

Contrat de plan Etat – Région Rhône – Alpes (1994 – 1999)
Programme « Risques Naturels »
Journées « Bilan des Travaux » 11- 13 avril 2000

Thème : mouvements de terrain

PROJET

**« Etude des mécanismes de déformation et de rupture des
versants rocheux . Le cas de Séchilienne. »**

Pierre Antoine, André Giraud, Jean-Marc Vengeon
Lirigm, Université Joseph Fourier Grenoble 1
BP 53 – 38041 Grenoble Cedex 9

Henri Evrard, Louis Rochet
Centre d'Etudes Techniques de l'Equipement de Lyon
109 avenue Salvador Allende, Case n°1, 69674 Bron Cedex

Jean-Marc Vengeon
Lirigm
BP 53
38041 grenoble Cedex 9
Tel : 04 76 82 80 68
E_mail : jmvengeo@ujf-grenoble.fr

1 CONTEXTE D'ETUDE

Le secteur des Ruines de Séchilienne (en rive gauche de la Romanche entre Vizille et Bourg d'Oisans, Isère) est le siège d'un grand mouvement de versant en terrain métamorphique (micaschistes). L'instabilité se développe sur la majeure partie du versant (Antoine, 1994), jusqu'à la crête, et mobilise un volume de plusieurs dizaines de millions de m³ (Figure 1). Les déplacements sont mesurés et enregistrés, avec des moyens importants et croissants, par le CETE de Lyon, depuis 1985 (Evrard et al., 1990 ; Rochet et al., 1994)). Cette quantité d'information, alliée au creusement d'une galerie de reconnaissance et à l'ampleur du risque induit par la menace de rupture, fait de ce site un objectif de recherche exceptionnel au plan européen, riche en enseignements de portée plus générale (Giraud et al. 1990).

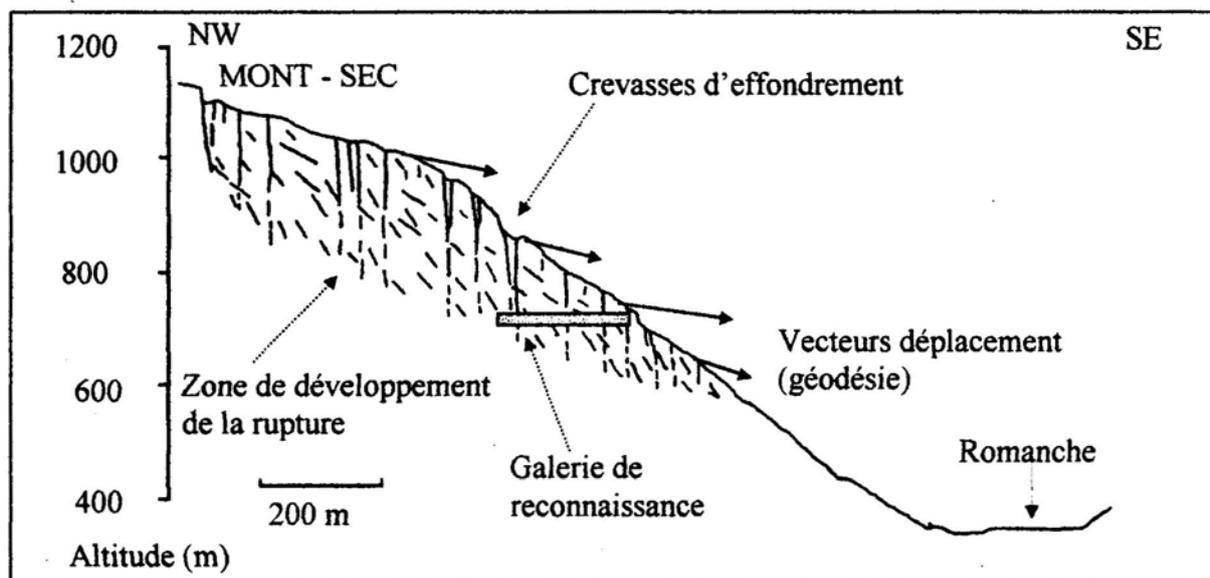


Figure 1: Coupe schématique du versant des Ruines de Séchilienne.

Notre recherche (Vengeon, 1998), qui vise à comprendre la déformation observée, a été conduite selon une triple approche. Nous allons résumer les objectifs et les résultats obtenus dans les domaines de la **géologie**, de la **géomécanique** et de l'**hydrogéologie**.

2 APPROCHE GEOLOGIQUE

Objectif : l'approche géologique consiste à préciser la structure du massif rocheux et l'histoire de sa déformation, dans le contexte de l'histoire de la chaîne alpine.

Méthode : étude géologique et structurale multi-échelle :

- cartographie géologique et géomorphologique (échelle 1/2000 et 1/5000) ;
- analyse structurale par photointerprétation de clichés aériens ;
- construction des grandes structures par la cartographie de la foliation ;
- analyse structurale systématique en surface et en profondeur (galeries) ;
- observations sur échantillons (lames minces).

Résultats : on a ainsi pu préciser l'influence du contexte géologique sur la localisation et la cinématique de la déformation :

- le caractère discontinu de la fracturation à pendage aval est peu compatible avec l'existence d'une surface de glissement localisée, au stade actuel de la déformation du massif ;
- l'existence des systèmes de fracturation NE-SW détermine un découpage du massif en lanières. Les vecteurs déplacement sont orthogonaux à ces structures, qui contrôlent la déformation du versant ;
- l'étude détaillée de la foliation a mis en évidence une grande structure antiforme dans le haut du versant, qui permet d'expliquer les différences de cinématiques dans la masse en mouvement.

3 APPROCHE GEOMECHANIQUE

Objectif : pour préciser le mécanisme des mouvements, nous avons cherché à reconstituer la déformation du massif depuis le retrait des glaciers, il y a 10000 à 15000 ans.

Méthode : pour ce faire, nous avons réalisé une simulation numérique (Vengeon, 1996) en deux dimensions (déformations planes) par la méthode des éléments distincts (code UDEC). Le creusement de la vallée et le retrait des glaciers ont ensuite été simulés par plusieurs phases d'excavation.

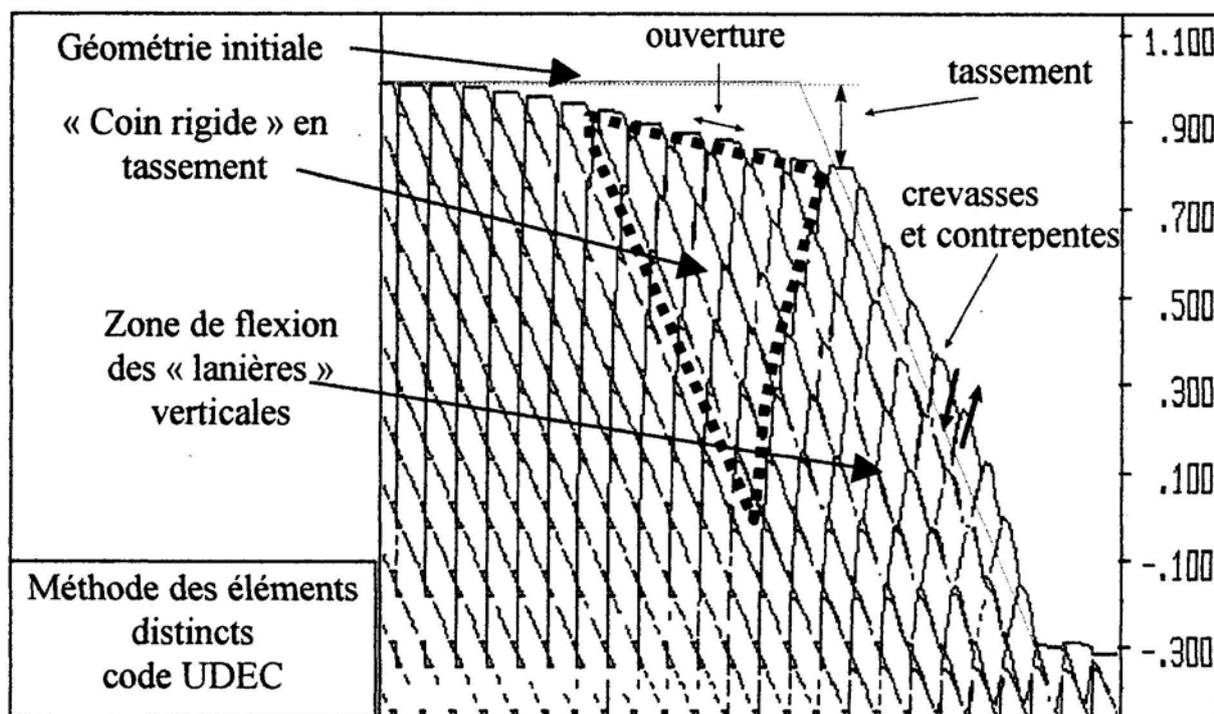


Figure 2 : Modèle de déformation sans surface de rupture.

Résultats : nous avons ainsi pu proposer un mécanisme de déformation en accord avec les observations morphologiques et les principales particularités des mesures de déplacement en surface et en galerie, à savoir :

- l'existence du tassement sommital du Mont-Sec ;
- la présence de contrepenches amont sur les grandes fractures transverses ;
- l'ouverture de ces grandes fractures ;
- la faible inclinaison des vecteurs déplacement et l'atténuation des déplacements en pied de versant ;
- le mouvement relatif des blocs en profondeur induisant l'ouverture des fractures inclinées vers la vallée et le cisaillement de celles inclinées vers l'amont.

Dans ce modèle, une des conséquence des mouvements est l'apparition d'une très forte anisotropie hydraulique de la zone en mouvement (voir le modèle hydraulique ci-dessous), avec une conductivité parallèlement à la pente bien supérieur à la conductivité perpendiculaire au versant.

On note également une accumulation de contraintes au pied de chaque « ressaut » du versant final et une sollicitation en flexion de chaque bloc rocheux élémentaire. Celle-ci se traduit par des efforts de traction sur la face externe (côté intérieur du massif) et des efforts supplémentaires de compression sur la face interne (côté vallée). Dans le massif réel, ce mode de sollicitation est responsable de la propagation de la fracturation secondaire dans le massif rocheux, qui peut amener à la rupture au sein d'un bloc élémentaire. Ce phénomène, qui n'est pas modélisé dans ce calcul, est responsable de la progression irréversible de la dislocation du massif rocheux. Il est très sensible aux pressions hydrauliques.

Application de la modélisation : ces calculs permettent de penser que l'état actuel du massif n'est que « métastable » et que toute perturbation des facteurs d'équilibre, globale ou locale, est susceptible de réactiver fortement la déformation : altération, écoulements et pressions hydrauliques dans les fractures, rupture locale d'un ressaut, reprise d'érosion... On observe d'ailleurs que la zone la plus sollicitée en traction est située près du pied du versant, à l'aplomb du premier ressaut. Bien que la plus grande partie de la déformation ait été limitée dans le haut du versant, le pied du versant reste donc la zone la plus critique. Toute modification des conditions d'équilibre de cette zone aurait certainement des conséquences importantes pour la stabilité de l'ensemble du versant. Dans la pratique, ces considérations ont amené les responsables à intensifier la surveillance géodésique du bas du versant, où de faibles déplacements sont maintenant perceptibles.

4 APPROCHE HYDROGEOLOGIQUE

L'influence des écoulements souterrains sur la stabilité d'un versant est bien admise. A Séchilienne, l'auscultation a mis en évidence des corrélations étroites entre pluviométrie et déplacements, significatives d'une « commande hydraulique. Dans certains cas, ces données ont servi à prédire l'évolution de versants instables vers la rupture globale (Gervreau, 1991), ce qui n'est pas toujours possible. La caractérisation des apports hydriques dans le massif et dans la zone active ainsi que les conditions de couplage hydromécanique avec la déformation sont donc deux domaines d'étude particulièrement importants. Cependant, l'hydrogéologie des massifs rocheux est complexe et les méthodes d'investigation dans ce domaine restent à développer.

Objectif

L'objectif de l'étude hydrogéologique est de mieux approcher les circulations d'eau dans le massif et caractériser la « commande hydraulique », révélée par les mesures du CETE de Lyon, sur lesquelles on peut observer une alternance de périodes rapides en saison humide et de périodes lentes en saison sèche. Les années « sèches » sont en outre marquées par une réduction générale de la vitesse d'ouverture des fractures.

Méthode

Nous avons procédé à des études hydrogéochimiques sur les écoulements observés en surface sur l'ensemble du massif, et en galerie dans la zone instable. Plusieurs méthodes ont été utilisées, dont les informations partielles convergent pour donner une image du fonctionnement hydraulique du massif.

Méthode	Objectifs
Analyses chimiques	Connaître la nature des terrains traversés
Analyses isotopiques	Caractériser le type d'écoulement
Oxygène	⇒ aquifère avec ou sans mélange, altitude moyenne de l'aire d'infiltration, temps de transit moyen
Tritium	⇒ « âge moyen » des eaux
Enregistrements de conductivité et débit des venues d'eau en galerie	Par des corrélations avec la pluviométrie et les déplacements, déterminer si ces écoulements participent à la « commande hydraulique »

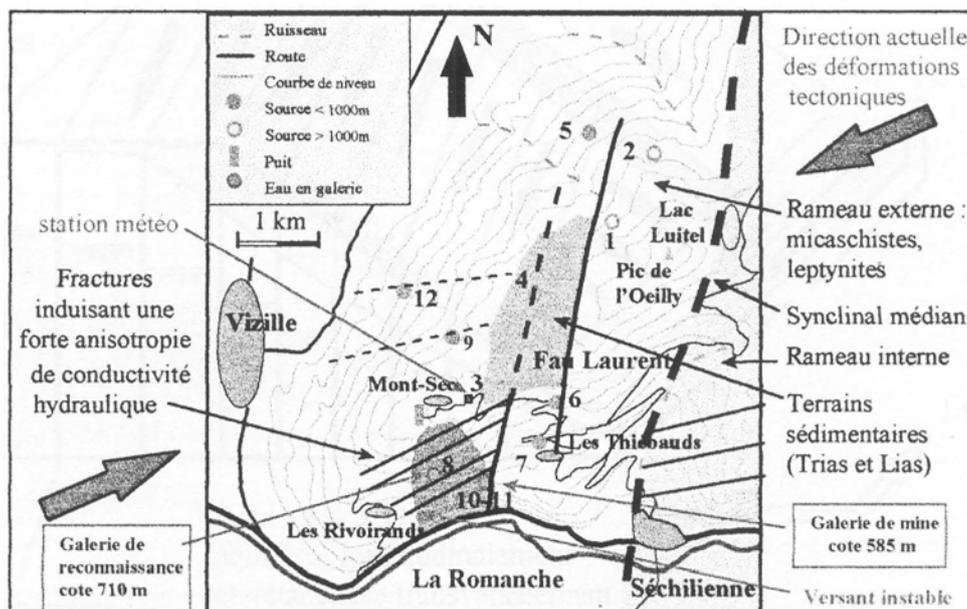


Figure 3 : Plan de situation des sources du Mont-Sec et des venues d'eau en galerie.

Résultats

Les mesures répétées durant un an nous ont permis de proposer un modèle hydrogéologique complexe, compte tenu des particularités géologiques du site :

- les analyses chimiques et les analyses isotopiques sur l'oxygène ont montré que, outre l'infiltration directe, le versant est alimenté, par des écoulements latéraux profonds, possiblement guidés par les grands accidents de direction N 50 ;
- les analyses isotopiques de l'oxygène ont révélé une altitude moyenne d'infiltration des eaux comprise entre 1100 et 1400 m, ce qui correspond au plateau du Mont-Sec;
- les analyses isotopiques du Tritium ont indiqué que les eaux sont jeunes (1 à 20 ans) ;
- les écoulements dans le massif sont compartimentés, avec des réseaux de fractures inclinées vers la vallée ouvertes et très conductrices, à comportement très dynamique, et des zones plus capacitives où la conductivité hydraulique est plus faible et les écoulements plus étalés dans le temps (révélés par les enregistrements de conductivité).
- les enregistrements de conductivité et de débit en galerie sont corrélés aux déplacements en période humide mais pas en période sèche. Durant ces dernières périodes, la commande hydraulique s'exerce donc plus profondément dans le massif.

Ces résultats nous ont permis de proposer un modèle hydraulique global du versant, qui rend compte du couplage hydro-mécanique observé, notamment des très fortes accélérations fugitives en période humide.

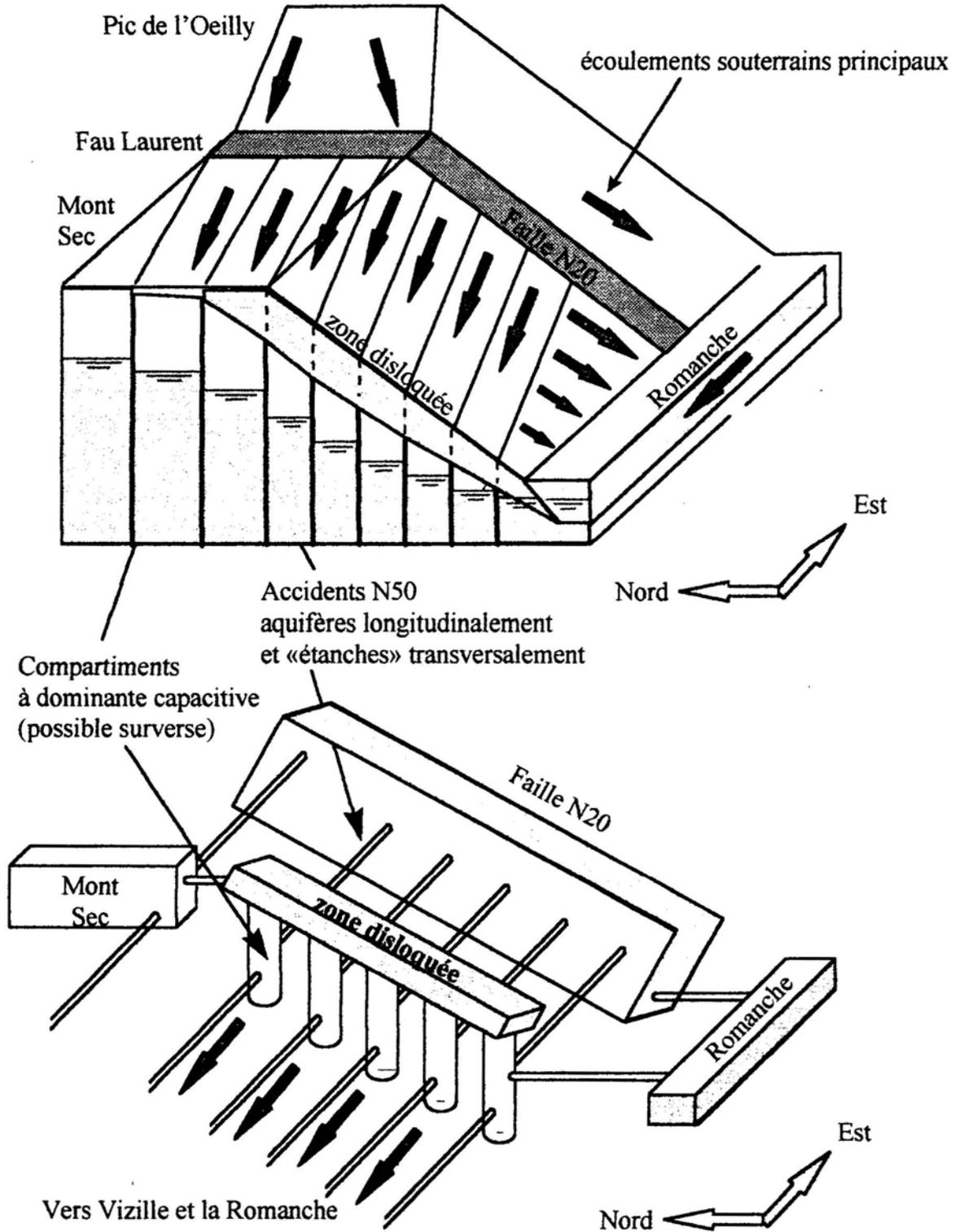


Figure 4 : Schématisation hydraulique des écoulements dans le Mont - Sec

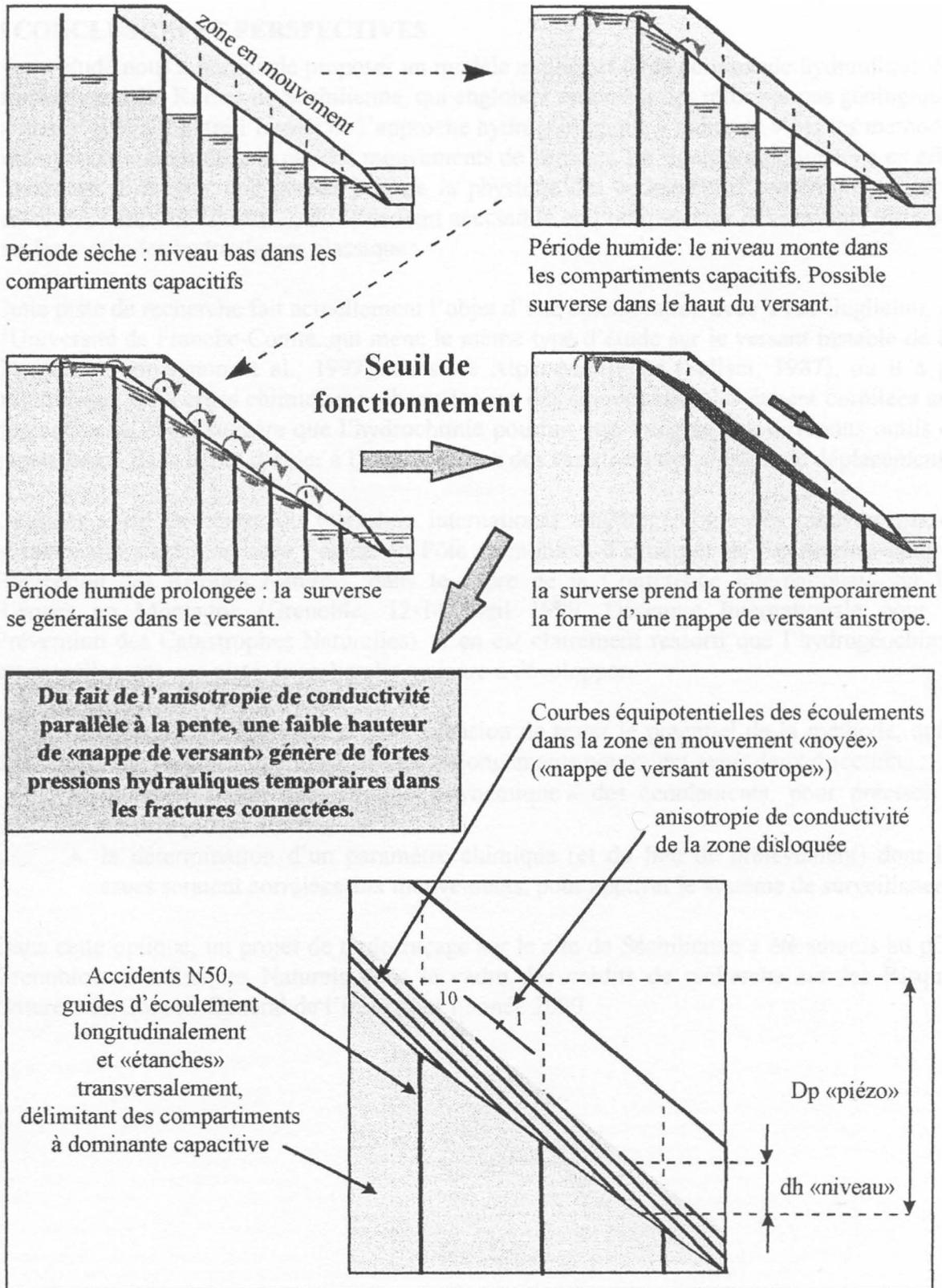


Figure 5 : Modèle hydrodynamique du Mont-Sec expliquant les brusques accélérations constatées par l'apparition et la disparition rapide d'un écoulement dans la zone en mouvement, analysé comme une « nappe éphémère de versant anisotrope ».

5 CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Notre étude nous a permis de proposer un modèle explicatif de la commande hydraulique des mouvements des Ruines de Séchilienne, qui englobe l'ensemble des informations géologiques connues. Elle a montré l'intérêt de l'approche hydrogéologique « indirecte » par les méthodes hydrogéochimiques dans le cas des mouvements de versants. Le signal « chimique » a en effet l'avantage d'intégrer une grande part de la physique des écoulements souterrains (terrains traversés, temps de transit...), difficilement accessible en pratique dans des versants instables par les méthodes hydrauliques classiques.

Cette piste de recherche fait actuellement l'objet d'une collaboration avec Yves Guglielmi, de l'Université de Franche-Comté, qui mène le même type d'étude sur le versant instable de La Clapière (Compagnon et al., 1997), dans les Alpes-Maritimes (Follaci, 1987), où il a pu montrer que les « crues chimiques » observées sur des sources latérales étaient corrélées aux déplacements. Ceci suggère que l'hydrochimie pourrait être intégrée aux différents outils de surveillance, dans le but d'aider à l'interprétation des variations des vitesses de déplacement.

Ce sujet a été au centre du workshop international « hydrogéologie des mouvements de terrain » qui s'est tenu sous l'égide du Pôle Grenoblois d'Etude et de Recherches pour la Prévention des Risques Naturels, dans le cadre de la Conférence Internationale sur les Risques en Montagne (Grenoble, 12-14 avril 1999, Décennie Internationale pour la Prévention des Catastrophes Naturelles). Il en est clairement ressorti que l'hydrogéochimie est actuellement une piste de recherche majeure à développer.

Le site de Séchilienne fournit une belle occasion de tester le potentiel de la méthode, qui a déjà fourni des résultats intéressants. Ces prolongements pourraient avoir deux directions :

- la modélisation géochimique « dynamique » des écoulements, pour préciser le modèle global d'écoulement ;
- la détermination d'un paramètre chimique (et du lieu de prélèvement) dont les crues seraient corrélées aux mouvements, pour appuyer le système de surveillance.

Dans cette optique, un projet de multitraçage sur le site de Séchilienne a été soumis au pôle Grenoblois des Risques Naturels dans le cadre des crédits de recherche sur les Risques Naturels du Conseil Général de l'Isère pour l'année 2000.

BIBLIOGRAPHIE

- Alfonsi P. 1997. Relation entre les paramètres hydrologiques et la vitesse dans les glissements de terrains. Exemples de La Clapière et de Séchilienne (France). *Revue Française de Géotechnique*, n°79, pp. 3-12.
- Antoine P., Giraud A., Evrard H., Rochet L. 1994. A huge slope movement at Sechilienne, Isère, France. *Landslide News* n°8, p 15-18.
- Compagnon F., Guglielmi Y., Mudry J., Follaci J.P., Ivaldi J.P., 1997. Approche chimique et isotopique de l'origine des eaux en transit dans un grand mouvement de terrain : exemple du glissement de La Clapière (Alpes-Maritimes, France). *C.R. AC. Sc. Paris, Sciences de la terre et des planètes / Earth Planetary Sciences*, n°325, p. 565-570.
- Evrard H., Gouin T., Benoit A., Duranthon J.P., 1990. Séchilienne, risque majeur d'éboulement en masse . Point sur la surveillance du site. *Bulletin de Liaison des Ponts et Chaussées*, n°165.
- Follacci J.-P. 1987. Les mouvements du versant de La Clapière à Saint Etienne de Tinée (Alpes Maritimes). *Bulletin de Liaison des Ponts et Chaussées*, n°150/151, p 39/54.
- Gervreau E., 1991. Etude de l'évolution des versants naturels en mouvement : prévoir, alerter.
- Giraud A. Rochet L. et Antoine P. 1990. Processes of failure in cristallophyllian formations. *Engineering Geology*, 29, p 241-253.
- Rochet L., Giraud A., Antoine P., Evrard H. 1994 La déformation du versant sud du Mont-Sec dans le secteur des Ruines de Séchilienne. *Bulletin de l'Association Internationale de Géologie de l'Ingénieur*, n°50, pp.75-87.
- Vengeon J.M., Hantz D., Giraud A. et Ract D. 1996. Numerical modelling of rock slope deformations. *International Symposium in Rock Mechanics and Rock Engineering*. Torino, Italy.
- Vengeon J.M. 1998. Déformation et rupture des versant en terrain métamorphique anisotrope. Apport de l'étude des Ruines de Séchilienne. Thèse de 3° cycle, Université Joseph Fourier, Grenoble 1.
- Vengeon J.-M., Antoine P., Giraud A. et Rochet L. 1999. Contribution à l'analyse de la déformation et de la rupture des grands versants rocheux en terrain cristallophyllien. *Canadian Geotechnical Journal*, Dec 1999 (à paraître).