



Analyse spatiale, évaluation et cartographie du risque glissement de terrain

Jean-Philippe Malet, Yannick Thiery, Olivier Maquaire, Anne Puissant

► **To cite this version:**

Jean-Philippe Malet, Yannick Thiery, Olivier Maquaire, Anne Puissant. Analyse spatiale, évaluation et cartographie du risque glissement de terrain. *Revue Internationale de Géomatique*, Lavoisier, 2006, 16, pp.499 - 525. <10.3166/rig.16.499-525>. <hal-01108696>

HAL Id: hal-01108696

<https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01108696>

Submitted on 23 Jan 2015

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Analyse spatiale, évaluation et cartographie du risque « glissement de terrain »

Jean-Philippe Malet ^{*,**} — Yannick Thiery ^{*,***} — Olivier
Maquaire ^{*,***} — Anne Puissant ^{****}

** Institut de Physique du Globe, UMR 7516 CNRS/ULP, 5 rue Descartes, F-67084
Strasbourg Cedex, France.*

jeanphilippe.malet@eost.u-strasbg.fr; yannick.thiery@eost.u-strasbg.fr;

olivier.maquaire@eost.u-strasbg.fr

*** Faculty of Geosciences, Utrecht University, P.O. Box 80.115, 3508 TC Utrecht,
The Netherlands.*

j.malet@geo.uu.nl

**** Géographie Physique et Environnement, UMR 6554 CNRS/UCBN, Esplanade
de la Paix, BP 5183, F-14032 Caen Cedex, France.*

olivier.maquaire@unicaen.fr, yannick.thiery@unicaen.fr

***** Geosyscom, Géographie des Systèmes de Communication, FRE 2795 CNRS,
University of Caen- Basse Normandie, Esplanade de la Paix, F-14032 Caen Cedex,
France.*

anne.puissant@unicaen.fr

*RÉSUMÉ: Pour évaluer et cartographier le risque « glissement de terrain », les techniques
d'analyse spatiale et les technologies SIG sont rarement utilisées. En particulier, aucune
étude concerne la cartographie automatique du risque « glissement de terrain » à grande
échelle (1:10,000^e), échelle de travail correspondant à la cartographie règlementaire du
risque naturel en France. Cet article présente une procédure en trois étapes pour évaluer et
cartographier le risque « glissement de terrain » en associant plusieurs modèles d'analyse.
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 terrains 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).*

*ABSTRACT. Spatial analysis and GIS technology are still seldom used to evaluate and map
landslide risk. Especially, few studies concern the automatic mapping of landslide risk at
large scales (1:10,000) corresponding to the scale of the legal regulation plans in France.*

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).

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

KEYWORDS: landslide, risk assessment, susceptibility, spatial analysis, modelling, GIS.

1. Introduction

Le risque « glissement de terrain » est lié, d'une part à la présence d'un événement ou aléa qui est la manifestation d'un phénomène naturel géomorphologique, et d'autre part à l'existence d'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). Le risque peut ainsi être exprimé par [Eq. 1] :

$$[1] \quad \text{Risque} = f(\text{aléa} ; \text{conséquence sur les enjeux})$$

Les conséquences de l'action d'un aléa sur les enjeux sont fonction des éléments exposés et de leur vulnérabilité [Eq. 2], qui est le plus fréquemment exprimée en terme de valeur ou de degré de dégâts (Glade, 2003):

$$[2] \quad \text{Conséquence} = f(\text{élément exposé} ; \text{vulnérabilité})$$

Ces différents concepts et termes ont été définis dans le cadre général de l'analyse du risque (UNDRO, 1979 ; UNDP/BCPR, 2004), puis adaptés aux spécificités du risque « glissement de terrain » par plusieurs auteurs depuis le début des années 1990 (Cruden et Fell, 1997 ; Bonnard *et al.*, 2004 ; Fell *et al.*, 2005).

La démarche scientifique d'analyse pour le zonage du risque « glissement de terrain » est synthétisée par les questionnements de la Figure 1 (Malet, 2003), en distinguant les caractéristiques des phénomènes générateurs d'un aléa et les caractéristiques des enjeux. Les questions 1 et 2 permettent d'évaluer la susceptibilité des terrains, c'est-à-dire la probabilité d'occurrence spatiale d'un phénomène pour plusieurs facteurs de prédisposition environnementaux ; en complément, les questions 3 à 5 permettent d'évaluer l'aléa *stricto-sensu*, c'est-à-dire la probabilité d'occurrence spatiale, temporelle et de propagation d'un phénomène d'intensité donnée (Cruden et Fell, 1997 ; Fell *et al.*, 2005). Les questions 6 à 8 permettent de caractériser les conséquences de l'aléa sur les enjeux potentiellement affectés. Pour chaque enjeu reconnu, qui varie selon l'aléa considéré

et le cadre socio-économique et environnemental de la région d'étude, une évaluation des dommages est réalisée à partir du nombre et de la valeur des éléments exposés. Procéder à une évaluation quantitative du risque comporte ainsi trois étapes : (1) l'analyse de l'aléa, (2) l'analyse des conséquences et enfin (3) le calcul du risque par le croisement des informations obtenues aux étapes 1 et 2.

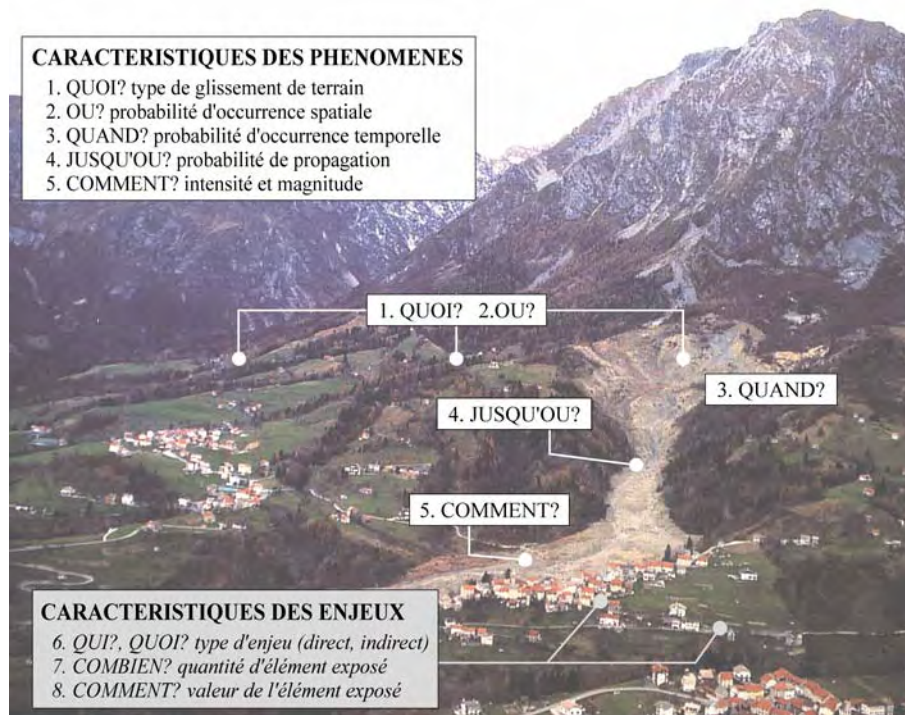


Figure 1. Concepts, termes et questions à résoudre pour l'analyse et le zonage du risque « glissement de terrain » (exemple du glissement-coulée de Tessina, Belluno, Italie ; modifié de Malet, 2003).

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). Ainsi, seuls des éléments réponses aux questions 1 et 2 pour les phénomènes, et 6 à 8 pour les enjeux sont généralement utilisés, soit car les données nécessaires à une analyse complète et rigoureuse ne sont pas disponibles ou insuffisamment détaillées, soit à cause de l'incertitude associée à la connaissance des phénomènes. Le risque est alors exprimé sans référence à la composante temporelle de l'aléa par [Eq. 3] :

$$[3] \quad \text{Risque} = f(\text{susceptibilité ; conséquence sur les enjeux})$$

Ainsi, ce travail propose une méthodologie, reproductible et généralisable, de cartographie du risque « glissement de terrain » par l'utilisation de modèles

d'analyse fondés sur la technologie SIG. La méthodologie comprend trois étapes successives :

(1) l'évaluation et la cartographie de la susceptibilité aux phénomènes « glissement de terrain », par l'utilisation d'un modèle probabiliste bi-varié 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 des enjeux indirects. Ce procédé permet de s'affranchir de la collecte de données économiques chiffrées pour les éléments exposés, souvent difficiles à obtenir ;

(3) l'évaluation et la cartographie du risque total « glissement de terrain » par la combinaison des cartes de susceptibilité et des cartes de conséquences.

La méthodologie est appliquée dans le secteur Sud du Bassin de Barcelonnette (Alpes-de-Haute-Provence, France), zone affectée par plusieurs types de glissements de terrain et soumises à de forts enjeux.

2. Concepts et approches pour l'analyse du risque « glissement de terrain »

La méthodologie utilisée pour l'analyse du risque « glissement de terrain » est schématisée à la Figure 2.

2.1. L'analyse de 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. Les techniques d'analyse spatiale (Guzzetti *et al.*, 1999 ; van Westen, 2000, 2004) permettent d'identifier des zones susceptibles selon deux approches distinctes :

(1) une approche directe et qualitative fondée sur une connaissance experte et intuitive de la relation entre les glissements de terrain observés et différents facteurs de prédisposition. Cette méthode est utilisée en France pour l'élaboration des Plans de Prévention des Risques (PPR ; MATE/METL, 1999), et en Suisse pour la réalisation des Cartes de Danger (BUWAL/BWW/BRP, 1997) ;

(2) une approche indirecte, généralisable et reproductible, fondée sur des modèles statistiques d'analyse spatiale. Le concept fondamental de ces modèles est d'étudier le comportement d'une variable dépendante (localisation des glissements de terrain) à partir d'une combinaison de variables indépendantes prédictives pour des unités géomorphologiques homogènes. Des modèles d'analyse bivariée ou

multivariée peuvent être utilisés (Carrara *et al.*, 1995). La méthode d'analyse utilisée est décrite à la section § 4.1 et détaillée dans Thiery *et al.* (2005) et Thiery *et al.* (sous presse).

2.2. L'analyse des conséquences potentielles : élément exposé et vulnérabilité

Une question récurrente dans la communauté scientifique étudiant les glissements de terrain est de définir une méthode d'analyse généralisable des conséquences. Des synthèses détaillées sur ces méthodes sont fournies par Léone *et al.* (1996), Glade (2003), Maquaire *et al.* (2004), Bonnard *et al.* (2004) ou Malet *et al.* (soumis). Le choix d'une méthode d'analyse, plus ou moins complexe, dépend avant tout de l'échelle d'intérêt, des objectifs de l'étude et de la qualité et quantité des données nécessaires. Toutes les méthodes nécessitent l'identification des éléments exposés et la définition de leur valeur (monétaire ou non). A l'échelle du 1:10,000^e, trois méthodes peuvent ainsi être retenues (Malet *et al.*, soumis) :

(1) une approche experte, qualitative, fondée sur l'identification (carte, photographie aérienne) de zones homogènes sensibles et des principaux enjeux. Cette méthode est utilisée en France pour l'élaboration des Plans de Prévention des Risques (PPR ; MATE/METL, 1999) ;

(2) une approche analytique semi-empirique et semi-quantitative fondée uniquement sur une évaluation relative de la valeur des éléments exposés. Dans ce cas, la valeur relative, unique ou variable, est soit individuelle et affectée à un type d'élément spécifique (MATE/METL, 1999), soit globale et affectée à un ensemble d'éléments pour une aire homogène (Bonnard *et al.*, 2004) ;

(3) une approche analytique quantitative fondée sur un calcul détaillé de la valeur (monétaire ou non monétaire) et de la vulnérabilité des éléments exposés. La vulnérabilité est alors définie soit par des coefficients d'endommagement (représentant le degré relatif de dommage à un élément exposé), soit par des fonctions d'endommagement reliant une intensité du phénomène à un niveau observé de dommage sur l'élément exposé (Léone *et al.*, 1996). Cette analyse très détaillée des conséquences est difficilement applicable en pratique car les bases de données sur les dégâts sont rares ou peu détaillées, en particulier en ce qui concerne le type d'événement générateur de l'aléa (Petrascheck et Kienholz, 2003; Crozier et Glade, 2005).

Compte tenu de l'échelle d'étude, et de la difficultés de mise en œuvre de l'approche analytique quantitative, l'approche analytique empirique a été privilégiée, et fait l'objet d'une description détaillée à la section § 4.2.

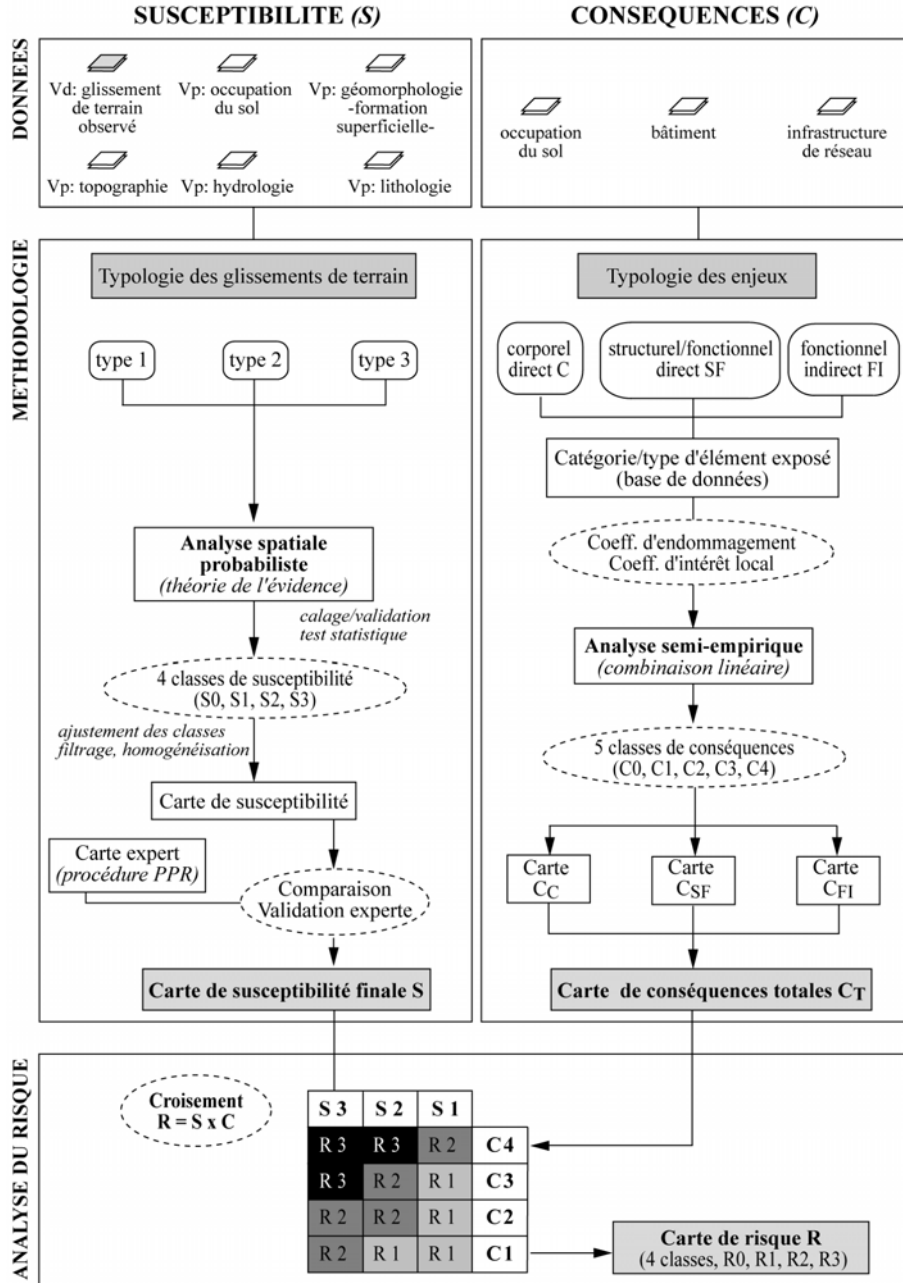


Figure 2. Méthodologie d'analyse du risque « glissement de terrain » (R) défini comme le croisement de la susceptibilité des terrains (S) et des conséquences éventuelles sur les enjeux (C).

2.3. Le calcul du risque total

Le risque total est ensuite calculé en croisant, à l'aide d'un tableau à double entrées (Ko Ko *et al.*, 2004), les classes de susceptibilité simulées et les classes de conséquences potentielles simulées comme cela est pratiqué pour la cartographie réglementaire en Italie (Sorriso-Valvo, 2005) et en Suisse (Loat et Zimmermann, 2004). Le risque total (Fig. 2) est alors généralement exprimé en quatre classes (risque nul, risque faible, risque modéré, risque élevé).

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 (Fig. 3), est fortement anthropisé malgré sa situation géographique enclavée, entre les massifs montagneux du Queyras au Nord-Est, de l'Argentera à l'Est et du Mercantour au Sud. Approximativement 6000 personnes vivent de manière permanente dans le Bassin, mais la population peut atteindre plus de 15,000 personnes pendant les saisons touristiques. Les deux activités économiques principales sont les activités de loisirs (ski, randonnée, camping, etc.) et les activités agricoles. Une petite activité industrielle et artisanale, ainsi que de services existent également. Le bassin est caractérisé par un tissu urbain discontinu le long des routes principales avec quelques gros hameaux (Fig. 3). Les accès au Bassin sont limités à de hauts cols enneigés et fermés l'hiver ou bien à d'étroites gorges empruntées par une unique voie principale de communication.

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). Des aménagements ont été entrepris pour réduire le risque, comme des travaux de drainage, des engazonnements et la mise en place d'un système de surveillance et d'alerte pour le glissement-coulée de La Valette (Colas et Locat, 1993). 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 (Fig. 4) et à des conséquences indirectes liées à l'interruption des activités de tourisme.

Le site d'étude, où la cartographie du risque a été entreprise dans le cadre du Projet Européen ALARM (*Assessment of Landslide Risk and Mitigation in Mountain Areas*, 2002-2004), correspond au versant ubac du bassin et aux territoires communaux de Jausiers à l'Est et d'Enchastrayes à l'Ouest. Il présente une superficie d'environ 100 km² entre les altitudes de 1100 m et 3000 m. Deux unités géomorphologiques séparées par une faille de direction Nord-Sud peuvent être distinguées : à l'Est, les versants sont caractérisés par l'affleurement de flyschs du Sénonien ; à l'Ouest, les versants sont dominés par l'affleurements des marnes noires du Callovo-Oxfordien (Thiery *et al.*, 2005).

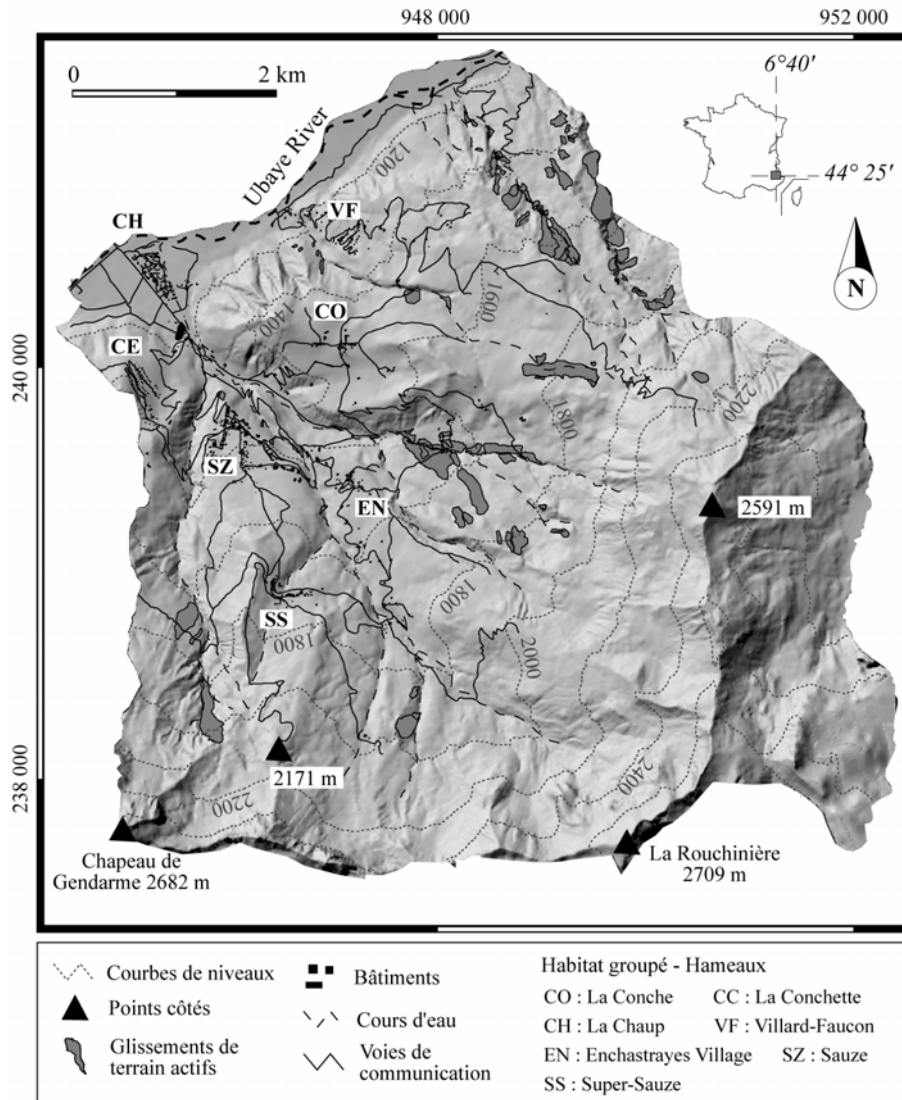


Figure 3. Topographie, localisation des principaux glissements de terrain actifs et des activités humaines du site d'étude. Exemple du territoire communal d'Enchastrayes.



Figure 4. Enjeux représentatifs et modérés du site d'étude. Exemple du territoire communal d'Enchastrayes.

Les versants de l'unité Est, aux pentes fortes (30° - 60°), sont complètement dénudés. A l'inverse, les versants de l'unité Ouest, aux pentes plus douces (10° - 30°), sont recouverts de dépôts morainiques et de sols d'épaisseurs variables (2 m-15 m). Les versants aux pentes fortes présentent une végétation arborée de type conifères ou une végétation herbacée alors que les versants aux pentes les plus douces sont cultivés. Ces caractéristiques lithologiques, géomorphologiques et d'occupation du sol, expliquent en partie la diversité des glissements de terrain observés. Ainsi, dans l'unité Est, la présence de flyschs très résistants associée à des versants aux pentes locales fortes favorisent les écroulements rocheux. Dans l'unité Ouest, la superposition marnes noires – dépôts morainiques, ainsi que la densité du réseau de drainage, favorise la localisation de glissements rotationnels, translationnels ou complexes (Thiery *et al.*, 2005). L'activité des glissements de terrain, leur fréquence spatiale et temporelle, ainsi que leur mécanismes de contrôle physique sont étudiés depuis une dizaine d'années (Flageollet *et al.*, 1999 ; Malet *et al.*, 2005). Si l'étude a concerné l'ensemble du versant ubac du bassin de Barcelonnette, les illustrations présentées dans cet article ne concernent que le seul territoire de la commune d'Enchastrayes (46 km²).

4. Evaluation du risque : modèles d'analyse et données utilisées

Plusieurs modèles d'analyse spatiale ont été utilisés pour produire des cartes de risque à l'échelle du 1:10,000°. La Figure 2 présente la méthodologie utilisée ainsi que les données d'entrée. La préparation des données, leur archivage ainsi que les

simulations ont été réalisées dans l'environnement SIG ArcView 3.2® et dans l'environnement PcRaster (Wesseling *et al.*, 1996).

4.1. Analyse spatiale et cartographie de la susceptibilité

4.1.1. Description du modèle d'analyse

La susceptibilité des terrains a été simulée par un modèle d'analyse bivariable (théorie de l'évidence), considérée comme l'approche probabiliste la plus robuste pour ce type d'étude (van Westen, 2004), sous réserve de vérifier l'hypothèse d'indépendance conditionnelle des variables explicatives. Le principe de la méthode consiste à définir une relation mathématique entre des facteurs de prédisposition (variable explicative, *Ve*) et l'occurrence spatiale des glissements de terrain (variable dépendante, *Vd*; Carrara *et al.*, 1995; Aleotti et Chowdhury, 1999). Elle suppose trois hypothèses : (1) les glissements de terrain potentiels se déclencheront selon les mêmes conditions que dans le passé, (2) les facteurs de prédisposition sont connus *a priori* et introduits dans l'analyse, (3) 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* (Bonham-Carter, 1994). 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 (Fig. 2). Le calcul des probabilités *a posteriori* actualise la probabilité *a priori*; de ce fait, 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*. Les calculs ont été effectués avec le module ArcSDM® (Kemp *et al.*, 2001) dans l'environnement SIG ArcView 3.2®.

Pour tenir compte des caractéristiques du site d'étude, notre stratégie a été d'identifier (1) la surface des glissements de terrain à introduire dans l'analyse (zone d'ablation, zone d'accumulation, nombre et choix des mailles représentatives), et (2) le type et le nombre de variables prédictives à introduire dans le modèle. La stratégie de modélisation, les tests statistiques, ainsi que les procédures de calage/validation utilisées sont détaillées dans Thiery *et al.* (2005).

4.1.2. Collecte et préparation des données d'entrée

Les données pour l'analyse de la susceptibilité peuvent être regroupées en cinq groupes de variables (Tableau 1) : un inventaire géomorphologique des glissements de terrain observés, des paramètres topographiques (gradient de pente, aspect, orientation), des paramètres géologiques (lithologie, structure, présence de faille) et géomorphologiques (sol, formation superficielle), des paramètres hydrographiques (distance aux cours d'eau, densité du réseau de drainage) et l'occupation du sol. Ces données ont été collectées et mises en forme, soit à partir de bases de données

spatiales existantes, soit à partir de la digitalisation d'informations issues de photographies aériennes ou d'images satellites, soit d'observations de terrain.

| Groupe de variables | Variable dépendante/explicative | Source |
|----------------------------------|---|--|
| Inventaire d'événements observés | Vd : Glissement de terrain (GT) | Orthophotoplan, observation, carte topographique |
| Topographie | Ve : Gradient de pente (PE) Ve : Exposition de la pente (EX) Ve : Aspect de la pente (AS) | Modèle numérique de terrain au 1:10,000 ^e (krigeage) |
| Géologie/Géomorphologie | Ve : Lithologie (LI) Ve : Formations superficielles (FS) Ve : Epaisseur des formations (EF) | Carte géologique, observation, ortho-photoplan, rapport technique |
| Hydrologie | Ve : Réseau hydrographique (HY) | Carte topographique, modèle numérique de terrain au 1:10,000 ^{ee} |
| Occupation du sol | Ve : Occupation du sol (OS) | Fusion d'image satellite (Landsat ETM, Spot XS), observation |

Tableau 1. Variables pour l'analyse de la susceptibilité et sources d'information.

L'inventaire géomorphologique des glissements de terrain (variable dépendante) a été réalisé au 1:10,000^e à partir de l'analyse de photographies aériennes, de documents d'archives, de rapports techniques et d'observations de terrain. Seuls les glissements actifs identifiés précisément sur le terrain et par photo-interprétation ont été retenus. Ainsi, pour le territoire communal d'Enchastrayes, 68 glissements actifs ont été introduits dans l'analyse (Fig. 3). Une distinction géomorphologique (Dikau *et al.*, 1996) en trois types de glissement de terrain est nécessaire car les facteurs de prédisposition pertinents pour chaque type et leur ordre d'importance sont différents (Tableau 2). Leur hiérarchie a été définie par une connaissance experte des phénomènes, et par une étude statistique des corrélations entre les variables (Thiery *et al.*, sous presse).

| Type de glissement de terrain | Caractéristiques : localisation / géologie | Hiérarchie des facteurs de prédisposition |
|---------------------------------------|---|---|
| Translationnel superficiel | Berges de torrents / Moraine et altérite de marnes | PE, HY, FS, LI, OS |
| Rotationnel superficiel | Berges de torrents / Moraine | HY, PE, FS, OS |
| Complexe à dominante translationnelle | Versants à pente modérée / Contact moraine-roche en place ou au sein de la roche en place | PE, FS, LI, OS, AS |

Tableau 2. Types de glissements de terrain, leurs caractéristiques principales et leurs facteurs de prédisposition.

Les cartes de variables prédictives ont été produites par croisement de ces sources d'informations, puis rasterisées à une maille de 10 m. Les paramètres topographiques ont été dérivés d'un modèle numérique de terrain issu de la digitalisation des courbes de niveaux sur des fonds de plan au 1:10,000^e et d'une

interpolation par krigeage (Thiery *et al.*, 2005), et une occupation du sol (Tableau 3) a été produite par le traitement d'images satellites fusionnées (SPOT XS, Landsat ETM+) complété par des observations de terrain.

| Occupation du sol | Classes utilisées pour l'analyse de la susceptibilité | Classes utilisées pour l'analyse des conséquences |
|--------------------------|---|---|
| Forêt et milieu naturel | 1. Forêt de conifères (densité forte) 2. Forêt de conifères (densité moyenne à faible) 3. Forêt de feuillus | 1. Forêt |
| | 4. Pelouse alpine et pâturage | 2. Pelouse alpine |
| Territoire agricole | 5. Culture permanente | 3. Culture permanente |
| | 6. Prairie | 4. Prairie |
| Affleurement rocheux | 7. Roche nue ou sol nu 8. Affleurement de marne noire | 5. Affleurement rocheux |
| Territoire artificialisé | 9. Zone urbanisée 10. Zone industrielle / commerciale 11. Aéroport 12. Zone d'extraction de matériau | 6. Zone urbaine |
| Surface en eau | 13. Cours d'eau 14. Lac, étang 15. Alluvion | 7. Surface en eau |

Tableau 3. Variable occupation du sol : description des classes pour l'analyse de la susceptibilité et des conséquences potentielles.

4.1.3. Validation des cartes de susceptibilité par la méthode expert

Les cartes de susceptibilité simulées par le modèle d'analyse spatiale bivariée ont été comparées à une carte expert réalisée en appliquant la procédure réglementaire utilisée pour la réalisation des Plans de Prévention du Risque (MATE/METL, 1999). Cette carte, qualitative, et qui relève du jugement de la personne qui cartographie, est une synthèse interprétative des facteurs de prédisposition des phénomènes. La construction de la carte expert nécessite d'avoir une vision large de la zone à cartographier en identifiant des secteurs aux caractéristiques environnementales homogènes, et de prendre en compte les possibilités de développement amont/aval et latéral des glissements de terrain pour une période de cent ans (échelle humaine). Quatre classes de susceptibilité ont été identifiées (Tableau 4).

| Susceptibilité | Définition |
|-----------------------------|---|
| S0 : susceptibilité nulle | Aucune possibilité de déclenchement d'un glissement de terrain à l'échelle humaine. <i>Les conditions environnementales locales contribuent à renforcer la stabilité des terrains (gradient de pente nul à faible [0-10°], terrain agricole en culture permanente, entretenu et drainé).</i> |
| S1 : susceptibilité faible | Possibilité faible de déclenchement d'un glissement de terrain à l'échelle humaine. <i>Les conditions environnementales locales (gradient de pente faible à modéré [10-20°], pelouse ou espace forestier entretenus) sont faiblement favorables au déclenchement de glissements de terrain ; néanmoins, l'abandon de l'entretien des terrains ou la présence locale de rupture de pente pourraient conduire à la déstabilisation. Le principe est donc à la prudence et il convient de faire attention aux aménagements futurs.</i> |
| S2 : susceptibilité modérée | Possibilité modérée de déclenchement d'un glissement de terrain à l'échelle humaine. <i>Les conditions environnementales locales sont favorables au déclenchement de glissements de terrain (gradient de pente modéré à fort [20°-25°], présence de rupture de pente et de bossellement, pelouse ou espace forestier non entretenus, absence ou mauvais état des dispositifs de drainage, sol faiblement dégradé). Les projets de construction sont possibles mais devront être précédés d'études géotechniques détaillées pour définir les travaux de confortement obligatoire (fondation, renforcement des structures, drainage, reboisement).</i> |
| S3 : susceptibilité forte | Possibilité forte de déclenchement d'un glissement de terrain à l'échelle humaine. <i>Les conditions environnementales locales sont très favorables (gradient de pente fort [$>25^\circ$], sol fortement dégradé ou raviné, absence de végétation ou forêt très mal entretenue) au déclenchement de glissements de terrain. Des glissements très actifs sont présents. Aucun aménagement n'est possible.</i> |

Tableau 4. Classes de susceptibilité « glissement de terrain » pour le site d'étude.

4.2. Evaluation et cartographie des conséquences potentielles

4.2.1. Description du modèle d'analyse

Les conséquences potentielles sont estimées par une analyse semi-empirique des enjeux définis en termes de valeur relative d'éléments exposés (Fig. 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 (Maquaire *et al.*, 2004).

Dans une première étape, une typologie des principaux enjeux de la zone d'étude est réalisée. Ces enjeux peuvent concerner (1) les hommes dans leur intégrité physique (enjeu corporel direct), (2) les dégâts aux biens et aux infrastructures (enjeu structurel direct), (3) les perturbations des activités humaines aux conséquences locales, immédiates mais limitées dans le temps (enjeu fonctionnel direct), et (4) 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 car les dommages potentiels concernent les mêmes catégories d'éléments exposés.

Dans une deuxième étape, une base de données de catégories d'éléments exposés relatives à tous les types d'enjeux est construite. Les catégories comprennent plusieurs types d'élément exposé, chacun décrit par des attributs (Fig. 5). 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 .

4.2.2. Collecte et préparation des données d'entrée

Les données pour l'analyse des conséquences potentielles ont été collectées en distinguant trois catégories d'éléments exposés qui apparaissent comme les plus discriminants et révélateurs des enjeux (Léone *et al.*, 1996) :

(1) l'occupation du sol au sens large, qui regroupe des informations à la fois sur l'occupation du sol (description physique du territoire) et sur l'utilisation du sol (description fonctionnelle du territoire). Cette distinction permet de différencier les surfaces (naturelles, anthropisées) considérées suffisamment homogènes d'un point de vue physio-géographique, des surfaces relevant d'une affectation du sol qui est la fonction dévolue à une portion de territoire. Par rapport aux classes d'occupation du sol utilisées pour l'analyse de la susceptibilité, des regroupements ont été opérés pour l'évaluation des conséquences (Tableau 3) en ne retenant que sept classes par manque d'informations sur les valeurs foncières des terrains. Pour l'utilisation du sol, les zones de loisirs (domaine skiable, camping, parc de loisir) ont été introduites car elles représentent un enjeu économique très important pour le site d'étude.

(2) les bâtiments, qui correspondent à des lieux d'habitation permanent (immeuble, maison individuelle) ou non permanent (lieu d'activité commerciale, industrielle), à des lieux d'entreposage (remise, hangar), à des monuments particuliers (église, cimetière), à des infrastructures de réseau (poste électrique, réservoir) et à des abris de montagne (cabane). Les attributs « fonction » (éducation, sécurité civile, santé, commerce, industrie, résidentiel) et « hauteur » (nombre d'étage) ont été introduits dans la base de données car ils expriment indirectement le nombre d'habitants pouvant être affectés, les dommages aux structures ou les perturbations fonctionnelles liées aux fonctions hébergées dans le bâtiment. Pour notre analyse à l'échelle du 1:10,000^e, la structure de construction des bâtiments (béton, brique, pierre sèche, acier, bois) n'est pas prise en compte.

(3) les infrastructures de réseau, qui correspondent au réseau d'énergie (électricité, gaz, eau), au réseau de circulation (autoroute, route nationale, voie de

desserte), au réseau d'assainissement (égout) et à des réseaux liés aux activités touristiques (télésiège, remonte-pente). Les infrastructures ponctuelles associées à ces réseaux (poteau et pylône électrique, pont, captage d'eau) ont été intégrées à cette catégorie.

4.2.3. Hiérarchisation des enjeux et évaluation des conséquences

Le coefficient d'endommagement potentiel (Cep) est défini par rapport à la perte subie par l'élément exposé s'il est affecté par un glissement de terrain. Dans notre analyse globale et à but cartographique, l'intensité du phénomène naturel sur le degré d'endommagement n'est pas prise en compte. La Figure 5 indique les coefficients utilisés, compris dans l'intervalle [0-1]. Par exemple, pour l'évaluation du potentiel de dommage structurel et fonctionnel direct (C_{SF}), les coefficients des éléments de la catégorie « occupation du sol » ont été définis en fonction de la valeur foncière des terrains, indiquée par les gestionnaires locaux. Pour la catégorie « infrastructure de réseau » les coefficients ont été attribués en fonction des perturbations fonctionnelles directes attendues en cas d'endommagement ou de destruction des éléments de cette catégorie. La même approche a été utilisée par Glade (2003). Le coefficient d'intérêt local (Cil) pour chaque catégorie a été défini de manière experte, en prenant en compte les caractéristiques socio-économiques et environnementales du site d'étude. Ainsi, le développement économique du territoire communal d'Enchastrayes est fortement lié aux activités touristiques d'hiver et d'été ; les infrastructures associées à ces activités doivent être préservées (Fig. 5) ce qui justifie un Cil de valeur 4.0 pour cette catégorie.

| ENJEU CORPOREL DIRECT C_C | ENJEU STRUCTUREL ET FONCTIONNEL DIRECT C_{SF} | ENJEU FONCTIONNEL INDIRECT C_{FI} |
|---|---|---|
| <p><i>Cel</i> Type de bâtiment</p> <p>1.00 Habitat 0.80 Monument de patrimoine 0.30 Bâtiment de service 0.50 Entrepôt 0.20 Parking 0.10 Cabane <i>Cil</i> : 1.0</p> | <p><i>Cel</i> Occupation du sol <i>Cil</i> : 2.0</p> <p>1.00 Surface agricole 0.30 Forêt 0.25 Prairie et pelouse alpine 0.15 Surface en eau 0.05 Affleurement rocheux et sol nu</p> | <p><i>Cel</i> Fonction des bâtiments</p> <p>1.00 Fonction d'éducation 0.95 Fonction de secours 0.90 Fonction commerciale privée 0.90 Fonction industrielle 0.70 Fonction de service public 0.80 Fonction d'hébergement 0.40 Fonction agricole 0.80 Fonction de loisirs <i>Cil</i> : 2.0 0.20 Fonction religieuse</p> |
| <p><i>Cel</i> Hauteur des bâtiments</p> <p>1.00 > 9 étages 0.90 7-8 étages 0.80 5-6 étages 0.70 3-4 étages 0.60 2 étages 0.50 1 étage <i>Cil</i> : 2.0</p> | <p><i>Cel</i> Fonction liée à l'utilisation du sol</p> <p>1.00 Fonction urbaine 0.70 Fonction de loisirs d'hiver 0.40 Fonction de loisirs d'été 0.10 Fonction agricole <i>Cil</i> : 4.0</p> | <p><i>Cel</i> Infrastructure de réseau</p> <p>1.00 Voie de communication principale 0.80 Voie de communication secondaire 0.80 Servitude de réseau 0.60 Réseau de loisirs 0.10 Surface artificialisée <i>Cil</i> : 4.0</p> |
| <p><i>Cel</i> Fonction des bâtiments</p> <p>1.00 Fonction d'éducation 0.95 Fonction de secours 0.90 Fonction commerciale privée 0.90 Fonction industrielle 0.70 Fonction de service public 0.80 Fonction d'hébergement 0.40 Fonction agricole 0.80 Fonction de loisirs <i>Cil</i> : 2.0 0.20 Fonction religieuse</p> | <p><i>Cel</i> Type de bâtiment</p> <p>1.00 Habitat 0.80 Monument de patrimoine 0.30 Bâtiment de service 0.50 Entrepôt 0.20 Parking 0.10 Cabane <i>Cil</i> : 1.0</p> | |
| | <p><i>Cel</i> Fonction des bâtiments</p> <p>1.00 Fonction d'éducation 0.95 Fonction de secours 0.90 Fonction commerciale privée 0.90 Fonction industrielle 0.70 Fonction de service public 0.80 Fonction d'hébergement 0.40 Fonction agricole 0.80 Fonction de loisirs <i>Cil</i> : 3.0 0.20 Fonction religieuse</p> | |
| | <p><i>Cel</i> Infrastructure de réseau</p> <p>1.00 Voie de communication principale 0.80 Voie de communication secondaire 0.80 Servitude de réseau 0.60 Réseau de loisirs 0.10 Surface artificialisée <i>Cil</i> : 2.0</p> | |

Figure 5. Enjeux, typologie des catégories d'éléments exposés et coefficients attribués à chaque élément (*Cel*) et catégorie d'éléments exposés (*Cil*).

Ainsi, la méthodologie proposée permet de s'affranchir de données économiques chiffrées sur la valeur des éléments exposés ou sur le coût des dommages observés, qui n'existent pas pour toutes les régions, sont disparates ou difficiles à collecter. De plus, la méthodologie est modulable ; à partir d'une base d'attributs sur les éléments exposés, la méthode permet de modifier la hiérarchie des éléments exposés et leurs coefficients (*Cep*, *Cil*) afin de tenir compte de l'évolution annuelle de leur valeur, de mettre en exergue un élément particulier, ou de réaliser des simulations d'aménagement. La combinaison des potentiels de dommage (C_C , C_{SF} , C_{FI}) permet d'évaluer un potentiel de dommage total C_T , exprimé en cinq classes (Tableau 5).

| Conséquence totale C_T | Définition |
|-----------------------------|---|
| C0 : conséquence nulle | Pas de conséquences de quelque nature que ce soit. |
| C1 : conséquence faible | Domages très mineurs aux bâtiments ou aux réseaux. Perturbations faibles, très locales et de courte durée des activités humaines. |
| C2 : conséquence modérée | Pas de blessés. Domages faibles à sérieux aux bâtiments et aux réseaux. Perturbations modérées (quelques jours à quelques semaines) des activités humaines. |
| C3 : conséquence forte | Des blessés légers ou graves sont à attendre compte tenu des forts dommages aux constructions. Perturbations modérées à fortes des activités humaines. Conséquences fortes, directes ou indirectes, circonscrites à la seule commune concernée mais pouvant se faire ressentir durant plusieurs mois. |
| C4 : conséquence très forte | Des victimes sont à attendre (blessés graves, morts) par la destruction totale des constructions. Conséquences très fortes, directes ou indirectes, dépassant les possibilités de prévention des seules collectivités concernées. Des effets induits (conséquences en chaîne) sont à prévoir. |

Tableau 5. Classes de conséquence potentielle totale pour le site d'étude.

4.3. Evaluation et cartographie du risque total

Pour graduer l'importance de la menace pour l'homme, ses biens et ses activités, la susceptibilité ($S1 < S2 < S3$) et la conséquence potentielle ($C0 < C1 < C2 < C3 < 4$) sont traduites en classes de risque total (Ko Ko *et al.*, 2004) dans une matrice à double entrée (Fig. 2). Le diagramme utilisé dans cette matrice doit être unique et de validité générale. Ainsi, par mesure de simplification, la classe de susceptibilité nulle n'est généralement pas introduite car elle implique, quelle que soit la classe de conséquence, un risque nul (Fig. 2). 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. Leur nombre peut varier selon l'échelle de la cartographie et le pays. Par exemple, en Italie (Panizza *et al.*, 2004 ; Sorriso-Valvo, 2005) et en Allemagne dans la région Rheinland-Pfalz (Glade et Crozier, 2005), cinq classes sont utilisées (risque très fort, fort, modéré, faible, nul). En Suisse (Loat et Zimmermann, 2004) et en France (MATE/METL, 1999), quatre classes sont cartographiées (risque fort, modéré, faible et nul). Les définitions des classes de risque en France sont indiquées au Tableau 6.

| Risque total | Définition |
|--------------------|---|
| R0 : risque nul | La menace sur les enjeux est nulle. <i>Il n'existe aucune menace connue à l'échelle humaine, ou le niveau de menace est négligeable selon l'état des connaissances scientifiques actuelles.</i> |
| R1 : risque faible | La menace sur les enjeux est faible. <i>La menace sur les personnes est faible ou inexistante, mais de faibles dommages aux bâtiments et une perturbation mineure des activités humaines sont à attendre. Le principe est à la sensibilisation et à l'autorisation de construction sous prescriptions d'un coût modéré.</i> |
| R2 : risque modéré | La menace sur les enjeux est modérée. <i>La menace sur les personnes est forte à l'extérieur des bâtiments mais faible ou inexistante à l'intérieur, des dommages sérieux aux bâtiments sont à prendre en compte si le mode de construction n'est pas adapté, et une perturbation modérée des activités humaines est à attendre. Le principe est à la réglementation avec l'instauration de mesures de précautions appropriées (zone inconstructible ou constructible sous prescriptions d'un coût élevé).</i> |
| R3 : risque fort | La menace sur les enjeux est élevée. <i>La menace sur les personnes est forte à l'intérieur ou à l'extérieur des bâtiments, une destruction rapide des bâtiments est à attendre et une perturbation majeure des activités humaines est identifiée. Le principe est à l'interdiction de toute construction (zone inconstructible).</i> |

Tableau 6. Classes de risque total « glissement de terrain » pour le site d'étude.

5. Résultats : analyse et cartographie du risque

5.1. Cartographie de la susceptibilité aux glissements de terrain

La procédure de calage/validation du modèle probabiliste associe trois étapes. Elle est détaillée dans Thiery *et al.* (2005) et Thiery *et al.* (soumis).

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.

En pratique, (1) plusieurs simulations sont effectuées pour chaque type de glissement de terrain (V_d) et pour différentes combinaisons de variables prédictives (V_p), (2) la meilleure simulation pour chaque type est retenue, et (3) les cartes de susceptibilité pour chaque type de glissement sont assemblées en une carte de susceptibilité totale.

Par rapport aux combinaisons de variables prédictives décrites dans Thiery *et al.* (2005), la procédure utilisée dans cet article a été modifiée (1) en distinguant trois

types de glissements de terrain, et (2) en introduisant des néo-variables prédictives (nVp). Ces néo-variables sont obtenues en agrégeant certaines classes des variables prédictives considérées comme les plus significatives. Par exemple, pour le type « glissement translationnel superficiel », localisé prioritairement sur les berges raides des torrents, les classes $[20^{\circ}-50^{\circ}]$ de la variable gradient de pente (PE) et la classe [zone de 100 m autour des torrents] de la variable réseau hydrographique (HY) ont été combinées.

Ces néo-variables sont ensuite utilisées comme des variables traditionnelles et introduites dans l'analyse. Le Tableau 7 indique les combinaisons de variables et néo-variables retenues pour les simulations, ainsi que les différents tests statistiques. Par rapport aux résultats obtenus dans Thiery *et al.* (2005), l'introduction d'une néo-variable permet d'augmenter de manière significative le pouvoir prédictif des simulations ; ainsi, en fonction du type de glissement de terrain, plus de 80% des zones identifiées de déclenchement sont reconnues par le modèle.

| Type de glissement de terrain | Erreur relative (-) | | Zones de déclenchement identifiées (%)* | Meilleure combinaison de variable prédictive |
|---------------------------------------|---------------------|------------|---|--|
| | Calage | Validation | | |
| Translationnel superficiel | 0.14 | 0.20 | 80% | $nVp1 + FS + OS + AS$ |
| Rotationnel superficiel | 0.06 | 0.13 | 88% | $nVp2 + FS + OS$ |
| Complexe à dominante translationnelle | 0.10 | 0.20 | 81% | $nVp3 + FS + LI + OS$ |

Tableau 7. Combinaison de variables prédictives (Vp , nVp) introduites dans l'analyse de la susceptibilité, et tests statistiques associés. Les noms des variables font référence au Tableau 1. Les néo-variables $nVp1$, $nVp2$ et $nVp3$ correspondent respectivement à la combinaison HY-PE (classe $20^{\circ}-50^{\circ}$), HY-PE (classe $10^{\circ}-35^{\circ}$) et FS-PE (classes $10^{\circ}-35^{\circ}$). * correspond aux résultats obtenus sur la zone test.

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 (Fig. 6). 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.

Plusieurs filtres sont ensuite appliqués sur les cartes afin (1) d'éliminer les aires résiduelles de surface inférieure à 400 m^2 et (2) d'homogénéiser et de densifier les aires séparées par une distance inférieure à respectivement 20 m, 15 m et 10 m pour les classes de susceptibilité S1, S2 et S3. Les trois cartes sont ensuite combinées en une carte de susceptibilité totale (Fig. 7).

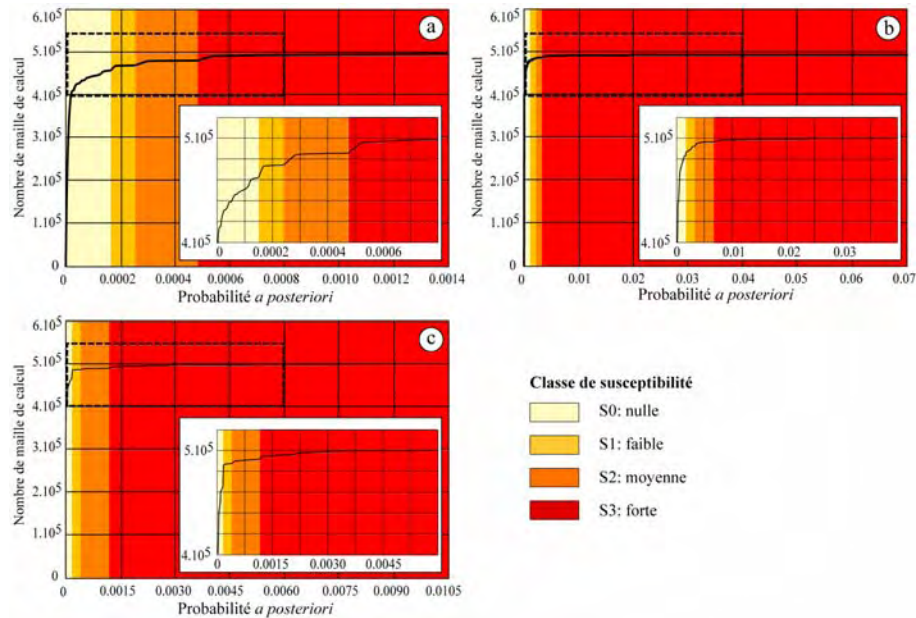


Figure 6. Courbes de probabilité *a posteriori* obtenue pour l'analyse de la susceptibilité et définition des limites de classes selon les seuils observés. (a) glissement complexe à dominante translationnelle, (b) glissement translationnel superficiel, (c) glissement rotationnel superficiel.

La carte susceptibilité totale simulée identifie respectivement des aires de susceptibilité de 8.9 km^2 , 7.2 km^2 et 4.4 km^2 pour S1, S2 et S3. D'un point de vue cartographique, la carte simulée et la carte expert identifient des secteurs de susceptibilité identiques en particulier pour la classe de susceptibilité forte (S3). Par rapport à l'expert, le modèle d'analyse tend à sous-estimer l'occurrence de glissements de terrain dans les aires à faible gradient de pente ($5\text{-}10^\circ$) car peu de phénomènes y ont été observés (probabilité *a priori* très faible) ; à l'inverse, l'expert interprétera ces zones en associant de manière orientée les facteurs de prédisposition et en usant généralement du principe de précaution.

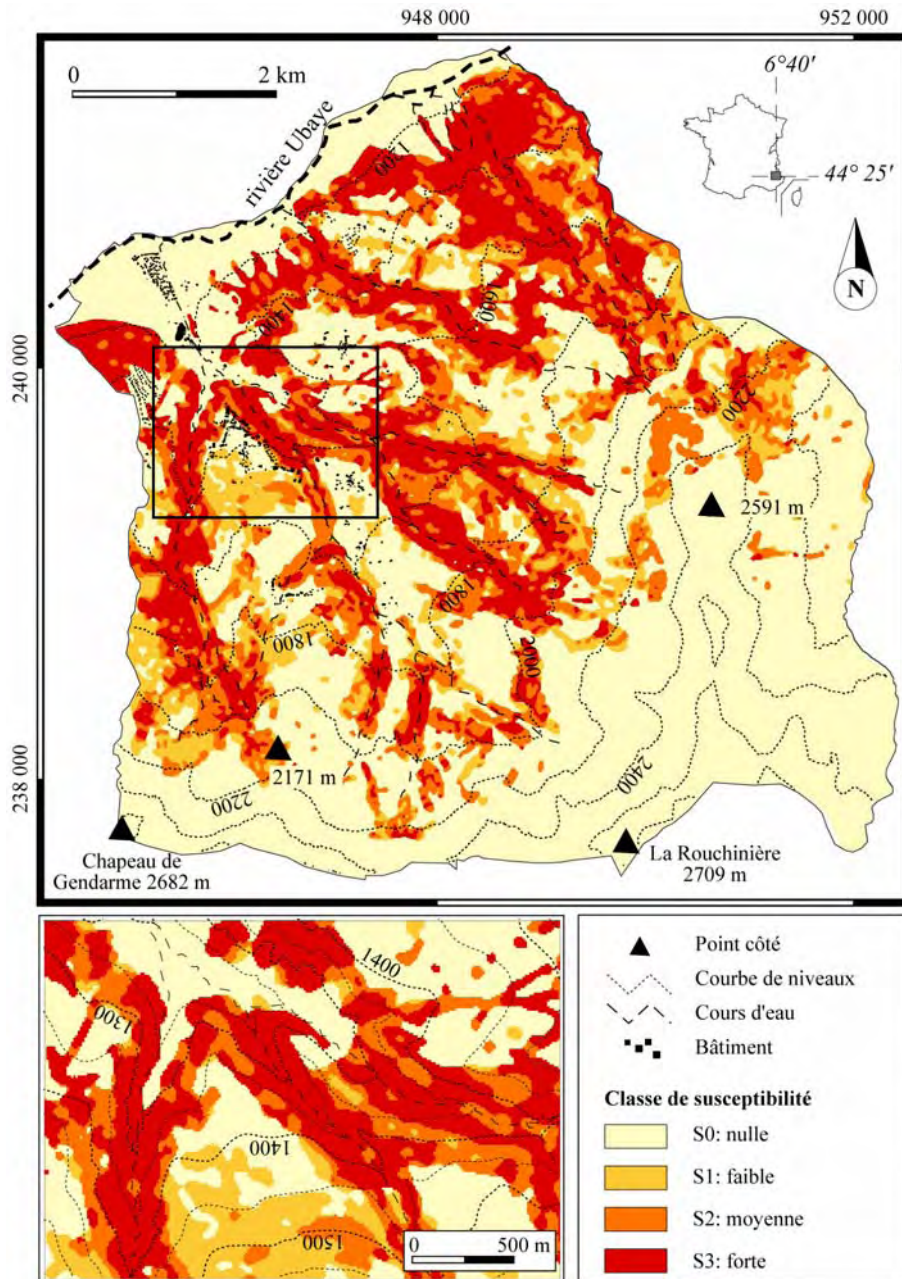


Figure 7. Carte simulée de la susceptibilité totale aux glissements de terrain obtenue par analyse spatiale bivariée (théorie de l'évidence). Exemple du territoire communal d'Enchastrayes.

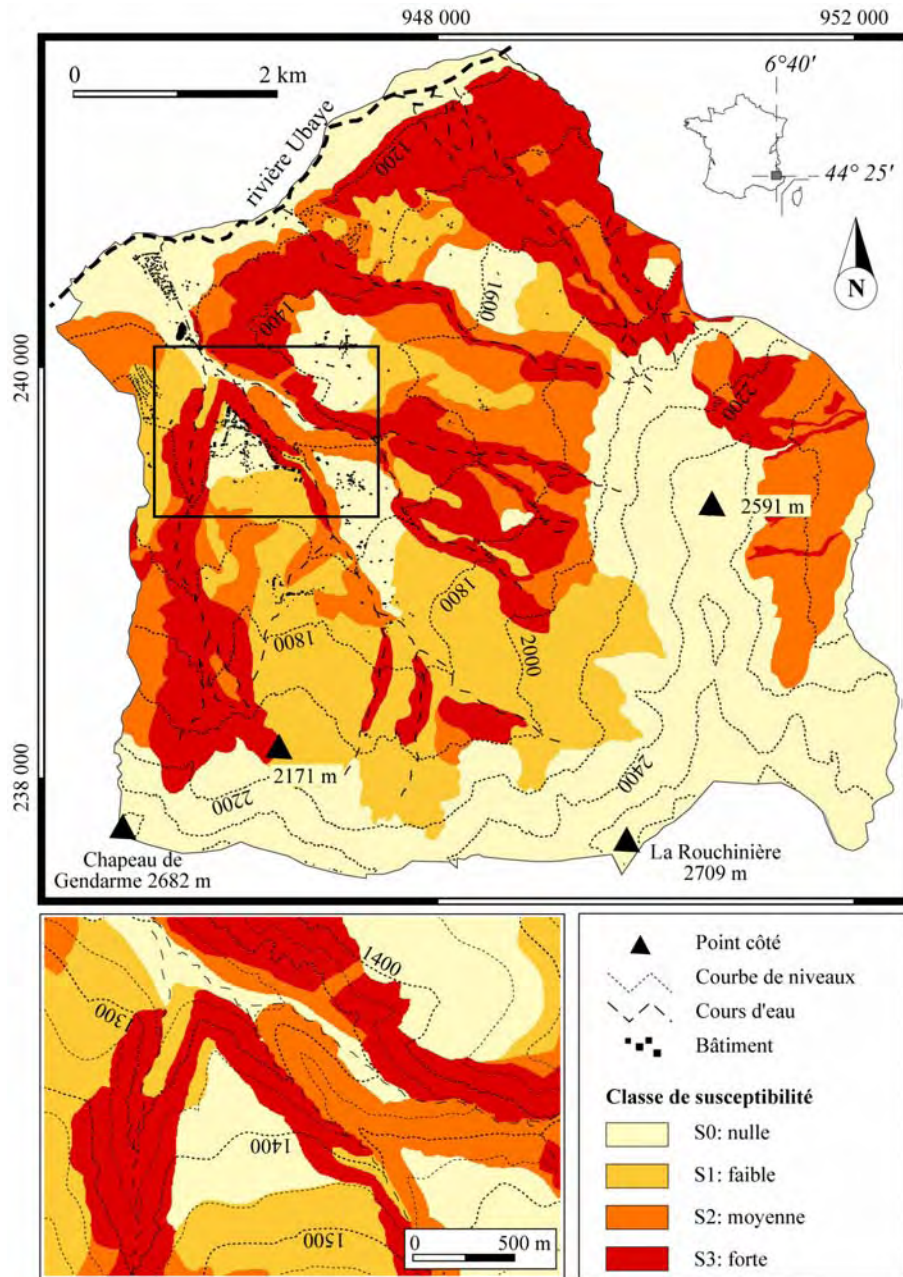


Figure 8. Carte expert de la susceptibilité aux glissements de terrain obtenue par la procédure du Guide Méthodologique 'Plan de Prévention des Risques Glissements de Terrain'. Exemple du territoire communal d'Enchastrayes.

5.3. Cartographie des conséquences potentielles

La figure 9 présente les cartes de potentiel de dommage obtenues pour la zone d'habitat du Sauze. La carte de dommage structurel et fonctionnel direct C_{SF} (9a) met en évidence les enjeux liés à l'emprise des pistes de ski, aux zones urbanisées et aux zones de culture ; la carte de dommage corporel direct C_C (9b) classe les bâtiments selon le nombre potentiel de victimes ; la carte de dommage fonctionnel indirect C_{FI} (9c) met en évidence les perturbations potentielles liées au réseau de communication et aux activités touristiques. La figure 10 présente la carte de potentiel de dommage total pour l'ensemble de la zone d'étude, ainsi que la courbe cumulée de la surface du territoire en fonction de la valeur de l'indice de dommage potentiel, dont les seuils permettent de fixer les limites des classes de conséquences. La carte identifie respectivement des aires de conséquences potentielles de 3.8 km², 4.9 km², 3.9 km² et 0.1 km² pour C1, C2, C3 et C4.

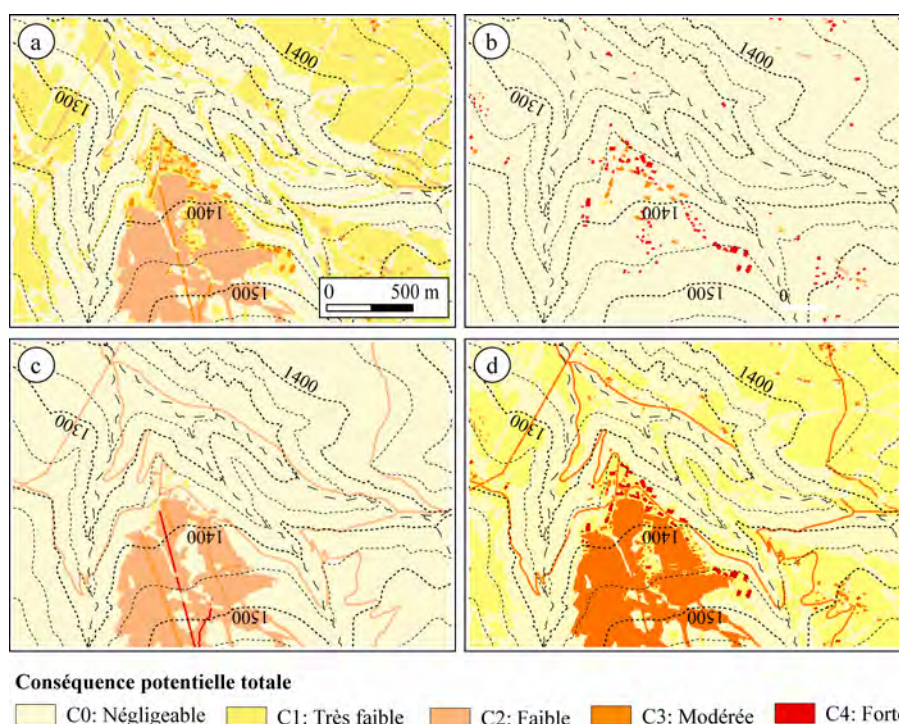


Figure 9. Exemple de cartes de potentiel de dommage structurel et fonctionnel direct C_{SF} (9a), de dommage corporel direct C_C (9b), de dommage fonctionnel indirect C_{FI} , (9c) et de dommage total C_T (9d) obtenue par une modèle d'analyse semi-empirique. Exemple de la zone d'habitat du Sauze sur le territoire communal d'Enchastrayes.

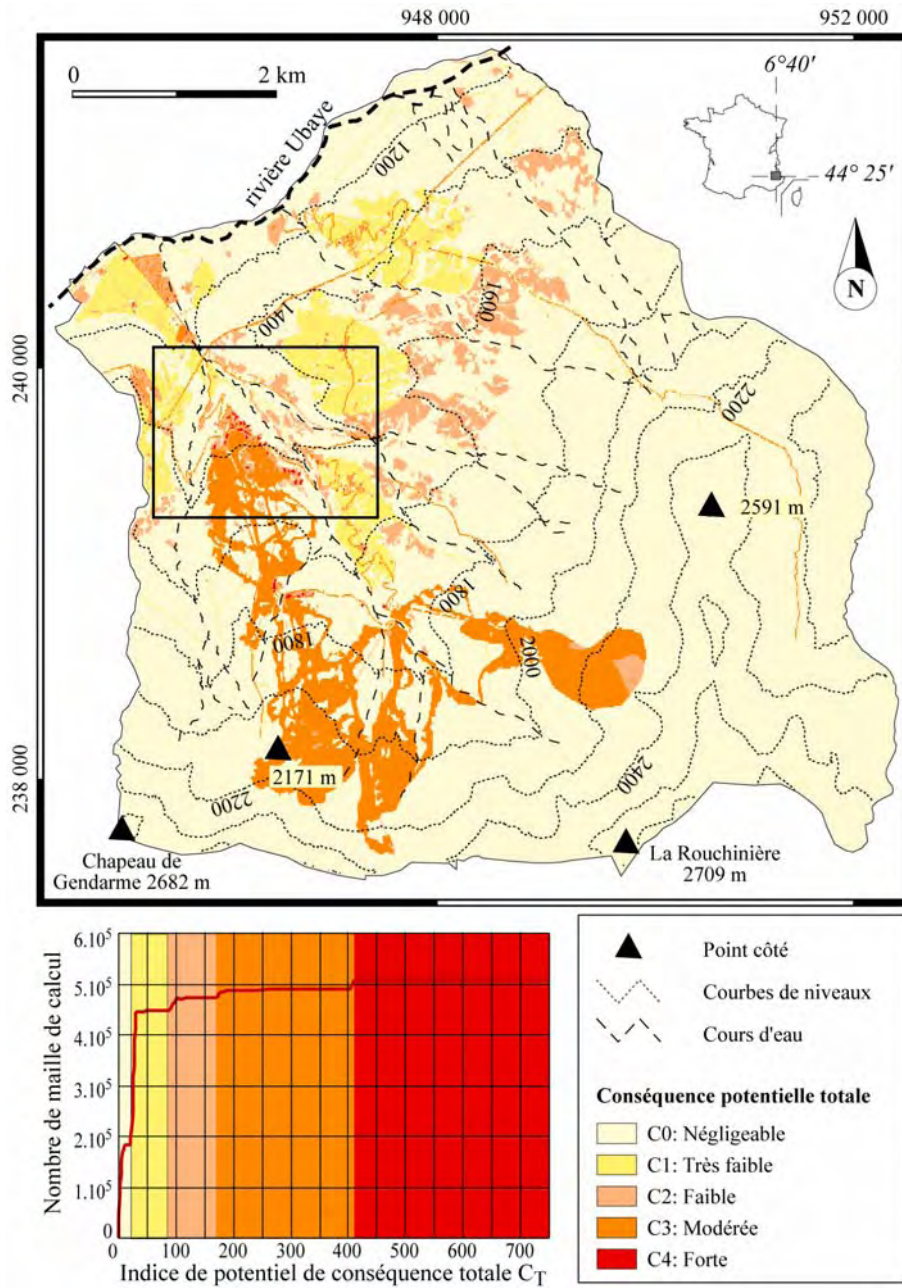


Figure 10. Carte simulée de potentiel de dommage total et principe de définition des cinq classes de conséquence. Exemple du territoire communal d'Enchastrayes.

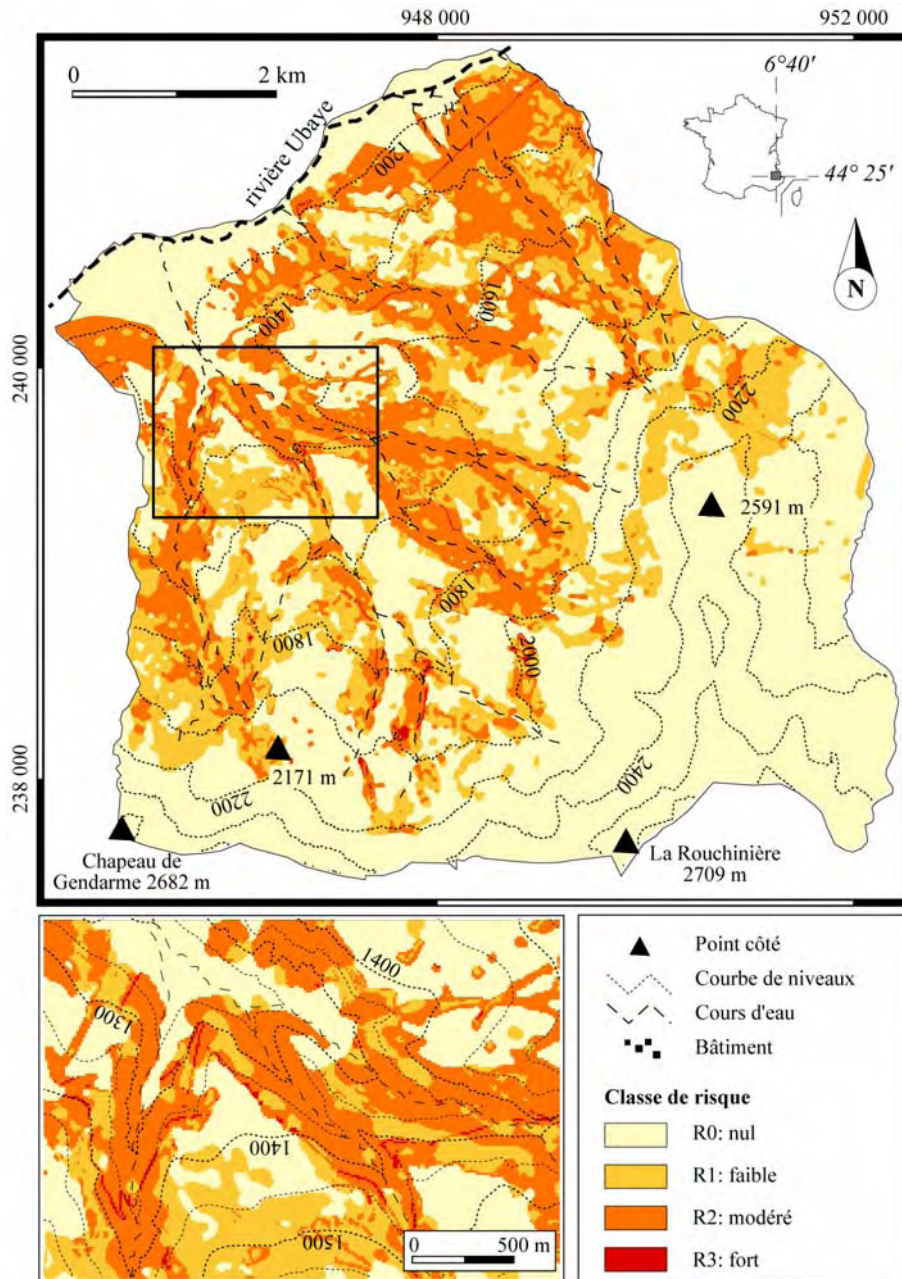


Figure 11. Carte simulée de risque total par combinaison des cartes de susceptibilité simulée et de conséquence potentielle totale. Exemple du territoire communal d'Enchastrayes.

5.4. 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 communal d'Enchastrayes (Fig. 11). 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). Ailleurs, en dehors de larges espaces à risque nul, le niveau de risque est faible à modéré (par exemple, versants aux pentes raides mais aux conséquences faibles à modérées).

6. Discussion et conclusion

Cette recherche démontre les potentialités des techniques d'analyse spatiale pour évaluer le risque « glissement de terrain » à grande échelle (1:10,000^e), échelle de travail correspondant à la cartographie réglementaire du risque en France. A partir d'une procédure en trois étapes, le risque est identifié et cartographié en associant plusieurs modèles d'analyse : (1) la susceptibilité des versants (composante spatiale de l'aléa) aux glissements de terrain est analysée par un modèle probabiliste bivarié ; (2) les conséquences potentielles sont estimées par l'identification des éléments à risques (enjeux) et de leurs valeurs dans un modèle d'analyse semi-empirique ; (3) le risque est évalué en combinant les cartes de susceptibilité et les cartes de conséquences.

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. Ainsi, 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 bivariée 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. Il convient également de vérifier les conditions de transposition et de généralisation des méthodes en les

validant sur des sites aux caractéristiques environnementales différentes et à différentes échelles, afin de définir leur reproductibilité. Enfin, dans une perspective d'aide à la décision pour la mise en place des politiques d'aménagement du territoire, les cartes prédictives doivent être accompagnées d'une mesure de leur incertitude.

Remerciements

Cette recherche a été financée par l'Union Européenne dans le cadre du programme de recherche *ALARM* (*Assessment of Landslide Risk and Mitigation in Mountainous Areas*), EVG1-2001-00018, 2002-2004, Coordinateur : S. Silvano (CNR-IRPI, Padoue, Italie). Les auteurs remercient S. Sterlacchini (Consiglio Nazionale delle Ricerche, Milano) pour ses remarques pertinentes sur les modèles d'analyse probabiliste. Contribution EOST- 2006-31-UMR7516.

7. Bibliographie

- Aleotti P., Chowdhury R., « Landslide hazard assessment: summary review and new perspectives », *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, vol. 58, 1999, p. 21-44.
- Bonham-Carter G.F., *Geographic Information System for geoscientists: modelling with GIS*, Pergamon Press, 1994.
- Bonnard C., Forlati F., Scavia C., (eds), *Identification and mitigation of large landslide risks in Europe : Advances in risk assessment, IMIRILAND Project*, Leiden, Balkema, 2004.
- Brunsdon D., 1995. « Learning to live with landslides: some British examples ». *Natural Risks and Civil Protection*, Oxon, E&FN Spon, p. 268-282.
- BUWAL/BWW/BRP, *Berücksichtigung der Massenbewegungsgefahren bei raumwirksamen Tätigkeiten*, Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL), Bundesamt für Wasserwirtschaft (BWR), Bundesamt für Raumplanung (BRP), Bern, 1997.
- Carrara A., Cardinali M., Guzzetti F., Reichenbach P., « GIS technology in mapping landslide hazard », In: Carrara A., Guzzetti F (eds.), *Geographical Information Systems in Assessing Natural Hazards*, 1995, p. 135-176.
- Colas, G., Locat, J., « Glissement et coulée de La Valette dans les Alpes de Haute-Provence. Présentation générale et modélisation de la coulée », *Bulletin de Liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, 187, 2003, p. 19-28.
- Cruden, D.M., Fell, R. (eds), *Landslide Risk Assessment*, Rotterdam, Balkema, 1997.
- Dikau R., Brunsdon D., Schrott L., Ibsen M.-L. (eds), *Landslide recognition: identification, movement and causes*, London, Wiley, 1996.
- Fell R., Ho K.K.S., Lacasse S., Leroi E., « 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., « Landslides and climatic conditions in the Barcelonnette and Vars Basins Southern French Alps, France », *Geomorphology*, vol. 30, 1999, p. 65-78.

- Glade T., « Vulnerability assessment in landslide risk analysis », *Die Erde*, vol. 134, 2003, p. 121-138.
- Glade T., Crozier M.J., « The nature of landslide hazard impact », *Landslide Hazard and Risk*, Chichester, Wiley, 2005, p. 43-74.
- Guzzetti F., Carrara A., Cardinali M., Reichenbach P., « Landslide hazard evaluation: a review of current techniques and their application in a multi-scale study, Central Italy », *Geomorphology*, vol. 31, 1999, p. 181-216.
- Kemp L.D., Bonham-Carter G.F., Raines G.L., Looney C.G., *Arc-SDM: ArcView extension for spatial data modelling using weights of evidence, logistic regression, fuzzy logic and neural network analysis*, 2001, <http://ntsर्व.gis.nrcan.gc.ca/sdm/>
- Ko Ko C., Flentje P., Chowdhury R., 2004, « Landslides qualitative hazard and risk assessment method and its reliability », *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, Vol. 63, n° 2, 2004, p. 149-165
- Léone F., Asté J.-P., Leroi E., « L'évaluation de la vulnérabilité aux mouvements de terrain : pour une meilleure quantification du risque », *Revue de Géographie Alpine*, vol. 1, 1996, p. 35-46.
- Leroi E., Bonnard C., Fell R., McInnes, R., « Risk assessment and management ». *Proceedings International Conference on Landslide Risk Management*, Leiden, Balkema, 2005, p. 159-198.
- Loat R., Zimmermann M., « La gestion des risques en Suisse », *Risques Naturels et Aménagement en Europe*, Paris, Armand Colin, 2004, p. 108-120.
- Malet J.-P., Laigle D., Rемаître A., Maquaire O. « Triggering conditions and mobility of debris-flows associated to complex earthflows ». *Geomorphology*, vol. 66, 1-4, 2005, p. 215-235.
- Malet, J.-P., « *Les glissements de type écoulement dans les marnes noires des Alpes du Sud. Morphologie, fonctionnement et modélisation hydro-mécanique* ». Thèse de Doctorat, Strasbourg, Université Louis Pasteur, 2003.
- Malet J.-P., Maquaire O., Puissant A., Weber C., « Building landslide consequence maps at a 1:10,000 scale: a tentative approach with a semi-empirical procedure ». *Landslides*, submitted in September 2005.
- Maquaire O., Malet J.-P., Rемаître A., Locat J., Klotz S., Guillon J., « Instability conditions of marly hillslopes: towards landsliding or gullying? The case of the Barcelonnette Basin, South-East France », *Engineering Geology*, vol. 70, n°1-2, 2003, p. 109-130.
- Maquaire O., Weber C., Thiery Y., Puissant A., Malet J.-P., Wania. A. « Current practices and assessment tools of landslide vulnerability in mountainous basins. Identification of exposed elements with a semi-automatic procedure », *Proceedings 9th International Symposium on Landslides*, Leiden, Balkema, 2004, p. 171-176.
- MATE/METL, *Plans de Prévention des Risques Naturels (PPR): Risques de Mouvements de Terrain*, Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement (MATE), Ministère de l'Équipement, des Transports et du Logement (METL), Paris, La Documentation Française, 1999.
- Panizza M., Corsini A., Marchetti M., Pasuto A., Silvano S., Soldati M. « Cartographie du risque de mouvements de terrain au Tyrol du Sud », *Risques Naturels et Aménagement en Europe*, Paris, Armand Colin, 2004, p. 131-142.

- Petrascheck A, Kienholz H., « Hazard assessment and mapping of mountain risks in Switzerland ». *Proceedings of the 3rd International Conference on Debris-Flow Hazards Mitigation*, Rotterdam, Millpress, 2003, p. 25-38.
- Raetzo H., Lateltin O., Bollinger D., Tripet J.P., « Hazard assessment in Switzerland – Codes of practice for mass movements », *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 61, 2002, p. 263-268.
- Sorriso-Valvo M., « Landslide risk assessment in Italy », *Landslide Hazard and Risk*, Chichester, Wiley, 2005, p. 699-732.
- Thiery Y., Malet J.P., Sterlacchini S., Puissant A., Maquaire O., « 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, 2005, p.227-245.
- Thiery Y, Malet J.-P., Sterlacchini S., Puissant A., Maquaire O., « Strategy to reduce subjectivity in landslide susceptibility zonation by GIS in complex mountainous environment », *Computers and Geosciences* (soumis).
- UNDP/BCPR, *Reducing disaster risk. A challenge for development*, New York, UNDP/Bureau for Crisis Prevention and Recovery, 2004.
- UNDRO, *Natural Disasters and Vulnerability Analysis*, Geneva, UNDRO, 1979.
- van Westen C.J., « The modelling of landslide hazard using GIS », *Surveys in Geophysics*, vol. 21, 2000, p. 241-255.
- van Westen, C.J., « Geo-Information tools for landslide risk assessment: an overview of recent developments », *Proceedings 9th International Symposium on Landslides*, Leiden, Balkema, 2004, p. 39-56.
- Wesseling C.G., Karssenber D., van Deursen W., Burrough, P.A., « Integrating dynamic environmental models in GIS: the development of a Dynamic Modelling Language ». *Transactions in GIS*, vol. 1, 1996, p. 40-48.