

## APPROCHE MODULAIRE ET EVOLUTIVE DE LA DETECTION ET DE L'EVALUATION DE L'ALEA LIE AUX MOUVEMENTS DE VERSANT: OUTILS ET DOCUMENTS

Michel Jaboyedoff, Quanterra, Lausanne, Suisse  
François Baillifard, Crealp, Sion, Suisse  
Réjean Couture, Commission géologique du Canada, Ottawa, Canada  
Marc-Henri Derron, Service géologique de Norvège, Trondheim, Norvège  
Jacques Locat, Université Laval, Québec, Canada  
Pascal Locat, Université Laval, Québec, Canada  
Jean-Daniel Rouiller, Crealp, Sion, Suisse

### ABSTRACT

Assuming that all methods must evolve with the recent tools and documents available, a framework for the development of GIS based methods dedicated to slope hazard assessment is presented. A hierarchy in physical models is defined. Starting from a geometrical approach, the proposed method of slope movement assessment is enriched toward complete physical description. The proposed tools and methods are illustrated with examples.

### RÉSUMÉ

Partant de l'hypothèse que les méthodes doivent évoluer avec les nouveaux documents et outils, un cadre de développement relatif aux méthodes SIG dédiées à l'évaluation de l'aléa de mouvements de versant est présenté. Une hiérarchie de modèles physiques est définie. Elle part d'une approche géométrique pour se compléter en direction de modèles physiques complets. Les méthodes et outils proposés sont illustrés par des exemples.

### 1. INTRODUCTION

L'évaluation du risque lié aux mouvements de versant passe par de nombreuses étapes qui vont de la décision administrative ou politique jusqu'à la mise en œuvre des stratégies choisies. Dans cette perspective, les méthodes de détection d'instabilités et de qualification de l'aléa sont essentielles, car l'évaluation des risques nécessite de caractériser les probabilités des différents types d'événements en un lieu donné et à différentes échelles (Leroueil et Locat 1998). La susceptibilité aux mouvements de versant et la caractérisation des fréquences d'événements se basent souvent sur un inventaire, des analyses statistiques ou sur une modélisation mécanique (Soeters and Van Westen 1996; Guzzetti *et al.* 1999 ; Dietrich *et al.*, 2001; Evans 2003).

Dans la perspective de l'évaluation du risque, les mouvements de versant sont caractérisés tant du point de vue de leurs mécanismes de déstabilisation et de leur mode de propagation (Cruden and Varnes 1996) que du point de vue géotechnique (Leroueil et Locat 1998 ; Leroueil 2001). L'incertitude, inhérente à toute description des phénomènes naturels, représente l'écueil principal de la procédure de caractérisation et de détection des instabilités.

Les méthodes d'évaluation de l'aléa doivent être établies de façon à intégrer des informations lacunaires et des incertitudes variables. Elles doivent pouvoir intégrer de nouvelles données et outils issus des Systèmes

d'Information Géographique (SIG) (Guzzetti *et al.* 1999 ; Günther 2003 ; Jaboyedoff *et al.* 2004a). Ce constat incite à établir une stratégie de recherche, de mise en œuvre et de développement de méthodes d'évaluation de l'aléa. Le présent article propose une telle stratégie et en montre les premiers résultats.

### 2. LA PROBLEMATIQUE DU RISQUE

La définition du risque acceptable (Fell et Hartford 1997) fait du risque un problème sociologique qui dépasse le cadre de cet article. Cependant, cette notion fournit des limites qui sont converties en termes économiques à une époque donnée. Par conséquent, ces limites ont un impact sur les décisions et les montants attribués par les pouvoirs publics à la gestion des risques naturels. Cette contrainte économique a une influence considérable sur le développement des méthodes d'évaluation du risque et donc sur l'évaluation de l'aléa. Les décisions politiques et les conditions économiques changeant rapidement, il est impératif de pouvoir adapter les méthodes en fonction de ces conditions. Cependant, il faut aussi être capable de montrer qu'il n'est pas possible de répondre aux exigences des pouvoirs publics si les crédits sont insuffisants pour une étude.

L'établissement de la carte d'aléa doit donc s'adapter aux conditions d'une époque donnée en fonction des moyens à disposition. Le développement des méthodes et des outils doit s'intégrer dans un cadre plus large que l'analyse des processus naturels uniquement. De la

décision administrative à la mise en œuvre de la gestion des risques, il existe de nombreuses étapes qui impliquent certaines activités, tâches ou actions des différents intervenants ou acteurs nécessitant des outils et des documents. Cette chaîne de processus génère un certain nombre de problèmes (Figure 1). Dans cette perspective, les méthodes d'évaluation de l'aléa sont tributaires des étapes qui les précèdent et qui les suivent.

Décision administrative	Faisabilité	Création de la méthode	Etude Mise en œuvre
Activités, actions et tâches			
Problèmes			
Outils, documents			
Acteurs et intervenants			

Figure 1. Etapes successives simplifiées qui mènent de la décision à la mise en œuvre d'une « politique de risques » et les éléments à prendre en compte (modifié d'après Jaboyedoff 2004).

L'objectif de la présente approche est d'optimiser l'utilisation de l'information, et en particulier l'interaction entre les investigations de terrain et la modélisation à l'aide de documents numériques, en particulier lors de la création de la méthode.

### 3. MOUVEMENTS DE VERSANT ET SIG



Figure 2. Illustration des concepts de paramètres intrinsèques et facteurs externes. En petites majuscules les paramètres intrinsèques et en italiques les facteurs externes (d'après Jaboyedoff *et al.* 2003).

Les SIG sont en premier lieu des bases de données géoréférencées, c'est-à-dire qu'ils spatialisent l'information. Ils fournissent la répartition géographique de paramètres intrinsèques et facteurs externes (Figure 2). Ils facilitent la modélisation des processus ou la caractérisation de l'incertitude. La caractérisation des aléas de mouvements de versant utilisant un SIG doit réussir à intégrer le relief comme un système composé de paramètres intrinsèques et de facteurs externes. Ces derniers agissent sur les premiers par différents processus qui régissent la stabilité des versants. La détection passe donc par l'identification et la localisation

des processus de pré-rupture et des vitesses de dégradation qui mènent à la rupture (Leroueil et Locat 1998). Il s'agit donc de transférer progressivement les connaissances géologiques et géotechniques dans les SIG au sein d'une hiérarchisation issue de la modélisation des processus.

Les paramètres intrinsèques sont les variables propres au versant. Ils sont susceptibles d'évoluer au cours du temps sous l'effet des facteurs externes. La liste suivante n'est pas exhaustive :

- Morphologie :
  - Type de versant (pente, hauteur des parois rocheuses ou talus, profil, etc...); exposition; style de relief; (processus qui le contrôle);
- Contexte géologique :
  - Type de roches et météorisation; variabilité des structures; stratification; type de dépôts; zone plissée; structures
- Fracturation :
  - Familles de discontinuité; persistance, espacement, etc.; égré de la fracturation
- Caractéristiques hydrogéologiques :
  - perméabilité; conductibilité des fractures
- Propriétés mécaniques des roches :
  - cohésion (C); angle de friction ( $\phi$ )
- Activité (chutes de blocs ou mouvements)

Les facteurs externes sont des phénomènes qui possèdent une origine extérieure au versant. Parmi eux on peut effectuer les subdivisions suivantes: effet de la gravité, effets liés à l'eau (hydrologie et hydrogéologie, climat), les précipitations, neige, les taux d'infiltration, les eaux souterraines, altération, érosion, sismicité, tectonique active, microclimat (variation de température, gel-dégel, exposition au soleil, pergélisol), instabilités avoisinantes, facteurs anthropiques, etc. Tous ces facteurs possèdent une connotation temporelle évidente. Ils provoquent l'évolution du système. Tous les paramètres et facteurs peuvent être cartographiés dans un SIG. Ils peuvent être utilisés de plusieurs manières que l'on peut subdiviser en quatre types:

- I. La façon la plus simple est de créer une échelle relative d'aléa en comptant le nombre de paramètres ou facteurs défavorables en un point, en y ajoutant une zone tampon si nécessaire. Il s'agit d'une approche purement géométrique.
- II. Les processus physiques sont modélisés par une approche géométrique, qui hiérarchise les données en fonction des processus et qui prend en compte l'effet du voisinage d'un point.
- III. La physique simplifiée est introduite dans les modèles géométriques simples ou développées indépendamment.
- IV. La modélisation physique détaillée des phénomènes.

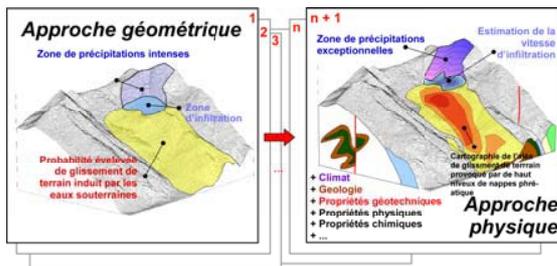


Figure 3. Illustration de l'enrichissement des modèles géométriques (II) vers un modèle complet (III ou IV) par des modélisations imbriquées.

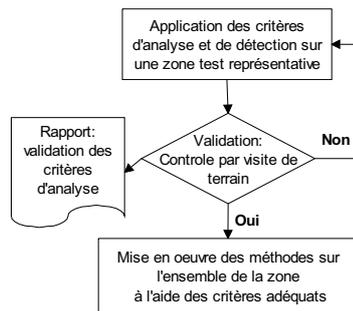


Figure 4. Schématisation de validation d'une méthode (modifié d'après Jaboyedoff *et al.* 2003).

En fonction de l'échelle à laquelle est effectuée une étude, des informations et des modèles disponibles, l'une des quatre approches peut être choisie. Dans une stratégie d'étude régionale sur de larges territoires, on peut commencer à appliquer les méthodes de type I ou II, puis lorsque les zones sensibles sont identifiées, les méthodes de types III ou IV peuvent être utilisées (Figure 3).

D'autre part, le caractère lacunaire des données SIG (paramètres et facteurs) implique que les informations ne sont que partiellement accessibles. Il faut une certaine souplesse dans les méthodes. Les données et les méthodes sont donc enrichies au cours du temps. Par conséquent, la caractérisation de l'aléa va s'améliorer progressivement passant d'un niveau à l'autre et impliquant une imbrication des méthodes.

Un dernier élément de la stratégie utilisant des SIG est qu'il faut toujours tenter de valider les méthodes par des investigations de terrain (Figure 4).

#### 4. OUTILS ET METHODES

Il existe deux stratégies de qualification de l'aléa de mouvements de versant. La première (A) considère que les aléas sont détectés grâce à l'observation de mouvements avérés (terrain déplacé, niches d'arrachement, chutes de blocs, dépôts, etc.) et la seconde (B) tente de mettre en évidence des zones qui ne présentent pas nécessairement des mouvements avérés, mais qui sont susceptibles d'en produire. Ces

deux approches peuvent être dissociées ou réunies dans les méthodes d'estimation de l'aléa.

Les lignes qui suivent présentent des exemples d'outils utilisés et développés dans un environnement SIG. L'outil de base de l'approche SIG en ce qui concerne le relief est le Modèle Numérique d'Altitude (MNA).

##### 4.1 Type I: Outils et méthodes orientés vers les données ponctuelles

Un certain nombre des paramètres intrinsèques doivent présenter un caractère défavorable pour qu'une instabilité se forme (Gupta *et al.* 1999). C'est souvent ces paramètres qui sont utilisés dans les échelles de susceptibilité d'aléa dans les approches les plus rudimentaires. Ils peuvent être issus des attributs de cartes topographiques (falaise, talus etc.), de cartes géologiques ou de levés plus spécifiques, comme la fracturation ou les sédiments sensibles, etc. De nombreuses méthodes développées jusqu'à présent utilisent ce principe, qu'elles soient déterministes ou statistiques (Soeters et Van Westen 1996).

Souvent, les paramètres n'existent pas sous forme vectorielle. Il s'agit donc d'établir des cartes SIG sur la base de documents de natures différentes: vecteurs (points, lignes, polygones) et raster, comme par exemple les photos aériennes ou les MNA. Lorsque l'information est visuelle et non identifiable par analyse de raster, il s'agit alors de vectoriser toutes les informations accessibles, puis de les réunir au sein d'un unique document vectoriel ou raster (Figure 5).

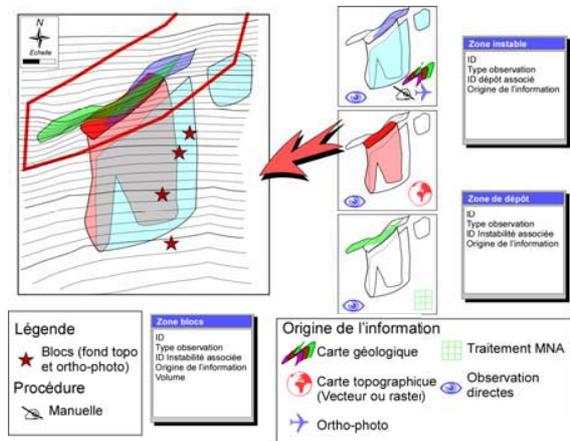


Figure 5. Illustration de la création de documents de base à partir de plusieurs sources. Ici l'exemple des dépôts rocheux (modifié d'après Jaboyedoff *et al.* 2003).

Le plus simple des paramètres intrinsèques est la pente, qui révèle implicitement des propriétés mécaniques telles que la cohésion et l'angle de frottement apparent (Locat *et al.* 2000). L'analyse de pente permet de mettre en évidence des populations de pentes qui contiennent la plupart des instabilités. En milieux rocheux, ce sont généralement les fortes pentes qui sont instables (Rouiller

et al. 1998), mais pour les sols, les pentes intermédiaires peuvent être celles qui sont le plus sensibles (Rautela et Thakur 1999). La précision des MNA-Laser a permis de considérablement améliorer la caractérisation des pentes. La figure 6 montre un méandre de la rivière du Doubs (formant la frontière franco-suisse) pour lequel les pentes dans les marnes sont très proches de 38° et celles dans les calcaires de 64°, ce qui démontre un comportement vis-à-vis de l'érosion bien défini.

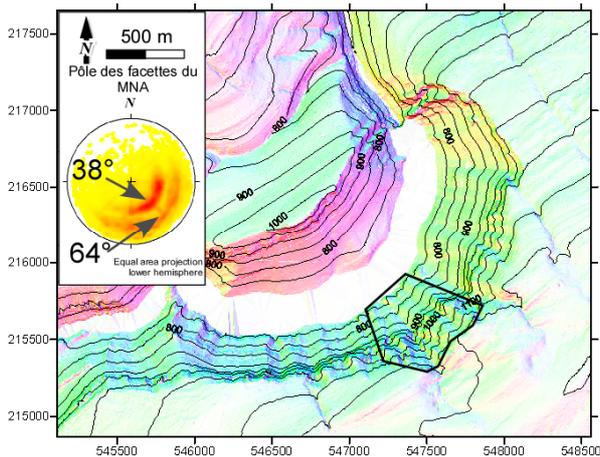


Figure 6. Représentation des orientations selon un code de couleurs qui indique l'orientation (voir Jaboyedoff et al. 2004b). Le stéréogramme des orientations issues du polygone indique que les barres rocheuses sont bien marquées, et la pente dans les marnes est très constante (Données de DEM Laser terrain DOM-AV 2003)

#### 4.2 Type II : Spatialisation des données

Les processus physiques respectent certaines règles géométriques, notamment celles qui sont liées à la gravité. Les exemples typiques sont les bassins versant calculés sur la base de MNA (Burrough et MacDonnel 1998) ou les chutes de blocs (Evans et Hungr 1993). Les instabilités de versant peuvent être détectées à l'aide de critères géométriques basés sur les mécanismes de déstabilisation des versants (Jaboyedoff et al. 2004a ; Jaboyedoff et Labiouse 2003). L'analyse de systèmes tels que les chutes de blocs, les coulées boueuses, etc. implique un à priori sur la physique du processus, de sorte que des informations lacunaires issues de la stratégie (A) peuvent être complétées par la stratégie (B), c'est-à-dire des modélisations géométriques.

Un exemple simple est l'utilisation de la méthode des cônes pour les chutes de blocs (Evans et Hungr 1993). Cette méthode permet d'évaluer les distances de propagation des blocs sachant qu'ils ne se propagent pas au-delà d'un certain angle d'ombre (Figure 7). Les données étant lacunaires, les chutes de blocs observées ne permettent pas d'établir de limite, par conséquent les données de terrain sont complétées par un modèle géométrique ou numérique (Figure 8). Lors de cette phase, les photos aériennes sont d'un grand apport.

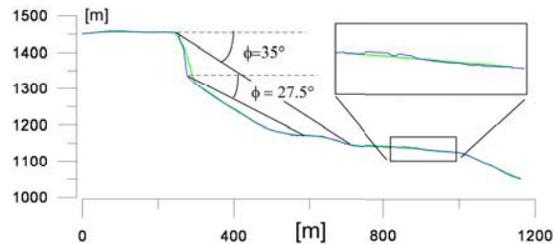


Figure 7. Illustration de la méthode des cônes en coupe. Exemple prenant en compte toute la falaise comme source (Jaboyedoff et Labiouse 2003), et la méthode de Evans et Hungr (1993) qui considère le pied de falaise comme source. Le profil topographique a été dressé au moyen d'un MNA 25 m et d'un MNA-Laser 2 m (Données de DEM Laser terrain DOM-AV 2003).

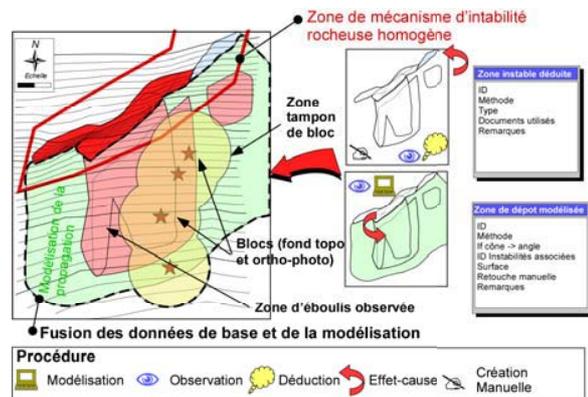


Figure 8. Illustration de la procédure SIG qui permet d'utiliser et de compléter les données de terrain selon une méthode de type II mêlant les stratégies A et B (modifié d'après Jaboyedoff et al. 2003). La carte de gauche synthétise en un document l'ensemble des informations relatives aux zones de dépôts et aux instabilités obtenues à partir d'observations ou de modélisations (à droite).

#### 4.3 Type III: Processus physiques simples

Les approches de ce type modélisent les processus, et intègrent ou génèrent des valeurs de paramètres physiques. Elles suivent la plupart du temps la stratégie B. Parmi les approches les plus connues, on peut noter le programme SHALSTAB (Dietrich et al. 2001). SHALSTAB calcule un index de stabilité vis-à-vis des glissements peu profonds dans les sols. Il se base sur l'estimation de la stabilité d'un pixel de MNA compte tenu de l'eau de surface qui théoriquement y transite et de l'infiltration puis estime sa limite de stabilité en fonction de l'angle de friction interne du sol et du niveau de la nappe phréatique. Cette approche mène à une cartographie de la susceptibilité au glissement de surface, les résultats sont d'autant meilleurs que le MNA possède une petite maille. De façon similaire à SHALSTAB, Günther (2003) a défini un modèle de glissements rocheux peu profond. La stabilité des versants vis-à-vis de grands glissements de

terrain peut-être évaluée sur la base de modèles géomécaniques simples en 2D (Miller 1995) ou en 3D (Ried *et al.* 2001).

Les simulations simples de chutes de blocs permettent, sur la base de modèles physiques, d'extraire les vitesses, énergies, les hauteurs de vol des chutes de blocs, etc. Le cas de la modélisation des chutes de blocs est un cas intéressant, car il existe une grande variété de solutions, qui nécessitent chacune des paramètres plus ou moins détaillés. Pourtant, il n'existe encore que peu d'interfaces avec les SIG de ces programmes de simulation. Le programme STONE (Guzzetti *et al.* 2002) fait exception.

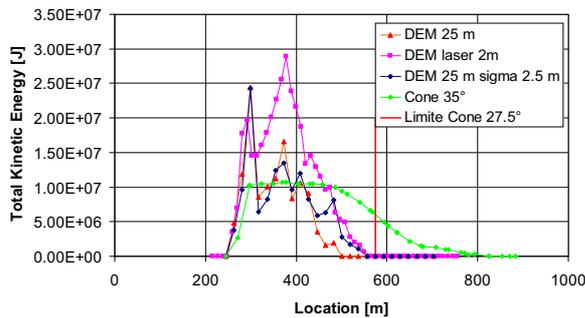


Figure 9. Profil des énergies maximales le long du profil de la figure 7. Les résultats de la méthode des cônes sont issus de la simulation sur la grille et ceux de la trajectographie ont été effectués sur le profil.

Le choix des données est crucial (MNA, paramètres de rebond, etc.), car le temps nécessaire à la mise en oeuvre de ces méthodes peut varier énormément. Par conséquent, lorsqu'on étudie de grands territoires, la question de la méthode est prépondérante. La comparaison de simulations trajectographiques (Rockfall 2D ; [www.rocscience.com](http://www.rocscience.com)) et de résultats obtenus à partir de la méthode des cônes (Conefall [www.quanterra.org](http://www.quanterra.org)) illustre cette problématique. Suivant le MNA utilisé, le résultat varie en fonction de la taille de la maille du MNA et de la topographie (Figure 9). La trajectographie établie à partir du MNA-Laser 2 m induit des trajectoires plus longues que celles simulées à partir du MNA-25 m, la rugosité du modèle MNA-Laser 2 m étant plus élevée que celle du MNA-25 m. Les résultats sont identiques si une variable aléatoire est ajoutée sur la position des points de la topographie du MNA-25 m. Les énergies maximales restent plus faibles que celles de la simulation plus précise. Crosta et Agliardi (2003) ont montré avec le programme STONE que l'effet du MNA sur la dispersion des trajectoires et l'estimation des énergies maximales est important.

Par comparaison, la méthode des cônes fournit, pour un angle de 35° à partir du sommet de la falaise, une distance de propagation surestimée comparée aux données de trajectographie. Les données de terrain semblent plus proches de cette méthode. Les énergies sont sous-estimées comparativement à la trajectographie, mais l'ordre de grandeur reste correct. Utilisant le pied de

falaise et un angle de 27.5°, la distance maximale de propagation est très proche de celle des trajectographies. Ainsi, il est possible de remplacer la distance de propagation avec la méthode des cônes, quand les énergies sont sous-estimées.

#### 4.4 Type IV

Les modélisations qui sont interfacées avec des SIG sont encore peu nombreuses, les récentes évolutions de STONE peuvent en faire partie (G. Crosta comm. pers.; Günther comm. pers.) L'analyse en 3D de glissements de terrain par des modèles hydromécaniques existent (Laloui *et al.* 2004), mais elle n'est pas facile à mettre en oeuvre, car les méthodes comme les éléments finis nécessitent des paramètres précis et sont difficilement applicables sur de grandes surfaces.

### 5. EXEMPLES D'APPLICATION

#### 5.1 Méthode type I appliquée aux routes

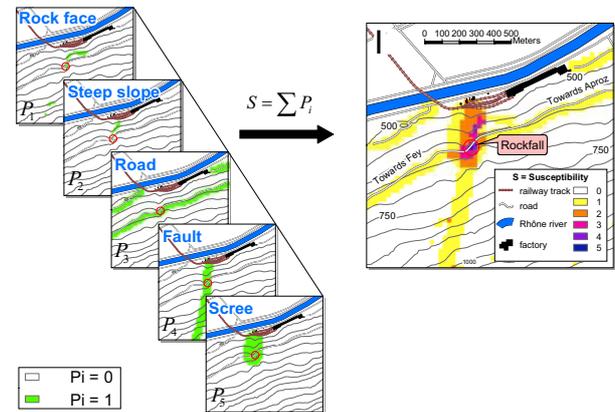


Figure 10. Exemple de cartographie de susceptibilité aux éboulements induits par les routes utilisant 5 critères booléens simples pour chaque pixel, ici le cas de l'éboulement de la falaise des Eterpas. S est la susceptibilité relative et Pi les valeurs de chaque paramètre i (d'après: Baillifard *et al.* 2004).

Partant du postulat simple que quelques facteurs seulement contrôlent les talus de bords de route en milieu rocheux, l'aléa de chutes de blocs en bords de route du canton du Valais en Suisse a été évalué. L'échelle de susceptibilité de 0 à 5 utilise la somme de 5 critères booléens pour chaque pixel défini par un MNA de 25 m de côté (Baillifard *et al.* 2003; Baillifard 2004). Les critères considérés pour un point donné sont qu'il soit situé: (1) A moins de 150 m d'une faille ou d'un contact ; (2) A moins de 100 m d'un éboulis ; (3) Dans une falaise; (4) Dans une pente supérieure à 45°; (5) A moins de 50 m à l'amont d'une route (Figure 10).

Cette méthode a été établie en analysant l'éboulement des Eterpas (2000 m<sup>3</sup>) survenu en janvier 2001. Sur la base de documents au 1:10 000, tels que les cartes géologiques et topographiques vectorisées, on obtient

une susceptibilité de 5. Basé sur des documents au 1 :25 000, elle n'est plus que de 3. A l'échelle 1 :25'000 que 3.9% des 7555 km de routes du Valais, soit 255 km, possèdent une susceptibilité égale ou supérieure à 3. Ce qui représente un bon filtre pour des études plus fines. Rétrospectivement que plusieurs éboulements se sont produits le long des routes valaisannes dans des zones de susceptibilité  $\geq 3$ . Sur un territoire limité (Val de Bagnes) de 297 km<sup>2</sup> et 331 km de routes, des tests de validation montrent que les zones de susceptibilité  $\geq 4$  (=2.4 km, soit 0.7% des routes) présentent presque partout des chutes de blocs récentes ou des instabilités (Baillifard 2004).

### 5.2 Méthode Type III et stratégie B appliquée au glissement de Havre St-Pierre (Québec)

Un calcul simplifié du facteur de sécurité utilisant un niveau de base d'érosion dans un sol et une estimation du niveau de la nappe phréatique a été appliqué au glissement du Havre-St Pierre (3 avril 1980, sur un trait de côte dans la région de la Côte Nord au Québec). Le calcul du niveau de base d'érosion (SLBL : Sloping Local Base Level ; Jaboyedoff *et al.* 2004b) a été effectué en prenant le rivage du St-Laurent et l'enveloppe externe des cours d'eau. Dans ce périmètre, le SLBL a été calculé sur la base d'un modèle numérique antérieur au glissement. Le volume défini par cette surface est de l'ordre de 1 M m<sup>3</sup>, ce qui est en accord avec notre estimation manuelle. La surface de la nappe phréatique a été simulée en lissant la topographie puis en l'abaissant au niveau des cours d'eau (Figure 11).

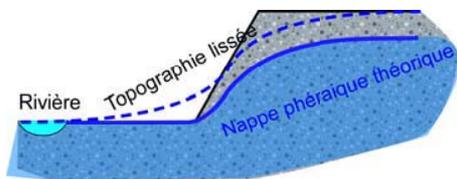


Figure 11. Principe du calcul du niveau de la nappe phréatique à partir d'un MNA.

Le SLBL et le MNA postérieur au glissement sont proches (Figure 12). Partant du SLBL et du niveau de la nappe phréatique estimé, le facteur de sécurité simplifié pour la surface du glissement devient :

$$F_s = \tan \phi \frac{\sum (W \cos \theta - P_s)}{\sum (W \sin \theta)} \quad [1]$$

où la somme s'effectue sur tous les pixels de l'instabilité, W est le poids du pixel au-dessus du SLBL, s la surface basal du pixel, P la pression d'eau à la base et  $\phi$  l'angle de friction interne. Le résultat montre que le rapport des facteurs de sécurité entre drainé et non drainé est de l'ordre de 1.3 soulignant l'influence des pressions d'eau. Le calcul de ce facteur de sécurité doit encore être amélioré, mais cette approche, montre qu'il est possible d'obtenir des ordres de grandeur de la stabilité

rapidement sur d'assez grands territoires par une procédure simple.

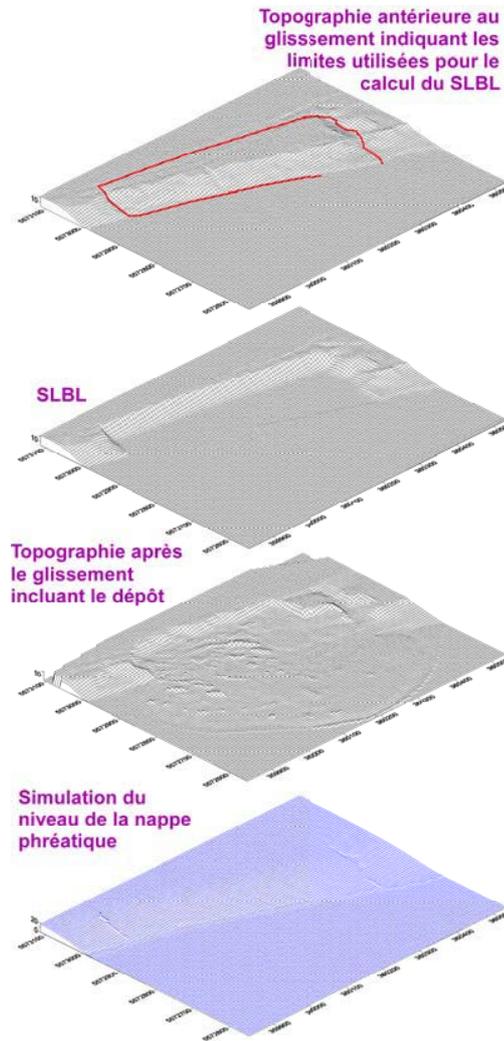


Figure 12. Comparaison des résultats de la modélisation du niveau d'érosion de base le SLBL avec les données. La nappe phréatique est aussi représentée.

### 5.3 Méthode type II avec Promontoire de Québec associé à un inventaire d'événements

L'estimation de l'aléa de rupture et de la probabilité d'atteinte de maisons le long de la falaise du Boulevard Champlain (Québec), est basé sur la hiérarchisation de variables booléennes calculées à partir des structures géologiques principales, des masses rocheuses en excès, de l'orientation et la pente de la topographie, de l'épaisseur maximale érodable, de la taille des bassins versants topographiques et des résultats de tests cinématiques (Baillifard *et al.* 2004). La probabilité observée est basée sur la densité d'événements par unité de temps, alors que les fréquences calculées ne tiennent compte que de la fréquence totale sans information

spatiale. Les résultats obtenus sont en accord avec la densité d'événements observés.

## 6. DISCUSSION

Suivre une stratégie où les facteurs et paramètres sont identifiés et où des critères physiques sont introduits dans la détection mène à un système de méthodes de détection cohérent. Cette approche hiérarchise les données et les modèles de la caractérisation géométrique des phénomènes jusqu'au processus physiques.

La qualification de l'aléa, qui est une variable temporelle, doit, pour le moment, être calibrée par un catalogue d'événements ou utiliser des lois de distribution d'événements (Evans 2003). Cet aspect est crucial, car l'appréciation des fréquences d'événements reste difficile en l'absence d'inventaires, et même si ceux-ci existent, ils sont souvent lacunaires. Ceci démontre qu'il faut tenter de développer des méthodes qui puissent, sur la base de processus physiques, simuler des scénarios, particulièrement si l'on considère les changements climatiques qui pourraient rendre les inventaires peu utilisables.

Les facteurs externes sont encore difficiles à apprécier. Le facteur externe le plus simple à implémenter est les précipitations. Les valeurs seuils de précipitations qui induisent des instabilités doivent d'abord être établies (Reichenbach *et al.* 1998), pour permettre une estimation de l'aléa de glissement. Partant d'une connaissance détaillée des précipitations, l'aléa de glissement peut être évalué par une stratégie B (Crosta et Frattini 2003). D'autres éléments externes peuvent fournir des informations sur les fréquences des mouvements de versant. Cependant, leurs apports restent pour le moment qualitatifs.

La méthode du paragraphe 5.1 permet d'effectuer un zonage le long des routes. Le zonage par la méthode des cônes et l'étude du boulevard de Champlain montrent qu'en présence de suffisamment d'informations les données nécessaires à l'évaluation du risque peuvent être générées. Cependant il ne s'agit que de résultats préliminaires en matière de gestion du territoire. L'avantage des méthodes de type I ou II est leurs faibles coûts. Les méthodes de type III et IV, tel que Shalstab ou le cas de Havre-St Pierre permettent de quantifier la stabilité des versants, mais elles ne permettent pas à l'heure actuelle d'obtenir des indications sur la fréquence des événements sans l'apport d'un inventaire.

L'introduction progressive de modèles physiques et chimiques dans les différentes couches SIG selon la stratégie proposée doit permettre de progressivement évaluer la variable temps. Des nouveaux documents cartographiques, notamment les MNA-laser, devraient permettre de faire un pas vers la détection des signes prédisposant et précurseurs des phénomènes d'instabilité.

## 7. CONCLUSION

En se basant sur une stratégie de développement de méthodes qui s'appuient sur la modélisation physique, le lien avec les données de terrain est maintenu, car la question est de savoir ce qui est cartographiable et ce qui ne l'est pas. Cette approche crée aussi un lien entre la démarche purement naturaliste et la géomécanique par exemple. Le cadre posé par le SIG renforce cet aspect. En fonction des objectifs, il faut adapter les méthodes, tout en sachant que la précision des documents joue un rôle important sur la qualité des résultats. La variété des solutions doit être étudiée par une analyse coût/bénéfice. La validation des méthodes sur le terrain est un aspect important. Lors du développement des méthodes, il faut optimiser l'interaction entre procédures automatiques et travaux de terrain. Des méthodes de type I aux méthodes de type IV, le degré de connaissance des instabilités augmente : les phénomènes sont mieux caractérisés du point de vue de leur répartition dans l'espace et de leur intensité. Les méthodes de type I sont plus conservatrices que celles de types II, III ou IV, et ainsi de suite. Cela souligne l'intérêt d'approches imbriquées. D'une façon générale le grand problème reste l'évaluation des fréquences des phénomènes. L'amélioration de la connaissance relative aux fréquences passe par la compréhension fine des influences des facteurs externes sur les versants ce qui souligne la cohérence de l'approche proposée.

## 8. RÉFÉRENCES

- Baillifard, F.J., 2004. Détection par SIG des zones rocheuses à fortes susceptibilités d'éboulement. Thèse de doctorat, Université Lausanne, 192 p.
- Baillifard, F., Locat, J., Couture, R., Jaboyedoff, M., Locat, P., Robichaud, G. et Rouiller, J.-D. 2004. Estimation continue de l'aléa et du risque à l'aide d'un SIG: l'exemple du promontoire de Québec (Québec, Canada). 57<sup>ème</sup> conférence canadienne de géotechnique - Québec, Octobre 24-26, 2004.
- Baillifard, F., Jaboyedoff, M. and Sartori, M. 2003. Rockfall hazard mapping along a mountainous road in Switzerland using an empirical approach. NHESS, Vol. 3, pp. 435-442.
- Burrough, P.A. and McDonnell, R.A., 1998. Principles of geographical information systems. Oxford University Press, Oxford, 333 p.
- Crosta, G. and Agliardi, F. 2003. A methodology for physically based rockfall hazard assessment. NHESS, Vol. 3, pp. 407-422.
- Crosta, G. and Frattini, P. 2003. Distributed modelling of shallow landslides triggered by intense rainfall. NHESS, Vol. 3, pp. 81-93.
- Cruden, D.M. and Varnes, D.J. 1996. Landslides types and process. In Landslides - Investigation and mitigation, Transportation Research Board, National Research Council, Special report #247, Turner & Schuster (eds), National Academy Press, Washington D.C, pp. 36-75.
- DEM Laser terrain DOM-AV,2003. Service d'information du territoire de Neuchâtel (<http://sitn.ne.ch/>) and Swisstopo ([www.swisstopo.ch](http://www.swisstopo.ch)).

- Dietrich, W.E., Bellugi, D., and Real de Asua, R. 2001. Validation of the shallow landslide model, SHALSTAB, for forest management. In Wigmosta, M.S. and Burges, S. J. (eds), *Land Use and Watersheds: Human influence on hydrology and geomorphology in urban and forest areas*; Amer. Geoph. Union, Water Science and Application, pp. 195-227.
- Evans, S.G. 2003. Characterizing landslide risk in Canada, 3<sup>rd</sup> Canadian Conference on Geotechnique and Natural Hazards, Edmonton, AB, Canada, pp. 35-50.
- Evans, S., and Hungr, O. 1993 The assessment of rockfall hazard at the base of talus slopes. *Can. Geo. J.*, Vol. 30, pp. 620-636.
- Fell R. and Hartford, D., 1997. "Landslide Risk Management". In D.Cruden, R.Fell (eds): *Landslide Risk Assessment*. Balkema, pp. 51-110.
- Günther, A. 2003. SLOPEMAP: programs for automated mapping of geometrical and kinematical properties of hard rock hill slopes, *Computers & Geosciences*, Vol. 29/7, pp. 865-875.
- Gupta, S.K., Saha, A.K., Arora, M.K., and Kumar, A., 1999. Landslide hazard zonation in a part of the Bhagirati Valley, Garhwal Himalayas, using integrated remote sensing – GIS. *Himalayan Geology*, 20, pp. 71-85.
- Guzzetti, F., Carrara, A., Cardinali, M., and Reichenbach, P. 1999. Landslides hazard evaluation: a review of current techniques and their application in a multi-scale study, *Central Italy, Geomorphology*, Vol. 31, pp. 181-216.
- Guzzetti, F., Crosta G., Detti R. and Agliardi, F. 2002. STONE : a computer program for the three-dimensional simulation of rock-falls. *Computers & Geosciences* 28. pp. 1079–1093.
- Jaboyedoff, M. 2004. Integrated risk assessment process of landslides. Abstract European Geosciences Union - 1<sup>st</sup> General Assembly, Nice, France, 25-30 April 2004.
- Jaboyedoff, M., Baillifard, F., Philippossian, F. and Rouiller, J.-D. 2004a. Assessing fracture occurrence using "weighted fracturing density": a step towards estimating rock instability hazard. *NHESS*, 4, 83-93.
- Jaboyedoff, M., Couture, R. and Locat, P. 2004b Structural analysis of Turtle Mountain (Alberta) using digital elevation model (DEM). 57<sup>th</sup> Canadian Geotechnical Conference. GéoQuebec 2004.
- Jaboyedoff, M., Baillifard, F., Kaufmann, J.F. et Labiouse, V. 2003. Identification des versants rocheux potentiellement instables. Université Européenne d'Été sur les risques naturels 2002, Sion, Suisse. *Quanterra, Short-Course – 03F.25 p.*
- Jaboyedoff, M. and Labiouse, V. 2003. Preliminary assessment of rockfall hazard based on GIS data. *ISRM 2003–Technology roadmap for rock mechanics, Symposium Series - South African Institute of Mining and Metallurgy*, Vol. 1, pp. 575-578.
- Laloui, L., Tacher, L. and Bonnard, Ch. 2004. Hydro-Mechanical modelling of crises of large landslides: application to the La Frasse Landslide. *International Symposium on Landslides*, RIO, Brazil, 2004.
- Leroueil, S. 2001. Natural slopes and cuts : movements and failure mechanisms. *Géotechnique*, 51 pp. 197-243.
- Leroueil, S. et Locat, J. 1998. Slope Movements - Geotechnical Characterization, Risk Assessment and Mitigation. XI Danube-European Conf. on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Porec, Croatia, Maric. Lisac and Szavits-Nossan (eds.). Balkema, pp. 95-106.
- Locat, J., Leroueil, S. and Picarelli, L. 2000. Some considerations on the role of geological history on slope stability and the estimation of the minimum apparent cohesion of a rock mass. In: E. Bromhead, N. Dixon and M.-L. Ibsen (eds.), *Landslides in research, theory and practice*. Thomas Telford, Cardiff, pp. 935-942.
- Miller, D.J. 1995. Coupling GIS with physical models to assess deep-seated landslide hazards. *Environmental & Engineering Geoscience*, Vol. 1, pp. 263-276.
- Rautela, P. and Thakur, V.C. 1999. Landslide hazard zonation in Kaliganga and Madhyamahshwar valleys of Garhwal Himalaya: A GIS based approach *Him.Geol.* Vol. 20, pp. 31-44.
- Reichenbach, P., Cardinali, M., De Vita, P. and Guzzetti, F. 1998. Regional hydrogeological thresholds fro landslides and floods in the Tiber River basin (central Italy). *Envir. Geol*, Vol. 35, pp. 146-159.
- Reid, M.E., Sisson, T.W., and Brien, D.L, 2001. Volcano collapse promoted by hydrothermal alteration and edifice shape, Mount Rainier, Washington, *GEOLOGY*, Vol. 29 (9), pp. 779-782.
- Rouiller, J.-D., Jaboyedoff, M., Marro, C., Philippossian, F. et Mamin, M. 1998. Pentes instables dans le Pennique valaisan. *Rapport final PNR31. VDF 239 p.*
- Soeters, R.S. and Van Westen, C.J., 1996. Slope Instability Recognition, Analysis, and Zonation. In *Landslides - Investigation and mitigation*, Transportation Research Board, National Research Council, Special report #247, Turner & Schuster (eds), National Academy Press, Washington D.C, pp. 129-173.