

# Application d'un modèle de joint frottant visqueux activé par la pluie au glissement de La Clapière

Christelle LÉONARD\*  
Ahmad POUYA  
Piétro ALFONSI

Laboratoire central des ponts et chaussées

## ■ RÉSUMÉ

Les glissements de terrain dans les massifs rocheux sont très sensibles aux précipitations atmosphériques. De ce fait, la recherche de corrélations entre les données pluviométriques ou la fonte des neiges et les vitesses de glissements mesurées sur certains grands glissements ont fait l'objet de nombreuses études, mais les résultats des modèles restent encore peu satisfaisants. Dans les cas où une surface de glissement peut être supposée existante, un modèle de glissement visqueux couplé à un modèle d'infiltration d'eau pourrait permettre d'expliquer ces corrélations. La quantité et la pression d'eau dans le joint constitué par la surface du glissement seraient alors le résultat d'un modèle d'infiltration alimenté en amont par les précipitations atmosphériques. La pertinence d'un tel modèle pour le glissement de La Clapière (Alpes-Maritimes) a été étudiée. Les vitesses de glissements fournies par le modèle sont en bon accord avec celles mesurées en deux points du massif sur une période s'étendant de 1991 à 1998. Ce modèle permet d'identifier, dans le mouvement global du massif, la part liée aux précipitations atmosphériques, ce qui devrait permettre de mieux mettre en évidence les événements liés à une rupture interne du massif.

## Application of a model describing a rainfall-activated viscous friction joint to the "La Clapière" landslide

### ■ ABSTRACT

*Landslides within rock masses are highly sensitive to atmospheric precipitations. Consequently, the search for correlations between rainfall data or snowmelt and landslide velocities measured over some slide areas has been the objective of many studies, yet model results have remained rather unsatisfactory. In the case where a sliding surface is presumed to exist, a viscous landslide model coupled with a water infiltration model could serve to explain these correlations. The quantity and pressure of water in the joint composed of the sliding surface would thus result from an infiltration model fed upstream by atmospheric precipitation. The relevance of such a model for the La Clapière landslide (Southern Alps) was studied in detail. The landslide velocities output by the model are in close agreement with those measured at two points on the rocky mass over the period 1991-1998. This model makes it possible to identify, within the total mass movement, the share ascribed to atmospheric precipitation; this step should enable singling out the events to be correlated with internal rocky mass failure.*

\*AUTEUR À CONTACTER :

Christelle LÉONARD  
christelle.leonard@lcp.c.fr

## INTRODUCTION

L'évolution de la plupart des glissements de terrain dans les massifs rocheux est souvent liée aux précipitations qu'ils subissent. En effet, 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. Si de petites pluies continues n'entraînent pas forcément la saturation du milieu et une réponse cinématique du glissement, un orage intense et ponctuel peut conduire à une réponse cinématique importante, souvent différée de quelques jours. Ainsi, dans la plupart des études concernant l'influence des précipitations sur les mouvements des masses rocheuses instables, les conditions météorologiques intenses capables de déclencher des mouvements soudains sont souvent étudiées [1-4]. Cependant, pour certaines masses rocheuses instables, on observe que, si le milieu a été saturé auparavant par de fortes pluies, des précipitations moins importantes et continues peuvent engendrer une réponse cinématique quasi immédiate. Il est alors possible d'obtenir des relations continues entre les paramètres hydroclimatologiques et les vitesses de déplacement sur des périodes plus ou moins longues, séparées par des accélérations du mouvement soudaines et fortes. Ces relations ont été recherchées sur le glissement de La Clapière [5], et parfois en utilisant une approche purement statistique [6]. Cependant, ces relations de type « boîte noire » ne sont pas toujours satisfaisantes pour comprendre le phénomène d'instabilité et prédire les mouvements. Une première approche développée par Tullen [7] consiste à déterminer la relation entre les phénomènes hydroclimatologiques et un état hydrologique critique qui peut conduire un phénomène d'instabilité à un état de réactivation ou de rupture. À l'opposé, des modélisations très complexes par éléments finis ou éléments distincts peuvent être menées, avec cependant beaucoup de difficultés pour intégrer l'apport en eau dans le massif. Chennoufi [8] a ainsi étudié le glissement de Acquara-Vadoncello en combinant les résultats de deux codes numériques, le premier pour reproduire le phénomène hydrique et le second (FLAC) pour l'aspect mécanique. Récemment, Cappa *et al.* [9] ont réussi, sur le glissement de La Clapière, à réaliser une approche hydromécanique par la méthode des éléments distincts, mais cette modélisation nécessite une connaissance très fine de la masse rocheuse qui n'est pas toujours facile à acquérir.

La démarche présentée ici consiste plutôt, dans les cas où une surface de rupture peut être supposée existante ou bien identifiée, à introduire, au niveau de la discontinuité constituant la surface de glissement, un modèle très simple de joint visqueux couplé à un modèle d'infiltration d'eau. La quantité et la pression d'eau dans ce joint seraient le résultat d'infiltration des précipitations atmosphériques en amont.

Ce modèle a été appliqué au glissement de La Clapière en aval de Saint-Étienne-de-Tinée (44,25° nord, 6,96° est) dans les Alpes-Maritimes ; ce glissement est instrumenté et suivi depuis de nombreuses années par le Laboratoire régional des ponts et chaussées de Nice. Le modèle est fondé sur les paramètres géométriques propres au glissement (masse, longueur, pente de la surface de rupture principal, etc.). Il prend aussi en compte les paramètres hydrauliques afin de reproduire un modèle d'infiltration d'eau dans le joint rocheux (perméabilité, quantité d'eau présente, débit entrant et sortant, etc.). Des relevés des stations météorologiques proches du glissement ont été utilisés (pluviomètres et nivomètres) pour introduire l'apport en eau dans le massif. Le modèle fournit alors une vitesse du glissement qui peut être ensuite comparée à la vitesse réelle, mesurée sur le site. La période étudiée s'étend de juin 1991, date de mise en place des mesures automatiques de vitesse sur le glissement de La Clapière, à nos jours.

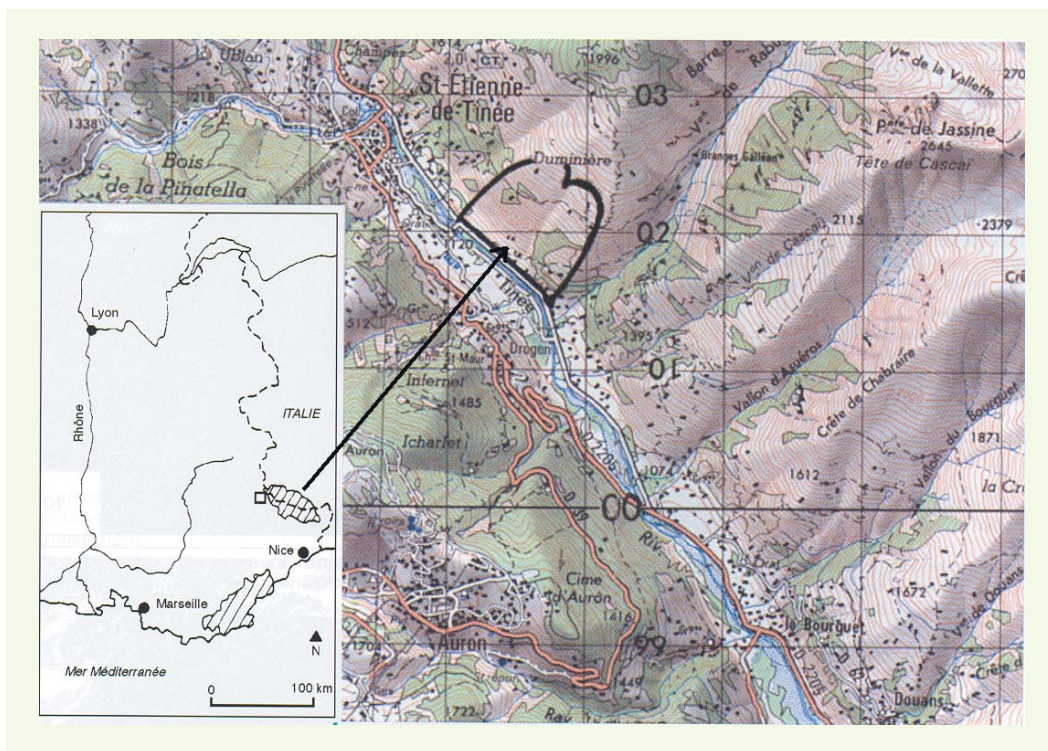
## LE GLISSEMENT DE LA CLAPIÈRE

Le glissement de La Clapière se situe dans la chaîne des Alpes au nord-ouest du massif cristallin externe de l'Argentera-Mercantour, plus précisément à 650 m en aval de Saint-Étienne-de-Tinée (figure 1). Le versant de Duminière, où se produit le glissement, se trouve à la confluence de la vallée de la Tinée et du vallon de Rabuons. Concernant un volume en mouvement de plus de 50 millions de m<sup>3</sup> sur une surface active de 0,3 km<sup>2</sup>, 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.

L'instrumentation implantée sur le versant couvre trois domaines : la cinématique des déplacements superficiels, les apports hydrologiques (relevés journaliers des hauteurs de pluies, de fonte des

**figure 1**

Glissement de La Clapière  
- Plan de situation. Fond  
de carte IGN Saint-  
Étienne-de-Tinée 1/50 000  
(d'après [10]).



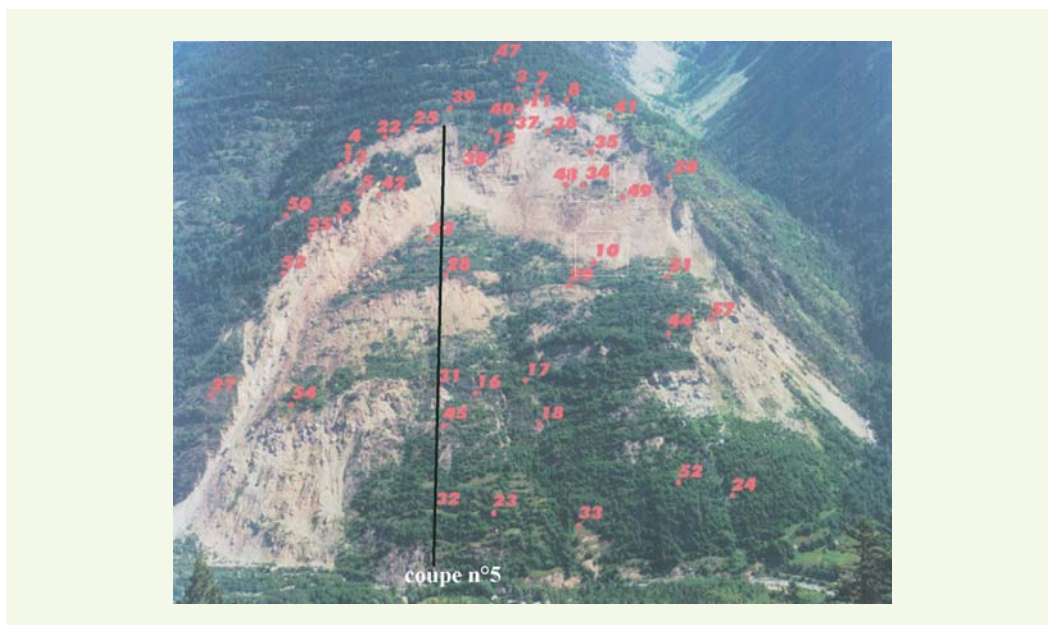
neiges et du débit de la Tinée) et les vibrations (écoute sismique). Depuis 1991, un dispositif de surveillance automatisé a été mis en place. Ce système mesure, à partir de deux stations situées face au versant de La Clapière, la distance de toutes les cibles (une cinquantaine ; **figure 2**) réparties dans les parties fortement mobiles du glissement pour en contrôler les mouvements, mais aussi implantées en périphérie, afin d'en vérifier la stabilité et de pouvoir déceler les éventuelles extensions des désordres. Ces mesures permettent de suivre l'évolution des vitesses de déplacement de tout le glissement [10]. La **figure 3** présente à titre d'exemple la vitesse de la cible 10 (**figure 2**) moyennée sur trois jours afin de réduire les écarts-types.

L'observation sur une longue période de la vitesse de glissement de la cible 10 laisse apparaître trois composantes du mouvement [6] :

- une tendance, traduisant le comportement à long terme, caractérisée par la vitesse moyenne de cette cible (12 mm/jour environ),

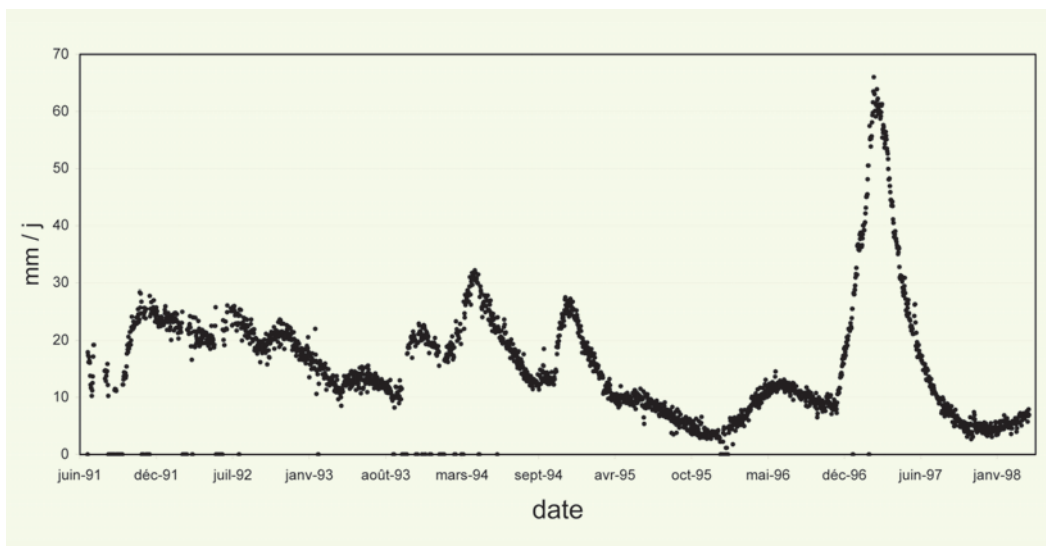
**figure 2**

Position approximative  
des cibles sur le versant de  
La Clapière (1998).





**figure 3**  
Vitesse (en mm/j) de la  
cible 10.



- 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 (pic de 1997).

## PRÉSENTATION DU MODÈLE

### ■ Description du modèle

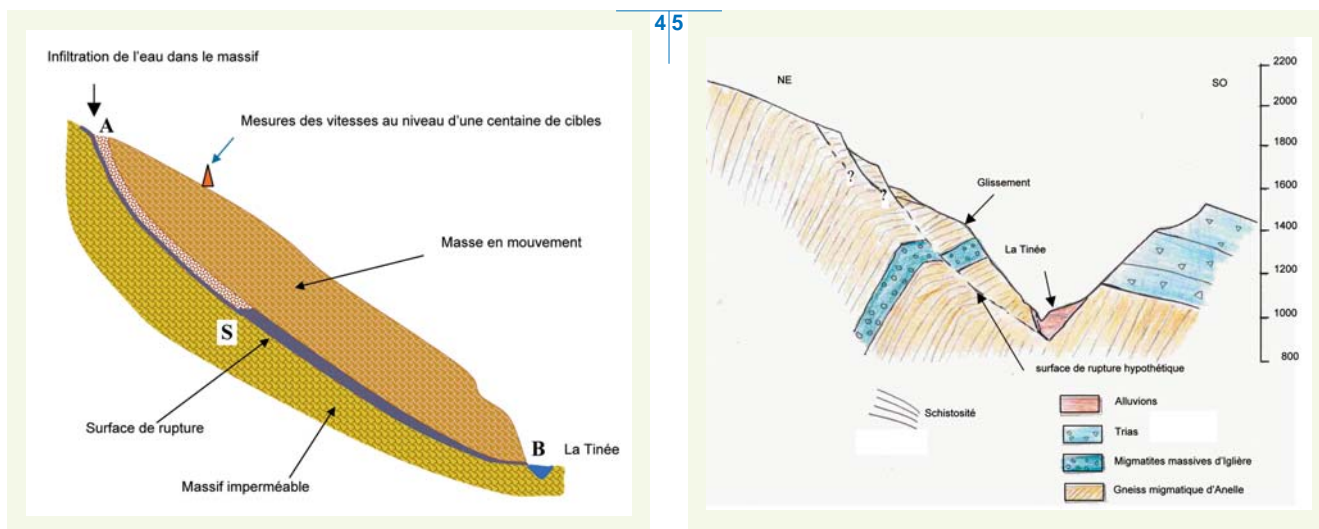
Le modèle numérique présenté sur la **figure 4** suppose l'existence d'une surface de rupture qui constitue le « joint rocheux ».

L'existence de cette surface de rupture sur le glissement de La Clapière est supposée sur la **figure 5** présentant la coupe géologique du site [11]. Elle est confirmée d'après les calculs de stabilité de pente réalisés avec le logiciel PETAL (LCPC) [12], qui tiennent compte des études hydrogéochimiques et hydromécaniques conduites sur le site [13, 14] afin de reproduire au mieux la complexité et la spécificité de l'hydrogéologie du versant de La Clapière (**figure 6**).

La coupe n° 5 sur laquelle se situe la cible 28 a été prise comme référence selon la topographie de 1997, car elle se trouve sur la partie centrale du glissement et ne présente donc qu'une seule

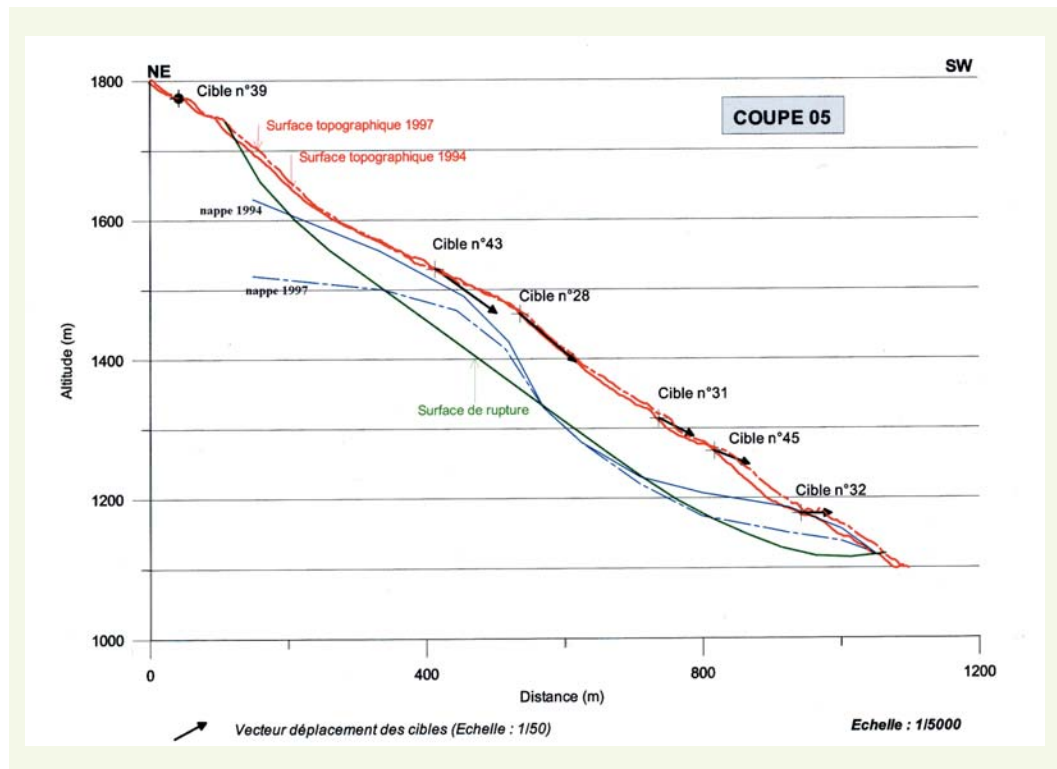
**figure 4**  
Modèle de bloc rigide  
glissant sur un « joint  
visqueux activé par la  
pluie.

**figure 5**  
Coupe géologique  
simplifiée du glissement  
(d'après [11]).



**figure 6**

Coupe du glissement indiquant les surfaces topographiques de 1994 et 1997, la surface de rupture, estimée à partir de calculs de stabilité de pente ainsi que les positions des nappes phréatiques en 1994 et 1997 (d'après [12]).



surface de rupture contrairement à la partie sud-est qui possède des surfaces de rupture emboîtées (cf. figure 2). Cela permet de rendre compte du mouvement global du glissement.

Le « joint rocheux », simulant la surface de rupture, se comporte alors comme un système hydro-mécanique soumis à des forces mécaniques et hydrauliques externes (figure 7).

Mécaniquement, le modèle est représenté par une masse  $M$ , glissant avec un contact frottant visqueux sur une pente inclinée  $\alpha$ , de longueur  $L$ . Le contact frottant visqueux, introduit par Pouya *et al.* [15], peut se justifier physiquement si l'on considère que le joint rocheux est rempli de matériaux très visqueux, comme certaines argiles.

Toutes les équations sont écrites en considérant une pente de 1 m de large (dans la direction perpendiculaire à la figure 7). Ainsi, la masse  $M$  est exprimée en kg/m.

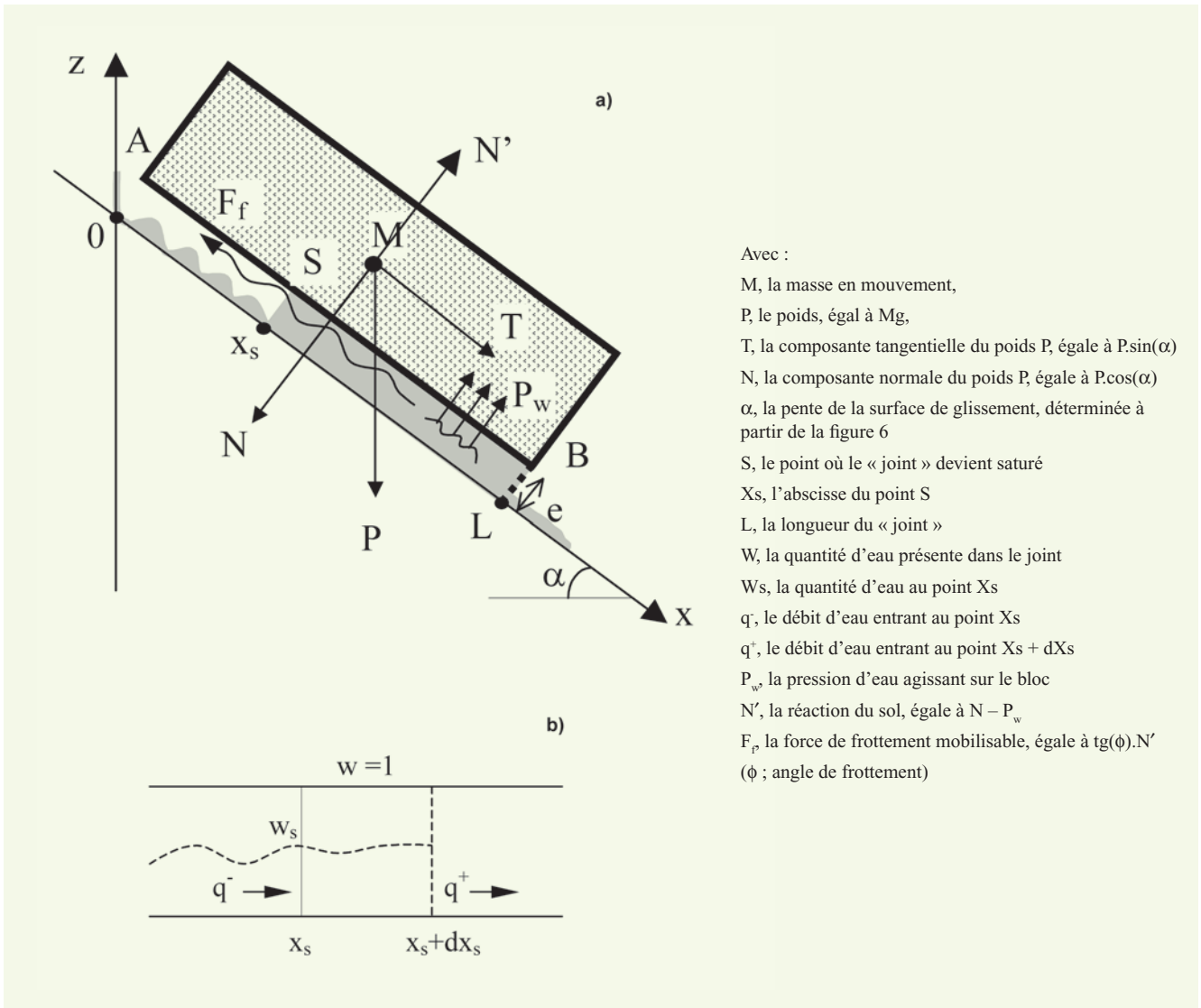
L'infiltration d'eau dans le joint peut prendre différents chemins, surtout si le massif est fracturé et perméable. Toutefois, dans le modèle simplifié proposé, l'eau, sous forme de pluie et de neige fondue, s'infiltré uniquement au sommet du joint, en A ( $x = 0$ ) sur la figure 4. Elle s'écoule ensuite dans le joint à la vitesse  $v_r$  (supposée constante dans le temps et dans l'espace) jusqu'au point de saturation S ( $x = x_s$ ) et s'évacue au pied du joint en B ( $x = L$ ). Le point de saturation S correspond au point à partir duquel le joint devient saturé, c'est-à-dire que la section SB agit comme un réservoir qui se remplit et se vide en fonction de l'apport en eau dans le massif. Les variations au cours du temps de ce point de saturation représentent assez bien les fluctuations des nappes phréatiques observées sur le versant.

## ■ Équations du mouvement

Pour reproduire le glissement visqueux, on propose de rajouter au système mécanique une force de viscosité  $F_v$ , proportionnelle à la vitesse du glissement ( $F_v = \mu V$ ,  $\mu$  étant une constante, exprimée en  $\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{j}^{-1}$ ), qui freine le mouvement et stabilise ainsi le glissement [15].

En écrivant les relations fondamentales de la dynamique parallèlement et perpendiculairement au plan incliné, on obtient l'équation de l'accélération du mouvement sous la forme suivante :

$$M a = M \frac{dV}{dt} = T - F_f - F_v = Mg \sin \alpha - [Mg \cos \alpha - P_w] \tan \varphi - \mu V \quad (1)$$



- Avec :
- M, la masse en mouvement,
  - P, le poids, égal à Mg,
  - T, la composante tangentielle du poids P, égale à  $P \cdot \sin(\alpha)$
  - N, la composante normale du poids P, égale à  $P \cdot \cos(\alpha)$
  - $\alpha$ , la pente de la surface de glissement, déterminée à partir de la figure 6
  - S, le point où le « joint » devient saturé
  - $x_s$ , l'abscisse du point S
  - L, la longueur du « joint »
  - W, la quantité d'eau présente dans le joint
  - $W_s$ , la quantité d'eau au point  $x_s$
  - $q^-$ , le débit d'eau entrant au point  $x_s$
  - $q^+$ , le débit d'eau entrant au point  $x_s + dx_s$
  - $P_w$ , la pression d'eau agissant sur le bloc
  - $N'$ , la réaction du sol, égale à  $N - P_w$
  - $F_f$ , la force de frottement mobilisable, égale à  $\tan(\phi) \cdot N'$  ( $\phi$  ; angle de frottement)

**figure 7**

a) Modèle schématique de glissement sur un joint hydromécanique visqueux.  
 b) Discontinuité du flux  $q(x,t)$  et de la fonction  $w(x,t)$  en S en fonction de la variable x.

Le joint n'étant saturé que dans la section SB, la pression d'eau  $p(x,t)$  est nulle dans la section AS. On suppose que la partie SB agit comme un réservoir. La pression sur cette partie peut être calculée par une loi hydrostatique. On obtient alors :

$$0 \leq x \leq x_s(t) : \quad p(x,t) = 0 \quad (2a)$$

$$x_s(t) \leq x \leq L : \quad p(x,t) = \rho_w g \sin \alpha (x - x_s) \quad (2b)$$

$\rho_w$  étant la masse volumique de l'eau.

La pression d'eau  $P_w(t)$  s'exprime alors ainsi, pour une largeur unitaire de pente :

$$P_w(t) = \int_0^L p(x,t) dx = \int_{x_s}^L \rho_w g \sin \alpha (x - x_s) dx = \frac{1}{2} \rho_w g (L - x_s)^2 \sin \alpha \quad (3)$$

En introduisant l'équation (3) dans l'équation (1), après simplification, on obtient alors l'équation de l'accélération du mouvement sous la forme suivante :

$$a = \frac{dV}{dt} = \frac{g \sin(\alpha - \phi)}{\cos \phi} + \frac{\rho_w g \sin \alpha \tan \phi (L - x_s)^2}{2M} - \frac{\mu}{M} V \quad (4)$$

Comme on peut le voir dans l'équation (3), l'accélération du mouvement dépend de la position du point de saturation S ( $x = x_s$ ), qui est fonction de la quantité de pluie et de neige fondue infiltrée au sommet du glissement.

## ■ Calcul de la position du point de saturation S ( $x = x_s$ ) au cours du temps

Dans ce modèle, l'eau s'infiltré en  $x = 0$ , s'écoule à la vitesse  $v_r$  jusqu'au point S, et s'évacue en  $x = L$ .

Si l'on suppose que le « joint rocheux » a une « ouverture hydraulique »  $e$ , et que l'eau s'écoule dans la partie AS, le joint peut être assimilé à une couche d'épaisseur  $w(x,t)e$  (la fonction  $w(x,t)$  variant de 0 pour un joint sec à 1 pour un joint entièrement rempli). La fonction  $w(x,t)$  obéit à la loi de propagation de l'eau dans le joint suivante :

$$0 \leq x \leq x_s(t) : \quad w(x,t) = w(0, t - x/v_r) \quad (5a)$$

$$x_s(t) \leq x \leq L : \quad w(x,t) = 1 \quad (5b)$$

Pour une largeur unitaire, le flux d'eau au point  $x$  dans le joint peut s'exprimer ainsi :

$$q(x,t) = w(x,t)ev_r \quad (6)$$

Le flux entrant au point A dépend de la quantité journalière  $h(t)$  de pluie et de neige fondue. Il peut être écrit sous la forme :

$$q(0,t) = C h(t) \quad \text{où } C \text{ est une constante} \quad (7)$$

Le flux maximum qui peut entrer dans le « joint » est limité à la quantité  $ev_r$  (avec  $w(0,t) = 1$ ) (6). De ce fait, toute la quantité journalière de pluie et de neige fondue supérieure à  $h_m = ev_r/C$  s'écoulera par ruissellement le long de la surface topographique du glissement. En notant que  $w_0(t) = w(0,t)$ , on peut écrire, d'après l'équation (7) :

$$w_0(t) = h(t)/h_m \quad \text{si } h(t) \leq h_m \quad (8a)$$

$$w_0(t) = 1 \quad \text{si } h(t) > h_m \quad (8b)$$

$h_m$  correspond à la quantité d'eau journalière (sous forme de pluie et de neige fondue) qui peut entrer dans le « joint ».

Le débit d'évacuation  $q_L$  au point B est proportionnel à la différence de pression d'eau dans le réservoir entre ce point et l'extérieur. Soit :

$$q_L = K(p_i - p_e) \quad (9a)$$

avec  $p_i$ , la pression au point B et  $p_e$ , la pression au point A. La constante d'évacuation  $K$  dépend des propriétés hydrauliques du joint au pied du massif. Pour simplifier les équations, on peut l'écrire sous une forme issue d'une comparaison avec un écoulement dans un joint de conductivité hydraulique  $\kappa$ . En effet, en supposant que le « joint » a une « ouverture hydraulique »  $e$  et une conductivité hydraulique  $\kappa$  sur toute la longueur AB, le flux sortant au point B peut s'exprimer par :

$$q_L = \frac{\kappa}{\rho_w g} \cdot \frac{e(p_i - p_e)}{L} \quad (9b)$$

Ceci permet d'écrire formellement  $K$  sous la forme  $K = \frac{\kappa}{\rho_w g} \frac{e}{L}$ . Par la suite, les équations seront écrites en utilisant ce « coefficient de drainage »  $\kappa$ .

La pression au point B, déduite de l'équation (2b), est égale à :

$$p_i = \rho_w g \sin \alpha (L - x_s) \quad (10)$$

En substituant (10) dans (9b) et posant  $p_e = 0$ , on obtient :

$$q_L = \kappa e \sin \alpha (1 - x_s/L) \quad (11)$$

Comme on peut le voir sur la figure 7b, le point S ( $x = x_s$ ) exprime un point de discontinuité, puisque le flux  $q(x,t)$  et la fonction  $w(x,t)$  sont discontinus par rapport à la variable  $x$ . Sur la section SB,

le flux est constant et est égal à  $q_L$ . Ainsi, à droite de S, le flux noté  $q^+$  est égal à  $q_L$ . À gauche de S, le flux noté  $q^-$  est obtenu d'après l'équation (6) et est égal à  $w_s e v_r$  où

$$w_s(t) = w_0(t - x_s/v_r) \quad (12)$$

Les valeurs à gauche et à droite en S de la fonction  $w(x,t)$ , notées respectivement  $w^-$  et  $w^+$  sont  $w^- = w_s$  et  $w^+ = 1$ .

En considérant les quantités de flux entrant et sortant de la portion du joint limitée par  $x_s$  et  $(x_s + dx_s)$  (les positions respectives du point S au temps  $t$  et  $[t + dt]$ ), on peut écrire, d'après Pouya *et al.* [15], que la vitesse de propagation  $v_s$  du point de discontinuité S est égale à :

$$v_s(t) = dx_s/dt = (q^+ - q^-)/[(w^+ - w^-) e] \quad (13)$$

En introduisant dans l'équation (13)  $w^+ = 1$ ,  $w^- = w_s$ ,  $q^+ = q_L$ ,  $q^- = w_s e v_r$ , et en utilisant l'équation (11), on obtient alors l'équation de  $v_s$  suivante, après simplification :

$$v_s(t) = \frac{(1 - x_s/L)\kappa \sin\alpha - w_s v_r}{1 - w_s} \quad (14)$$

Un logiciel a été développé sous Visual Basic qui permet de résoudre les équations ci-dessus de manière incrémentale pour calculer l'évolution des différentes paramètres  $w(x,t)$ ,  $x_s(t)$ ,  $v_s(t)$  et  $V(t)$ .

## ■ Paramètres du modèle

À partir de la **figure 6**, on a pu estimer la longueur  $L$  du joint rocheux (longueur de l'arc formant la surface de rupture), la pente moyenne  $\alpha$  de la surface de glissement ainsi que le volume en mouvement (la partie comprise entre la surface topographique et la surface de rupture). On obtient  $L = 1\,181$  m et  $\alpha = 35$  degrés. À partir du volume estimé, on calcule, pour ce massif de gneiss, une masse de  $125 \cdot 10^6$  kg par unité de largeur du glissement, soit  $M = 125 \cdot 10^6$  kg/m.

Les autres paramètres du modèle, qui ne sont pas connus, sont indiqués dans le **tableau 1**.

**tableau 1**  
Paramètres introduits dans  
le modèle.

Symbole	Paramètres physiques	Unité
$\mu$	Viscosité	$\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{j}^{-1}$
$\kappa$	Coefficient de drainage	$\text{m} \cdot \text{j}^{-1}$
$v_r$	Vitesse d'infiltration	$\text{m} \cdot \text{j}^{-1}$
$h_m$	Quantité d'eau journalière maximale absorbable	$\text{m} \cdot \text{j}^{-1}$
$\varphi$	Angle de frottement	degré

## APPLICATION DU MODÈLE AU GLISSEMENT DE LA CLAPIÈRE

L'instrumentation du site de La Clapière a permis de mesurer les vitesses de mouvement sur une cinquantaine de cibles à différentes périodes (**cf. figure 2**). On se contentera dans la suite d'étudier les données obtenues sur les deux cibles 10 et 34 qui sont parmi les plus mobiles et dont les mesures recouvrent la même période.

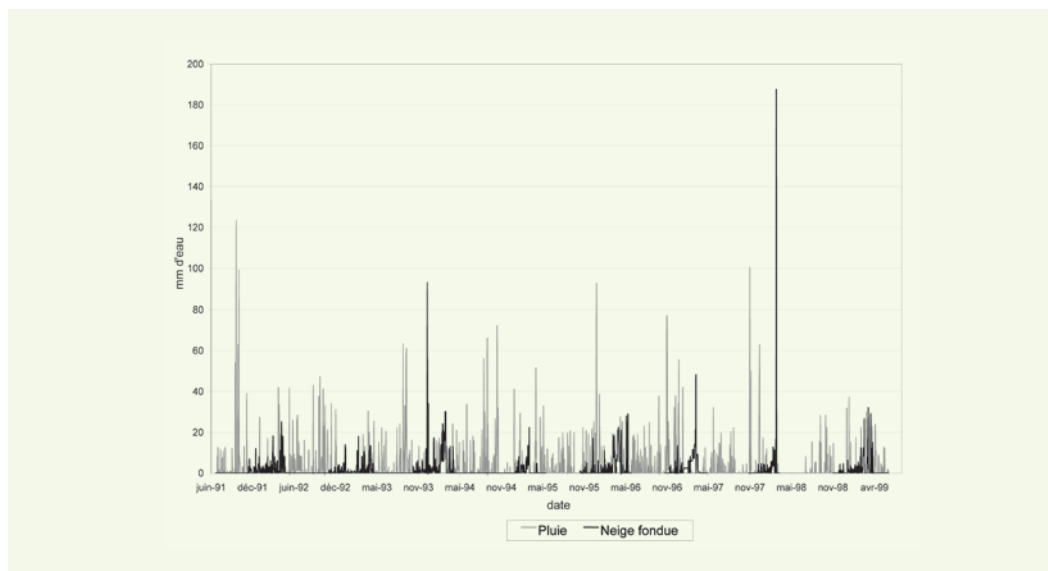
### ■ Cible 10

Le modèle de joint visqueux a d'abord été testé sur la cible 10 située sur la partie aval du glissement supérieur. Cette cible est particulièrement sensible aux événements météorologiques et elle reproduit assez bien le comportement global du glissement. La période d'étude s'étend de juillet 1991 à janvier 1998. Les données de pluie et de neige fondue sur cette période sont représentées sur la **figure 8**.



**figure 8**

Pluies et neiges fondues  
à Saint-Étienne-de-Tinée  
entre juillet 1991 et  
janvier 1998.



Dans un premier temps, seule la quantité de pluie est introduite dans le modèle, au travers de la fonction  $h(t)$ . Le résultat de la modélisation est illustré sur la **figure 9**.

Le résultat obtenu montre une assez bonne corrélation entre les vitesses mesurées et celles calculées par le modèle : l'allure générale est retrouvée. Cependant, l'amplitude des pics de vitesse n'est pas toujours respectée, en particulier à partir de février 1995, où la vitesse calculée est toujours supérieure à la vitesse mesurée, à l'exception du pic de février 1997. Si on ne tient pas compte de ce pic, qui n'apparaît pas corrélé avec les données pluviométriques, il semblerait ainsi qu'à partir de février 1995 le glissement se soit ralenti.

En examinant plus précisément le modèle avant février 1995, deux zones d'anomalies apparaissent aux printemps 1992 et 1994, certainement dues à la non-prise en considération de la fonte des neiges dans le calcul. Cette dernière devant jouer un rôle primordial dans l'accélération des mouvements, on a décidé alors de l'inclure dans la fonction  $h(t)$ . Le résultat obtenu montre une amélioration sensible de la corrélation entre le modèle et les mesures, avant février 1995 (**figure 10**). Après cette date, la vitesse calculée reste toujours supérieure à la vitesse mesurée, à l'exception du pic de février 1997.

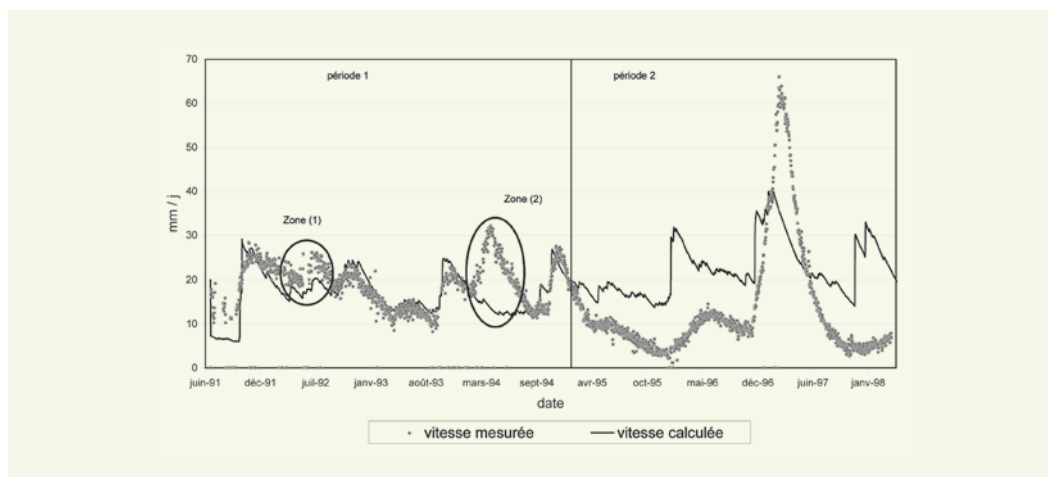
Afin de reproduire le ralentissement du glissement, observé après février 1995, il semble nécessaire de modifier les paramètres du modèle, tels que la viscosité  $\mu$  et le paramètre  $\kappa$  qui contrôle l'évacuation de l'eau dans le « joint ». En effet, lors des différentes phases d'accélération du mouvement, on peut supposer que les caractéristiques du glissement ont évolué, modifiant ainsi les paramètres

**figure 9**

Comparaison entre le  
modèle et la vitesse de  
la cible 10 mesurée sur  
site. Seule la pluie est  
introduite.

Paramètres du modèle :

$$\begin{aligned} h_m &= 0,075 \text{ m/j,} \\ v_r &= 50 \text{ m/j, } \kappa = 6,25 \text{ m/} \\ &\text{j, } \phi = 32 \text{ degrés,} \\ \mu &= 3,40 \cdot 10^{20} \text{ kg/m/j,} \\ x_s(t=0) &= 0,68L. \end{aligned}$$

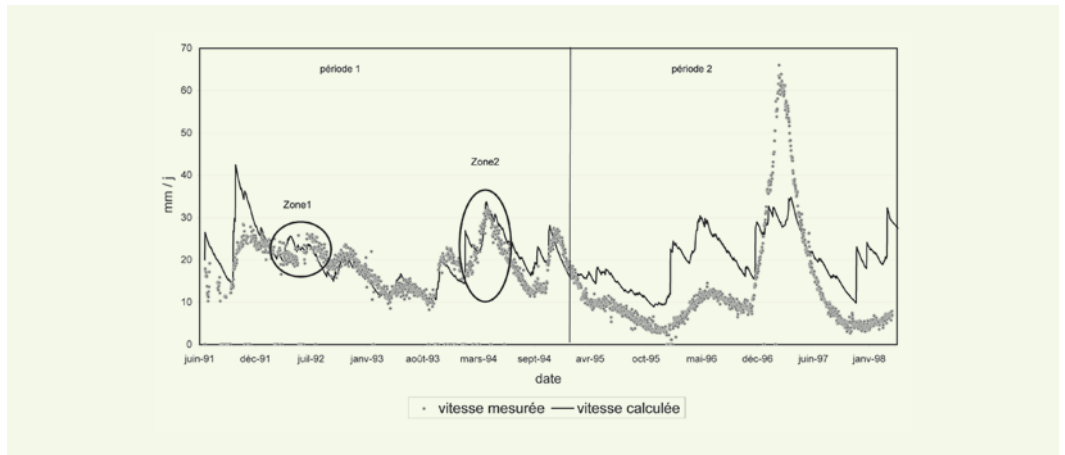


**figure 10**

Comparaison entre le modèle et la vitesse de la cible 10 mesurée sur site. L'apport en eau est constitué de pluies et de neiges fondues.

Paramètres du modèle :

$$\begin{aligned}
 h_m &= 0,075 \text{ m/j,} \\
 v_r &= 50 \text{ m/j, } \kappa = 9,08 \text{ m/j,} \\
 \phi &= 32 \text{ degrés,} \\
 \mu &= 3,53 \cdot 10^{20} \text{ kg/m/j,} \\
 x_s(t=0) &= 0,68L
 \end{aligned}$$



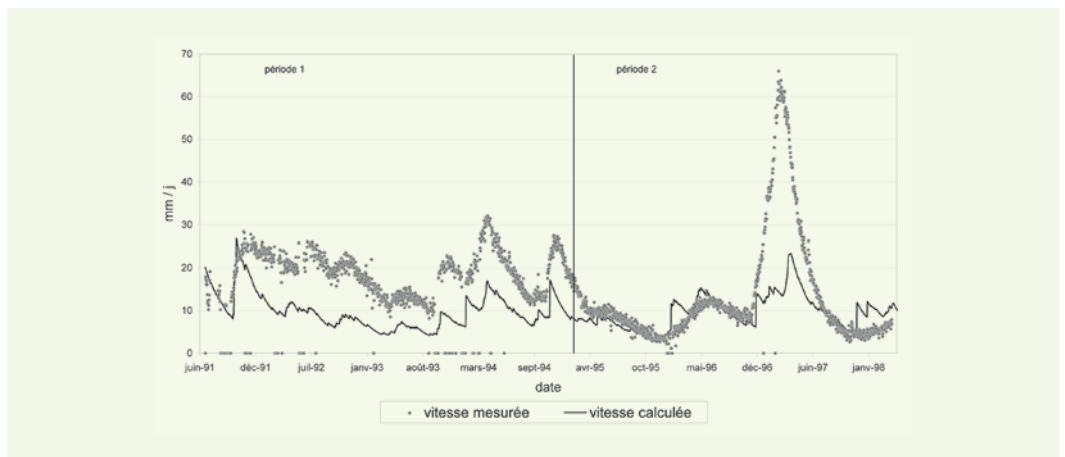
à prendre en compte dans le modèle. En augmentant la viscosité qui joue un rôle de frein sur le mouvement, en prenant  $\mu = 4,62 \cdot 10^{20} \text{ kg/m/j}$  et en augmentant le coefficient de drainage en prenant  $\kappa = 12,54 \text{ m/j}$ , le résultat, présenté sur la **figure 11**, indique une assez bonne corrélation entre les calculs et les mesures pour la période postérieure à février 1995, à l'exception du pic de février 1997. Ce dernier semble donc indépendant de l'apport hydrique et on suppose qu'il est plutôt le résultat d'une rupture mécanique du massif, non prise en compte dans le modèle. Avant février 1995, les vitesses calculées avec ces paramètres sous-estiment largement les vitesses mesurées, confirmant la tendance au ralentissement après février 1995. La **figure 12** présente les deux modèles précédents assemblés.

**figure 11**

Comparaison entre le modèle et la vitesse de la cible 10 mesurée sur site. L'apport en eau est constitué de pluies et de neiges fondues.

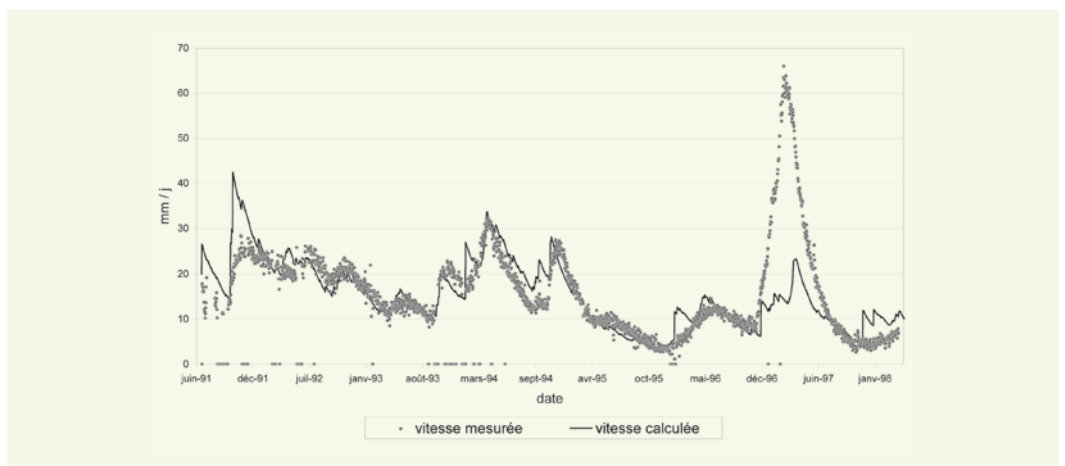
Paramètres du modèle :

$$\begin{aligned}
 h_m &= 0,075 \text{ m/j,} \\
 v_r &= 50 \text{ m/j, } \kappa = 12,54 \text{ m/j,} \\
 \phi &= 32 \text{ degrés,} \\
 \mu &= 4,62 \cdot 10^{20} \text{ kg/m/j,} \\
 x_s(t=0) &= 0,3L.
 \end{aligned}$$



**figure 12**

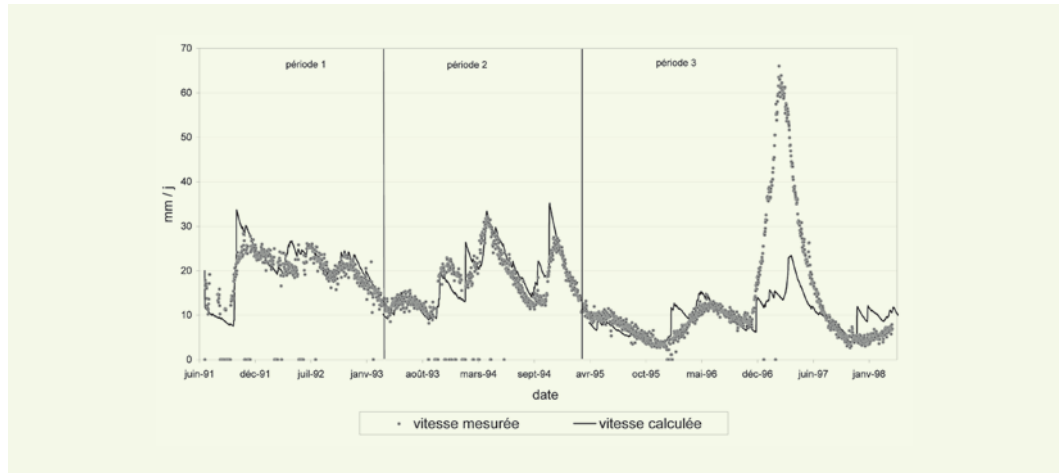
Assemblage des modèles présentés sur les figures 10 et 11.



Si l'on souhaite affiner cette modélisation, en supposant à nouveau que les paramètres mécaniques et hydrauliques du glissement peuvent être différents pour différentes phases d'accélération du glissement, un calage en trois parties peut être réalisé. Le résultat est présenté sur la **figure 13**. Les corrélations sont relativement améliorées par rapport à la **figure 12** pour chaque phase, à l'exception du pic de février 1997, qui n'est toujours pas reproduit. Ceci montre que les caractéristiques du système mécanique ont changé d'une phase à l'autre. Ces modifications pourraient résulter de ruptures internes du massif.

**figure 13**

Comparaison entre le modèle et la vitesse de la cible 10 mesurée sur site : calage en trois parties. L'apport en eau est constitué de pluies et de neiges fondues.



Compartiment 1 :  $h_m = 0,075 \text{ m/j}$ ,  $v_r = 50 \text{ m/j}$ ,  $\kappa = 8,65 \text{ m/j}$ ,  $\phi = 32 \text{ degrés}$ ,  $\mu = 2,89 \cdot 10^{20} \text{ kg/m/j}$ ,  $x_s(t=0) = 0,3L$ .  
 Compartiment 2 :  $h_m = 0,075 \text{ m/j}$ ,  $v_r = 50 \text{ m/j}$ ,  $\kappa = 10,72 \text{ m/j}$ ,  $\phi = 32 \text{ degrés}$ ,  $\mu = 2,86 \cdot 10^{20} \text{ kg/m/j}$ ,  $x_s(t=0) = 0,3L$ .  
 Compartiment 3 :  $h_m = 0,075 \text{ m/j}$ ,  $v_r = 50 \text{ m/j}$ ,  $\kappa = 12,54 \text{ m/j}$ ,  $\phi = 32 \text{ degrés}$ ,  $\mu = 4,62 \cdot 10^{20} \text{ kg/m/j}$ ,  $x_s(t=0) = 0,3L$ .

### ■ Cible 34

Le modèle est ensuite appliqué à la cible 34 (**cf. figure 2**), située dans la partie aval du glissement supérieur, en contre-haut de la cible 10. N'appartenant pas au même bloc du glissement que celui de la cible 10, on peut supposer que les paramètres géométriques et hydromécaniques du modèle seront différents du cas précédent. Cependant, n'ayant pas de données précises sur la géométrie de ce bloc, on a repris pour simplifier les mêmes données que dans le cas précédent et on a tenté d'optimiser les paramètres hydromécaniques. L'optimisation des paramètres géométriques pourra faire l'objet d'études ultérieures.

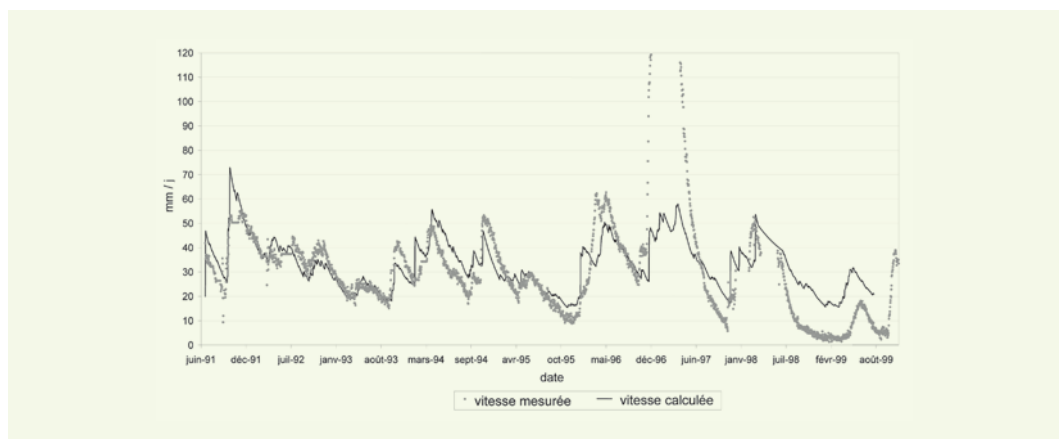
En prenant pour paramètres une viscosité égale à  $\mu = 2,27 \cdot 10^{20} \text{ kg/m/j}$  et un coefficient de drainage  $\kappa = 8,65 \text{ m/j}$ , le résultat de la modélisation obtenu est représenté sur la **figure 14**.

On remarque que le modèle fonctionne relativement bien avec cette cible, du fait que la variation de la vitesse mesurée coïncide à peu près avec celle du modèle. Mais cela n'empêche pas l'existence

**figure 14**

Comparaison entre le modèle et la vitesse de la cible 34 mesurée sur site. L'apport en eau est constitué de pluies et de neiges fondues.

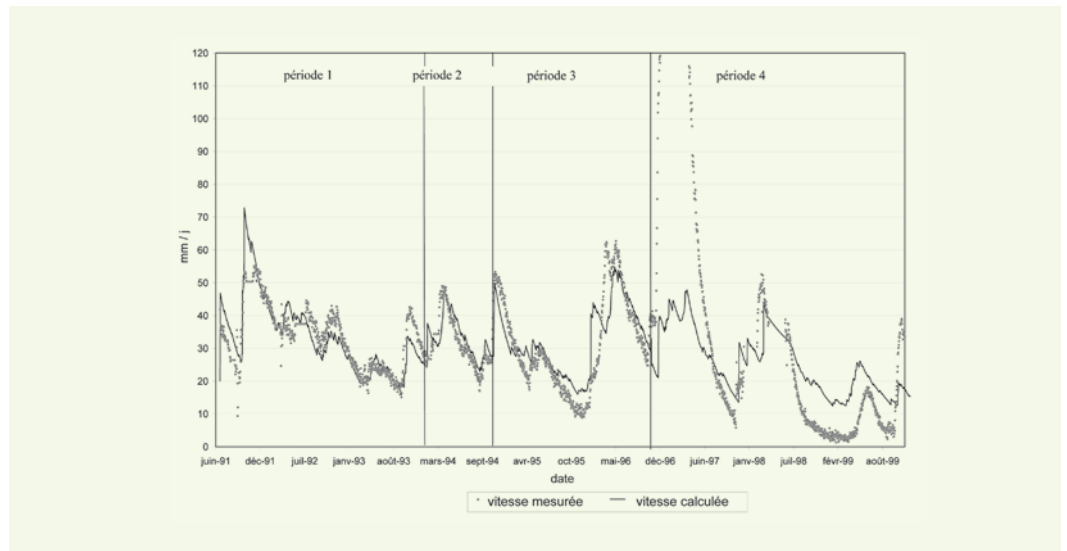
Paramètres du modèle :  
 $h_m = 0,075 \text{ m/j}$ ,  
 $v_r = 50 \text{ m/j}$ ,  $\kappa = 8,65 \text{ m/j}$ ,  
 $\phi = 32 \text{ degrés}$ ,  
 $\mu = 2,27 \cdot 10^{20} \text{ kg/m/j}$ ,  
 $x_s(t=0) = 0,25L$ .



de quelques décalages dans le temps et en amplitudes entre les deux vitesses, surtout après la grande accélération du glissement en février 1997, cette dernière n'étant toujours pas reproduite correctement. Ces décalages sont la conséquence du changement des propriétés mécaniques et hydrauliques après chaque décélération importante de la vitesse. Cependant, on n'observe pas un ralentissement du glissement après février 1995, comme c'était le cas pour la cible 10, ce qui explique qu'un seul jeu de paramètres peut assez bien reproduire l'allure générale de la courbe de vitesse mesurée. Il semblerait donc que, dans cette partie du glissement, les paramètres hydromécaniques n'aient pas réellement changé au cours des sept premières années de l'étude. Malgré tout, pour affiner le modèle et obtenir une meilleure représentation de la variation de la vitesse mesurée, on peut effectuer un calage plus fin en quatre parties. Le résultat de la modélisation, après assemblage, est représenté sur la **figure 15**.

**figure 15**

*Comparaison entre le modèle et la vitesse de la cible 34 mesurée sur site : calage en quatre parties. L'apport en eau est constitué de pluies et de neiges fondues.*



Compartiment 1 :  $h_m = 0,075 \text{ m/j}$ ,  $v_r = 50 \text{ m/j}$ ,  $\kappa = 8,65 \text{ m/j}$ ,  $\phi = 32 \text{ degrés}$ ,  $\mu = 2,27 \cdot 10^{20} \text{ kg/m/j}$ ,  $x_s(t=0) = 0,25L$ .  
 Compartiment 2 :  $h_m = 0,075 \text{ m/j}$ ,  $v_r = 50 \text{ m/j}$ ,  $\kappa = 10,03 \text{ m/j}$ ,  $\phi = 32 \text{ degrés}$ ,  $\mu = 2,17 \cdot 10^{20} \text{ kg/m/j}$ ,  $x_s(t=0) = 0,25L$ .  
 Compartiment 3 :  $h_m = 0,075 \text{ m/j}$ ,  $v_r = 50 \text{ m/j}$ ,  $\kappa = 9,08 \text{ m/j}$ ,  $\phi = 32 \text{ degrés}$ ,  $\mu = 1,71 \cdot 10^{20} \text{ kg/m/j}$ ,  $x_s(t=0) = 0,25L$ .  
 Compartiment 4 :  $h_m = 0,075 \text{ m/j}$ ,  $v_r = 50 \text{ m/j}$ ,  $\kappa = 9,08 \text{ m/j}$ ,  $\phi = 32 \text{ degrés}$ ,  $\mu = 2,58 \cdot 10^{20} \text{ kg/m/j}$ ,  $x_s(t=0) = 0,25L$ .

## CONCLUSION

Ce modèle très simple fournit une représentation du couplage entre les phénomènes hydriques (pluies et neiges fondues) et les déplacements observés sur le glissement. Il repose sur une modélisation simplifiée de la géométrie du glissement, du régime d'infiltration de l'eau dans le massif et du mécanisme du mouvement. Ce modèle doit être considéré comme un modèle schématisé simple qui ne prétend pas reproduire toute la complexité du massif en mouvement. Il peut être comparé au schéma d'un bloc rigide glissant sur une surface frottante qui permet de réaliser des estimations de la stabilité mécanique d'un massif. Par analogie, le modèle développé ici permet d'inclure, de manière très simple, l'effet de l'apport en eau sur la cinétique du glissement d'une masse rigide au cours du temps. Ce modèle pourrait être amélioré sur plusieurs points, par exemple en multipliant les points d'infiltration d'eau ou en faisant varier le paramètre de viscosité en fonction de la quantité d'eau dans le joint.

Cependant, les premiers résultats issus de simulations avec ce modèle paraissent très prometteurs. Il permet surtout de déceler les périodes pendant lesquelles le système hydromécanique du massif est constant et où les variations observées de vitesses résultent uniquement des sollicitations pluviométriques. Les capacités prédictives du modèle permettent ainsi d'anticiper à court terme les mouvements du massif en fonction des précipitations enregistrées. Un écart entre la prédiction et les mouvements observés traduit alors un changement interne du système hydromécanique du massif. Ce sont ces changements internes du massif ainsi identifiés qui doivent faire l'objet d'études plus approfondies par des méthodes appropriées afin de comprendre le mécanisme global de déformation et du mouvement du massif.

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- 1 **COJEAN R.**, Role of water as triggering factor for landslides and debris flow, *Int. Conf. And Field Workshop on Floods*, Trento, Italie, **1994**.
- 2 **COROMINAS J., MOYA J.**, Reconstructing recent landslide activity in relation to rainfall in the Liobregat River basin, Eastern Pyrenees, Spain. *Geomorphology*, **30**, **1999**, pp. 79-93.
- 3 **BHASIN R., GRIMSTAD E., LARSEN J.O., DHAWAN A.K., RAJBAL S., VERMA S.K., VENKATACHALAM K.**, Landslide hazards and mitigation measures at Gantok Sikkim Himalaya. *Engineering Geology*, **64**, **2002**, pp. 351-368.
- 4 **AYONGHE S.N., NTASIN E.B., SAMALANG P., SUH C.E.**, The June 27, 2001 landslide on volcanicones in Limbe, Mount Cameroon, West Africa. *Journal of African Earth Sciences*, **39**, **2004**, pp. 435-439.
- 5 **RAT M.**, The Landslide at La Clapière – Monitoring and prediction of the failure, *Felsbau* 13, **6**, **1995**, pp. 420-424.
- 6 **ALFONSI P.**, Relation entre les paramètres hydrologiques et la vitesse dans les glissements de terrains. Exemples de La Clapière et de Séchillienne (France), *Revue Française de Géotechnique*, **79**, **1997**, pp. 3-12.
- 7 **TULLEN P.**, *Méthodes d'analyse du fonctionnement hydrogéologique des versants instables*, Thèse, École polytechnique fédérale de Lausanne, n° **2622**, **2002**.
- 8 **CHENNOUFI L.**, *L'eau et les glissements de terrains : élaboration d'un modèle de prévision du risque*, Thèse, École Nationale Supérieure des Mines de Paris, **2000**.
- 9 **CAPPA F., GUGLIELMI Y., SOUKATCHOFF V.M., MUDRY J., BERTRAND C., CHARMOILLE A.**, Hydromechanical modelling of a large moving rock slope inferred from slope levelling coupled to spring long-term hydromechanical monitoring : example of the La Clapière landslide (Southern Alps, France), *Journal of Hydrology*, **291**, **2004**, pp. 67-90.
- 10 **FOLLACCI J.P.**, Seize ans de surveillance du glissement de La Clapière (Alpes-Maritimes). *Bulletin des laboratoires des ponts et chaussées*, **220**, **1999**, pp. 35-51.
- 11 **FOLLACCI J.P.**, Les mouvements du versant de La Clapière à Saint-Étienne-de-Tinée (Alpes-Maritimes) *Bulletin des laboratoires des ponts et chaussées*, **150/151**, **1987**, pp. 39-54.
- 12 **DAVID E.**, Glissement de La Clapière – Saint-Étienne-de-Tinée. Étude cinématique, géomorphologique et de stabilité. *Rapport d'activité du LRPC de Nice*, **2000**, 88 pages.
- 13 **COMPAGNON F., GUGLIELMI Y., MUDRY J., FOLLACCI IVALDI J.P.**, Approche chimique et isotopique de l'origine des eaux en transit dans un grand mouvement de terrain : exemple du glissement de La Clapière (Alpes-Maritimes, France). *C. R. Acad. Sci. Paris, Sciences de la Terre et des planètes / Earth and Planetary Sciences*, **325**, **1997**, pp. 565-570.
- 14 **GUGLIELMI Y.**, Hydrogéochimie et hydromécanique du glissement de La Clapière (Alpes-Maritimes, 06), *Rapport d'activité du LRPC de Nice*, **2000**, 80 pages.
- 15 **POUYA A., LÉONARD CH., ALFONSI P.**, Modelling a viscous rock joint activated by rainfall : Application to the La Clapière landslide, *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, **44**, **2007**, pp. 120-129.