

# La Clapière : le plus grand glissement de terrain français est-il encore un risque majeur ?

## Auteurs :

**DURVILLE Jean-Louis**, Ingénieur des Ponts et Chaussées honoraire, ancien du Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (aujourd'hui : IFSTTAR) puis du CETE de Lyon (aujourd'hui : CEREMA).

**PEREZ Jean-Louis**, Docteur en Géologie de l'Université de Nice.

**Patrice MAURIN**, Adjoint au chef du Laboratoire, Laboratoire d'Aix-en-Provence, CEREMA.

17-08-2019



*Le glissement de La Clapière (Alpes-Maritimes) mobilise 50 millions de m<sup>3</sup>. Identifié vers 1980, le phénomène a montré une accélération progressive avec modulations saisonnières marquées. Après un pic de vitesse en 87-88 qui faisait craindre une rupture catastrophique, et a conduit au creusement d'une galerie de dérivation pour la rivière, une décélération s'est manifestée, attribuée à un meilleur drainage dans la masse en mouvement.*

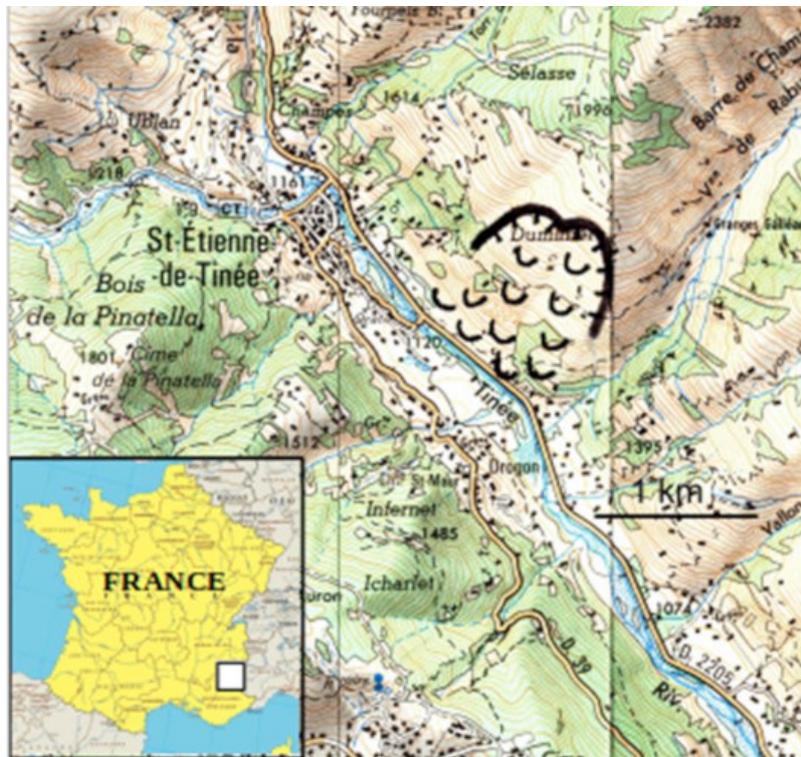


Figure 1. Situation de La Clapière (extrait de la carte IGN).

Le glissement de La Clapière est situé dans les Alpes du Sud (Figure 1), à 80 km au nord de Nice. Il s'est développé en rive gauche de la Tinée, affluent du Var, à moins d'un kilomètre à l'aval du village de Saint-Étienne-de-Tinée. Le glissement s'étage du fond de vallée, à 1100 m d'altitude, jusqu'à 1760 m. La superficie totale du glissement est d'environ 1,2 km<sup>2</sup> et son volume est estimé autour de **50 millions de m<sup>3</sup>** (50 hm<sup>3</sup>). Il y a une quarantaine d'années, des chutes de blocs et des déformations de la route ont attiré l'attention et un phénomène d'instabilité affectant le versant a été décelé. Un suivi des mouvements fut en place fin 1982, par mesures de distance depuis le versant opposé. En 1984 la route a été déviée provisoirement puis, en 1986, de façon définitive sur le versant rive droite de la Tinée.

Une **rupture catastrophique** était attendue à la fin des années 80. Pour parer au risque induit par un barrage de la vallée, un projet de galerie a été étudié, suite à la visite du ministre H. Tazieff en 1988, et réalisé en 1989-1991 sous le versant rive droite de la Tinée. Des zonages interdisant l'accès au pied du glissement et la construction dans la zone d'étalement supposée ont été définis. Un plan de secours a été mis sur pied. Toutefois, dès 1988, une décélération du mouvement s'est manifestée, interrompue par quelques pointes saisonnières, et en 2019 il semble bien que la masse principale se soit stabilisée, après un déplacement cumulé supérieur à une centaine de mètres (voir l'animation Clapiere.avi).

## 1. Un phénomène ancien réactif



Figure 2. Principales zones du glissement de La Clapière (photo 2007) [Source : © J-L Durville]

Le versant est marqué par l'empreinte du glacier de la Tinée qui occupait la vallée : pente forte à la base (40° environ), rupture de pente aux alentours de la cote 1600 m et pente plus douce au-dessus. La gorge de raccordement de l'affluent Rabuons borde au sud-est le glissement (Figure 2). Le glissement possède une couronne divisée en deux lobes (Figure 2) ; son pied, au niveau du fond de vallée, a recouvert progressivement la route et les alluvions en repoussant la Tinée.

Les précipitations annuelles atteignent 990 mm en moyenne à Saint-Étienne-de-Tinée. La partie supérieure du versant, qui monte à 3000 m, est couverte de neige en hiver et au printemps.

## 1.1. Géologie

Le glissement de La Clapière se situe sur la bordure sud-ouest du massif Argentera-Mercantour, au contact du Trias sédimentaire. Il se développe dans un versant constitué de **roches métamorphiques d'âge hercynien**, principalement de gneiss, d'amphibolites et de migmatites : la série d'Anelle, dans laquelle on peut individualiser la formation d'Iglière, épaisse de 80 m et constituée de migmatites massives (Figure 3). La proportion de micas (biotite) est élevée dans certains niveaux de la série d'Anelle, favorisant l'altération.

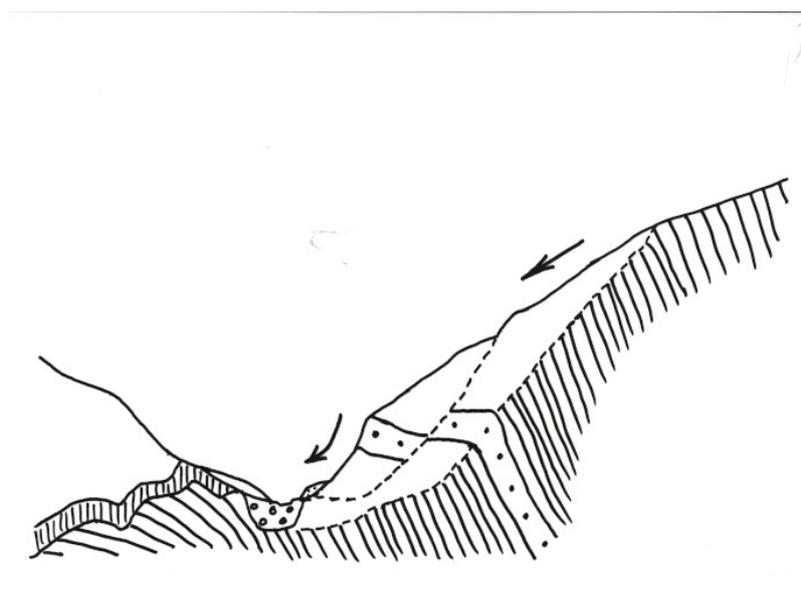


Figure 3. Coupe géologique à travers la vallée de la Tinée. Noter la barre rocheuse d'Iglière et le pendage rentrant. D'après Follacci et al., 1988. ref. [1], [Source : © Felix Darve]

Les principaux traits structuraux sont issus des phases tectoniques hercyniennes et alpines [1]. La foliation hercynienne est de

direction générale parallèle à la vallée de la Tinée, c'est-à-dire nord-ouest/sud-est et son pendage, en profondeur, est de 60-80° vers l'intérieur du massif (Figure 3). Outre la foliation métamorphique, deux directions de discontinuités ont un rôle majeur : N10-N20° et N60-N90°.

La présence de Trias gypseux au pied du glissement, qui serait aujourd'hui masqué par le remplissage alluvial, reste une hypothèse, en l'absence de sondages.

Après le **retrait glaciaire**, daté de 13 000 ans B.P. (Before Present : origine = + 1950) dans la vallée de la Tinée, des formations glacio-alluviales et alluviales ont comblé le fond de vallée sur une épaisseur de plusieurs décamètres.

Du point de vue hydrogéologique, on peut admettre un modèle à deux nappes : l'une, basale, se raccordant à la nappe alluviale de la Tinée et imprégnant le pied du glissement, et l'autre, perchée dans la zone décomprimée des gneiss (quelques décamètres superficiels), alimentant le haut du glissement et en particulier le glissement supérieur.

## 1.2. Historique de la déstabilisation du versant



*Figure 4. La Clapière en 1986. [Source : J-L Durville]*

La datation par cosmonucléides d'escarpements rocheux sur le versant, qui marqueraient les premières manifestations de déstabilisation, fournit un âge de 10 000 ans B.P. , soit environ 3000 ans après la déglaciation. Les premières ruptures correspondant au glissement actuel dateraient de **3600 B.P.** (- 1650 ans).

Sur les photos aériennes de 1938, une amorce d'escarpement sommital est visible, correspondant au lobe nord-ouest du glissement actuel. Dans les années 1950, les deux lobes dessinent un escarpement sommital net tandis que le cône d'éboulis de La Clapière *sensu stricto* s'enrichit de nombreux blocs.

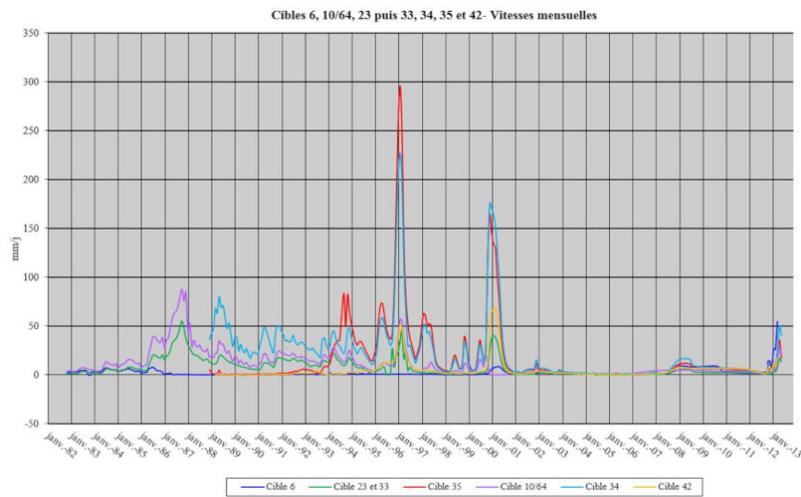


Figure 5. Graphique des vitesses mensuelles (mm/j) de plusieurs cibles. Tachéométrie entre 1982 et 2013. Noter que le pic majeur du glissement principal est fin 1987. [Source : Document © P. Maurin]

C'est vers 1976 que l'activité du cône d'éboulis et les déformations de la route située en pied de versant ont alerté les autorités ; suite à une visite de Jean Goguel sur le site, une note du Laboratoire des Ponts et Chaussées de Nice de 1977 s'interroge sur l'existence d'un mouvement impliquant une bonne partie du versant. Les mesures de distance ont confirmé le mouvement d'ensemble (Figure 4), avec des fluctuations saisonnières marquées, en relation avec les précipitations de pluie ou neige, et une nette tendance à l'accélération (Figure 5).



Figure 6. La Clapière en 2016 On observe une réactivation du lobe NW. [Source : © P.Maurin]

Une nouvelle rupture sous le lobe nord-ouest s'est développée en 1987, régularisant en arc de cercle l'escarpement amont (Figure 2). Lors de l'hiver 87-88, on a atteint des vitesses de 10 cm/j en certains points (Figure 5). Toutefois, le mouvement a subi un ralentissement rapide ensuite.

Une régression importante à l'amont du lobe côté Rabuons s'est manifestée vers 1989, accentuée en 1997, délimitant le **glissement supérieur** (environ 5 hm<sup>3</sup>), lequel s'est avancé progressivement sur le glissement principal (Figure 2).

Le ralentissement, encore marqué par des pointes lors de périodes très humides, notamment dans le glissement supérieur, s'est poursuivi jusqu'à aujourd'hui où les mouvements sont faibles (moins de 20 cm annuels dans le glissement principal depuis 2010 pour la plupart des cibles). Depuis le début des années 2010, on observe des déplacements significatifs du lobe NW, toutefois sans régression vers l'amont.

Après un déplacement cumulé de 100 à 130 m, le glissement est aujourd'hui soumis à l'érosion superficielle, qui dégrade en particulier l'escarpement amont (Figure 6).

## 2. Un glissement observé et mesuré sous toutes les coutures

### 2.1. Les mesures de distance

Un système de **mesures de distance par infra-rouge** depuis le versant opposé est opérationnel depuis 1983 [2]. Les mesures ont été acquises par deux distancemètres, situés à 1 km l'un de l'autre, pendant plusieurs années, puis par un seul appareil. De 30 à 50 cibles sont visées dans le glissement et à sa périphérie.

Les variations d'humidité et de température de l'air dans la vallée perturbent les ondes électromagnétiques. Pour corriger les erreurs qui s'en suivent, des mesures sont effectuées chaque fois sur 3 ou 4 cibles fixes situées sur le pourtour du glissement. Pour des distances variant de 600 à 1800 m, la précision est évaluée entre 3 et 6 mm après correction.

Ajoutons que des mesures géodésiques ont été réalisées une fois par an pour déterminer les vecteurs déplacements 3D.

### 2.2. Les Modèles Numériques de Terrains différentiels

L'exploitation de deux modèles numériques de terrain (MNT) pris à des dates différentes donne une évaluation des variations d'altitude  $Dz$  de la surface en un point  $(x,y)$  donné. Serratrice [4] compare ainsi des MNT de 1970 et de 1997 tirés de photos aériennes : le gonflement (apparent) dans la partie inférieure du glissement et l'affaissement (apparent) dans la partie supérieure sont bien mis en évidence (plusieurs décimètres), mais le bilan de volume montre une variation très faible, inférieure à 1 %.

### 2.3. Les images terrestres et satellitaires

Outre la photo-interprétation multi-dates classique, qui permet de dégager les évolutions importantes dans le glissement [5], une exploitation quantitative des photos aériennes a été effectuée par différents auteurs.

Delacourt *et al.* [6], après rectification des photos aériennes de 1983, 1991 et 1999, estiment les déplacements horizontaux des différents secteurs du glissement ; en particulier, entre les deux dates extrêmes, la barre d'Iglière a progressé de 160 m dans la partie NNW et de 120 m au SSE ; le pied a avancé de 115 m.

La technique de corrélation d'images a été utilisée par Delacourt *et al.* [6] avec des photos aériennes de 1995 et 1999. Les auteurs obtiennent une cartographie des déplacements horizontaux entre ces deux dates.

## 3. Les modèles cinématiques et mécaniques

### 3.1. Les déformations anciennes

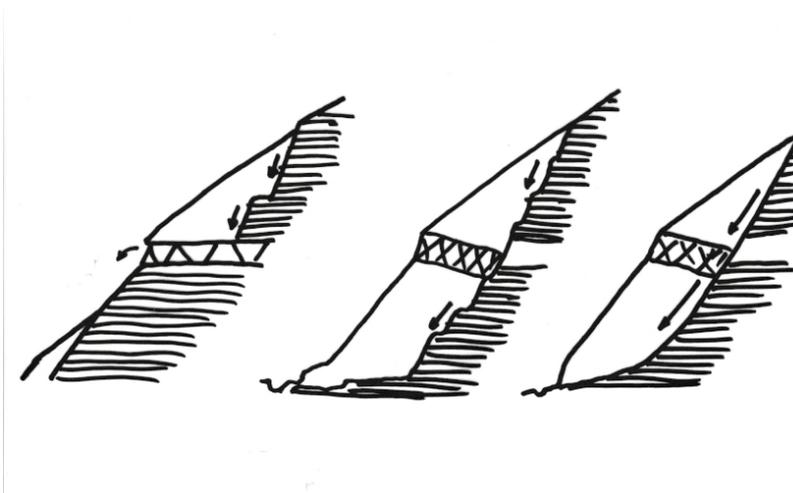


Figure 7. Schéma de développement de la rupture (d'après Follacci, 1999; ref. [2]). [Source : © Felix Darve]

Le versant de La Clapière est constitué de gneiss dont la direction est parallèle à celle de la vallée et dont la foliation présente un fort pendage vers l'intérieur du versant. Cependant on observe que ce pendage se réduit progressivement quand on se rapproche de la surface jusqu'à devenir horizontal, voire renversé, autour de la zone glissée (Figure 3). Ce changement de pendage a été expliqué, soit par un phénomène gravitaire – **fauchage** : les bancs basculeraient sous l'effet de la gravité et du versant – soit par

un plissement d'origine tectonique, les deux phénomènes pouvant se combiner.

La géométrie convexe du versant, laissée par le glacier, est favorable à une déstabilisation de la partie inférieure du versant. Le glacier constituait une butée de pied et sa fonte a engendré un déséquilibre du massif, comme cela a été souvent observé dans les vallées glaciaires. Toutefois, la déstabilisation semble avoir démarré bien après la fonte du glacier de la Tinée. Un facteur climatique et peut-être une dissolution de gypse en pied pourraient avoir favorisé l'amorce des ruptures.

Les observations de terrain et l'interprétation de photos aériennes ont conduit Follacci [3] à un modèle de développement de la rupture, hétérogène dans le temps et dans l'espace. La rupture se développe d'abord dans le lobe SE, affaibli par la présence voisine du vallon de Rabuons. Elle gagne ensuite le lobe NW, au-dessus de la barre d'Iglière et enfin sur toute la hauteur (Figure 7).

C'est seulement vers 1990-1991 que les vitesses des parties supérieure et inférieure ont convergé, indiquant le passage à un glissement rotationnel d'ensemble.

L'image d'une surface de rupture se développant alors en se « lissant » progressivement, telle que proposée par Follacci [2], peut ainsi être retenue (Figure 6). De plus, la barre d'Iglière, constituée de migmatite massive, était une armature pour le versant dont la rupture progressive peut avoir permis l'accélération des années 1980. Il faut avoir à l'esprit que des « aspérités » sur une surface de glissement peuvent avoir typiquement une hauteur de 1 à 2 % de sa longueur dans le sens de la pente, ce qui représente ici plus d'une dizaine de mètres.

### 3.2. La phase récente de glissement : un peu de mécanique

Compte tenu du déplacement cumulé, on peut supposer qu'après 1988 la surface de rupture pseudo-circulaire s'est formée. Nous ne disposons pas de forages dans le glissement mais nous pouvons évaluer la profondeur du glissement à 90 m environ, en utilisant le pendage des vecteurs déplacements le long du versant.

Une analyse à rebours en supposant en équilibre-limite (sans nappe) conduit aux paramètres mécaniques résiduels : cohésion  $c'_r = 0$  et angle de frottement  $\varphi'_r = 32,5^\circ$ .

L'énergie cinétique du glissement ( $\frac{1}{2} MV^2$ ), lors de la crise de 1987-8, était inférieure à 1 Joule, mais la perte d'énergie potentielle quotidienne était d'environ 100 MJ. L'énorme réserve d'énergie potentielle est donc consommée entièrement sous forme de déformation/rupture au sein de la masse en mouvement et de chaleur le long des surfaces de glissement.

Si nous comparons la morphologie de la pente entre 1970 et 1992 (100 m de déplacement, par rapport à une longueur de rupture de 1000 m), la diminution du moment moteur pourrait expliquer, au moins en partie, le ralentissement après le pic de 1987. Mais une cause hydrogéologique peut aussi être invoquée.

## 4. L'importance du facteur hydrogéologique

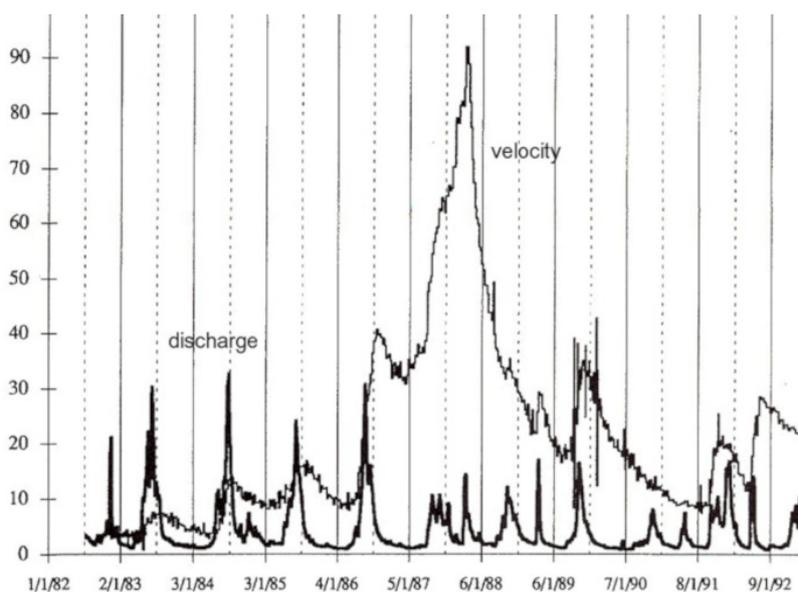


Figure 8. Vitesses en mm par jour de la cible 10 du glissement principal et débit de la rivière Tinée. On observe la bonne corrélation des pics, excepté en 87-88. [Source : Données du CEREMA, graphique de J-L Durville]

Les variations saisonnières de vitesse ont été perceptibles dès les premières années de mesures (Figure 8) et des tentatives de corrélation entre vitesses et précipitations (ou débit de la Tinée) se sont multipliées, à des fins scientifiques comme de surveillance et d'alerte.

Compte tenu de la complexité de l'hydrogéologie dans un massif rocheux tel que celui de La Clapière, le couplage entre l'apport d'eau  $P$  (pluie ou fonte de neige, même si la prise en compte de la fonte des neiges est sans doute imparfaite) et la vitesse du glissement  $V$  a été simulée en utilisant différents types de « boîtes noires » ou grises. Pour mieux rendre compte de la commande  $P \rightarrow V$ , le processus est divisé en une partie hydrogéologique " $P \rightarrow H$ " et une partie mécanique " $H \rightarrow V$ ". Tous les modèles considèrent ainsi un pseudo-niveau piézométrique  $H$  calculé comme la différence entre l'apport d'eau (précipitation  $P$ , ou mieux infiltration  $I$ ) et le drainage. On estime  $H$  au jour  $n+1$  à partir de  $H$  au jour  $n$  et de  $P$  aux jours précédents. La partie mécanique des modèles fait appel à différentes lois reliant de façon simple la vitesse ou l'accélération à la hauteur  $H$ .

Tous ces modèles permettent d'obtenir un bon agrément entre calculs et mesures en ajustant leurs paramètres aux mesures, mais ce calage doit être renouvelé fréquemment. De plus, les modèles se révèlent incapables de prévoir les changements majeurs de comportement du versant, en particulier le pic de vitesse en 1987. Ceci semble confirmer qu'une modification importante du comportement hydro-mécanique est alors intervenue. De même en 2001 ou 2013, les « sursauts » observés (Figure 5) pourraient être expliqués par un colmatage momentané.

Cette faiblesse des modèles rend donc impossible la prévision d'une rupture catastrophique par ce type de méthode ; toutefois, l'intérêt de réaliser une prévision à un horizon de quelques jours subsiste, toute divergence entre prévision et mesure pouvant être l'indice d'un changement de comportement.

De façon plus globale, la **sensibilité du glissement principal aux apports hydriques** peut être évaluée par le rapport du déplacement annuel  $D$  à l'apport annuel  $P$  (Tableau 1). La réduction de  $D/P$  par un facteur 20 à 40 entre 1986/1987 et l'après 2000 est remarquable.

Année	86/87	87/88	93/94	96/97	00/01	01/02	02/03	15/16
D	7,7	12,4	5,1	6,2	6,8	0,6	0,2	0,4
P	0,72	1,05	1,22	1,16	1,61	0,68	0,76	0,75
D/P	10,7	11,8	4,2	5,3	4,2	0,90	0,26	0,53

Tableau 1. Déplacement cumulé (m) et précipitation cumulée (m) sur un an.

L'évolution dans le temps de la commande hydrique peut s'interpréter comme résultant d'un **couplage déformation/perméabilité**. Ainsi la décélération après le pic de 1987-88 (Figure 7) traduirait une assez rapide ouverture de discontinuités, facilitant le drainage. Notons que le pic secondaire de 1996-97 pourrait correspondre, inversement, à une diminution provisoire de la capacité de drainage (colmatage de fractures ?).

## 5. La propagation d'un éboulement

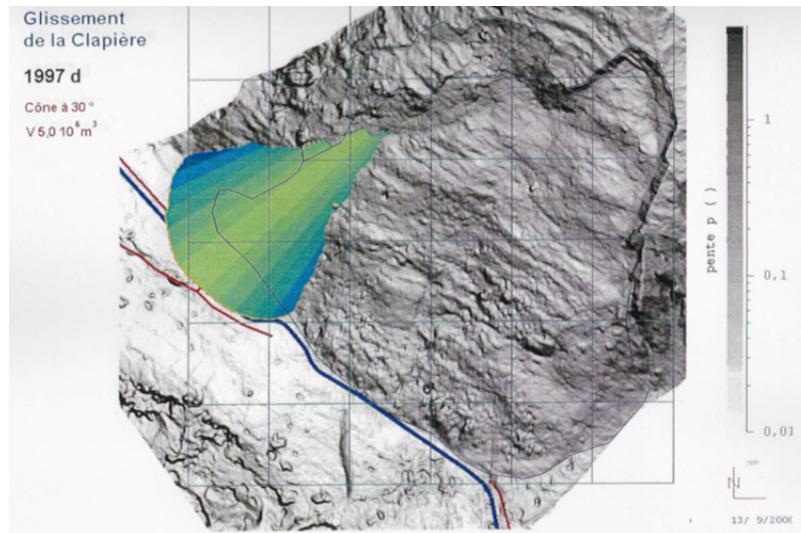


Figure 9. Cône d'éboulis : chute de  $5 \text{ hm}^3$  avec pente à  $30^\circ$  [Source : d'après Serratrice, 2006, ref. [4]]

La question d'une éventuelle bouchure de la vallée s'est posée au milieu des années 80, lors de l'accélération d'un mouvement qui impliquait environ  $50 \text{ hm}^3$ . Plusieurs simulations de propagation et d'étalement des matériaux ont été mises en œuvre, avec différentes approches : milieu continu de fluide visqueux, volumes élémentaires successifs glissant avec frottement, sans négliger des méthodes simples comme la méthode du cône (Figure 9).

## 6. Messages à retenir

En France, La Clapière a été le premier grand mouvement de versant bénéficiant d'une instrumentation de suivi dense et précise, le site de Séchilienne (Isère) étant équipé quelques années plus tard.

Si cette instrumentation a été motivée principalement par une préoccupation de sécurité publique, l'apport scientifique s'est révélé très riche, principalement dans l'analyse de la commande hydrogéologique. Il faut d'ailleurs mentionner qu'en retour, la fiabilité de la surveillance opérationnelle est fiabilisée grâce aux progrès de la compréhension des phénomènes.

L'histoire de La Clapière est aujourd'hui quasi-terminée, la phase véritablement active laissant place aujourd'hui à une période de dégradation lente par érosion – sauf occurrence d'une régression amont importante. Le fait marquant de cette histoire pluri-millénaire est qu'il n'y a pas eu de mouvement catastrophique rapide au final, mobilisant plusieurs dizaines de millions de mètres cubes, événement qui paraissait pourtant très probable en 1987.

Le ralentissement assez brusque de La Clapière fin 1987, et donc **la non-occurrence d'un éboulement catastrophique**, sont attribués à un changement des conditions hydrogéologiques, la déformation cumulée importante ayant favorisé un bon drainage de la masse en mouvement et réduit du même coup l'influence des pressions hydrauliques. A cette cause, relative au couplage entre déformation et hydraulique souterraine, on peut ajouter la réduction du moment moteur due à l'avancée d'ordre hectométrique de la masse glissée, avancée qui se poursuit encore aujourd'hui, quoique très ralentie.

## Notes et références

**Photo de couverture.** [Source : © J-L Durville]

[1] Follacci J.P., Guardia P. Ivlandi J.P. (1988). Le glissement de La Clapière (Alpes-Maritimes) dans son cadre géodynamique. Symposium international sur les glissements de terrain, Lausanne.

[2] Follacci, J.-P. (1999). Seize ans de surveillance du glissement de La Clapière (Alpes-Maritimes). Bull. Labo. Ponts et Chaussées, 220: 35-51.

[3] Follacci J.P. (1987) Les mouvements du versant de La Clapière à Saint Etienne de Tinée (Alpes Maritimes). Bulletin de

[4] Serratrice, J.-F. (2006). Modélisation des grands éboulements rocheux par épandage. Application aux sites de La Clapière (Alpes-Maritimes) et de Séchilienne (Isère). Bull. Labo. Ponts et Chaussées, 263-264: 53-69.

[5] Potherat P. (1994). Photo-interprétation du glissement de la Clapière – Analyse structurale cinématique du mouvement de 1955 à 1992. 7<sup>th</sup> International IAEG Congress Paris.

[6] Delacourt C., Allemand P., Casson B., Vadon H. (2004). Velocity field of the "La Clapière" landslide measured by the correlation of aerial and Quickbird satellite images. Geophys. Res. Lett., 31, L15619, doi : 10.1029/2004GL020193.

---

L'Encyclopédie de l'environnement est publiée par l'Université Grenoble Alpes - [www.univ-grenoble-alpes.fr](http://www.univ-grenoble-alpes.fr)

Pour citer cet article: **Auteurs** : DURVILLE Jean-Louis - PEREZ Jean-Louis - Patrice MAURIN (2019), La Clapière : le plus grand glissement de terrain français est-il encore un risque majeur ?, Encyclopédie de l'Environnement, [en ligne ISSN 2555-0950] url : <http://www.encyclopedie-environnement.org/?p=9530>

Les articles de l'Encyclopédie de l'environnement sont mis à disposition selon les termes de la licence Creative Commons Attribution - Pas d'Utilisation Commerciale - Pas de Modification 4.0 International.

---