

Expertise relative aux risques d'éboulement du versant des ruines de Séchilienne

Rapport du collège d'experts

**Ministère de l'Aménagement du Territoire et de
l'Environnement**

Décembre 2000

Sommaire

1. INTRODUCTION

2. DEROULEMENT DE LA MISSION

3. LA GEOLOGIE DU SITE

4. L'AUSCULTATION ET LA SURVEILLANCE DU VERSANT

5. LES DEFORMATIONS ACTUELLES AFFECTANT LE VERSANT

5.1 Les déplacements des repères géodésiques

5.2 Les mesures extensométriques

5.3 Les mesures dans les galeries

5.4 L'analyse des déformations du versant

5.5 Les relations entre les mouvements et les données hydroclimatiques

6. LES SCENARIOS D'EVOLUTION DU VERSANT

6.1 Quelques considérations préliminaires

6.2 Les scénarios envisageables à court terme

6.3 Les scénarios possibles à moyen et long terme

6.4 L'incidence de tremblements de terre

7. MODELES DE PROPAGATION ET D'ETALEMENT DES EBOULEMENTS DANS LA VALLEE

8. RECOMMANDATIONS DU COLLEGE D'EXPERTS

Annexe 1 : Liste des principaux documents mis à la disposition du Collège d'Experts

Annexe 2 : Liste des questions posées au collège d'experts

Introduction

Le site des Ruines de Séchilienne en rive droite de la Romanche en Isère (fig. 1) est connu pour ses chutes de blocs. Divers témoignages prouvent que des instabilités sont survenues à plusieurs reprises au cours des siècles. Des éboulements sont rapportés au cours des années 1726, 1762, 1794, 1833 et 1906. Ce secteur reconnu de tous temps comme très dangereux par suite de la chute de blocs n'a toutefois pas connu d'éboulement majeur, ni d'obturation naturelle du lit de la Romanche.

De nouvelles instabilités marquées par une recrudescence des chutes de blocs et par une augmentation de leur calibre se sont produites au cours de l'hiver et du printemps 1985. Les premières analyses ont conduit à mettre le site sous surveillance permanente.

Toutes les chutes de blocs ou petits éboulements (volume inférieur à 100 m³) qui sont survenus jusqu'à ce jour n'ont concerné que la zone très localisée des Ruines de Séchilienne. Les auscultations faites depuis 1985 ont mis en évidence un fait nouveau : une zone beaucoup plus large couvrant l'ensemble du versant Sud du Mont Sec, soit plus de 7 km², est le siège de déformations permanentes. Le risque changeait alors radicalement d'échelle : de quelques centaines de mètres cubes, le volume concerné par des instabilités potentielles passait à quelques millions, voire dizaines de millions, de mètres cubes.

Les nombreuses études et auscultations réalisées sur le site depuis quinze ans ont conduit à envisager plusieurs scénarios d'éboulements majeurs. Des mesures préventives ont été prises : déviation de la route nationale (RN91), dérivation de la Romanche et construction d'un merlon de protection. Suite à la loi du 2 février 1995, dite loi Barnier, il a été procédé à des expropriations dans l'île Falcon, la zone la plus vulnérable. Une galerie de dérivation de la Romanche en rive gauche autorisant un débit maximal de 50 m³/s, soit un débit inférieur au débit correspondant à la crue de fréquence annuelle de la Romanche, est en cours d'achèvement. D'autres mesures préventives sont en cours d'étude pour faire face à une bouchure de la vallée et simultanément à une forte crue, le barrage naturel risquant alors de s'effacer et de provoquer en aval une débâcle qui entraînerait des pertes considérables.

Vu, d'une part, la gravité des conséquences d'un éboulement de grande ampleur et, d'autre part, la complexité des mécanismes de déformation du versant, la Direction de la Prévention de la Pollution et des Risques du Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement a confié à un Collège d'Experts la mission :

- de donner son avis sur :
 - la synthèse des études géologiques et géotechniques du site,
 - l'interprétation des résultats des mesures d'auscultation du site réalisées depuis 1985 par le Centre d'Etudes Techniques de l'Équipement de Lyon,
 - les mécanismes à l'origine des mouvements du versant,
 - les hypothèses de scénarios d'éboulements qui peuvent être raisonnablement envisagés à court terme et à long terme,
 - les évaluations des zones d'épanchement dans la vallée correspondant aux différents scénarios d'éboulements,
- de faire aux autorités responsables toutes les recommandations utiles à la gestion des risques d'éboulement.



Vue du versant Sud du Mont Sec (Photo CETE Lyon)



Vue du versant Sud du Mont Sec (Photo CETE Lyon)

Sous la présidence de Marc PANET, Président de la Société Internationale de Mécanique des Roches, le Collège d'Experts est constitué de :

- Christophe BONNARD, Chargé de Cours à l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne,
- Pietro LUNARDI, Président de la société Rocksoil,
- Michele PRESBITERO, Directeur Général du Territoire de la Région de Lombardie.

Du fait des missions d'études et d'expertises qu'ils ont effectuées précédemment,

- Jean-Louis DURVILLE, Chef de Division au Laboratoire des Ponts et Chaussées (LCPC),
- Louis ROCHET, Chargé de Mission au LCPC,

ont été associés aux travaux du collège.

Déroulement de la mission

La mission s'est déroulée comme suit :

- réunion au CETE de Lyon le 5 juin 2000,
- visite et réunion sur le site le 6 juin 2000,
- visite et réunion sur le site les 27 et 28 juillet 2000,
- réunion au CETE de Lyon le 20 septembre 2000.

Au cours de ces visites et réunions, les experts ont pris connaissance des diverses études effectuées, des observations et des reconnaissances faites sur le site et des résultats de l'auscultation. Chaque expert a relaté sa propre expérience acquise à l'occasion de grands éboulements ou lors d'études de zones de risques d'éboulements majeurs et a fait part des enseignements qui pouvaient en être tirés dans le cas particulier du versant de Séchillienne.

La liste des principaux documents remis aux experts figure en **annexe 1**.

A la suite de ces visites et de ces réunions, chaque expert a rédigé un rapport dans lequel il a présenté sa propre analyse et s'est efforcé de donner les réponses les plus pertinentes aux questions dont la liste figure en **annexe 2**. Le collège d'experts a rédigé le présent rapport de synthèse auquel sont annexés les trois rapports des experts qui ont pu ainsi apporter, à titre personnel, des nuances par rapport à ce rapport de synthèse.

La mission s'est déroulée dans les meilleures conditions d'efficacité grâce à la compétence et à la grande disponibilité des ingénieurs du CETE de Lyon et du LCPC qui, tout au long de la mission, ont assisté le Collège d'Experts et lui ont fourni de nombreuses données et éléments d'appréciation.

La géologie du site

La géologie du site est complexe. Les compléments d'étude réalisés récemment par Pierre POTHERAT et Laurent EFFENDIANTZ ont permis d'avoir une vision cohérente de la géologie et de la structure du site.

Le site se situe dans le rameau externe de la chaîne de Belledonne caractérisé par la présence d'une bande de micaschistes et leptynites ou "Série Satinée". Deux accidents majeurs de direction N 20°E encadrent ce rameau externe : à l'Est le synclinal médian et à l'Ouest l'accident de Vizille.

La "Série Satinée" est constituée d'une roche résultant du métamorphisme d'une ancienne formation sédimentaire détritique, grésopélitique.

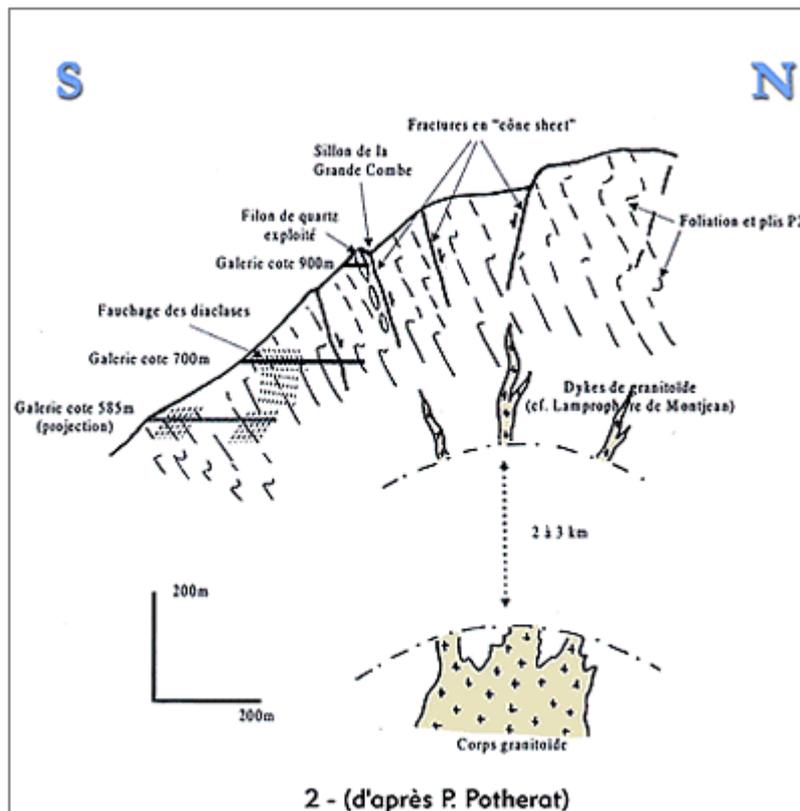
La structure du massif résulte de plusieurs phases de déformation au cours des périodes géologiques qui ont récemment été mises en évidence par Pierre POTHERAT :

- Des phases de déformation précoces responsables de la foliation, de la formation des filonnets de quartz synschisteux et de petits plis isoclinaux à axe vertical.
- Les phases de déformation westphaliennes ont conduit à l'empilement des unités qui constituent le complexe de Belledonne et se traduisent par des plis dissymétriques à axe horizontal de direction N50-80°E et à des accidents conjugués N 20-50°E et N 120-140°E avec des décrochements respectivement sénestres et dextres.
- Une phase de déformation tardi hercynienne a joué un rôle majeur avec, d'une part, la création d'un pli à grand rayon de courbure dont l'axe a une direction N 20°E et un plongement 45°N et, d'autre part, la mise en place d'un champ filonien à paragenèse Pb-Zn exploité au siècle dernier. Un des traits majeurs du schéma structural du massif est le tassement du Mont Sec de forme grossièrement elliptique, bordé de discontinuités concentriques en cônes inverses emboîtés et de discontinuités rayonnantes. Ces discontinuités résultent vraisemblablement de la fracturation qui a accompagné la montée du magma lors de la mise en place du champ filonien qui serait à rattacher à cette phase de distension permienne.
- La phase de déformation alpine représentée par des plis d'axe N à N 20°E plongeant vers le N et par des décrochements conjugués N 20°E et N 140°E.
- L'examen des documents cartographiques et des photographies aériennes met en évidence à l'emplacement du bassin de Séchilienne une structure losangique de type pull-apart. Cette structure, confirmée, par les études de terrain serait récente. La faille de la Romanche serait alors une faille active.

Lors du retrait du glacier de la Romanche, le versant de Séchilienne a été soumis à une forte décompression marquée par l'ouverture des discontinuités subparallèles à la vallée et l'affaissement en coin de la partie sommitale du Mont Sec (fig. 2).

Les discontinuités qui ont joué et jouent un rôle majeur dans la déformation postglaciaire et actuelle du versant sont :

- l'accident sensiblement NS à N 20°E qui délimite à l'est le couloir des Ruines et qui semble correspondre à une zone de cisaillement qui a rejoué au cours de la phase alpine,
- la schistosité de direction N 20°E avec un pendage subvertical mais avec de nombreuses variations locales dues aux plissements ou, en surface, au fauchage,
- les failles de direction conjuguée N 20°-50°E et N 110°-140°E,
- les discontinuités N 50-60°E associées au rebord SE de la structure elliptique de l'affaissement du Mont Sec. A cette famille correspondent la fracture arrière de l'affaissement avec un escarpement d'une quarantaine de mètres et un pendage de 75° vers le sud et le sillon de la Grande Combe qui délimite l'affaissement au sud avec un pendage de 65° vers le nord. Dans le secteur des Ruines, sous l'effet de la zone de cisaillement, on observe une virgation de cette famille très représentée qui prend alors une direction N 60-70° E.



L'auscultation et la surveillance du versant

Le versant de Séchilienne est ausculté de manière permanente. Les premières bases extensométriques permettant de suivre l'ouverture des principales discontinuités de la zone la plus active ont été mises en place en 1985.

Le système d'auscultation a progressivement été complété. Les mesures extensométriques ont été automatisées en 1988 avec la mise en place de quatre balises radio qui interrogent les extensomètres à intervalle régulier. Un réseau géodésique couvre l'ensemble du versant. La station automatique de Mont Falcon située sur le versant rive gauche de la Romanche permet de suivre en permanence 41 repères géodésiques. La mise en œuvre d'une auscultation des repères géodésiques avec un distancemètre par micro-ondes radar va permettre d'assurer la continuité de l'auscultation du versant même lorsque les conditions de visibilité sont défavorables à l'utilisation des distancemètres optiques. Ce dispositif sera opérationnel dès la fin de l'année 2000.

Trois galeries orientées NS ont été creusées dans le versant :

- une galerie de mine d'environ 60 m à la cote 875 ;
- une galerie de mine longue de 240 m à la cote 595 ;
- une galerie de reconnaissance longue de 240 m à la cote 710.

La galerie de mine de la cote 875 a été équipée de huit bases extensométriques dont les mouvements peuvent être comparés aux repères géodésiques implantés à proximité de la tête.

Vingt-cinq bases pour des mesures extensométriques et de nivellement ont été installées dans la galerie de mine de la cote 595.

La galerie de reconnaissance de la cote 710 a été creusée, il y a une dizaine d'années. Elle est suivie en nivellement et en extensométrie depuis mars 1996. Ces mesures permettent de mettre en évidence les mouvements relatifs avec les repères implantés à la tête de la galerie et entre divers compartiments du massif délimités par des discontinuités majeures.

Des essais d'écoute microsismique ont été tentés mais n'ont donné jusqu'à présent aucun résultat probant. Il faut toutefois indiquer que les écoutes microsismiques se sont révélés d'un grand intérêt sur plusieurs sites sous surveillance à l'étranger, notamment en Italie. Il est vraisemblable que les moyens mis en œuvre ont été insuffisants et expliquent les échecs constatés ici comme sur d'autres sites en France.

Il n'a été réalisé aucun sondage équipé permettant de suivre les mouvements en profondeur par des mesures inclinométriques ou extensométriques. Cette absence s'explique par le coût élevé de ces sondages sur un site très accidenté et par le fait que les déformations du massif auraient rapidement rendu impossible les auscultations dans les sondages.

Les quelques venues d'eau qui existent sur le versant ont été localisées, mais on ne dispose pas de données piézométriques permettant d'établir des corrélations avec les données hydroclimatiques.

Les divers dispositifs de suivi et d'auscultation mis en œuvre par le CETE de Lyon sur le versant de Séchilienne constituent un système de surveillance permanent qui donne depuis quinze ans un ensemble de données de très grande qualité qui permettent d'analyser sur des bases sûres et non contestables les déplacements qui affectent la surface de ce versant. Toutefois, mis à part les mesures faites dans les trois galeries, les mouvements en profondeur sont mal connus.

Les déformations actuelles affectant le versant

1. Les déplacements des repères géodésiques

Pour analyser de manière homogène les déformations du versant, nous avons retenu les déplacements qui ont été mesurés au cours de l'année 1999. La représentativité de cette année sera discutée ultérieurement ; on se limite à noter ici que les déplacements mesurés au cours de l'année 1999 sont cohérents avec ceux mesurés les années précédentes avec toutefois une légère accélération qui peut être mise en relation avec des conditions hydroclimatiques nettement plus défavorables que les années précédentes.

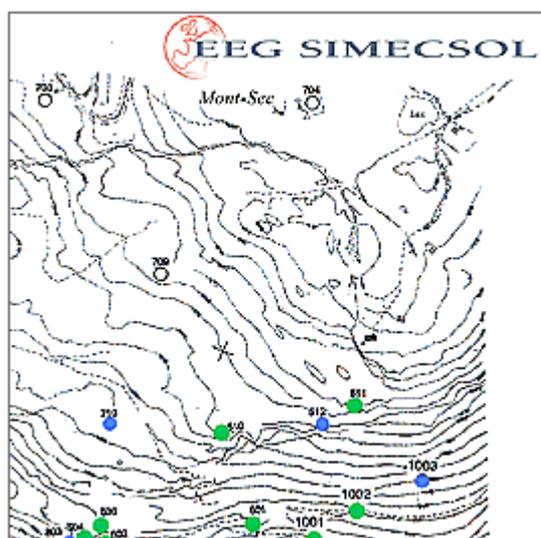
Sur la figure 3 ont été reportées, pour chaque repère suivi par géodésie classique, l'intensité du vecteur déplacement entre décembre 1998 (mission 10) et décembre 1999 (mission 11) et pour les repères suivis seulement par distancemètre automatique (803, 804, 805, 806, 807, 808) indiqués ci-dessous en italique, la variation de la distance mesurée entre le 1 janvier et le 31 décembre 1999.

Pour l'intensité des déplacements, nous avons distingué six classes :

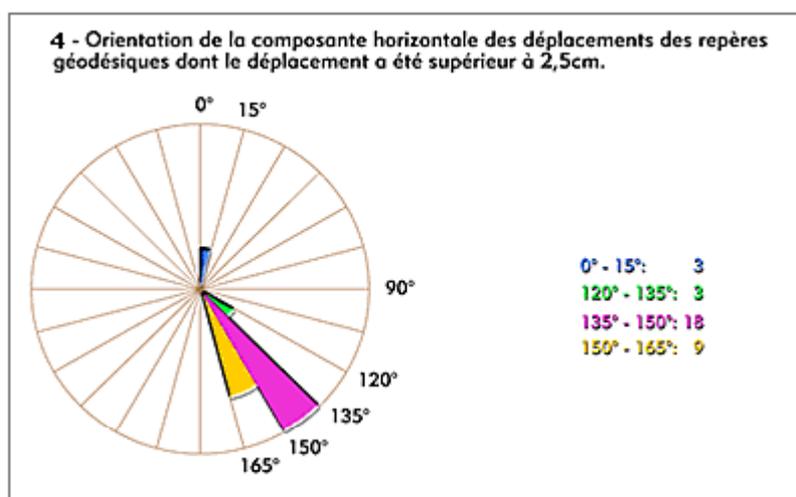
1. Les points géodésiques dont le déplacement est supérieur à 40 cm : 517, 631, 632, 635, 804.
2. Les points géodésiques dont le déplacement est compris entre 20 cm et 40 cm : 1010, 805.
3. Les points géodésiques dont le déplacement est compris entre 10 cm et 20 cm : 806.
4. Les points géodésiques dont le déplacement est compris entre 5 cm et 10 cm : 501, 502, 503, 504, 510, 511, 518, 1001, 1002, 1004.
5. Les points géodésiques dont le déplacement est compris entre 2,5 cm et 5 cm : 505, 506, 507, 508, 509, 512, 513, 514, 607, 613, 622, 625, 626, 708, 710, 803, 902, 1000, 1003, 1009.
6. Les points géodésiques dont le déplacement est inférieur à 2,5 cm : 500, 515, 516, 605, 606, 611, 612, 615, 621, 622, 623, 624, 701, 702, 703, 704, 709, 716, 717, 800, 807, 808, 900, 901, 903, 904, 1005, 1006, 1007, 1008.

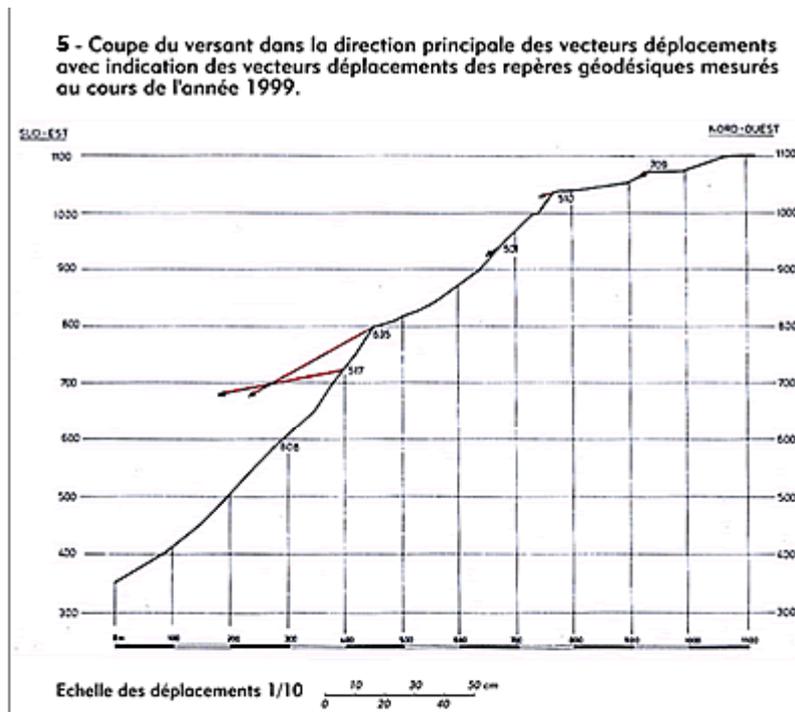
La figure 4 donne la distribution de l'orientation de la composante horizontale du vecteur déplacement des repères géodésiques dont le déplacement a été supérieur à 2,5 cm au cours de l'année 1999. Cette direction est remarquablement homogène pour la très grande majorité de ces repères géodésiques et est comprise entre N 135°E et N165° E. Cette direction n'est pas parallèle à la direction de plus grande pente du versant mais sensiblement orthogonale aux fractures associées à l'affaissement du Mont Sec. Font exception à cette direction les déplacements des repères 510, 511, 512, 1003, localisés dans la zone d'affaissement du Mont Sec au-dessus du Couloir des Ruines. La direction horizontale du vecteur déplacement de ces repères est sensiblement orientée N S.

Le plongement du vecteur déplacement des repères, dont le déplacement est significatif (>2,5 cm en 1999), est généralement inférieur à la pente du versant (fig.5). Toutefois, certains repères affectés de déplacements importants (631, 632, 635), montrent sur une période de cinq ans une inclinaison peu différente de la pente moyenne du versant.



Plan avec les repères géodésiques et leur classement en fonction des déplacements annuels mesurés au cours de l'année 1999.





2. Les mesures extensométriques

Les mesures extensométriques qui permettent de suivre l'ouverture des principales fractures du versant fournissent un complément d'information très utile. De manière générale on observe un accord satisfaisant entre les données des mesures extensométriques et celles des mesures géodésiques.

Si on se réfère à une période de un an entre le 1er avril 1999 et le 31 mars 2000, les mouvements les plus importants ont été observés sur les capteurs A13 (38,4 cm), A16 (68,7 cm), C1 (48,8 cm), C2 (61,4 cm), E3 (15,8 cm), F1 (67,5 cm). Les mesures faites sur les capteurs mis en place en 1985 donnent des déplacements de 1 m à plus de 6 m et celles faites sur les capteurs mis en place en 1992, 1994 et 1996, des déplacements de 1,5 m à plus de 3 m (les extensomètres n'étant le plus souvent pas perpendiculaires aux parois des fractures, l'ouverture de celles-ci est inférieure à ces mesures).

Les autres capteurs enregistrent des mouvements annuels de deux ordres de grandeur plus faibles.

3. Les mesures dans les galeries

Dans la galerie de mine de la cote 595, les mesures sont données par rapport à un point situé en fond de galerie à une distance de 235,9 m de l'entrée. Entre le 22 novembre 1994 et le 24 juin 1999, les variations de nivellement des 25 points de mesure sont inférieures à 4 mm et ne sont pas significatives. Pendant la même période de quatre ans et demi, le déplacement relatif des différents points de mesure par rapport au point de repère en fond de galerie varie sensiblement linéairement en fonction de la distance ; l'extension entre le fond et la tête de la galerie est d'environ 18 mm, soit une déformation inférieure à $8 \cdot 10^{-6}$. Le point géodésique 800 implanté à proximité de la tête de la galerie a eu au cours de l'année 1999 un déplacement total de 16 mm.

Dans la galerie de mine de la cote 875, les déplacements relatifs de sept points par rapport à un point de repère situé en fond de galerie à 52,9 m ont été mesurés. Entre le 17 septembre 1998 et le 9 février 2000, les seuls points qui ont des déplacements significatifs sont le point situé à la tête et celui situé à environ 10 m de l'entrée. Ces déplacements sont compris entre 5 et 6 mm. Il convient de noter que les points géodésiques implantés à proximité de la tête de la galerie : 502, 503, 504, ont eu respectivement au cours de la seule année 1999 un déplacement cumulé de 57 mm, 63 mm et 69 mm.

La galerie de reconnaissance de la cote 710 est suivie en nivellement et en extensométrie depuis le 14 mars 1996. Les mouvements sont repérés par rapport à un point situé à 237 m de l'entrée de la galerie. L'analyse détaillée des mouvements montre des déplacements relatifs de compartiments du massif délimités par des discontinuités. Entre le 14 mars 1996 et le 22 avril 2000, le déplacement relatif entre la tête de la galerie et le repère en fond de galerie a été de 23 mm, soit une extension de l'ordre de $2,5 \cdot 10^{-5}$ /an. Entre le 20 juillet 1994 et le 26 novembre 1999, les repères géodésiques 623 et 624 situés à proximité de la tête de la galerie se sont respectivement déplacés de 12,6 cm et 14,1 cm, soit une vitesse moyenne annuelle de l'ordre de 2,5 cm/an ce qui correspond à quatre fois plus que le déplacement relatif moyen sur la longueur de la galerie.

4. L'analyse des déformations du versant

Des données de l'auscultation synthétisées ci-dessus, le Collège d'Experts a tiré les enseignements suivants :

- L'ensemble du versant est le siège de déformations gravitaires lentes dans une zone limitée au Nord par la limite septentrionale de l'affaissement du Mont Sec, à l'Est par le Couloir des Ruines. Ces déformations s'amortissent rapidement en pied de versant et progressivement vers l'Ouest. Elles sont très faibles en dessous de la cote 600 (cf. repères 1007, 902, 1006, 615, 900, 901, 716, 717) et à proximité des Rivoirands (cf. repères 903, 904, 906).
- Les déplacements des repères géodésiques (à l'exception des repères 510, 511, 512, 1003) sont caractérisés, d'une part, par une direction persistante de la composante horizontale sensiblement orthogonale à une direction structurale majeure du massif N 50°-70°E, et d'autre part par un plongement inférieur à la pente du versant.
- Les mesures dans les galeries de la cote 710 et 595 montrent clairement que ces mouvements ne sont pas superficiels mais sont des mouvements profonds, puisque les déplacements relatifs de la tête et du fond de ces deux galeries sont faibles vis-à-vis des déplacements des têtes des galeries. Les données permettant d'analyser comment les déformations décroissent en profondeur font actuellement défaut.
- Bien que des discontinuités de déplacement apparaissent au franchissement de zones de fractures dans la galerie de reconnaissance, aucune surface de rupture potentielle n'a été mise en évidence.

L'ensemble de ces données est conforme à l'hypothèse d'un **mouvement actuel de flexion profond imposé par une direction structurale liée à l'affaissement du Mont Sec qui découpe le massif en lanières**. Ce mouvement s'amplifie à proximité de la zone de cisaillement du Couloir des Ruines. C'est cette hypothèse qui a fait l'objet d'une modélisation bidimensionnelle par le code de calcul UDEC ; cette modélisation a pour vertu principale d'illustrer qualitativement ce type de déformation liée à la décompression entraînée par la fonte des glaciers. On assisterait donc actuellement à la poursuite d'un processus très ancien qui peut, toutefois, connaître des phases d'accélération, voire de paroxysmes.

La différence d'orientation des déplacements dans la zone des repères 510, 511, 512, 1003, pourrait s'expliquer par l'existence d'une butée à l'est de ce secteur ou par l'asymétrie du tassement elliptique affectant le Mont Sec.

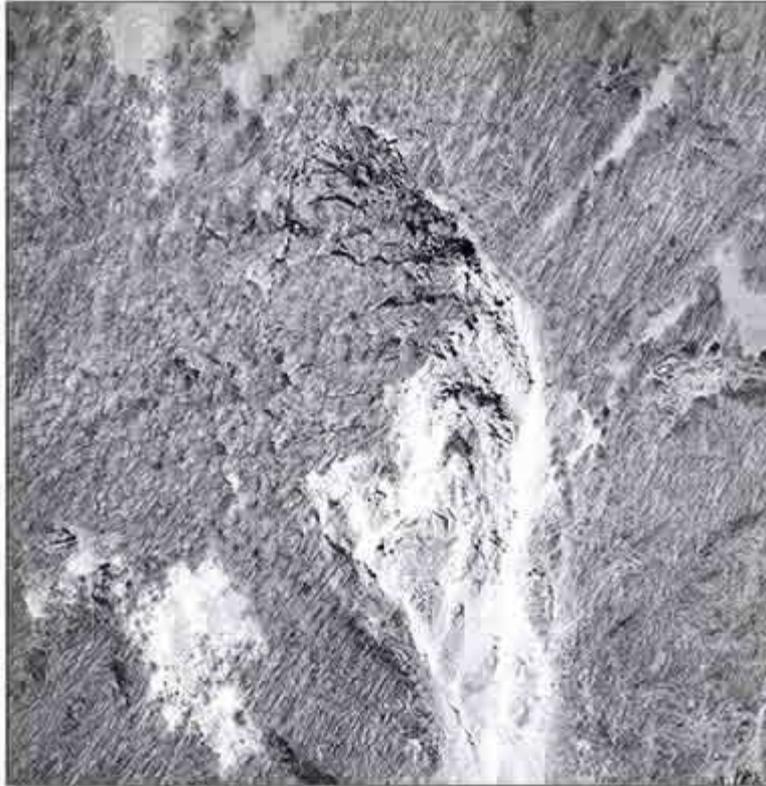
Les mesures mettent également en évidence, **immédiatement à l'ouest du Couloir des Ruines, une zone très active en forte évolution** (fig. 6a) dans laquelle des déplacements plurimétriques ont déjà été observés. Les mesures géodésiques, les mesures extensométriques, les levés morpho-structuraux réalisés récemment par le CETE de Lyon, diverses photographies obliques, permettent d'identifier cette zone avec une bonne précision. Elle englobe les repères géodésiques 517, 631, 632, 635, 804, 805, 806, 1010, dont les vitesses de déplacement annuelles sont supérieures à 10 cm/an, et les extrémités aval des extensomètres A13, A16, C1, C2, E3, F1. Cette zone a la forme d'une amande (fig. 6b) qu'on peut schématiser par un parallélogramme dont les côtés correspondent à des directions structurales majeures du massif N 20°E et N 120°-140°E. Cette zone a une aire un peu supérieure à 3 ha.

La morphologie du versant suggère une extension possible de cette zone vers le sud-est et vers le sud-ouest, mais dans ce secteur des données instrumentales font actuellement défaut.

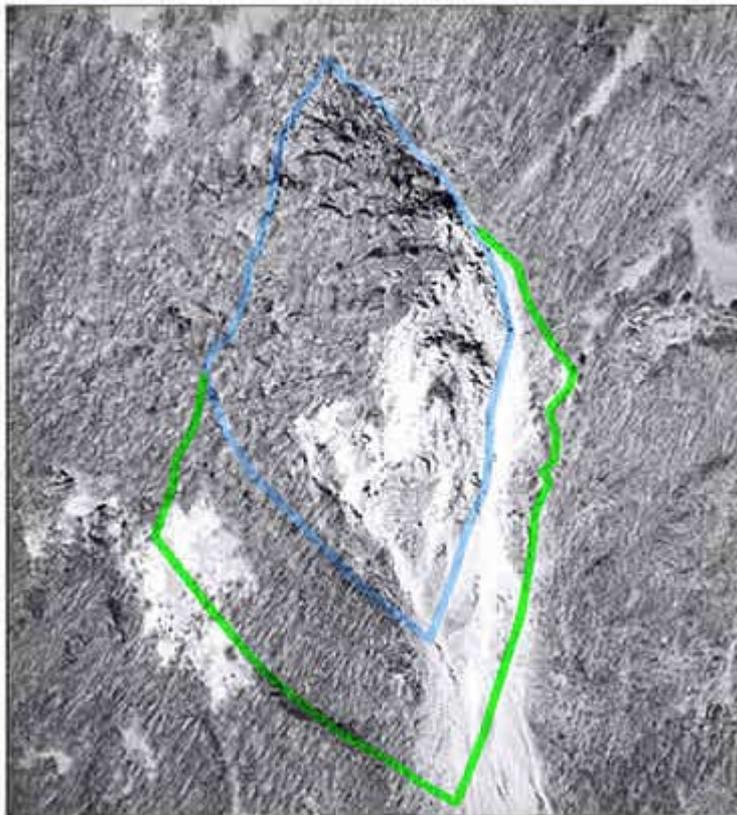
5. Les relations entre les mouvements et les données hydroclimatiques

On dispose actuellement des données suivantes sur les précipitations :

- Avant 1993, les données de deux stations pluviométriques, une à St-Martin d'Hères dans la plaine grenobloise à 250 m d'altitude, l'autre à Varcès à la même altitude que la précédente mais plus proche de Séchilienne. Sur la période de quatre ans pour laquelle on dispose de données pour les deux stations de St-Martin d'Hères et de Varcès, les précipitations annuelles sont pratiquement égales à 3% près.



6a - Vue aérienne de la zone active



6b - Vue aérienne de la zone active délimitée par un contour bleu, et de ses extensions Est et Ouest délimitées par un contour vert.

- Depuis 1993, les données d'une station bien équipée au Mont Sec à une altitude de 1140 m, en plus des relevés précédemment cités.

La méthode de calcul de l'eau réellement infiltrée peut être sujette à caution, d'une part, parce que l'évapotranspiration est calculée et non mesurée et, d'autre part, parce qu'il est supposé que toute l'eau disponible s'infiltré, ce qui n'est pas forcément exact dans les secteurs en pente au voisinage du Mont Sec.

Entre 1993 et 1999, la hauteur moyenne d'eau infiltrée au Mont Sec a été, compte tenu de l'évapotranspiration calculée, de 1076 mm alors que la hauteur équivalente à Varcès peut être évaluée à 500 mm. Il serait donc nécessaire d'établir des corrélations entre les précipitations des trois stations pour disposer d'une base statistique des précipitations permettant d'analyser l'évolution des mouvements du versant en fonction des conditions hydroclimatiques.

On peut noter qu'à St-Martin d'Hères, les précipitations annuelles ont été assez régulières de 1973 à 1993 et comprises en général entre 900 mm et 1200 mm. Deux années font exception : 1977 avec plus de 1300 mm et 1989 avec un peu plus de 500 mm.

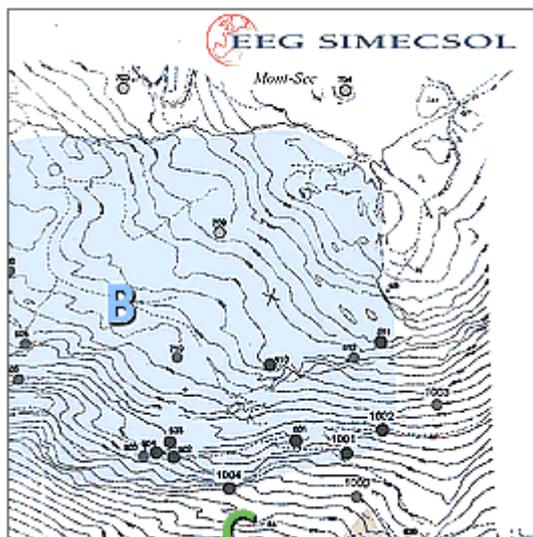
En ce qui concerne le Mont Sec, la moyenne de 1993 à 1998 des hauteurs d'eau infiltrées, calculées sur la base des données des précipitations, des hauteurs de neige et des températures, est de 1080 mm, avec pour valeurs extrêmes, 797 mm en 1997 et 1325 mm en 1995. L'année 1999 apparaît comme assez exceptionnelle avec une hauteur d'eau infiltrée de 1593 mm.

Le mois de mars 1999 a été exceptionnel avec une hauteur d'eau infiltrée de 296 mm, soit une valeur mensuelle jamais atteinte précédemment. Par ailleurs, pour la dernière période hivernale, le cumul de novembre à avril a largement dépassé les valeurs correspondantes des années précédentes (910 mm pour l'hiver 1999-2000, 674 mm pour l'hiver 1998-1999 et 445 mm pour l'hiver 1997-1998). Ces données montrent que la période 1999-2000 a été particulièrement défavorable ; elles pourraient expliquer une certaine accélération des mouvements. Mais cette accélération reste modeste si on la compare à celle qui a pu être mesurée sur d'autres sites instables en période de crise. Par exemple à Sedrun en Suisse, les mouvements du sommet de la zone instable ont atteint presque 60 cm en 1989 et ont nettement diminué les années suivantes.

De ces analyses, on peut tirer les conclusions suivantes :

• on peut donc distinguer sommairement quatre zones (fig. 7) :

- La zone des Ruines de Séchilienne très active (A) ; cette zone définie par les observations actuelles pourrait se développer à l'Est et à l'Ouest (A').
 - La zone qui correspond à l'affaissement du Mont Sec (B) ; elle a subi de fortes déformations au cours de l'histoire géologique, mais elle n'a actuellement qu'une activité modérée.
 - La zone située entre les deux précédentes (C) où pourraient se produire des mouvements régressifs en cas d'éboulement de la zone active.
 - Une zone de faible activité située entre, à l'Est, la zone active et son extension possible occidentale et, à l'Ouest, le hameau des Rivoirands.
- les légères accélérations des mouvements constatées au printemps 1999 et au cours de l'hiver 1999-2000 peuvent être expliquées par les conditions hydroclimatiques très défavorables de cette période. Elles ne permettent pas de présager un comportement catastrophique du versant.



7 - Zonage du versant Sud du Mont Sec
(cliquer sur l'image pour voir le plan)

Les scénarios d'évolution du versant

1. Quelques considérations préliminaires

Sur la base des analyses faites ci-dessus, plusieurs scénarios d'évolution du versant peuvent être envisagés. Au préalable, il convient de préciser autant qu'il est possible la signification de termes couramment employés dans le domaine des mouvements de terrain et qui pourraient être mal interprétés par des non-spécialistes.

Un versant a atteint la rupture lorsque les mouvements du versant conduisent à l'individualisation d'une surface ou de plusieurs surfaces correspondant à de fortes discontinuités de déplacement ; ces surfaces sont appelées surfaces de rupture.

La rupture est brutale si la formation de la surface de rupture est très rapide et s'accompagne d'une forte accélération des mouvements. Dans la grande majorité des cas, une rupture brutale déclenche des déplacements importants et rapides de la masse instable et se traduit par des éboulements de grande ampleur.

La rupture est progressive lorsque la formation de la surface de rupture se fait par étapes successives. Elle est régressive lorsque la surface de rupture régresse vers l'amont du versant ou latéralement. Ces éboulements sont postérieurs à l'éboulement principal.

Les mécanismes de rupture des versants rocheux sont le glissement et le basculement ou une combinaison des deux. Ils peuvent être également associés à des tassements. Des considérations cinématiques très simples permettent de distinguer ces types de mécanismes de rupture sur la base des mouvements constatés sur le versant.

Dans le cas d'un glissement plan, les vecteurs déplacements de la masse instable sont équipolents. Si la surface de rupture est circulaire, les déplacements des points situés en tête du glissement ont une forte composante verticale alors que ceux situés à la base du glissement ont une forte composante horizontale.

Dans le cas d'un basculement, ce sont les déplacements des points situés en tête du volume instable qui sont les plus importants et avant d'atteindre la rupture, la composante horizontale de ces déplacements est la plus forte.

Les tassements impliquent essentiellement des déplacements verticaux.

L'étude des instabilités des versants intéressant des masses rocheuses importantes (supérieures à quelques centaines de millions de mètres cubes), en particulier dans les Alpes, montre que les ruptures interviennent après des mouvements plurimétriques des points situés en surface.

La prévision de l'échéance de la rupture d'une masse rocheuse sur un versant n'est pas à la portée des méthodes d'analyse disponibles ; on ne dispose pas de modèles rhéologiques confirmés décrivant correctement les déformations visco-plastiques permettant de décrire les lentes déformations d'un massif rocheux et la localisation d'une surface de rupture.

Plusieurs critères basés sur l'analyse des mouvements ont été proposés pour prédire la date de la rupture (Voight, Fukuzuno). Ils considèrent qu'à l'approche de la rupture la vitesse des déplacements croît de manière exponentielle. En représentant l'inverse de la vitesse en fonction du temps, l'intersection du prolongement analytique de la courbe avec l'axe des abscisses donne la date de la rupture. Ces critères ont pu être validés sur plusieurs cas a posteriori, mais leur pertinence a souvent été mise à défaut pour des prévisions a priori. Chaque accélération de la vitesse de déplacement ne conduit pas inéluctablement à la rupture. Le Collège des Experts estime que ces méthodes de prévision ne peuvent être appliquées avec succès que lorsque la rupture est proche, c'est à dire lorsque le mécanisme de la rupture est enclenché de manière irréversible.

Ce rapport se limite à utiliser les termes: court, moyen et long terme, qui peuvent être considérés comme trop qualitatifs et largement subjectifs. On peut tenter d'en préciser le sens sur une échelle logarithmique :

- très court terme : inférieur à 1 an
- court terme : compris entre 1 an et 10 ans
- moyen terme : compris entre 10 ans et 50 ans
- long terme : compris entre 50 ans et 100 ans
- très long terme : supérieur à 100 ans

A des vitesses de déplacements décimétriques par an, correspondent à moyen terme des déplacements cumulés plurimétriques. La poursuite de mouvements avec ces vitesses de déplacement permet d'envisager le risque d'une rupture à moyen terme.

2. Les scénarios envisageables à court terme

1) **Le scénario le plus évident pour le très court et court terme est la poursuite dans le futur de ce qui a été observé au cours des siècles sur le site des Ruines de Séchilienne**, c'est à dire des ruptures de masses rocheuses par basculement n'excédant pas un volume de quelques centaines à milliers de mètres cubes. Les blocs empruntent le couloir des Ruines et atteignent dans la vallée l'emplacement de l'ancienne route nationale. Les mouvements actuels qui ont eu tendance à s'accélérer au cours de 1999 et de l'année présente montrent que de telles chutes de blocs sont actuellement vraisemblables à très court terme.

2) **L'éboulement en masse de toute la zone considérée comme active avec son extension éventuelle vers le Sud-Ouest et le Sud-Est est également un scénario envisageable à court terme.** On ne dispose pas d'éléments qui permettent d'identifier clairement une surface de rupture, mais la poursuite des mouvements de flexion et de tassement peut conduire à la localisation d'une surface de rupture conduisant à un éboulement en masse. L'évaluation du volume de l'éboulement dépend de l'hypothèse que l'on fait sur la position de la surface de base de la zone instable. Pour évaluer le volume correspondant, il a été fait une hypothèse de même nature que celle qui a été faite précédemment par Louis ROCHET. Le volume a été découpé en tranches d'égale largeur parallèles à la direction des déplacements, chaque tranche étant limitée à sa base par un plan ayant un pendage de 30° ; le volume est alors évalué à 2,2 millions de mètres cubes (2,6 millions de mètres cubes pour un pendage de 25°).

La réalisation du scénario comportant l'éboulement de toute la zone considérée comme très active donnerait naissance à une situation nouvelle rendant envisageable des ruptures régressant vers l'amont du versant dans la zone C. Mais le volume de ces éboulements resterait limité à court terme.

3. Les scénarios possibles à moyen et long terme

L'analyse de l'ensemble des données disponibles sur le site permet de considérer comme très improbable à court terme et peu probables à moyen terme la réalisation des autres scénarios qui ont été envisagés, conduisant à des volumes d'éboulement de 20 ou 25 millions de mètres cubes ou même 100 millions de mètres cubes ; ce dernier volume paraît quasiment impossible.

Cet avis est fondé sur les éléments objectifs suivants :

- Aucune amorce de surface de rupture généralisée n'a pu être identifiée nulle part.
- Les déplacements mesurés en dehors de la zone déclarée comme très active peuvent au mieux être interprétés comme des tassements et des mouvements de flexion profonds. Des discontinuités de déplacement existent au niveau des grandes fractures, notamment celles qui sont associées à l'affaissement du Mont Sec ; mais ces discontinuités de déplacement restent modérées et se produisent sur des fractures qui ne peuvent pas devenir à terme des surfaces de rupture puisqu'elles s'enracinent dans le massif.
- L'amplitude des déplacements mesurés pour certains depuis quinze ans est trop faible pour rendre crédible l'échéance d'un grand éboulement à court et moyen terme.

L'attention des experts a été attirée sur l'existence possible de zones de résistance où viendraient se concentrer les efforts, et qui pourraient céder brutalement. Cette hypothèse pourrait s'appliquer à la zone située en haut du Couloir des Ruines où l'on observe une déviation de l'orientation des directions de déplacement, par ailleurs remarquablement homogène. L'auscultation continue de la zone concernée devrait permettre d'identifier le développement d'un tel mécanisme dans un milieu aussi fracturé qui rend fort improbable une rupture soudaine et brutale de grande ampleur.

Si les scénarios impliquant des volumes de plusieurs dizaines de millions de mètres cubes leur paraissent très improbables à court terme et peu probables à moyen terme, les experts ne peuvent pas exclure à terme l'occurrence d'éboulements de plusieurs millions de mètres cubes ; la poursuite des déformations actuellement constatées peut engendrer à long terme des surfaces de rupture délimitant des masses instables de très grands volumes. Ils recommandent de poursuivre la surveillance d'un versant en constante évolution.

4. L'incidence de tremblements de terre

Le site se trouve dans le canton de Vizille qui est classé en zone sismique Ib, autrement dit,

- la période de retour d'un séisme d'intensité VI est de 50 à 100 ans,
- la période de retour d'un séisme d'intensité VII est de 100 à 250 ans,
- la période de retour d'un séisme d'intensité VIII est de 250 à 700 ans.

L'événement sismique le plus récent est le séisme de Laffrey du 11 janvier 1999. C'est un séisme de magnitude 3,5 dont l'épicentre se situe à environ 6 km des Ruines de Séchilienne et à 1 km de profondeur. Il correspond vraisemblablement à un rejeu de la faille de Belledonne, d'orientation N 20°-30° E. Son intensité sur le site de Séchilienne est estimée à IV-V. Les mesures extensométriques et géodésiques du site n'indiquent aucun mouvement particulier à la date du séisme.

Selon la réglementation, l'accélération nominale aN en zone Ib varie entre 1,5 m/s² et 2,5m/s² selon la classe de bâtiment. Pour les études de stabilité des pentes en pseudo-statique, on admet une accélération horizontale de 0,5 aN, soit au maximum 1,25 m/s² en zone Ib, et une accélération verticale de 0,3 aN, soit au maximum 0,75 m/s² en zone Ib. Il est vraisemblable que de telles accélérations seraient de nature à déstabiliser quelques centaines à quelques milliers de mètres cubes dans la zone active, mais auraient une incidence nulle sur le reste du versant en l'état actuel. On peut penser que la répétition d'événements sismiques pourrait produire un effet de fatigue, mais les périodes de retour des séismes d'intensité suffisante sont très longues pour qu'il soit pris en compte.

Modèles de propagation et d'étalement des éboulements dans la vallée

Le CETE de Lyon a étudié la propagation et l'étalement des éboulements dans la vallée correspondant au scénarios d'éboulements en grande masse alors envisagés : 3 millions de mètres cubes, 7 millions de mètres cubes, 20 millions de mètres cubes, 100 millions de mètres cubes.

Ces éboulements en grande masse s'apparentent à des écoulements granulaires avec une forte interaction entre les éléments en mouvement qui dissipe de l'énergie. Cette dissipation d'énergie au sein de l'éboulement décroît lorsque le volume de l'éboulement croît (phénomène de fluidisation croissant avec le volume). Le modèle est incrémental. Il tient également compte du caractère régressif des éboulements et de la modification de la topographie du versant et de la zone d'étalement au cours de l'éboulement. La masse en rupture a été découpée en bandes parallèles à la direction moyenne des vecteurs déplacements. Le modèle a été calé, d'une part, sur des éboulements relativement nombreux concernant des volumes inférieurs à 105 mètres cubes et, d'autre part, sur l'écroulement du Mont Granier de 1248 en Savoie, dont le volume a été estimé à 500 millions de mètres cubes.

La démarche proposée pour définir la zone d'étalement suivant les quatre scénarios envisagés et les résultats obtenus paraissent raisonnables au Collège des Experts. Ils constituent, en l'état des connaissances et des données disponibles, la meilleure évaluation possible.

Toutefois, ces modèles de propagation n'ont fait l'objet d'aucune publication et n'ont donc pas de références tant au niveau national qu'international. Il est nécessaire que L. ROCHET, qui est l'auteur de ces remarquables études et recherches au CETE de Lyon, en publie les résultats afin qu'ils soient soumis à la critique de la communauté scientifique et soient confrontés au plus grand nombre de cas possibles.

Par ailleurs, il faut relever l'absence apparente d'eau dans la partie du versant susceptible de s'ébouler et l'étroitesse de la vallée de la Romanche à cet endroit ; ces deux circonstances limiteront la progression de la masse dans la vallée et conduiront à une bouchure d'une certaine hauteur. La comparaison avec des cas d'éboulements similaires conduit à penser que l'angle de pente de la masse éboulée devrait se situer entre 40 % et 50 %, ce qui est proche des profils définis par L. ROCHET pour la masse de 7 millions de mètres cubes.

Recommandations du collège d'experts

1. Le Collège d'Experts recommande le maintien sous surveillance du versant afin de suivre l'évolution des déformations et de déceler le plus tôt possible un éventuel changement de comportement qui pourrait inférer une modification du mécanisme de déformation pouvant conduire à une situation dangereuse.

2. Le dispositif d'auscultation mis en place par le CETE de Lyon est parfaitement opérationnel ; il sera amélioré par l'utilisation du distancemètre par micro-ondes radar qui permettra de faire face à des conditions météorologiques défavorables aux visées optiques. Le Collège d'Experts recommande de compléter le suivi par l'implantation de quelques repères géodésiques dans les zones d'extension Est et Ouest (A') et dans la zone de régression possible en amont du secteur très actif (C), bien que les sites correspondants ne soient pas très accessibles ; ces points pourraient être observés par GPS.

3. Le Collège d'Experts pense qu'il est regrettable que les travaux de creusement de la galerie de reconnaissance se soient arrêtés à une distance vraisemblablement faible d'un accident majeur du rebord méridional de l'affaissement du Mont Sec. Un sondage de reconnaissance subhorizontal à partir du fond de la galerie serait souhaitable pour permettre une meilleure analyse des mesures faites dans cette galerie. Si ces reconnaissances complémentaires étaient entreprises, une attention particulière devrait être portée aux investigations hydrogéologiques.

4. Le Collège d'Experts recommande une meilleure définition des caractéristiques géomécaniques, tant à l'échelle de la roche que du massif rocheux.

5. Le suivi microsismique des déformations d'un versant n'a jamais conduit en France à des résultats significatifs, alors que nos collègues italiens ont fait état de résultats probants. Les moyens d'études et de recherches consacrés à ce sujet ont sans doute été insuffisants en France. Ce thème de recherche pourrait être développé avec l'appui d'instituts de recherche italiens.

6. De manière plus générale, les pays de l'arc alpin sont tous confrontés à des risques de mouvements de terrain majeurs qui menacent des vallées. La confrontation des expériences vécues sur des sites divers constitue un support d'expertise incomparable. La création d'un tel réseau d'expertise par les pays de l'arc alpin serait d'une grande utilité.

Marc PANET, Christophe BONNARD, Pietro LUNARDI, Michele PRESBITERO

ANNEXES

Annexe 1 : Liste des principaux documents mis à la disposition du Collège d'Experts

- Vengeon J.M. *Déformation et rupture des versants en terrain métamorphique anisotrope*. Thèse LIRIGM. Grenoble. 1992.
- LCPC. LIRIGM. *Le versant instable des Ruines de Séchillienne. Rapport géologique*. Février 1998.
- CETE Lyon. Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées Rhône-Alpes. *Zone instable des Ruines de Séchillienne. Etude du risque d'éboulement en grande masse. Modélisation*. Mars 1998.
- CETE Lyon. Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées Rhône-Alpes. *Risque majeur d'éboulement des Ruines de Séchillienne. Point des mesures de suivi et de surveillance du site 1985 - 31 mars 2000*. Dossier H/33116. Mai 2000.
- CETE Lyon. Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées Rhône-Alpes. *Cartographie morphologique de la zone frontale du risque majeur d'éboulement de Séchillienne*. Aout 2000.
- Alfonsi P., J.L. Durville, P. Potherat. *Mouvement du versant de Séchillienne. Modélisation du tassement du Mont Sec*. LCPC. Septembre 2000.
- Potherat P. *Mouvement du versant de Séchillienne. Etude morpho-structurale*. LCPC. Septembre 2000.

Annexe 2 : Liste des questions posées au collège d'experts

1. Sur les mécanismes de déformation affectant le versant des Ruines de Séchillienne

- Nature et origine des modes de déformation
- Relations avec les données hydroclimatiques
- Relations avec le tassement du Mont Sec

2. Sur les modes de ruptures pouvant affecter le versant

- Glissements déclarés ou potentiels
- Localisation d'une surface de glissement éventuelle , moyens pour la mettre en évidence
- Basculements
- Eboulements régressifs

3. Sur les modes de rupture pouvant conduire à un éboulement majeur

- Ordre de grandeur des déplacements et des déformations précédant une rupture

4. Sur le suivi et l'auscultation du versant

- Avis sur l'auscultation actuelle
- Compléments éventuels

5. Sur l'évaluation des volumes des masses susceptibles de s'ébouler en distinguant les différents modes de rupture envisagés

6. Sur les modèles de simulation de propagation et d'étalement des éboulements dans la vallée

7. Sur les études complémentaires utiles

LISTE DES RAPPORTS ANNEXES

Christophe **BONNARD**, "Rapport individuel complétant le rapport du Collège d'Experts, Lausanne, novembre 2000

Pietro **LUNARDI**, "Relazione di commento ai quesiti", Milan, octobre 2000

Pietro **LUNARDI**, "Fiches d'identité pour les glissements italiens", Milan, septembre 2000

Michele **PRESBITERO**, "Relazione di commento ai quesiti", Milan octobre, 2000