

## Evaluation et cartographie par SIG du risque 'glissement de terrain'. Application aux Alpes du Sud.

**OLIVIER MAQUAIRE\***, **YANNICK THIERY\***, **JEAN-PHILIPPE MALET\*\*\*\***, **ANNE PUISSANT\*\*\*\***

\*UMR 6554 CNRS, LETG-Geophen, Université de Caen Basse-Normandie, Esplanade de la Paix, F-14032 Caen, France

\*\*Faculty of Geosciences, UCEL, Utrecht University, Po.Box 80.115, 3508 TC Utrecht, Netherlands

\*\*\*FRE 2795 CNRS, IDEES-Geosyscom, Université de Caen Basse-Normandie, Esplanade de la Paix, F-14032 Caen, France

### RÉSUMÉ

Cet article présente une procédure en trois étapes pour évaluer et cartographier le risque 'glissement de terrain' en associant plusieurs modèles d'analyse spatiale. Dans un premier temps, la susceptibilité (composante spatiale de l'aléa) aux glissements de terrain est évaluée par un modèle probabiliste bivarié (théorie de l'évidence). Le modèle analyse les relations mathématiques entre des facteurs environnementaux de prédisposition et l'occurrence spatiale des glissements de terrain passés et présents. Dans un deuxième temps, leurs conséquences potentielles (ou dommages) sont estimées par l'identification des éléments à risques (enjeux) et de leurs valeurs dans un modèle d'analyse semi-empirique. Enfin, le risque 'glissement de terrain' est évalué en combinant les cartes de susceptibilité et les cartes de conséquences. La méthode a été élaborée dans le cadre du projet européen ALARM (*Assessment of Landslide Risk and Mitigation in Mountain Areas*, 2001-2004), et a été testée dans le bassin de Barcelonnette (Alpes-de-Haute-Provence, France).

MOTS CLÉS : glissement de terrain, risque, susceptibilité, analyse spatiale, modélisation, SIG

### ABSTRACT

This paper presents a three-step procedure to map landslide risk in mountain areas. First, landslide susceptibility (e.g. the spatial component of the hazard) is evaluated with a bivariate probabilistic model. The model simulates the relationship between several environmental factors controlling landslide location and the observed past and present landslide distribution. Second, landslide potential consequences (damage) are evaluated through the identification of the elements at risk (or stakes) and their value with a semi-empirical model. Finally, landslide risk is evaluated by combining the susceptibility maps and the consequence maps. The methodology has been developed within the EU-funded project ALARM (*Assessment of Landslide Risk and Mitigation in Mountain Areas*, 2001-2004) and has been applied in the Barcelonnette Basin (French South Alps).

KEY WORDS : landslide, risk assessment, susceptibility, spatial analysis, modelling, GIS

### 1. Introduction

Le risque 'glissement de terrain' est lié, d'une part à un événement ou aléa qui est la manifestation d'un phénomène naturel géomorphologique, et d'autre part à des enjeux qui représentent l'ensemble des conséquences ou des pertes attendues (vies humaines, blessés, dommages aux biens, à l'activité économique, aux moyens de subsistance, à l'environnement ou au patrimoine). Les conséquences de l'action d'un aléa sur les enjeux sont fonction des éléments exposés et de leur vulnérabilité, qui est le plus fréquemment exprimée en terme de valeur ou de degré de dégâts (Glade, 2003). Ces différents concepts et termes ont été définis dans le cadre général de l'analyse du risque, puis adaptés aux spécificités du risque 'glissement de terrain' par plusieurs auteurs (Fell et al., 2005). Dans la mesure où il est souvent difficile de quantifier un niveau d'aléa, très fréquemment, seule la susceptibilité des terrains à un type de phénomène est analysée (Aleotti et Chowdhury, 1999). Celle-ci représente la probabilité d'occurrence spatiale d'un phénomène pour plusieurs facteurs de prédisposition environnementaux. Ensuite, pour chaque enjeu reconnu, qui varie selon l'aléa considéré et le cadre socio-

économique et environnemental de la région d'étude, les dommages sont évalués à partir du nombre et de la valeur des éléments exposés potentiellement affectés.

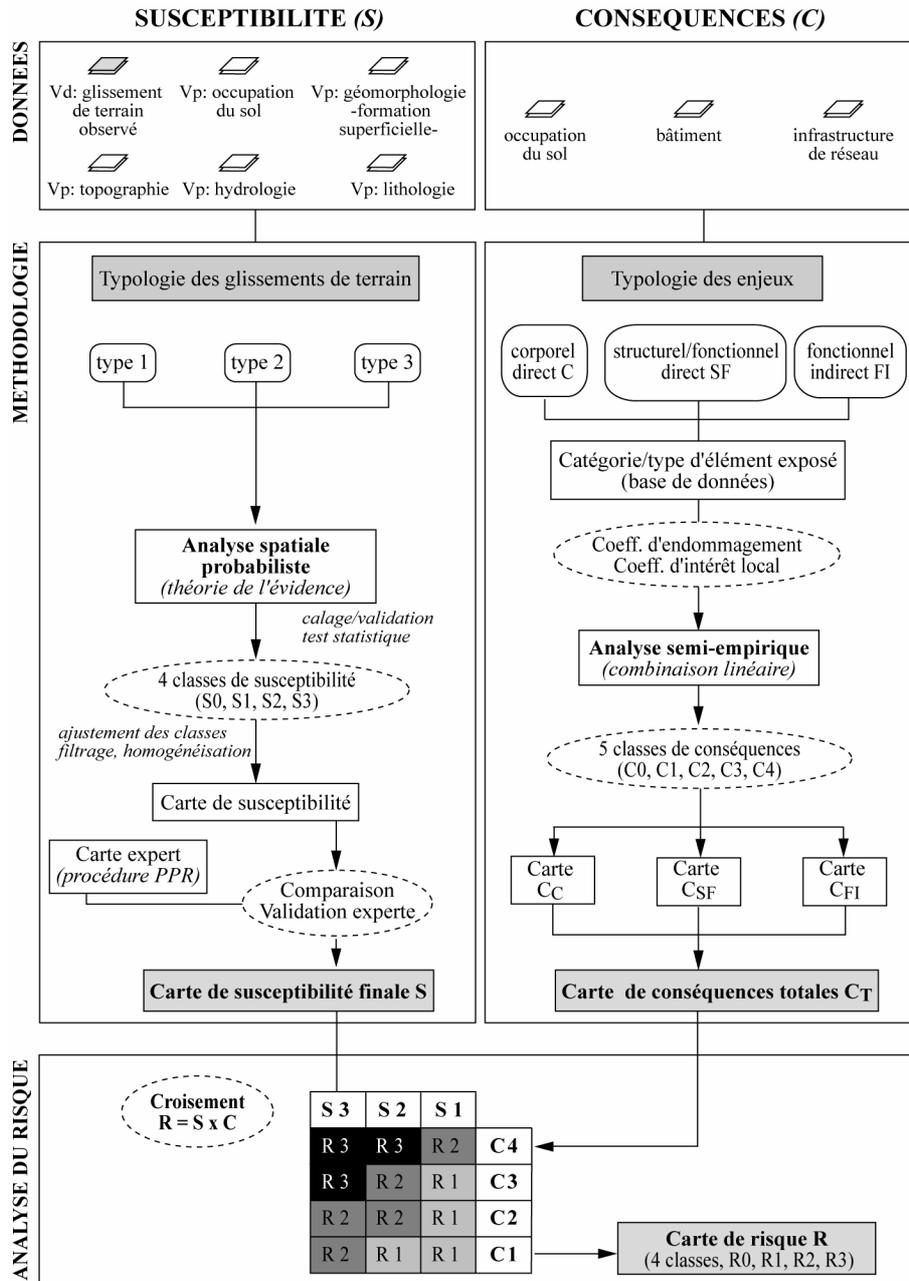


Figure 1. Méthodologie d'analyse du risque 'glissement de terrain' (R) défini comme le croisement de la susceptibilité des terrains (S) et des conséquences éventuelles sur les enjeux (C).

Ce manuscrit présente une méthodologie généralisable de cartographie du risque 'glissement de terrain' par l'utilisation de modèles d'analyse spatiale. La méthodologie comprend trois étapes successives (Figure 1) :

(1) l'évaluation et la cartographie de la susceptibilité par l'utilisation d'un modèle probabiliste bivarié simulant la relation entre des facteurs de contrôle de la localisation des glissements et leur distribution passée et actuelle ;

(2) l'évaluation et la cartographie des conséquences d'un événement par l'identification des éléments exposés et l'analyse de leurs dommages éventuels. Ces derniers sont évalués par un modèle spatialisé semi-empirique combinant plusieurs critères de description des enjeux directs (structurel, fonctionnel et corporel) et indirects ;

(3) l'évaluation et la cartographie du risque par la combinaison des cartes de susceptibilité et de conséquences.

## 2. Approches et méthodes utilisées pour l'analyse du risque 'glissement de terrain'

La Figure 1 présente la méthodologie utilisée ainsi que les données d'entrée. La préparation des données, leur archivage ainsi que les simulations ont été réalisées dans les environnements SIG ArcView 3.2® et PcRaster.

(1) Une approche indirecte fondée sur des modèles statistiques d'analyse spatiale a été utilisée pour quantifier la susceptibilité. La susceptibilité est définie comme la probabilité spatiale qu'un glissement de terrain se produise sur un territoire pour différentes conditions environnementales locales. Le concept fondamental de ces modèles est d'étudier le comportement d'une variable dépendante ( $Vd$ , localisation des glissements de terrain) à partir d'une combinaison de variables indépendantes prédictives ( $Ve$ ) pour des unités géomorphologiques homogènes. La susceptibilité a été simulée par un modèle d'analyse bivariée fondé sur la théorie de l'évidence (Kemp *et al.*, 2001). L'application de la méthode suppose trois hypothèses : (a) les glissements de terrain potentiels se déclencheront selon les mêmes conditions que dans le passé, (b) les facteurs de prédisposition sont connus *a priori*, (c) l'ensemble des glissements de terrain est inventorié sur l'aire d'étude. Le modèle d'analyse est une version log-linéaire du théorème général de Bayes utilisant les notions de probabilité *a priori* et de probabilité *a posteriori*. La probabilité *a priori* est la probabilité qu'une unité de terrain (maille de calcul) contienne la variable dépendante  $Vd$ . Elle est calculée à partir de sa densité sur la zone d'étude. La probabilité *a posteriori* est estimée après le calcul des probabilités *a priori* selon la densité de  $Vd$  pour chaque variable explicative  $Ve$ , dans notre cas chaque facteur de prédisposition. Lorsque plusieurs  $Ve$  sont combinées, les mailles de calculs qui ont un poids élevé ou faible correspondent respectivement à une plus grande ou une plus petite probabilité de présence de  $Vd$ . La méthode est détaillée dans Thiery *et al.* (2005) et Malet *et al.* (2006).

(2) Les conséquences potentielles sont estimées par une analyse semi-empirique des enjeux définis en terme de valeur relative d'éléments exposés (Figure 2). Dans la méthodologie proposée, le potentiel de dommage ou de perturbation des enjeux n'est pas exprimé comme une grandeur numérique mais comme des classes de valeurs. Ce procédé permet de s'affranchir de la collecte de données économiques chiffrées, souvent difficiles à obtenir. Dans une première étape, une typologie des principaux enjeux de la zone d'étude est réalisée. Ces enjeux peuvent concerner (a) les hommes dans leur intégrité physique (enjeu corporel direct), (b) les dégâts aux biens et aux infrastructures (enjeu structurel direct), (c) les perturbations des activités humaines aux conséquences locales, immédiates mais limitées dans le temps (enjeu fonctionnel direct), et (d) les perturbations des activités socio-économiques, aux conséquences extra-locales et diffuses dans le temps (enjeu fonctionnel indirect). Dans notre cas, les enjeux structurels directs et les enjeux fonctionnels directs sont regroupés dans la même analyse. Dans une deuxième étape, une base de données de catégories d'éléments exposés relatives à tous les types d'enjeux est construite. Un coefficient d'endommagement potentiel ( $Cep$ ) est ensuite attribué à chaque élément exposé. En fonction des objectifs de l'étude ou de l'importance socio-économique d'une catégorie d'élément exposé pour le site d'étude, chaque catégorie peut également être affectée d'un coefficient d'intérêt local ( $Cil$ ). Une combinaison linéaire des types d'éléments exposés et des catégories d'éléments exposés associés à leurs coefficients respectifs ( $Cep$ ,  $Cil$ ) permet ainsi d'évaluer un potentiel de dommage pour chaque enjeu corporel direct  $C_C$ , structurel et fonctionnel direct  $C_{SF}$  et fonctionnel indirect  $C_{FI}$ , puis un potentiel de dommage total  $C_T$ . La méthode d'analyse utilisée est détaillée dans Puissant *et al.* (soumis).

(3) Pour graduer l'importance de la menace pour l'homme, ses biens et ses activités, la susceptibilité ( $S1 < S2 < S3$ ) et la conséquence potentielle ( $C0 < C1 < C2 < C3 < C4$ ) sont traduites en classes de risque total dans une matrice à double entrée (Figure 2) comme cela est pratiqué pour la cartographie réglementaire en Italie (Sorriso-Valvo, 2005) et en Suisse (Loat et Zimmermann, 2004). Le risque total est alors exprimé en quatre classes (risque nul, faible, modéré, élevé). Les classes de risque sont choisies de telle manière qu'elles impliquent un type précis de comportement et de prescriptions en termes d'utilisation du sol et d'urbanisme.

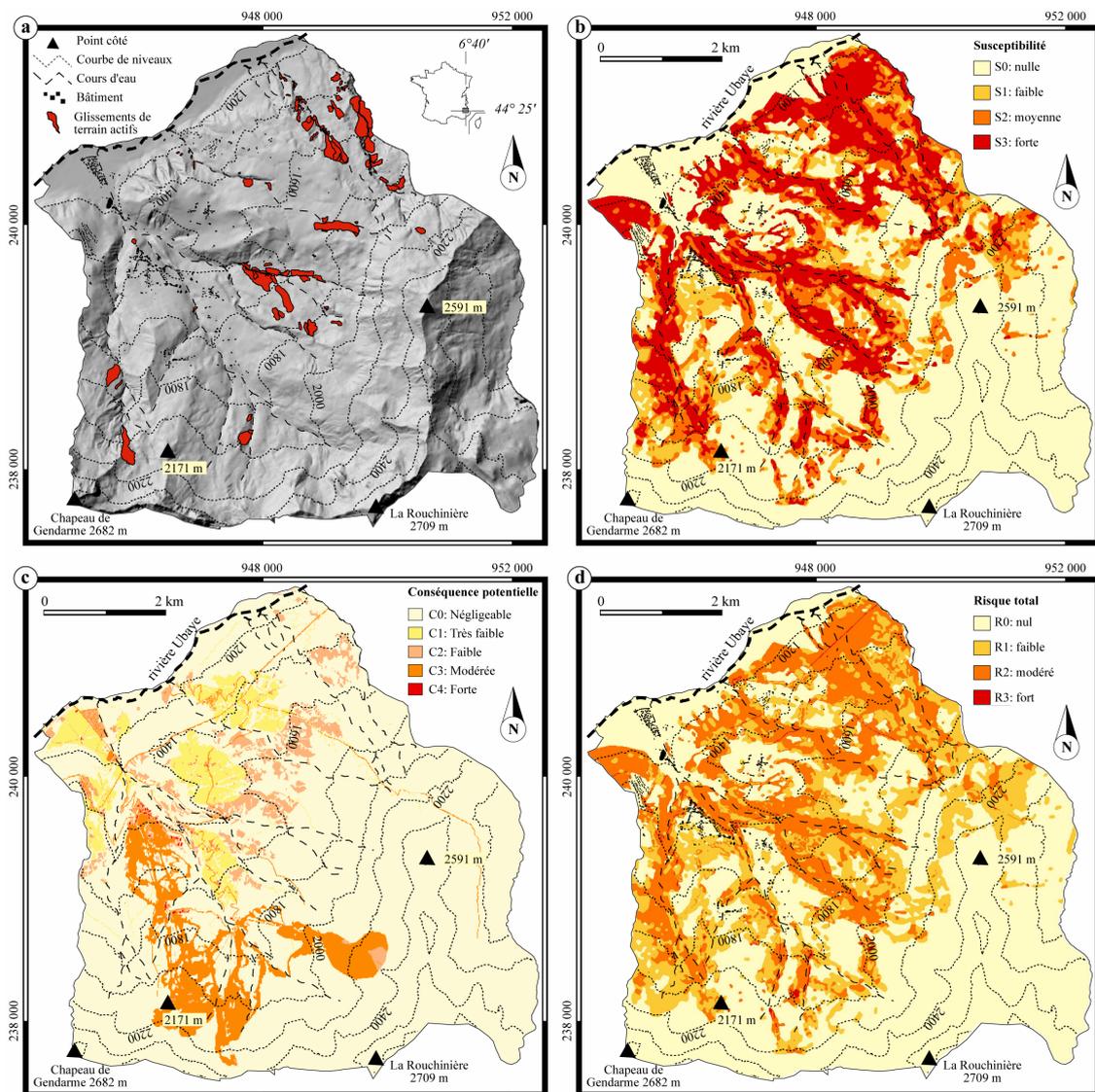
## 3. Le site d'étude : le versant ubac du Bassin de Barcelonnette, Alpes-de-Haute-Provence, France

Le Bassin de Barcelonnette (Alpes-de-Haute-Provence, France), situé à 100 km au nord de Nice, est fortement anthropisé malgré sa situation géographique enclavée. Approximativement 6,000 personnes vivent de manière permanente dans le Bassin, mais la population peut atteindre plus de 15,000 personnes pendant les saisons touristiques. Plusieurs glissements de terrain ont occasionné des dégâts plus ou moins importants dans le bassin, entraînant la fermeture provisoire des voies de communication et de fortes perturbations du trafic routier (Flageollet *et al.*, 1999). Néanmoins, l'occurrence majoritaire de glissements à cinématique très lente explique que les enjeux sont modérés et limités à des conséquences directes aux biens et aux infrastructures de réseau et à des conséquences indirectes liées à l'interruption des activités de tourisme.

## 4. Résultats

### 4.1. Cartographie de la susceptibilité

La première étape correspond à l'analyse statistique des glissements de terrain observés ( $V_d$ ) sur une zone test représentative. Cette étape détermine le nombre minimum de mailles de calcul à introduire dans le calcul des probabilités *a priori* pour chaque type de glissements de terrain, ainsi que leurs localisations optimales. La deuxième étape correspond à l'analyse statistique (analyse de corrélation, analyse factorielle des correspondances) des facteurs environnementaux ( $V_p$ ) pour identifier la meilleure combinaison de  $V_p$  (au sens statistique) pour chaque type de glissement de terrain. La troisième étape correspond à la validation statistique (erreur relative, test t de Student) et empirique (comparaison de la carte simulée avec la carte experte) des cartes simulées. Une carte de susceptibilité est obtenue pour chacun des types de glissements de terrain. Les seuils observés sur une courbe cumulative, représentant le nombre de mailles de calcul en fonction de la probabilité *a posteriori* d'occurrence d'un glissement de terrain, permet de définir quatre classes de susceptibilité. Dans notre cas, les probabilités *a posteriori* sont faibles car la densité de mailles de calcul introduites pour le calcul des probabilités *a priori* est très faible (< 1‰) par rapport au nombre total de mailles de la zone test. Une carte de susceptibilité simulée pour le territoire communal d'Enchastrayes est représentée à la Figure 2b.



**Figure 2.** Inventaire des glissements de terrain actifs (2a) et cartes simulées de la susceptibilité totale aux glissements de terrain obtenue par analyse spatiale bivariée (2b), des conséquences potentielles totales directes et indirectes (2c) et de risque total (2d). Exemple du territoire communal d'Enchastrayes.

## 4.2. Cartographie des conséquences

La Figure 2c présente la carte de potentiel de dommage total. Les cartes (intermédiaires) de (a) dommage structurel et fonctionnel direct, (b) de dommage corporel direct, et (c) de dommage fonctionnel indirect mettent respectivement en évidence les enjeux liés (a) à l'emprise des pistes de ski, aux zones urbanisées et aux zones de culture, (b) au nombre potentiel de victimes par bâtiments, et (c) les perturbations potentielles liées au réseau de communication et aux activités touristiques.

## 4.3. Cartographie du risque total

Le croisement des cartes de susceptibilité et de conséquences potentielles indique que les zones de risque fort (R3) sont peu développées sur le territoire considéré (Figure 2d). Les zones R3 correspondent (1) à des secteurs urbanisés (conséquences fortes) localisés immédiatement à l'amont de versants à forte susceptibilité (par exemple, les versants limitant la station de ski du Sauze), et (2) à des tronçons de route secondaires à enjeu fort (par exemple, l'unique route qui relie les stations du Sauze et Super-Sauze).

## 5. Conclusion

Cette recherche démontre les potentialités des techniques d'analyse spatiale pour évaluer le risque 'glissement de terrain' à grande échelle (1:10,000<sup>e</sup>), échelle de travail correspondant à la cartographie réglementaire du risque en France. Une cartographie indicative pour l'expert en charge de la réalisation des plans réglementaires peut ainsi être obtenue, sous réserve de contrôler la source et la qualité des données d'entrée et de caractériser les conditions de validité des modèles. Pour évaluer la susceptibilité, la procédure doit être adaptée en fonction des types de glissements de terrain observés sur la zone d'étude. Une définition précise de leur activité doit permettre de hiérarchiser le degré de danger et d'apprécier leur poids respectif dans le calcul du niveau de susceptibilité. Ces résultats indiquent que l'analyse spatiale bivariable par théorie de l'évidence, fondée à la fois sur l'objectivité du calcul et l'expérience de l'expert est performante pour la cartographie de la susceptibilité des versants. De même, pour l'évaluation des conséquences, la méthodologie proposée permet de s'affranchir de données économiques précises sur la valeur des éléments exposés ou sur le coût des dommages. Néanmoins, pour aboutir à des réelles cartes de risque, probabilistes et quantitatives, les recherches doivent se poursuivre pour introduire la composante temporelle (probabilité de rupture, probabilité de propagation, période de retour) et l'intensité des phénomènes dans l'évaluation de l'aléa.

## 6. Bibliographie

- Aleotti P., Chowdhury R., 1999. Landslide hazard assessment: summary review and new perspectives, *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, vol. 58, p. 21-44.
- Fell R., Ho K.K.S., Lacasse S., Leroi E., 2005. A framework for landslide risk assessment and management. *Proceedings International Conference on Landslide Risk Management*, London, Taylor & Francis, 2005, p. 3-25.
- Flageollet J.-C., Maquaire O., Martin B., Weber D., 1999. Landslides and climatic conditions in the Barcelonnette and Vars Basins Southern French Alps, France. *Geomorphology*, vol. 30, p. 65-78.
- Glade T., 2003. Vulnerability assessment in landslide risk analysis. *Die Erde*, vol. 134, p. 121-138.
- Kemp L.D., Bonham-Carter G.F., Raines G.L., Looney C.G., 2001. *Arc-SDM: ArcView extension for spatial data modelling using weights of evidence, logistic regression, fuzzy logic and neural network analysis*, <http://ntsर्व.gis.nrcan.gc.ca/sdm/>
- Loat R., Zimmermann M., 2004. La gestion des risques en Suisse. *Risques Naturels et Aménagement en Europe*, Paris, Armand Colin, p. 108-120.
- Malet J.-P., Thiery Y., Maquaire O., Puissant, A., 2006. Analyse spatiale, évaluation et cartographie du risque 'glissement de terrain'. *Revue Internationale de Géomatique* (sous presse, à paraître en 2006).
- Puissant, A., Malet J.-P., Maquaire O., Weber C., (soumis). Building landslide consequence maps at a 1:10,000 scale: a tentative approach with a semi-empirical procedure ». *Landslides* (soumis en Janvier 2006).
- Sorriso-Valvo M., 2005. Landslide risk assessment in Italy. *Landslide Hazard and Risk*, Chichester, Wiley, p. 699-732.
- Thiery Y., Malet, J.-P., Sterlacchini S., Puissant, A., Maquaire O., 2005. Analyse spatiale de la susceptibilité des versants aux glissements de terrain. Comparaison de deux approches spatialisées par SIG. *Revue Internationale de Géomatique*, vol. 15, n°2, p. 227-245.