

**LE MOUVEMENT DE VERSANT
DE LA “CLAPIERE”
Vallée de la Tinée**



Vue générale du glissement de la Clapière (1995).



Fig. 1. Plan de situation (extrait de la Carte IGN au 1/150.000). Dans la haute vallée de la Tinée, en bordure du massif cristallin externe de l'Argentera-Mercantour, le glissement de la Clapière affecte une centaine d'hectares au pied du versant français de la crête frontalière avec l'Italie.

INTRODUCTION

Dans les Alpes-maritimes françaises (figure 1), immédiatement en aval d'un village de 1800 habitants, le glissement de la Clapière mobilise cinquante millions de mètres cube sur une centaine d'hectares et sur 650 mètres de dénivelée, avec des vitesses annuelles plurimétriques à décimétriques.

Ayant de longue date préoccupé les autorités en charge de la sécurité publique, il fait l'objet d'une stratégie de protection qui a comporté d'importants travaux préventifs mais pas d'investigations lourdes du site. Par contre, il supporte depuis 1982 des instrumentations et observations qui offrent une mine de données comportementales.

I. HISTORIQUE

L'étude historique, réalisée sans le concours d'un historien professionnel, a consisté en :

- des recherches en archives,
- une collecte iconographique,
- une enquête auprès de la population et notamment des anciens.

Retrouvé dans les Alpes de haute Provence, un cadastre du XV^e siècle mentionne déjà un lieu-dit «Clapiera» à l'emplacement actuel du glissement, témoignant ainsi de l'ancienneté sinon de la permanence des chutes de blocs sur ce site.

Un mémoire (le rapport de 1752 de l'intendant général G. Joanini pour l'administration piémontaise) signale le barrage de la vallée par un éboulement en 1711 avec retenue d'un lac qui persistait en 1752 lors de la rédaction du rapport. Il y a lieu de penser que ce sont en fait les déjections du torrent de l'Apillier, face au glissement, qui étaient à l'origine du barrage.

L'iconographie retrouvée concernant le versant de la Clapière est pauvre et le premier document objectif est une photographie de 1938 qui montre que le glissement était déjà déclenché, traduit par un escarpement décimétrique au-dessus du lobe Sud-Est et par des déformations à l'emplacement du lobe Nord-Ouest.

La très grande majorité des Stéphanois que nous avons interrogés ont affirmé avoir toujours eux-mêmes connu ou entendu mentionner par leur parents l'existence d'un escarpement continu à hauteur du sommet du glissement et on peut donc considérer que cet escarpement avait commencé à se constituer avant le début du siècle.

Des constatations sur les positions relatives de blocs et de granges anciennes confirment l'ancienneté de certains des éboulements.

Pour les périodes antéhistoriques, on n'a évidemment pas d'information sur l'âge du basculement qui a préparé le glissement *s.s.* (cf. ci-des-

sous) et qui est probablement lié aux influences glaciaires.

On peut dater de la dernière déglaciation (moins 8 000 ans) des désordres qui ont affecté, face au glissement, le Trias de la rive droite et ont laissé des traces dans la morphologie du versant. Outre des blocs géants enchâssés dans le piémont fluvio-glaciaire, on a trouvé au niveau actuel de la rivière des bois de cette âge dans des cavités de dissolution du gypse, qui témoignent d'un abaissement du niveau de base.

2. DOCUMENTS DISPONIBLES

Le glissement ayant été observé, étudié, puis surveillé, principalement par le LPC (laboratoire des ponts et chaussées) de Nice depuis 1970, les documents disponibles sont nombreux et seuls les plus importants seront cités.

2.1. Plans et cartes topographiques

Carte IGN au 1/25 000 (levé 1952 et mises à jour ultérieures).

Restitutions de la zone du glissement au 1/1000 en 1978, au 1/2000 en 1982, 1987 et 1989.

Restitution de l'ensemble du secteur (1800 hectares environ) au 1/5000 débordant le glissement, réalisée en 1990, mise à jour en 1994 et destinée aux interventions de crise ou après-crise.

Pour mémoire, plans du seul fond de vallée au 1/1000 en 1977 et au 1/2000 en 1988.

2.2. Photographies aériennes

Couvertures générales

A petite échelle à partir de 1948.

Prises de vues spéciales à grande échelle (>1/10 000)

Principalement en 1970, 1978, 1982, 1985, 1987, 1989, 1990, 1992 et 1994.

2.3. Modèles numériques de terrain

Modèles à la maille de 2 mètres des topographies 1970, 1987, 1989 et 1994 couvrant toute la surface mobilisée.

2.4. Photographies terrestres

Premiers clichés couvrant le secteur en 1938 par le service R.T.M.

Photographies systématiques depuis le même point de vue à partir de 1976, annuellement au moins à partir de 1984.

2.5. Principaux rapports techniques d'ordre opérationnel

- *Désordres de la Clapière à Saint-Etienne-de-Tinée - Avis géologique - LPC - Octobre 1977.*

– Carte Zermos des zones exposées à des risques liés aux mouvements du sol et du sous-sol de la région de Saint-Etienne-de-Tinée au 1/25.000 - 1979.

– Glissement de terrain de la Clapière - Saint-Etienne-de-Tinée - Rapport du Comité National d'Evaluation des Risques de Mouvements de Terrain remis au Délégué aux risques majeurs - Décembre 1984.

– Glissement de terrain à Saint-Etienne-de-Tinée - Visite de Monsieur Haroun Tazieff, secrétaire d'état à la prévention des risques majeurs - Août 1985.

– Désordres de la Clapière - Déviation du CD 2205 - Analyse de propagation - LPC - Février 1986.

– Surveillance du glissement de la Clapière - Avis sur le zonage des risques dans la vallée - LPC - Mars 1988.

– Glissement de la Clapière à Saint-Etienne-de-Tinée - Barry Voight - Mai 1988.

– Glissement de la Clapière - Analyse des conséquences possibles et des moyens à mettre en œuvre - LPC et BRGM - Février 1988.

– Amélioration de la surveillance du glissement de la Clapière - Compte rendu de l'installation et de la mise en œuvre de l'instrumentation complémentaire - LPC - Septembre 1992.

– Surveillance du glissement de la Clapière - Avis complémentaire sur le zonage des risques dans la vallée - LPC - Mai 1993.

– Glissement de la Clapière - Synthèse des connaissances et actualisation des risques - LPC pour la Délégation aux risques majeurs - Mai 1993.

– Glissement de la Clapière - Système de surveillance - LPC pour la Délégation aux risques majeurs - Novembre 1993.

– Mission du Conseil général des ponts et chaussées sur le glissement de la Clapière - Rapport du groupe d'experts n. 93-142 - Juillet 1994.

2.6. Comptes-rendus de suivi et de surveillance

– Comptes-rendus périodiques sur les résultats du suivi topométrique de 1982 à 1989.

– Comptes-rendus trimestriels sommaires sur les données brutes de la surveillance à partir de Juillet 1989.

2.7. Principaux rapports de recherche et travaux universitaires

VIBERT C., *Apport de l'auscultation de versants instables à l'analyse de leur comportement: les glissements de Lax le Roustit (Aveyron) et Saint-Etienne-de-Tinée (Alpes-Maritimes)*, Janvier 1987.

BOUCHELAGE M. A., *Le glissement de terrain de Saint-Etienne-de-Tinée: une étude de la corrélation données hydrologiques-cinématique du mouvement*, Juillet 1987.

FOLLACCI J.-P., *Mouvements du versant de la Clapière - Rapport de synthèse*, Mars 1988.

LOCAT J., *Analyse de la mobilité du bloc supérieur, glissement de la Clapière, Alpes-Maritimes, France, à l'aide du modèle glissement-consolidation*, Juin 1989.

SERRATRICE J.-F., *Bilan de volume du glissement de la Clapière d'après des modèles numériques de terrain de 1970, 1987 et 1989*, Janvier 1990.

GERVREAU E., *Etude de l'évolution des versants naturels en mouvement: prévoir, alerter*, Février 1991.

GIRAULT F., *Auscultation de versants instables par imagerie numérique*, Juin 1992.

DIDIER F., *Calcul des coordonnées Lambert des cibles à partir de mesures automatiques - Etude des contraintes et réalisation du protocole de traitement des données*, Février 1994.

DURVILLE J.-L., *Chronique d'une chute annoncée: la fin de la cible cinq à la Clapière*, Mai 1994.

POUGET P., *Comportement des pentes instables: exploitation des données de suivi. Site de la Clapière - Corrélation entre différents paramètres climatologiques et déplacements*, Juin 1994.

ALFONSI P., *Comportement des pentes instables: exploitation des données de suivi. Site de la Clapière - Etude d'un modèle analogique: influence des précipitations sur la vitesse du glissement*, Décembre 1994.

SERRATRICE J.-F., *Bilan de volume du glissement de la Clapière - Modèles numériques de terrain de 1970, 1989 et 1994*, Février 1995.

3. CONTEXTE GEOLOGIQUE

3.1. Contexte géologique régional

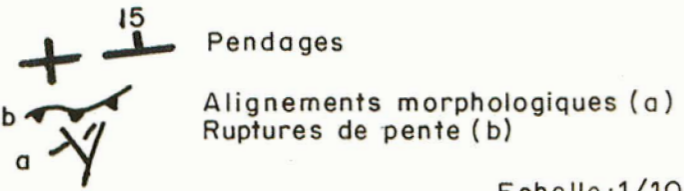
Lithologie

La Tinée sépare le massif cristallin externe de l'Argentera-Mercantour (rive gauche) de sa couverture mésozoïque (rive droite).

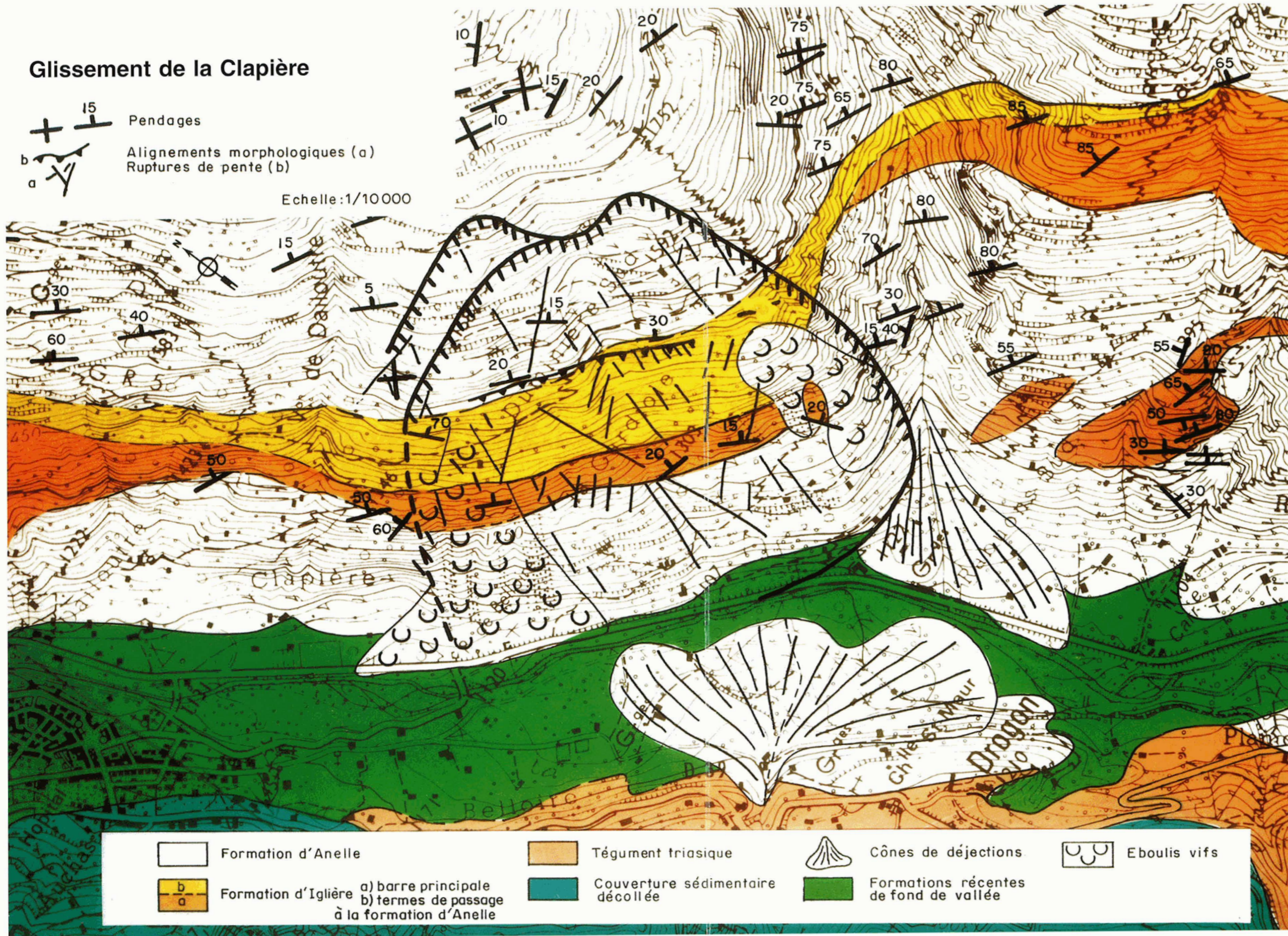
En bordure Sud du massif, gisent des formations de gneiss migmatitiques plus ou moins micacés qui doivent l'essentiel de leurs faciès et de leur foliation au métamorphisme hercynien avec des résistances mécaniques, une anisotropie et une altérabilité qui sont fonctions de leur proportion en micas. Celle-ci est minimale dans la série d'Iglière avec une roche dure et massive, une faible anisotropie et une maille de discontinuités lâche.

Plus hétérogène, la série d'Annelle est composée de faciès moins résistants, avec des proportions de micas supérieures mais variables, localement très élevées (gneiss surmicacés), lui conférant une importante anisotropie et une sensibilité à l'altération. Ces roches ont été faiblement affectées par le métamorphisme alpin, avec développement de

Glissement de la Clapière



Echelle: 1/10000



	Formation d'Anelle		Tégument triasique		Cônes de déjections		Eboulis vifs
	Formation d'Iglière a) barre principale b) termes de passage à la formation d'Anelle		Couverture sédimentaire décollée		Formations récentes de fond de vallée		

Carte géologique et géomorphologique schématique.

A l'interfleuve entre deux vallées glaciaires, le glissement de développe dans des migmatites hercyniennes à foliation orientées parallèlement à l'axe de la vallée principale.

A mi-pente, la formation d'Iglière formée de gneiss massifs constitue une armature rigide plus résistante que la formation d'Annelle encaissante de faciès plus feuilletés.

A l'échelle du glissement, la fracturation subverticale selon des directions N 20° et N 60° E s'exprime mieux que les accidents majeurs, décrochements parallèles à la vallée.

quelques minéraux spécifiques et de schistosités souvent difficiles à distinguer des foliations.

Géodynamique interne

Les foliations ont été redressées à la verticale dans une direction NW-SE, puis déversées sur le versant français vers l'axe du massif, soit vers le Nord Est, et enfin localement déformées par des virgations senestres.

La fracturation, induite par un raccourcissement Nord Est, s'organise autour de trois familles majeures:

- décrochantes dextres N-140°-E,
- verticales senestres conjuguées subméridiennes,
- normales autour de N-60°-E.

Bien que la sismicité du secteur apparaisse modeste comparativement à celle de la bordure Nord du massif, des indices révèlent d'une persistance de l'activité tectonique après les glaciations avec notamment :

- une surrection continue et probablement différentielle de l'axe du massif,
- des serrages générateurs, selon les accidents, d'extensions ou de jeux inverses pouvant pincer des lambeaux triasiques.

Géodynamique externe

Les traces des dernières phases glaciaires sont inscrites dans la morphologie.

Le glacier principal a modelé la vallée de la Tinée avec une pente de 40 à 45° jusqu'à 250 mètres de hauteur par rapport au lit actuel. Il a laissé peu de vestiges, plus probablement fluvio-glaciaires que morainiques : des graves polygéniques en pied de versant ainsi que, surtout rive droite, en placages à mi-pente qui semblent jalonner un ancien tracé plus méridional.

Des glaciers affluents issus de cirques creusés vers 2500 mètres ont creusé des vallées sur la rive gauche avec gradins de confluence à + 400 mètres.

On n'a pas recherché d'éléments sur la paléoclimatologie postglaciaire; on sait seulement que poussait des genévriers dont on a retrouvé un tronç daté de 8000 ans.

L'érosion a été et reste violente sur les versants de la couverture triasique avec de méga écroulements et effondrements et la constitution de cônes de déjections emboîtés ayant provoqué des embâcles de la Tinée.

L'alluvionnement, très grossier, est abondant : plus de 60 mètres d'épaisseur au droit du glissement.

L'anisotropie «en direction», le fort pendage et la pente ont favorisé des basculements des têtes de couches à toutes les échelles, métriques à hectométriques, qui évoluent parfois jusqu'à constituer un manteau de roches désagrégées.

Ces basculements, comme la présence de ban-

des de mylonites dans les accidents décrochants ont favorisé la formation d'une morphologie en terrasses, parfois en contre-pente et d'escarpements à regard amont.

Ils ont dû aussi favoriser l'infiltration des eaux météoriques et, avec elle, l'altération des roches en profondeur. Cette dernière se traduit en surface par des oxydations mais n'a pas fait l'objet d'étude minéralogique approfondie.

Des éluvions peu épaisses empâtent la partie haute du versant, où la pente de 25° a limité l'ablation ; elles sont souvent le siège de ravinements régressifs amorcés par des ruissellements hypodermiques qui évoluent en constituant des vallons temporaires frustes entre les vallons glaciaires affluents.

Les pierriers d'éboulis actifs sont très abondants dans les parties amont de ces derniers, plus localisés sur les flancs de la vallée principale.

3.2. Description de la zone en mouvement

(Voir la Carte annexe dans le texte)

Géomorphologie

Le glissement est étagé entre 1100 et 1800 mètres en pied d'un versant qui culmine à 3000 mètres (figure 2).

Il affecte l'interfleuve entre la vallée de la Tinée et le vallon glaciaire de Rabuons. Deux vallons postglaciaires frustes et sans écoulement l'incisent faiblement, mais sans ravinement, contrairement à ce qui s'observe latéralement.

Le découpage structural est bien inscrit, avec notamment des linéaments N-20°-E en moyenne, dont deux principaux divisent le glissement en trois compartiments assez contrastés. D'autres linéaments entre N-40°-E et N-60°-E et entre N-120°-E et N-160°-E sont aussi fréquents, plus sensibles dans l'aire du glissement qu'alentour.

En amont de l'épaule à 250 mètres environ, des replats ou terrasses, parfois en contre-pente, alternent avec des corniches frangées de pierriers actifs. Avant 1988, les deux principaux pierriers couvraient la partie basse du compartiment Nord-Ouest (clapière sensu stricto) et l'arrêt interfleuve Tinée-Rabuons.

L'escarpement sommital penté à 50° en moyenne s'allongeait sur 650 mètres entre 1550 et 1735 mètres en dessinant deux lobes dont celui du Nord-Ouest qui s'amortit progressivement jusqu'à disparaître.

Depuis 1988, au delà de l'accroissement généralisé de la fracturation, des éboulements et de la désorganisation tendant à une certaine homogénéisation des faciès morphologiques, l'évolution morphodynamique a été importante et significative.

Une fissure amorcée en 1986 dans le lobe Nord-Ouest atteint une hauteur de 50 mètres, tradui-



Fig. 2. Photographies. Entre 1976 et 1994, le glissement a entraîné un affaissement aisément discernable et des éboulements superficiels. Apparaissent également sur la photographie de 1976 :
 – le talus provoqué par le différentiel de mouvement après ralentissement de la partie supérieure du lobe N-W (partie gauche),
 – le glissement supérieur en deux parties déclenché par régression en amont du talus sommital du lobe S-E (partie droite).

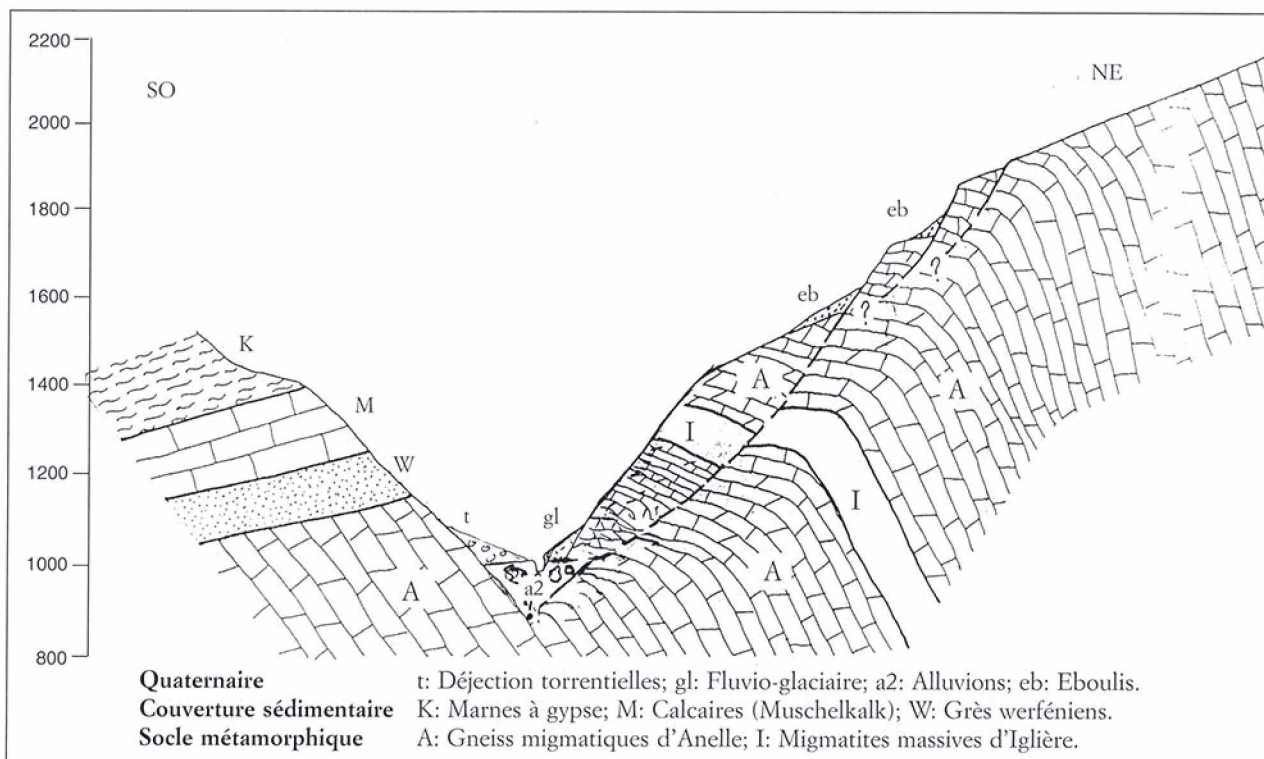


Fig. 3. Coupe géologique schématique. Le glissement affecte un secteur où les foliations des migmatites normalement fortement inclinées vers l'intérieur du massif ont été préalablement (lors du retrait des glaciers?) basculées à l'horizontale.

sant le blocage de la partie supérieure de ce lobe. L'escarpement sommital n'ayant pratiquement plus évolué en amont, elle constitue la limite actuellement majeure du glissement principal dans ce secteur.

Une régression s'est produite, au dessus du lobe Sud-Est, à partir de l'été 1988. Une première fissure, avec un rejet de 1,75 m en moyenne, continue sur 500 mètres, s'est d'abord ouverte. Tangentant l'ancien escarpement sommital, elle s'oriente d'abord à Nord-20°-Est entre 1700 et 1780 mètres puis se développe horizontalement à Nord-140°-Est et s'interrompt brutalement en amont du promontoire central, l'ancienne jonction entre les deux lobes. Cette fissure n'a pratiquement plus évolué jusqu'au deuxième semestre 1992 depuis lequel elle se réactive lentement.

Par contre, à l'intérieur du glissement supérieur qu'elle délimite, une autre fissure s'est ouverte dès janvier 1989, le séparant en une partie amont et une partie aval. La partie aval a immédiatement accéléré tandis que la partie amont se stabilisait pratiquement : un talus s'est constitué entre les deux dont la hauteur ne cesse de s'accroître et atteint actuellement 80 mètres.

Le pied de versant progresse. La route rive gauche a disparu complètement au droit du compartiment central dit «des trois granges» et s'est déformée, dans les zones de part et d'autre où elle était antérieurement épargnée. La rivière a été progressivement repoussée et étranglée jusqu'à ce que la crue (55 mètres cubes par seconde) de septembre 1991 élargisse son lit par érosion de la rive droite détruisant une déviation routière construite en 1985.

La trace de la partie basse de la rupture du glissement principal apparaît clairement sauf au droit du compartiment des trois granges où elle semble proche de la surface des alluvions. Latéralement, elle s'inscrit nettement, au-dessus du pied de versant, dans la déchirure du piémont fluvio-glaciaire au Sud-Est et dans une déformation croissante en arc de cercle du glacis d'éboulis au Nord-Ouest.

En sus de l'engraissement des pierriers principaux (particulièrement de celui de l'interfluve Tinée-Rabuons pendant l'été 1990), des éboulements et des glissements élémentaires engageant plusieurs milliers de mètres cubes affectent la surface du glissement principal, jalonnant souvent les accidents principaux, tel le glissement de novembre 1992, en pied de l'accident de bordure Sud-Est du compartiment des trois granges. Ce dernier, qui se situe sur une des seules zones d'émergence temporaire d'eau souterraine, s'inscrit sur une série de désordres qui depuis 1988 circonscrivent sous l'épaulement une zone convexe d'environ 7 hectares évoquant l'amorce d'un glissement élémentaire d'envergure, emboîté dans le glissement principal.

Des replats relatifs se sont constitués dans la partie supérieure de la partie Sud-Est, sous l'ancien escarpement sommital, et, dans la partie inférieure, sous la barre d'Iglière.

Un dernier trait majeur de l'évolution morphologique récente est l'individualisation de plus en plus nette par le jeu des accidents d'une zone grossièrement triangulaire entre la limite latérale Nord-Ouest du glissement principal et l'accident de bordure Nord-Ouest du compartiment des trois granges, confortant l'hypothèse de l'existence d'un «dièdre Belloire». Au sein de ce dièdre, les mouvements relatifs entre le sommet de la barre d'Iglière et les gneiss sus-jacents, qui s'observaient avant 1986 ont cessé. D'autres, conformes à la foliation, s'amorcent dans les gneiss sous-jacents depuis 1992.

Lithologie

Hormis les formations superficielles (éluvions en amont de l'épaulement, liseré fluvio-glaciaire du piémont, éboulis disséminés ou organisés en pierriers et alluvions) qui restent marginales, le phénomène implique des gneiss des séries d'Annelle et d'Iglière.

La série d'Iglière constitue une barre principale de 80 mètres à hauteur de l'épaulement et trois barres décamétriques supérieures de métadiorite faiblement anisotrope, avec une maille de discontinuités plurimétrique et formant saillies au sein de la série d'Annelle.

Celle-ci est composite avec un faciès type de gneiss migmatitiques mais aussi des passées de «granite» fin orienté, de quartzites, de quartzo-leptynites, d'amphibolites, de «leptyno-amphibolites» et de gneiss surmicacés.

A titre indicatif, des essais mécaniques ont été réalisés pour approcher les résistances **matricielles** de ces roches (en parallèle avec l'étude des microfaciès sur les mêmes éprouvettes). Les résistances relativement modestes par rapport à l'aspect macroscopique peuvent, en partie, s'expliquer par la mylonitisation assez générale observable en lame mince.

Orientation de la contrainte par foliation		Normale	Parallèle	Oblique
Annelle	Rc (MPa)	58,7	46,9	23,8
	Rt (MPa)	8,7	4,4	5,0
Iglière	Rc (MPa)	110,6	82,5	74,2
	Rt (MPa)	11,7		6,8

Il a paru intéressant de rechercher les caractéristiques mécaniques des faciès broyés susceptibles d'occuper les surfaces de rupture majeures

après des déplacements relatifs décimétriques de leurs épontes. On a étudié :

– les fines de lessivage que produisent en abondance les versants gneissiques et qui garnissent très rapidement les interstices fissuraux et les vides des éboulis,

– les produits d'un broyage au laboratoire de fragments de faciès d'Iglière et d'Annelles dans une proportion analogue à leur proportion sur une génératrice du glissement. Ces derniers sont moins résistants ($c' = 29,8$ kPa contre 32,7) et moins frotants ($\phi' = 28,9^\circ$ contre 30,6) que les fines de lessivage dans lesquels une partie des micas a été éliminée.

Données structurales et géomécaniques

Deux facteurs structuraux semblent avoir joué un rôle essentiel dans le déclenchement du glissement :

- le basculement préalable,
- les lacunes de la barre d'Iglière.

Autour du glissement, les foliations, normalement fortement inclinées vers le N-E (amont-pendage), sont généralement subhorizontales. Ce phénomène est attribué à un basculement de versant à grande échelle tardi-glaciaire et a pu favoriser le glissement par réduction des résistances mécaniques (cisaillement des interlits micacés et traction dans les strates rigides), ouverture de joints conduisant les eaux et l'altération et, surtout, en favorisant les mouvements à composante transversale (figure 3).

L'armature du versant constituée par la barre d'Iglière présente, en affleurement, des solutions de continuité précisément aux limites latérales du glissement, probablement initialisées par la migmatite, peut-être accusées par la tectonique.

La fracturation locale, comprend trois familles majeures d'accidents (dextres N-140°-E, verticaux senestres conjugués subméridiens et normaux autour de N-60°-E). Ce réseau est conforme au modèle d'une zone de décrochements selon une direction majeure N-140-160°-Est induite par un raccourcissement orienté de N-20-25°-E à N-40-45°-E.

Le jeu des discontinuités en fonction de la topographie locale (interfluve convexe entre vallées à N-140°-E et N-40°-Est) est accusé par les mouvements gravitaires et réciproquement. Les directions subméridiennes étaient initialement morphologiquement prépondérantes dans la morphologie (et vraisemblablement l'hydrogéologie) de la zone des désordres actifs avec des décalages décimétriques dextres et peut-être tendance à l'ouverture en traction (fractures T) sous l'effet des contraintes récentes et/ou actuelles. Actuellement l'amplitude des déplacements accuse de mieux en mieux l'importance des directions N-60°-E.

La néotectonique, avec la permanence de la surrection, a pu jouer un rôle, sinon dans le glis-

sement, du moins dans le basculement qui l'a préparé.

Les orientations localement sécantes de la foliation hercynienne et de la schistosité alpine sous l'effet d'une virgation tardi-hercynienne ont pu réduire les résistances en déterminant le débit de la roche «en poissons» qui s'observe en rive droite du vallon de Rabuons.

4. CLIMATOLOGIE ET HYDROGÉOLOGIE

4.1. Conditions d'alimentation

Pluviométrie

Entre 1100 et 3000 mètres, les précipitations sont pluvio-nivales (figure 4). Les données issues du pluviographe installé en fond de vallée à moins d'un kilomètre du glissement, si elles sont fiables concernant les quantités, sont à considérer avec circonspection quand à leur date d'effet sur l'infiltration : celle-ci peut être différée entre novembre et mai quand l'eau reste pro parte stockée sous forme de neige sur le versant.

La pluviométrie moyenne de 1982 à 1992 a été de 936 millimètres par an.

De 1982 à 1989 les périodes modérément déficitaires et modérément excédentaires en pluie ont alterné (figure 5). Le déficit s'est creusé fin 1989 et surtout en 1990. Le retour à l'excédent s'est réalisé de 1991 à 1994 mais avec une alternance saisonnière très marquée et des pluies souvent concentrées sur des périodes courtes (près de 500 mm en 30 jours à l'automne 1991 572 mm en 63 jours à l'automne 1994). Le régime saisonnier est en effet sensible, avec des maxima au printemps et, certaines années, en automne.

Nivométrie

La nivométrie indispensable pour raisonner au plan temporel sur l'infiltration. On dispose de deux nivomètres (enregistreurs et non totalisateurs) installés en 1983 à 2500 mètres et en 1990 à 1800 mètres.

L'enneigement à 2500 mètres diffère naturellement de celui à 1880 mètres (figure 6). Sur 10 cycles de mesure, la moyenne a été de 810 millimètres (lame d'eau équivalente) avec des écarts importants, de 495 mm (1989-1990) à 1136 mm (1983-1984). Après trois cycles excédentaires (1983-1984 à 1985-1986), l'enneigement a été fortement déficitaire avec seulement deux cycles excédentaires (1990-1991 et 1992-1993) en 7 ans. À l'altitude de 2500 mètres, l'isotherme 0° C remonte rarement en hiver, la neige se conserve, le stock s'accroît jusqu'au printemps (au cours duquel les chutes sont souvent abondantes) puis il fond en bloc. La fusion est souvent d'autant plus rapide qu'elle est tardive. Les volumes d'eau libérés ain-

Fig. 4. Pluie, neige et débits annuels. Depuis le début de la surveillance en 1982, les années 1988, 1989 et 1990 ont été les plus sèches. L'enneigement a été particulièrement réduit en 1990.

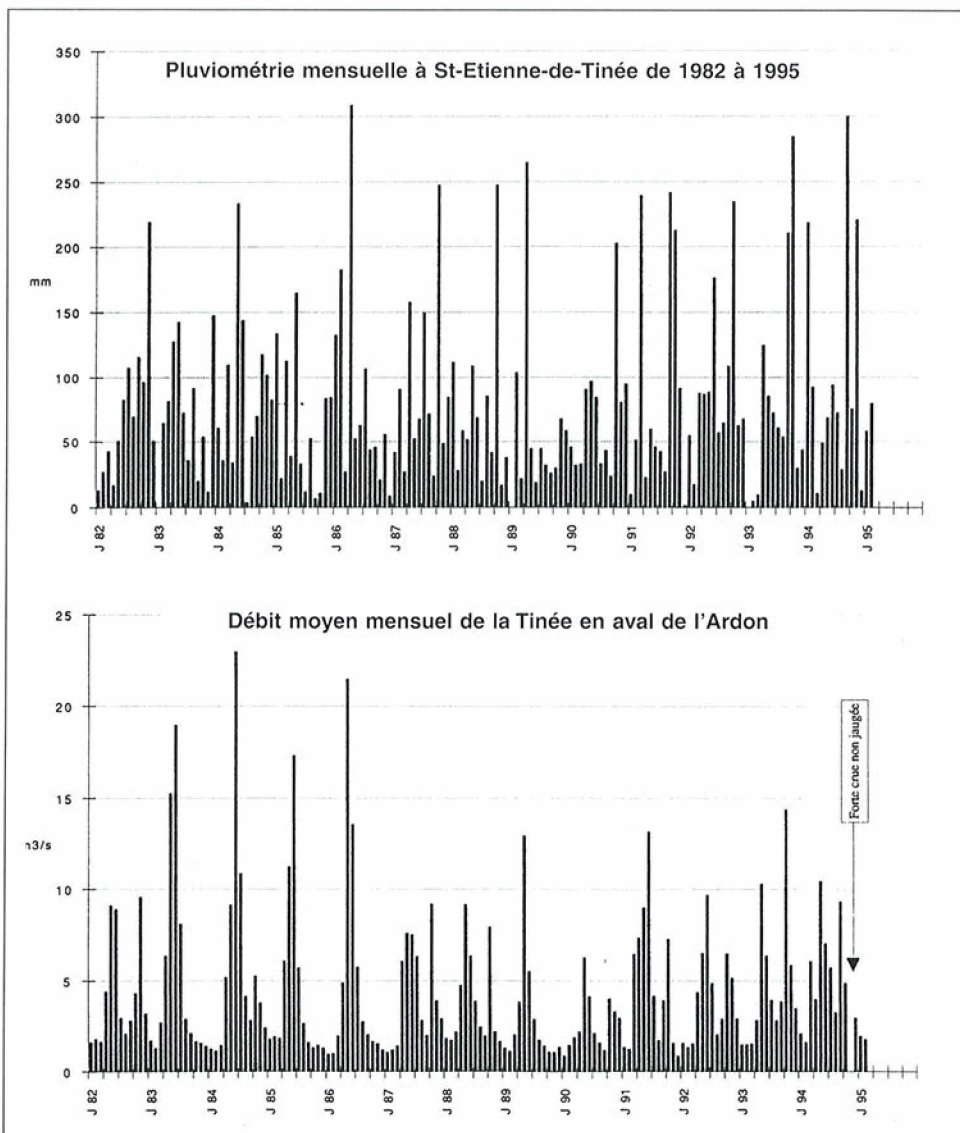
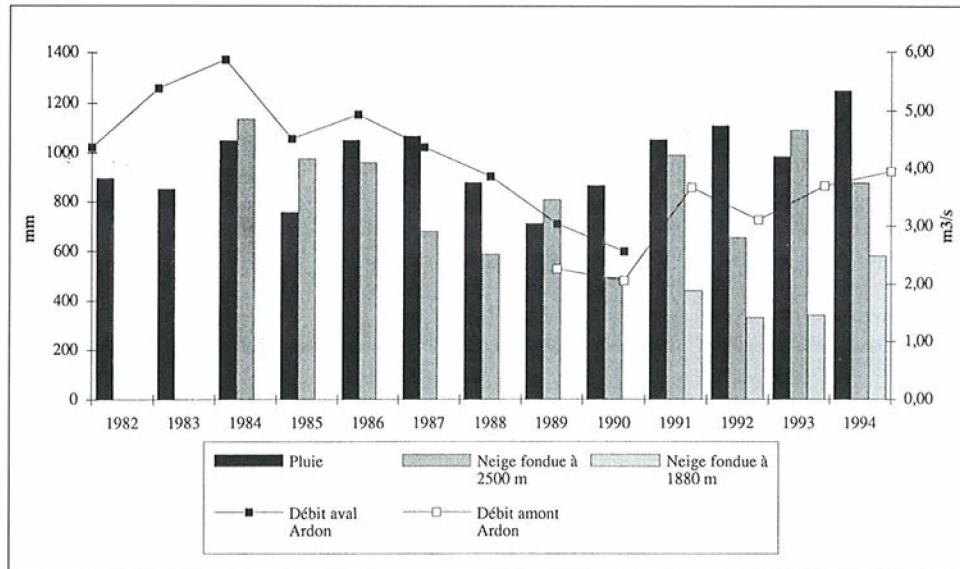


Fig. 5. Pluviométrie et débits mensuels. La rétention en altitude d'une part des précipitations du premier semestre et les averses automnales, souvent intenses, se traduisent dans le régime pluvionival de la Tinée.

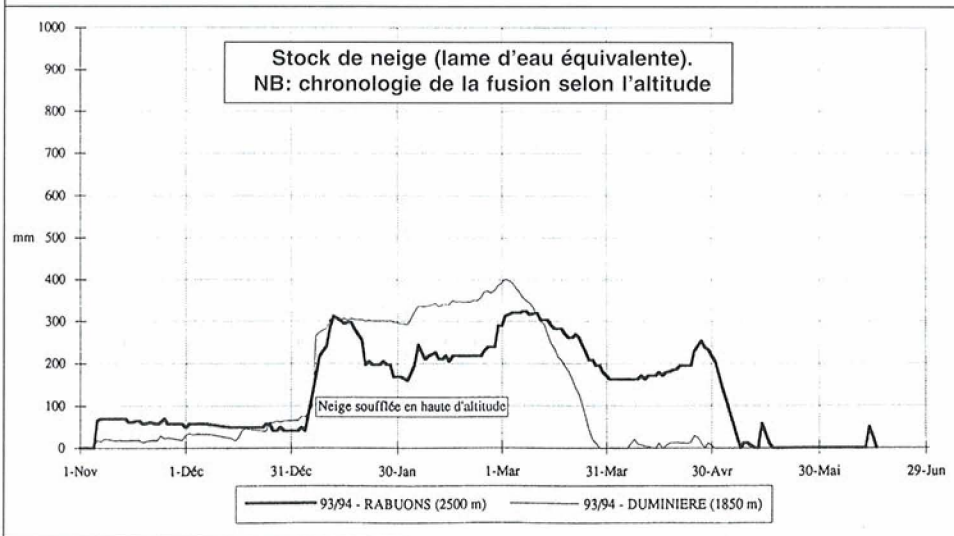
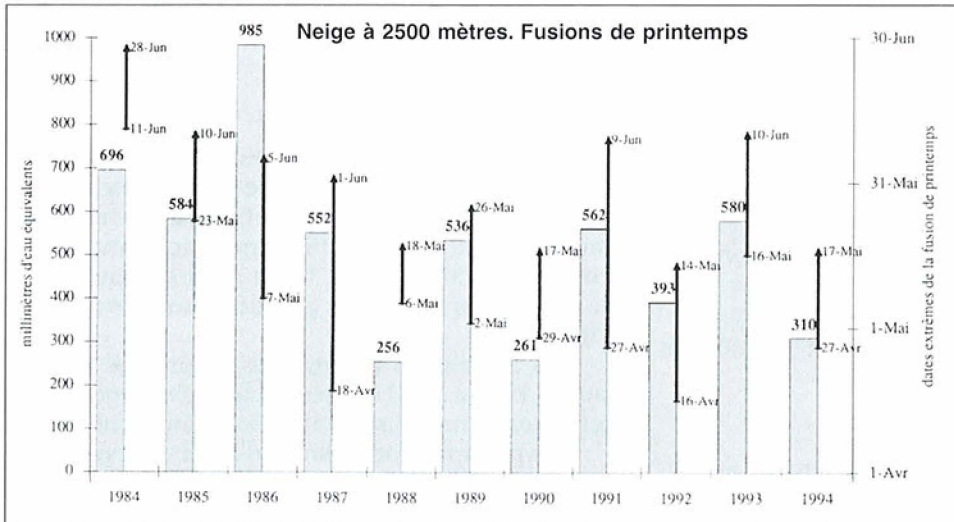


Fig. 6. Fonte de neiges. Au printemps, en sus de la quantité d'eau libérée, la durée de la fonte des neiges détermine les débits d'infiltration. Elle est souvent d'autant plus réduite qu'elle est tardive. Les deux nivomètres, à 1800 et 2500 mètres d'altitude, mettent en évidence le déphasage de la fusion selon l'altitude dans l'aire d'alimentation des eaux souterraines percolant dans le glissement.

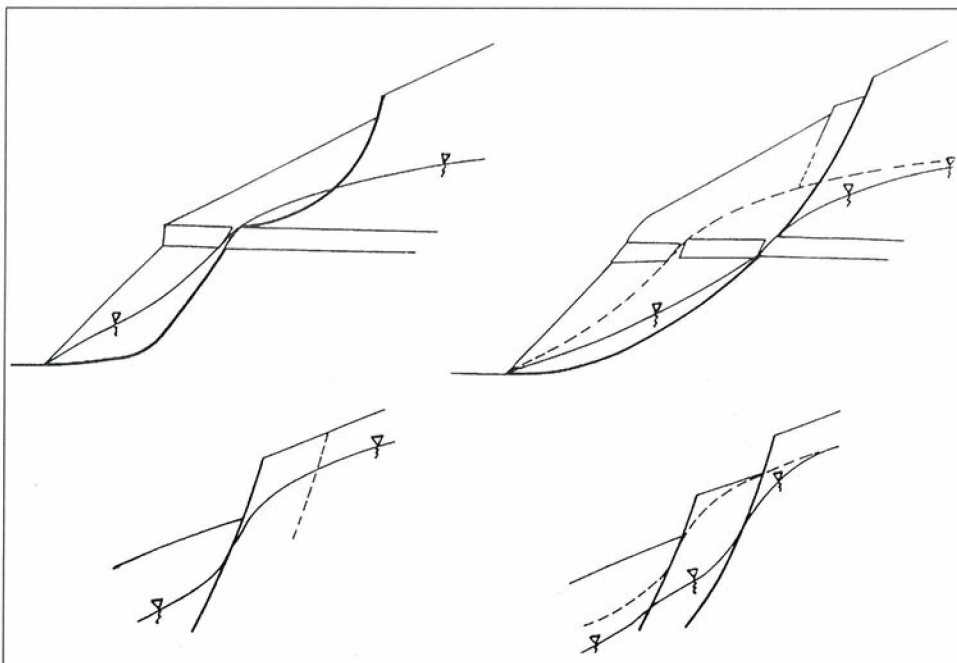


Fig. 7. Régime transitoires. Au cours du processus de glissement, des ruptures modifient les perméabilités, dévient les trajets des eaux souterraines et font varier la répartition de leurs pressions. Les schémas illustrent deux cas où un déstockage dû à l'abaissement de la surface piézométrique peut transitoirement accroître les débits.

si en peu de semaines sont considérables : jusqu'à 985 mm en 29 jours en 1986, les minima étant de 256 mm en 1988 et 261 en 1990.

Pour l'enneigement à 1880 mètres, on manque de recul après trois ans et demi d'observation. Les quantités sont naturellement inférieures (de moitié en 1991 et 1992), une plus grande part des précipitations s'effectuant sous forme de pluie. A cette altitude la température est plus douce, la neige est plus facilement reprise par la fusion et ne peut généralement accumuler pour la fusion ultime, normalement plus précoce, un stock aussi important qu'à 2500 mètres.

Débit des cours d'eau

Il n'y a pas de réseau de ruissellement sur le glissement proprement dit et le versant sus-jacent, ni de sources de débit supérieur à 0,01 litre/seconde, ni même de traces notables de ravinement.

Le débit de la Tinée à Saint-Etienne (drainant 167 kilomètres carrés d'un bassin versant ramassé et homogène dans la répartition des altitudes et des pentes entre 1000 et 3000 mètres) reflète dans ses variations annuelles l'évolution de la ressource fournie par les précipitations, pluie et neige. Après un maximum en 1984 (5,9 m³/s), le débit moyen annuel décroît fortement jusqu'en 1990 (2,6 m³/s) avant de remonter en 1991, marqué par la forte crue d'automne liée aux 500 mm de pluie en 30 jours.

Le régime saisonnier, pluvio-nival, est accusé.

Les crues de printemps sont toujours présentes, plus ou moins violentes et plus ou moins durables : elles ont été les plus fortes de 1983 à 1986, faibles en 1988, 1989 et surtout 1990, modérées mais prolongées en 1987 et 1991.

Les crues d'automne manquent certaines années : 1983, 1985, 1986 et 1989. Souvent plus brèves, elles transportent moins d'eau que les crues de printemps bien qu'elles soient plus intenses (débit maximum journalier de 80 m³/s en 1982 et 50 m³/s en 1991).

Pour rattacher au débit de la Tinée les quantités d'eau qui traversent le massif qui circonscrit le glissement, il convient de rapprocher chaque pic de débit des courbes correspondantes de pluviométrie et de fonte de neige ; cela aide à déterminer l'origine prépondérante des eaux et le mécanisme d'alimentation, à distinguer les épisodes de crue qui caractérisent le mieux les percolations intéressantes plus directement le glissement et à éliminer ceux qui correspondent à une origine extérieure (averses localisées extérieures au secteur, fonte de neige à l'amont du bassin versant ou aux altitudes extrêmes).

Températures

On dispose depuis 1990 de mesures de températures fréquentes sur le site.

Les résultats n'ont pas fait l'objet d'une exploitation poussée.

4.2. Conditions d'infiltration

Dans la zone des désordres actifs, en cohérence avec l'absence de réseau de ruissellement et de ravinement, la morphologie en terrasses fréquemment en contre-pente, l'intense fracturation et le couvert végétal arbustif (bien qu'il ait tendance à se réduire au profit des pierriers) sont propices à l'infiltration.

Les conditions restent très favorables au-dessus de 1750 à 2400 mètres environ avec encore des terrasses et un boisement en développement.

Les précipitations solides d'hiver sont plus efficaces pour l'infiltration que la pluie : la neige constitue un stockage tampon de l'eau, libérée suffisamment progressivement par la fusion pour ne pas ruisseler. La fusion est plus ou moins différée selon l'altitude. En raison de l'orientation au Sud-Est, jusqu'à 1500 mètres la neige persiste rarement au delà d'une quinzaine de jours.

Il apparaît néanmoins, à l'examen visuel et à l'étude des réactions cinématiques, que malgré leurs intensités, sur le site, les pluies d'automne ne conduisent pas à des taux de ruissellement importants mais à des infiltrations massives.

Avec moins de 10 mm/mois d'évapotranspiration potentielle en hiver et moins de 100 mm/mois en été, l'influence de l'évapotranspiration réelle apparaît marginale et a été jusqu'à présent peu prise en compte.

4.3. Exutoires

Compte-tenu de l'importance des apports d'eau, les quelques exutoires superficiels du versant à la périphérie du glissement ont des débits infimes, hors de proportion avec les débits infiltrés :

- quelques sources d'un débit cumulé inférieur à 0,1 litre/seconde dans le vallon de Rabuons,
- en pied, au printemps, la saturation du fluvio-glaciaire, voire des suintements,
- quelques taches d'humidité fugitives apparaissant quelques jours, parfois assez haut, jusqu'à 1300 mètres.

Il semble donc que l'essentiel des eaux soit drainé souterrainement par l'inféoflux de la Tinée dans les alluvions grossières et perméables (dont l'épaisseur dépasse 60 mètres en pied de glissement).

4.4. Hypothèses pour les circulations aquifères

En l'absence de toute piézométrie, on ne peut faire que des hypothèses sur les circulations souterraines.

Ces hypothèses se fondent sur la nature du massif (faciès et fracturation), les conditions d'ali-

mentation et les exutoires (*cf.* ci-dessus), sur des calculs de stabilité indicatifs paramétrant, entre autres facteurs, le niveau des eaux souterraines ainsi que sur l'observation des réactions cinématiques aux épisodes d'alimentation (*cf.*, ci-dessous, analyse des données d'auscultation).

Elles sont énoncées, ci-dessous, comme modèles hydrogéologique et hydraulique.

4.5. Données extrêmes

On sait que, pour certains processus érosifs, l'essentiel du travail s'effectue lors de circonstances paroxystiques extraordinaires.

La constitution temporaire de gradients hydrauliques exceptionnels peut résulter de conditions d'alimentation résultant d'une conjonction de précipitations extraordinaires par leurs valeurs et par leur enchaînement ; par exemple, lors d'un printemps tardif et chaud succédant à un hiver rigoureux, de fortes pluies cumulant leur effet avec la fonte brutale d'un épais manteau de neige. Dans ces conditions, un apport de 1200 mm d'eau en un seul mois résultant de 985 mm de fonte de neige (comme en mai 1986) et de 234 mm de pluie (comme en mai 1984) est très vraisemblable.

Elle peut aussi provenir de brusques accroissements ou modifications de perméabilité, consécutifs à des ruptures internes, changeant des conditions limites des écoulements et provoquant des débits de vidange de volumes antérieurement saturés (figure 7).

5. TECHNIQUES DE RECONNAISSANCE MISES EN ŒUVRE

On a considéré dès 1976 :

– que la dimension du site, sa mobilité, sa dangerosité et ses difficultés d'accès rendaient prohibitive et difficile (voire impossible) l'application des techniques de reconnaissance (géophysique, sondages, piézométrie, inclinométrie, etc.) en usage sur les glissements courants,

– que la compréhension qui aurait pu en découler ne pourrait déboucher sur un confortement jugé impossible.

De ce fait, on a opté pour une stratégie de prévention privilégiant la surveillance et le déplacement gradué des aménagements vulnérables. La reconnaissance a été limitée à la collecte, relativement économique, des informations disponibles en surface, sans investigations lourdes en profondeur.

5.1. Cartographie géologique de terrain et photogéologie

Appuyée sur les photos aériennes et les levés à grande échelle, les levés ont été réalisés au 1/10.000

et au 1/2.000, couplés avec des études pétrologiques des différents faciès.

Il n'a pas été réalisé d'étude minéralogique des processus d'altération.

Coût très approximatif: 200.000 F (topographie et levé géologique).

5.2. Photogrammétrie

Elle n'a pas été seulement utilisée pour la confection des plans et pour conserver l'information relative à un stade caractéristique de l'évolution mais aussi pour l'étude quantitative de la déformation.

Ainsi 4 couvertures anciennes (1952, 1964, 1974 et 1983) ont été réexploitées par l'Institut géographique national permettant notamment de suivre l'évolution des coordonnées d'environ 300 points caractéristiques et de confirmer l'ancienneté des mouvements et leur accélération (figure 8).

Coût approximatif: 80.000 F.

Les déformations à partir de 1970 ont été également quantifiées par comparaison de modèles numériques successifs de terrain à grande échelle à la maille de 2 mètres (*cf.*, ci-dessous, «Auscultation»).

Coût approximatif par opération: 20.000 F pour la prise de vue et 50.000 F pour le MNT.

5.3. Auscultation

Les différentes opérations décrites ci-dessous dans la rubrique «Auscultation» ont fourni de précieuses informations sur le site et sur le phénomène et ont ainsi, indirectement, apporté une contribution essentielle à la reconnaissance.

6. AUSCULTATION

Le site a fait l'objet, dès 1982, de mesures cinématiques et d'un suivi hydrométéorologique.

Le premier système mis en œuvre était basé, en sus de l'observation morphodynamique du versant et du suivi hydrométéorologique, sur des mesures de distances pratiquées par des opérateurs locaux.

Il a été décidé en 1988 d'en améliorer la fiabilité par l'automatisation permettant d'accroître la fréquence des mesures et de réduire les délais d'interprétation et de transmission des conclusions aux décideurs en charge de la sécurité publique. Le système, entré en service à partir de 1990, a nécessité l'installation et la mise au point d'une infrastructure de mesure et de transmission, le développement de procédures d'exploitation et communication rapides et la constitution d'une équipe d'exploitation et de maintenance (figures 9 et 10).

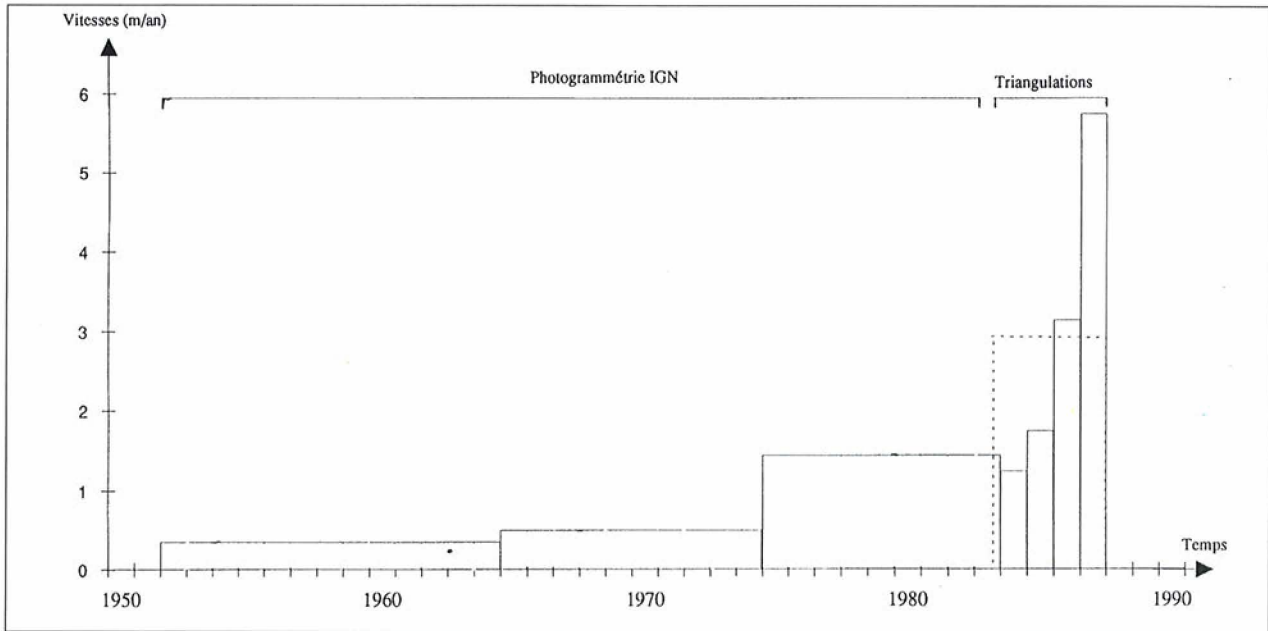


Fig. 8. Evolution des vitesses moyennes à partir de 1952. L'exploitation d'anciennes photographies aériennes a permis de mettre en évidence et de quantifier les déplacements d'un certain nombre de points singuliers entre 1952 à 1983. Les vitesses moyennes sont régulièrement crissantes et cohérentes avec celles qui ont été calculées à partir des triangulations à partir de 1982.

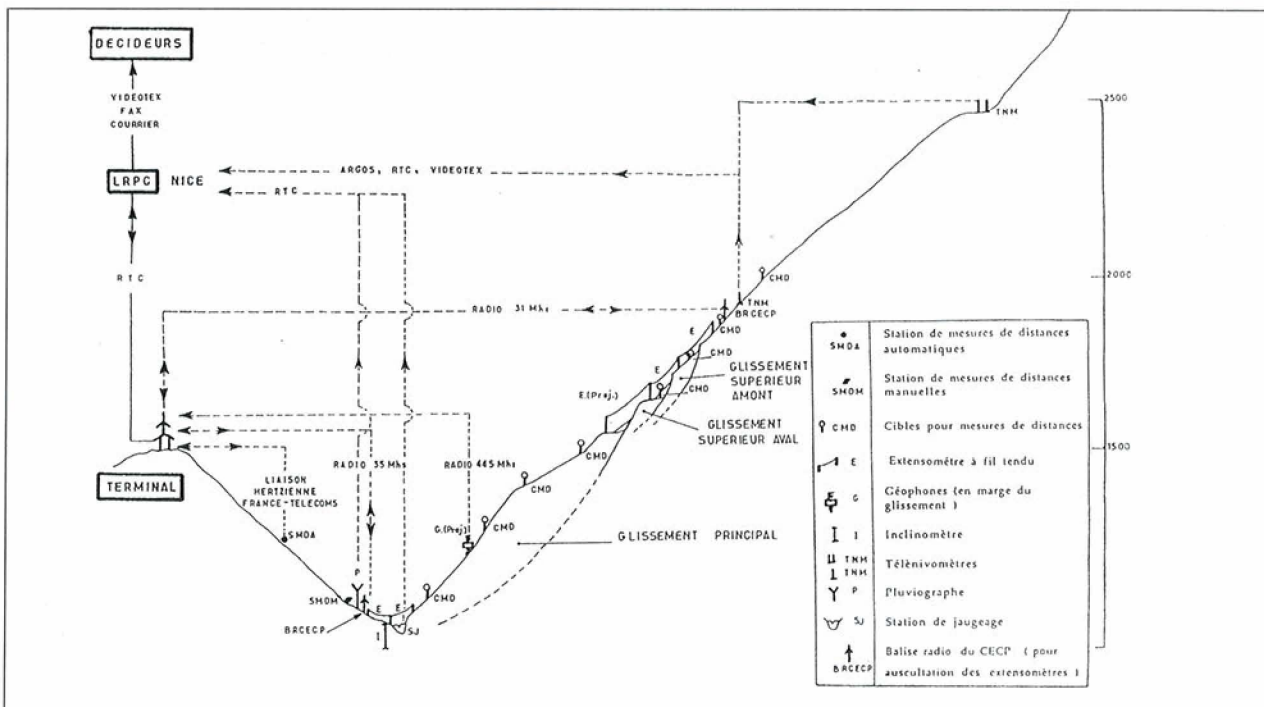


Fig. 9. Dispositif de surveillance installé en 1991. La surveillance installée en 1991 comporte:

- des capteurs de déplacements superficiels
- extensomètres à fils tendus,
- stations topométriques autoatiques installées sur le versant immobile de la vallée pour suivre des cibles placées sur le versant en mouvement,
- des capteurs pour les facteurs hydrologiques neige et pluie et une station de jaugeage de la rivière,
- des enregistrements de la nanno-séismicité,
- les systèmes de transmission, essentiellement hertzienne, des résultats vers un terminal de proximité et le centre de traitement.

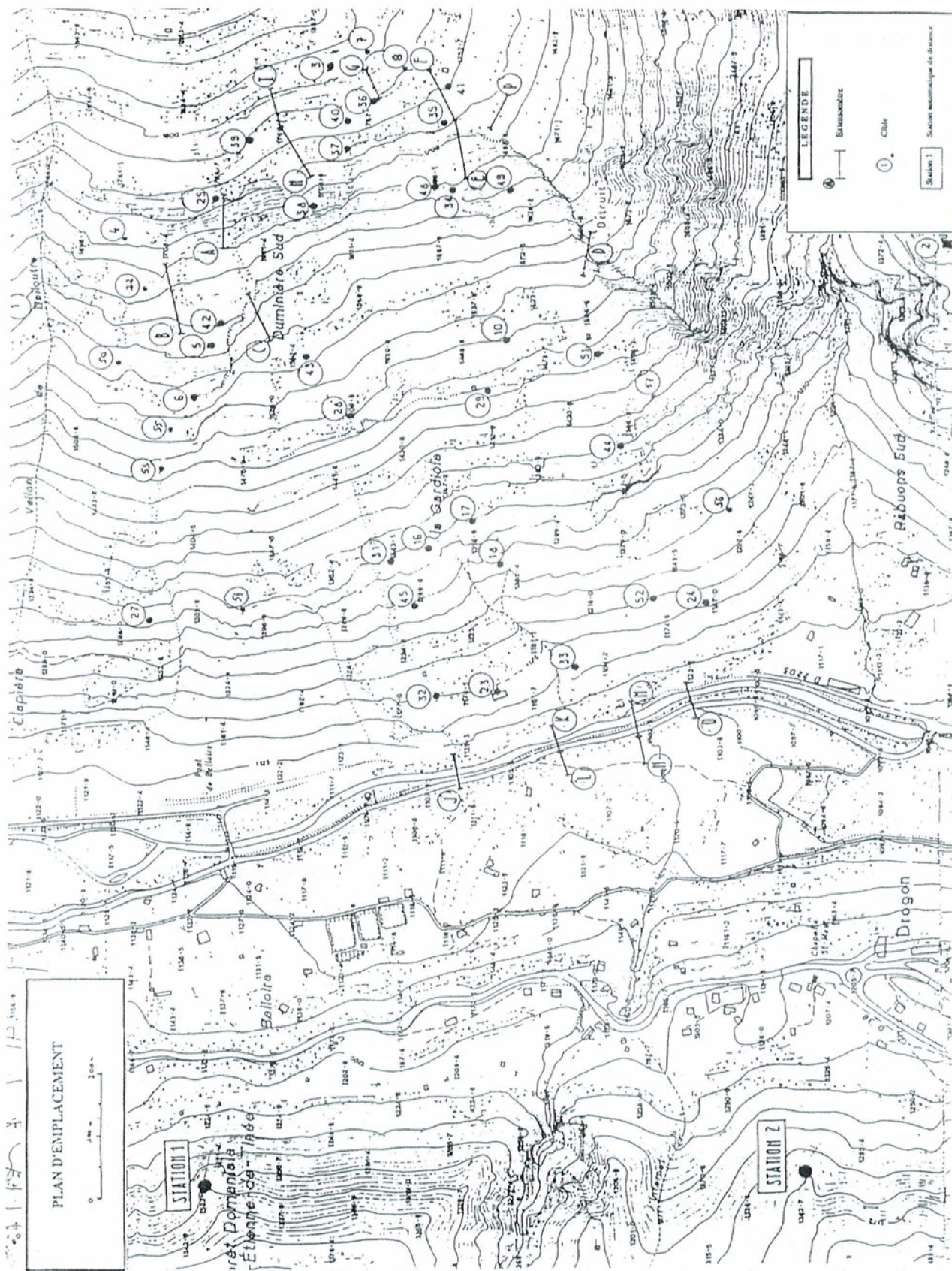


Fig. 10. Plan de situation des capteurs de déplacement. Les extensomètres ont été disposés sur les fissures périphériques. Les cibles topométriques sont implantées sur les différentes parties du glissement mais aussi sur ses marges, pour vérifier leur stabilité ou déceler des extensions éventuelles des désordres.

6.1. Objectif de la surveillance

L'objectif de la surveillance est double :

- prédiction des phénomènes : déceler au plus tôt les indices annonciateurs d'une évolution dommageable afin que les responsables opérationnels disposent du maximum de temps pour mettre en œuvre des mesures de sauvegarde et évacuer la population et le maximum de biens mobiliers susceptibles d'être impliqués,

- assistance à la gestion des crises : reconstituer, après un bouleversement, une capacité de diagnostic de la stabilité du site résultant permettant de fonder les décisions des responsables (sécurité des équipes d'intervention, retour dans les zones évacuées, etc).

6.2. Le système de surveillance

La surveillance (figure 11) comprend principalement des fonctions:

- d'observation morphodynamique qualitative,
- de mesure, cinématique et hydrométéorologique,
- de transmission,
- d'exploitation (dépouillement et interprétation) des résultats,
- d'information des décideurs,
- de maintenance (entretien, dépannage et modifications) du dispositif instrumental.

Elle requiert des moyens en locaux et en personnel, donc en financement.

L'observation du site

L'observation géomorphologique systématique est indispensable pour déceler des phénomènes qui échappent à la maille de l'instrumentation, forcément discontinue, et des manifestations morphodynamiques significatives quoique non quantifiables.

Elle est assurée par des agents de l'équipement et des services communaux coordonnés par le CETE qui procède aussi à des inspections en s'appuyant sur des clichés de référence répétitifs.

Les mesures cinématiques

Mesures «manuelles» de distance (système 1982). Le dispositif a fonctionné avec des fréquences quotidiennes à hebdomadaires de 1982 jusqu'à la mise en œuvre des mesures automatiques en 1991. Des géodimètres à infra-rouges manœuvrés manuellement délivrent les distances entre des cibles, disséminées sur le glissement et alentour, et deux stations installées sur le versant stable face aux désordres et accessibles en automobile. Les mesures, réalisées, dépouillées et transmises par des agents de la commune sans qualification en topographie, permettent de disposer en moins de 3 heures de vitesses apparentes, proches des vitesses réelles,

entre deux mesures.

Il est encore régulièrement utilisé à fréquence réduite comme complément, d'une part, à titre d'entretien d'une solution de secours pouvant pallier des pannes du dispositif automatique, d'autre part.

Extensométrie. 15 extensomètres à fil tendu avec des bases longues, excédant parfois 100 mètres, ont été répartis à la périphérie du glissement. Ils suivent les mouvements relatifs de certains compartiments du glissement entre eux et avec l'encaissant immobile au sommet et en pied. Ils contrôlent l'immobilité de zones de régression et compression potentielles.

Les mesures sont réalisées et retransmises 12 fois par jour.

Mesures automatiques de distance. Elles constituent l'axe de la télésurveillance.

Le dispositif instrumental comprend :

- 43 cibles constituées de miroirs rétrodirecteurs passifs, installées dans les différentes zones du (des) glissement(s), dans les zones de régression potentielle ainsi qu'à l'extérieur du secteur,
- deux appareils standard du commerce, un théodolite motorisé TM 3000 et un distancemètre Wild DI 3000, pilotés par le logiciel APS implanté dans des micro-ordinateurs.

Les automates sont installés dans deux abris spécialement aménagés sur le versant rive droite qui fait face au glissement, implantés sur des critères de visibilité, d'intervisibilité et d'intégration au réseau géodésique.

Les mesures (distances et coordonnées angulaires) sont réalisées et retransmises 6 fois par jour.

L'absence de résultats pendant les précipitations les plus intenses (qui empêchent la propagation des infra-rouges) peut durer une demi-journée, voire une journée, et rend précieuses les informations des extensomètres qui continuent alors de parvenir.

Triangulations

Une fois l'an environ, les coordonnées des cibles sont mesurées par triangulation. Ces mesures (poursuivies depuis 1982) ont permis de contrôler l'amplitude et surtout l'orientation des mouvements de surface ainsi que les variations de cette dernière qui sont riches d'enseignements pour la compréhension du phénomène.

Le canevas d'appui de ces opérations a été élargi et renforcé en 1990.

Inclinométrie

Le suivi annuel de deux forages inclinométriques installés en 1990 en fond de vallée en rive droite a permis de mieux apprécier la position de la rupture par rapport à la surface mais ils ont été

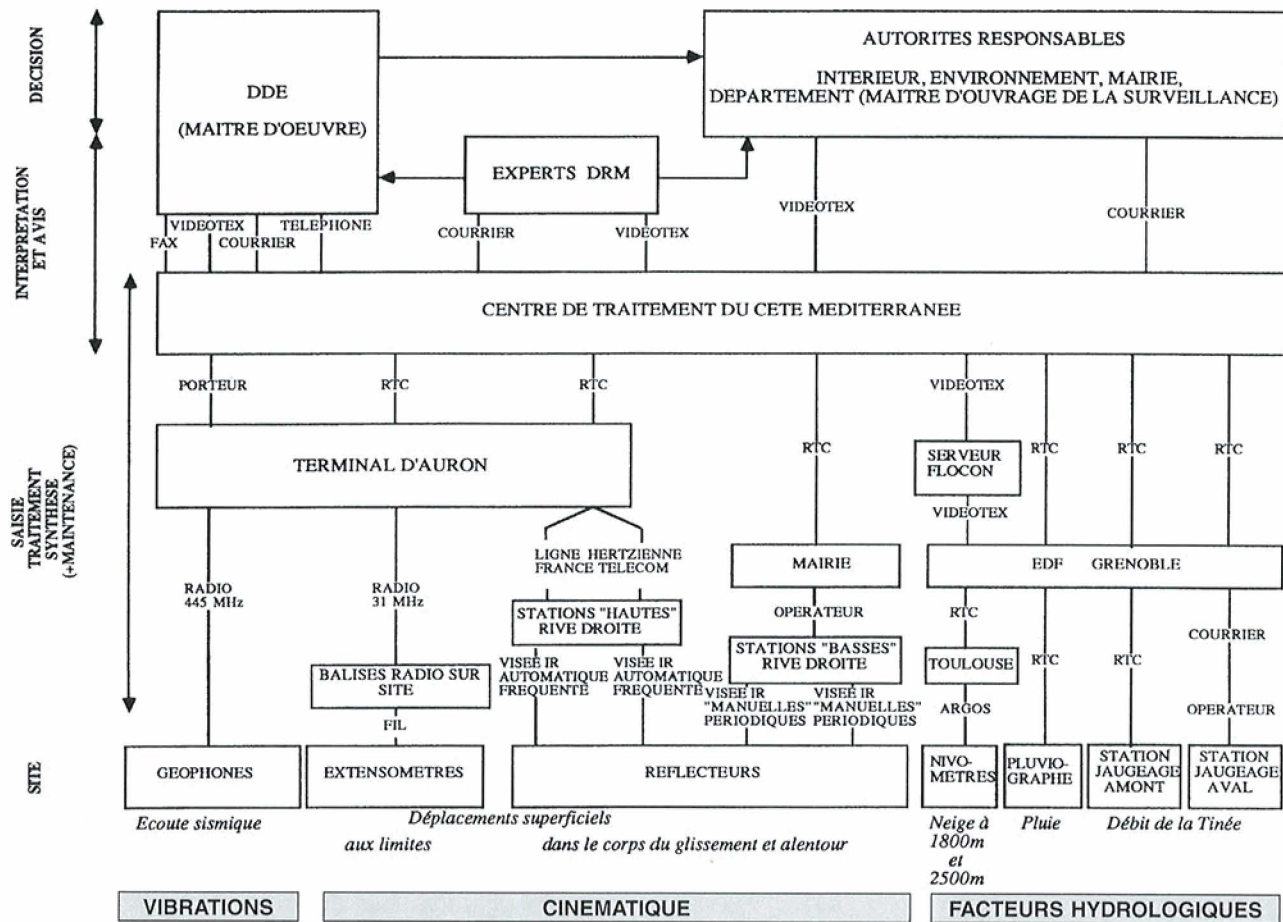


Fig. 11. Organigramme de la surveillance. L'information saisie sur le site doit être traitée, interprétée et mise à disposition des décideurs dans les meilleurs délais. Elle transite par divers canaux vers le centre de traitement qui en assure la synthèse et la répercuté vers les autorités responsables.

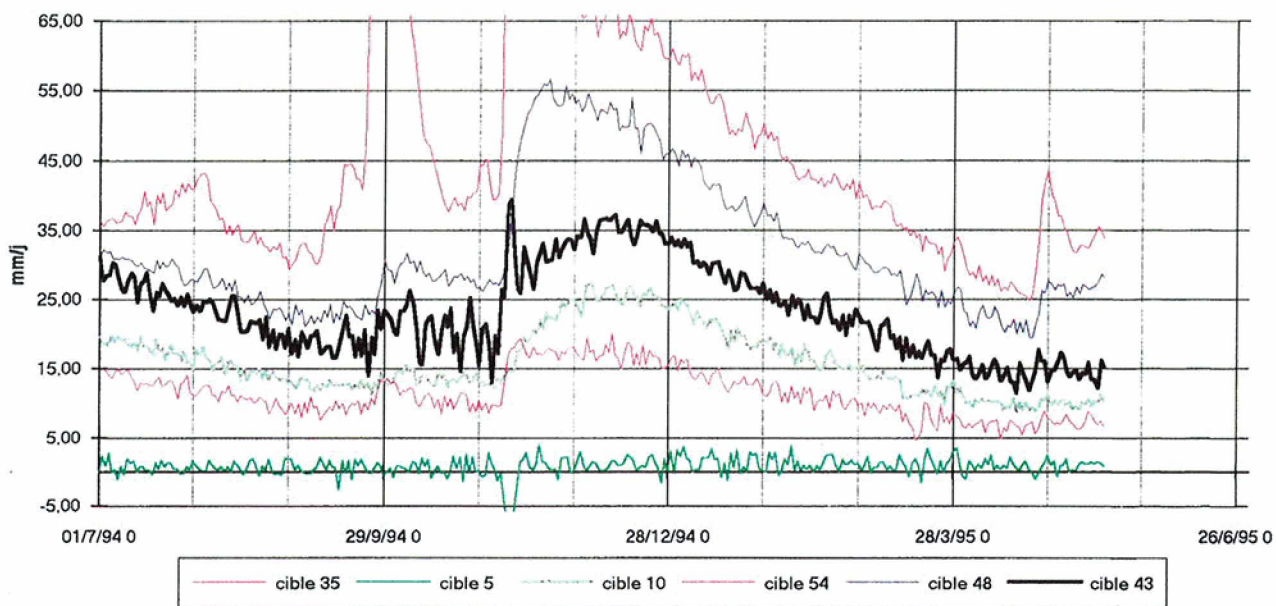


Fig. 12. Vitesses journalières. Des graphes synthétiques sont utilisés pour élaborer les diagnostics au jour le jour. Les vitesses de déplacement des différents secteurs, ici lissées sur trois jours, constituent l'information primordiale.

malheureusement détruits en 1993 par la rivière repoussée par la progression du glissement.

Les mesures hydrométéorologiques

La pluviométrie. Elle est connue grâce au pluviographe téléconsultable de Saint-Etienne-de-Tinée suffisamment représentatif des conditions du versant.

Le débit de la Tinée. Paramètre globalisant les apports des précipitations liquides récentes et ceux provenant de précipitations solides plus anciennes libérées par la fonte, il permet une approche de l'eau disponible pour l'infiltration.

Il est connu par deux stations de jaugeage. L'une d'elles, téléconsultable, est installée hors de la zone d'influence des éboulements prévisibles, immédiatement en amont. Elle devrait continuer à fonctionner, après ces événements, et permettre ainsi de déterminer les délais avant remplissage de la retenue.

L'évolution de la couverture neigeuse. Elle est connue par deux télénivomètres implantés l'un à 6 kilomètres du glissement et à 2500 m d'altitude, l'autre à 1 kilomètre et 1850 mètres d'altitude, dans la zone où l'infiltration intervient plus directement dans l'alimentation du glissement. Ils sont téléconsultables quotidiennement durant l'hiver.

Les transmissions

Pour des raisons de technique et de fiabilité, elles empruntent plusieurs vecteurs. Seules certaines sont, entièrement ou partiellement automatiques.

Architecture du système de transmission. Elle comporte quatre niveaux.

Sur le site, les capteurs et leurs sources de transmission émettent l'information.

Le terminal de mesures fonctionne de façon automatique dans un immeuble d'Auron. Il réceptionne, trie, ordonne et stocke les données cinématiques émises par le site. Il transmet automatiquement les résultats chaque matin au centre de traitement et les garde disponibles dans l'intervalle pour une interrogation à l'initiative de ce dernier. Il peut émettre des signaux d'alerte automatique.

Il peut enfin, en cas de crise, être transformé en centre de traitement.

Au centre de traitement installé au CETE à Nice, les données sont réceptionnées, dépouillées, interprétées et archivées. À ce niveau sont élaborés et émis les messages d'information et, le cas échéant, d'alerte graduée en direction des autorités responsables. Au même niveau, se situe une réflexion plus générale sur l'évolution du phénomène. Un ordinateur portable permet aux agents d'astreinte hors du laboratoire, en cas d'alerte émise par le

terminal, de reprendre à distance le contrôle du traitement.

Les autorités responsables de la décision, Préfecture et Mairie, et leurs conseils des ministères de l'intérieur, de l'équipement, de l'environnement (collège d'experts à créer) constituent le quatrième niveau.

Transmission des données extensométriques. Les informations conduites par câbles à trois balises sont transmises par voie hertzienne au terminal. Les balises comprennent une alimentation électrique autonome (panneaux solaires, batterie et régulateur), une carte d'acquisition et d'alimentation des capteurs et un émetteur-récepteur.

Transmission des distances automatiquement mesurées. Les micro-ordinateurs des stations de mesure transmettent les fichiers issus du programme de mesure APS vers un micro-ordinateur du terminal de mesures par l'intermédiaire de lignes spécialisées hertziennes installées par France-Télécom.

Transmission des distances mesurées «manuellement». Les résultats saisis sur un micro-ordinateur (qui assure une correction des variations dues aux conditions atmosphériques, calcule les vitesses puis se met en position de serveur) sont téléchargés par l'intermédiaire du réseau télécommuté depuis le centre de traitement.

Transmission des données pluviométriques et des données de débit. Les données, récupérées par le réseau télécommuté et dépouillées par EDF Grenoble, sont chargées dans un serveur où elles sont disponibles pour le centre de traitement.

Transmission des données nivométriques. La hauteur de neige et celle de la lame d'eau équivalente sont transmises quotidiennement par Argos à EDF Grenoble qui charge les données dans un serveur Vidéotex.

Transmission des signaux d'alerte automatiques. Elle s'effectue par Opérateur : réseau télécommuté entre le terminal de mesure et un central, voie hertzienne entre celui-ci et l'agent d'astreinte.

Transmission de l'information aux décideurs. Cf., ci-dessous, «L'information des autorités responsables».

L'exploitation des résultats

Premier niveau : les dépouillements automatiques. Au terminal de mesures, lors de chaque mesure extensométrique, les déplacements sont automatiquement comparés à des seuils prédéterminés et, en cas de dépassement, un signal d'alerte automatique est émis sur Opérateur vers les seuls agents de surveillance.

Au centre de traitement, les résultats reçus chaque matin sont automatiquement répartis dans des

tableaux et transcrits en graphes permettant de rapidement déceler, le cas échéant, les changements importants du régime des mouvements ainsi que les grosses anomalies fonctionnelles.

Deuxième niveau : synthèse, interprétation et diagnostic. Les différentes données, cinématiques et hydrométéorologiques, sont ensuite quotidiennement retraitées (calcul de vitesse et d'accélération, lissage, rapports, etc) et intégrées (figure 12) pour constituer un «tableau de bord» qui permet d'élaborer le diagnostic sur l'état du versant et de formuler le pronostic sur son évolution à court terme qui sera transmis aux autorités responsables.

Les procédures de traitement, largement automatisées, ont été progressivement élaborées et adaptées à la problématique spécifique du phénomène et elles évoluent en fonction de celui-ci.

Le tableau de bord renseigne aussi sur l'état de l'instrumentation, soumise sur le site à des agressions naturelles et, parfois, anthropiques, et il permet de décider les interventions de maintenance.

On ne peut dissocier de l'auscultation le travail de recherche sur les données qui prolonge la surveillance et vise un approfondissement des connaissances dont elle devrait bénéficier (adaptation des méthodes et techniques, amélioration des capacités de prévision et prédiction, etc).

L'information des autorités responsables

Absence d'alarme automatique. Il est apparu que le phénomène est (encore ?) insuffisamment déterminé pour que l'on puisse se fier à des critères et des seuils préconçus pour déclencher des mesures de sauvegarde sans qu'un niveau d'expertise raisonnée, circonstanciée, critique et valide, après acquisition d'une information préprogrammée comme alarmante.

L'alerte automatique est réservée au personnel en astreinte, à charge pour lui de compléter son information et de donner l'alarme, s'il le juge opportun.

L'information au jour le jour. Elle s'effectue par vidéotex, ce vecteur permettant à tous les intervenants de consulter, à tout moment et de n'importe où, la même information.

Les messages, concis, comprennent une description sommaire du comportement du versant, un diagnostic sur le niveau de risque, un avis sur les mesures de sécurité qui paraissent opportunes et quelques données plus techniques (vitesses, précipitations, hauteurs de neige, etc).

Les rapports. Comptes rendus trimestriels et rapport annuel.

La maintenance

C'est un poste important dans un site agressif où l'instrumentation, qui comporte des modules

d'inégale rusticité, est souvent éprouvée. La permanence d'une capacité de diagnostic convenable repose sur des redondances instrumentales et systématiques permettant de pallier les dysfonctionnements inévitables, d'une part, sur la disponibilité d'une équipe d'intervention spécialement entraînée, d'autre part.

Les moyens en personnel

Les tâches d'exploitation et de maintenance requièrent des intérimis et des astreintes et ne sont pas réparties uniformément dans le temps ; elles sont partagées par une équipe de trois agents à mi-temps (un ingénieur et deux techniciens supérieurs) qui a dû s'organiser pour pouvoir réagir à des accroissements inopinés en s'adjoignant temporairement le renfort de spécialistes d'autres services et/ou d'équipes d'intervention pour les travaux spéciaux sur le terrain.

Les coûts

Système «1982». Installation: 500.000 F (valeur 1982).

Exploitation et maintenance: 200.000 F par an.

Surveillance actuelle. Terme fixe initial pour l'installation progressive et la montée en puissance de l'exploitation maintenance durant deux ans: 7.000.000 F.

Exploitation et maintenance: 1.700.000 F par an.

Il est envisagé de ramener ce coût à 1.100.000 F par an par diverses mesures d'économie portant principalement sur la suppression des extensomètres et la réduction des astreintes ainsi que le déplacement du terminal, d'une station automatique de mesures de distance dans un site plus accessible, etc.

6.3. Auscultation complémentaire

On rattachera à l'auscultation des opérations de photogrammétrie, d'écoute sismo-acoustique et de télédétection réalisées dans le cadre d'action de recherches.

Photogrammétrie

Des photos aériennes sont périodiquement réalisées dans des conditions répétitives permettant la réalisation de modèles numériques successifs de terrain à grande échelle à la maille de 2 mètres.

La comparaison de ces derniers permet de quantifier les déformations (figure 13) et de contrôler les contractions et dilatations. Elle permet aussi par la réalisation d'images de synthèse (figure 14), de profils sériés denses (figure 15), etc, des approches plus qualitatives de la morphodynamique d'ensemble ou de détail. Elle permet enfin de contrôler la représentativité des modèles cinématiques.

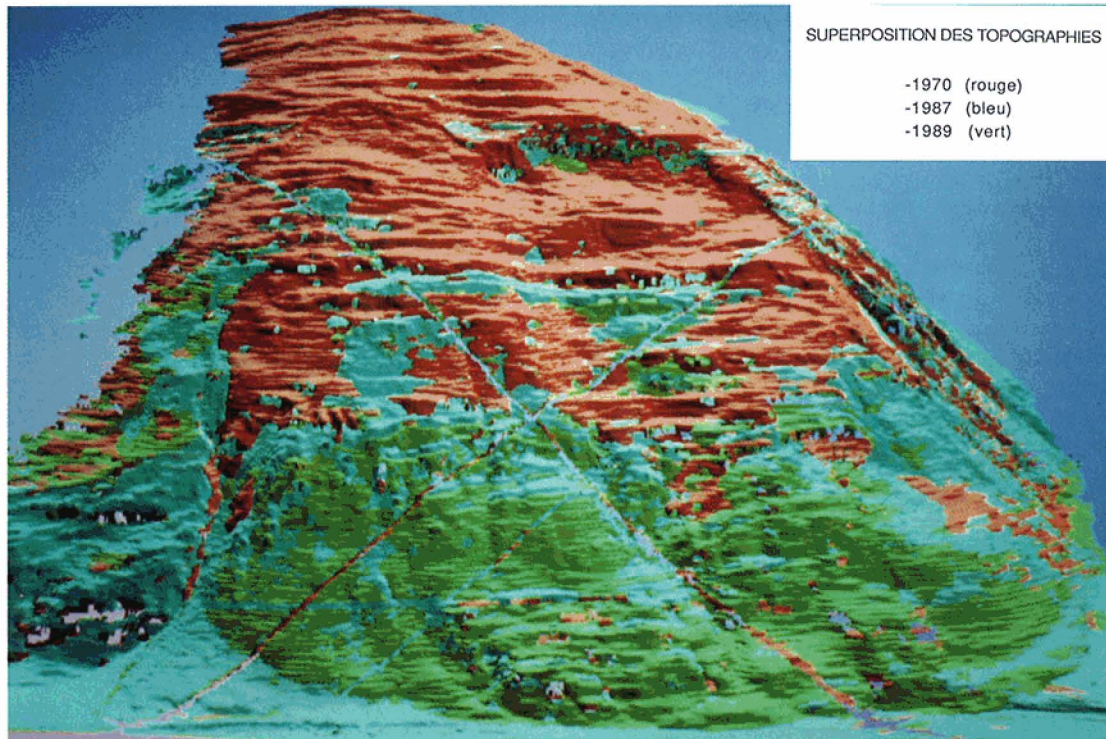


Fig. 13. Modèles numériques de terrain - Superposition des topographies. Des MNT à haute résolution (maille de 4 mètres carrés) permettent de comparer les topographies successives. La superposition sur une image de synthèse, faisant apparaître en chaque point la surface la plus haute, traduit l'abaissement en tête et la progression en pied.

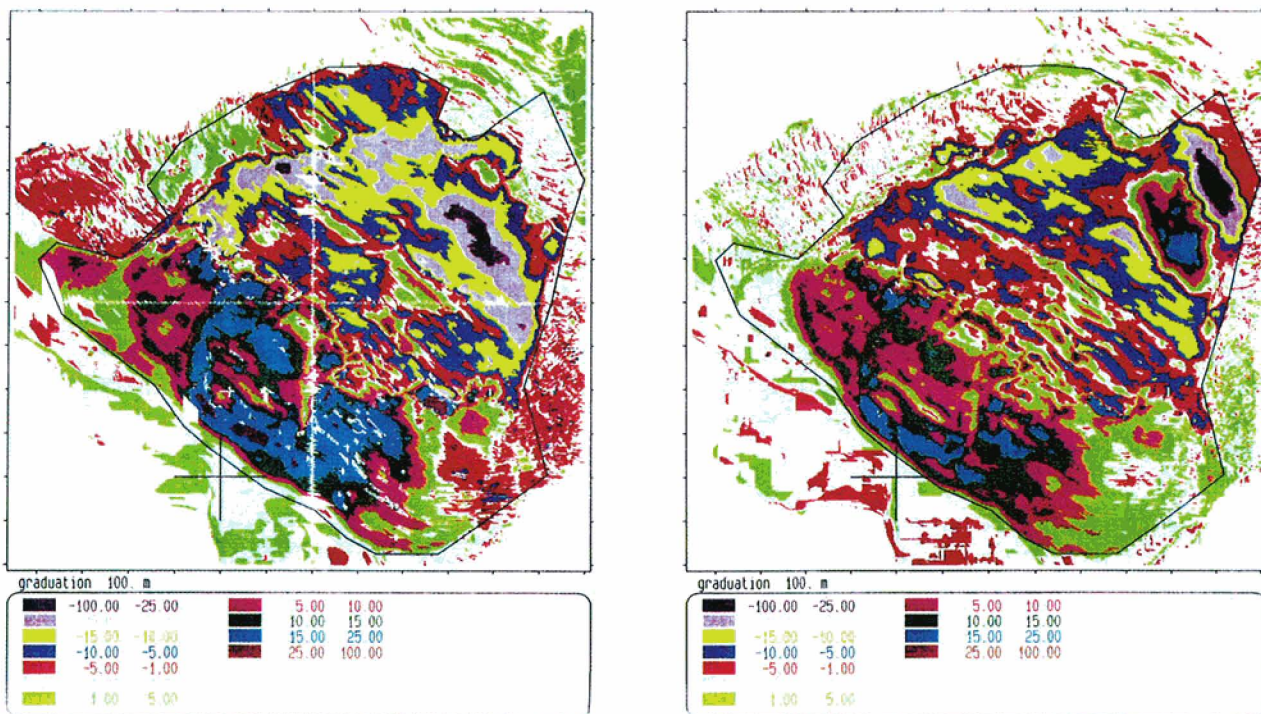


Fig. 14. Modèles numériques de terrain - Quantification de la déformation.. La comparaison des MNT successifs permet de quantifier les déformations. Les deux cartes d'isovariation d'altitude font ressortir les directions structurales limitant les différents compartiments; elles illustrent aussi l'immobilisation de la partie sommitale du lobe Nord-ouest entre 1989 et 1994 ainsi que la régression du glissement au sommet du lobe Sud-est.

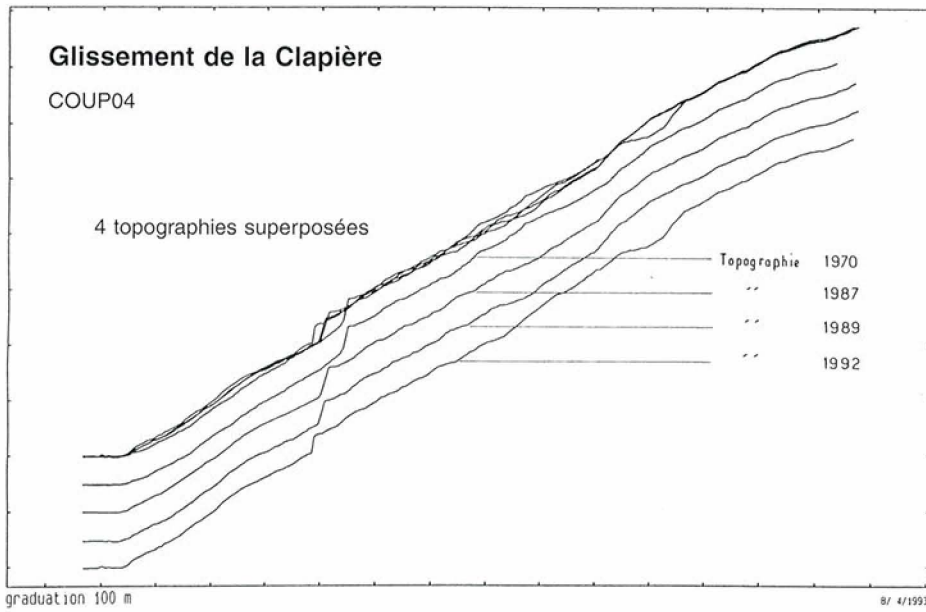


Fig. 15. Suivi des déplacements sur profils photogrammétriques sériés. L'évolution de la topographie dans les mêmes plans verticaux fournit des informations morphologiques sur les mécanismes (ici, accentuation de l'escarpement sommital, avancée de la falaise médiane, gonflement du pied, etc.) et permet de caler des modèles cinématiques.

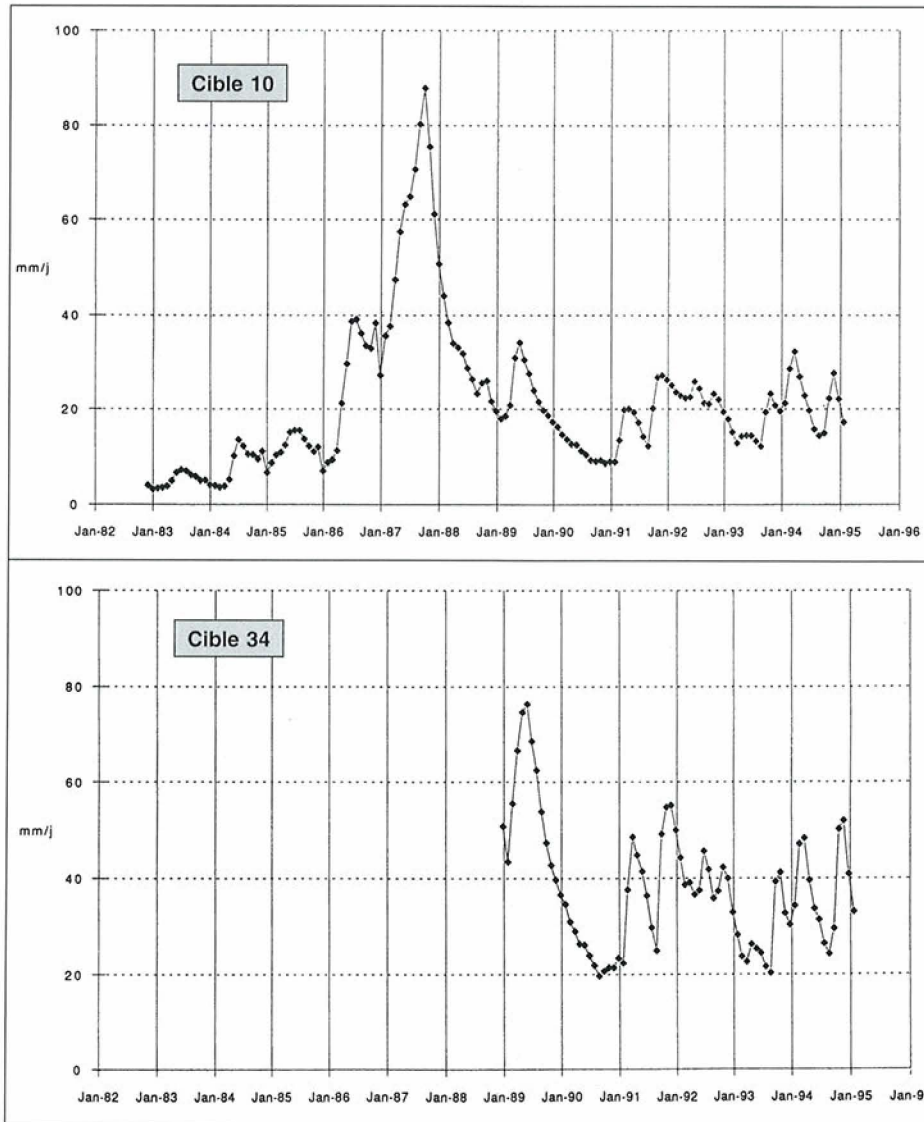


Fig. 16. Vitesses mensuelles - Glissement principal et glissement supérieur. Outre le régime saisonnier pluvio-nival avec accélérations à la fonte des neiges au printemps et, le cas échéant, lors des orages d'automne, les courbes montrent les changements de tendance avec la « crise » de 1986 et 1987 et l'effet des années sèches, 1988, 1989 et surtout 1990 à enneigement réduit.

Ecoute sismo-acoustique

Elle est destinée à rechercher des corrélations entre les déplacements et l'activité nano-sismique engendrée par les ruptures du glissement, en vue d'une possible utilisation ultérieure pour la surveillance et la prédiction des phénomènes. Deux géophones sont implantés en bordure Nord du glissement. Les signaux, transmis par radio, sont enregistrés au terminal et traités au CETE à Nice.

Coût approximatif: 800.000 F d'investissement (matériel et installation) et 200.000 F par an pour l'exploitation et la maintenance.

Télé-détection

Le glissement a servi à des essais des balises Doris du Centre National d'Etudes Spatiales et il fait actuellement l'objet de suivis expérimentaux par interférométrie différentielle satellitaire.

6.4. Analyse des données d'auscultation

Données hydrométéorologiques

Elles sont résumées sous la rubrique «Climatologie et hydrogéologie».

Données cinématiques

Elles ne peuvent être que résumées dans le cadre de ce document.

Les vitesses ont régulièrement crû de 1982 à 1985 selon une «loi» combinant une *tendance* croissant de façon à peu près linéaire et des «pics» saisonniers au printemps, et en automne, quand ils étaient pluvieux (figure 16). Cette «loi» a été perturbée en 1986, 87 et 88. En 1986 et en 1987, l'accélération s'est accrue et a conduit à des vitesses dépassant localement 100 millimètres par jour pendant un mois. Ces vitesses semblent résulter davantage d'une variation de la tendance que des pics saisonniers, restés proportionnés avec ceux des années précédentes et avec l'alimentation en eau. En 1988, à l'exception de deux pics très peu marqués en automne et au printemps, la décélération se poursuit toute l'année, et les vitesses n'atteignent plus en janvier 1989 que le cinquième de leurs valeurs d'octobre 1987. Il semble que ce soit encore la *tendance* qui ait été modifiée fin 1987, cette fois dans le sens de la diminution des vitesses de base.

De 1988 à 1995, la variation des vitesses en fonction du temps n'a pas retrouvé une «loi» apparente aussi régulière que celle de 1982 à 1985. On a constaté :

– une vive accélération «nivale» au printemps 1989,

– une décélération continue jusqu'en janvier 1991, ramenant la moyenne des vitesses du glisse-

ment principal à 7 mm/jour, soit le niveau atteint en avril 1986 et dix fois moins que la vitesse moyenne atteinte en octobre 1987,

– de nouveau une accélération de 1991 à 1995, rythmée par des pics aux printemps et automnes, amenant la vitesse moyenne à 25 mm/jour en décembre 1994 et 12 mm/jour en mars 1995.

Est à noter le pic bref enregistré le 22 janvier 1991 (figure 17) sur pratiquement toutes les cibles, lors de la chute d'un bloc d'un millier de mètres cube depuis la partie Sud-Est de la barre d'Iglière survenue, en période sèche après 30 jours sans pluie (et en absence de séisme).

Exceptés les blocages et régressions (figure 18), le comportement du glissement est globalement homogène, les accélérations et décélérations sont synchrones sur l'ensemble des cibles mais la hiérarchie des vitesses entre les différentes zones évolue, et parfois s'inverse notamment au tournant des années 1986-87. Ainsi l'écart se réduit continuellement entre les vitesses supérieures dans la partie haute et celles des parties basses. La partie Nord-Ouest se déplace maintenant davantage que la partie Sud-Est, contrairement au comportement constant des premières années du suivi.

Les mesures automatiques de distances effectuées depuis juillet 1991 permettent de calculer des vitesses apparentes qui sont naturellement cohérentes avec celles du dispositif manuel (à des coefficients près, liés à la situation des stations sur la rive droite). En sus du complément de fiabilité qu'elles confèrent à la surveillance par leur fréquence (6 mesures par jour) et leur temps de réponse réduit, ces mesures apportent des précisions utiles sur la cinématique. Elles démontrent que (pendant la période de mesure) les mouvements ont été progressifs, sans saccade significative en période normale ; elles mettent par contre en évidence, sur certaines cibles, des «pics fugitifs» immédiats de forte amplitude se dissipant en peu de jours (figure 19), en prélude aux accélérations majeures mais plus progressives consécutives aux fortes précipitations (*cf.* ci-dessous).

Les orientations des déplacements sont restées assez constantes au cours des années mais l'analyse détaillée révèle des variations, minimales mais significatives. L'azimut des trajectoires est, sauf dans la partie basse du compartiment des trois granges, dévié vers le Sud-Est par rapport à la plus grande pente du versant. Cette déviation tend à s'atténuer progressivement en même temps que la dispersion; on note néanmoins une tendance résiduelle à la divergence «en éventail», les cibles côté Nord-Ouest divergeant plutôt vers l'amont (vers le village) et les cibles côté Sud-Est divergeant souvent nettement en direction du vallon de Rabuons. Leur site varie peu avec le temps mais décroît avec l'altitude. Il est supérieur à la pente topographique et peu dispersé en amont ; dans la partie basse, il est inférieur mais si les mouvements sont pra-

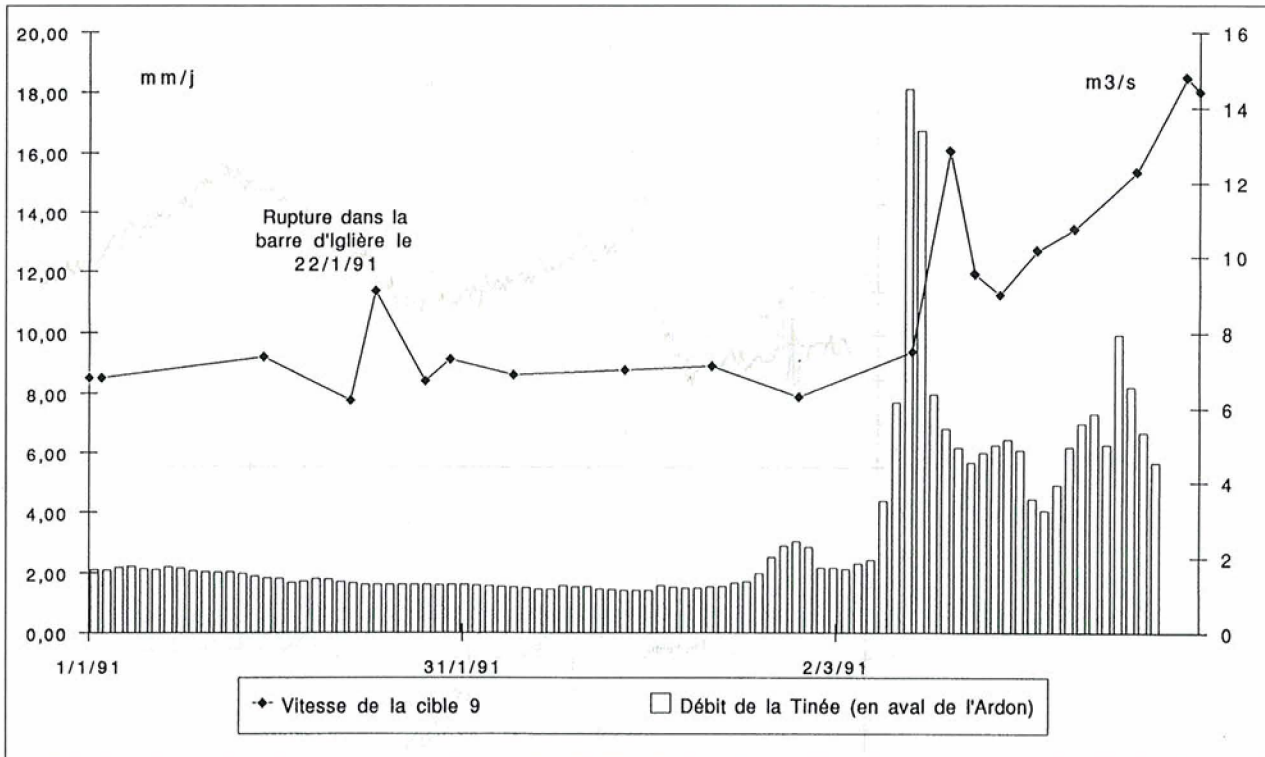


Fig. 17. Débit de la Tinée et vitesse de déplacement au premier trimestre 1991. L'évolution des vitesses enregistre trois influences. En janvier, hors sollicitation hydraulique un premier pic d'accélération est à relier à une fracturation illustrée par des éboulements superficiels. Un deuxième pic, début mars, est consécutif à des orages intenses traduits par une crue nerveuse. Ensuite l'accélération, réduite mais prolongée durant tout le mois, correspond à la fonte des neiges de moyenne altitude qui provoque aussi une crue continue.

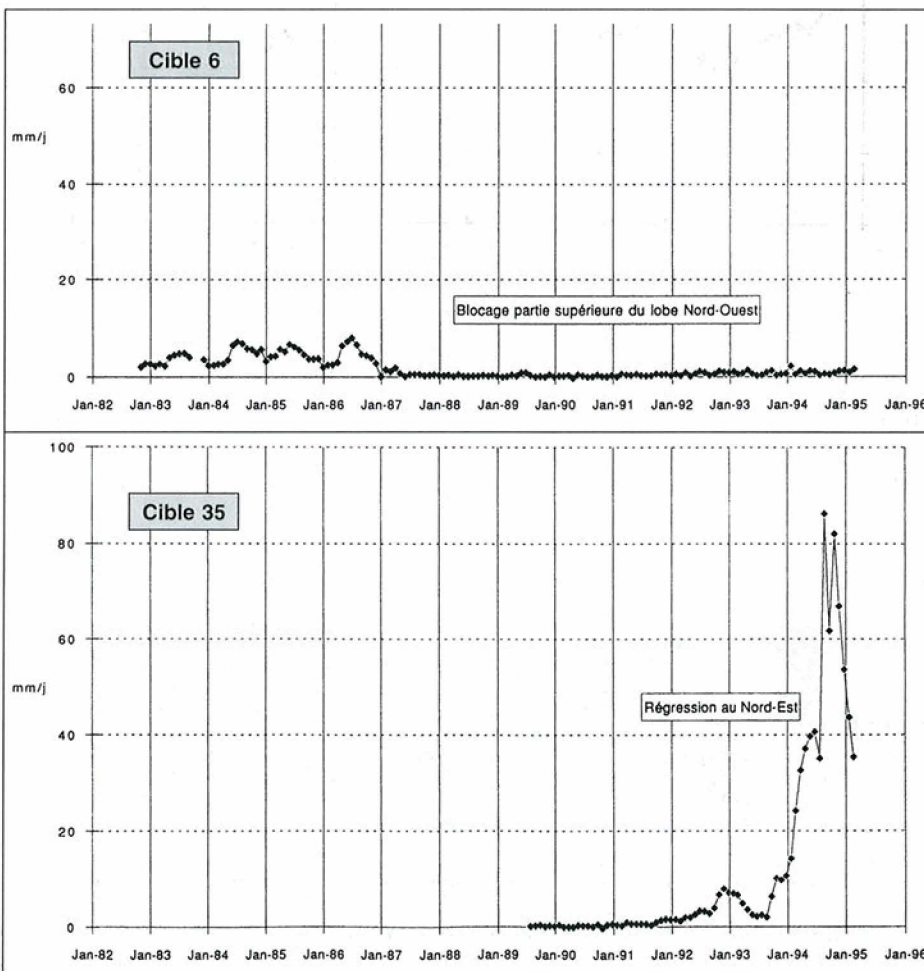


Fig. 18. Vitesses mensuelles - Lobe Nord-ouest et glissement supérieur. La cible 6, dans la partie supérieure du lobe Nord-ouest s'est pratiquement quand cette partie du glissement principal s'est bloquée en 1987. Inversement la cible 35, implantée en amont de l'escarpement sommital du glissement principal, s'est mise en mouvement quand les mouvements ont régressé pour constituer le glissement supérieur au Sud-est.

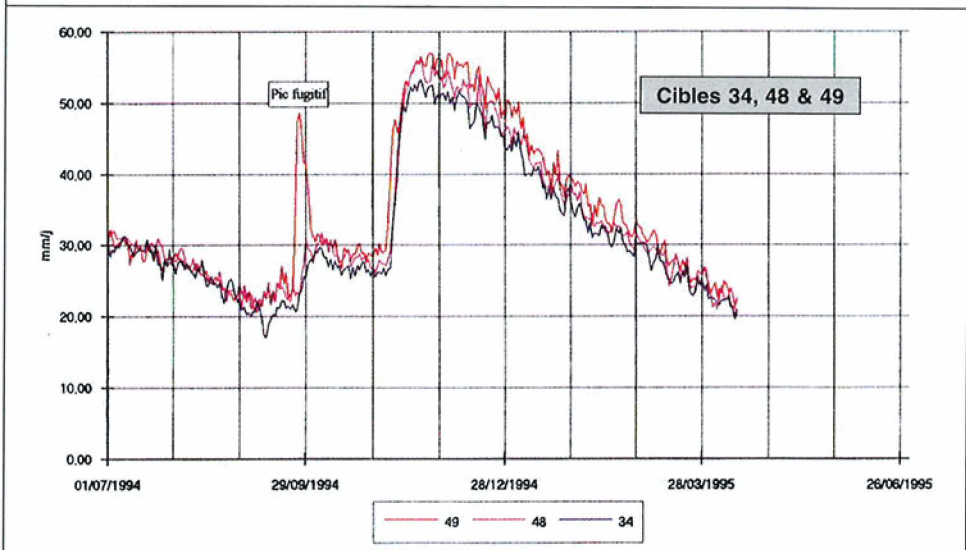
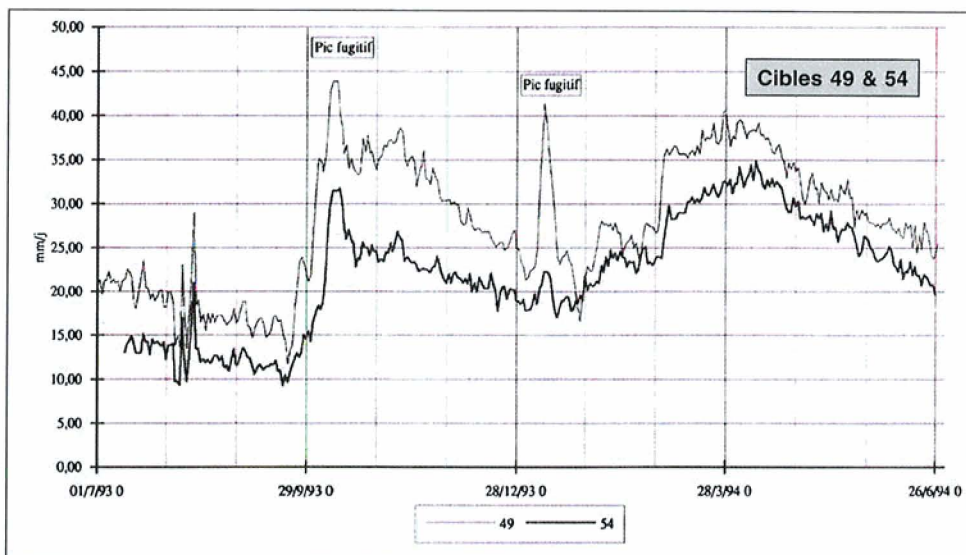


Fig. 19. Vitesses journalières. L'automatisation des mesures, autorisant des mesure fréquentes, a permis de mettre en évidence après les précipitations majeures des réactions cinématiques très violentes et parfois peu durables, les «pics fugitifs».

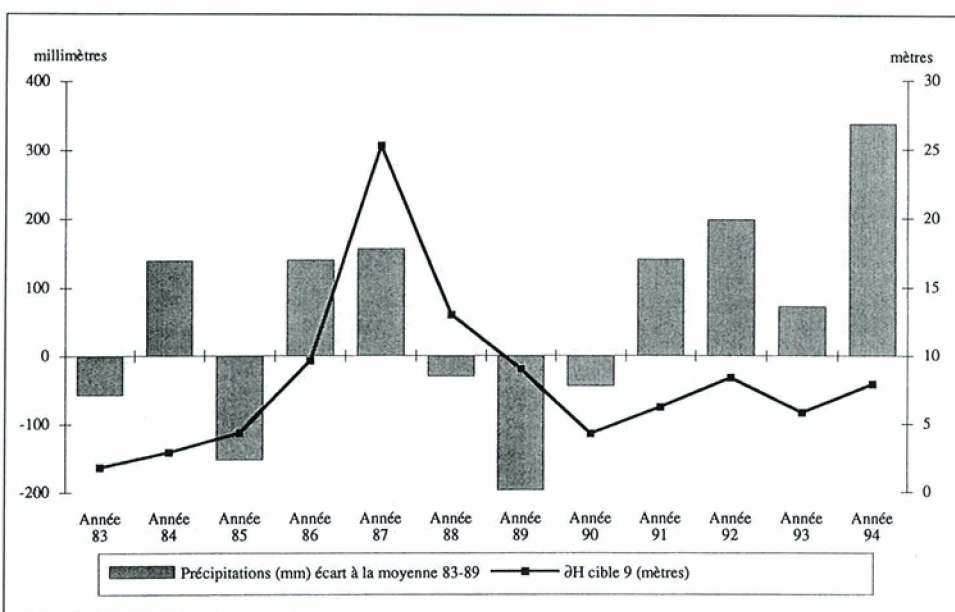


Fig. 20. Précipitations et déplacements annuels. A l'échelle annuelle, la corrélation se discerne entre les excédents en pluies et les accélérations et, inversement, entre les déficits et les ralentissements. La «crise» cinématique de 1987 semble toutefois hors de proportion avec la pluviométrie correspondante et à rattacher à d'autres facteurs.

tiquement horizontaux en pied du compartiment central, ils sont encore inclinés de 25° vers l'aval dans le compartiment Sud-Est (cible 24).

Corrélations hydrométéorologie-cinématique

La coïncidence des périodes d'accélération et des périodes humides, ainsi que l'amplitude des mouvements liées à la pluviosité confirment l'influence de l'eau souterraine dans les mouvements du versant. Les corrélations apparaissent nettement quand on considère les grandes masses, à l'échelle annuelle et saisonnière (figure 20). Les corrélations fines aux horizons courts (figure 21), visant à faire ressortir la "nervosité" du système et à rapporter l'amplitude des réactions cinématiques à des volumes de précipitations, sont plus floues.

Les travaux de Gervreau, Durville et Alfonsi, basés sur un modèle de type «boîte noire» précipitations-mouvements, et ceux de Pouget, basés sur des analyses statistiques, quantifient des corrélations et ils débouchent sur des modèles prédictifs utiles pour la surveillance. Les pics fugitifs de vitesse consécutifs aux infiltrations majeures, qui peuvent correspondre à des situations critiques pour la stabilité, échappent à ce modèle.

L'approche plus qualitative basée sur l'observation au jour le jour montre notamment que, pour des quantités d'eau isolées et inférieures à quelques dizaines de millimètres, les réactions sont ténues ou imperceptibles. Il s'agit généralement davantage d'une inflexion passagère de la tendance en cours que d'une accélération franche. Les réactions à ce type d'événements, comme aux infiltrations plus conséquentes, sont devenues plus rapides depuis les grands déplacements de 1986 et 1987; elles sont aussi plus précoces et plus intenses dans la partie aval du glissement supérieur que dans le glissement principal. Pour les quantités d'eau importantes, supérieures à une ou plusieurs centaines de millimètres concentrées sur peu de semaines, les accélérations sont généralement fortes et prolongées. La partie aval du glissement supérieur réagit encore plus vite et plus fort que le glissement principal avec trois principaux types de réaction :

- après une série prolongée d'épisodes pluvieux d'intensité moyenne qui n'ont pas provoqué de réaction importante, une nouvelle série d'averses, guère plus abondantes que les précédentes, déclenche enfin une accélération (printemps et début d'été 1992),

- l'accélération débute peu de jours après les fortes averses et se prolonge durant une période de ordre du mois,

- succession d'un «pic fugitif», brève accélération sur 24 ou 48 heures, décélération jusqu'à la vitesse initiale puis réaccélération prolongée du type précédent.

7. ETAT ACTUEL DE LA MODELISATION

7.1. Modèle géologique

Le glissement se développe, en pied d'un versant de migmatites hercyniennes soulevées et refracturées à l'Alpin, dans un secteur d'interfluve où elles ont été horizontalisées par un fauchage post-glaciaire de grande ampleur favorisant les déplacements transversaux.

Une barre de migmatites plus massives qui constituent l'armature du versant est interrompue aux limites du glissement.

Parmi les fractures régionales, des failles verticales subnormales au versant et des failles normales obliques favorisent le découpage à l'intérieur et aux limites de la masse mobile.

7.2. Modèle hydrogéologique

Faute de reconnaissance, l'indétermination est presque totale.

On est réduit à des spéculations appuyées sur l'observation des conditions d'alimentation ainsi que sur l'étude des réactions cinématiques aux variations temporelles de ces dernières.

En raison de:

- l'importance de l'alimentation par la surface et, vraisemblablement, par l'encaissant amont,
- la forte perméabilité liée aux failles subnormales et, dans la zone mobile, à la fracturation,
- la quasi-absence d'exutoires superficiels,
- l'épaisseur et du faciès des alluvions,
- des calculs de stabilité paramétriques,

on a admis :

- que des débits importants s'infiltrent et parcourent le massif,
- qu'ils sont drainés vers l'inféroflux de la Tinée,
- que la zone de saturation est basse dans la zone du glissement principal,
- qu'elle est beaucoup plus haute dans l'encaissant avec, en particulier, une nappe perchée dans les éluvions sur les migmatites moins désorganisées, nappe perchée pouvant se prolonger dans le glissement supérieur,
- que, si elle se réalise en surface du glissement principal, la saturation ne peut y être que très ponctuelle et temporaire
- que le transfert entre la surface, saturée ou non, et la zone de saturation en base du glissement s'effectue au travers de fissures diverses et rarement saturées.

Les notions de seuils et d'état initial revêtent une importance particulière pour tenter d'élucider les comportements quand on met en parallèle la typologie des événements cinématiques et celle des épisodes hydrométéorologiques qui les précèdent.

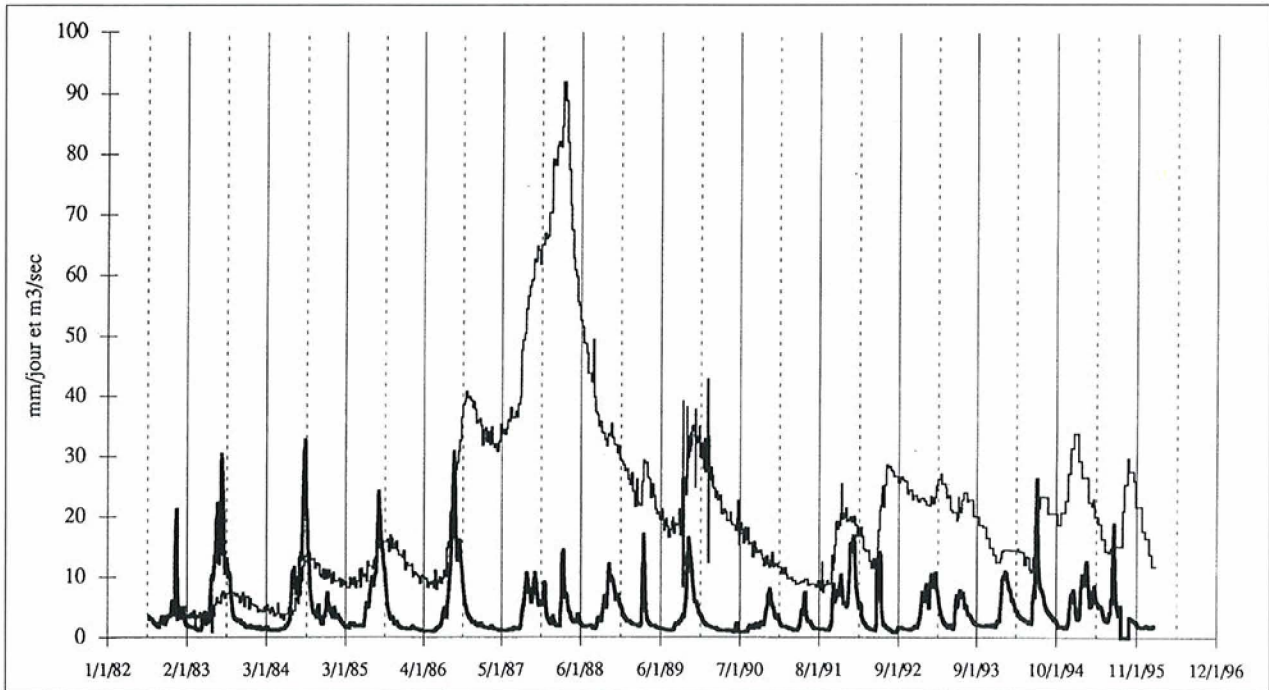
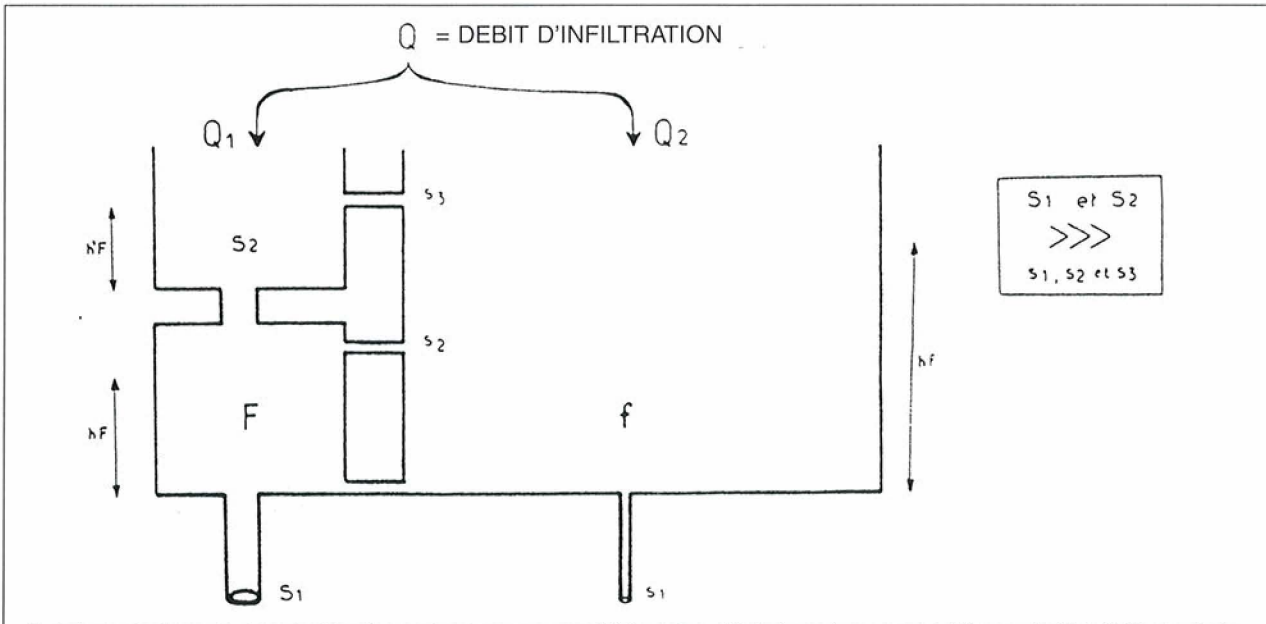


Fig. 21. Débit de la Tinée et vitesse de déplacement. Le débit de la rivière peut être, avec précautions, utilisé comme marqueur de l'eau disponible sur le site. Son rapprochement avec une courbe de vitesse montre la complexité des corrélations. Des effets de seuils, la typologie des hydrogrammes, les vitesses antérieures interviennent dans les délais, l'intensité et la durée des réactions cinématiques. Les temps de réponse ont globalement tendance à se réduire.

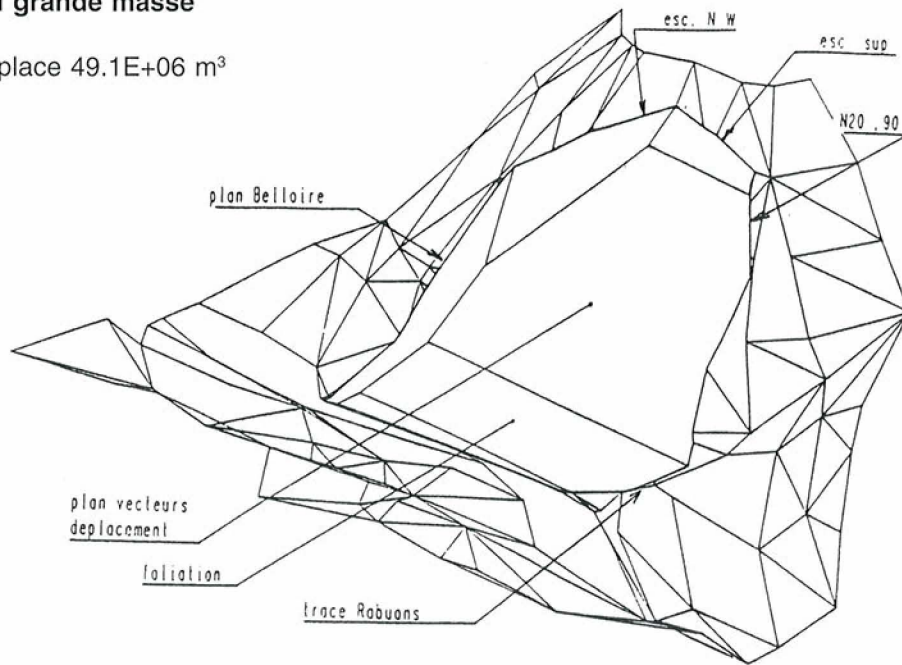


Si, de façon simpliste, on schématise l'écoulement dans le versant par celui dans un modèle à réservoir, on peut considérer que le débit d'infiltration Q transite pour une part Q_1 , dans des fractures ouvertes assimilables à un réservoir F doté d'un orifice de vidange de section S_1 , pour une part Q_2 , dans un réseau de fissures beaucoup plus ténues assimilables à un réservoir f doté d'un orifice de vidange de section s_1 très inférieure à S_1 . La "charge piézométrique" dans le glissement est représentée par la hauteur d'eau libre dans les réservoirs, laquelle dépend du rapport des débits d'entrée et des débits susceptibles d'être évacués par les orifices de vidange et du temps. Elle diffère selon le réseau de drainage considéré. Les fractures ne sont que rarement et brièvement saturées, seulement lors de l'infiltration rapide d'importantes lames d'eau. Les fissures ne reçoivent que les quantités qui ne sont pas dérivées dans les fractures, les "charges piézométriques" ne peuvent y atteindre les valeurs excessives qu'imposeraient leur faible perméabilité si l'intégralité des débits infiltrés les empruntait et qui sont incompatibles avec l'observation (absence d'émergence) et avec les calculs de stabilité, la faible perméabilité détermine la lenteur du tarissement dans ce réseau et explique la durée et la progressivité des décélérations après les épisodes de pluie ou de fonte des neiges et la permanence des mouvements. On peut admettre des étroitures (S_2) dans les fractures permettant des mises en charge temporaires locales à l'origine des près fugitifs et des communications (s_2 et s_3) entre les deux réseaux.

Fig. 22. Schéma hydraulique. Un schéma est proposé pour rendre compte de spécificités de l'hydrogéologie des milieux fracturés où semblent coexister des réseaux de drainage intervenant dans une certaine indépendance selon les débits d'infiltration.

Rupture en grande masse

Volume en place 49.1E+06 m³



Rupture en grande masse

Volume foisonne 57.8E+06 m³

bicone de pente 20 degrés

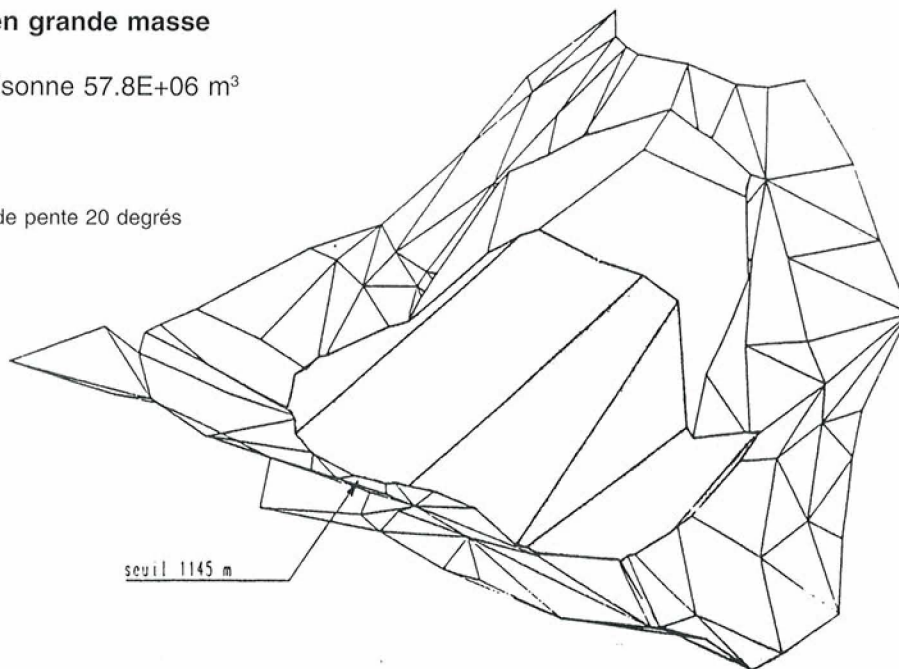


Fig. 23. Modèles géométriques. Des modèles tridimensionnels à facettes ont été utilisés pour reconstituer des géométries de glissement compatibles avec les données structurales (orientation des failles), morphologiques (pente escarpements, tracés des limites, etc.) et cinématiques (vecteurs déplacement). Ces modèles ont été ensuite utilisés pour simuler divers scénarios d'éboulement et les morphologies des bouchures susceptibles d'en résulter. Les figures représentent, après un éboulement d'ensemble, le massif restant en place sans (en haut) et avec (en bas) une des configurations envisageables pour les terres ébouleées.

7.3. Modèle hydraulique

Ne disposant pas (*c.f.* ci-dessus) d'un modèle hydrogéologique précis du massif, on ne peut non plus se référer à un modèle hydraulique général qui fait défaut pour les aquifères de versants rocheux fracturés ; une large part des circulations doit s'y effectuer dans des réseaux de fissures et fractures, de perméabilités variées et variables, qui ne se saturent que temporairement et, probablement, pas en phase.

On a encore raisonné sur la chronologie et l'amplitude des réponses cinématiques aux épisodes de pluie et de fonte des neiges et sur leurs évolutions au cours des treize dernières années.

On a proposé pour les interpréter un schéma simpliste où coexistent deux (au moins) réseaux de drainage (figure 22) :

– l'un, à perméabilité moyenne, ne transférerait qu'une part modeste des débits infiltrés, insuffisante pour provoquer des montées en charge très rapides, mais dont le tarissement se prolonge durant de nombreux mois,

– l'autre, par des fractures ouvertes, évacue rapidement une large part des eaux infiltrées et il ne peut se saturer que très temporairement, lors des

alimentations massives excédant son débit capable élevé.

Cette hypothèse est compatible avec des travaux inédits de Serratrice qui constatent l'impossibilité d'expliquer par un régime de drainage unique, d'une part, la permanence des mouvements et, d'autre part, le non-cumul des alimentations.

Enfin l'accélération de 1987 et le ralentissement qui l'a suivi ne peuvent s'expliquer sans variation des perméabilités. Ils pourraient, de plus, impliquer des modifications des niveaux de base internes avec des régimes de vidange transitoires.

7.4. Modèle de rupture

Les mouvements de surface indiquent que le mouvement, tridimensionnel, n'est ni translationnel plan, ni rotationnel circulaire.

En raisonnant sur les traces de la rupture principale en surface, sur les données structurales (pendages des foliations et des fractures principales) et sur les orientations des déplacements superficiels, on peut proposer une hypothèse de surface enveloppe profonde, continue et cylindrique, avec une pente croissant de bas en haut (figure 23).



Fig. 24. Modèles cinématiques. Des modèles en deux dimensions de déplacements de blocs rigides inclinés vers l'aval glissant sur une surface limite choisie conduisent à des mouvements superficiels compatibles à la fois avec les déformations réelles et avec l'orientation des vecteurs déplacements.

La surface limite cylindrique ainsi définie circonscrit un volume de 49 millions de mètres cubes. Des possibilités d'extension du glissement existent, par régression dans les migmatites encaissantes basculées, vers l'amont ainsi que, latéralement, vers le Nord à la faveur des accidents Nord 60°Est.

Sur cette surface, on peut caler un modèle bidimensionnel de déplacement de tranches rigides séparées par des surfaces planes inclinées vers l'aval (figure 24). Ce modèle, dont la représentativité peut être discutée, conduit à des déplacements superficiels analogues en orientation et en amplitude aux déplacements réellement observés aux différents niveaux.

Rupture en cours

Les désordres semblent avoir régressé au cours du temps, depuis le vallon de Rabuons vers le Nord-Ouest ainsi que de l'aval vers l'amont du versant, et avoir, ce faisant, progressivement évolué d'un stade initial de foisonnement gravitaire sans rupture limite continue (ou stade de rupture interne avec dilatance) au stade final de glissement rotationnel de matériaux relativement homogénéisés par le broyage, en passant par des stades intermédiaires avec surface limite polyédrique et intenses fracturations et déplacements à l'intérieur de la masse mobile (figure 25).

Les déformations de la masse mobile constatées en surface impliquent pour un matériau rocheux des ruptures internes en sus de la rupture limite avec l'encaissant, quand elle existe.

L'inertie de la barre de migmatites d'Iglière, supérieure à celle des gneiss sus et sous-jacents avec une maille de discontinuité décimétrique, introduit une discontinuité déterminante et ses ruptures successives se répercutent sur la localisation de la rupture principale et ses migrations en surface (figure 26).

Ruptures prévisibles

Des analyses prévisionnelles ont été réalisées par L. Rochet pour simuler la propagation des débris rocheux dans plusieurs scénarios d'éboulement en masse, celui de l'ensemble du volume déstabilisé et ceux des parties sommitales (figures 27 et 28). Ces analyses sont utilisées en prévention pour circonscrire des zones exposées, positionner les ouvrages de déviation, etc.

NB - D'autres études théoriques ont été conduites sur le sujet par J. Locat ainsi que J. Sousa et B. Voight.

7.5. Modèle géomécanique

Le déclenchement du glissement a été favorisé par les effets du basculement : fracturation et perméabilité accrues, altération, horizontalisation

des foliations favorable aux mouvements transversaux.

La prépondérance de la commande hydraulique s'est manifestée dans les modulations du régime des déplacements constatés en treize ans. Elle n'est pas exclusive.

Des calculs de stabilité appuyés sur le modèle géométrique évoqué ci-dessus ont été réalisés (Serratrice, 1990). Dans un tel phénomène, où les données souterraines, notamment la piézométrie, nous échappent et où la rupture est acquise et active en permanence, ils n'ont pas de réelle valeur diagnostique pour la stabilité à un moment donné. Leur intérêt réside dans la pondération paramétrique de différents facteurs:

- déformations intervenues depuis 1970,
- valeur de l'angle de frottement,
- retrait et adjonction des parties hautes à la masse mobile,
- rupture d'un glissement emboîté sous la barre au Sud-Est,
- niveaux piézométriques.

Avec une énergie cinétique négligeable (10^3 Joules), une part importante de l'énergie absorbée par le glissement (10^9 joules d'énergie potentielle par jour) doit être dissipée par les frottements, ruptures et broyages induits par les déplacements internes à la masse mobile. Cette part, exclusive au début, diminue continuellement au cours du processus et la résistance mécanique globale au mouvement tend, in fine, vers la valeur résiduelle de la résistance au cisaillement selon la rupture limite tant que l'extension du glissement ne varie pas.

L'enchaînement des événements a fait apparaître des rétroactions des mouvements sur la stabilité du massif qu'ils affectent.

Le régime des déplacements à un moment donné résulte du jeu de facteurs, favorables et défavorables, parfois concourants et parfois antagonistes:

- l'effet des circulations d'eau souterraines soumises aux aléas météorologiques, saisonniers comme pluri-annuels ; les impulsions principales requièrent des débits importants, disponibles à la fonte des neiges et lors de pluies intenses et prolongées,
- l'augmentation de la perméabilité par l'ouverture des fissures plus ou moins progressive, rapide quand elle résulte de la dilatance de fractures jeunes,
- la diminution des perméabilités dans les zones de compression aval ou par colmatage des fissures par les fines de lessivage,
- des régimes d'écoulement transitoires consécutifs à des ruptures internes,
- la réduction de la proportion du poids moteur du fait de l'évolution continue déprimant le sommet (cinquante mètres depuis 1982) et gonflant le pied,
- l'augmentation du poids moteur par les régressions abondant la masse mobile en tête,

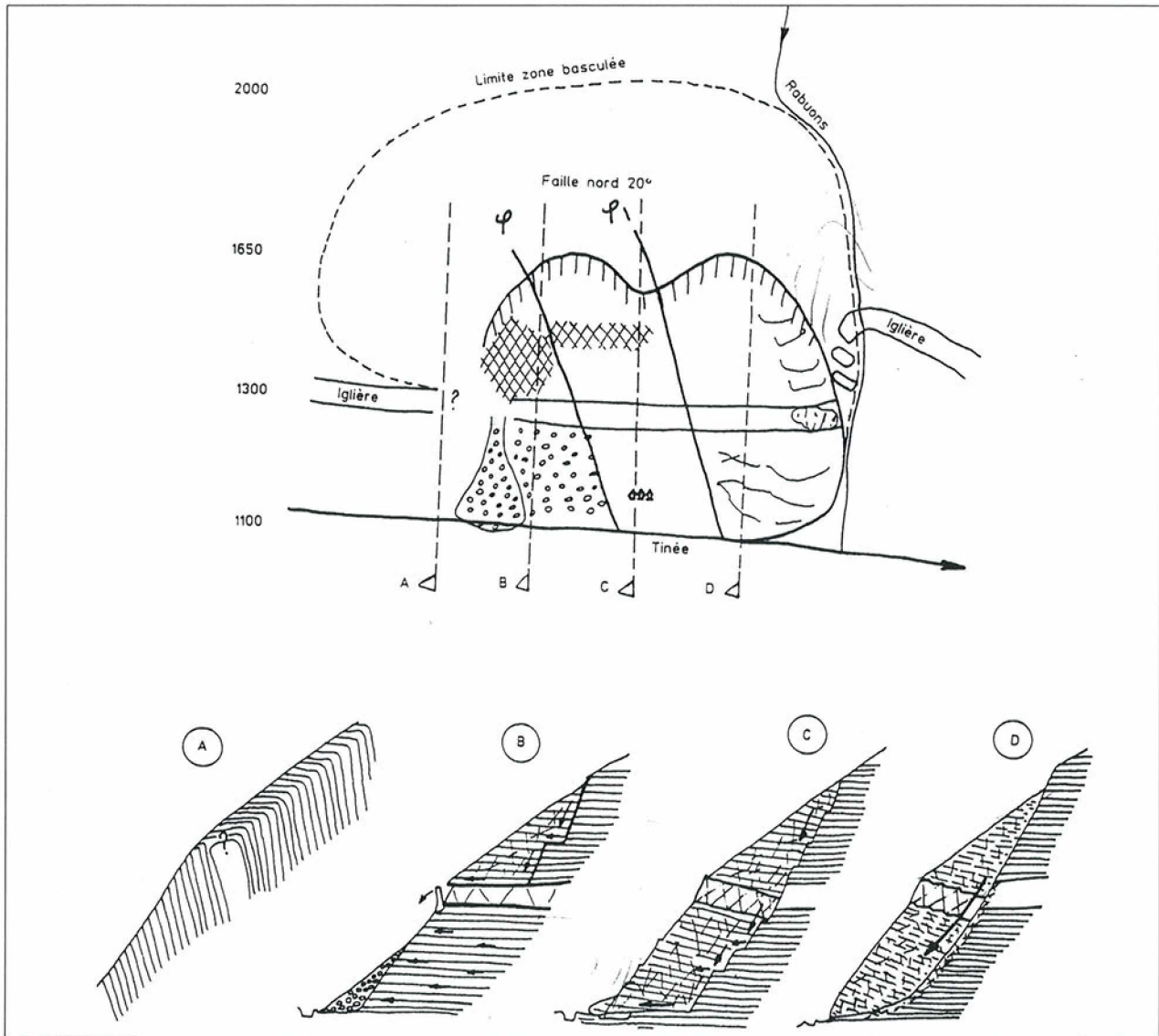


Fig. 25. Différents stades du glissement. Le glissement s'est probablement développé progressivement depuis le vallon de Rabouons au Sud-est vers le Nord-ouest. Les différents compartiments, séparés par les accidents, en sont à des stades d'évolution successifs. Le schéma présente l'état du versant en 1986: basculement limité (profil A), foisonnement gravitaire sous la barre non encore rompue (profil B), glissement polyédrique fruste d'ensemble (profil C), glissement rotationnel dans un matériel très fracturé (profil D).

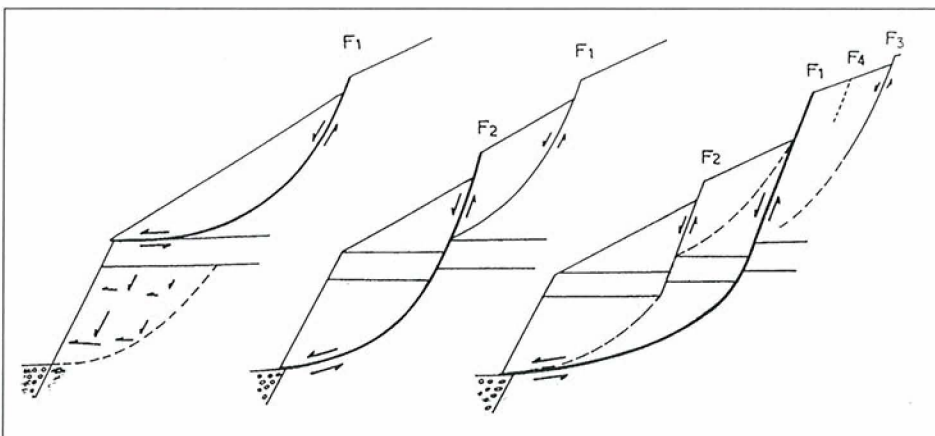


Fig. 26. Schéma d'un possible mécanisme de régression. Une explication basée sur un recul des ruptures de l'armature de gneiss de la série d'Iglière, modifiant les limites imposées aux déplacements, est proposée pour rendre compte de l'activation successive des fissures amont et aval observée dans les parties haute du glissement.

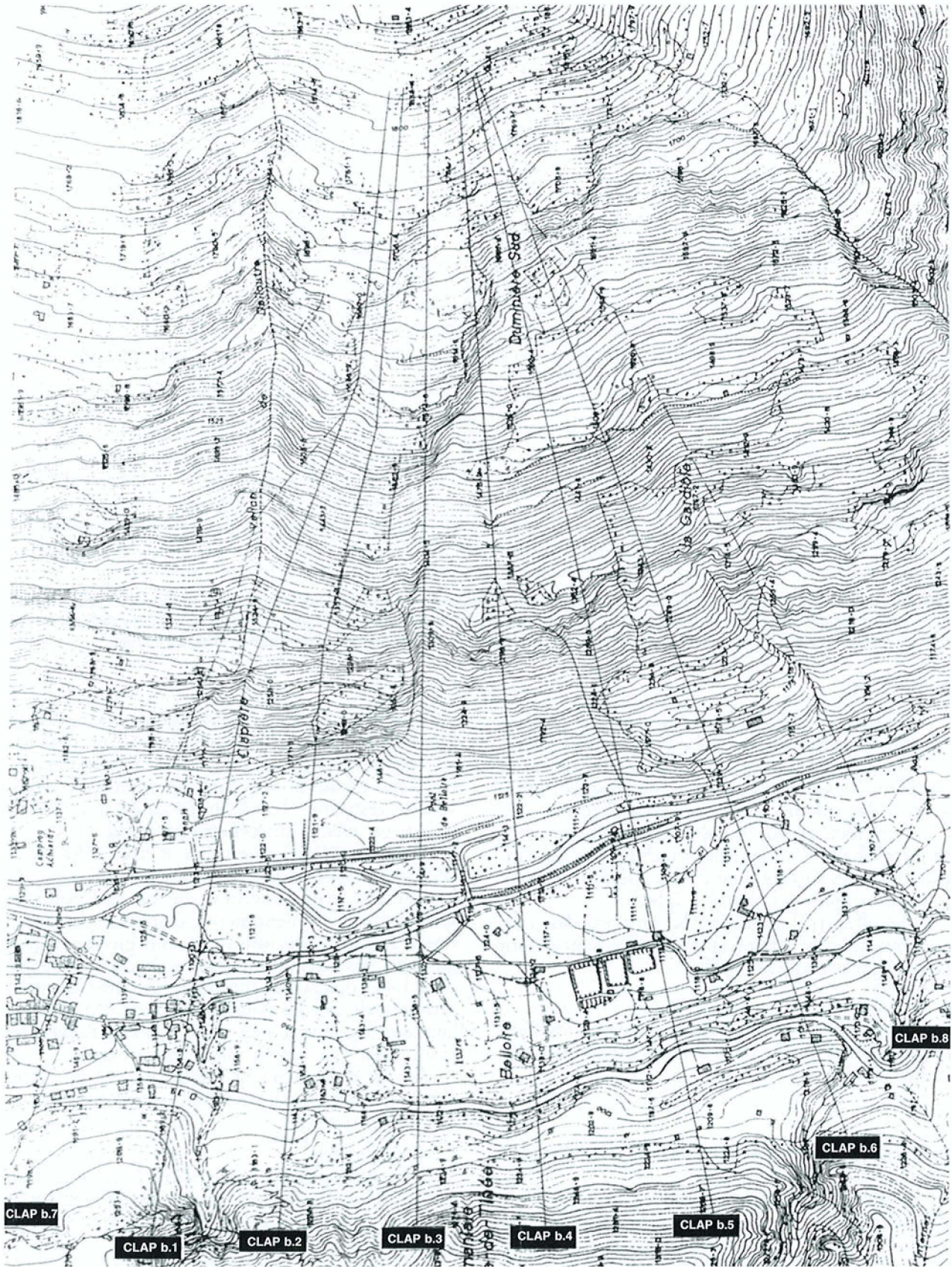


Fig. 27. Analyse de propagation - Trajectoires. La propagation des matériaux éboulés est calculée sur des profils correspondant aux trajectoires déterminées en fonction de la morphologie superficielle.

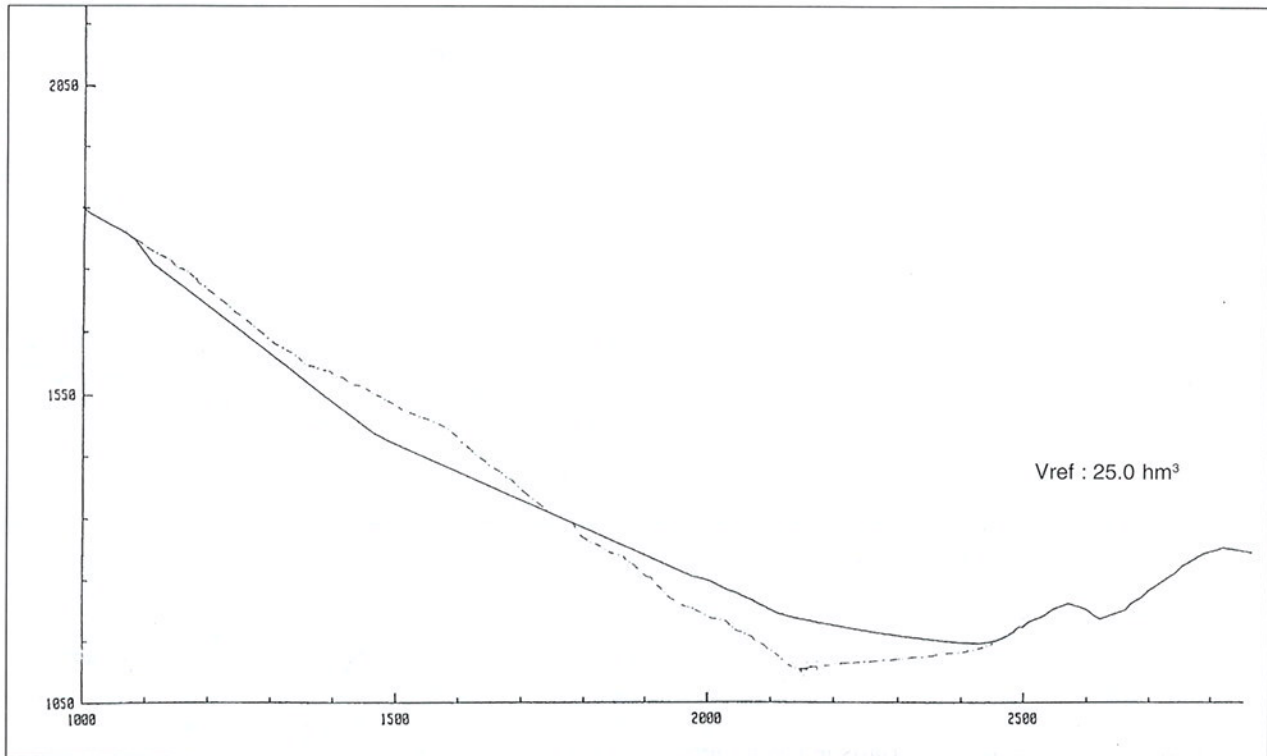


Fig. 28. Analyse de propagation - Profils avant de après l'éboulement en masse. Dans l'hypothèse maximaliste d'un éboulement en masse de l'ensemble du volume actuellement mobile, les matériaux pourraient se propager jusqu'au delà de la rupture de pente en pied de rive droit, avec un cote de déversement 40 mètres plus haut que le thalweg actuel.

- la diminution du poids moteur par les blocages provisoires en tête (lobe N-W depuis 1986),
- la réduction progressive de la résistance au cisaillement selon les surfaces de rupture limite jusqu'à des valeurs résiduelles constantes,
- la réduction plus brutale de la résistance mécanique globale au mouvement induite par les ruptures internes surtout quand elles affectent des secteurs clefs comme la barre d'Iglière,
- les effets tridimensionnels : rapports des compartiments entre eux et, surtout, avec l'encaissant stable non basculé au N-W,
- etc.

L'apparence parfois erratique du comportement du glissement résulte de l'ignorance de nombre de ces facteurs.

8. EVOLUTION DE L'ACUITE DU RISQUE

Le versant actuel est loin d'une position d'équilibre : des déplacements considérables, pluridécimétriques à hectométriques, sont à attendre, en pied et en tête, avant stabilisation (figure 29).

Ces déplacements peuvent s'effectuer jusqu'à leurs phases ultimes suffisamment «lentement»

(mètres par jour ou même par heure) pour ne pas menacer la sécurité des personnes et ne détruire les constructions, par effet direct des matériaux rocheux déplacés, que dans un périmètre relativement restreint, pluridécimétrique à hectométrique. C'est même un scénario probable.

D'autres scénarios ne peuvent être exclus : tous ceux qui comportent une ou plusieurs phases d'éboulement brutal mettant en jeu des volumes importants. Ces phénomènes, dispersant les matériaux solides avec une forte énergie cinétique, auraient des effets destructeurs directs plus étendus. La propagation intéresse une aire d'autant plus grande que les volumes élémentaires s'ébouillant simultanément sont importants, le maximum étant atteint par un éboulement en masse.

En cas d'éboulement brutal, en sus de l'effet *direct* des matériaux rocheux, on peut envisager des effets *indirects*:

- simultanés:
 - le déplacement violent d'un volume de fluide (air et, éventuellement, eau occupant le thalweg) étendant largement les destructions par effet de souffle,
 - la bouchure de la vallée par un barrage de terres jusqu'à une cote de déversement variable, pouvant atteindre 1130 à 1160 m,

- différés:

- en amont, remontée des eaux retenues par le barrage,
- en aval, une onde de crue dans la vallée en cas de rupture rapide du barrage par déversement ou par renard.

Il faut souligner que les effets hydrauliques, inondation amont et onde de crue aval, sont également à craindre dans le cas d'une bouchure édifée progressivement par des mouvements «lents».

Les déplacements majeurs ont été considérés comme imminents en fin 1988. Ils ont été différés avec le ralentissement début 1991 mais restent prévisibles à l'horizon de quelques années ou de la décennie.

Sauf s'ils sont déclenchés par une secousse sismique, les mouvements majeurs devraient être précédés par des manifestations cinématiques et morphologiques (fissuration, grenailage, etc) constituant autant d'indices annonciateurs de l'imminence du phénomène. La durée entre ces manifestations et le phénomène devrait être de quelques jours. Ce «préavis» peut être réduit lors des mises en charge rapides induites temporairement par les plus fortes infiltrations (*cf.* «pics fugitifs»). La détection de tels indices ne devrait, dans le cas général, pas permettre de déterminer s'ils annoncent pour les phases ultimes des déplacements majeurs des cinématiques «lentes» ou des cinématiques rapides.

Les périodes humides (fonte des neiges, fortes pluies) sont les plus propices aux mouvements majeurs et c'est durant ces périodes qu'ils sont les plus probables. Lorsque les alimentations sont massives, le tout début des périodes d'infiltration peut être particulièrement critique («pics fugitifs»). Toutefois les mouvements majeurs peuvent être aussi déclenchés inopinément en période sèche par d'autres facteurs que le facteur hydraulique tels que des ruptures fragiles soudaines dans des secteurs clefs.

On peut être affirmatif sur l'amplitude au moins pluridécimétrique des déplacements majeurs prévisibles avant stabilisation. Par contre les indéterminations demeurent nombreuses sur leurs modalités et leurs circonstances :

- les ultimes mouvements pourront être «lents» ou bien brutaux, d'ensemble ou bien pluriphasés ;
- ils sont à attendre dans un avenir plus ou moins lointain [mois, année(s), décennies(s), ... ?] ;
- ils peuvent se produire durant un épisode, *a priori* défavorable, de fortes pluies ou de fonte de neige, mais des ruptures int peuvent aussi les déclencher, inopinément, pendant la saison sèches considérées comme moins dangereuses ;
- le préavis entre les premiers indices annonciateurs et le déclenchement, évalué empiriquement à quelques jours, peut varier en plus ou en moins ;
- etc.

Ces indéterminations découlent, en sus de la

complexité inhérente à tout mouvement de versant naturel de grande ampleur, du fait que n'avons d'information directe que sur la surface et que nous n'en possédons pas en profondeur [piézométrie, débits souterrains, géom de la ou des rupture(s) limite, *etc.*] qui permettrait de caler les modèles.

9. VULNERABILITE

La vulnérabilité des différents secteurs est fonction de leur position par rapports aux périmètres concernés par les conséquences des phénomènes envisageables (*cf.* ci-dessus):

- chutes de blocs isolés avant déplacements majeurs (phénomènes d'ores et déjà relativement fréquents),
- éboulements, avant déplacements majeurs, de volumes importants (milliers à millions de mètres cubes) émanant des parties supérieures du glissement,
- déplacements majeurs à cinématique «lente»
- déplacements majeurs à cinématique rapide
 - partiels
 - d'ensemble
 - d-b-a* pluriphasés
 - d-b-b* en masse (simultanés pour tout le volume)
- effets de souffle pouvant accompagner les déplacements à cinématique rapide (notamment *b* et, surtout, *d-b-b*)
- chutes de blocs isolés sur les talus résultants après déplacements majeurs
- éboulements sur les talus résultants après déplacements majeurs et émanant de zones amont déstabilisées par ces derniers
- remontée du niveau de l'eau retenue en amont une bouchure due à *c* ou *d*
- onde de crue en aval de l'eau libérée par la rupture de la bouchure
- chutes dans une retenue d'eau des matériaux mobilisés par le phénomène *g*.

On s'est efforcé d'apprécier et cerner, fût-ce de façon approximative et subjective, les périmètres correspondant à ces différents phénomènes. On s'est basé sur l'observation (pour *a*) ainsi que sur des analyses de propagation (Louis Rochet) et sur des modélisations des massifs rocheux par blocs diagrammes (Jean-François Serratrice) en tenant compte de la topographie de la rive droite.

Ces méthodes ne fournissent d'éléments rationnels, quoique très approximatifs, que pour les aires menacées par les phénomènes qui mettent en jeu des éléments solides (*a, b, c, d*). Par contre on ne sait pas évaluer et circonscrire l'impact potentiel des déplacements de fluides (*e* et *j*) qui intéressent, dans les pires des cas, des surfaces considérables (*cf.* éboulement de Val Pola en 1987).



Fig. 29. Le village et le pied du glissement en mars 1992. La photographie est prise de l'amont vers l'aval, dans l'axe de l'ancienne route détruite en rive gauche et elle montre la proximité entre le village et le glissement. L'avancée du versant repousse la rivière vers la rive droite où un route provisoire a également été détruite.

On a ainsi défini quatre zones principales:

- une zone 1 de «risques majeurs actuels», correspondant aux éboulements sur le talus actuel, d'ores et déjà fréquents; elle couvre une largeur inférieure à 200 m,

- une zone 2 de «risques majeurs prolongés durables», correspondant aux glissements de pied progressifs et aux éboulements élémentaires associés; elle tangente le village en amont et, en aval, recouvre une zone d'habitat dispersé en rive droite de la Tinée,

- une zone 3 de «risques majeurs temporaires», correspondant aux effets directs et indirects (souffle) d'un éboulement d'ensemble brutal; elle englobe actuellement l'intégralité du village (environ 1500 habitants permanents),

- une zone 4 de «risques immédiats en raison d'un éboulement imminent d'une part importante du lobe Nord-Ouest»; elle étend la zone 2 à un camping et des habitations en rive gauche de la Tinée.

L'aire menacée par l'onde de crue (phénomène *i*) a été étudiée par le BRGM dans le cas d'un effacement instantané de la bouchure.

9.1. Accès et réseaux

L'ancienne route d'accès à Saint-Etienne-de-Tinée, à Auron et aux Alpes de Haute Provence par le col de la Bonette et une déviation provisoire édifiée en 1985 ont été détruites par l'avancée du versant. La route actuelle a été construite en 1986 en rive droite, à une altitude minimale de 70 mètres par rapport au thalweg face au glissement, et devrait être (sauf ponctuellement?) hors d'atteinte des débris rocheux même lors d'un éboulement en masse.

Les réseaux d'électricité et de téléphone, initialement en rive gauche, ont été déplacés en rive droite au niveau de la route ou au-dessus.

La vulnérabilité de ces infrastructures a ainsi été réduite et, s'ils étaient atteints, ils pourraient être remis en service au prix de travaux relativement mineurs et rapides.

9.2. La Tinée

Il a été estimé que la cote de déversement des bouchures susceptibles d'être provoquées par le glissement pouvait atteindre 1130 à 1160 mètres. Une grande partie du village, construit entre 1125 à 1170 mètres, pouvait être inondée par les eaux retenues.

L'étude des vitesses de remontées du plan d'eau selon les débits a montré que les délais avant inondation, déversement et éventuellement rupture avec onde de crue en aval, étaient insuffisants pour la mise en œuvre d'interventions curatives post-bouchure et une galerie de dérivation préventive

a été construite, avec une capacité de 100 mètres cubes par seconde, soit le débit de pointe de la crue décennale (coût: 400.000.000 F).

Les risques indirects d'ordre hydraulique liés à la Tinée ne subsistent donc que pour les débits supérieurs.

9.3. La population

La population résidant dans les aires menacées est vulnérable dans la mesure où elle n'est pas prévenue et évacuée en temps utile avant le déclenchement de déplacements majeurs. Le délai nécessaire, après une alarme, pour évacuer la population est fonction de son information, de sa préparation, des performances des services de secours, des circonstances, etc. Il ne paraît pas pouvoir être inférieur à 24 heures.

La sécurité de la population est donc directement dépendante de la fiabilité du système de surveillance.

9.4. Les biens mobiliers et immobiliers

La mise à l'abri des biens mobiliers (ou de certains d'entre eux) requiert probablement des délais supérieurs.

Leur vulnérabilité dépend des durées entre les moments où les indices annonciateurs sont perceptibles, où ils sont perçus, où l'alarme est donnée et le déclenchement d'un mouvement majeur. Elle aussi dépend donc très directement de la surveillance.

Par nature, l'immobilier restera exposé dans les aires menacées.

10. PREVENTION ET PROTECTION

La stratégie de prévention des risques induits par le glissement comporte trois volets:

- des mesures préventives préalables,
- la mise en œuvre d'une surveillance,
- l'établissement et l'application d'un plan de secours.

10.1. Mesures préventives préalables

Chronologiquement elles ont principalement comporté:

- une zone non edificandi dans la basse vallée face au glissement définie par le Plan d'occupation des sols en 1982 et révisée en 1995,
- la déviation de la route d'accès en rive droite (1986),
- la déviation des réseaux du téléphone et de l'alimentation en électricité (1986),
- quelques mesures d'ordre hydrologiques (mise

à l'abri de la station de jaugeage de la rivière) et topographiques (mise en place d'un réseau géodésique robuste encadrant le site, plan à grande échelle destiné à faciliter les interventions post-déplacement, MNT à grande échelle du fond de vallée permettant de rapidement connaître la géométrie de la bouchure ainsi que la capacité de retenue pour différentes cotes de plan d'eau),

et, surtout,

– la construction d'une dérivation souterraine de la rivière pour les débits inférieurs ou égaux au débit de pointe de la crue décennale (1989 à 1993).

10.2. Surveillance

Le système installé en 1982 a permis de suivre les modulations de l'activité du glissement et de gérer la «crise» de 1987 durant laquelle les vitesses ont durablement dépassé 10 centimètres par jour et l'évacuation a été envisagée à plusieurs reprises.

L'actuelle surveillance, décidée suite à cette crise (et à la catastrophe de Val Pola qui a contribué à accréditer les risques auprès des autorités administratives), contrôle la dangerosité du phénomène et, de par sa fonction de prédiction, doit jouer un rôle essentiel dans le déclenchement des mesures de sauvegarde et du plan de secours.

Il a notamment permis de prévoir des éboulements localisés intervenus durant l'été 1993 et de faire, à cette occasion, mettre en vigueur puis rapporter des mesures particulières de protection justement proportionnées.

10.3. Plan de secours

Outre l'organisation générale des secours, le Plan particulier de secours et d'évacuation de Saint-Etienne-de-Tinée, édicté en 1988 et périodiquement mis à jour, prévoit des interdictions et évacuations graduées en fonction de la surveillance et du zonage de risques (*cf.* ci-dessus).

La zone de «risques majeurs actuels» doit être interdite à la première alerte.

La zone de «risques majeurs temporaires» (comprenant le village) a vocation à être évacuée dès que l'on décèlerait les indices d'une rupture imminente, quelque soit son mécanisme apparemment prévisible.

Le territoire compris entre la zone de «risques majeurs temporaires» et la zone de «risques majeurs prolongés durables» (incluant la majeure partie du village) pourrait être réoccupé si l'on acquiert la certitude que le mouvement est un mouvement à vitesse permanente modérée.

La zone de «risques immédiats liés à l'éboulement imminent d'une partie du lobe Nord-Ouest»

est à évacuer lorsqu'on y constate des accélérations.

II. STRUCTURE DE DECISION

L'application des dispositions prévues par le Plan particulier de secours et d'évacuation de Saint-Etienne-de-Tinée ou des autres mesures de prévention qui pourraient s'avérer nécessaires relève des autorités préfectorale et municipale.

Ces autorités sont informées en permanence des résultats de la surveillance gérée par le CETE méditerranée.

Ce dernier, service extérieur du Ministère de l'Équipement, agit comme prestataire de service pour le compte de la Préfecture des Alpes-maritimes, maître d'ouvrage au nom de l'État, sous la maîtrise d'œuvre de la Direction départementale de l'équipement.

Le maître d'ouvrage pourra s'appuyer, notamment en surveillance renforcée et haute surveillance lors des périodes critiques, sur l'avis d'un collège d'experts nationaux qui doit être organisé par le Ministère de l'Environnement pour pouvoir le conseiller.

BIBLIOGRAPHIE

BLANC A., DURVILLE J.-L., FOLLACCI J.-P., GAUDIN B., PINCENT B. (1987), *Méthodes de surveillance d'un glissement de terrain de très grande ampleur: La Clapière, Alpes-Maritimes, France*. Bulletin AIGI, 35, p. 37-46.

FOLLACCI J.-P. (1987), *Les mouvements du versant de La Clapière à Saint-Etienne-de-Tinée (Alpes-mar.)*. Bulletin de liaison des Ponts et Chaussées, 150/151, p. 39-54.

FOLLACCI J.-P., GUARDIA P., IVALDI J.-P. (1988), *Le Glissement de la Clapière (Alpes-Maritimes, France) dans son cadre géodynamique*. Comptes rendus du 5^{ème} symposium international sur les glissement de terrain, p. 1323-1327.

RAT M. (1988), *Problèmes posés par la prévision de la rupture des mouvements de terrain: La Clapière*. Comptes rendus du 5^{ème} symposium international sur les glissement de terrain, Lausanne, p. 1503-1504.

GERVREAU E., DURVILLE J.-L., SÈVE G. (1992), *Relations entre précipitations et cinématique des glissements de terrain déduites du suivi des sites instables*. Comptes rendus du 6^{ème} symposium international sur les glissement de terrain, Christchurch, p. 409-414.

SOUSA J., VOIGHT B. (1992), *Computational flow modeling for long-runout landslide hazard assessment, with an example from Clapière landslide, France*. Bulletin of the association of Engineering Geologists, 24, p. 131-150.