

**Page 0**

**Page 0-1**

# Remerciment

Les instabilités rocheuses constituent l'un des risques naturels le plus souvent rencontré dans les grands reliefs de Korbous et restent malgré tout un domaine encore mal connu des Sciences de la Terre. Compte tenu de leurs caractéristiques, l'amélioration de nos connaissances dans le domaine de la stabilité des massifs rocheux passe par l'instrumentation et la surveillance de ces instabilités.

L'objectif de ce projet de fin d'étude est tout d'abord d'élaborer un canevas de contrôle sur les collines de Korbous afin de suivre l'évolution des déformations subies par une écaille rocheuse instable ainsi par ses traces sur toute la continuité du site. En effet, ce rapport va être le fruit de l'observation de différents paramètres (Déformation, météorologie.) Et leur suivi temporel pendant environ 3 mois.

# Resumé

# Table de matiere

## Introduction générale( non terminé)

Les instabilités rocheuses constituent l'un des risques naturels le plus souvent rencontré dans les grands reliefs de la planète, leur impact allant croissant avec le degré d'anthropisation (urbanisation, développement de voies de communication, etc.) de la surface du globe. Ces instabilités restent pourtant un domaine mal connu des Sciences de la Terre. Elles présentent néanmoins l'avantage indéniable d'être superficielles et donc aisément localisables et identifiables et par conséquent susceptibles d'être surveillées plus facilement qu'une faille sismique ou même qu'un volcan. En contrepartie, ces instabilités rocheuses sont nombreuses et souvent de dimensions limitées et donc éventuellement plus difficilement repérables. Par ailleurs, de par la variabilité de leur dynamique, pouvant s'étendre sur plusieurs ordres de grandeurs sur l'échelle des temps, l'appréhension de ces phénomènes rend incontournable le recours aux mesures, ce qui a incontestablement retardé les connaissances dans ce domaine. Ainsi l'appréciation des risques liés à ces instabilités nécessite de mettre en place des systèmes d'instrumentation de ces aléas.

A ce terme, ce projet de fin d'étude vise à mettre en évidence différents outils permettant d'arriver à une conclusion satisfaisante sur l'état du site des collines de Korbous, ou peut-être de Korbous en terme générale.

Les phénomènes visés sont les instabilités rocheuses, dont la phase paroxysmale, marquée par l'accélération soudaine des processus géomécaniques, est très courte et très difficile à observer.

## CHAPITRE 1 :

### Instabilités et surveillance

Ce chapitre présente l'aléa « mouvement de terrain » et plus particulièrement l'instabilité rocheuse, qui constitue l'objectif de surveillance de ces travaux de rapport de fin d'étude.

Ces phénomènes sont très difficiles à prévoir car il est extrêmement complexe de caractériser de manière exhaustive la qualité des ponts rocheux (altération et endommagement des discontinuités). Dès lors que des biens sont menacés, la mise sous surveillance d'un site constitue une protection efficace. Nous présenterons un tour d'horizon des techniques instrumentales utilisées dans le cadre de l'élaboration d'un système de gestion d'alerte. Pour terminer, nous détaillerons quelques études de cas d'écoute micro sismique d'instabilités rocheuses, domaine encore peu développé et faisant l'objet de ce rapport.

### 1. Les phénomènes d'instabilités rocheuses

#### 1.1

#### 3333335. Caractérisation du phénomène

Les instabilités rocheuses font partie de l'aléa « mouvement de terrain ». Ces phénomènes se caractérisent par la déstabilisation d'une masse rocheuse dont la force de gravité est l'élément moteur de la rupture [Flageollet, 1989]. Les instabilités rocheuses se manifestent par des phénomènes de chutes de pierres ou éboulements et peuvent représenter une menace pour les biens et les personnes. Ces phénomènes sont plus particulièrement fréquents et destructeurs en montagne du fait des versants souvent abrupts et des volumes importants de matériaux mobilisables (forte énergie potentielle).

Les instabilités sont caractérisées par des descripteurs physiques et par une probabilité de rupture (fréquence d'occurrence). Le volume constitue le critère le plus déterminant pour l'évaluation de l'aléa. C'est pourquoi, on retrouve principalement dans la littérature une classification des instabilités en fonction de l'intensité du phénomène (volume éboulé). Ainsi, on distingue la chute de pierre (volume < 0,1 m<sup>3</sup>), la chute de blocs (volume < 10 m<sup>3</sup>), l'éboulement (volume < 10 000 m<sup>3</sup>) et l'effondrement ou éboulement en masse (volume > 10 000 m<sup>3</sup>) [PPR, 1999, LCPC,

2004].

D'autres classifications se basent sur les mécanismes de rupture, le type de matériaux ou encore le mode de déplacement [Cruden et Varnes, 1996, CFGI, 2000]. Du point de vue de la sécurité, la vitesse de l'instabilité (rupture et propagation) est un élément essentiel à prendre en compte pour la définition des protections. On peut ainsi différencier le glissement, mouvement lent et progressif présentant des signes prémonitoires, le basculement, mouvement plus ou moins rapide, progressif avec indices d'évolution observables, et la rupture, mouvement rapide sans signes prémonitoires (cf. Annexe A-2). Il n'est pas rare d'observer des phénomènes combinant plusieurs de ces mécanismes soit simultanément, soit de manière échelonnée dans le temps (un mécanisme entraînant un autre).

L'identification des instabilités rocheuses s'effectue essentiellement par observation. Un massif rocheux est concerné par l'aléa instabilité, dès lors qu'il présente un état de fracturation avancé ou des traces d'un éboulement antérieur. L'identification des facteurs intrinsèques et déclenchants va permettre de caractériser l'instabilité [Finlayson & Statham, 1980].

Les facteurs intrinsèques correspondent à la description géo-mécanique du massif rocheux. Ils comprennent (cf. Figure 1):

- la définition des discontinuités (localisation, type), qui constituent les points de faiblesse du massif, à l'intérieur desquelles se développent des processus d'altération physico-chimiques qui participent à la stabilité du massif;
- les caractéristiques structurales des différentes discontinuités et des relations entre elles (orientation, pendage, persistance, espacement, etc.);
- les caractéristiques géomorphologiques et géo-mécaniques (lithologie, ouverture des épontes, remplissage, rugosité, volume des différents éléments instables, etc.) ;
- la définition des mécanismes de rupture probable (glissement, rupture de surplomb ou de pied de colonne, basculement, etc.) (cf. Annexe A-2).

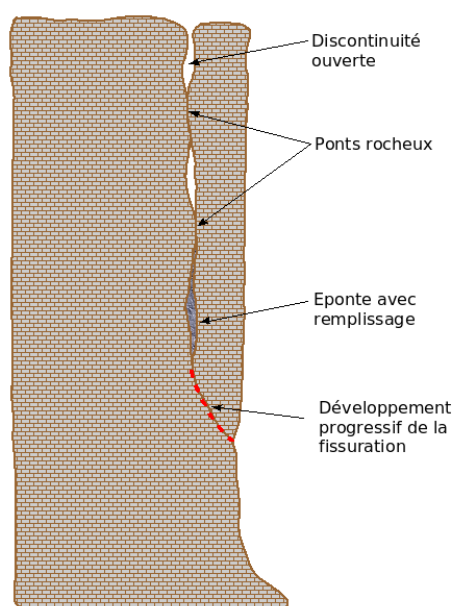


Figure 1 : Facteurs intrinsèques d'une éaille rocheuse participant à l'évolution de sa stabilité



# Resumé

Les facteurs intrinsèques vont se dégrader sous l'action de sollicitations extérieures. Il s'agit de tous les processus capables d'intervenir sur la stabilité du massif rocheux. Ces facteurs, dits « d'évolution » et « déclenchants », peuvent être d'origine naturelle ou anthropique.

Les facteurs d'évolution, nommés aussi facteurs dégradants, sont définis par les actions qui agissent régulièrement sur la stabilité (altération, gel/dégel). Les facteurs déclenchants concernent les actions discontinues qui interviennent brutalement (séisme, pression hydraulique suite à de fortes pluies). De manière globale, on les identifie par :

- les données hydrologiques et hydrogéologiques (présence d'eau, pluies, écoulement) ;
- la sismicité ;
- les données climatiques (cycle gel/dégel, vent, sécheresse) (cf. Figure 2) ;
- les données relatives au couvert végétal ;
- les données historiques ;
- l'activité anthropique à proximité (travaux, tir de mines, barrage hydraulique, trafic routier, etc.).



Figure 2 : Action du gel sur la fracturation de la roche (Grands Goulets, *photo P.Mouro*)

# Resumé

Une instabilité est associée à une probabilité de rupture que l'on définit comme la probabilité, pour une période donnée, qu'une masse rocheuse se mette en mouvement. Ce critère est néanmoins difficilement quantifiable car il dépend des facteurs intrinsèques (les forces résistantes) et des facteurs déclenchants (les forces motrices) dont l'action combinée va modifier l'état de stabilité du massif rocheux. On associe aussi à l'instabilité une probabilité d'atteinte qui correspond à la probabilité qu'un bloc rocheux atteigne une zone. Dans ce cas, il est possible d'estimer la trajectoire ainsi que l'énergie développée par la chute au moyen de modèles numériques du terrain. L'étude de la propagation est conditionnée par la géomorphologie du versant (pente, forme, obstacles, formes et caractéristiques des blocs, etc.). De nombreux codes de calcul des trajectoires existent et permettent d'évaluer des conditions probables de propagation des blocs dans un versant (Modèle LCPC, Modèle ADRGT, PIR3D de l'ENTPE, Modèle BRGM, Modèle EPFL). Les résultats obtenus à partir de ces modèles sont utilisés essentiellement pour la définition des ouvrages de protection (limite de propagation, énergie et distribution des impacts, volumes fragmentés après propagation, etc.). Les résultats de simulations peuvent différer d'un code à l'autre du fait que les modèles ne prennent pas en compte les mêmes interactions rhéologiques. Par ailleurs, la pertinence des résultats dépend de celle des paramètres d'entrée. Pour cette raison, les valeurs de ces paramètres doivent être calibrées par des informations de propagation de masses de blocs observées sur le terrain.

## 1.2. Évolution d'une instabilité vers la rupture

La stabilité d'une masse rocheuse évolue progressivement dans le temps. Sa résistance diminue naturellement au cours du temps par sollicitation des facteurs d'évolution [Finlayson & Statham, 1980, Hantz, 2003]. Les déformations qui s'opèrent dans le massif sont très faibles, quasiment invisibles en surface. Lorsque les forces motrices deviennent prépondérantes, la stabilité évolue alors dans une phase d'accélération marquée par des modifications géomorphologiques visibles. Cette phase peut se dérouler sur une échelle de temps très variable en fonction du type d'instabilité (de quelques minutes à plusieurs mois). La phase paroxysmale est atteinte par l'éboulement de la masse instable.

Dans le cas des mouvements de terrain lents, type glissement de terrain, la phase d'accélération est bien marquée, avec des indices de déplacement en surface visibles [Azimi et al., 1988, Duranthon et al., 2003]. Ce n'est pas le cas des instabilités rocheuses, où la prévision est rendue difficile par une phase d'accélération du phénomène très courte et très difficile à observer. Dans le cadre de cette thèse, on s'est ainsi attaché à élaborer des dispositifs permettant cette observation.

Il existe différentes méthodes d'évaluation des instabilités rocheuses dont l'objectif va de la caractérisation de l'aléa à la probabilité d'atteinte de l'instabilité. Parmi les différentes approches, on peut citer :

- la méthode Rock Engineering System (RES) [Hudson, 1992], modulable en fonction du choix des paramètres utilisés et permettant de définir un indice de probabilité d'atteinte (Rockfall Instability Index, RII);
- la méthode Rockfall Hazard Assessment Procedure (RHAP), utilisée par la région Lombardie (Italie) et permettant une évaluation rapide de la probabilité d'atteinte et du risque;
- la méthode du Laboratoire Central des Ponts et Chaussées [LCPC, 2001], basée sur une démarche détaillée opérationnelle et permettant par une approche qualitative d'évaluer l'occurrence d'une instabilité selon une échelle comportant 5 classes;
- la méthode MATTEROCK [Rouiller et al, 1998], basée sur une analyse détaillée de la stabilité et fournissant une carte de périmètre d'atteinte de chutes de blocs par unité de temps;
- la méthode Historique, Géo-mécanique et Probabiliste (HGP) [Hantz et al, 2003], qui aborde l'évaluation de l'aléa par une approche globale et associe la fréquence d'éboulement d'un secteur donné, à la probabilité de rupture d'un

# Resumé

massif déterminée par une approche géo-mécanique, empirique ou statistique;

- la méthode Rock Hazard Rating System (RHRS) [Pierson et al., 1990], développée spécifiquement pour le domaine routier et constituant une méthode opérationnelle qui fournit une carte de périmètre d'atteinte de chutes de blocs en fonction de la morphologie, de la fréquentation et des caractéristiques géo-mécaniques des roches;

- la méthode Rock Mass Rating (RMR) [Bieniawski, 1993], développée spécialement pour les travaux souterrains et permettant de classer les masses rocheuses d'un point de vue géo-mécanique, sans en évaluer la rupture. Une adaptation [Romana, 1993], appelée Slope Mass Rating (SMR), a étendu son application aux talus routiers (versants reprofilés).

Ces différentes méthodes font référence à la qualité de la roche, aux discontinuités, aux venues d'eau et à différents paramètres extérieurs qui influencent la stabilité. Elles permettent de définir une zonation spatiale de l'aléa en termes probabilistes.

Néanmoins, elles ne permettent pas de rendre compte de l'évolution temporelle de cet aléa et donc d'obtenir une appréciation réelle du risque.

Une autre approche permet d'intégrer cette problématique, il s'agit de l'approche instrumentale. Dans ce cas, il s'agit de détecter des indices physiques d'évolution de l'instabilité vers la rupture et de quantifier les paramètres pertinents par des mesures instrumentales continues. L'instrumentation permet d'appréhender les mécanismes qui s'opèrent au sein de la masse instable, en corrélant les différents paramètres mesurés tels que l'ouverture des fractures, la pluviométrie, la piézométrie, etc. Néanmoins, ces méthodes ne sont pas toujours adaptées aux phénomènes présentant une phase d'accélération rapide. En effet, ce type de phénomènes survenant de manière brutale présente pendant sa phase d'accélération des déplacements très rapides, dont l'amplitude est nettement inférieure à la résolution des capteurs de mesure de déplacement classiques. C'est une problématique qui sera abordée dans cette thèse afin de trouver d'autres paramètres observables pertinents.

Parmi les méthodes d'évaluation de l'aléa citées précédemment, et dans le cadre de l'instrumentation d'une instabilité rocheuse, nous utilisons la grille de caractérisation du LIRIGM [Dussauge-Peisser, 2002]. L'objet n'est pas ici d'évaluer la probabilité de rupture de l'aléa mais de décrire précisément l'instabilité afin de définir les meilleures techniques instrumentales à mettre en oeuvre.

La caractérisation de l'instabilité, dans le cadre de cette méthode, se présente sous la forme d'une fiche descriptive des paramètres à prendre en compte pour l'évaluation du risque (cf. Annexe A-2). L'intérêt de cette fiche réside dans sa structuration permettant de rendre la collecte de données la plus objective possible. Elle comporte quatre rubriques :

- les paramètres Statiques (S), relatifs à l'analyse de la stabilité actuelle ;
- les paramètres Dynamiques (D), indices de mouvement ;
- les facteurs d'évolution Continus (FC) ;
- les facteurs d'évolution aléatoires/Discontinus (FD), ou facteurs déclenchants.

Par la description des paramètres afférents à la nature de l'instabilité, chaque rubrique est affectée d'une note allant de 0 à 10. Une note élevée marque un caractère très défavorable. De plus, chaque rubrique est affectée d'un indice de qualité de l'observation, noté a, b et c, permettant de distinguer une observation sûre, d'une observation non vérifiée (ou non accessible).

Cette démarche, détaillée pas à pas, constitue un outil très intéressant en vue de définir une instrumentation car elle permet une évaluation la plus objective possible. Le jugement final, à savoir l'évaluation de l'instabilité, reste ainsi du ressort de l'expert.

## 2. Surveillance des instabilités rocheuses

Les instabilités rocheuses ne constituent pas, en France et dans le monde, le risque naturel le plus meurtrier. Néanmoins, une enquête effectuée en Rhône-Alpes montre que parmi les glissements de terrain, les érosions torrentielles et les éboulements

# Resumé

rocheux, ce sont ces derniers qui occasionnent les travaux les plus coûteux pour mettre en sécurité les itinéraires [LCPC, 2001]. En France, le risque de mouvement de terrain (*famille regroupant tous les types d'instabilités gravitaires*) concerne environ 4500 communes.

Pour se préserver de ces risques, deux grandes familles de protection sont habituellement utilisées :

- les protections actives, dont le but est d'intervenir sur l'aléa en s'opposant aux phénomènes et qui consistent par exemple à réaliser des opérations de stabilisation, confortement, drainage, terrassement, minage, purge, etc. ;
- les protections passives, qui agissent sur les conséquences du phénomène et qui correspondent à la réalisation d'ouvrages type barrage, écran, fosse, merlon, piège à blocs, déviateur, etc.

## 2.1. La mise sous surveillance

Lorsque les travaux de protection ne peuvent être envisagés, au moins à court terme, une autre solution consiste à mettre le site sous surveillance. La surveillance n'a pas d'action directe sur la conséquence du phénomène, en limitant par exemple sa propagation, mais intervient de manière indirecte en alertant de l'imminence d'un danger. On distingue différents degrés de surveillance.

L'observation permet de mettre en évidence l'existence de zones instables dans un massif. C'est une action ponctuelle, visuelle, et non instrumentée, effectuée par un expert dans le cadre de la définition d'un aléa ou de son suivi. L'inspection visuelle d'un site (observations qualitatives : apparition de nouvelles fissures, de venues d'eau, état de la fracturation, structure géologique, etc.) constitue une base indispensable pour assurer une surveillance fiable, qui ne se réduit en aucun cas à l'interprétation directe de mesures.

L'auscultation constitue la première étape de l'instrumentation d'un site. Elle permet l'examen régulier du site au moyen de capteurs de mesure, qu'ils soient à lecture directe (visuelle sur site) ou automatique (par un appareillage à enregistrement de données sur site). Ce contrôle effectué de manière régulière fournit des informations précises sur l'évolution de l'instabilité [LCPC, 1994].

La surveillance, proprement dite, se distingue de l'auscultation par son objectif de gestion de la sécurité. L'objectif de la surveillance est d'assurer un contrôle total ou partiel de l'instabilité. Elle doit fournir des informations précises sur l'évolution de l'état de stabilité d'un massif rocheux. Le recueil régulier et périodique des données, permet une exploitation et interprétation des informations liées à la stabilité du massif selon une échelle de temps adaptée à la nature du phénomène [LCPC, 1994]. Dans ce cadre, le contrôle est effectué uniquement à l'aide de capteurs et appareillage à enregistrement automatique, intégrant une unité de gestion des alertes. L'évaluation de la stabilité du massif est effectuée à chaque mesure afin qu'une procédure d'alerte adaptée au contexte du site puisse être déclenchée instantanément.

Le système de surveillance se différencie donc du système d'auscultation par :

- l'analyse des données en temps réel (selon une échelle de temps adaptée à l'évolution du phénomène);
- la prise en compte de contraintes temporelles.

Autrement dit, le système de surveillance ne doit pas simplement délivrer des résultats concernant la stabilité du massif rocheux, il doit les délivrer dans des délais imposés.

Un des principaux avantages de la mise sous surveillance d'un site réside dans sa rapidité de mise en oeuvre, permettant ainsi de faire face à des problématiques urgentes. Il peut par exemple s'agir de rétablir la circulation routière sur un axe stratégique menacé par un aléa d'éboulement rocheux. Le système de surveillance peut être mis en place et fonctionnel dans un délai de 48 heures alors que les moindres travaux de confortement demandent au minimum plusieurs semaines de réalisation. Hormis l'urgence, la mise sous surveillance est envisagée de manière temporaire, dans l'attente d'une décision politique ou de travaux de confortement ou de protection, mais aussi dans le cas où aucun ouvrage de protection n'est en mesure de

réduire significativement le risque.

## 2.2. Techniques instrumentales utilisées en surveillance

La surveillance fait appel à un vaste panel d'outils et de méthodes mis en oeuvre afin de suivre au mieux l'évolution d'un massif instable. L'instrument et la (ou les) méthode(s) qui lui sont appliqués doivent permettre de mesurer les paramètres caractérisant la stabilité du massif et l'évolution des facteurs déclenchants.

Néanmoins, parmi toutes les techniques de mesure existant actuellement, un nombre limité d'entre elles peut être utilisé pour la surveillance des instabilités rocheuses. En effet, le recours à une instrumentation dépend :

- de la compatibilité de la technique avec la mesure de la grandeur physique recherchée et de sa vitesse d'évolution;
- des contraintes environnementales du site (température, humidité, milieu corrosif, poussière, bruit, etc.);
- de la capacité de la technique à s'intégrer dans un processus de mesure automatisé dans le cadre d'un système de gestion d'alerte.

Différentes techniques instrumentales peuvent être utilisées dans le cadre de la surveillance des instabilités gravitaires. Une liste détaillée est fournie en annexe (cf. Annexe A-3).

Ces techniques peuvent être regroupées en 5 principales méthodes instrumentales :

- la mesure des déformations structurales (en surface et en profondeur) ;
- la mesure des vibrations ;
- la détection d'objets en mouvement ;
- la mesure de niveau et de pression ;
- la mesure météorologique.

Parmi ces méthodes, il existe un choix plus ou moins varié de techniques permettant de réaliser les mesures. Par exemple, la méthode de mesure des déformations regroupe un vaste choix de techniques et en particulier la mesure des déformations superficielles qui regroupe les techniques d'extensométrie, topographie, géodésie, radar, vidéométrie et interférométrie. Par contre, il n'en est pas de même pour la mesure du niveau de la nappe phréatique, qui ne peut être déterminé que par piézométrie. Néanmoins, lorsqu'une méthode présente un panel de techniques disponibles, le choix de la technique à mettre en oeuvre sera fonction de la nature de l'objet instrumenté. La caractérisation de l'aléa est primordiale afin de sélectionner la technique la mieux adaptée.

Ainsi un mécanisme de rupture brutale nécessite une technique ayant un temps de réponse et de traitement des données très rapide. De plus, si l'instabilité se situe dans une zone très difficile d'accès, il faudra alors privilégier une technique de mesure à distance.

D'autre part, dans le cadre de la surveillance d'une zone menacée, la sécurisation du site peut imposer en elle-même des contraintes dans le choix de la technique. Par exemple, la nature des enjeux peut imposer que la technique instrumentale soit opérationnelle de jour comme de nuit.

Enfin, les contraintes environnementales du site à instrumenter limiteront l'utilisation de certaines techniques. Il peut par exemple s'agir de techniques nécessitant une ressource énergétique trop importante, dont les besoins de maintenance réguliers ne sont pas adaptés aux conditions d'accès difficiles, etc.

Finalement, les techniques instrumentales s'attachent tout particulièrement à la manière d'effectuer la mesure alors que le système de surveillance quant à lui, vise à l'intégration des techniques instrumentales choisies dans un système de gestion d'alerte.

## 2.3. Système de surveillance : définition et méthodes opérationnelles

### 2.3.1. Définition d'un système de surveillance

Un système de surveillance est un système de mesure qui intègre des outils de

# Resumé

traitement de l'information permettant d'analyser en temps réel l'évolution d'un phénomène. Le dispositif de mesure et d'analyse est relié et synchronisé à un dispositif de gestion d'alerte ayant pour but de sécuriser la zone menacée en cas de crise.

On distingue trois grands types de systèmes de surveillance :

- le premier type, dit « tout ou rien », est le plus simple (*par exemple le Détecteur Routier d'Avalanches, DRA*). Son principe repose sur un simple contact électrique, qui est activé par rupture d'une boucle électrique ou par le mouvement d'un balancier (*par exemple au passage d'une avalanche*). Un signal électrique est transmis jusqu'à une balise en bordure de route qui déclenche des feux rouges ;
- le deuxième type regroupe toutes les stations de mesure télémétrées. La station de mesure, sur site, est programmée pour acquérir périodiquement les données et est capable de transmettre une alerte sur dépassement de seuil, soit localement vers un dispositif d'avertissement, soit à distance sous la forme d'un SMS, d'un message vocal ou d'un courriel. Certaines, plus évoluées, peuvent être interrogées à distance (par téléphone, GSM ou Internet) afin d'accéder aux données et à la configuration de la station ;

enfin, le système de télésurveillance le plus élaboré et le plus complet est un système qui permet de centraliser l'information de plusieurs sites sous surveillance par une gestion automatisée. De plus, il doit être équipé d'outils d'analyse, de gestion et de représentation visuelle de l'information, afin de fournir aux experts des outils d'aide à la décision, permettant d'assister les responsables dans la gestion de crise.

Dans le cadre de ce mémoire, nous nous intéressons exclusivement à ce dernier type de système.

Les systèmes de télésurveillance sont spécifiques à un aléa et aux types d'enjeux. C'est pourquoi il n'existe pas véritablement de solution « clé en mains ». Les systèmes actuels intègrent des technologies qu'il est nécessaire d'adapter ou modifier en fonction des besoins. Une grande part de développement logiciel « sur mesure » est en outre nécessaire pour coordonner l'ensemble du système.

## 2.3.2. Systèmes de télésurveillance opérationnels

Les systèmes de surveillance des mouvements de terrain sont relativement récents. Nous présentons, ci-dessous, quelques-uns d'entre eux portés à connaissance. Cette présentation n'est probablement pas exhaustive compte tenu de la difficulté à recenser ces expériences.

Le projet européen INTERREG « RiskYdrogé » [Interreg IIIA, 2006] a permis d'analyser trois systèmes de télésurveillance: Eydenet (Italie), GeSSRI (France) et Guardaval (Suisse). Ces trois systèmes ont pour objectif de gérer des problématiques de mouvements de terrain à l'échelle régionale et nationale. L'analyse réalisée montre tout d'abord que le développement d'outils de télésurveillance est relativement récent : GeSSRI (2000), Eydenet (2000) et Guardaval (2003).

Le système GeSSRI, développé par le CETE de Lyon pour la surveillance du site de Séchilienne (Isère), est un système bien plus mature que les autres compte tenu qu'il intègre la longue expérience de surveillance acquise sur le site des Ruines de Séchilienne depuis 1988, date de mise en oeuvre des premiers instruments de mesure automatisés. Le système a largement évolué grâce à une meilleure connaissance de l'aléa et à l'évolution des techniques instrumentales. Face aux enjeux concernés par cet aléa, l'accent a surtout été mis sur la sûreté de fonctionnement et la gestion des alertes [Duranthon, 2004].

Le système Eydenet, développé par la société ISMES, présente des caractéristiques très performantes de gestion d'alerte et d'aide à la décision, attestant d'une réflexion aboutie sur la problématique [Lazzari, 1999].

Le système Guardaval, développé par le CREALP, est un système plus récent. A la différence des deux autres systèmes, Guardaval s'articule sur une architecture clientserveur



# Resumé

avec une intégration vers Internet. La gestion des alertes est simplifiée mais le but fixé de centralisation des informations des différents sites surveillés dans le canton du Valais est atteint [Rouiller, 2004].

L'INERIS développe depuis plus de vingt ans des systèmes de télésurveillance appliqués à la gestion des risques du sol et du sous-sol. Elle a mis au point les systèmes de télésurveillance SYTGEO (géotechnique) et SYTMIS (microsismique) dédiés au suivi des ouvrages et à la gestion des risques du sol et du sous-sol. Le système SYTMIS a d'ailleurs été installé sur la falaise de craie de Mesnil-Val (Normandie) dans le cadre du projet européen PROTECT (PRediction Of The Erosion for Cliffed Terrains), visant à améliorer la connaissance des éboulements côtiers

[Busby, 2004]. Le système a permis de mesurer l'activité microsismique lors de l'éboulement du 23 juin 2002.

Développé par les sociétés GEOLITHE et LEAS, un système de surveillance en continu des éboulements rocheux par écoute acousto-sismique est en fonctionnement depuis l'été 2001 sur le site de La Rochaille (Alpes de Haute Provence). Le système de surveillance permet de sécuriser en permanence une portion de la Route RD900 (Col de Larche) au moyen de feux, panneaux de signalisation lumineux et barrières basculantes. Il était initialement prévu pour une durée de trois ans afin de permettre au Conseil Général des Alpes de Haute Provence d'organiser les travaux d'une galerie de protection. Compte tenu de ses performances, le système a été prolongé de cinq ans (jusqu'en 2009).

Concernant le domaine de la surveillance des avalanches, il y a lieu de mentionner le système islandais Watchman. Ce dernier, développé depuis 1996 par l'administration publique des routes en collaboration avec l'université d'Islande (*Reykjavik*), permet de sécuriser la route côtière de la région des Fjords de l'Ouest, où les accidents dus aux avalanches sont très fréquents [Bessasson, 2007]. Son fonctionnement est basé sur la détection sismique et sur l'analyse automatique des signatures sismiques. Ainsi en cas de reconnaissance d'un signal d'avalanche, un message téléphonique est aussitôt envoyé à la station de contrôle sur site qui déclenche la fermeture de la route.

## 2.3.3. Méthodes de surveillance : seuils et critères d'alerte

Les méthodes de surveillance vont permettre de déclencher des procédures d'alerte à partir de l'analyse des données reçues du (ou des) dispositif(s) de mesure. Pour cela des seuils doivent être définis préalablement afin que le système informatisé automatique soit en mesure d'évaluer les données.

La définition des seuils est une problématique extrêmement complexe à laquelle on ne peut répondre de façon exhaustive. Elle nécessite d'abord la définition des paramètres pertinents à suivre, sachant que ces paramètres varient suivant le type d'aléa surveillé. Ainsi la définition de seuils s'affine généralement au cours de l'auscultation grâce à l'amélioration des connaissances des facteurs d'évolution de l'instabilité. Cette approche, par approximations successives (« *learn-as-you-go* »), est la plus souvent utilisée. Néanmoins, lors de la mise sous surveillance d'une instabilité présentant déjà des signes d'accélération des valeurs seuils sécuritaires sont souvent fixées à des niveaux très bas de manière à rendre le système très sensible.

Les valeurs seuil peuvent être absolues ou relatives et s'attachent à la mesure ainsi qu'éventuellement à sa dérivée (i.e. vitesse).

Comme explicité précédemment lorsqu'un site est suivi depuis plusieurs années, les valeurs seuil peuvent être fixées en fonction des données historiques. A Séchilienne par exemple, les seuils d'alerte prennent en compte la vitesse journalière moyenne sur l'année N-1 (1er juillet au 30 juin), pour au moins trois capteurs appartenant à une liste pré-définie [Duranthon, 2004].

Cette méthode est aussi utilisée dans le cas du mouvement de terrain de la Becca di Nona (Aoste, Italie), où les seuils d'alerte, définis à 1.2 et 2.4 mm/h, ont pu être fixés sur la base des déplacements maximaux observés durant la réactivation du phénomène en octobre 2000, soit 4.5 à 6 mm/h [Interreg IIIA, Tamburini, 2006].

Dans le cas de mouvements présentant une phase d'accélération lente et progressive,



# Resumé

il est possible d'élaborer un modèle cinématique d'évolution permettant d'évaluer une date probable d'occurrence de l'éboulement. C'est le cas du Piton de la Becqua sur la commune de la Perrière (Savoie) qui a permis au LRPC d'élaborer un modèle de divergence ayant constitué une aide significative à la prise de décision [Effendiantz, 2000]. Deux capteurs de déplacement mesurent l'ouverture de la fissure arrière de l'éperon. A partir d'un pas de mesure d'un quart d'heure est calculée la vitesse moyenne sur 24 heures ( $V_{\text{moy}}$ ). Le modèle retenu, repose sur l'évaluation de l'intervalle de temps nécessaire pour enregistrer un déplacement de 10 mm (*seuil fixé grâce aux données d'auscultation de 1975 à 1999*), soit  $\Delta t = 10 / V_{\text{moy}}$ . Le modèle hyperbolique (en  $1/V$ ) proposait un pronostic jugé trop prudent car il aurait conduit à une évacuation injustifiée dès la première crise en février 1999, soit un mois avant l'éboulement. C'est le modèle exponentiel qui a été retenu pour la gestion de crise. Ce modèle, représentant  $\log(\Delta t)$  en fonction du temps, a servi de base à la décision d'évacuation 14 jours avant l'éboulement.

Parmi les autres méthodes empiriques, Saiton [Saiton, 1965] propose une relation entre la vitesse de déplacement ( $V$ ) et temps ( $t$ ), avec des coefficients empiriques ( $c$ ,  $m$ ) qui doivent être adaptés en fonction de chaque site :  $\log(t) = c - m \cdot \log(V)$ .

L'approche développée par Voight [Voight, 1988, 1989], basée sur l'évolution des déplacements superficiels, est également couramment employée. La méthode part du principe 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 une estimation de la date de rupture.

Malgré ces expériences, la définition d'un seuil reste très difficile à appréhender. Le déclenchement d'une alerte tient compte d'une part des seuils d'alerte mais aussi de critères permettant de combiner des données multi-sources.

Ainsi, lors de l'éboulement du Meidji (Commune de Saint-Nicolas, Valais) en novembre 2002, les autorités suisses ont fait évacuer la zone 24 heures avant l'éboulement. Un système de surveillance basé sur des mesures de déplacement par extensométrie et topométrie avait été mis en place quelques mois avant. Néanmoins, ce n'est pas sur la base d'un dépassement de seuils que la décision a été prise par les experts mais en comparant les vitesses de déplacement couplées à l'analyse du comportement géomécanique [Interreg IIIA, Pointer, 2006].

Un critère d'alerte peut être défini de différentes manières et dépend essentiellement de la bonne connaissance du site et de l'aléa. La typologie suivante a été reprise de l'étude comparative menée dans le cadre du projet INTERREG [Interreg IIIA, Ornstein, 2006].

Le cas le plus simple est le critère unique :

*Exemple : SI ( $V_{\text{extenso}} > 2 \text{ mm/h}$ )*

Le critère corrélé permet de sectoriser l'instabilité par groupes de capteurs de même type :

*Exemple : SI ( $V_{\text{extenso}_1} > 2 \text{ mm/h}$ ) ET ( $V_{\text{extenso}_2} > 2 \text{ mm/h}$ )*

Lorsque plusieurs types de données sont disponibles, on peut utiliser un critère combiné :

*Exemple : SI ( $V_{\text{extenso}_1} > 2 \text{ mm/h}$ ) ET ( $V_{\text{pluie}} > 14.8 \text{ mm/h}$ )*

Le critère de persistance est basé sur un des trois critères précédent (unique, corrélé ou combiné) auquel est ajouté une condition de répétabilité :

*Exemple : SI (<critère\_unique>) apparaît 2 fois de suite*

Le critère statistique utilise des outils tels que la covariance ou la régression linéaire. Il est basé sur un critère simple néanmoins la comparaison ne s'effectue pas avec une valeur seuil définie préalablement mais avec une valeur attendue, estimée par exemple par une régression linéaire (d'ordre 1) sur une période de référence (période connue de 24 à 72 heures) :

*Exemple : SI ( $V_{\text{extenso}_1} > V_{\text{reg\_lin\_24h}}$ )*

A partir de ces critères, il est possible d'établir toutes les combinaisons souhaitées en fonction des connaissances du site et de l'instabilité.

## 2.3.4. Remarques générales sur les méthodes de surveillance

L'expérience montre que la définition des seuils et critères d'alerte s'effectue souvent au cas par cas et est affinée à partir d'une auscultation préalable de l'instabilité. Il faut ainsi rester prudent sur l'utilisation de modèles déterministes, qui s'attachent le plus souvent à l'extrapolation d'une seule variable (le déplacement). Or les fluctuations sur les déplacements (ouverture de fracture) ne sont pas nécessairement représentatives, de manière exhaustive, de la stabilité du massif rocheux. Par ailleurs, l'état de stabilité au moment de la mise sous surveillance n'est connu qu'avec une grande incertitude. La mise sous surveillance est souvent décidée lorsqu'un mouvement a été observé et confirmé. Enfin, les conditions aux limites géo-mécaniques et structurales du massif rocheux, y compris la localisation des surfaces de rupture, ne sont souvent pas connues précisément.

Ainsi si les modèles peuvent être validés a posteriori, leur application a permis de montrer qu'ils ne fonctionnent qu'en phase terminale de crise, c'est à dire pendant la phase d'accélération définitive avant la rupture [Rocher, 1992]. Les instabilités gravitaires de grande ampleur, telles que les Ruines de Séchilienne, La Clapière, ou le glissement de Randa, ainsi que les cas de glissements présentant une phase d'accélération croissante et graduelle, tels que les sites de La Perrière et du Meidji, qui ont fait l'objet d'études détaillées, constituent des références importantes pour l'établissement de seuils.

La mise sous surveillance est souvent décidée lorsqu'un mouvement a été observé et confirmé. L'état de stabilité à ce moment-là n'est connu qu'avec une grande incertitude. En particulier, les conditions aux limites géo-mécaniques et structurales du massif rocheux, y compris la localisation des surfaces de rupture, ne sont souvent pas connues précisément et doivent donc l'être pour mieux appréhender la stabilité réelle de la zone potentiellement instable.

La grande variété des instabilités potentielles en massif rocheux, qui peuvent atteindre l'échelle de l'instabilité de versant de grande ampleur -comme celles des Ruines de Séchilienne, de Randa ou de la Clapière-, ou bien celle des blocs rocheux des Gorges de la Bourne ou des Grands Goulets dans le Vercors, implique des niveaux de complexité et d'interaction, et donc des dynamiques très différentes. Il est donc clair que l'on ne peut rechercher un modèle unique pour rendre compte de cette dynamique. L'identification de grandes classes de dynamique de mouvements gravitaires est elle-même un objectif à atteindre. Repérer la place d'une instabilité parmi ces grandes classes est une aide pour la détermination des paramètres observables pertinents, ainsi que pour leur utilisation pour suivre et peut-être prévoir l'évolution de cette instabilité (par exemple, [Rochet, 1992 ; Effendiantz et Rochet, 2000]).

L'expérience montre que la définition des seuils et critères d'alerte s'effectue souvent de façon empirique, au cas par cas et est affinée à partir d'une auscultation préalable de l'instabilité (par exemple, [Effendiantz et Rochet, 2000]). Il est également nécessaire de tester un ensemble de paramètres et non pas un seul. Il faut également déterminer quels sont les ensembles de paramètres pertinents. Il faut ainsi rester prudent sur l'utilisation de modèles qui s'attachent à l'extrapolation d'une seule variable (le déplacement). Les fluctuations des déplacements (ouverture de fracture) ne représentent pas nécessairement très bien la dynamique interne fine de la stabilité du massif rocheux. Par exemple, un bloc associé à un massif par quelques ponts rocheux répartis à la surface d'une fracture arrière verticale peut rester immobile ou se déplacer de façon infime et éventuellement non mesurable, alors que l'état des ponts rocheux évolue sous l'effet de transformations physico-chimiques (transfert de matière, par exemple) lentes mais continues. Cette dynamique profonde ne sera pas représentée correctement par les mesures de déplacement. La question est de savoir si les mesures acoustiques, ou l'utilisation du bruit sismique acquis en continu peut permettre de connaître mieux l'évolution de l'état de ce type de fracture et des ponts

rocheux qu'elle contient.

Ainsi si les modèles peuvent être validés a posteriori, leur application a permis de montrer qu'ils ne fonctionnent qu'en phase terminale de crise, c'est à dire pendant la phase d'accélération définitive avant la rupture.

Les instabilités gravitaires de grande ampleur, telles que les Ruines de Séchilienne, La Clapière, ou le glissement de Randa, ainsi que les cas de glissements présentant une phase d'accélération croissante et graduelle, tels que les sites de La Perrière et du Meidji, qui ont fait l'objet d'études détaillées, constituent des références importantes pour l'établissement de seuils.

## 2.3.5. Présentation de sites sous surveillance

Nous avons recensé, en annexe, une liste non exhaustive de sites, qui ont fait ou font l'objet d'une surveillance avec gestion d'alerte, en France et dans les pays de l'Arc alpin (cf. Annexe A-4).

L'aspect de la sécurité constitue l'objectif majeur de ces sites, ce qui signifie qu'en plus de la mesure, ces systèmes de surveillance transmettent l'information (par télémétrie) vers un centre de traitement, capable de générer des alertes opérationnelles.

## 2.4. Auscultation des instabilités par écoute microsismique

L'écoute microsismique est une technique qui consiste à mesurer et analyser les vibrations émises lors de ruptures dans les massifs rocheux sous contrainte. Au sein d'une instabilité rocheuse, l'énergie emmagasinée se libère brutalement sous la forme de rupture et génère des ondes élastiques se propageant dans le milieu. Leur magnitude étant très faible (souvent négative ou nulle), on appelle ces séismes des nano-séismes.

Les réseaux microsismiques sont apparus à partir des années 60 grâce aux avancées technologiques en instrumentation, transmission et traitement des données. En 1981, on recense déjà plus de 100 réseaux microsismiques permanents dans le monde auxquels s'ajoutent les nombreux réseaux de mesures temporaires [Lee & Stewart, 1981]. Les applications sont nombreuses. La majorité des réseaux installés sont principalement utilisés pour l'étude des tremblements de terre. Mais l'écoute microsismique s'étend à d'autres domaines. Elle est utilisée entre autre, dans la surveillance des exploitations souterraines et pétrolifères [Smith et al., 1974, Senfaute 1995, 2000, Mendecki, 1997], ainsi que dans la surveillance volcanique [Endo & Murray, 1991, Scarpa et al., 1996]. Par contre, elle n'a pas encore été validée comme système de surveillance opérationnel pour le suivi des instabilités rocheuses.

Néanmoins, différentes expérimentations ont été menées et ont démontré un fort potentiel dans la prévision des éboulements [Verdier, 1993, Senfaute et al., 2003, Clément, 2004, Gunzburger, 2004, Amitrano et al., 2005, Spillmann, 2007]. Ces expériences d'écoute microsismique appliquées à la surveillance des instabilités rocheuses sont encore rares mais les résultats obtenus ont permis de mettre en évidence qu'un éboulement rocheux est précédé d'une activité micro-sismique liée à la déstabilisation du massif. [Amitrano et al., 2005] ont observé un accroissement d'activité sismique avant l'éboulement de la falaise de craie de Val-Mesnil ; ils ont montré que cet accroissement suivait une loi puissance qui peut être interprétée comme un précurseur à la rupture. Ils ont également mis en évidence le fait que la taille moyenne des événements avait tendance à augmenter lorsque le massif se rapproche de la rupture. On remarque que certaines sources sismiques, très localisées, ne sont pas détectées par tous les capteurs sismiques du réseau en place. En effet, la structure géo-mécanique des instabilités rocheuses étant très fracturée, les discontinuités constituent généralement des filtres naturels à la propagation des ondes sismiques. A cette caractéristique s'ajoute la nature des matériaux les constituant qui peuvent aussi jouer un rôle atténuateur. C'est le cas pour l'éboulement de la falaise de Mesnil-Val (Normandie) dont les signaux sismiques n'ont été détectés que par un seul capteur situé à la limite de la zone de rupture. Les autres capteurs, entourant la zone à des distances d'environ 50 m n'ont rien détecté. Cette forte atténuation peut être

# Resumé

partiellement expliquée par la porosité de la craie (environ 45%) [Senfaute et al., 2003].

## Conclusion

### Bibliographie

Flageollet J.-C., 1989. Les mouvements de terrain et leur prévention, Paris, Ed. Masson, Collection Géographie, 224p.

PPR, Plans de Prévention des Risques naturels, Risques de mouvements de terrain, 1999. Guide méthodologique, Ministère de l'aménagement du territoire et de l'environnement, La documentation française, 71p.

# Resumé

Finlayson B, Statham I., 1980. Hillslope analysis, Heineman, Londres, Grande-Bretagne.

Cruden, D.M., and Varnes, D.J., 1996. Landslide types and processes: in Turner, K.A. and Schuster, R.L., editors, Landslide Investigation and Mitigation: National Research Council, Transportation Research Board Special Report 247, p. 36-75.

Azimi C., Desvarreux P., 1996. Quelques aspects de la prévision des mouvements de terrains, Revue française de géotechnique, vol. 76, pp 63-71.

Hantz D., Vengeon J.M., Dussauge-Peisser C., 2003. An historical, geomechanical and probabilistic approach to rock fall hazard assessment. Natural hazards and Earth System Sciences, 3, 693-701.

CFG, 2000. Caractérisation et cartographie de l'aléa dû aux mouvements de terrain, Collection Environnement – Les risques naturels, Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, 91p.

Duranthon J.-P., 2000. Application de la méthode GPS de localisation par satellite à la surveillance de sites naturels instables. B.L.P.C., n°228, p. 47-57.

Pierson L.A., Davis S.A. and Van Vickie R., 1990. Hazard Rating System Implementation Manual, Federal Highway Administration (FHWA) Report FHWA-OREG-90-01,

Bieniawski Z.T., 1993. Classification of rock masses for engineering; The RMR system and future trends, in J.A. Hudson, Rock testing and site characterization, pp. 553-573, Pergamon Press, Oxford, UK.

Romana M.R., 1993. A geomechanical classification for slopes : Slope Mass Rating, in J.A. Hudson, Rock testing and site characterization, pp. 575-600, Pergamon Press, Oxford, UK.

Dussauge-Peisser C., 2002. Evaluation de l'aléa éboulement rocheux. Développement méthodologiques et approches expérimentales. Application aux falaises calcaires du Y grenoblois. *PhD thesis*, Université Joseph Fourier, France.

LCPC, 1994. Surveillance des pentes instables, Guide technique, Techniques et méthodes des laboratoires des ponts et chaussées.

LCPC, 2001. Parades contres les instabilités rocheuses, Guide technique, Collection Environnement, Les Risques Naturels, 143p.

Interreg III A « RiskYdrogé » , 2006. Risques hydro-géologiques en montagne : parades et surveillance, Programme Interreg III A, DVD Rom.

Duranthon J.-P., Effendiantz L., 2004. Le versant instable des "Ruines" de Séchillienne, Point sur l'activité du phénomène et présentation du nouveau dispositif de gestion de la télésurveillance, B.L.P.C., n°252-253. septembre-décembre 2004, Art

4532, pp 29-48.

Rouiller J.D., Ornstein P., Délèze J.Y., 2004. GUARDAVAL : la télésurveillance appliquée à la gestion des risques naturels en milieu alpin. GeoQuebec 2004, 57<sup>ème</sup> Congrès Canadien de Géotechnique, papier G33.996.

Busby J.P. et coll. 2004. Programme de recherche européen : PRediction Of The Erosion of Cliffed Terrains (PROTECT), Final Report, Sections 1-3.

Bessason B., Eiriksson G., Thorarinsson O., Thorarinsson A., Einarsson S., 2007. Automatic detection of avalanches and debris flows by seismic methods, *Journal of Glaciology*, Vol. 53, No. 182.

Effendiantz L., Rochet L., 2000. Suivi d'une instabilité rocheuse jusqu'à l'éboulement. Commune de La Perrière (Savoie), Bull. Liaison Laboratoire des Ponts & Chaussées, n°226, pp 47-56.

Saito M., 1965. Forecasting the time of occurrence of a slope failure, Proceedings of 6th ICSMFE, Montreal.

Voight B., 1988. Material science law applies to time forecast of slope failure, Landslides news, 3.

Voight B., 1989. A relation to describe rate-dependent material failure, Science, vol.243.

Rochet L., 1992. Auscultation; diagnostic; surveillance, Bull. Int. Assoc. Eng. Geol., 45, 43-57.

Rogers J.A., Stephens C.D., 1991. SSAM : a PC-based seismic spectral amplitude measurement system for volcano monitoring, Seismol Res Lett 62: 22.

Lee W.H.K., Stewart S.W., 1981. Principles and applications of microearthquake networks, Academic Press, New York, New York, 293.

Smith R., Winkler P.L., Anderson J.C., Scholt Ch., 1974. Source mechanisms of microearthquakes associated with underground mines in Easter Utah, *Bull. Seism. Soc. Am.* 64, pp.1295-1317.

Senfaute G., 1995. La surveillance microsismique de l'exploitation souterraine du charbon aux houillères de Provence : Contribution à la détection des risques de coups de terrains par écoute microsismique, Thèse de doctorat, INPL, Nancy, 321p.

Senfaute G., Abdul Wahed M., Piguet J.-P., Josien J.-P., 2000. Technique d'écoute microsismique appliquée au risque d'effondrement dans les mines du bassin ferrière lorrain. *Revue Française de Géotechnique*, 92, pp 57-62

Mendecki, A.J., 1997. Seismic Monitoring in Mines. Chapman & Hall, London, 262.

Endo E.T., Murray T.L., 1991. Real-time seismic amplitude measurement (RSAM) : a volcano monitoring and prediction tool. *Bull Volcanol* 53: 533-545.

Scarpa R., Tilling R. I., et al, 1996. Monitoring and mitigation of volcano hazards, ISBN 3-540-60713-7 Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York.

Verdier J.M., 1993. Etude de l'activité nano-sismique du versant de la Clapière, Rapport de stage 3<sup>ème</sup> année ISTG Géotechnique, Grenoble, 100p.

Senfaute G., Merrien-Soukatchoff V., Morel J., and Gourry J.C., 2003. Microseismic monitoring applied to prediction of chalk cliffs and contribution of numerical modelling,

# Resumé

in Fast Slope Movement Prediction and Prevention for Risk Mitigation, edited by L. Picarelli, pp. 463 – 468, Bologna, Naples.

Clément C., 2004. Technique d'écoute microsismique appliquée à l'auscultation du versant rocheux instable de Valbres (Alpes-Maritimes), Interprétation des mesures, caractérisation du milieu et de son instabilité. Mémoire de stage de fin d'études, École et Observatoire des Sciences de la Terre (EOST), Université Louis Pasteur, Strasbourg I, France

Gunzburger Y., 2004. Rôle de la thermique dans la prédisposition, la préparation et le déclenchement des mouvements de versants complexes, Thèse de doctorat, INPL, Nancy, 157p.

Amitrano D., Grasso, J.R., Senfaute G., 2005. Seismic precursory patterns before a cliff collapse and critical-point phenomena. Geophys. Res. Lett., 32, 1-5.

Spillmann T., 2007. Borehole radar experiments and microseismic monitoring on the unstable Randa rockslide (switzerland), *PhD thesis, ETH Zurich*, Diss. ETH no. 16866.

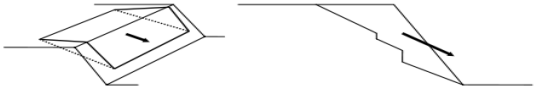
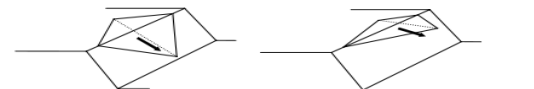
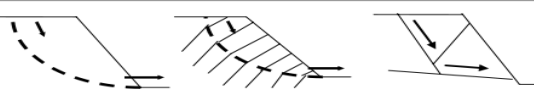
## Annexe

### A.2. Caractéristiques des instabilités gravitaires rocheuses

*Nous présentons dans cette annexe quelques propriétés des roches et décrivons les différents mécanismes d'instabilités rocheuses. Nous terminerons par la présentation de la fiche de caractérisation (méthode LIRIGM) que nous utilisons pour caractériser les instabilités étudiées.*

#### Mécanismes d'instabilités rocheuses

Les mécanismes d'instabilité sont différents suivant la configuration des versants rocheux qui vont présenter différents types de rupture possibles. On peut répertorier les principales configurations potentiellement instables selon trois familles : glissement, rupture et basculement [Hantz, 2001].

Configurations potentiellement instables	Mécanisme d'instabilité
	Glissement plan
	Glissement dièdre ou plan
	Glissements rotationnel (et fractionné)

# Resumé

*Les différents mécanismes d'instabilités rocheuses (d'après Hantz, 2001)*

## Type de discontinuités

Les caractéristiques structurales et géomécaniques des discontinuités jouent un rôle primordial dans le déclenchement d'éboulement (Hoek and Bray, 1981, Goodman et Shi, 1985). Les caractéristiques des différents plans de discontinuités définissent le découpage en blocs du massif, et jouent un rôle majeur dans les circulations d'eau et les mécanismes de rupture.

Plan de schistosité (plan de clivage): plan des feuillets, plus ou moins serrés, présenté par certaines roches, acquis sous l'influence de contraintes tectoniques, distinct de la stratification, et selon lequel elles peuvent se débiter en lames plus ou moins épaisses et régulières. La schistosité peut s'accompagner de phénomène de dissolution d'où concentration de particule.

Plan de stratification: plan délimitant différentes formations géologiques.

Diaclase: cassure de roches ou de terrains sans déplacement relatif des parties séparées. S'emploie plus spécialement pour des cassures perpendiculaires aux couches sédimentaires.

Faille: cassure de terrain avec déplacement relatif des parties séparées. Ce terme désigne le plus souvent des accidents verticaux, ou à pendage fort et n'impliquant pas de recouvrement (cf chevauchement, charriage).

Fracture: terme général désignant toute cassure avec ou sans rejet, de terrains, de roches, voire de minéraux.

Joint (de retrait): toute surface de discontinuité au sein d'une roche ou d'un terrain, qui n'est pas un contact anormal avec déplacement (faille, ..). Un joint tectonique est une cassure sans rejet.

Lithoclase: toute cassure de roche avec ou sans déplacement relatif des parties.

Rejet (d'une faille ou d'un décrochement): amplitude du déplacement causé par une faille.



# Resumé

Fiche de caractérisation des instabilités rocheuses (grille-LIRIGM)

D'après [Dussauge-Peisser, 2002].

Nous présentons ci-après la grille LIRIGM de caractérisation d'une instabilité rocheuse utilisée dans le cadre de l'évaluation des aléas rocheux. L'intérêt de cette fiche réside dans sa structuration permettant de rendre la collecte de données la plus objective possible.

Le principe de cette grille est de lister de la manière la plus exhaustive, les différents paramètres à prendre en compte pour la caractérisation des aléas rocheux. Dans un souci d'objectivité, le résultat de cette grille ne présente pas une seule note finale mais une série de valeurs pour 4 rubriques :

- Statique (S) ;
- Activité (A), noté également Dynamique (D) ;
- Facteurs d'évolution Aléatoires / discontinus (FA) ;
- et Facteurs d'évolution Continus (FC).

	STATIQUE			S/10
MECANISME	Découpage principal (/5)	Conditions géométriques aggravantes (1/3)	Conditions géomécaniques aggravantes (/2)	
Gp  Glissement plan	CONDITION NECESSAIRE : (pendage < pente du versant) ET (Δ azimuts plan / front de falaise < 20°)  Continuité de la surface de glissement :  Probabilité faible 0 Probabilité moyenne 1 Probabilité forte 3 Continuité avérée 5	• Découpage latéral : surfaces libres ou plans de décollement latéraux  Non 0 D'un côté 1 Des deux côtés 2  • Plan de décollement arrière  0 (non) 1 (oui)	Pendage < $\phi_{estime} - 10^\circ$ 0 Pendage = $\phi_{estime} \pm 10^\circ$ 1 Pendage > $\phi_{estime} + 10^\circ$ 2  <u>Proposition d'estimation de <math>\phi</math> :</u> - Joint argileux : $\phi \approx 15^\circ$ (10-20°) - Plan lisse : $\phi \approx 30^\circ$ - Joint rugueux : $\phi \approx 45^\circ$ (40-50°)	
Gd  Glissement d'un dièdre	CONDITION NECESSAIRE : 2 discontinuités dont l'intersection plonge vers l'aval avec un plongement inférieur à celui du versant (mesuré dans la direction de l'intersection).  Continuité de la surface de glissement (ensemble des 2 plans, voir Jaboyedoff et al. 1996) :  Probabilité faible 0 Probabilité moyenne 1 Probabilité forte 3 Continuité avérée 5	• Plan de décollement arrière 0 1 (non) (oui)  • - Si glissement sur un plan : 2 - Si glissement sur deux plans :  Ouverture du dièdre $\alpha < 90^\circ$ 0 $\alpha < 120^\circ$ 1 $\alpha > 120^\circ$ 2	Si glissement sur un seul plan, idem Gp. → 0 1 2  Si glissement sur deux plans : idem Gp en considérant l'inclinaison de l'intersection et l'angle de frottement du plan de pendage le plus faible. On peut être plus rigoureux en utilisant les abaques de Hoek et Bray (1981).	
Glissement rotationnel	CONDITION NECESSAIRE : roche suffisamment fracturée pour que la taille des éléments soit négligeable devant la taille de la pente. APPROCHE GLOBALE : $S = 10-3F$ (arrondi au nombre entier et positif le plus proche) Facteur de sécurité F calculé avec c et $\phi$ - issus d'une évaluation type RMR ou Q - et la pente du versant (abaques en Annexe I, d'après Hoek et Bray, 1981)			

• Création du découpage :

# Resumé

STATIQUE (suite)							S / 10
MECANISME	Découpage principal (/5)				Conditions géométriques aggravantes (/3)		Conditions géomécaniques aggravantes (/2)
		Elancement $E < 2$	Elancement $2 < E < 5$	Elancement $E > 5$			
<b>Cb</b> Basculement de colonne	Découpage arrière douteux	0	1	2	Projection du centre de gravité : Rapport Plus grande largeur / largeur de la base $e$		Résistance en traction du pied (matrice + joints) :
	Fracture arrière fermée	1	2	3	$e < 1.5$ (tiers central) 0		- Roche massive et saine 0
	Fract. arrière ouverte	3	4	5	$1.5 < e < 2.5$ (hors 1/3 central) 1-2		- Roche fissurée ou altérée, ou présence d'un joint 2
					$e > 2.5$ (hors base) 3		
<b>Cp</b> Rupture en pied de colonne	H = hauteur	$H \leq 15$ m	$15 \leq H \leq 50$ m	$H \geq 50$ m	Présence d'un plan de glissement basal		Résistance en compression simple du pied et du socle
	Découpage arrière douteux	0	1	2	Probabilité faible 0		- Roche saine 0
	Fracture Arrière Fermée	1	2	3	Probabilité moyenne 1		- Roche fracturée 1
	Décollé à l'arrière	3	4	5	Probabilité forte 2		- Roche tendre ou très altérée 2
					Continuité avérée 3		
<b>Bf</b> Rupture de banc	CONDITION NECESSAIRE : Discontinuité plus ou moins parallèle au versant, non émergente ( $\Delta$ azimuts plan / front de falaise $< 20^\circ$ ) Continuité de la surface de glissement : Probabilité faible 0 Probabilité moyenne 1 Probabilité forte 3 Continuité avérée 5				• Rapport longueur / épaisseur du banc (voir équation III.12, p96) : $l < l_c : 0$ $l > l_c : 1$ • Fractures transverses : 0 1 (non) (oui) • Emergence latérale du plan basal ou plans de décollement latéraux 0 1		Fendage $< \phi$ estimé - $10^\circ$ 0 Fendage = $\phi$ estimé $\pm 10^\circ$ 1 Fendage $> \phi$ estimé + $10^\circ$ 2 Proposition : - Joint argileux : $\phi = 15^\circ$ (10-20°) - Plan lisse : $\phi = 30^\circ$ - Joint rugueux : $\phi = 45^\circ$ (40-50°)

MECANISME	ACTIVITE			A / 10
	ACTIVITE ACTUELLE AVEREE (/8)		SIGNES D'ACTIVITE PASSEE (/2)	
	Mouvements mesurés ou prouvés, éboulement voisin dans configuration analogue, chutes de blocs au front		Ouverture ou rejet sur fractures en crête (s'ajoute à l'existence, constitutive ou non, d'une fracture en crête)	Fractures ouvertes ou rejet en paroi
<b>Gp</b>	• Si des mesures existent et montrent un mouvement :		0 1	0 1 Sur le plan de glissement
<b>Gd</b>	- Mouvements mesurés : 0 à 5 - Eboulements voisins dans une configuration analogue : 0 à 2		0 1	0 1 Sur les plans de glissement
<b>Gr</b>			0 1	0 1 sur la surface de rupture (front souvent très fracturé, ouverture difficilement observable)
			0 ou 1 si configuration verticale	0 1

# Resumé

MECANISME	FACTEURS D'EVOLUTION ALEATOIRES / DISCONTINUS				FD / 10
	Pressions interstitielles (/5)	Sismicité de base (période de retour 1 an) (/1)	Sismicité exceptionnelle récurrente (période de retour 475 ans) (/2)	Lien avec autres aléas (glissement de versant, érosion par torrent / crues torrentielles en pied ou latéralement ...) (/2)	
Gp	La note attribuée doit tenir compte de la complexité des circulations d'eau qui peuvent aboutir à des mises en pression, en se basant entre autres sur les points suivants :	(*)	(*) L'influence d'un séisme sur un aléa est quantifiée par l'accélération horizontale produite, qui dépend de la magnitude et de la distance de l'événement	0 1 2	
Gd	• Les entrées d'eau dans le massif : - La pluviosité de la région concernée ; - L'étendue du bassin versant : influence la quantité d'eau qui peut arriver sur le massif ;	$a < 0.001 \text{ g}$ 0		Poussée active en tête, diminution de butée...	
Gr	- L'ouverture des fractures en tête : favorise les infiltrations ; - L'orientation du versant : en cas d'enneigement, en versant sud les pics de fonte seront plus forts et plus répétitifs qu'en versant Nord (+ cycles gel / dégel plus fréquents) ;	$a \geq 0.001 \text{ g}$ 1			
S	• Les sorties d'eau dans le massif : - Les observations de sortie d'eau : écoulement, suintement, signes (mousses, tufs...) ; - Le niveau de ces sorties d'eau dans le massif : plutôt plus défavorable en partie basse qu'en partie haute (indice sur la continuité des discontinuités) ;	$a < 0.1 \text{ g}$ 0 $a < 0.3 \text{ g}$ 1 $a \geq 0.3 \text{ g}$ 2		0 1 (peu d'influence)	
Cb	- Le temps passé depuis les dernières précipitations : des arrivées d'eau persistant plusieurs jours après les dernières pluies sont indicateurs d'écoulements lents (mises en pressions possibles en cas de précipitations prolongées ou intenses) ; - Les exutoires : des exutoires masqués ou bouchés, de façon permanente (plaquage de calcite...) ou temporaire (bouchons de	Plus d'influence (effet de site, résonance). Non quantifié en l'état.		0 1 2	Surtout influent à la base
Cp		$a < 0.001 \text{ g}$ 0	$a < 0.1 \text{ g}$ 0 $a < 0.3 \text{ g}$ 1		

# Resumé

MECANISME	FACTEURS D'EVOLUTION CONTINUS				
	Altération / Dissolution Si matériau altérable ou soluble et écoulement lent (/2)	Gel-dégel (/2)	Modifications de géométrie (-3 / +3)	Permafrost (-5 / +5)	Facteurs anthropiques (-3 / +5)
Gp	Effet chimique de l'eau, à différencier de l'effet des pressions interstitielles	Effet de surface (quelques 10cm) → distinguer l'influence sur des aléas de petit volume (facteur déclenchant) ou de volume plus important (rôle d'érosion)	- Perte de masse en pied (érosion): 0 à +2	Pour les zones de haute altitude, le gel permanent ajoute un terme de cohésion à la résistance des discontinuités.	Vibrations – explosions (mines, carrières, chantiers), déprise agricole (élimination du drainage) ...
Gd	0 – 2 Affecte la résistance des plans de discontinuité, évacue ou dépose du remplissage	Prendre en compte le nombre de cycles gel - dégel par an, N, fonction de l'altitude, de l'orientation du site	- Accumulation en pied (dépos, déplacements): -2 à 0		
Gr					
S	0 – 2 Active la mise en surplomb par érosion du niveau inférieur	N ≤ 80      0 80 ≤ N ≤ 120      1	- Dépôts / accumulations en tête : 0 à +1	- Fonte du permafrost : 0 à +5	Drainage du bassin Versant, mesures de stabilisation (ancrages, filets) ...
Cb	0 – 2 Si affecte le pied	N ≥ 120      2	- Perte de masse en tête : -1 à 0	- Permafrost : -5 à 0	-3 à 0
		On considère principalement le			

## A.3. Techniques instrumentales

Le tableau de synthèse présenté ci-après regroupe les différentes techniques instrumentales utilisées dans le cadre de la surveillance des instabilités gravitaires.

Ce tableau décrit différents paramètres permettant de différencier les techniques en fonction des phénomènes observés. Les paramètres étudiés sont les suivants :

- le mesurande, correspondant à la grandeur physique mesurée.
- le principe de mesure, spécifiant la technique de mesure mise en oeuvre.
- la grandeur de sortie, permettant de justifier du type de station de mesure et traitement nécessaire.
- le domaine d'application et le type d'aléa, informant des phénomènes que l'on peut surveiller avec ce type de technique.
- la résolution, informant sur la plus petite quantité mesurable que l'on peut obtenir avec la technique.
- la mise à disposition des données, correspondant au temps de réponse de l'instrument auquel s'ajoute le temps de traitement nécessaire jusqu'à obtention de la valeur interprétable.

L'échelle du temps de mise à disposition des données est exprimée selon l'intensité suivante :

- instantané (ms),
- très rapide ( $\ll 1$  sec.),
- rapide (~sec.),
- moyen (qq sec.),
- long (~min.),
- très long (~heure).

Les avantages, inconvénients et limites d'utilisation fournissent des informations complémentaires spécifiques à chaque technique.

## Pas terminé

# Resumé

## A.4. Liste de sites sous surveillance

Liste réalisée en mars 2008.

Nous présentons ci-après une liste de sites, non exhaustive, qui ont fait ou font l'objet d'une surveillance avec gestion d'alerte, en France et dans les pays de l'arc alpin.

L'aspect de la sécurité constitue l'objectif majeur de ces sites, ce qui signifie qu'en plus de la mesure, ces systèmes de surveillance transmettent l'information (par télémétrie) vers un centre de traitement, capable de générer des alertes opérationnelles.

Les sites sont triés par ordre chronologique de la date de mise en service du système de surveillance.

Légende :

- P=Pluviomètre
- Ta=Température de l'air
- Ts=Température du sol
- B=Baromètre
- N=Nivomètre
- H=Hygromètre
- G=Gonionemomètre
- S=Ensoleillement, Rayonnement solaire
- C=Conductivité électrique du sol
- Pe=Permittivité (Humidité du sol)
- V=Vitesse et direction du vent

## Pas terminé

# Resumé