

Relation entre les paramètres hydrologiques et la vitesse dans les glissements de terrains

Exemples de La Clapière et de Séchilienne (France)

P. ALFONSI

Laboratoire Central
des Ponts et Chaussées
58, bd Lefèbvre
75732 Paris, cedex 15

Résumé

L'évolution de la plupart des glissements de terrains est souvent liée aux précipitations qu'ils subissent. Comme on dispose généralement de peu de mesures précises des mouvements et des apports en eau, la relation entre l'hydrologie et la cinématique est difficile à établir. Toutefois sur le glissement de La Clapière, bénéficiant des relevés accumulés depuis quelques années, un modèle analytique a pu être étudié sur une zone particulièrement sensible du versant, puis appliqué sur une partie du glissement principal et enfin étendu à un autre glissement comparable, les ruines de Séchilienne.

Relationship between hydrological parameters and velocity of landslides

Examples of La Clapière and Séchilienne (France)

Abstract

The course of most landslides is often influenced by the precipitation they receive. Since, generally, few precise measurements of movements and inputs of water are available, the relation between hydrology and kinematics is difficult to investigate. However, on the landslide at La Clapière, using information recorded for several years, it had been possible to work out an analytical model on an especially sensitive zone of the slope, then apply it to a part of the main landslide, and finally extend it to another comparable landslide, the ruins de Séchilienne.

Introduction

Peut-on prévoir les évolutions des grands glissements de terrains, anticiper les accidents majeurs ? Quel effet aura une période de fortes précipitations, une pluie d'orage ? Quelle sera la conséquence de la fonte des neiges, d'un été particulièrement sec ? Pour tenter de répondre à une partie de ces questions, un modèle analytique reliant les apports en eau au comportement cinématique des deux plus importants glissements des Alpes françaises, La Clapière et Séchilienne, a été expérimenté.

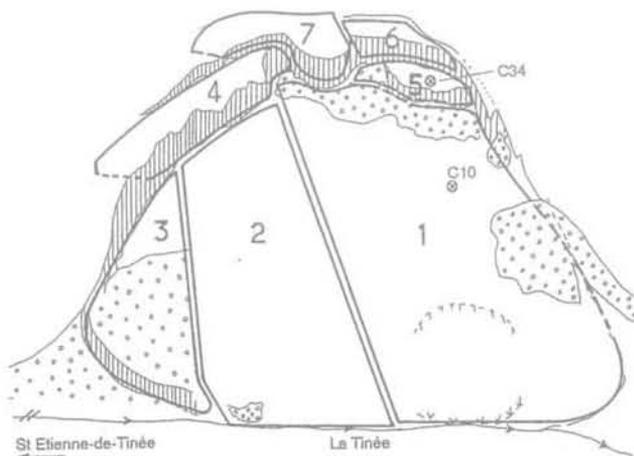


FIG. 1 Découpage du glissement en zones distinctes et implantation des cibles 10 et 34.
Division of the landslide into distinct zones and locations of targets 10 and 34.

Le glissement de La Clapière, situé dans la partie nord du département des Alpes-Maritimes, est depuis quelques années l'objet d'un suivi continu pour tenter de prévoir son évolution, et de nombreuses études et de modèles hydrogéologiques s'y rapportent [1]. Concernant un volume en mouvement de plus de 50 millions de m³ sur une surface active de 0,3 km², il est susceptible de provoquer un barrage instable sur la rivière en pied de glissement, la Tinée, menaçant de manière indirecte un village en amont, Saint-Étienne-de-Tinée, et la vallée en contrebas par rupture du barrage (Fig. 1). Les quelques accélérations récentes et le constant accroissement des volumes en action ont conduit à mettre en œuvre une surveillance continue pouvant déclencher en quelques heures un processus d'alerte [2].

L'instrumentation implantée sur le versant couvre trois domaines : la cinématique des déplacements superficiels, les apports hydrologiques (relevé des hauteurs de pluie, de fonte des neiges et du débit de la Tinée), et les vibrations (écoutes sismiques). Les contraintes d'intervention rapide ont rendu indispensable l'automatisation des mesures et leur transmission immédiate au Laboratoire des Ponts et Chaussées de Nice qui est chargé de leur traitement continu, de l'analyse précise du niveau des risques et d'études liées à la qualité des mesures [3].

Du fait de l'étroite corrélation des précipitations avec les accélérations du glissement, une étude de la relation entre les relevés hydrologiques et la vitesse de déplacement superficiel d'une zone limitée du versant de La Clapière a été entreprise. Les résultats obtenus ont ensuite été appliqués à un glissement présentant quelques similitudes, le glissement des ruines de Séchilienne.

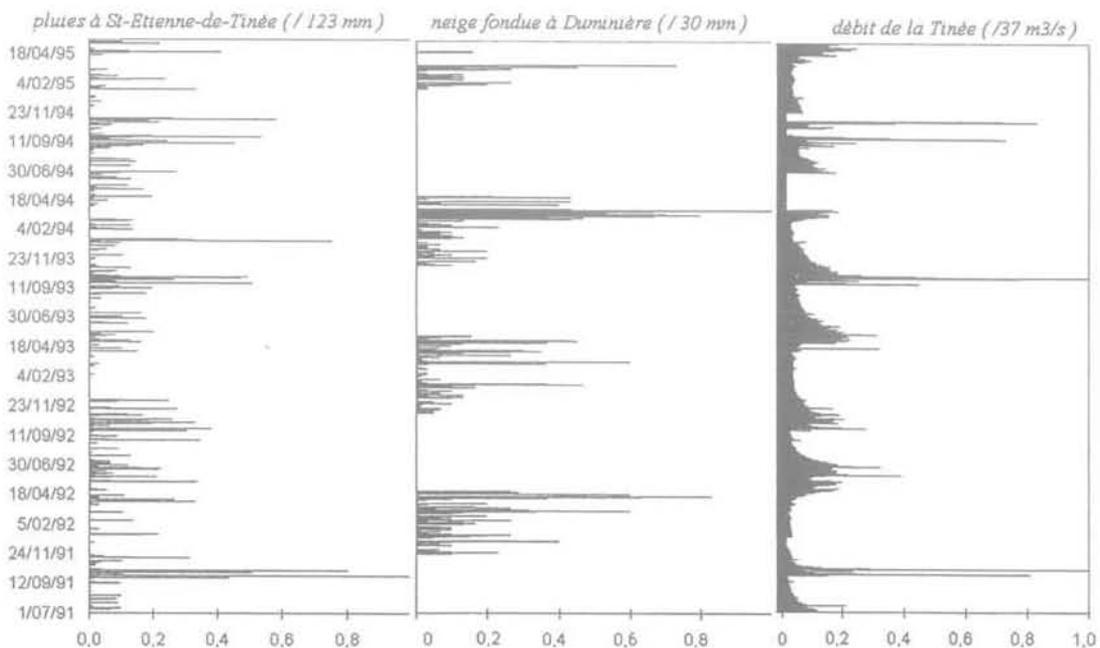


FIG. 2 Relevés pluviométriques à Saint-Étienne-de-Tinée, nivométriques à Duminière (1850 m) et débit de la Tinée, normés par rapport à leur valeur maximale.
Rainfall recordings at Saint-Étienne-de-Tinée, level recordings at Duminière (1850 m), and flowrate of the Tinée, normed with respect to their maximum values.

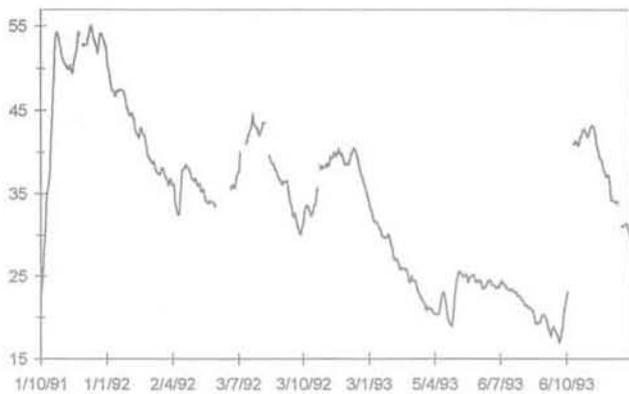


FIG. 3 Vitesse (en mm/jour) de la cible 34.
Speed of target 34 (mm/day).

2

Mesures

2.1

Détermination de la vitesse

La vitesse locale du glissement est déterminée à partir des mesures de la distance entre une des cibles placées sur la surface du versant en mouvement et les deux stations de mesure installées sur le versant stable en regard. Les stations sont équipées d'un émetteur-récepteur à infrarouge permettant d'effectuer dans de bonnes conditions climatiques des mesures de distance avec une précision de quelques millimètres pour un éloignement moyen de 1 500 mètres entre les deux versants. Ces relevés ne peuvent être effectués quand les conditions météorologiques sont très défavorables (fortes pluies, chute de neige, brouillard), privant ainsi le site de mesures dans les périodes critiques. Néanmoins, la présence de deux stations de mesure, la bonne répartition des cibles sur le glissement et l'automatisation de relevés effectués toutes les 4 heures permettent un suivi fiable de l'évolution du glissement.

La précision des mesures de distance dépendant des variations de la température et de la distance mesurée, les incertitudes ont pu être réduites par un calage systématique sur des cibles fixes de référence implantées sur les zones stables autour du glissement.

En ne considérant que les mesures nocturnes prises à 0 h, moins sujettes aux fluctuations, l'écart-type se définit par la relation :

$$\sigma \text{ (en mm)} = 1,39 + 2,33 d \text{ (en km)},$$

où d représente la distance mesurée [4].

La réduction des écarts-types a nécessité un lissage de la vitesse sur trois jours à partir des relevés de distance entre les cibles et une station de mesure, la station 2, avec une extrapolation des relevés de la première station pour pallier les défauts de mesure de la station 2.

2.2

Relevés hydrologiques

Dans la plupart des glissements de terrain, les apports en eau, qui se traduisent par des changements

de niveaux des nappes phréatiques et des variations de pressions interstitielles, conditionnent les amplitudes des mouvements [5]. La connaissance des eaux souterraines va donc être précieuse pour apprécier les risques éventuels d'accélération du phénomène [6]. Le site de La Clapière n'étant pas équipé de sondes piézométriques, on a utilisé les relevés des stations météorologiques proches (Fig. 2) : relevés pluviométriques à Saint-Étienne-de-Tinée, et quantités de neige fondue à Duminière (1 850 m) et à Rabuons (2 500 m). Les relevés du pluviomètre, du fait de son éloignement (quelques centaines de mètres) et surtout de son altitude (en pied du glissement), ne correspondent pas aux hauteurs réelles des précipitations reçues par le versant, en particulier pour les orages d'été, souvent très localisés, et pour les précipitations des périodes hivernales qui peuvent être des pluies ou des chutes de neige suivant l'altitude. En outre, en raison de l'état du sol, un temps plus long va être nécessaire pour l'infiltration de la neige fondue. Les mesures du débit de la Tinée confirment les évolutions des niveaux de précipitations, mais cette donnée est à considérer avec circonspection, car elle inclut les ruissellements et les résurgences locales du grand bassin versant, qui ne jouent aucun rôle dans le bilan hydrologique de La Clapière.

3

Présentation du modèle

L'observation sur une longue période de la vitesse de glissement d'une cible particulièrement sensible aux événements météorologiques, la cible 34, située sur la partie aval du glissement supérieur, laisse apparaître trois composantes du mouvement (Fig. 3) :

- une tendance, traduisant le comportement à long terme, caractérisée par la vitesse moyenne de cette cible (30 mm/jour environ);
- un facteur saisonnier, correspondant aux fluctuations climatiques périodiques, fonte des neiges de printemps et fortes pluies d'automne;
- des perturbations provoquées par des précipitations irrégulières de plus grande importance, pouvant amener des modifications dans l'allure de la série.

Cette liaison directe entre les apports en eau et les évolutions du glissement a permis de développer différentes méthodes prévisionnelles et quelques modèles, dont celui proposé par E. Gervreau [7], qui relie l'hydrologie et la cinématique et qui nous a servi de base pour cette étude. Le modèle présenté ici s'apparente à un système constitué d'un réservoir d'accumulation d'eau avec une loi exponentielle de vidange, associée à une relation linéaire simple entre la hauteur d'eau cumulée et la vitesse estimée du glissement :

$$H_j = \alpha (P_{j-k} + N_{j-k}) + H_{j-\Delta t} e^{-\beta \Delta t},$$

$$V_j = V_{j-\Delta t} \cdot H_j / H_{j-\Delta t},$$

où H_j et $H_{j-\Delta t}$, V_j et $V_{j-\Delta t}$ représentent les hauteurs d'eau du réservoir et les vitesses du glissement aux jours j et $j-\Delta t$; Δt étant l'écart en jours entre deux déterminations,

$e^{-\beta \Delta t}$, la décroissance exponentielle de vidange du réservoir, où β (en jours⁻¹) représente le coefficient de décharge,

$\alpha (P_{j-k} + N_{j-k})$, les apports en pluie et neige fondue

TABEAU I Valeur du coefficient de décharge par périodes sans apports d'eau.
Values of discharge coefficient during periods without inputs of water.

Période du	au	β
26/08/1991	5/09/1991	-0,0073
29/07/1993	4/08/1993	-0,0078
30/08/1993	7/09/1993	-0,0087
4/08/1994	10/08/1994	-0,0056
9/12/1994	14/12/1994	-0,0081
22/12/1994	29/12/1994	-0,0061
12/01/1995	17/01/1995	-0,0076
6/04/1995	13/04/1995	-0,0071

dans le réservoir relevés aux jours $j-k$ et $j-k'$, les décalages k et k' pouvant être différents.

Par l'introduction d'un décalage en temps entre les relevés hydrologiques et la hauteur d'eau calculée le modèle peut être défini comme un modèle prévisionnel, mais du fait de la nécessité d'un recalage périodique des coefficients avec les mesures de vitesse superficielle du glissement, il donne plus particulièrement des indications sur les variations des paramètres hydrogéologiques du massif.

3.1

Détermination du coefficient de décharge

En utilisant exclusivement les périodes sans apport en eau, la détermination de la vitesse se limite à l'expression simplifiée :

$$V_j = V_{j-\Delta t} \cdot e^{-\beta \Delta t}$$

Afin d'obtenir la meilleure précision de la vitesse, il a fallu sélectionner des périodes suffisamment étendues pendant lesquelles les relevés de distance ont été moins sujets à des problèmes de mesure, généralement météorologiques (brouillard, variations de température...).

En comparant les différentes périodes retenues, la valeur du coefficient β obtenue par la régression exponentielle des courbes de décroissance de la vitesse lissée sur 3 jours en fonction du temps, se rapproche de $0,0072 \text{ j}^{-1}$.

La valeur relativement constante de ce coefficient sur plus de 4 années de mesures, malgré des conditions climatiques très différentes, indique une stabilité des conditions de drainage du versant, et nous permet de proposer un modèle essentiellement caractérisé par le paramètre α d'absorption des apports en eau par le sol :

$$H_j = k_p H_{j-1} + \alpha (P_{j-1} + N_{j-1}),$$

où $k_p = e^{-\beta \Delta t} = e^{-0,0072}$, pour la valeur $\Delta t = 1$ jour.

3.2

détermination du coefficient d'alimentation

La qualité de la corrélation entre le modèle et la mesure est estimée par l'analyse statistique simple de la différence saisonnière entre le modèle et la vitesse mesurée (tableau II) : écart-type, moyenne et écart moyen quadratique (S_{EMQ}), cet indice étant plus sensible pour des écarts importants. Les valeurs correspondant à l'ensemble de la période étudiée sont reportées sur la dernière ligne du tableau.

TABEAU II Relation statistique trimestrielle entre le modèle à coefficients fixes ($\alpha = 0,21$; $\beta = 0,0072$) et la vitesse mesurée (relevés du 1/07/1991 au 21/05/1995).

Seasonal statistical relation between the model with fixed coefficients ($\alpha = 0.21$; $\beta = 0.0072$) and the measured speed (recorded from 1/7/1991 to the 21/5/1995).

jusqu'au	écart-type	moyenne	S_{EMQ}
21/09/1991	1,48	4,30	2,55
21/12/1991	7,88	-4,67	9,11
21/03/1992	3,71	-9,19	9,90
21/06/1992	3,99	4,18	5,76
21/09/1992	3,87	-1,66	4,19
21/12/1992	1,95	1,75	2,61
21/03/1993	1,63	3,75	4,08
21/06/1993	2,76	9,83	10,20
21/09/1993	1,65	8,99	9,03
21/12/1993	4,48	4,81	6,55
21/03/1994	4,49	0,07	4,46
21/06/1994	3,86	6,26	7,34
21/09/1994	2,61	9,86	10,20
21/12/1994	10,39	0,74	10,36
21/03/1995	6,20	-3,19	6,94
21/05/1995	2,05	11,49	11,67
de 07/1991 à 05/1995	7,40	2,80	7,91

L'augmentation des écarts et l'inversion de la moyenne à certaines saisons indique la trop faible prise en compte des pluies de l'automne 1991, l'influence trop forte des pluies du début de l'année 1992 et durant l'été 1993, ainsi que les divergences successives de comportement du modèle dans les accélérations et décélérations des années 1994 et 1995 (Fig. 4).

Si l'on peut confirmer l'allure générale de l'évolution du glissement avec les paramètres fixés, il nous faut cependant prendre en considération l'action des facteurs saisonniers et des perturbations climatiques exceptionnelles. En conséquence, le coefficient α devra dépendre des conditions météorologiques périodiques et du caractère spécifique des précipitations, pluies d'hiver, orages, pour lesquels les proportions d'eau infiltrée ou d'eau de ruissellement sont différentes.

3.3

Modulation des coefficients de charge et d'évapotranspiration

Deux termes d'infiltration sont donc introduits, α_p et α_n , où α_p représente le coefficient attaché à la hauteur de pluie et α_n le coefficient concernant la hauteur de neige fondue à Duminière, auquel sera adjoint le terme d'évapotranspiration, ϵ_{ETV} , lié aux conditions climatiques estivales. Ce dernier paramètre a une influence sur la hauteur d'eau du pseudo-réservoir et va dépendre de l'ensoleillement et de l'abondance de la végétation.

Comme nous ne disposons pas de renseignements suffisamment précis sur les conditions climatiques effectives sur le site, les valeurs des coefficients appliquées au calcul de la hauteur du pseudo-réservoir ont été estimées empiriquement avec une relative périodicité annuelle soumise aux fluctuations saisonnières (Fig. 5).

Le calcul des moyennes de ces coefficients sur des périodes variant de 2 à 7 mois va permettre d'apporter

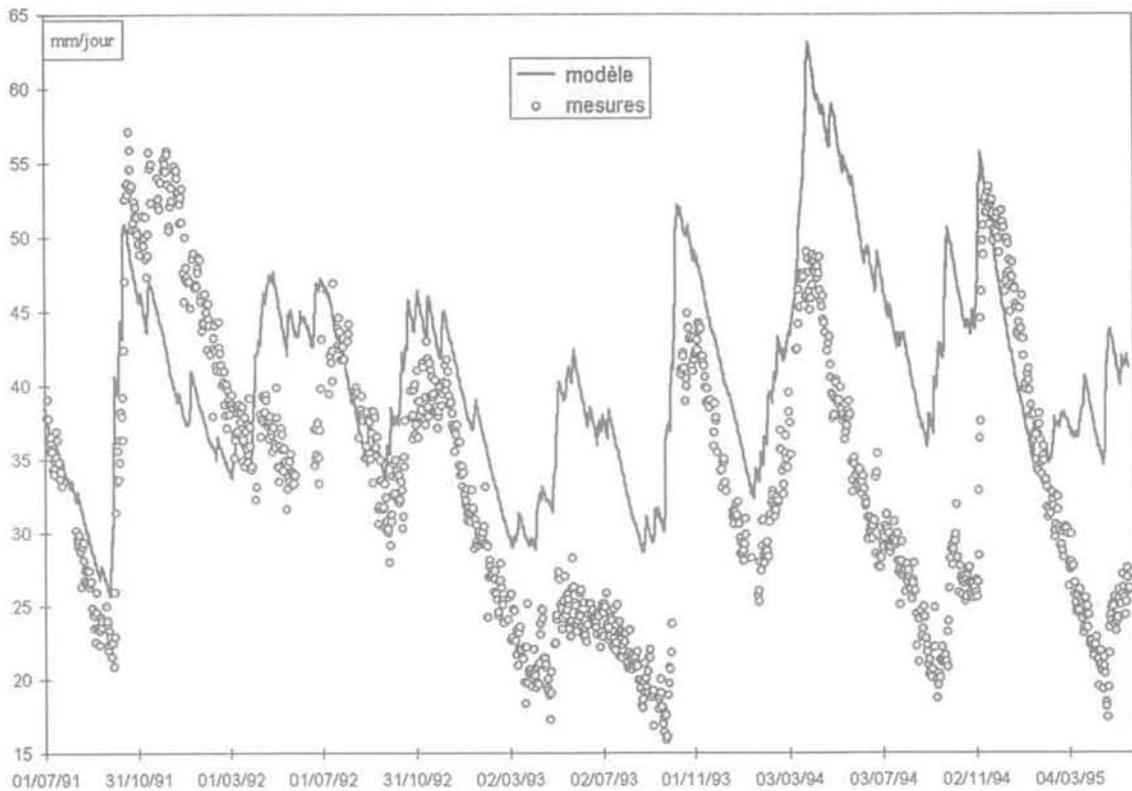


FIG. 4 Comparaison du modèle à coefficients fixes ($\alpha = 0,21$ et $\beta = 0,0072$) avec la vitesse de la cible 34.
Comparison between the model with fixed coefficients ($\alpha = 0.21$; $\beta = 0.0072$) and the measured speed of target 34.

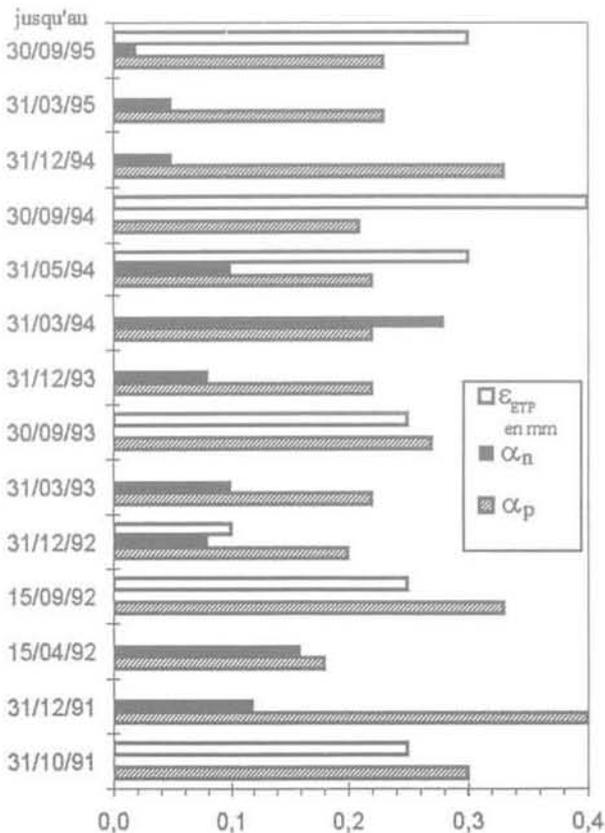


FIG. 5 Répartition par périodes des coefficients hydrologiques à partir du 1/07/1991.
Distribution by periods of the hydrological coefficients for target 34, starting from 1/07/1991.

une amélioration sensible du modèle par rapport aux vitesses mesurées (Fig. 6). Quelques décalages dans le temps, notamment dans les décharges, et quelques divergences, en particulier depuis le mois de décembre 1993, subsistent. Les décalages peuvent correspondre à des temps d'infiltration plus ou moins rapides entre les précipitations et la réaction du glissement. Une optimisation des décalages dans les premières périodes de surveillance donne un retard :

$$\Delta t_p = 6 \text{ jours pour les pluies,}$$

$$\Delta t_n = 8 \text{ jours pour la fonte des neiges.}$$

La relation s'écrit alors :

$$H_j = k_p \cdot H_{j-1} + \alpha_p P_{j-6} + \alpha_n N_{j-8} - \epsilon_{ETP}$$

$$\text{et } V_j = V_{j-\Delta t} \cdot H_j / H_{j-\Delta t}$$

avec les valeurs $H_0 = 110 \text{ mm,}$
 $V_0 = 38,5 \text{ mm/jour}$

Remarque : pour faciliter les comparaisons ultérieures, le critère choisi sera : s_{EMQ} / V_{moy} .

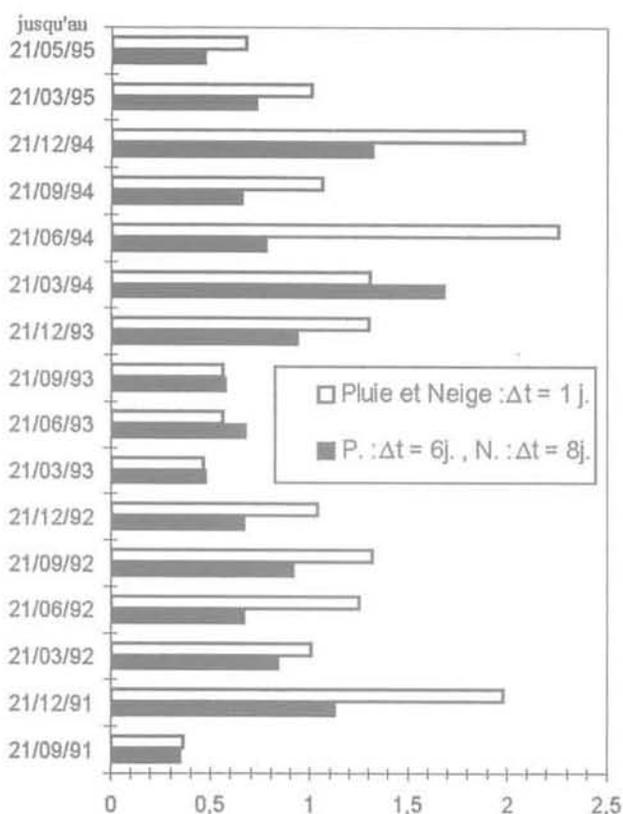


FIG. 6 Influence des décalages des temps d'infiltration sur la valeur de l'écart S_{EMQ}/V_{moy} entre le modèle et la vitesse mesurée de la cible 34.
Effect of offset of infiltration times on the S_{EMQ}/V_{moy} value between the model and the measured speed of target 34.

Quelques anomalies persistent sur les périodes récentes de suivi du glissement, essentiellement au cours des deux hivers 1994 (zone I, Fig. 7) et 1995 (zone II, Fig. 7). Les deux actions des apports hydrologiques apparaissent opposées ; les successions de fortes pluies de l'automne 1993 sont prises en compte tardivement par le modèle, provoquant une inversion du décalage entre les mesures et le modèle pendant l'hiver 1993-1994, les chutes de pluie en février 1995 étant par contre inefficaces.

3.4

Optimisation du modèle

La persistance de la dérive du modèle sur quasiment un semestre, du 1/11/1993 au 1/03/1994 (zone I, Fig. 7), montre bien qu'un changement apparaît dans la réponse cinématique du glissement aux apports en eau, pouvant provenir soit d'une rupture localisée, soit d'un effet dû à une accumulation inhabituelle de la réserve en eau. La première explication semble moins vraisemblable car le glissement retrouve ensuite sa tendance régulière.

De ce fait, l'introduction d'un terme lié aux conditions exceptionnelles n'étant pas évidente, on pourrait envisager un modèle avec un deuxième réservoir à diffusion différée à cause des couches abondamment saturées. Cependant, s'il s'avérait plus adapté, il n'en serait pas pour autant nécessaire car le dysfonctionnement du modèle présenté suffit pour servir de critère d'alarme et pour activer un processus de surveillance accrue.

De plus, la différence observée dans la zone II de la figure 7 peut s'expliquer par la différence d'altitude entre les relevés du pluviomètre et la partie supérieure

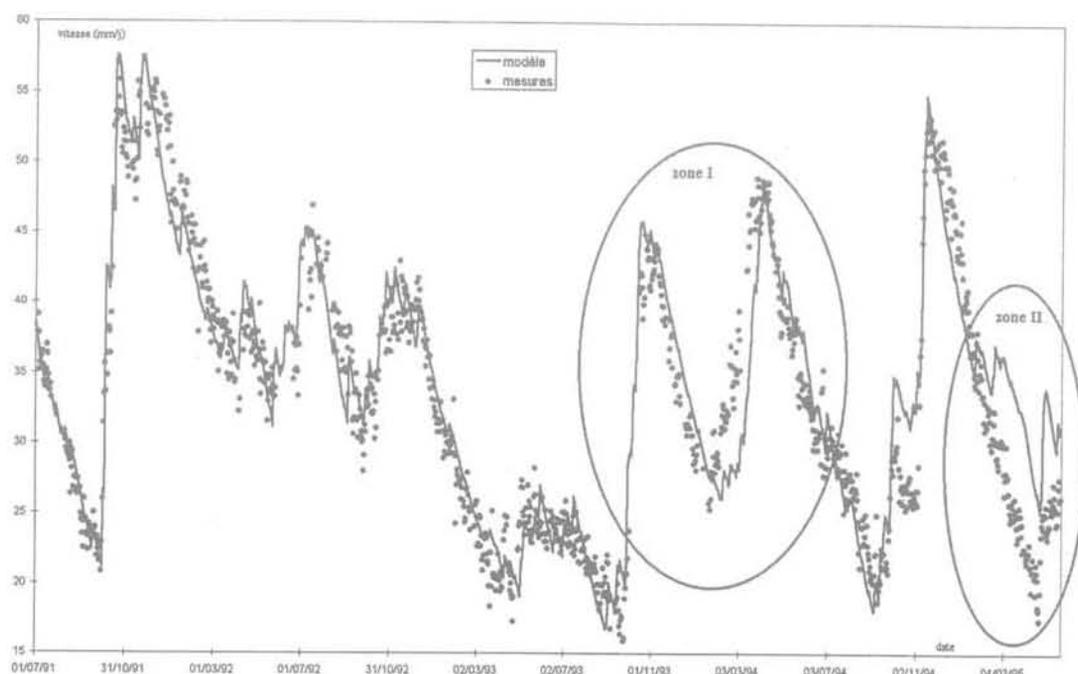


FIG. 7 Comparaison entre le modèle et la vitesse mesurée en introduisant un décalage de 6 jours pour la pluie et de 8 jours pour la neige.
Comparison between the model and the measured speed with an offset of 6 days for rain and 8 days for snow.

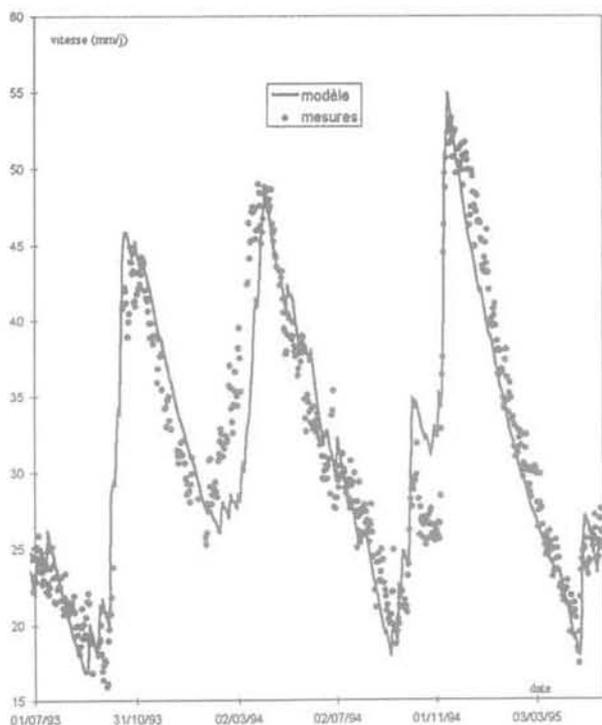


FIG. 8 Influence du retrait des pluies hivernales (hiver 1995) sur la comparaison entre le modèle et la vitesse mesurée pour la période du 01/07/1993 au 25/05/1995 (zone II, Fig. 7).
Influence of the withdrawal of the winter rains (winter of 1995) on comparison between the model and the measured speed for the period from 01/07/1993 to 25/05/1995 (zone II, Fig. 7).

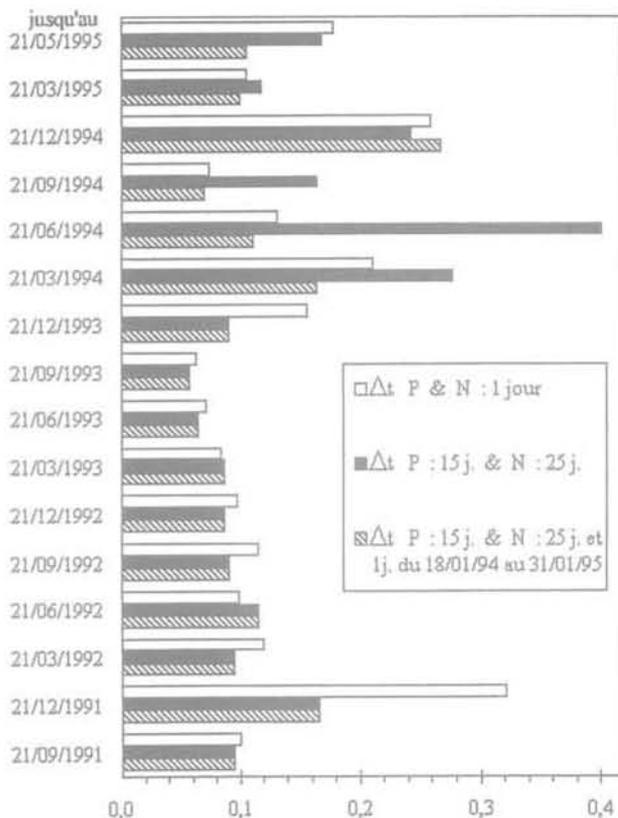


FIG. 9 Effet du décalage des temps d'infiltration sur la valeur de l'écart s_{EMQ}/V_{moy} entre le modèle et la vitesse mesurée de la cible 10.
Effect of offset of infiltration times on the s_{EMQ}/V_{moy} value between the model and the measured speed of target 10.

du glissement, les pluies hivernales relevées à Saint-Étienne-de-Tinée, transformées en neige sur le versant, étant déjà comptabilisées par les mesures nivométriques.

Après avoir contrôlé sur la figure 2 la stabilité du niveau de la Tinée, nous avons donc décidé d'enlever les pluies de la période février-mars 1995, et d'effectuer un nouveau calage du modèle. On observe sur la figure 8 une amélioration sensible de la corrélation entre le modèle et les mesures.

4

Application du modèle à la cible 10

Le test de ce modèle sur l'ensemble du glissement permet de vérifier si le comportement hydro-cinématique du versant instable est homogène. Si l'on applique les valeurs optimales du modèle précédent aux mesures de la cible 10 située dans la partie supérieure du glissement principal, en contrebas de la cible 34, il s'avère nécessaire de modifier la relation par l'introduction de trois coefficients réducteurs :

$$H_j = k_{\beta'} \cdot H_{j-1} + k_{\alpha'} (\alpha_p P_{j-\Delta t_p} + \alpha_n N_{j-\Delta t_n}) - k_c \cdot \epsilon_{ETP}$$

$$\text{et } V_j = V_{j-\Delta t} \cdot H_j / H_{j-\Delta t}$$

avec les valeurs de calage, pour $\Delta t = 1$ jour :

$$k_{\beta'} = e^{-k_{\beta} \Delta t} = \exp(-0,90 \times 0,0072) = 0,9935$$

et $k = k_{\alpha} = k_c = 0,90$;

et les valeurs initiales :

$$H_0 = 100 \text{ mm et } V_0 = 18,0 \text{ mm/jour.}$$

Remarque : l'optimisation du modèle est obtenue empiriquement avec des coefficients correcteurs équivalents pour les facteurs de charge et de décharge.

De façon générale, les déplacements d'une masse plus importante et la différence d'altitude avec la cible 34 vont définir empiriquement l'optimisation des décalages des infiltrations à 15 jours pour les pluies, et à 25 jours pour la fonte des neiges. En revanche, il a fallu tenir compte pour cette cible de l'action particulière des pluies abondantes de l'automne 1993, qui va provoquer un effet apparemment immédiat des apports en eau sur la vitesse de glissement, nécessitant l'annulation des décalages pour les pluies et la neige fondue sur une longue période allant de janvier 1994 à mars 1995 (Fig. 9). De même que pour la cible 34, la simulation a été effectuée après le retrait des pluies de la période hivernale, de février à mars 1995.

Avec une correction minimale des coefficients, on peut donc estimer que le modèle donne également une bonne appréciation de la vitesse du glissement pour cette cible (Fig. 10). En considérant, pour des relevés de distance plus faibles, qu'une même précision des mesures entraîne des fluctuations plus importantes sur la détermination des vitesses, le comportement entre les deux cibles étudiées semble alors très similaire.

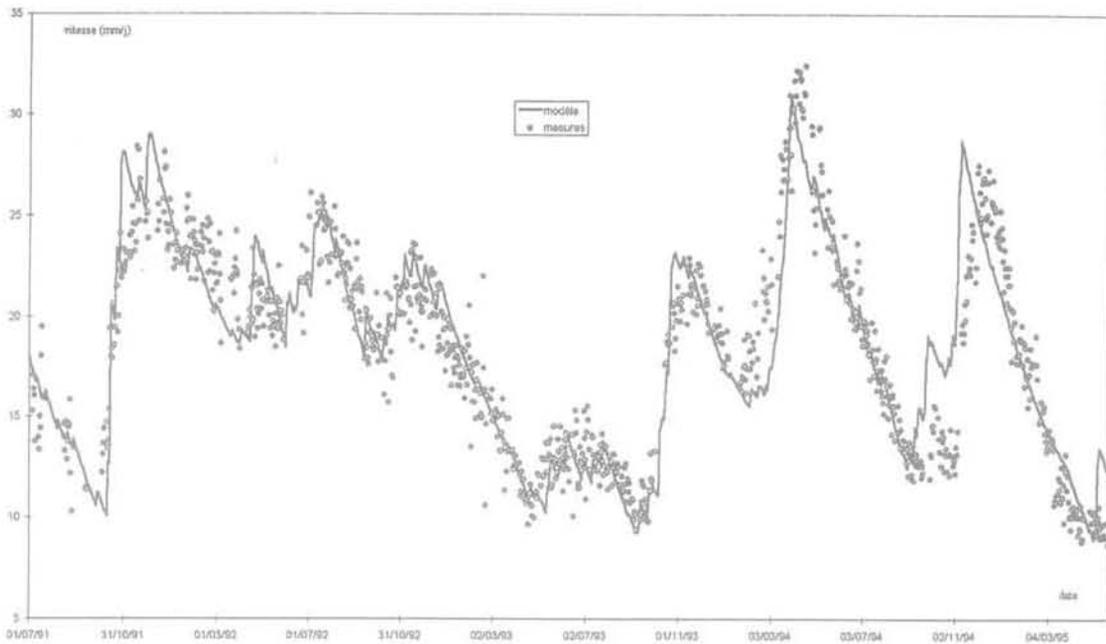


FIG. 10 Comparaison entre le modèle et la vitesse mesurée de la cible 10 en introduisant un décalage de 15 jours pour la pluie et de 25 jours pour la neige, excepté du 18/01/1994 au 31/01/1995 (décalage $\Delta t = 1$ jour pour la pluie et pour la neige).
 Comparison between the model and the measured speed of target 10 with an offset of 15 days for rain and 25 days for snow, except from 18/01/1994 to 31/01/1995 (offset of one day for rain and snow).

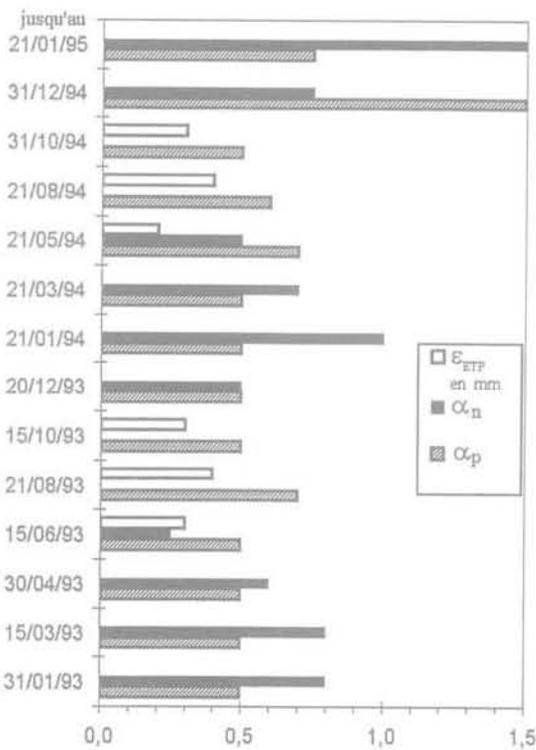


FIG. 11 Répartition par périodes des coefficients hydrologiques variables, depuis le 01/01/1993.
 Distribution by periods of the hydrological coefficients for strain gauge C2, starting from 1/01/1993.

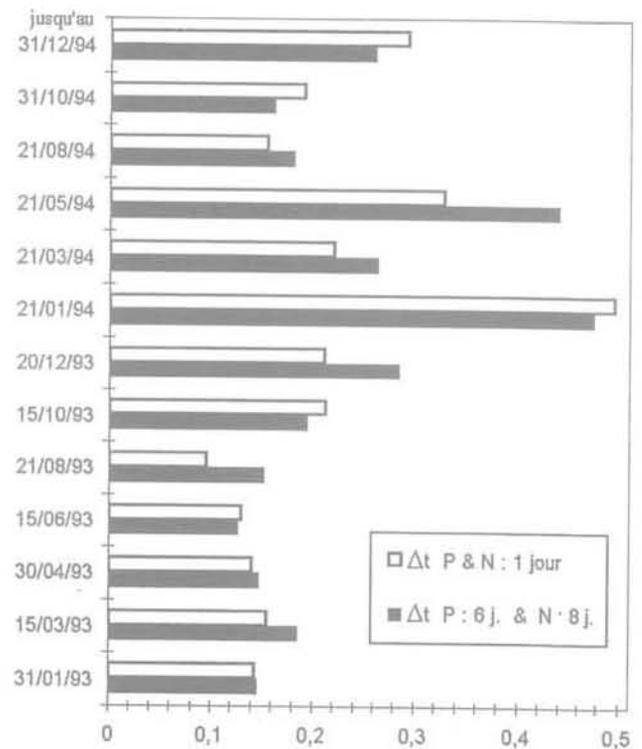


FIG. 12 Influence des décalages des temps d'infiltration sur la valeur de l'écart s_{EMQ}/V_{moy} entre le modèle et la vitesse mesurée (extensomètre C2, Séchilienne).
 Effect of offset of infiltration times on the s_{EMQ}/V_{moy} value between the model and the measured speed (strain gauge C2, Séchilienne).

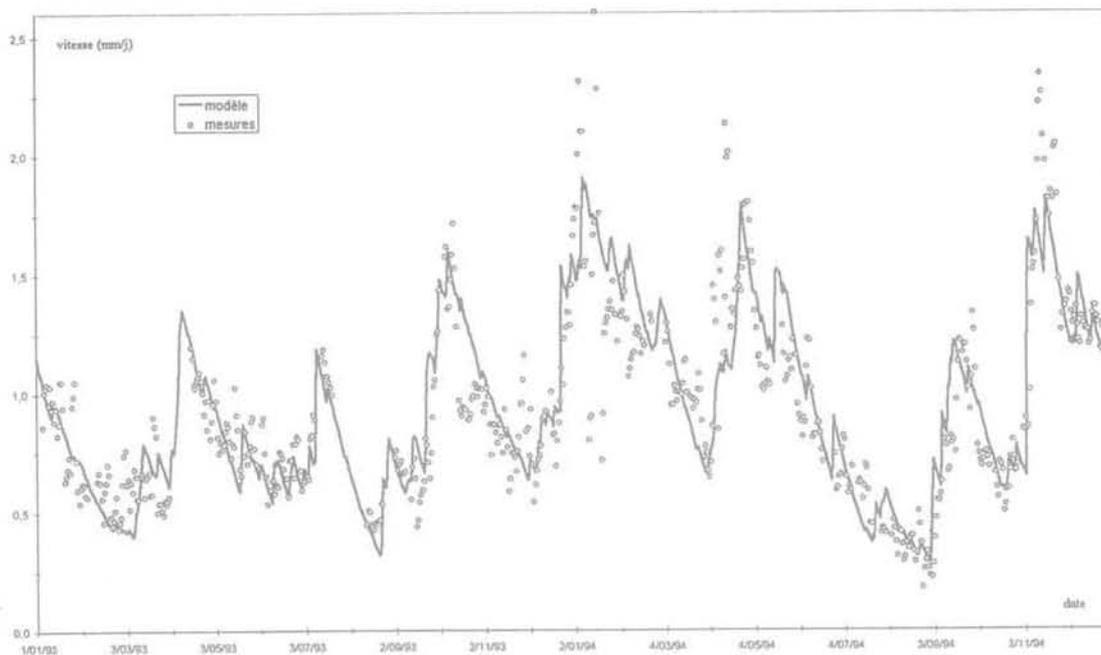


FIG. 13 Comparaison du modèle avec la vitesse mesurée (extensomètre C2, Séchilienne).
Comparison between the model and the measured speed (strain gauge C2, Séchilienne).

5

Application du modèle au glissement de Séchilienne

L'important glissement constitué de plus de 30 millions de mètres cubes de matériaux rocheux, situé au droit de la zone dite des ruines de Séchilienne (Isère), menace l'axe routier Briançon-Grenoble et le lit de la Romanche, rivière à fort débit principalement au printemps et en automne. La similitude de l'implantation et l'effet comparable des apports en eau sur les évolutions de ce glissement [8] permettent de supposer qu'il suit une relation hydro-cinématique du même type que celle étudiée précédemment :

$$H_j = k_\beta \cdot H_{j-1} + \alpha_p P_{j-\Delta p} + \alpha_n N_{j-\Delta n} - \epsilon_{ETP}$$

$$V_j = V_{j-\Delta t} \cdot H_j / H_{j-\Delta t}$$

avec comme valeurs de calage, pour $\Delta t = 1$ jour :

$$k_\beta = e^{-\beta \Delta t} = e^{-0,027} = 0,973,$$

et les valeurs initiales :

$$H_0 = 95 \text{ mm et } V_0 = 1,20 \text{ mm/jour.}$$

Les déplacements étant faibles par rapport à la distance entre les points de fixation de l'extensomètre C2, les incertitudes sur la mesure sont plus importantes. Pour limiter les fluctuations dues aux conditions météorologiques et aux caractéristiques des matériels de mesures, les valeurs des vitesses déterminées à partir des relevés de capteurs extensométriques ont été lissées sur trois jours, comme pour les mesures de La Clapière.

En redimensionnant les coefficients en rapport avec les faibles vitesses mesurées (Fig. 11), on peut considérer, de manière générale, que le modèle hydro-cinématique est bien adapté à ce glissement. Contrairement au

versant de La Clapière, les décalages pour les infiltrations des pluies ou de la neige n'ont pas contribué à un meilleur ajustement entre le modèle et la mesure, dévalorisant son rôle prévisionnel.

Les valeurs plus élevées du critère s_{EMQ}/V_{moy} montrent les difficultés d'obtenir une bonne relation entre le modèle et la mesure (Fig. 12), du fait des fortes perturbations de la mesure elle-même et des valeurs élevées de la vitesse révélant de vives accélérations, notamment en octobre 1993, en janvier 1994, en avril puis en novembre 1994, suivies quelquefois par des ralentissements notables, en octobre 1993 et en janvier 1994 (Fig. 13).

Quelques explications ont pu être avancées concernant ces valeurs élevées de la vitesse pour les relevés hivernaux [9], comme la formation de bouchons de neige autour des câbles extensométriques, mais les pics de printemps et de l'automne 1994 n'ont apparemment pas de justification en termes hydrauliques. Comme le modèle va suivre de nouveau sa tendance régulière d'évolution après ces pics, l'analyse de ces événements particuliers n'a pas été poursuivie.

6

Conclusion

Grâce à ce modèle simple, l'influence des événements météorologiques sur la cinématique d'un des importants glissements à évolution continue, le glissement de La Clapière, a pu être déterminée de manière analytique. En intervenant principalement sur la valeur du coefficient d'infiltration des pluies en automne, puis sur celui de la fonte des neiges au printemps, avec une pondération estivale liée à l'évapo-transpiration, l'allure générale du mouvement est correctement éva-

luée. Les accélérations inhabituelles, toujours liées à des apports en eau exceptionnels, sont alors révélées par des dérives momentanées du modèle. Cet aspect temporaire des périodes cinématiquement instables montre que la tendance continue du mouvement est persistante sans qu'il y ait eu un changement des caractéristiques mécaniques du glissement. Cette remarque importante est validée par le calage du coefficient de décharge à une valeur fixe et confirmée par la relative périodicité saisonnière des valeurs des coefficients du pseudo-réservoir. Enfin, en introduisant un facteur constant on a pu retrouver les déplacements superficiels d'une autre partie du glissement, l'extension de l'étude à toutes les cibles du glissement devant, cependant, être effectuée pour confirmer cette constatation.

Du point de vue prévisionnel, les décalages d'une semaine pour la cible 34 et de 15 à 25 jours pour la

cible 10 pour l'action des apports en eau dans le modèle permettent une bonne anticipation des vitesses superficielles en ne se basant que sur les mesures des précipitations. Toute modification de l'évolution du glissement non conforme à la prévision du modèle peut alors constituer une situation d'alerte, généralement consécutive à de très mauvaises conditions météorologiques, comme ce fut le cas sur ce massif en automne 1993.

Malgré des différences notables concernant la constitution géologique du massif, ce modèle analytique suit relativement correctement les mouvements du glissement de Séchillienne. En effectuant des calages appropriés des paramètres hydrologiques saisonniers, cette procédure paraît donc s'appliquer assez simplement à d'autres sites instables, et pourquoi pas à des glissements de moindre ampleur s'ils sont équipés d'une instrumentation susceptible de délivrer des mesures régulièrement.

Bibliographie

1. Rat M. - The landslide at La Clapière. Monitoring and prediction of failure, *Felsbau*, vol 13, n° 6, 1995, p. 420-424.
2. Follacci J.-P., Serratrice J.-F., Rochet L. - Synthèse des connaissances et actualisation des risques, Laboratoire des Ponts et Chaussées, CETE Méditerranée, 1993.
3. Follacci J.-P. - Les mouvements de La Clapière à Saint-Étienne-de-Tinée, *Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, n° 150-151, 1987, p. 39-54.
4. Alfonsi P. - Analyse statistique des relevés de mesure de distances du glissement de La Clapière, JSI 94 des Laboratoires des Ponts et Chaussées, 1994, p. 395-403.
5. Favre J.-L., Gervreau E., Durville J.-L. - Prévoir l'évolution des mouvements de terrain, *Revue Française de Géotechnique*, n° 59, 1992, p. 65-73.
6. Pouget P., Livet M. - Relations entre la pluviométrie, la piézométrie et les déplacements d'un versant instable. Coll. Études et Recherches des Laboratoires des Ponts et Chaussées, LCPC, n° GT 57, 1994, p. 50-83.
7. Gervreau E. Étude et prévision de l'évolution des versants naturels en mouvement. Coll. Études et Recherches des Laboratoires des Ponts et Chaussées, LCPC, 1991, n° GT 47.
8. Antoine P., Camporota P., Giraud A., Rochet L. - La menace d'écroulement aux ruines de Séchillienne (Isère), *Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, n° 150-151, 1987, p. 55-64.
9. Nicot F. - Les ruines de Séchillienne, relation entre les données météorologiques et l'instabilité de versant, Laboratoire des Ponts et Chaussées, CETE Lyon, 1994.