

Instabilité déclenchée par l'événement climatique particulier de l'hiver 1999 : exemple dans les Alpes vaudoises, Suisse

P. TULLEN
A. PARRIAUX
P. TURBERG

Laboratoire de géologie
(GEOLEP)
Département de Génie civil
(DGC)
École polytechnique
fédérale de Lausanne
(EPFL)
1015 Lausanne, Suisse
pierre.tullen@epfl.ch

C.-M. MARCUARD

Bureau MARIC,
Marcuard
Ingénieurs Conseil
ZI, chemin des Artisans 6
1860 Aigle, Suisse

Résumé

Le glissement de la Chenolette (canton de Vaud, Suisse) se situe dans un mélange constitué par des Wildflyschs et des moraines remaniées. Ce glissement s'est manifesté pour la première fois le 4 mars 1999 dans un secteur non cartographié comme terrain instable. Ce déclenchement fait suite à une pluie venue s'ajouter à la fonte des chutes de neige importantes du mois de février. Cette situation hydroclimatologique défavorable correspond à une période de retour d'une vingtaine d'années.

Mots-clés : glissement, hydrologie, climat, facteur déclenchant, écoulement souterrain, conditions géologiques.

Extreme climate event triggering landslide: example in the vaudoises Alps, Switzerland

Abstract

The Chenolette landslide (canton of Vaud, Switzerland) is located in reworked Wildflysch and moraine. The first movement was observed on March 4 1999 after an ordinary rainfall, but directly after a snow melting period, resulting in a fully saturated soil situation. The real triggering factor is the coincidence between the climatic and hydrologic circumstances corresponding of about twenty years return period.

Key words : Landslides, hydrology, climate, triggering factor, groundwater, geological setting.

Introduction

En Suisse, les zones instables affectent 6 à 8 % du territoire national, touchant principalement les Alpes, les Préalpes et certaines parties du Jura plissé (OFAT *et al.*, 1997). En la matière, les autorités fédérales suisses proposent des recommandations générales pour la reconnaissance et la gestion des dangers naturels (OFAT *et al.*, 1997). Ces recommandations fédérales traitent cette problématique en trois étapes successives. La première étape a pour but une identification des dangers, la seconde permet d'évaluer ces dangers et la troisième doit déterminer la planification des mesures de protection à prendre.

C'est ensuite la tâche des cantons d'exploiter ces recommandations pour les adapter à leurs contextes particuliers. C'est pourquoi l'approche de ces phénomènes peut être très différente d'un canton à l'autre.

Le glissement de la Chenollette s'est manifesté pour la première fois le 4 mars 1999 avec l'apparition de fissures le long de la route cantonale RC 716 reliant Bex et Les Plans dans le canton de Vaud (Suisse). Deux jours plus tard, la route était totalement coupée, traversée sur près de 80 m par la niche d'arrachement principale du glissement. Ce secteur n'avait fait l'objet d'aucune étude de risque auparavant et n'est pas mentionné comme glissement sur la carte géologique (Badoux et Gabus, 1990).

Au droit de la zone effondrée, la route cantonale traverse en déblais un versant raide (environ 35°) qui borde la rive gauche de la rivière Avançon. La route est bordée en amont par un mur de soutènement construit dans les années 50. Le lit de la rivière présente dans cette zone une pente d'environ 12°. Le lit actuel, après



FIG. 1 Étapes successives pour la prise en compte des dangers naturels (d'après OFAT *et al.*, 1997).

Successive stages to take into account natural hazards.

la mise en place d'enrochement, a une largeur moyenne de 5 m.

Ce glissement, de type translationnel (Varnes, 1978), est de taille modeste avec une superficie de 9 000 m² pour un volume estimé à près de 500 000 m³. Il s'étend de 605 à 678 m d'altitude avec un versant orienté vers le NNW. La pente moyenne est élevée avec près de 35° pour une longueur légèrement supérieure à 100 m et une largeur avoisinant les 80 m.

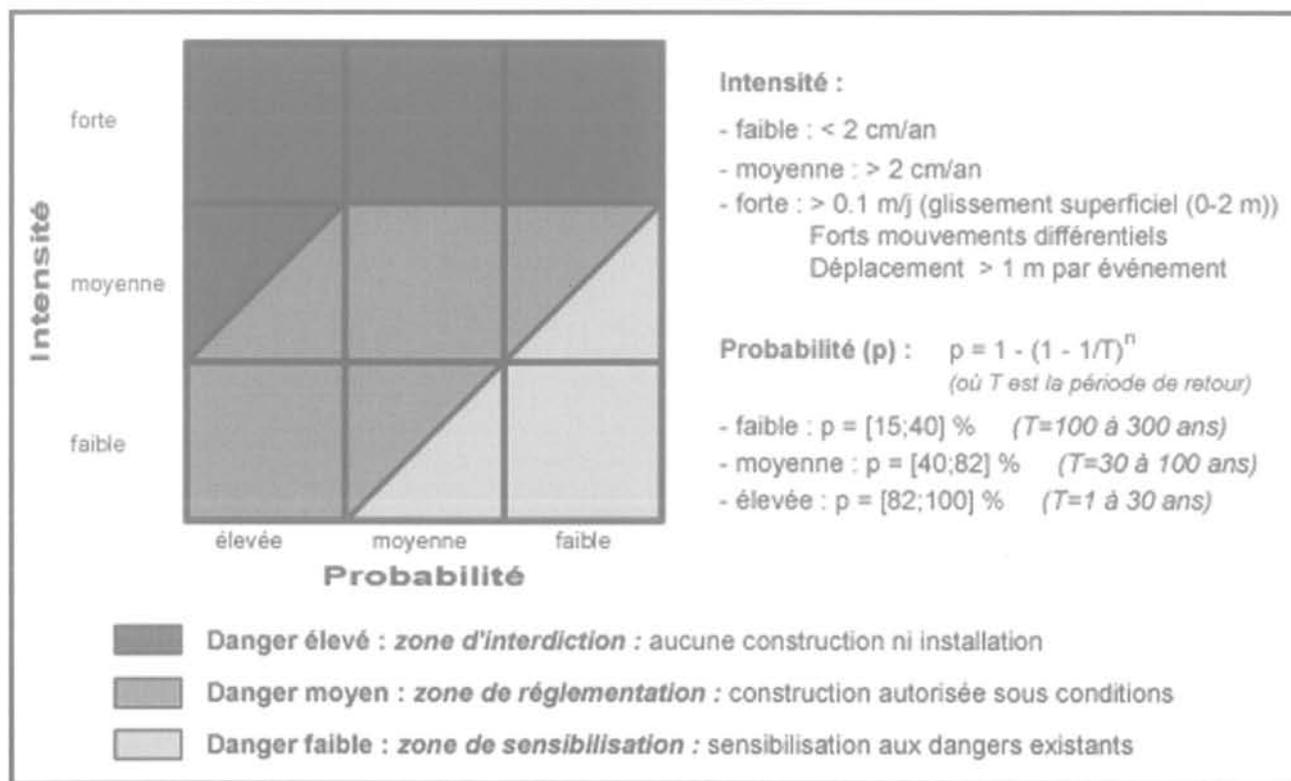


FIG. 2 Estimation du danger (d'après OFAT *et al.*, 1997).
Landslide hazard assessment.

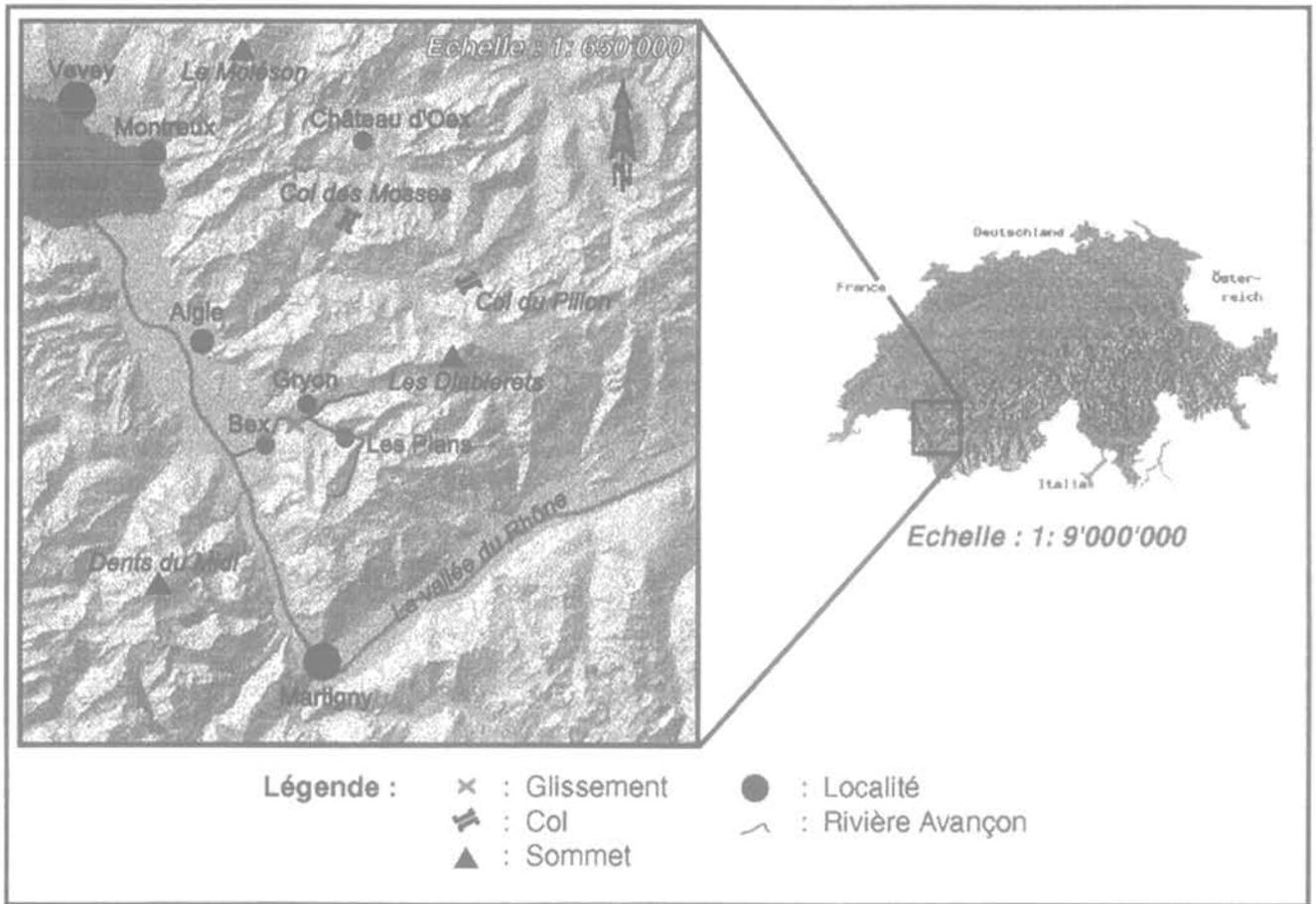


FIG. 3 Plan de situation.
Situation map.

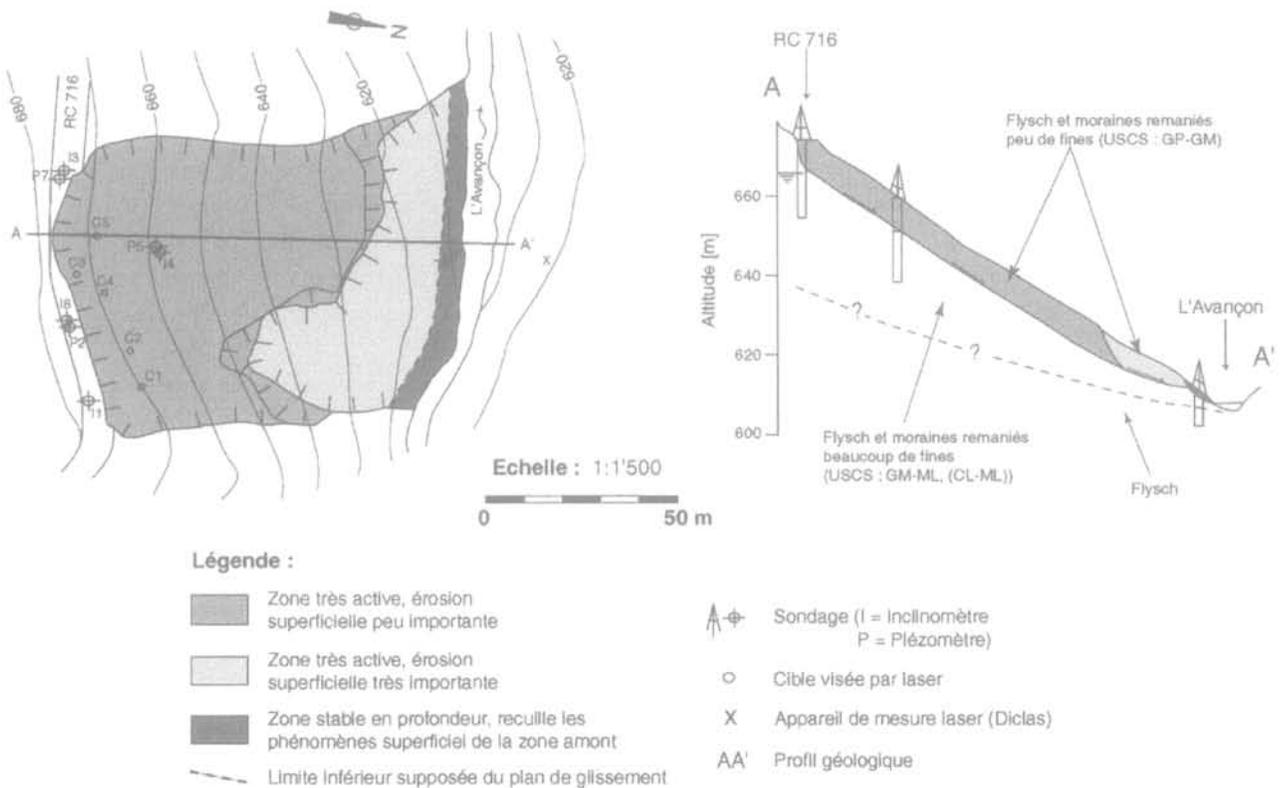


FIG. 4 Carte et coupe schématique du glissement (d'après Maric, 1999).
Landslide geological settings (according to Maric, 1999).

Le corps du glissement de la Chenolette présente trois zones d'activité distinctes (Fig. 4). De part et d'autre de ces secteurs, les terrains sont également soumis à des phénomènes d'instabilité qui présentent des déplacements mensuels millimétriques.

2

Contexte géologique et hydrogéologique

Le substratum rocheux est constitué par des Wildflyschs fortement tectonisés, présentant une alternance irrégulière de schistes et de marnes plus ou moins gréseuse, avec quelques blocs et lentilles de Crétacé. À l'ouest du glissement apparaissent des roches triasiques comprenant des cornieules massives, et à l'est se trouvent des calcaires du Crétacé. La masse glissée correspond à une bande constituée par un mélange de flysch et de moraine remaniés, située entre les roches triasiques à l'est et les calcaires du crétacé à l'ouest.

Cinq forages carottés, tous équipés pour l'inclinométrie et trois forages destructifs équipés pour la piézométrie ont été effectués. De plus, des mesures laser permettent de suivre l'évolution des déplacements de manière continue. Plusieurs campagnes de mesures topographiques ont également eu lieu. L'analyse des forages montre des niveaux contenant des éléments de la taille gravier au sein d'une masse hétérogène, dont le taux de fines, très faible au droit de la masse glissée, devient de plus en plus élevé dès que l'on atteint la surface de rupture (Fig. 4). De plus, des intercalations d'éléments de la taille sable se trouvent disséminés dans l'ensemble de la masse. D'une manière générale, la surface de glissement semble coïncider avec la limite entre les niveaux pauvres et ceux plus riches en éléments fins.

Des essais *in situ* et en laboratoire ont permis d'estimer les caractéristiques géotechniques des terrains meubles rencontrés dans le glissement.

La masse instable peu perméable contient vraisemblablement plusieurs petites nappes perchées, localement productives au droit des niveaux les plus grossiers. Ce glissement se caractérise par des écoulements souterrains complexes et vraisemblablement discontinus à travers la masse en glissement. Une relation entre les venues d'eau et la profondeur du plan de glissement semble exister car les écoulements souterrains sont situés aux environs de 10 m de profondeur, ce qui correspond au niveau moyen de la surface de rupture.

Les écoulements réagissent rapidement aux précipitations (Fig. 6) et peuvent se traduire par des mises en charge locales dans les niveaux les plus perméables. Les essais de perméabilité de type Lefranc, effectués dans les sondages, indiquent une hétérogénéité importante avec des valeurs moyennes se situant entre 10^{-7} et 10^{-8} m/s, mais pouvant atteindre localement des valeurs allant jusqu'à 10^{-4} m/s. Les niveaux piézométriques mesurés pendant les mois d'avril et de mai se corrélaient relativement bien avec les précipitations. Des événements pluviométriques supérieurs à 15 mm/jour indui-

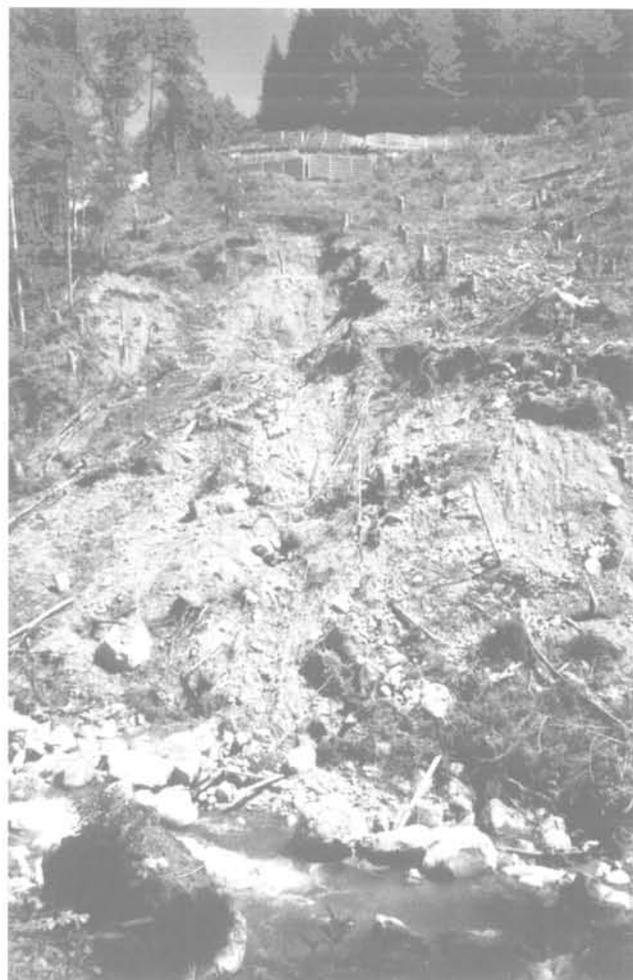


FIG. 5 Corps principal du glissement (photo : Bureau Maric).
Main part of the landslide.

TABLEAU 1 Caractéristiques géotechniques des terrains meubles.
Geotechnical settings.

	γ [kN/m ³]	ϕ'	c' [kN/m ²]	S_u [kN/m ²]	ME [MN/m ²]	W_L [%]	W_P [%]
Remblais, éboulis	20	35	0	-	20-40	-	-
Moraine avec peu de fines	21	38	0	-	40-80	35	23
Moraine avec beaucoup de fines	21	33	0-10	-	4-80	29	18
Niveaux très argileux peu humides	22	28	30	100	80	-	-
Moraine limoneuse	22	28	10	200	80	22	15

γ : poids volumique apparent ; ϕ' : angle de frottement effectif ; c' : cohésion effective ; S_u : cohésion au cisaillement non drainé ; ME : module de compressibilité ; W_L : limite de liquidité ; W_P : limite de plasticité.

sent une montée des niveaux piézométriques dans la masse en mouvement presque instantanément. Ces niveaux s'abaissent rapidement durant les deux à trois jours qui suivent des périodes sèches, pour se stabiliser sous la surface de rupture. Les pluies inférieures à 15 mm/jour n'influencent pas ces niveaux piézométriques.

3

Facteur déclenchant

L'hiver 1998-1999 a connu des chutes de neige particulièrement importantes à travers toutes les Alpes, provoquant de nombreuses avalanches. Cet important manteau neigeux s'est formé au cours de quatre épisodes principaux de fortes précipitations comprises entre le 26 janvier et le 8 mars (OFEG, 2000). La fonte de cette épaisse couverture neigeuse contribua de façon décisive aux inondations du mois de mai suivant. Le troisième de ces épisodes de précipitation se produisit du 16 au 24 février, provoqué par un courant d'ouest qui fit remonter la limite des chutes de neige à 1 200 m d'altitude, faisant fondre la couche de neige qui recouvrait le plateau depuis l'épisode précédent. Cette fonte, ainsi que les fortes précipitations du quatrième épisode provoquèrent des débits importants sur les cours d'eau du plateau suisse.

Les données climatiques utilisées sont fournies par l'ISM⁽¹⁾ et proviennent de trois stations pluviométriques : Bex (altitude 402 m), Les Plans (altitude 1 070 m), et Gryon (altitude 1 080 m) auxquelles vient s'ajouter la station locale de Peuffeyre (altitude 735 m), située au bord de l'Avançon à près de 2,5 km en amont du glissement. Les précipitations mensuelles en % de la norme de référence 1901-1960⁽²⁾ sont disponibles pour les trois stations ISM. La station de Peuffeyre fournit la pluviométrie et la température journalière depuis juin 1998.

Des corrélations effectuées entre ces quatre stations nous ont permis de calculer une norme standard de référence 1901-1960 applicable à la station de Peuffeyre. On constate que le déclenchement du glissement a été précédé par un mois de février 1999 climatologiquement très actif, avec 218 mm de précipitations tombées sous forme de neige, soit 264 % de la norme de référence. Un calcul des périodes de retour selon la loi de Gumbel nous a permis de définir une période d'occurrence moyenne de 19 ans pour cette précipitation mensuelle de février. Une analyse similaire sur les précipitations journalières montre que le 4 mars (jour du déclenchement du phénomène) correspond à un événement pluviométrique de 20,4 mm, ce qui équivaut à une période de retour d'une année. L'infiltration résultant de la fonte des neiges dans la région du glissement a débuté le 19 février par une période de quatre jours consécutifs de fonte, avec des températures journalières comprises entre 0,8 et 2,1 °C. Une seconde période de fonte est survenue dès le 25 février avec des températures en constante élévation jusqu'au 3 mars, atteignant des valeurs journalières moyennes de 4,3 °C.

⁽¹⁾ ISM : Institut suisse de météorologie.

⁽²⁾ Norme de référence 1901-1960 : moyenne des précipitations mensuelles calculée sur la période 1901-1960.

L'analyse du volume précipité durant l'intervalle du 16 au 25 février est très significative. L'indice des précipitations antécédentes (IPA) permet de caractériser l'état d'humidité d'un sol en se basant sur une pondération des événements pluviométriques précédant un événement particulier. La forme adoptée pour la détermination de cet indice pour un jour i , prend en compte l'IPA du jour $i-1$, les précipitations tombées au jour $i-1$ et un coefficient variable d'un bassin à l'autre (Jaton *et al.*, 1978). L'ajustement de cet indice nous a montré que la valeur de l'IPA maximal pour l'année 1999 est atteinte le 25 février avec une valeur de 123,2 mm, soit quelques jours seulement avant le déclenchement du glissement. Il est nécessaire de déterminer la hauteur de neige sur le site de la Chenollette le jour du déclenchement de l'événement, afin de comprendre l'influence réelle des précipitations survenues entre le 16 et le 25 février sur le déclenchement du glissement. Cette variable n'étant pas disponible pour les stations voisines du site, nous avons dû utiliser d'autres stations ISM représentatives en Suisse romande. Cette analyse indique que l'épaisseur du manteau neigeux a rapidement diminué dès le 24 février, jusqu'à des altitudes supérieures à 1 000 m. Ces analyses, confirmées par des observations de terrain, permettent d'affirmer que l'ensemble du volume neigeux précipité entre le 16 et le 25 février dans le secteur de la Chenollette, avait totalement fondu avant le déclenchement du glissement. La globalité de la précipitation neigeuse du 16 au 25 février doit ainsi être prise en compte dans l'analyse de l'événement hydroclimatologique. L'indice IPA obtenu pour le 26 mars correspond à un événement d'une période de retour de 20 ans.

L'analyse des conditions climatiques montre clairement que les causes de l'instabilité sont dues à la conjonction de plusieurs facteurs. Le site était prédisposé aux phénomènes d'instabilité à cause de ses caractéristiques géologiques et géométriques défavorables impliquant une faible résistance mécanique des matériaux et un drainage naturel des terrains difficiles. La pluie du 4 mars se produisit alors que la saturation en eau des terrains était déjà très élevée, permettant des mises en charge locales des niveaux contenant les éléments les plus perméables. Il faut donc considérer cette pluie comme étant le facteur déclenchant du glissement, venu s'ajouter à une situation hydrogéologique très défavorable, induite par les abondantes chutes de neige du mois de février qui ont provoqué une saturation en eau des terrains. Cette pluie n'aurait pas eu d'effet sur la stabilité du site sans les épisodes neigeux qui l'on précédée.

La fréquence de retour simultanée de l'IPA et de pluie du 4 mars correspond pour notre exemple à 20 ans. La période de retour de la précipitation mensuelle n'influence pas cette fréquence de retour simultanée, car elle est intimement liée à l'indice IPA déjà pris en compte.

4

Dynamique du glissement

Les déplacements sont mesurés depuis le 15 mars 1999, soit près de dix jours après le déclenchement du glissement. Les vitesses de déplacement ont atteint des valeurs de l'ordre de 5,5 cm/jour durant les deux premiers mois de mesure, puis ont ralenti pour atteindre des valeurs proches du cm/jour. Ensuite, ils se sont à

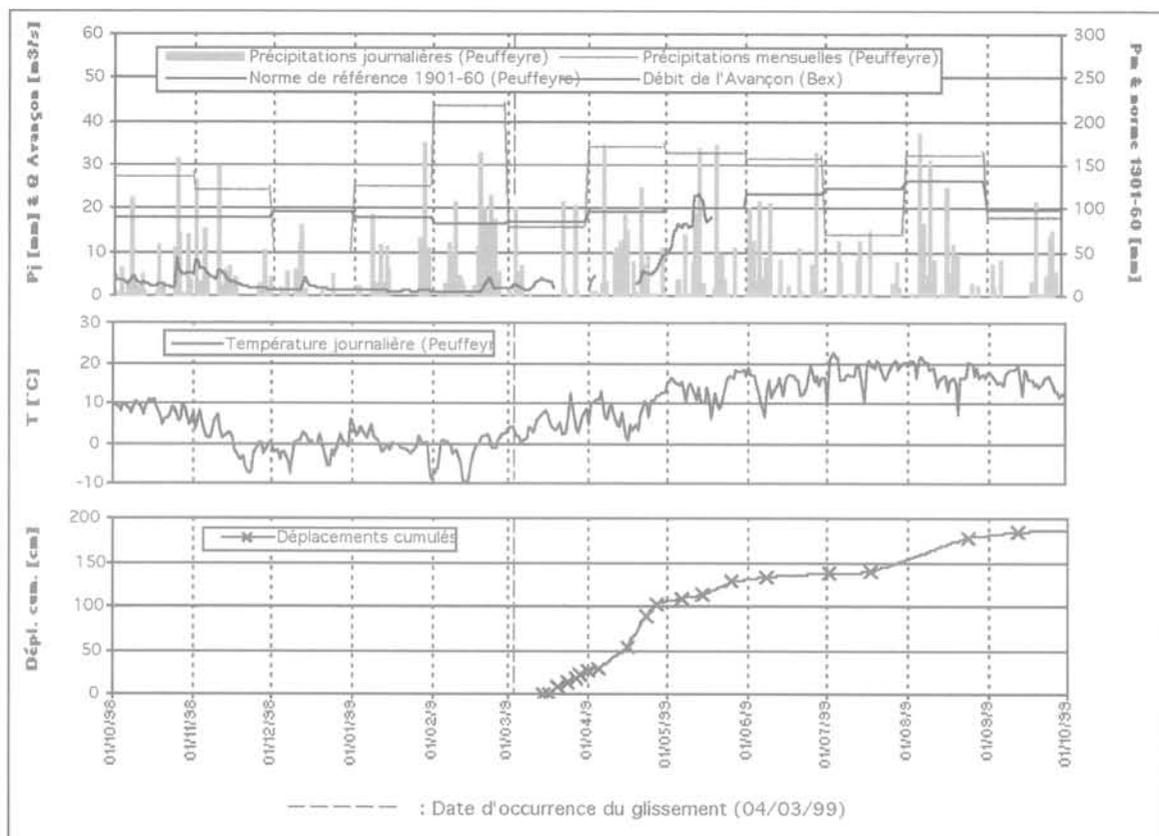


FIG. 6 Données climatiques et déplacements pour l'année hydrologique 1999 (Tullen, 2000).
Climatic and displacement data for the hydrologic years 1999.

nouveau accélérés durant la première quinzaine d'août avant d'atteindre des valeurs quasi nulles qui sont toujours mesurées aujourd'hui. Les déplacements se corrélaient bien avec les précipitations jusqu'à fin août 1999. En effet, les précipitations supérieures à 15 mm/jour qui induisent les variations des niveaux piézométriques se traduisent par une accélération brutale des vitesses de déplacement avec un décalage de deux à trois jours. Durant les périodes sèches ou pendant les événements climatiques présentant des précipitations inférieures à 15 mm/jour, l'activité du glissement reste quasi nulle. Ces analyses mettent bien en évidence l'influence des mises en charge hydraulique de la masse glissée sur l'activité du glissement. Depuis la fin du mois d'août, l'activité du glissement s'est très fortement ralentie. La pluviométrie durant l'automne a été faible, légèrement inférieure à la norme de référence et, dès la mi-novembre, elle est tombée sous forme de neige. De plus, il faut mentionner la remise en service durant l'automne 1999 de la route cantonale qui traverse la niche d'arrachement supérieure du glissement. Cette nouvelle route est équipée de drains qui améliorent la stabilité du site en récoltant des eaux de ruissellement sur le haut du glissement.

Les précipitations de l'année 2000 ont été inférieures à la moyenne à l'exception du mois de décembre et de ce début d'année 2001 qui connaissent à nouveau des précipitations supérieures aux moyennes saisonnières. Cependant, ces deux derniers mois d'observation ne semblent pas induire de réactivation du glissement. Une surveillance du comportement dynamique du phénomène sur un plus long terme est indispensable pour quantifier et valider l'influence de cette reconstruction de la route pour la stabilité générale du site.

Gestion du risque

Les dommages d'ordre direct concernent la route cantonale RC 716, emportée sur près de 80 m, et isolant partiellement le village Les Plans (près de 300 habitants). Les conséquences d'ordre indirect ont consisté en un aménagement de la route secondaire qui passe sur l'autre versant, afin de garantir un accès provisoire au village Les Plans. La forêt fut également abattue dans l'urgence sur la zone glissée afin de permettre l'accès aux machines pour les travaux de reconnaissances.

Les travaux de confortation entrepris dans l'urgence consistent en un enrochement du lit de l'Avançon au droit du glissement afin de protéger son pied de l'érosion directe par la rivière. Il s'est avéré par la suite que la surface de rupture ressort quelques mètres avant le cours d'eau.

Les travaux de confortation définitifs de la route cantonale RC 716 ont débuté en juillet 1999 et la circulation fut rétablie au début du mois de décembre de la même année. Ces travaux se sont basés sur un principe de confortation de la zone supérieure du glissement avec construction d'ouvrages fondés et ancrés dans les couches non déstabilisées par le phénomène du 4 mars 1999 dans le but de rouvrir la route sans modification de son tracé. La confortation avec mise en place de blocs ancrés par des clous actifs permanents sur front gunité a permis de créer des conditions de stabilité indispensables pour construire les deux ouvrages nécessaires au rétablissement de la chaussée, à savoir une estacade de 36 m de long à 6 travées et une paroi micro-berlinoise

de 30 m de longueur pour une hauteur de 4 m. Ces travaux ne permettent pas une stabilisation de l'ensemble du glissement, mais uniquement de la zone supérieure concernée par les fondations des ouvrages routiers. En cas de réactivation du glissement, une troisième étape (3^e rang de blocs ancrés) complémentaire est préconisée pour éviter une mise à découvert des ouvrages construits. La difficulté de cette réalisation fut double. D'une part, une altitude avoisinant les mille mètres, là où les cycles de gel et de dégel sont les plus nombreux au cours d'une année, et d'autre part, des difficultés liées à la topographie très accentuée du site. Ainsi, la confection du béton s'est basée sur un ciment NORMO 3 FS 4 (HCB, 2000) pour obtenir une bonne résistance aux cycles de gel-dégel et aux sels de déverglaçage. De plus, ce béton présente une bonne ouvrabilité, indispensable dans un espace aussi étroit et difficile d'accès.

Le coût des travaux 2000 s'élève à 560 000 francs suisses pour les travaux spéciaux et à 660 000 francs suisses pour le génie civil et béton armé, ce sans les honoraires, ni les travaux préparatoires et les travaux de reconnaissance géotechnique et géologique (Maric, 1999).



FIG. 7A État avant les travaux (photo : Bureau Maric).
Before road works.

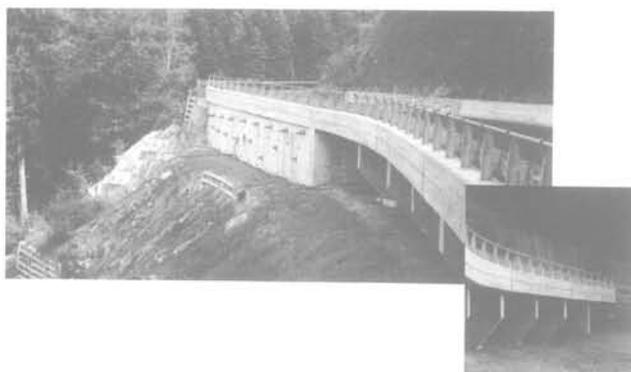


FIG. 7B État après les travaux (photo : HCB, 2000).
After road works.

FIG. 7 Route cantonale avant et après les travaux de confortation.
Road before and after cleaning up works.

Suite au déclenchement du phénomène, un danger d'obstruction de la rivière a été mentionné. Les conséquences d'un tel événement pourraient induire un risque important pour l'usine hydroélectrique et pour la ville de Bex situées dans la vallée. Aucune mesure n'a été prise pour parer à une telle éventualité qui, heureusement, ne s'est pas produite. L'évolution actuelle du glissement semble avoir écarté, ou du moins fortement diminué, ce danger d'obstruction de la rivière. De plus, une étude sur l'évolution de la turbidité dans la rivière serait intéressante. Elle permettrait d'estimer le risque d'une éventuelle usure des turbines de l'usine hydroélectrique située en aval, ainsi que sur la situation de la faune dans le cours d'eau suite au déclenchement du glissement.

6

Conclusion

Le phénomène climatologique extrême de février 1999 a induit, à l'échelle suisse, des dommages atteignant plus de 600 millions de francs suisses (dommages indirects compris), dont les effets majeurs se sont fait principalement ressentir à l'est du pays (Bollinger *et al.*, 2000). Ces événements font suite à de nombreuses catastrophes alpines survenues depuis une quinzaine d'années (crues en 1987, éboulement de Randa en 1991, coulée de boue à Brigue en 1993, etc.), auxquelles se sont ajoutées les crues et inondations de l'été 1999 (Bollinger *et al.*, 2000), l'ouragan Lothar en décembre 1999 et les catastrophes alpines d'octobre 2000. Cet enchaînement d'événements pousse les climatologues à un réexamen de l'analyse fréquentielle des événements climatiques (Parriaux, 2001).

Le glissement présenté dans cet article met en évidence l'influence d'une succession d'événements météorologiques (pluie sur des terrains saturés suite à des fontes de neiges) présentant des périodes de retour assez faibles (un à vingt ans). Cet exemple montre l'importance que peut prendre le cumul d'événements climatiques de moyenne intensité comme facteur déclenchant d'instabilités. Une succession d'événements climatiques induit dès lors un « effet mémoire » pour le milieu hydrogéologique qui doit être pris en compte dans la surveillance et la gestion de ce type de danger naturel.

Contrairement à l'image d'une instabilité généralisée comme présentée dans Bollinger *et al.* (2000), certains glissements n'ont pas réagi à cet événement climatique particulier de 1999, comme par exemple le site de Peney-Dessus dans le canton de Genève (Clément, 2000). Ce dernier exemple montre qu'il ne faut pas uniquement s'intéresser à l'appréciation des dispositions géologiques de chaque processus, mais qu'il est nécessaire d'analyser le régime hydrogéologique qui pondère l'influence d'une succession d'événements climatiques.

- Badoux H., Gabus J.H. – *Atlas géologique de la Suisse*. Feuille n° 1285, 1/25 000, Les Diablerets avec notice explicative. Berne, 1990, 63 p.
- Bollinger D., Hegg C., Keusen H.R., Lateltin O. – « Ursacheanalyse der Hanginstabilitäten 1999 ». *Bulletin de Géologie Appliquée* vol. 5, n° 1, 2000, p. 1-38.
- Clément I. – « Étude géologique et hydrogéologique du glissement de Peney-Dessus (GE) ». Travail de diplôme post-grade, GEOLEP-EPFL (non publié), 2000, 55 p.
- HCB – « Plans-sur-Bex : une estacade contre la nature ». *Magazine HCB – Dimension* 2000, n° 20, p. 10-11.
- État de Vaud, Service des eaux, sols et assainissements – Données pluviométriques relevées à la station de Peuffeyre et débit de la rivière Avançon à Bex, Lausanne.
- Institut suisse de météorologie. – Données pluviométriques des stations de Gryon, Bex et Les Plans, et hauteur de neige des stations de Sion, Pully et Château d'Oex.
- Jaton J.F., Musy A., Regamey P. – « Méthode de prédétermination des débits de ruissellement basée sur l'état de saturation antérieur du bassin ». *Publication IGR* n° 142, EPF-Lausanne, 1978.
- Maric, Ingénieurs Conseils. – Route cantonale 716 Bex-Les Plans, Glissement de la Chenollette. État de Vaud, Département des infrastructures, Services des routes, Division des routes cantonales, 1999, 27 p.
- OFAT (Office fédéral de l'aménagement du territoire), OFEE (Office fédéral de l'économie des eaux) et OFEFP (Office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage). – « Prise en compte des dangers dus aux mouvements de terrain dans le cadre des activités de l'aménagement du territoire, recommandations », Bern, 1997, 42 p.
- OFEG (Office fédéral des eaux et de la géologie). – « Hochwasser 1999, analyse der Ereignis ». Studienbericht, Bern, n° 10, 2000, 146 p.
- Parriaux A. – « Les Alpes en crise : tous concernés ». *Flash*, journal interne d'information, EPFL, Lausanne, n° 2, 2001, p. 3.
- Tullen P. – « Glissement de la Chenollette (Bex-Les Plans, VD) ». *Bulletin de Géologie Appliquée* vol. 5, n° 1, 2000, p. 39-45.
- Varnes D.J. – « Slope movement types and processes. Landslides. Analysis and control ». Special report 176, Ed. L. Schuster, R.J. Krizek. Chapter 2, 1978, p. 11-33.