

# Analyse spatiale de la susceptibilité des versants aux glissements de terrain

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

▶ **To cite this version:**

Yannick Thiery, Jean-Philippe Malet, Simone Sterlacchini, Anne Puissant, Olivier Maquaire. Analyse spatiale de la susceptibilité des versants aux glissements de terrain. Revue Internationale de Géomatique, 2005, 15 (2), pp.227-245. 10.3166/rig.15.227-245 . hal-00276824

**HAL Id: hal-00276824**
**https://hal.science/hal-00276824**

Submitted on 2 May 2008

**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 de la susceptibilité des versants aux glissements de terrain.

## Comparaison de deux approches spatialisées par SIG.

**Yannick Thiery*,***** — Jean-Philippe Malet*,****
**Simone Sterlacchini*** — Anne Puissant******
**Olivier Maquaire*,*****

** Institut de Physique du Globe, UMR 7516 ULP/CNRS, 5 rue Descartes, F-67084 Strasbourg Cedex, France.yannick.thiery@eost.u-strasbg.fr*
*** Faculty of Geosciences, UCEL, University of Utrecht, P.O. Box 80115, 3508 TC Utrecht, The Netherlands*
**** CNR-IDPA, Sezione de Milano, Piazza della Scienza 1, I-20126 Milano, Italy.*
***** Geosyscom, Géographie des Systèmes de Communication, FRE 2795 CNRS, University of Caen- Basse Normandie, Esplanade de la Paix, F-14032 Caen Cedex*
****** Géographie Physique et Environnement, LETG-Geophen, UMR 6554 CNRS, University of Caen-Basse Normandie, Esplanade de la Paix, BP 5183, F-14032 Caen Cedex*

RÉSUMÉ. *Les techniques d'analyse spatialisée par SIG sont de plus en plus utilisées pour évaluer la susceptibilité des versants aux glissements de terrain. Parmi ces méthodes l'analyse bivariée par théorie de l'évidence est considérée comme la plus robuste. Cependant, l'inconvénient principal de cette technique est le problème de redondance d'information entre variables prédictives. L'analyse bivariée par régression logistique, assez peu utilisée actuellement, donne des résultats prometteurs dans ce domaine sans nécessiter un travail d'évaluation préalable des données. Par une analyse de sensibilité sur les variables prédictives, cet article présente une comparaison de ces deux méthodes pour obtenir des cartes de susceptibilité réalistes et statistiquement acceptables pour une échelle du 1 /10 000$^{e}$ dans un environnement montagneux complexe.*

ABSTRACT. *GIS are more and more used to evaluate landslide susceptibility. Among the different methods generally used, bivariate analyses are considered as the more robust techniques, particularly the Weight of Evidence technique. However, one major drawback of this technique is the problem of information redundancy between predictive variables. Conversely, the logistic regression method does not need this assumption. This paper presents a strategy to obtain accurate landslide susceptibility zonation without statistical problem, at the 1:10 000 scale for complex mountainous environments.*

MOTS-CLÉS : *susceptibilité, glissements de terrain, analyse bivariée, régression logistique, SIG.*

KEYWORDS: *susceptibility, landslides, bivariate analysis, logistic regression, GIS.*

Géomatique – 15/2005. Cassini'04, pages 227 à 245

## 1. Introduction

Pour la cartographie du risque « glissements de terrain », il est nécessaire d'évaluer le niveau d'aléa et les enjeux humains ou la vulnérabilité des éléments exposés (MATE/METL, 1999). Un aléa est défini par une intensité, une probabilité d'occurrence spatiale et temporelle qui dépendent de facteurs de prédisposition et de facteurs déclenchants (Cruden et Varnes, 1996). Evaluer l'aléa nécessite au préalable d'apprécier la susceptibilité des terrains à un type de glissement, c'est à dire la possibilité qu'un glissement se produise sur un territoire pour différentes conditions environnementales locales. Cela revient à répondre à trois questions : quel type de glissement de terrain est susceptible de se produire ? quels sont les facteurs de prédisposition ? où ces facteurs sont-ils spatialement réunis ?

La probabilité d'occurrence spatiale est ainsi conditionnée par des facteurs de prédisposition (variables prédictives) comme par exemple la topographie (gradient de pente, aspect, orientation), la géologie (lithologie, structure), et l'occupation des sols. La démarche consiste donc à évaluer la probabilité de rupture des terrains à partir de ces variables prédictives et de phénomènes passés, sans tenir compte de leur occurrence temporelle. Les cartes de susceptibilité peuvent être obtenues par une approche directe (ou qualitative) ou une approche indirecte (fondée sur des modèles spatiaux statistiques).

L'approche indirecte est de plus en plus utilisée dans l'évaluation de la susceptibilité des versants aux glissements de terrain. En effet, ce type d'approche, qui évite l'avis subjectif de l'expert, permet d'obtenir à court terme des cartes fiables et réalistes. Plusieurs techniques d'analyse peuvent être appliquées (bivariées, multivariées ; Chowdhury *et al.*, 1999).

Cet article présente une comparaison de deux modèles statistiques spatialisés d'évaluation de la susceptibilité des versants aux glissements de terrain. La première technique, par analyse bivariée, est considérée comme robuste et fiable mais nécessite au préalable un travail sur la redondance d'information. La deuxième, par régression logistique, plus souple à mettre en place, est actuellement peu utilisée pour ces recherches. Les cartes obtenues sont évaluées statistiquement, puis comparées à une carte d'inventaire acquise par une démarche géomorphologique. Ces différents tests permettent d'évaluer les performances de chacune des deux techniques. Le site d'étude est localisé dans les Alpes du Sud, à proximité de la ville de Barcelonnette (Alpes-de-Haute-Provence, France).

## 2. Les modèles statistiques spatialisés d'évaluation de la susceptibilité

Deux approches d'évaluation de la susceptibilité des versants, fondées sur l'outil SIG pour combiner différents facteurs de prédisposition, sont utilisées (Soeters et Van Westen, 1996 ; Guzzetti *et al.*, 1999).

### 2.1. *L'approche directe*

L'approche directe (ou qualitative) privilégie la connaissance experte des phénomènes. Ce type d'analyse peut donner des résultats très différents selon l'expert (Van Westen, 2000). Deux méthodes sont couramment utilisées :

- la méthode expert, dans laquelle le scientifique évalue intuitivement les relations 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 Dangers* (BUWAL/BWW/BRP, 1997) ;

- la méthode de combinaison qualitative indexée, dans laquelle le scientifique hiérarchise chaque classe de facteurs de prédisposition suivant sa connaissance avant de les pondérer et de les combiner (Wachal et Hudak, 2000).

### 2.2. *L'approche indirecte*

L'approche indirecte (ou quantitative) est fondée sur des règles de calcul statistiques et sur le concept d'unités homogènes (Carrara *et al.*, 1995 ; Aleotti et Chowdhury, 1999). Ces méthodes permettent de limiter le problème associé à la subjectivité de l'expert (Soeters et Van Westen, 1996). Le principe consiste à définir des relations mathématiques entre les facteurs de prédisposition (variable predictive, *Vp*) et l'occurrence spatiale de glissements de terrain (variable dépendante, *Vd*) afin d'évaluer quantitativement la probabilité de rupture pour des régions non affectées par des glissements de terrain. Utiliser ces méthodes suppose trois hypothèses : (1) les glissements de terrain potentiels se déclencheront selon les mêmes conditions que dans le passé, (2) l'ensemble des facteurs de prédisposition sont connus a priori et introduits dans l'analyse, (3) l'ensemble des glissements de terrain sont inventoriés sur l'aire d'étude.

Les méthodes d'analyses peuvent être bivariées ou multivariées (Carrara *et al.*, 1995). Pour obtenir de bons résultats, ces dernières nécessitent un nombre exhaustif de variables prédictives, ce qui implique des efforts démesurés de collecte de données (Soeters et Van Westen, 1996). L'avantage des procédures bivariées réside alors dans la détermination d'une combinaison optimale de variables indépendantes (hypothèse d'indépendance conditionnelle, IC). Parmi les analyses bivariées, deux méthodes déjà testées sur d'autres sites d'études (Van Westen *et al.*, 2003 ; Süzen et Doyuran, 2004a) ont été sélectionnées :

- l'analyse bivariée par théorie de l'évidence (Bonham-Carter, 1994 ; Van Westen *et al.*, 2003) où chaque classe de facteurs de prédisposition est combinée avec une carte d'inventaire des glissements de terrain, puis pondérée par la densité de glissements de terrain dans la région considérée. Les probabilités pour chaque classe de facteurs sont additionnées une à une. Le calcul final attribue

plusieurs probabilités par combinaison de classes. L'analyse bivariée par la théorie de l'évidence est statistiquement la technique la plus robuste (Van Westen, 2004).

- l'analyse bivariée par régression logistique, qui permet de prédire l'effet d'un ou plusieurs facteurs de prédisposition sur la présence/absence de glissement de terrain. Elle permet de modéliser la probabilité pour qu'un événement survienne pour différentes valeurs d'un ensemble de variables descriptives quantitatives et/ou qualitatives (Dai *et al*. 2001 ; Süzen et Doyuran, 2004a, 2004b). L'analyse bivariée par régression logistique est plus souple à mettre en œuvre car elle ne suppose pas une hypothèse d'indépendance conditionnelle (Agterberg *et al*., 1989), ce qui peut réduire considérablement le temps d'analyse en amont.

Les deux modèles statistiques sont introduits dans le SIG ArcView 3.2® (extension ArcSDM ; Kemp *et al*., 2001).

## 3. Principes et méthodologie

### 3.1. *Principes de l'analyse spatiale bivariée par la théorie de l'évidence*

L'analyse spatiale bivariée par la théorie de l'évidence, déjà appliquée en médecine (Spiegelhater et Kill-Jones, 1984) et en géologie (Bonham-Carter, 1994), est une version log-linéaire du théorème général de Bayes utilisant les principes de calcul de probabilité fondés sur les notions de probabilité a priori et de probabilité a posteriori. La probabilité a priori, qui est la probabilité qu'une unité de terrain (un pixel) contienne une variable dépendante (*Vd*, dans notre cas les glissements de terrain), est calculée suivant la densité sur la zone d'étude. La probabilité a posteriori est estimée après le calcul de la probabilité a priori selon la densité de *Vd* pour chaque variable considérée comme prédictive (*Vp*, dans notre cas chaque facteur de prédisposition). La méthode est fondée sur le calcul d'un poids positif ($W_+$ ; [1]) et d'un poids négatif ($W_-$ ; [2]), dont les valeurs dépendent de l'association entre *Vp* et *Vd*.

$$W_+ = \ln \frac{P(B|Vd)}{P(B|\bar{Vd})} \qquad [1]$$

$$W_- = \ln \frac{P(\bar{B}|Vd)}{P(\bar{B}|\bar{Vd})} \qquad [2]$$

Dans les équations [1] et [2], *B* est la classe de *Vp* et le symbole « ⁻ » représente l'absence de *Vp* et/ou de *Vd*. Le ratio représente la probabilité de présence sur la probabilité d'absence d'un phénomène. Les pondérations sont additionnées en utilisant le logarithme naturel des ratios appelé logit. Les calculs des valeurs de $W_+$

et de $W_-$ pour toutes les *Vp* permettent de calculer la probabilité a posteriori, qui actualise la probabilité a priori. Lorsque plusieurs *Vp* sont combinées, les zones qui ont un poids respectivement élevé ou faible correspondent respectivement à une plus grande ou une plus petite probabilité de présence de *Vd*.

### 3.2. *Principes de l'analyse spatiale par régression logistique*

L'analyse spatiale bivariée par régression logistique est un modèle non-linéaire, fondée sur une fonction de répartition sigmoïdale entre la probabilité de présence d'un glissement de terrain (*Vd*) et différents facteurs de prédisposition (*Vd*, Kleinbaum, 1994). Le modèle logistique pour la présence ou l'absence de glissements de terrain est défini par :

$$Pr\ (Vd) = \frac{1}{1+e^{-z}} \qquad [3]$$

où Pr (*Vd*) est la probabilité que la variable dépendante soit présente et *Z* est une combinaison linéaire de *Vp*. Comme *Z* varie de -∞ à +∞, le codage de la probabilité varie de 1 à 0, et la probabilité de présence de *Vd* correspond à son espérance conditionnelle. Comme pour l'analyse bivariée par théorie de l'évidence, lorsque plusieurs *Vp* sont combinées, les zones qui ont un poids respectivement élevé ou faible correspondent respectivement à une plus grande ou une plus petite probabilité de présence de *Vd*.

## 4. Site d'étude et stratégie de modélisation

### 4.1 *Présentation du site d'étude : le versant ubac du Bassin de Barcelonnette*

Le site d'étude est localisé dans le Bassin de Barcelonnette (Alpes-de-Haute-Provence, France) sur le versant ubac (Figure 1), et présente une superficie d'environ 100 $km^2$, entre 1100 m et 3000 m d'altitude. Deux unités litho-géomorphologiques sont séparées par une faille de direction nord-sud : à l'est, les versants sont caractérisés par l'affleurement de flyschs du Sénonien ; à l'ouest, les versants sont dominés par des marnes noires du Callovo-Oxfordien. Les versants de l'unité est, aux pentes fortes (30°-70°), sont complètement dénudés. A l'inverse, les versants de l'unité ouest, aux pentes plus douces (8°-30°), sont recouverts de dépôts morainiques d'épaisseur variable (2 m-15 m). Ces versants présentent soit une végétation arborée formée majoritairement de conifères, soit une végétation herbacée laissant entrevoir une morphologie bosselée héritée des différentes phases de déglaciation du Quaternaire, ou des ravinements en bad-lands. Les versants intermédiaires, aux pentes douces et régulières, sont souvent cultivés.

Dans l'unité est, la structure des flyschs ainsi que les pentes locales fortes favorisent les écroulements rocheux. Dans l'unité ouest, la plupart des glissements de terrain actifs sont situés à proximité des axes de drainage, ou sur des pentes comprises entre 8° et 36° où la superposition marnes noires/dépôts morainiques favorise les instabilités. La dynamique et la fréquence temporelle des ces mouvements sont étudiées depuis une dizaine d'années par plusieurs équipes de recherche (Flageollet *et al.*, 1999 ; Maquaire *et al.*, 2003).

### 4.2. *Stratégie de modélisation*

La stratégie pour évaluer la susceptibilité des versants aux glissements de terrain se divise en quatre phases : (1) collecte et mise en forme des données ; (2) définition de la meilleure combinaison de variables prédictives ; (3) calage des modèles ; (4) validation statistique et experte.

#### 4.2.1. *Collecte et mise en forme des données*

Les données indispensables pour effectuer des cartes de susceptibilités sont regroupées en cinq groupes (Soeters et Van Westen, 1996, Tableau 1) : un inventaire géomorphologique des glissements de terrain, la topographie (gradient de pente, aspect, orientation), la géologie et les formations superficielles, l'occupation du sol et l'hydrographie.

| Catégorie de variables | Variables prédictives | Source |
|---|---|---|
| Géomorphologie | 1. Glissement de terrain | Ortho-photoplans, observations, cartes topographiques, cartes morphologiques |
| Topographie | 2. Gradient de pente (PEN)<br>3. Exposition (EXP)<br>4. Aspect (ASP) | BDAlti®, MNT issu d'une digitalisation de courbes de niveaux de cartes topographiques au 1/10 000[è] |
| Géologie | 5. Lithologie (LIT)<br>6. Formations superficielles (FS) | Carte géologique, observations, ortho-photoplans, rapports techniques |
| Occupation du sol | 7. Occupation du sol (OC) | Images satellites, observations |
| Hydrologie | 8. Réseau hydrographique (HYD) | MNT, cartes topographiques |

**Tableau 1.** *Variables prédictives retenues pour élaborer les cartes de susceptibilité*

Ces données sont construites à partir de bases de données existantes, de la digitalisation d'informations issues de photographies aériennes ou d'images satellites, d'interprétation de documents, et d'observations de terrain. Les données sont spatialisées grâce à l'outil SIG ; les cartes de variables sont au format raster, avec une maille carrée de 10m.

4.2.1.1 Inventaire géomorphologique des glissements de terrain

Cinq types de glissements de terrain ont été cartographiés au 1/10 000$^{e}$ à partir de l'analyse de photographies aériennes. La localisation de chaque glissement de terrain a été contrôlée sur le terrain. Trois cent cinquante glissements de terrain actifs ont été répertoriés sur la zone d'étude. Dans ce travail, seuls 230 glissements rotationels et translationels (71% du nombre total de glissement actifs de la zone, Figure 1) ont été retenus. La surface moyenne d'un glissement est de 0.01 km$^2$ et 70% des glissements de terrain retenus ont une surface inférieure ou égale à 0.0003 km$^2$.

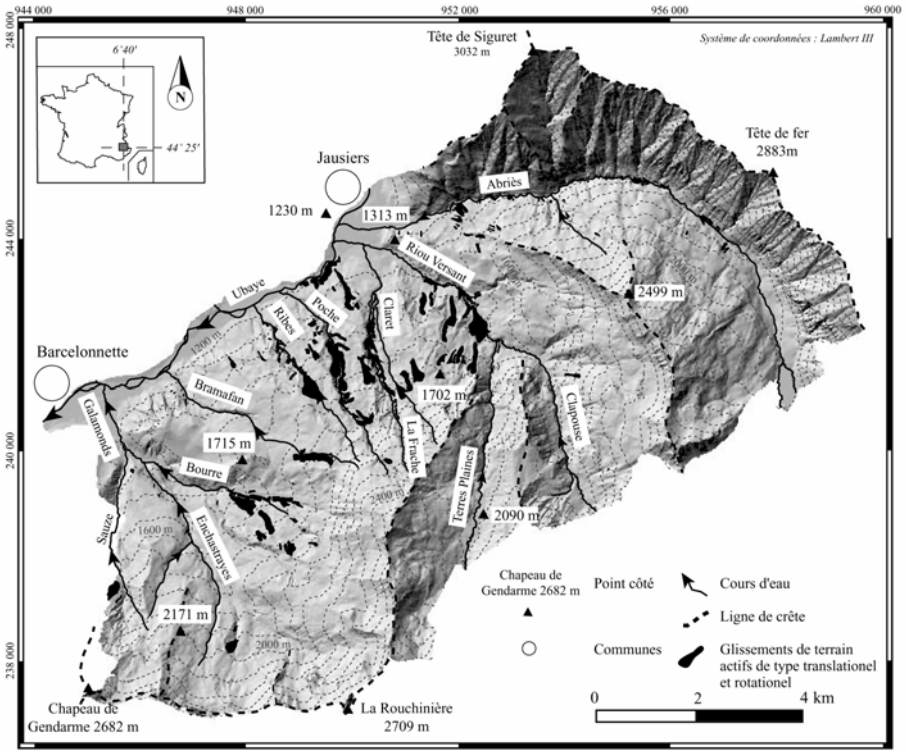



**Figure 1.** *Inventaire géomorphologique des glissements de terrain actifs de la zone d'étude*

4.2.1.2 Données topographiques

Les paramètres géométriques des versants sont dérivés d'un modèle numérique de terrain issu de la digitalisation de courbes de niveau de cartes topographiques au 1/10 000$^{e}$ et d'une interpolation par krigeage. Trois paramètres géométriques sont utilisés dans le modèle : le gradient de pente (Figure 2), l'exposition et l'aspect concave/convexe des versants.

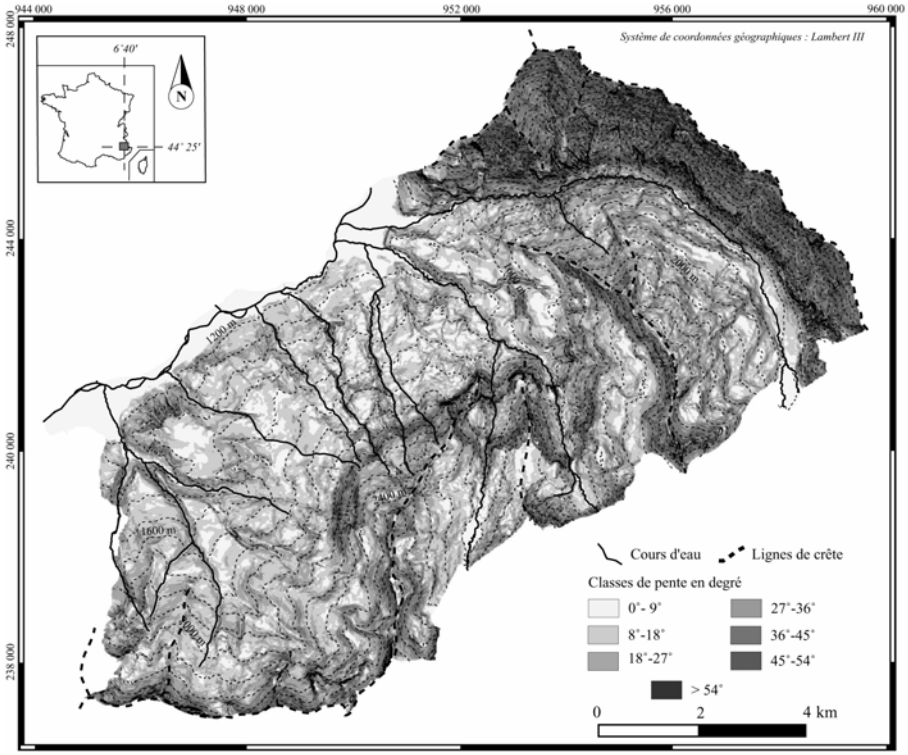



**Figure 2.** *Carte des gradients de pente de la zone d'étude*

4.2.1.3 Données géologiques

Les variables prédictives relatives à la géologie sont la lithologie et les formations superficielles. Les principales unités lithologiques de la zone d'étude ont été digitalisées à partir d'une carte géologique au 1/50 000$^{ème}$, complétée par des observations de terrain. La classification des formations superficielles (Figure 3) est celle proposée comme standard par Van Westen (1993) pour un ensemble de bassin-versants type ; elle repose sur la segmentation du paysage en zones géomorphologiques, associant étroitement faciès et forme.

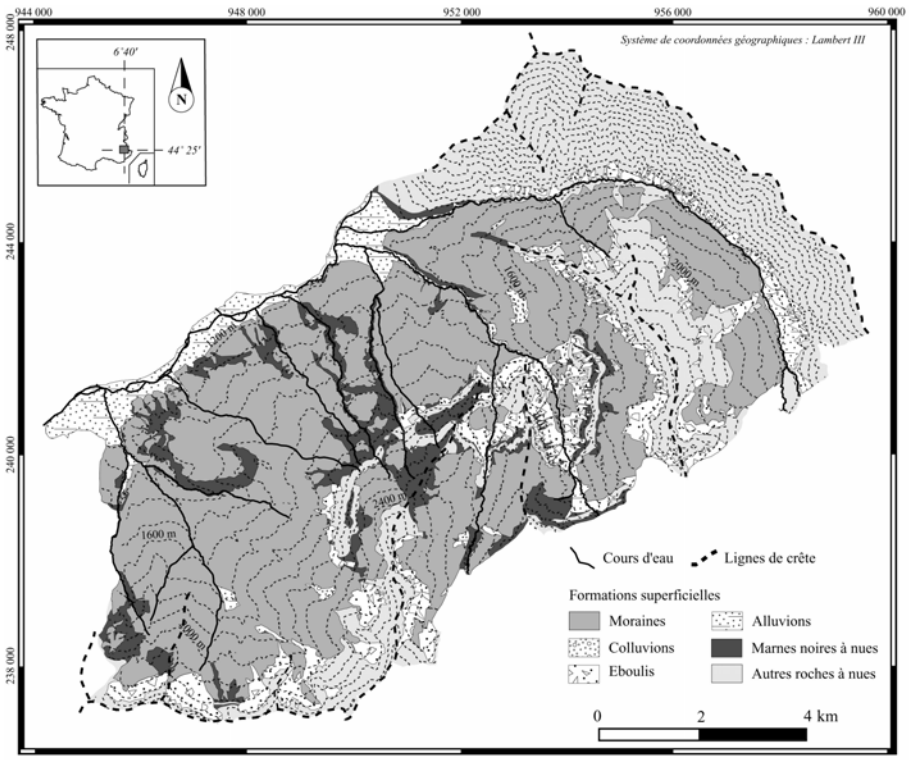



**Figure 3**. *Carte des formations superficielles de la zone d'étude*

4.2.1.4 Données d'occupation du sol

La carte d'occupation du sol est issue du traitement d'images satellites SPOT XS et Landsat ETM+, complété par des observations de terrain. Les limites de classes ont été corrigées de manière experte afin de respecter l'échelle d'étude du 1/10 000$^{e}$.

4.2.1.5 Données hydrographiques

Certains mécanismes de glissements de terrain correspondent à l'action érosive (sapement de berges) des cours d'eau. Plusieurs zones tampons hydrographiques ont ainsi été construites après une analyse statistique de la répartition des glissements de terrain proches des torrents.

4.2.2. *Définition de la meilleure combinaison de variables prédictives*

La meilleure combinaison de variables prédictives est définie par un test d'indépendance conditionnelle, de type $\chi^2$. Il permet d'évaluer le degré d'indépendance entre chaque variable prédictive pour un seuil de signification

$\alpha = 0.05$ (Bonham-Carter, 1994). La méthodologie d'évaluation, détaillée dans Thiery *et al.* (soumis), n'est pas reprise ici.

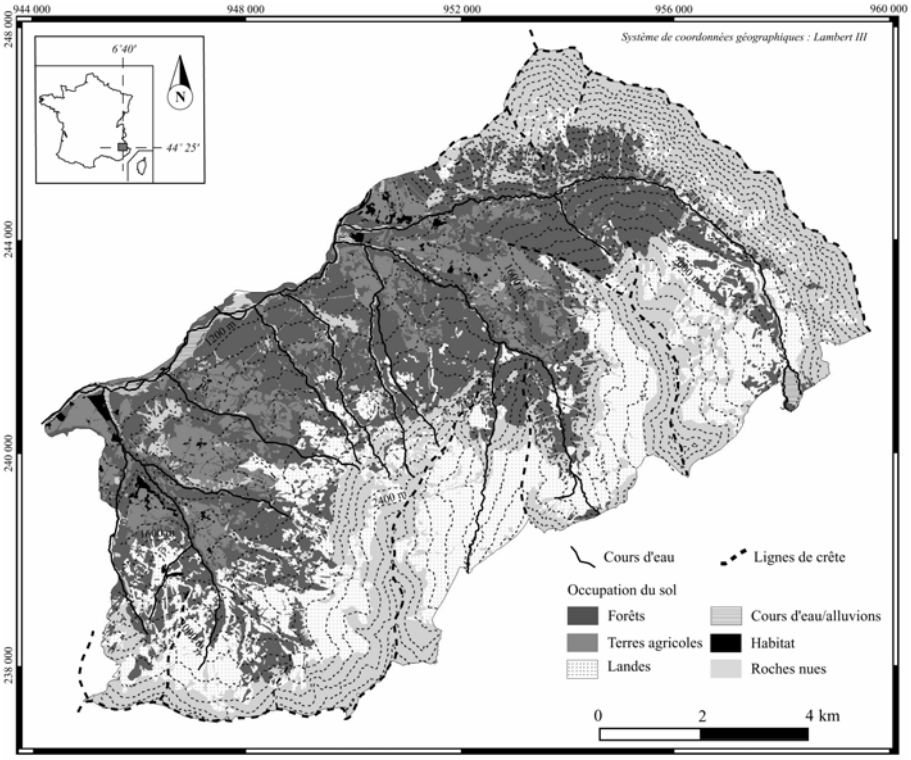



**Figure 4.** *Carte de l'occupation du sol de la zone d'étude*

4.2.3. *Calage et validation des modèles*

La calage des modèles a été effectué en ne retenant initialement que 50% de la population totale de *Vd* (présence/absence de glissements de terrain) pour la meilleure combinaison de *Vp*. Les résultats sont analysés à partir d'une courbe prédictive représentant l'aire cumulée en fonction de la probabilité, sur laquelle des sauts permettent d'identifier trois classes de susceptibilité (faible, moyenne, forte).

La performance des modèles est évaluée en calculant l'erreur relative [4] de chaque simulation :

$$\xi = \frac{Vd_{obs} - Vd_{mod}}{Vd_{obs}} \qquad [4]$$

où ξ est l'erreur relative, $Vd_{obs}$ est la surface observée (nombre de pixels de la zone de déclenchement des glissements de terrain) et $Vd_{mod}$ est la surface modélisée (nombre de pixels de glissements de terrains, en ne retenant que la classe de susceptibilité forte).

La validation des modèles s'effectue d'un point de vue statistique et d'un point de vue expert. Pour la validation statistique, la même procédure que pour le calage est utilisée, en introduisant les 50% restants de la population totale de *Vd*. Pour la validation experte, les résultats des modèles en terme de surface de glissements de terrain modélisés sont comparés à l'inventaire géomorphologique.

## 5. Résultats

### 5.1. *Calage des modèles et influence des variables prédictives*

Pour la phase de calage, 50% de la population totale des glissements de terrain sont introduits dans le modèle, à partir d'un tirage aléatoire. Puis, selon le protocole défini par Thiery *et al.* (soumis), chaque variable prédictive est ajoutée une à une pour observer son influence sur les simulations.

Plusieurs tests indiquent que les meilleures simulations sont obtenues en combinant de manière hiérarchique (Figure 5) le gradient de pente (PEN), les formations superficielles (FS), l'occupation du sol (OC), l'aspect concave/convexe des pentes (ASP), et l'exposition des pentes (EXP).

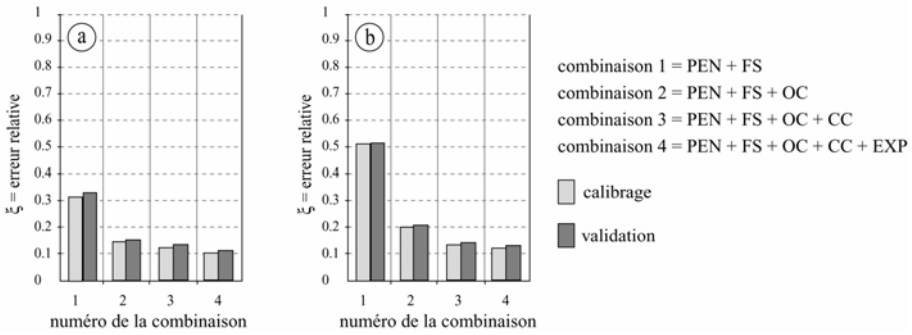



**Figure 5.** *Erreur relative associée à chaque combinaison de variables prédictives, pour l'analyse bivariée par (a) théorie de l'évidence, (b) régression logistique*

Une combinaison de deux *Vp* (PEN, FS) produit une erreur relative sur les surfaces modélisées comprises entre 32% et 51% (Figure 5). L'ajout des *Vp* OC, ASP et EXP permet un gain proche de 20% pour la théorie de l'évidence, et de 40%

pour la régression logistique. Pour la meilleure combinaison, l'erreur relative atteint 11% pour la théorie de l'évidence, et 12% pour la régression logistique.

Thiery *et al.* (soumis) indiquent que pour les glissements de terrain de la zone d'étude, la *Vp* OC (occupation du sol) est la plus performante pour améliorer la capacité prédictive des modèles, à condition de disposer d'une carte d'occupation du sol précise pour l'échelle considérée (1/10 000e). Celle-ci est le plus souvent dérivée d'un traitement spécifique d'images satellites multi-dates, complété par l'analyse de photographies aériennes. Les *Vp* ASP (aspect) et EXP (exposition) permettent également un gain appréciable, à condition de disposer d'un modèle numérique de terrain suffisamment précis pour l'échelle de travail choisie. Des pré-tests effectués sur les données dérivées de la BD ALTIi® IGN indiquent que cette base de données commerciale n'est pas suffisamment précise pour ce type d'étude (Thiery *et al.*, 2003). Un travail fastidieux d'amélioration du MNT par l'introduction de données ancillaires (digitalisation de courbes de niveaux, points GPS, etc), et de vérification de sa qualité intrinsèque, sont nécessaires (Dai *et al.*, 2000). Enfin, pour les glissements de terrain du site d'étude, la lithologie (LIT) et l'hydrographie (HYD) apportent peu d'informations sur la localisation spatiale.

## 5.2. *Validation statistique et experte des modèles*

### 5.2.1 *Validation statistique*

Pour la phase de validation statistique, les 50% restants de la population totale de glissement de terrains observés sont introduits dans la simulation. Les erreurs relatives obtenues avec ce deuxième jeu de *Vd* sont très proches de celles obtenues avec le jeu de *Vd* de la phase de calage, quelle que soit la combinaison de *Vp* (Figure 5).

| **Analyse bivariée** | ***par théorie de l'évidence*** | | | |
|---|---|---|---|---|
| ***par régression logistique*** | *Susceptibilité* | *Faible* | *Moyenne* | *Forte* |
| | *Faible* | 1.45 | 0.12 | 0.004 |
| | *Moyenne* | 2.55 | 3.90 | 0.20 |
| | *Forte* | 0.30 | 2.10 | 8.10 |

**Tableau 2**. *Aires communes ($km^2$) identifiées par les deux modèles spatiaux pour les trois classes de susceptibilité (avec la meilleure combinaison de Vp)*

Les deux modèles semblent ainsi performants pour identifier les aires susceptibles des glissements de terrain introduits dans les simulations. L'analyse bivariée, respectivement, par théorie de l'évidence et par régression logistique,

prédit, respectivement des aires de 8.4 km$^2$ et 10.8 km$^2$ pour la classe de susceptibilité forte, 6.7 km$^2$ et 7.2 km$^2$ pour la classe de susceptibilité moyenne, et 5.3 km$^2$ et 5.7 km$^2$ pour la classe de susceptibilité faible (Figures 6 et 7).

Si ces valeurs globales sont comparables, l'observation des cartes de résultats indiquent que la prédiction des localisations spatiales par les deux modèles sont différentes.

### 5.2.2 *Validation experte et comparaisons des résultats spatiaux des modèles*

Les cartes obtenues sont comparées en trois phases. La première consiste à comparer les surfaces communes de susceptibilité (faible, moyenne, forte) obtenues pour les deux meilleures combinaisons de *Vp* pour les deux modèles statistiques spatiaux (Tableau 2) ; la deuxième, à comparer les localisations modélisées des aires de la classe de susceptibilité forte pour les deux modèles (Figure 8) ; la troisième, à comparer les résultats de la meilleure simulation pour la classe de susceptibilité forte à l'inventaire géomorphologique des glissements de terrain (surface observée des glissements de terrain, Figure 9).

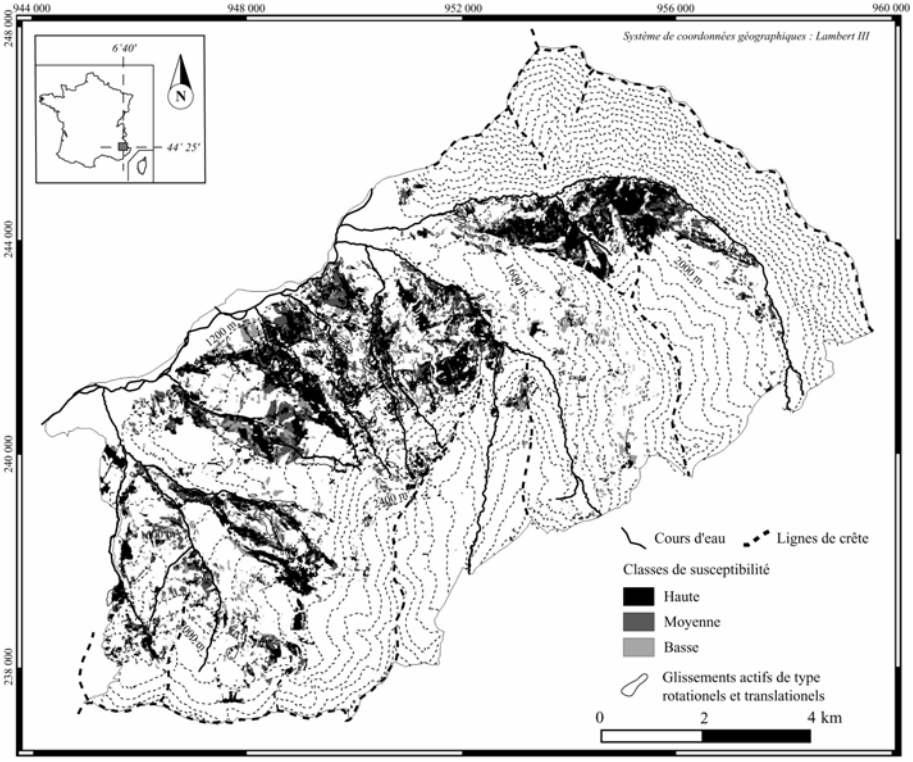



**Figure 6.** *Carte de susceptibilité des versants aux glissements de terrain obtenue par analyse bivariée par théorie de l'évidence*

En termes de localisation, les deux modèles spatiaux présentent des résultats proches. Les surfaces communes aux trois classes de susceptibilité pour les deux modèles spatiaux sont indiquées dans le Tableau 2. Les modèles apparaissent performants pour identifier la classe de susceptibilité forte, avec une aire commune aux deux modèles de 8.1 km$^2$. Pour les classes de susceptibilité moyenne et faible, des confusions entre les modèles sont observées, bien que les surfaces soient plus petites. Ces confusions peuvent être attribuées au découpage des classes sur la courbe cumulative. En comparant la localisation des aires de susceptibilité forte et des aires observées de glissement de terrain, deux remarques s'imposent (Figure 8, Figure 9) :

- les deux modèles spatiaux sous-estiment les aires de glissements de terrain qui se situent sur des zones planes ou à pente faible (inférieure à 9°). Comme ces versants sont, d'un point de vue mécanique, peu favorables aux instabilités, il est normal que la localisation de phénomènes très particuliers et peu représentés dans l'inventaire géomorphologique (généralement des mouvements translationnels d'ampleur moyenne) ne soit pas prédite par les modèles ;

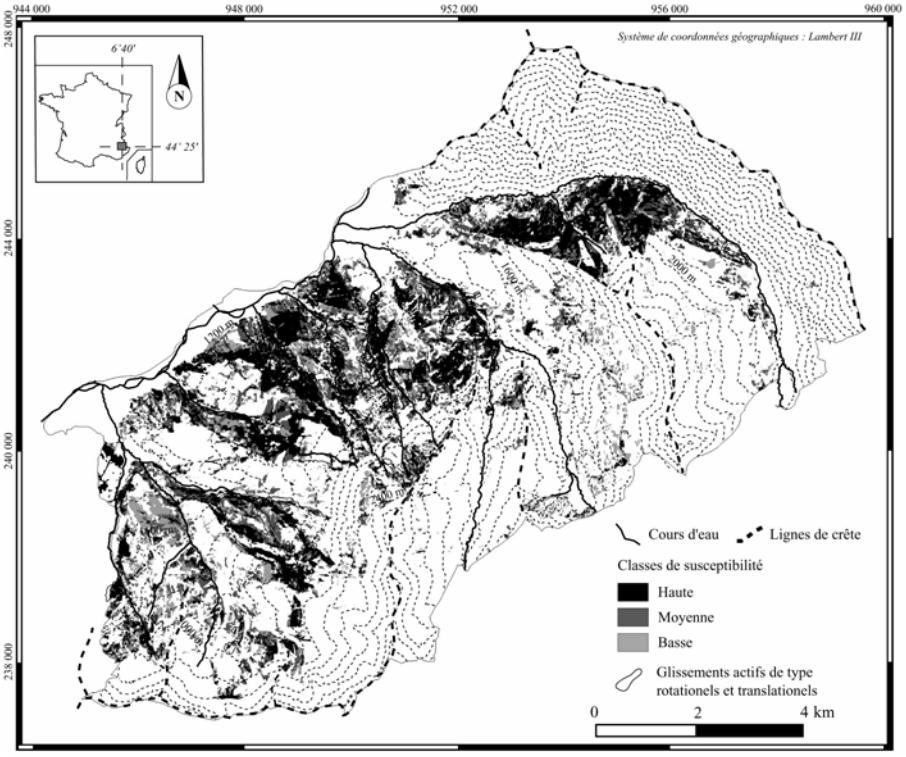



**Figure 7.** *Carte de susceptibilité des versants aux glissements de terrain obtenue par analyse bivariée par régression logistique*

- si l'analyse bivariée par régression logistique sous-estime les aires de susceptibilité forte dans les zones planes, elle sur-estime ces mêmes aires sur les versants aux pentes intermédiaires (9°-18°), qui ne présentent pas d'indice observable d'instabilité. Ces aires sont identifiées avec une susceptibilité moyenne par l'analyse bivariée par théorie de l'évidence, ce qui peut satisfaire un avis expert.

Finalement, l'analyse bivariée par théorie de l'évidence prédit, en terme de surface, 65% des aires observées de glissements de terrain actifs, contre 55 % pour l'analyse bivariée par régression logistique.

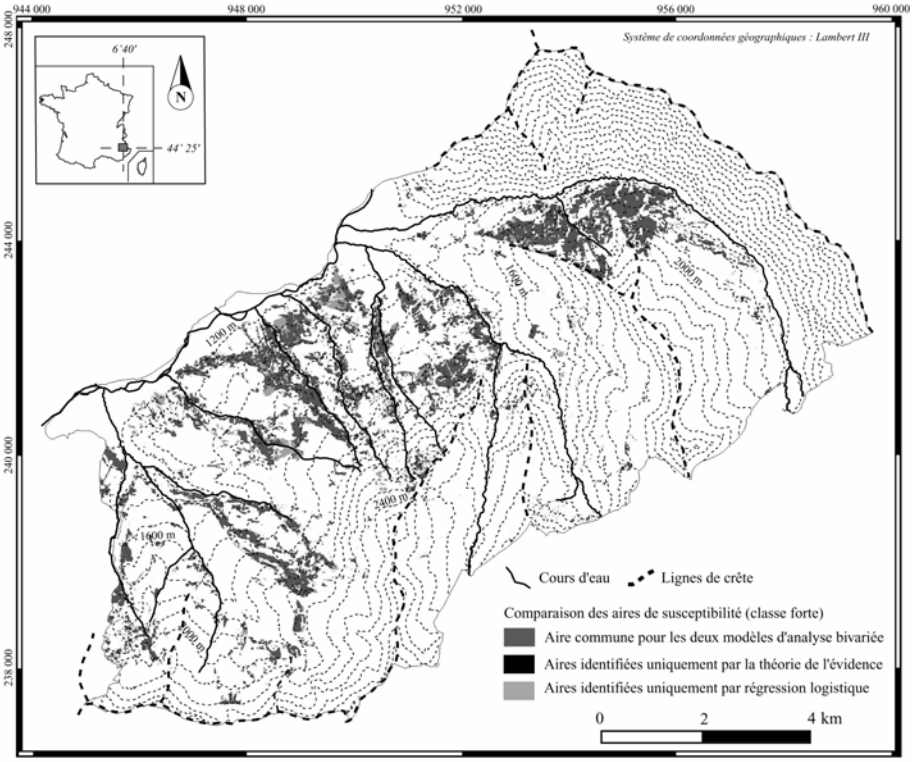



**Figure 8.** *Comparaison des aires de susceptibilité forte obtenues par les deux modèles d'analyse spatiale*

## 6. Conclusion

Cette étude a pour objectif de comparer deux modèles spatiaux statistiques pour évaluer la susceptibilité des versants au glissements de terrain, à une échelle du 1/10 000$^{e}$, pour des environnements montagneux complexe.

Deux méthodes d'analyse spatiale bivariées (théorie de l'évidence, régression logistique), implantées dans un SIG, ont été testées sur un site d'étude localisé dans le Bassin de Barcelonnette (Alpes-de-Haute-Provence, France).

Les résultats indiquent qu'une combinaison de cinq variables prédictives (gradient de pente, formations superficielles, occupation du sol, aspect, exposition) permet de prédire, pour la meilleure simulation, la localisation spatiale (en terme de susceptibilité) de 65% des aires observées de glissements de terrain. Si les résultats des deux modèles spatiaux sont proches, l'analyse bivariée par théorie de l'évidence semble plus robuste et adaptée à l'échelle de travail considérée (1/10 000$^{e}$). L'utilisation de la méthode comme outil de prédiction spatiale nécessite cependant un travail important de collecte et de mise en forme des données de base, en particulier pour les variables prédictives topographie et occupation du sol. Ces données ne peuvent être dérivées des bases de données commerciales et nécessitent d'être complétées par des observations de terrain.

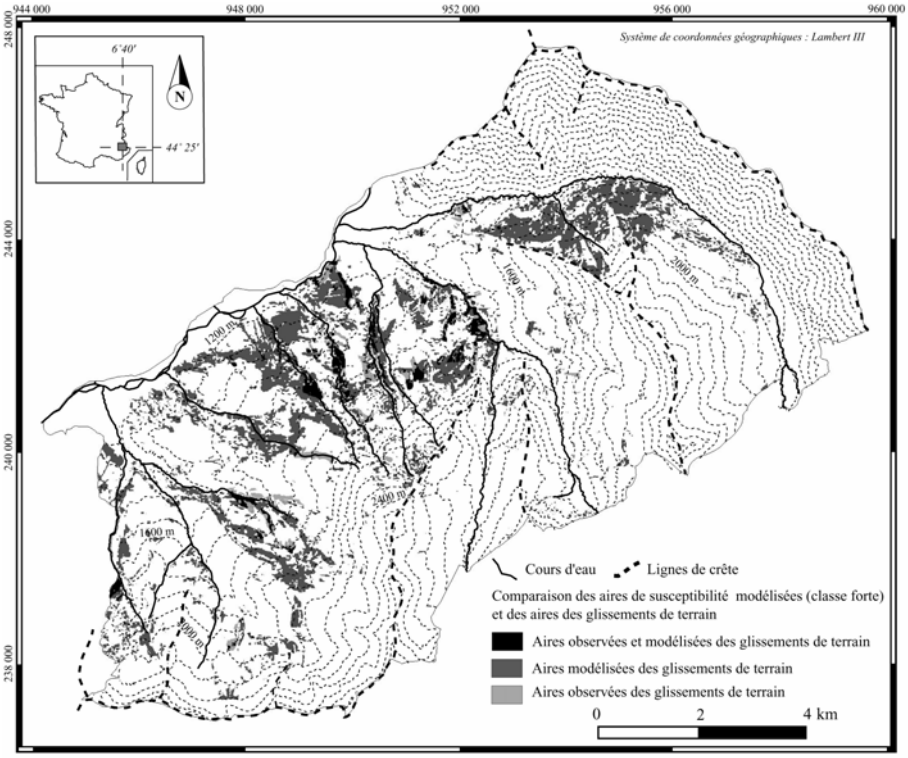



**Figure 9.** *Comparaison des aires de susceptibilités modélisées (classe forte) à l'inventaire géomorphologique des glissements de terrains*

Les résultats de l'étude confirment ceux obtenus par Van Westen *et al.* (2003) qui indiquent que l'analyse spatiale bivariée par théorie de l'évidence, fondée à la fois sur l'expérience de l'expert et sur l'objectivité de la méthode de calcul, est la plus performante pour évaluer la susceptibilité des versants. La méthode doit cependant être validée sur des sites aux caractéristiques environnementales différentes et à différentes échelles, pour une même combinaison de variables prédictives, afin de définir sa reproductibilité et l'incertitude associée aux prédictions.

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). Contribution EOST- 2004.22-UMR7516.

## 7. Bibliographie

Aleotti P., Chowdhury R., « Landslide hazard assessment: summary review and new perspectives », Bulletin of Engineering Geology Environment, vol. 58, 1999, p. 21-44.

Bonham-Carter G.F. 1994, Geographic Information System for Geoscientists : modelling with GIS, Computer methods in the Geosciences, vol. 13, Pergamon Press, 1994.

BUWAL/BWW/BRP, « Berücksichtigung der Massenbewegungsgefahren bei raumwirksamen Tätigkeiten », Herausgegeber: Bundesamnt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL), Bundesamnt für Wasserwirtschaft (BWR), Bundesamnt für Raumplannung (BRP), 1997, Bern: Empfehlungen, EDMZ 310.023d.

Carrara A., Cardinali M., Guzzetti F., Reichenbach P., « GIS technology in mapping landslide hazard », in Carrara A., Guzetti F (eds,), Geographical Information Systems in Assessing Natural Hazards, 1995, p. 135-176.

Chung C.F., Fabbri A.G., « The representation of geoscience information for data integration », Non Renewable Resources, vol. 2, n° 2, 1993, p. 122-139.

Cruden D.M., Varnes D.J., Landslides types and processes, in Turner A.K., Schuster R.L. (eds), Landslides investigation and mitigation, Transport Research Board, National Research Council, special report 247, 1996, p. 36-75.

Dai F.C., Lee C.F., Li J., Xu Z.W., « Assessment of landslide susceptibility on the natural terrain of Lantau Island, Hong Kong », Environmental Geology, vol. 40, n°3, 2001, p. 381-391.

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.

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://ntserv.gis.nrcan.gc.ca/sdm/.

Kleinbaum D.G., Logistic regression a self-learning text, Springer, Berlin Heidelberg New York, 1994, 250 pp.

Maquaire O., Malet J.P., Remaître 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.

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'Equipement, des Transports et du Logement (METL), 1999, La Documentation Française, Paris.

Sánchez M.J., « Slope deposits in the Upper Nalón River Basin (NW Spain) : an approach to a quantitative comparison », Geomorphology, Vol. 43, n° 1-2, 2002, p. 165-178.

Soeters R., Van Westen C.J., Slope instability, recognition, analysis, and zonation, in Turner A.K., Schuster R.L. (eds), Landslides investigation and mitigation, Transport Research Board, National Research Council, special report 247, 1996, p.129-177.

Süzen M.L., Doyuran V., « Data driven bivariate landslide susceptibility assessment using geographical information systems: a method and application to Asarsuyu catchment, Turkey », Engineering Geology, vol. 71, 2004a, p.303-321.

Süzen M.L., Doyuran V., « A comparison of the GIS based landslide susceptibility assessment methods: multivariate versus bivariate », Environmental Geology, vol. 45, 2004b, p. 665–679.

Spiegelhater D., Kill-Jones R.P., « Statistical and knowledge approaches to clinical decision-support systems, with an application in gastroenterology », Journal of the Royal Statistical Society, vol. 147, n° 1, 1984 p. 35-77.

Thiery Y., Sterlacchini S., Malet, J.P., Puissant, A., Remaitre A., Maquaire O, « Strategy to reduce subjectivity in landslide susceptibility zonation by GIS in complex mountainous environments », Computers and Geosciences, submitted.

Van Westen CJ., Application of geographic information systems to landslide hazard zonation, ITC Publication No 15, International Institute for Aerospace and Earth Resources Survey, Enschede, The Netherlands, 1993, 245 pp.

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 overwiew of recent developments, in Lacerda W.A., Ehrlich M., Fountoura, S.A.B., Sayão, A.S.F. (Eds.), Landslides evaluation and stabilization, vol. I. Balkema, Rotterdam, Netherlands, 2004, pp. 39-56.

Van Westen C.J., Rengers N., Soeters R., « Use of geomorphological information in indirect landslide susceptibility assessment », Natural Hazards, vol. 30, 2003, p. 399-419.

Wachal D.J., Hudak P.F., « Mapping landslide susceptibility in Travis County, Texas, USA », GeoJournal, n° 51, 2000, p. 245-253.