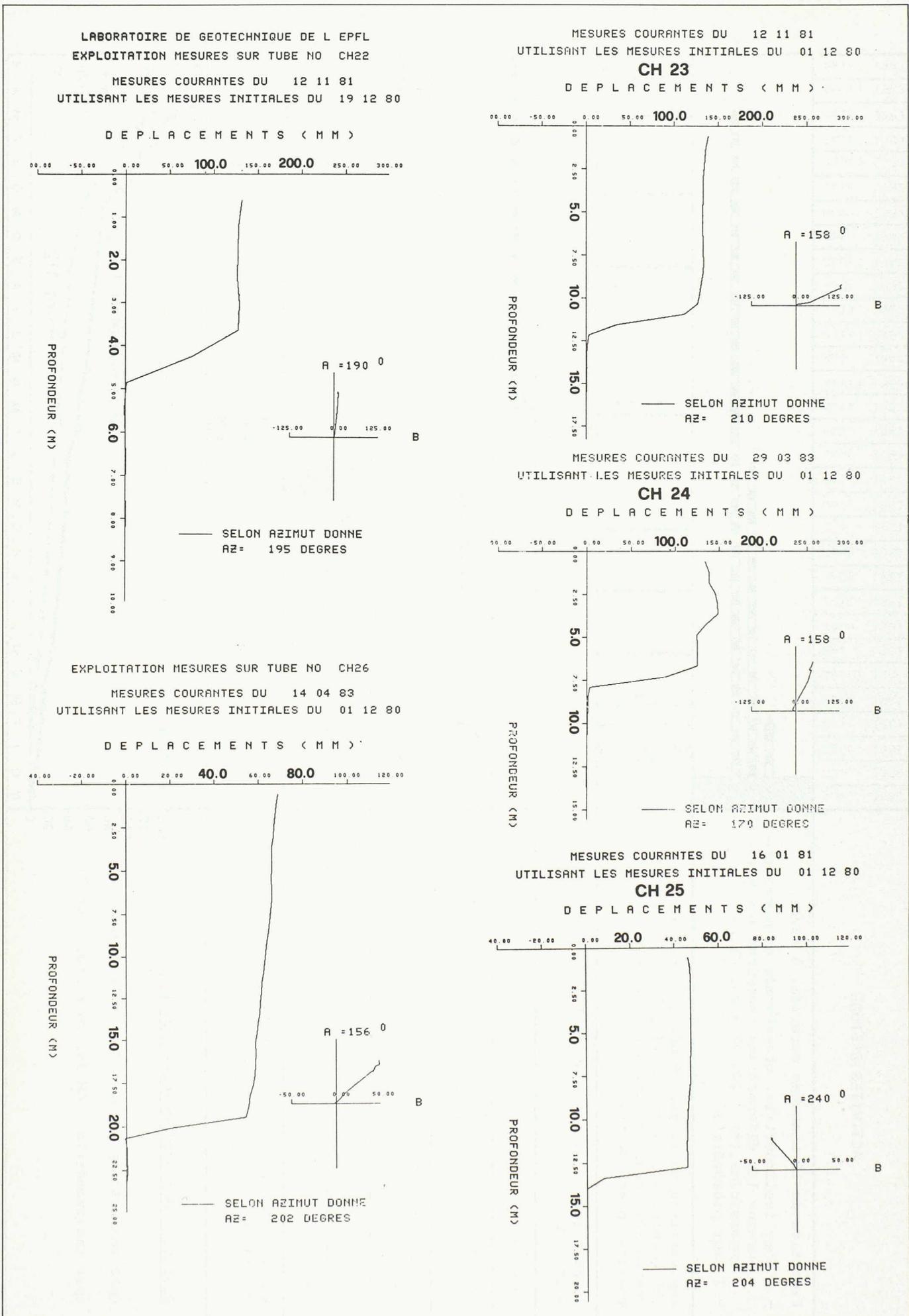


Fig. 2. — Inclinométrie: dernières courbes obtenues avant cisaillement des tubes.

Les niveaux piézométriques se sont néanmoins partout révélés défavorables, voisins de la surface du terrain dans toute la zone active.

4.2 Relevés inclinométriques

Les tubes inclinométriques ont fait l'objet de mesures mensuelles dès le mois de décembre 1980 (fig. 2). Les mesures ont fait apparaître dès janvier 1981 d'importants mouvements dans quatre forages (CH 22, 23, 24, 25) qui avaient été placés dans la zone cartographiée "en mouvement rapide" lors du levé géologique de surface. Le tube CH 26, situé dans le bas et en marge de la zone la plus active, a montré un mouvement moins rapide, mais profond. Les trois forages placés dans les parties médianes et hautes du glissement n'ont montré en revanche aucun mouvement à ce jour,

de même que les deux forages (CH 30 et 31) exécutés en avril 1983.

Certains tubes ont été cisailés très rapidement (voir tableau 1) tandis que les tubes CH 24 et surtout CH 26 sont restés en service jusqu'à la veille des mouvements catastrophiques. Ils ont permis de ce fait l'établissement de graphiques de déplacements cumulés qui ont remarquablement mis en évidence l'accélération importante survenue durant tout l'hiver 1982-83 (fig. 3). Ces graphiques ont été communiqués au Service des routes en janvier 1983.

Les mouvements enregistrés dans les forages CH 22 à 26 étaient situés à des profondeurs respectives de 4,40, 11,50, 7,30, 12,60 et 19,15 m; ils sont localisés au contact du substratum rocheux ou à son voisinage immédiat dans tous les

cas sauf pour le forage CH 24, où le mouvement a été enregistré à 7,30 m alors que la roche en place et le fond de la masse glissée ancienne se situaient à 12,30 m.

4.3 Campagne géophysique

Cinq profils de résistivité électrique ont été effectués par trainé multiligne; ils ont permis de préciser la position du rocher grâce aux possibilités d'étalonnage sur les forages carottés et grâce aux contrastes de résistivité généralement satisfaisants entre rocher et masse en glissement. Ils ont notamment mis en évidence d'importantes inégalités de la surface du rocher dont il a été tenu compte dans l'établissement des profils de la figure 5. Les deux profils de résistivité les plus significatifs sont représentés à la figure 4.

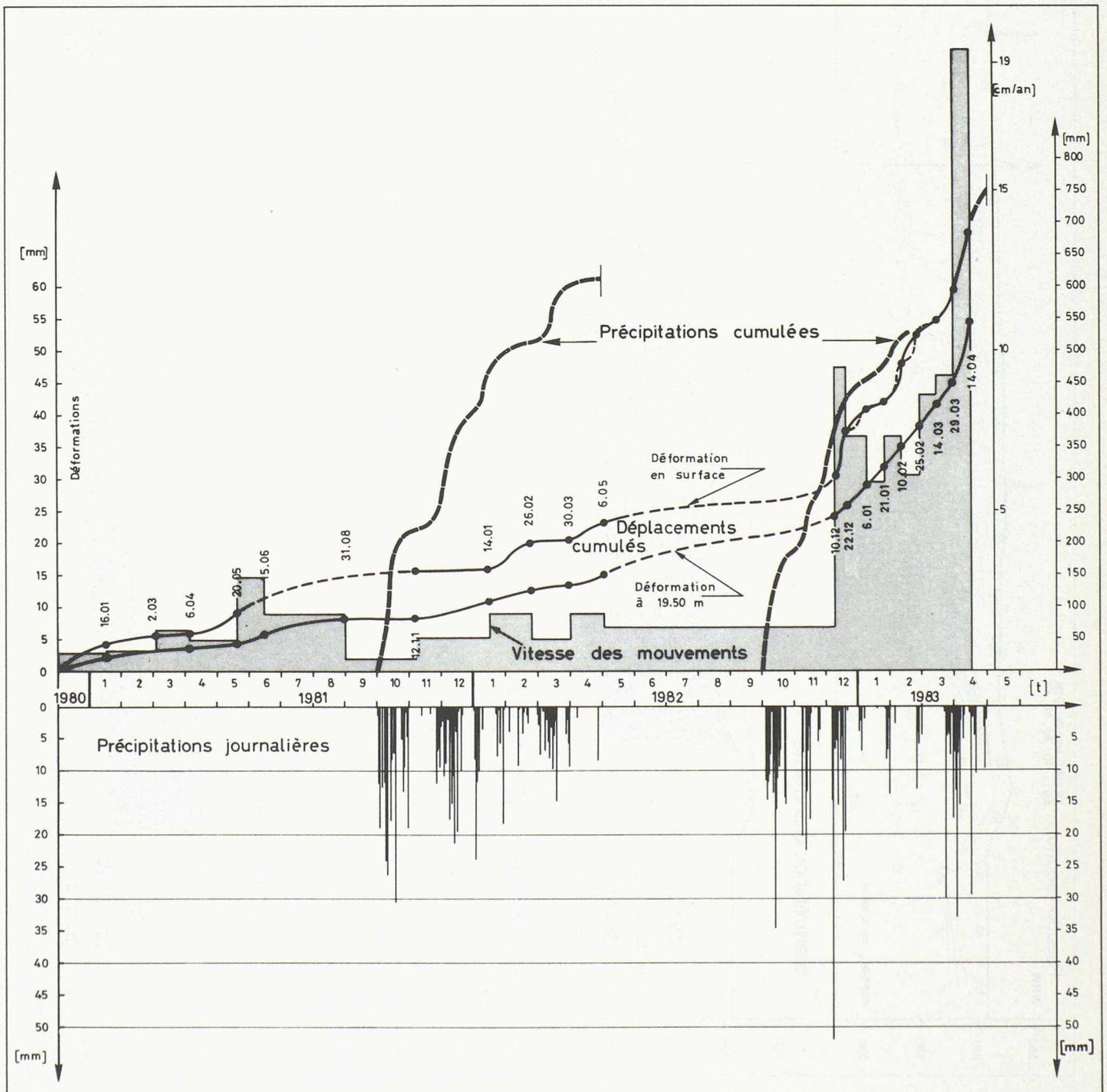
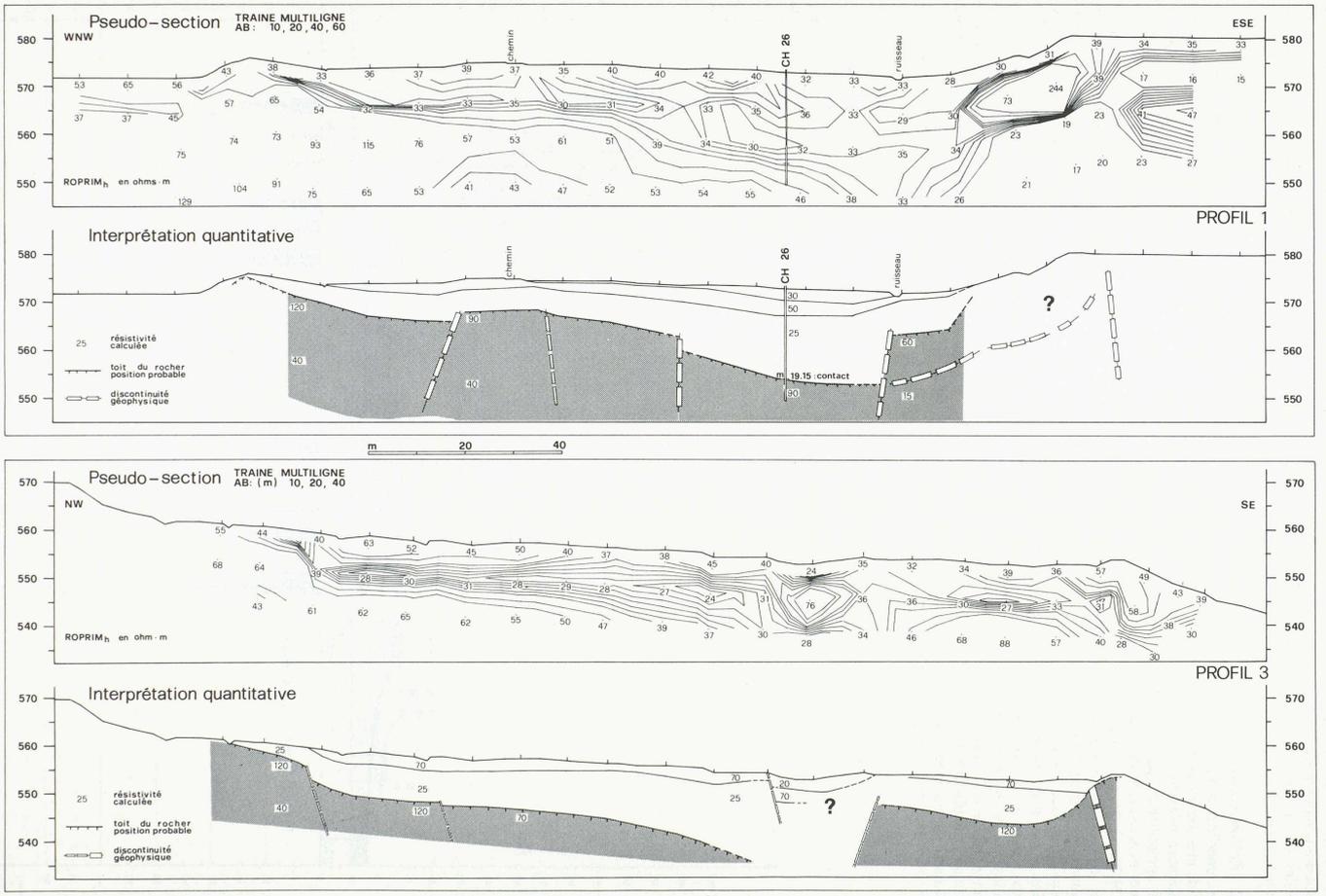


Fig. 3. — Précipitations journalières et cumulées (périodes d'octobre à avril 1981/82 et 1982/83), déplacements cumulés et vitesses des mouvements observés dans le tube CH 26.

Fig. 4. — Profils géophysiques de résistivité par traînée multiligne. Le profil 1 correspond au profil EE' de la fig. 1; le profil 3 correspond au profil EF' de la fig. 1.



4.4 Etude hydrologique

Une étude hydrologique de surface destinée à préciser les paramètres climatologiques et hydrologiques au moyen d'enregistrements continus et de mesures discrètes a nécessité la mise en place d'un important matériel: pluviographe chauffant, pluviomètres totalisateurs, thermohygrographe, limnigraphe et déversoir triangulaire, bacs évaporatoires et tubes de Piche (mesure de l'évaporation), profil d'humidité du sol par sonde à neutrons.

Les données de cette étude apportent quelques éléments fort intéressants à l'analyse des causes et du contexte préparatoire des mouvements d'avril (voir chap. 6).

4.5 Mesures géodésiques

Le réseau mis en place a permis d'arriver, parallèlement avec les mesures inclinométriques et la confrontation avec les observations géologiques, à une connaissance approfondie de l'évolution temporelle et de la répartition spatiale des mouvements. C'est ainsi qu'une carte géologique mettant en évidence les différents secteurs du glissement en fonction de leur comportement spécifique a pu être réalisée (rapport d'activité DUTI à fin 1981). Cette carte s'est trouvée parfaitement confirmée par les mouvements d'avril 1983 — délimitation générale de la zone active, secteurs à vitesse différenciée — démontrant l'efficacité de l'approche pluridisciplinaire appliquée aux problèmes des glissements de terrain.

Les déplacements observés pour la période du 2 février 1981 au 16 mars 1983 étaient de 80 cm environ au voisinage de la route cantonale: ils croissaient progressivement vers l'aval, atteignant 1,50 m au forage CH 25.

Les mouvements d'avril 1983 ont préservé la presque totalité des bornes mises en place antérieurement, si bien que la mesure des déplacements survenus entre les 19 et 23 avril a été possible sur toute la surface du glissement. Un relevé complet des points matérialisés antérieurement à la catastrophe d'avril ainsi que le repérage géodésique d'environ 150 points nécessaires à la cartographie détaillée ont été effectués du 17 au 20 mai 1983 et ont permis la réalisation de la carte représentée en figure 1.

4.6 Essais géotechniques

Les essais entrepris avaient pour but l'identification des sols composant le massif, afin de permettre la caractérisation géotechnique de la masse glissante, nécessaire à l'analyse de stabilité.

Les essais standard exécutés ont donné les valeurs de la teneur en eau naturelle w , du poids apparent humide γ , du poids volumique des grains γ_s et des limites d'Atterberg, ainsi que la granulométrie.

Des essais de cisaillement direct à la boîte de Casagrande et des essais au Geonor H 12 ont été exécutés afin d'obtenir les paramètres de résistance — cohésion c et angle de frottement interne φ — sous de faibles déplacements et leurs valeurs résiduelles en cas de grands déplacements.

Les sols analysés sont désignés selon la classification USCS comme des argiles à limite de liquidité élevée — CH — non stratifiés en raison des remaniements internes permanents au sein de la masse en mouvement. Les granulométries sont étendues, les tamisats inférieurs à 0,02 mm représentent une fraction de 20 à 70%, avec une moyenne de 55%.

L'étude statistique des résultats des essais de laboratoire fournit les moyennes (\bar{x}), les écarts-types (s) (tableau 2) et les valeurs minimale et maximale de chaque caractéristique. Les valeurs 90 min et 90 max sont les bornes inférieure et supérieure des intervalles de confiance à 90% de chance autour de la valeur moyenne.

On remarquera le grand coefficient de variation de l'angle de frottement interne obtenu par cisaillement direct, qui résulte de la présence de graviers dans les échantillons utilisés.

L'effet perturbateur de ces débris est par contre faible dans les résultats obtenus au Geonor car dans cet appareil le plan de cisaillement n'est pas imposé par la géométrie du dispositif d'essai.

4.7 Analyse de stabilité

Le rapport DUTI à fin 1981 présentait les résultats obtenus par les analyses de stabilité classiques et une première tentative d'approche probabiliste.

En se plaçant en conditions de résistance résiduelle ($c = 0 \text{ KN}\cdot\text{m}^{-2}$, $\varphi = 20^\circ$) et en utilisant la méthode de Bishop, on trouvait:

$$F_s = 1,08 \text{ pour } h = TN$$

$$F_s = 1,32 \text{ pour } h = TN - 3 \text{ m}$$

$$F_s = 1,57 \text{ pour } h = TN - 6 \text{ m}$$

où h = niveau phréatique
 TN = terrain naturel
 F_s = facteur de sécurité

Les résultats montraient bien la sensibilité du glissement aux variations de niveau de l'eau.

L'approche probabiliste, très simplifiée, utilisée à l'époque fournissait une probabilité de rupture pf (définie comme la probabilité pour que $F_s < 1$) égale à 20%.

Ce calcul était exécuté en utilisant les caractéristiques c_u , φ_u obtenues en laboratoire: une simulation de Monte Carlo avec 1000 cycles permettait de tracer la distribution du facteur de sécurité F_s , de laquelle on tirait pf .

Depuis 1981, en poursuivant un des objectifs du projet DUTI, qui consiste à faire progresser les méthodes de calcul de stabilité, un nouveau modèle probabiliste (Oboni et Bourdeau, 1983) a été développé.

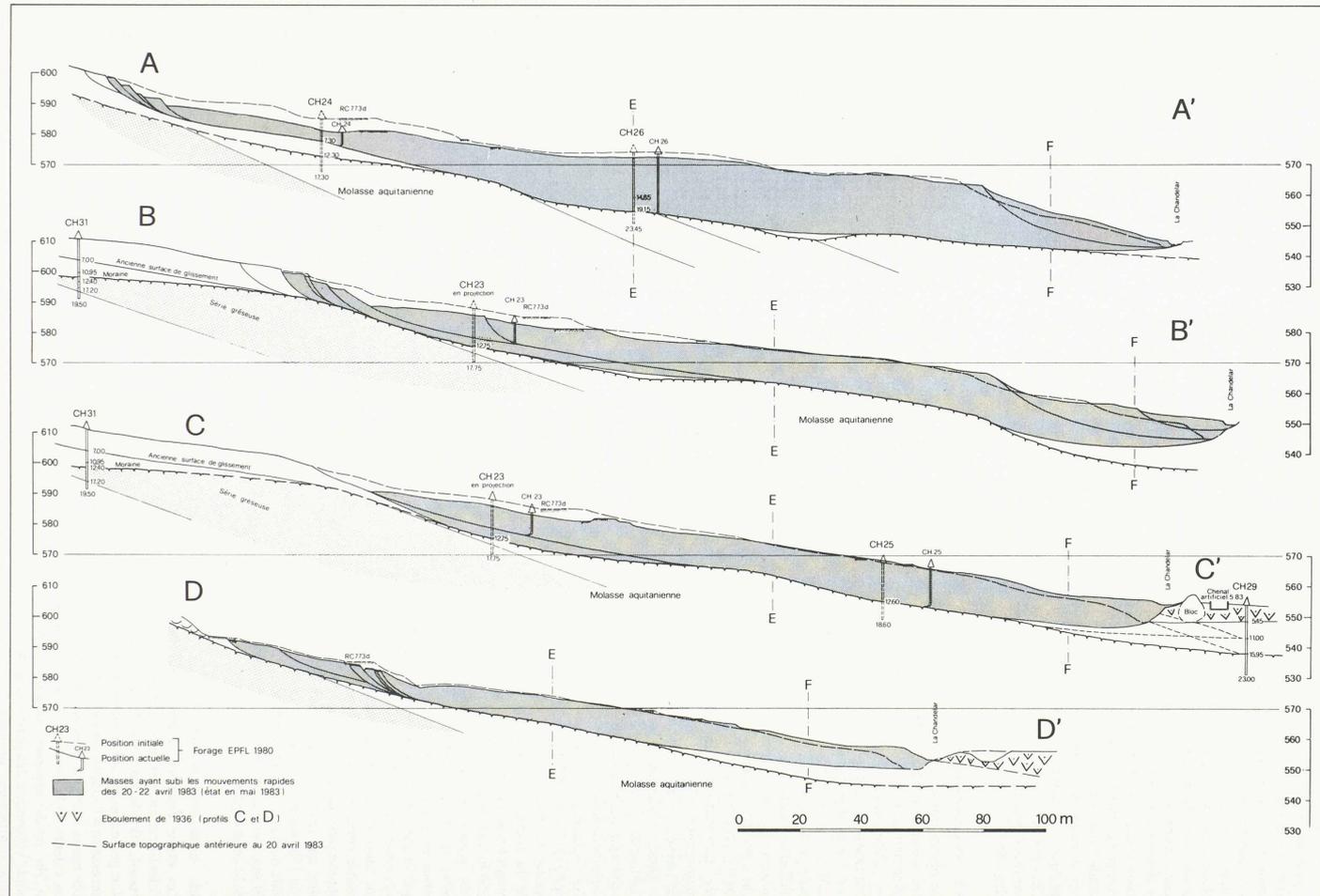
TABLEAU 2: Résultats des essais pour les échantillons proches du plan de glissement, statistiques

N° du sondage	Profondeur [m]	Description géologique	w [%]	γ [kN/m ³]	γ_s [kN/m ³]	w_L [%]	I_p [%]	c_u [kN/m ²]	φ_u/φ_r^* [°]
CH 22	3,7/4,0	Marnes molassiques décomp.: tendre	21,2	21,5	26,9	36,8	19,8	17	20
CH 23	8,85/9,20	Marne argilo-limoneuse compacte plastique	19,1	22,5	27,0	31,6	17,6	0	29/30*
CH 24	3,25/3,55	Idem, mais tendre à très tendre	19,7	21,5	27,0	39,3	23,1	20	15
CH 25	10,35/10,6	Masse limono-argileuse tendre	22,0	22,4	26,9	—	—	27	16,5/25*
CH 26	14,15/14,4	Masse argilo-limoneuse tendre, plastique	14,7	23,2	26,8	30,7	17,2	21	23

	w [%]	γ [kN/m ³]	γ_s [kN/m ³]	c_u [kN/m ²]	φ_u [°]
Moyennes	19,3	22,2	26,9	17	21
Écarts-types	2,8	0,73	0,07	10	5,6
Coefficient de variation	14,5%	3,2%	2,6%	58%	26,6%

* Note: essai au Géonor H 12.

Fig. 5. — Profils topographiques et géologiques: état comparatif avant et après les mouvements d'avril 1983.



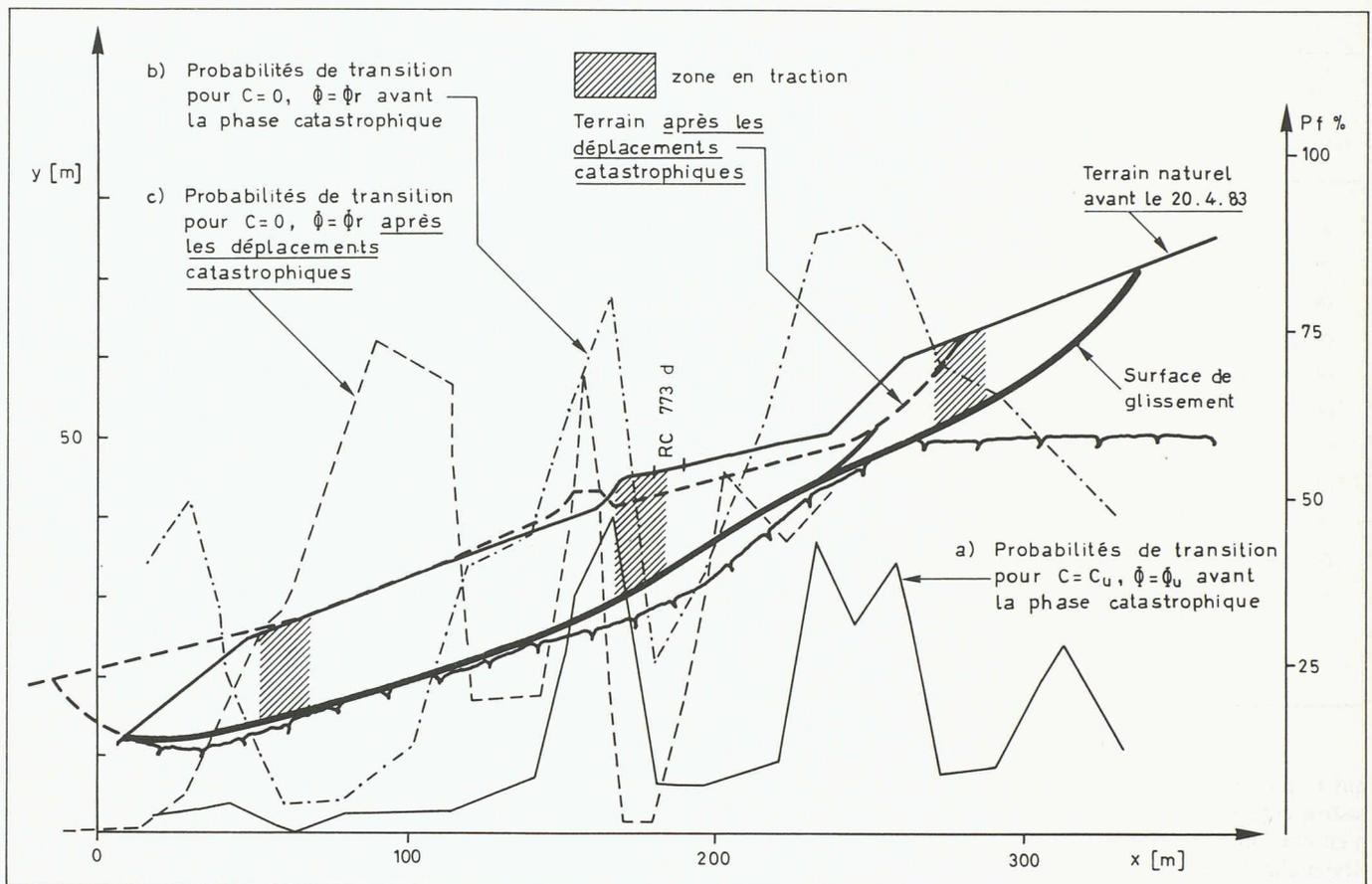


Fig. 6. — Résultats des calculs de stabilité: diagrammes de transition.

L'originalité de cette méthode réside dans le fait de calculer la stabilité des éléments (tranches) qui constituent le massif. La stabilité locale est exprimée comme probabilité de rupture locale ou probabilité de transition. Grâce à cette méthode, il est possible de déterminer les zones où des fissures de traction se développeront et les chances pour que la rupture progresse le long d'une surface de glissement potentielle.

La figure 6 montre les résultats de l'analyse probabiliste locale, d'une part en conditions c_u , ϕ_u (a), d'autre part avec les valeurs résiduelles (b). La courbe (c) est représentative de la stabilité après la phase catastrophique.

5. La phase rapide d'avril 1983

L'automne et l'hiver pluvieux de 1982-1983 ont été marqués par une accélération très nette des mouvements du glissement de la Chenaula, mise en évidence par les dégâts au tapis de la route cantonale; celle-ci est restée ouverte à la circulation sur la voie amont seulement depuis la fin 1982. Les graphiques des déplacements cumulés en fonction du temps établis au moyen des mesures inclinométriques des tubes CH 24 et surtout CH 26, dont la dernière mesure a été effectuée 5 jours avant la phase rapide, montrent fort bien l'évolution anormale des vitesses depuis le début décembre jusqu'au 14 avril (fig. 3). Depuis ce jour, la détérioration du tapis de

la RC 773d, qui venait d'être mis en place, a constitué le meilleur témoin des accélérations.

Le trafic a été interrompu le mercredi 20 vers 9 h. 30. Dès ce moment, la vitesse de déplacement au niveau de la route s'est établie, pendant deux jours environ, à une moyenne de 25 cm par heure, avec un ralentissement rapide dès le vendredi 22. A partir de samedi 23, les vitesses de déplacement étaient ramenées à quelques centimètres par jour, puis à moins d'un centimètre par jour dès le 25 avril (mesures effectuées par M. O. Renaud, géomètre officiel). Le déplacement total maximum durant ces quelques journées s'est élevé à une quinzaine de mètres.

Outre l'arrachement total de la route cantonale sur un tronçon d'une centaine de mètres, la conséquence principale de ces mouvements a été l'obstruction et le déplacement du cours de la Chandelar, sur une longueur de 170 m environ (voir fig. 1); d'importants lacs se sont créés engendrant un risque élevé de débâcle, risque inacceptable pour les aménagements situés plus à l'aval (remblais du stand de tir de Volson, voûtage sous les terrains de sport de la Rochettaz, etc.). Une intervention rapide commandée par le Service cantonal des eaux a permis le maintien en service du lit de la rivière, puis la déviation de celle-ci dans un chenal en bois provisoire conçu par le Bureau Stucky SA, Lausanne.

La surélévation du pied du glissement — et, conséquemment, du lit de la

Chandelar — bien visible sur les profils (fig. 5) explique vraisemblablement la diminution rapide des mouvements, par effet de contrebutage du pied sur la rive opposée.

5.1 Causes du paroxysme d'avril

Comme nous l'avons vu, les signes précurseurs de l'événement étaient très nets au niveau des déplacements. Il n'en va pourtant pas de même en ce qui concerne les niveaux piézométriques (tableau 3), certes élevés, mais qui ne constituent pour aucun des piézomètres les valeurs maximales enregistrées au cours des quelque 30 mois d'observation. Il en va de même pour les courbes limnigraphiques continues enregistrées dans le forage CH 25, qui indiquaient un abaissement constant du niveau depuis le 5 avril.

La relative stabilité des niveaux piézométriques, la croissance régulière des vitesses de l'amont en direction de la Chandelar, la morphologie de la masse en glissement tant avant qu'à la suite du paroxysme d'avril — présence généralisée de fissures de traction — sont autant de facteurs mettant en évidence directement ou indirectement le rôle primordial de l'érosion fluviale dans l'instabilité croissante de cette zone.

Cette érosion s'est exercée lentement, le cours de la rivière dans sa position au 19 avril 1983 résultant d'un travail de «sape» du pied de la masse glissée effectué durant près d'un demi-siècle (depuis l'éboulement de 1936). C'est elle

TABLEAU 3: Principales valeurs piézométriques

Piézomètre (P) Limnigraphe (L) Cellule Glötzl (G)	Niveau le plus élevé (jusqu'au 25.3.83)	Date	Niveau le plus bas	Date	Niveau le 29.3.83 (dernier niveau mesuré avant le glissement rapide)	Niveau pendant et après le glissement rapide							
						25.4	27.4	6.5	9.5	13.5	24.5	9.6	
CH 21 b (P)	0,60	19.01.81	1,75	1.9.81	1,10	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	--
CH 22 (IP)	0,45	19.11.82	0,80	3.6.82	0,65	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	--
CH 23 (IP)	0,65	16.12.82	1,65	26.9.82	0,75	--	--	1,25	1,10	1,10	0,80	--	--
CH 24 b (G)	1,40	16.01.81	1,70	26.2.82	hors service dès sept. 82	--	--	--	--	--	--	--	--
CH 25 (IL)	0,90	4.04.83	3,25	3.9.81	1,15	1,65	1,45	0,70	0,65	0,75	0,60	--	--
CH 26 (IP)	--	--	--	--	-- (sans piézomètre)	2,00	--	--	--	--	--	--	--
CH 2 (P)	+ 0,10	16.12.81	0,15	3.6.82	+ 0,05	0,40	0,15	+ 0,10	---	disparu	---	---	---
CH 8 (P)	+ 0,15	16.12.81	1,55	26.9.82	0,00	0,70	0,25	0,10	+ 0,15	+ 0,10	+ 0,25	--	--
CH 29 (P)	--	--	--	--	--	--	--	4,10	--	--	--	--	--
CH 30 (P1)	nouveau	--	--	--	--	--	artésien	---	---	---	---	---	+ 2,60
CH 30 (P2)	"	--	--	--	--	0,55	--	--	--	--	artésien	--	--
CH 31	"	--	--	--	--	--	--	--	3,95	3,95	4,00	--	--

qui a rendu possible les mouvements catastrophiques des 20-22 avril, mais elle n'en constitue en revanche pas la cause déclenchante, même en tenant compte de la très forte crue des 5-6 avril, au cours de laquelle son débit a dû avoisiner les 15 m³/s.

Il reste donc à examiner l'évolution parallèle de la courbe pluviométrique et de l'histogramme des vitesses des mouvements (inclinomètre CH 26) durant l'hiver dernier (fig. 3): cette comparaison met clairement en évidence la « période de réponse » entre épisodes de précipitations importantes et accroissements de vitesse: il a fallu environ 2 mois pour que le glissement réagisse à la période des précipitations très fortes (190 mm) d'octobre 1982, puis probablement 7 semaines après les fortes pluies de novembre (95 mm), 6 semaines après les pluies de décembre (155 mm); à partir de février 1983, ces périodes de réponse se raccourcissent encore plus nettement et des épisodes pluvieux modestes suffisent à provoquer de nettes réactions: moins de 3 semaines après les pluies de fin janvier, 15 jours après celles de fin février, quelques jours seulement après les pluies très importantes des 24 au 28 mars. Et c'est à ce moment critique que sont survenues les journées exceptionnellement pluvieuses de la première moitié d'avril (110 mm): dès lors, le processus de glissement catastrophique était engagé, sa première période ayant été captée grâce à l'ultime lecture inclinométrique du 14 avril; la période suivante a été mise en évidence par la détérioration ultra-rapide du nouveau tapis de la route cantonale: posé une semaine avant la catastrophe, celui-ci avait subi presque autant de dégâts à la veille de sa destruction que n'en avait subi le revêtement précédent durant tout l'hiver.

La croissance exponentielle des mouvements amorcée du 29 mars au 14 avril (CH 26) s'est donc poursuivie jusqu'à la phase finale et les fortes pluies du 19 avril, veille de la catastrophe, n'ont sans doute joué qu'un rôle d'amplification du phénomène.

C'est donc dans la répétition trop rapprochée d'épisodes très pluvieux que se trouve selon toute vraisemblance la cause déclenchante de la phase destructrice d'avril: cette situation a permis le maintien d'une vitesse élevée des mouvements permettant vraisemblablement une modification défavorable des propriétés rhéologiques des matériaux du plan de glissement jusqu'à fin mars, les pluies du début d'avril étant survenues au moment critique.

6. Situation présente et perspectives

La situation nouvelle créée par la crise de fin avril peut être résumée comme suit:

- La masse glissée a acquis un nouveau profil d'équilibre sensiblement plus favorable, par diminution de la pente et par allègement du haut, et par amélioration simultanée de l'effet de butée à l'aval.
- L'érosion du pied de la masse glissée est supprimée par mise en service d'un chenal provisoire canalisant les eaux de la Chandelar.
- L'épaisseur des matériaux glissés sous le tracé de la route cantonale à reconstruire est réduite de moitié.

Ce dernier fait a pour conséquence de simplifier grandement le problème de la reconstruction de la route, en rendant plus aisé le recours à des solutions axées sur des soutènements ancrés, par exemple. Des mesures préventives contre une

extension vers le haut des mouvements sont devenues en revanche indispensables.

Une dérivation définitive du cours de la Chandelar assurerait peut-être à elle seule une stabilisation quasi totale de la masse glissée en raison du profil d'équilibre plus favorable atteint par les masses en mouvement. Cette stabilisation paraît effectivement en passe d'être atteinte. En effet, les vitesses de déplacement semblent actuellement s'établir progressivement à des valeurs compara-

Bibliographie

Plan de situation 1:5000, géologie, pour l'autoroute N9 (plan N9-G511), par le Dr A. Bersier, géologue (30.5.1966).

Etude géotechnique par le bureau J. P. Schöpfer et I. K. Karakas (7.12.1973) et étude géologique préliminaire par le bureau J. Norbert, géologue (15.1.1974), pour un projet de liaison RC 773-RC 701, demandé par la commune de Pully.

Etude géologique par le bureau J. Norbert, géologue, du glissement de la Chenaula, pour le Service des routes (7.2.1978).

Feuille 1243 « Lausanne » de l'atlas géologique suisse 1:25000, par le Dr M. Weidmann, géologue (non publié).

Projet d'école, *Détection et utilisation des terrains instables*, EPFL, rapport d'activité à fin 1981.

Projet d'école, *Détection et utilisation des terrains instables*, EPFL, rapport d'activité à fin 1982.

OBONI & BOURDEAU, *Determination of the critical slip surface in stability problems*, 4th Intern. Conf. on application of statistics and probability in Soil and Structural Engineering, Florence, juin 1983.

VIREDAZ PH. (à paraître), *Analyse structurale directe et interprétation quantitative de mesures de résistivités à l'aide de pseudo-sections*. Exemple d'application: étude géoélectrique du pied du glissement de la Chenaula.

Remerciements

L'étude présentée est le fruit d'un travail de collaboration auquel ont participé, outre les signataires, les membres suivants du projet DUTI: MM. Ch. Bonnard, chef du projet; X. Morisod, mesures inclinométriques; A. Parriaux, hydrogéologie; Ph. Viredaz, géophysique; M. Walter, hydrologie, climatologie.

Nous leur exprimons notre gratitude.

bles à celles enregistrées durant les deux années qui ont précédé l'événement, et cela malgré les pluies très importantes du mois de mai et les niveaux piézométriques très défavorables relevés durant cette période.

Il est donc permis de conclure en disant que le problème posé par le glissement de la Chenaula se trouve être moins grave et plus facile à résoudre après la débâcle d'avril qu'avant celle-ci. Par ailleurs, l'étude menée par le groupe DUTI de l'Ecole polytechnique fédérale

de Lausanne montre qu'il est possible, grâce à une instrumentation bien conçue et une analyse continue des informations, de suivre l'évolution d'un glissement de terrain et de "voir venir" une phase critique. Faute de pouvoir véritablement prévoir une telle phase (facteur météorologique, précision dans la connaissance des propriétés des matériaux), le constat d'un accroissement anormal des vitesses peut être utilisé comme moyen d'alerte et mériterait de ce fait d'être pris très au sérieux dans d'autres cas analogues justifiant ou nécessitant une action préventive.

Pour cela, un appareil Géonor H12 à vitesse variable a été utilisé. Les résultats correspondants figurent aussi dans le tableau 6.3; ils ne paraissent pas beaucoup diverger dans le cas présent des valeurs correspondantes obtenues par cisaillement direct.

Les sols analysés, qui peuvent tous être désignés comme des argiles à limite de liquidité élevée (CH selon la classifica-

tion USCS), apparaissent dans leur ensemble assez homogènes. Ils sont tous saturés à sursaturés; leur granulométrie est assez étendue, les tamisats inférieurs à 0,02 mm représentant une fraction de 20% à 70%, avec une moyenne de 55%.

Adresses des auteurs:

Théophile Engel
Ing. géom. dipl. EPFL
EPFL — Institut de géodésie
et mensuration
33, avenue de Cour
1007 Lausanne

Francis Noverraz
Géologue dipl. UNIL
EPFL — Laboratoire de géologie
ISRF, DGC, Ecublens
1015 Lausanne

Franco Oboni
Ing. civ. dipl. EPFL
EPFL — Laboratoire de mécanique
et des sols
ISRF, DGC, Ecublens
1015 Lausanne

Auscultation en temps réel d'un revêtement routier

par Léopold Pflug et Serge Oesch, Lausanne

Les automobilistes empruntant l'autoroute de contournement de Lausanne (N9, tronçon Vennes-Crissier) ont pu, jusqu'à ces derniers temps, constater des irrégularités sensibles de la chaussée, notamment de la voie normale (piste de droite). Le sentiment de flottement s'accompagne d'un danger réel par temps de pluie, du fait de la profondeur de l'eau s'accumulant dans les ornières. L'article qui suit quantifie de façon impressionnante ces déformations. Au moment où les avis s'opposent quant à la part des poids lourds dans le compte routier, on accueillera avec le plus grand intérêt ces résultats irréfutables (contrairement à certaines affirmations d'experts minimisant les dégâts dus aux poids lourds).

Il paraît dorénavant impossible de prétendre que les poids lourds paient plus que leur part à l'entretien du réseau routier, au vu des dégâts occasionnés sur un tronçon relativement récent et des frais de réfection en résultant. On dispose là d'un cas exemplaire: souhaitons qu'il en soit tenu compte dans les futures discussions sur la part des poids lourds dans le compte routier pour balayer les affirmations optimistes des avocats de cette catégorie d'utilisateurs de notre réseau routier.

Jean-Pierre Weibel

1. Introduction

Responsable non seulement de construire des routes selon les règles de l'art, l'ingénieur doit encore en assurer l'exploitation et l'entretien de manière optimale.

Dans ce domaine, la fréquence et l'ampleur des travaux sont basés notamment sur l'observation de l'aspect et de la forme du revêtement, observation qui doit être objectivée par un certain nombre de grandeurs quantifiables.

L'évolution de la qualité d'un revêtement ou d'une surface de roulement au cours du temps peut être appréciée

grâce à l'observation de sa topographie ainsi qu'au tracé du profil en travers.

Le degré de déformation ou d'usure de la chaussée, et partant sa conformité aux normes en vigueur, est caractérisé en chaque profil à l'aide de deux paramètres importants: la profondeur d'ornière (T) et la profondeur d'eau (t), définies dans la norme SNV 640520a.

Pour l'ingénieur responsable de l'entretien d'un réseau routier, la perception de ces paramètres et de leur évolution, continue dans l'espace et périodique dans le temps, constitue un outil de première importance. A cet effet, il souhaite disposer d'un appareil d'auscultation à haut rendement, permettant des

mesures à faible prix de revient et adaptées au traitement automatique de l'information [1]¹.

Dans cet esprit, notre laboratoire a proposé puis développé un dispositif de mesure optique de la topographie fine d'un revêtement routier. Ce relevé de la topographie, effectué de manière continue et en temps réel, permet à l'opérateur de choisir les profils en travers qui lui paraissent significatifs, limitant par là même les opérations de dépouillement et concentrant la restitution des profils en travers sur les zones les plus sollicitées.

2. Description de la méthode

La méthode mise en œuvre est basée sur le principe du moiré et consiste à superposer un réseau témoin et un réseau lié à la structure de manière à suivre intégralement la forme ou la déformation de la surface analysée [2, 3].

Dans le cas du moiré utilisé pour l'étude de la forme des revêtements routiers, le réseau lié à la surface est projeté sur la chaussée à partir d'une diapositive (fig. 1). L'image de ce réseau (R_f) est superposée au réseau témoin (R_t) au niveau du plan image du dispositif de prise de vue. Cette superposition donne naissance à des franges d'interférences qui représentent, pour une configuration appropriée du montage optique, les lignes de niveau de la surface examinée. En choisissant judicieusement les paramètres géométriques, on obtient les lignes de niveau par rapport à un plan fixé à l'avance. Cette particularité permettra de mettre en évidence de faibles variations de cotes par rapport au plan

¹ Les chiffres entre crochets renvoient à la bibliographie en fin d'article.