

Cartographie de la susceptibilité aux glissements de terrain dans la région de Nova Friburgo (État de Rio de Janeiro, Brésil). Une étape vers l'évaluation et la gestion du risque

(LANDSLIDE SUSCEPTIBILITY MAPPING OF THE NOVA FRIBURGO AREA (RIO DE JANEIRO STATE, BRAZIL). A STEP TOWARD RISK ASSESSMENT AND MANAGEMENT)

François BÉTARD*, **Nicolas DELBART**** & **Clément PIEL*****

RÉSUMÉ – *Les glissements de terrain sont considérés comme un risque majeur au Brésil, comme en témoigne la catastrophe récente de janvier 2011 dans l'Etat de Rio de Janeiro, faisant plus de 1500 victimes et causant de nombreux dégâts aux infrastructures urbaines et rurales de la région. En vue d'une meilleure gestion du risque, les décideurs doivent pouvoir disposer de cartes de susceptibilité, leur permettant d'identifier les zones de leur territoire où de nouveaux glissements de terrain auront une plus forte probabilité de se déclencher dans le futur. Cette étude propose de tester une méthode de cartographie prédictive de la susceptibilité aux glissements dans la zone de Nova Friburgo – l'une des plus touchées par la catastrophe de janvier 2011 – en utilisant une approche probabiliste basée sur un modèle d'analyse spatiale bivariée (théorie de l'évidence). Après une procédure de calage et de validation statistique du modèle construit comme une combinaison de facteurs de prédisposition à l'occurrence de glissement de terrain, les résultats ont permis de réaliser une carte de la susceptibilité finale en cinq classes et d'interpréter le poids respectif de chacun des facteurs utilisés comme variables explicatives.*

Mots-clés : *Glissement de terrain – Aléa naturel – Évaluation du risque – SIG – Brésil.*

* Maître de Conférences, Univ. Paris-Diderot, Sorbonne Paris Cité, UMR CNRS 8586 PRODIG, case courrier 7001, 75205 Paris Cedex 13, France – Courriel : francois.betard@univ-paris-diderot.fr

** Maître de Conférences, Univ. Paris-Diderot, Sorbonne Paris Cité, UMR CNRS 8586 PRODIG, case courrier 7001, 75205 Paris Cedex 13, France – Courriel : nicolas.delbart@univ-paris-diderot.fr

*** Etudiant de master 2, Université Paris-Diderot, Sorbonne Paris Cité, UMR CNRS 8586 PRODIG, case courrier 7001, 75205 Paris cedex 13, France – Courriel : c.piel@hotmail.fr

ABSTRACT – *Landslides constitute a major natural hazard in Brazil, as recently shown by the disaster of January 2011 in the Rio de Janeiro State, that caused more than 1,500 deaths and extensive damage to the urban and rural infrastructures of the region. With the aim of improving risk management, stakeholders and policymakers must have access to landslide susceptibility maps, allowing them to identify areas of their territory where new landslides have a higher probability of being triggered in the future. This study proposes to test a method of landslide susceptibility mapping in the Nova Friburgo area - one of the most affected by the disaster of January 2011 - using an indirect approach based on a bivariate probabilistic model (weight of evidence). After a procedure of calibration/validation of the model, the results led to the completion of a final susceptibility map with five classes and also offer the opportunity to interpret the respective weight of predisposing factors used as predictive variables.*

Key words: *Landslide – Natural hazard – Risk assessment – GIS – Brazil.*

1. Introduction

Les glissements de terrain sont considérés comme un risque majeur au Brésil, en raison des dégâts importants et des conséquences meurtrières que ce type d'aléa a engendrés par le passé, particulièrement au cours des dernières années. Les événements récents des 11 et 12 janvier 2011 dans l'Etat de Rio de Janeiro – qui ont vu le déclenchement de plus de 3500 glissements de terrain sur une bande de 20 x 80 km – ont causé la mort de 1500 personnes et provoqué des dégâts sévères aux infrastructures rurales et urbaines de plusieurs municipalités de l'arrière-pays montagneux de Rio [Avelar & al. 2011]. Il s'agit essentiellement de glissements superficiels (glissements translationnels en majorité), déclenchés à la suite d'un épisode pluviométrique de haute intensité ayant atteint 325 mm de précipitations en moins de 48 heures [Coelho Netto & al. 2011]. Considéré comme la pire catastrophe naturelle de l'histoire du Brésil, cet événement ne doit pas occulter la récurrence de tels phénomènes dans la région au cours des dernières décennies (1966, 1967, 1988, 1996, 2010) [Coelho Netto & al. 2010]. Ceci a valu au gouvernement brésilien d'essayer de nombreuses critiques concernant le volet de la gestion du risque et de la crise, en l'absence de système d'alerte et de réelle planification urbaine et environnementale. Malgré la répétition de ce type d'événement catastrophique, on observe que la croissance des zones urbaines se fait souvent aux dépens d'espaces de plus en plus exposés aux aléas, en particulier sur les versants en pente forte affectés par les glissements où se concentrent en masse les populations pauvres des *favelas*. Depuis la catastrophe de 2011, le gouvernement brésilien s'est engagé à mettre en place un système d'alerte efficace et un plan de prévention des risques naturels à l'échelle du pays.

L'évaluation du risque « glissement de terrain » implique d'évaluer le niveau d'aléa et les enjeux humains ainsi que la vulnérabilité des éléments

exposés. L'évaluation de l'aléa nécessite au préalable d'apprécier la susceptibilité des terrains aux glissements, c'est-à-dire la possibilité qu'un glissement se produise sur un territoire donné pour différentes conditions environnementales locales [Thiery 2007]. La susceptibilité est donc définie comme la probabilité d'occurrence spatiale d'un glissement en fonction de facteurs de prédisposition connus (variables explicatives), sans tenir compte de leur occurrence temporelle. Les cartes de susceptibilité peuvent être obtenues soit par une approche qualitative ou heuristique (fondée sur une démarche experte), soit par une approche déterministe (fondée sur des modèles à bases physiques, reposant sur des mesures directes de différents paramètres : géotechniques, hydrologiques...) soit par une approche probabiliste (fondée sur des modèles statistiques d'analyse spatiale). Cette dernière est aujourd'hui de plus en plus utilisée en raison de son caractère généralisable et reproductible, et s'avère particulièrement adaptée aux échelles larges (du 1/100 000^e au 1/25 000^e) [Fell & al. 2008]. Cette étude propose de réaliser une cartographie préliminaire de la susceptibilité aux glissements dans la zone de Nova Friburgo – l'une des plus touchées par la catastrophe de janvier 2011 – en utilisant une approche probabiliste basée sur un modèle d'analyse bivariée (théorie de l'évidence). Cette méthode, considérée actuellement comme l'une des plus robustes statistiquement pour ce type d'étude [*e.g.*, Van Westen 2004, Thiery & al. 2007, Regmi & al. 2010], a donné de très bons résultats aux échelles régionales et dans des contextes environnementaux variés, y compris en milieu de moyenne montagne tropicale [Pradhan & al. 2010, Vijitha & al. 2014]. A l'heure où se fait sentir au Brésil le besoin d'une cartographie généralisée des aléas et des risques naturels, l'un des objectifs est d'évaluer le potentiel de cette méthode pour une cartographie de la susceptibilité aux glissements à large échelle, en se basant uniquement sur des données d'entrée gratuites et facilement accessibles (Google Earth, Landsat, ASTER GDEM).

2. Zone d'étude

La zone d'étude est localisée dans la municipalité de Nova Friburgo, au cœur de l'Etat de Rio de Janeiro, dans le Sud-Est du Brésil (Fig. 1). Située dans la Serra do Mar, à environ 100 km au nord-est de la ville de Rio, elle définit un rectangle de 141 km² centré sur la ville de Nova Friburgo et regroupe ainsi une bonne partie des 182 000 habitants que compte la municipalité. Il s'agit par conséquent d'une région fortement anthropisée, malgré sa situation géographique enclavée dans l'arrière-pays de Rio. Les activités économiques principales sont l'industrie textile et métallurgique, l'agriculture (essentiellement du pâturage et quelques cultures commerciales entre les *patches* de forêt atlantique secondaire) mais aussi le tourisme, puisque la zone est également connue pour ses paysages bucoliques, ses activités de plein air ainsi que pour son climat, plus frais que celui des plaines côtières, qui attire les

populations aisées de l'aire urbaine de Rio de Janeiro durant les mois d'été (décembre à février). Ainsi caractérisée par un climat tropical d'altitude, l'aire d'étude s'étend sur une zone de moyenne montagne dont l'altitude varie de 638 à 1593 mètres au-dessus du niveau de la mer. Dans ce secteur, les pentes des versants sont assez prononcées, puisque seulement 12,4 % de la zone d'étude possèdent des pentes inférieures à 8°, alors que 25,4 % des pentes sont supérieures à 25°. Sur le plan géologique, la région est partagée entre divers types de granites plus ou moins altérables (granites pré-, syn- et post-orogéniques) ; le quart sud-est de la zone d'étude se distingue des autres lithologies granitiques par la présence d'un massif de charnockites – un granite à orthopyroxène particulièrement résistant. Ces différents types de roches cristallines sont généralement recouverts sur les versants par d'épaisses formations superficielles (saprolites et colluvions) qui peuvent atteindre jusqu'à 10 mètres de profondeur. Toutes ces formations de nature argilo-sableuse, considérées comme instables d'un point de vue géotechnique, constituent un élément fondamental dans la prédisposition aux glissements superficiels, mais les paramètres géotechniques diffèrent ensuite selon la nature de la roche-mère [Avelar & al. 2011].

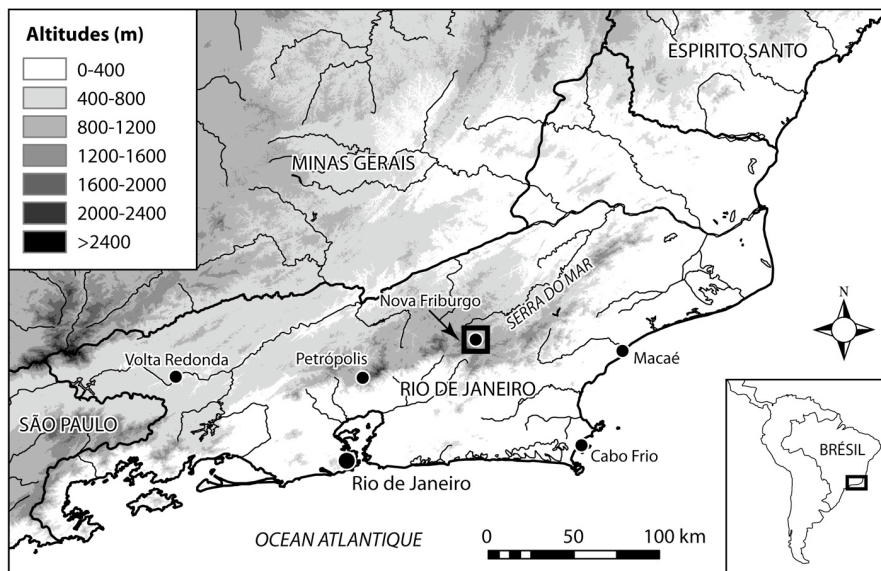


Figure 1 – Carte de localisation de la zone d'étude. Topographie dérivée du SRTM DEM v4.

3. Méthodes et données

3.1. Inventaire et cartographie des glissements de terrain

L'inventaire et la cartographie des glissements de terrain ont été effectués à partir de la photo-interprétation d'images gratuites à haute résolution du satellite GeoEye du 24/01/2011 (soit 13 jours après l'épisode catastrophique). Le lot d'images a pu être récupéré via l'application *Great Maps For Windows Forms* de *Google Earth*® au format .pngw, ce qui a permis de conserver les informations de géoréférencement des images. Ces dernières ont été directement chargées dans le module ArcMap® du logiciel ArcGIS® 10. Il s'est agi ensuite de digitaliser l'ensemble des glissements de terrain sous forme de polygones vectoriels.

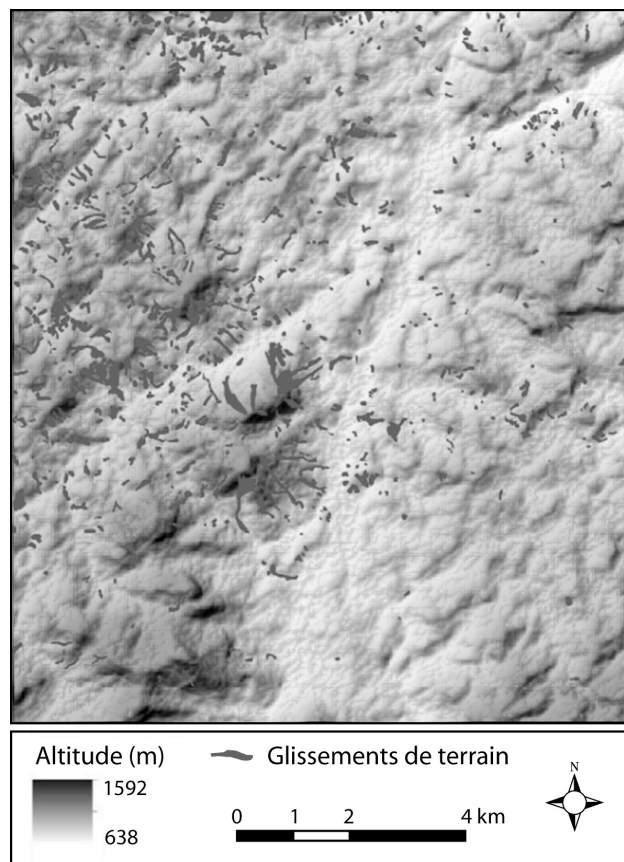


Figure 2 – Relief ombré (dérivé du modèle numérique d'élévation ASTER GDEM v4) et localisation des glissements de terrain sur la zone d'étude.

Lors de cet inventaire uniquement basé sur la photo-interprétation, les glissements n'ont pas été différenciés selon leur type : il s'agit dans tous les cas de glissements superficiels (profondeur <5m), majoritairement de type translationnel (plus rarement rotationnel), parfois prolongés par de véritables coulées de débris [Avelar & al. 2011]. Un total de 742 glissements de terrain, allant de 232 m² à 68 000 m², a été inventorié et cartographié sur la zone d'étude qui a été retenue (Fig. 2).

Pour chaque glissement, le centroïde et la zone de départ ont été identifiés. Il s'agit majoritairement de glissements de petite taille, puisque 68,7 % d'entre eux font moins de 5000 m² alors que ceux de plus de 20 000 m² ne représentent que 5,5 % de la surface totale occupée par les glissements. En vue de la modélisation de la susceptibilité, les 742 glissements ont été convertis en une grille de 11 212 points d'une résolution spatiale de 30 m, qui est la résolution choisie pour la cartographie finale de la susceptibilité.

3.2. Constitution d'une base de données sur les facteurs de prédisposition

Le choix des données à utiliser comme variables explicatives (*Ve*) de la susceptibilité aux glissements a été dépendant à la fois des facteurs de prédisposition connus [Avelar & al. 2011, Coelho Netto & al. 2011], de l'accès aux couches d'information et/ou de la possibilité d'en générer de nouvelles. Ceci a permis de mettre en évidence un ensemble de six principaux facteurs de prédisposition dans l'occurrence spatiale des glissements de terrain : la pente, l'exposition, la courbure de versant, l'occupation du sol, la lithologie et la distance aux cours d'eau (Tabl. 1). C'est le modèle numérique d'élévation ASTER GDEM v2 (*Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer, Global Digital Elevation Map, Version 2*), d'une résolution spatiale de 30 x 30 m, qui a constitué la base de données topographiques de référence pour dériver les cartes des pentes, d'orientation, de courbure de versant longitudinale et de distance aux cours d'eau, calculée par la méthode « distance à la ligne ». Les données de lithologie, qui concernent uniquement le *bedrock*, ont été récupérées directement sous la forme d'une couche vectorielle extraite de l'atlas géologique numérique du Brésil à 1/1 000 000^e [Bizzi & al. 2003]. Enfin, une cartographie de l'occupation du sol a été réalisée à partir du traitement par télédétection d'une image Landsat ETM+ du 25/04/2010, c'est-à-dire neuf mois avant la catastrophe de janvier 2011. Le traitement par télédétection procède d'une démarche experte reposant sur une classification supervisée corrigée manuellement à travers une série de seuillages (détails dans [Piel, 2013]).

Catégories	Variables prédictives	Résolution / échelle	Sources
Variable dépendante (V_d)	Glissements de terrain	30 m	Images à haute résolution du satellite GeoEye du 24/01/2011
Variables explicatives (V_e)	Pente	30 m	Modèle numérique d'élévation ASTER GDEM v2
	Orientation		
	Courbure de versant		
	Distance aux cours d'eau	1/1 000 000 ^e	Atlas géologique numérique du Brésil [Bizzi & al. 2003]
	Lithologie		
Occupation du sol	30 m	Image satellite Landsat ETM+ du 25/04/2010	

Tableau 1 – Variables prédictives retenues pour l'analyse de la susceptibilité, résolution spatiale (ou échelle) et sources de l'information utilisée

Afin de tester la validité des variables explicatives, des tests d'indépendance conditionnelle (test du χ^2) ont été réalisés entre chaque variable retenue et l'occurrence (présence/absence) des glissements de terrain (Tabl. 2). Avec un χ^2 calculé toujours supérieur à la distance critique (pour $\alpha = 0,001$), ces tests ont permis de rejeter l'hypothèse d'une indépendance conditionnelle et de valider la pertinence des six variables explicatives présentées ci-dessus.

	Occupation du sol	Pente	Lithologie	Distance cours d'eau	Orientation	Courbure
χ^2 calculé	1084,620	1033,107	2845,447	93,807	653,160	607,612
Degré de liberté	4	3	4	4	4	4

Tableau 2 – Résultats du χ^2 pour l'ensemble des variables explicatives. Le test porte sur l'indépendance entre l'occurrence de glissement et chacune de ces variables.

3.3. Modèle d'analyse bivariée par théorie de l'évidence

La susceptibilité aux glissements de terrain a été simulée par un modèle d'analyse spatiale bivariée (théorie de l'évidence), considérée comme l'une des approches probabilistes les plus robustes pour ce type d'étude [van Westen 2004, Thiery et al. 2007, Regmi & al. 2010], sous réserve de vérifier l'hypothèse d'indépendance conditionnelle des variables explicatives (ce qui a pu être réalisé dans le cas présent : voir *supra*). L'analyse bivariée consiste en une mise en relation entre les variables explicatives d'un phénomène (V_e) et l'occurrence de ce phénomène (la variable dépendante, V_d , ici les glissements de terrain). Pour pouvoir être appliquée, cette théorie repose sur trois hypothèses [Thiery 2007] : (1) les glissements 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 la zone d'étude.

Ce modèle se base sur une version log-linéaire du théorème général de Bayes, et a été appliqué à l'origine en médecine pour diagnostiquer certaines maladies. La théorie bayésienne de l'évidence utilise les notions de probabilité *a priori* et de probabilité *a posteriori*. La probabilité *a priori* est la probabilité qu'une unité de terrain (maille de calcul) possède la variable dépendante (*Vd*), 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. Cette association entre les *Vd* et les *Ve* va ainsi permettre le calcul d'un poids positif *W+* et d'un poids négatif *W-* pour chaque variable explicative, correspondant respectivement à une plus grande ou à une plus faible probabilité d'occurrence de *Vd*. L'ensemble des calculs a été effectué avec l'extension ArcSDM® [Sawatzky & al. 2004] du logiciel ArcGIS® 10.

Quatre étapes ont été conduites lors de la procédure de calage/validation du modèle probabiliste. Chacune de ces étapes est détaillée dans Piel [2013].

La première étape correspond au calage de la représentation de la variable dépendante, c'est-à-dire des glissements de terrain répertoriés. Une série de tests empiriques a montré que le modèle devait être étalonné sur l'ensemble des points de glissements et non pas sur le centroïde ou la zone de départ de chaque glissement.

La deuxième étape correspond à la définition de la meilleure combinaison de variables explicatives (au sens statistique). Suivant le protocole défini par Thiery [2007], chaque variable prédictive est ajoutée une à une dans le modèle pour observer son influence sur les simulations. Les tests empiriques effectués pour le calage des variables explicatives *Ve* indiquent que la meilleure combinaison possible pour l'utilisation du modèle est celle qui regroupe les six variables retenues au départ avec, par ordre hiérarchique, la lithologie, l'occupation du sol, la pente, la courbure de versant, l'orientation et la distance aux cours d'eau. Il est intéressant de noter que l'amélioration du modèle par ajout progressif des variables est surtout sensible pour les classes de susceptibilité élevée, ce qui signifie que l'utilisation des variables de pente, de lithologie et d'occupation du sol suffit à identifier les espaces de susceptibilité faible, mais que l'identification précise des zones d'aléa fort demande un plus grand nombre de variables, et que les glissements sont donc prédisposés par un ensemble de facteurs finalement assez complexe.

La troisième étape correspond à la validation statistique du modèle employé. Pour cette dernière étape, 70 % de la population totale des glissements de terrain sont introduits dans le modèle, à partir d'un tirage aléatoire, pour le calcul de la probabilité *a priori* et *a posteriori* ; les 30 % des points restants sont utilisés pour tester et valider les résultats. Les résultats des deux simulations (celle réalisée avec 70 % des points et celle réalisée avec

l'ensemble des points) sont très proches, avec un écart moyen de 0.1 point par classe de susceptibilité pour une cartographie en cinq classes (détails dans [Piel 2013]). Ces résultats valident statistiquement la fiabilité du modèle choisi pour la cartographie de la susceptibilité.

La quatrième étape consiste à interpréter les résultats du modèle sous forme de classes de susceptibilité. La susceptibilité modélisée pour chaque pixel de 30 m de côté par le modèle choisi est une variable continue et décimale. Le choix de la représentation cartographique finale de la susceptibilité modélisée passe donc par la définition de seuils permettant de séparer des classes de susceptibilité (forte, moyenne, faible...). Le choix des classes a été établi par une méthode de discrétisation manuelle, basée sur l'existence de seuils naturels visibles sur la courbe cumulative des valeurs de probabilité *a posteriori*.

4. Résultats et discussion

4.1. Cartographie de la susceptibilité finale modélisée

Une cartographie de la susceptibilité finale en cinq classes a finalement été retenue (Fig. 3), permettant en particulier de bien définir les classes extrêmes (susceptibilité très forte ou très faible). Dans ce cas, il est possible d'affirmer que la probabilité d'occurrence de glissements de terrain dans la zone de susceptibilité très faible est proche de zéro (cette classe regroupe seulement 3 % des glissements sur une surface correspondant à 23 % de la zone d'étude), alors que les espaces de susceptibilité très forte sont mieux ciblés avec un ratio glissement/surface très élevé (25 % des glissements sur 8 % seulement de la zone d'étude : Tabl. 3). On obtient également une meilleure précision et un bon équilibre entre les trois classes médianes, sans altération notable de la lisibilité.

Classes de susceptibilité	Très faible	Faible	Moyenne	Forte	Très forte
Densité de glissements	0,55	2,71	4,50	7,43	12,42
% de glissements	3,02	17,65	22,02	32,36	24,95
% de la superficie	23,60	28,00	21,05	18,72	8,64

Tableau 3 – Résultats de la modélisation de la susceptibilité pour les cinq classes retenues dans la cartographie finale

4.2. Interprétations des poids respectifs des facteurs de prédisposition

Une analyse des valeurs de W+, de W- et du poids final attribués à chacune des classes des variables explicatives a permis d'évaluer et d'interpréter le rôle respectif des facteurs de prédisposition dans l'occurrence spatiale des glissements de terrain. Il apparaît que la lithologie et l'occupation du sol jouent un rôle majeur alors que les variables de distance aux cours d'eau et d'orientation sont relativement moins influentes. En effet, l'écart de poids

maximum entre les cinq classes de la variable de distance aux cours d'eau est de seulement 0.3, alors qu'il est de 2.93 pour l'occupation du sol et de 3.51 pour la lithologie. Les variables de pentes et de courbure occupent une place intermédiaire avec un écart respectif de 1.27 et de 1.02. De toutes les variables prédictives, la lithologie est celle qui a le plus d'impact sur le modèle, notamment en raison de la faible susceptibilité des charnockites massives au déclenchement de glissements de terrain. Inversement, les granites post-orogéniques fortement altérés sont très sensibles aux instabilités gravitaires et aux glissements superficiels, en raison du comportement géotechnique de la saprolite souvent épaisse d'une dizaine de mètres sur ce type de substrat [Lacerda 2007, Avelar & al. 2011].

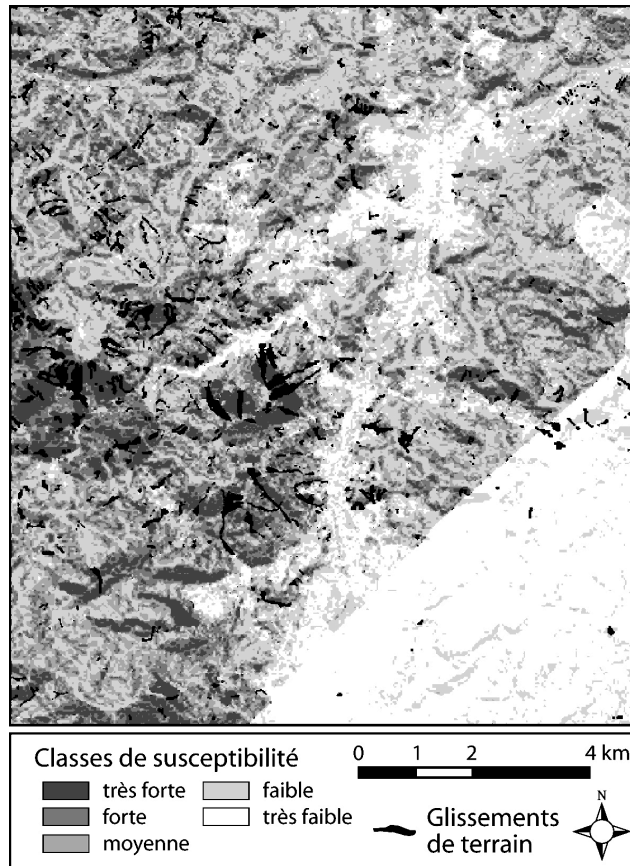


Figure 3 – Carte simulée de la susceptibilité finale aux glissements de terrain

Un problème d'interprétation des variables explicatives provient parfois de la redondance partielle de l'information, laquelle peut provoquer une violation

de l'indépendance conditionnelle [Thiery & al. 2007]. Dans notre cas, un autre problème a certainement conduit à sous-estimer le poids d'une variable explicative : en effet, on observe ici que la présence de bâti (classe issue de la couche « occupation du sol ») est considérée par le modèle comme une caractéristique limitant la probabilité d'occurrence de glissements, ce qui est conforme à la réalité du terrain puisque le nombre de glissements sur les surfaces de bâti est globalement peu important. Pourtant, la présence de surfaces bâties est considérée habituellement comme un facteur favorisant les glissements de terrain, notamment dans la région d'étude [Coelho Netto & al. 2007]. Ce problème s'explique par le recoupement de cette couche d'information avec la pente, puisque les zones de bâti sont majoritairement installées ici dans des zones de pentes faibles (notamment en fond de vallée : cas d'une bonne partie de la ville de Nova Friburgo). Il y a donc un risque que le modèle sous-estime la susceptibilité de glissement de terrain sur les zones de bâti en-dehors des zones de pente faible. D'autres améliorations du modèle sont évidemment possibles, concernant par exemple le nombre et la résolution spatiale des variables incorporées dans le modèle, ou encore en ne modélisant qu'un seul de type de glissement à la fois, après une étape indispensable de caractérisation des formes sur le terrain.

5. Conclusion et perspectives : vers une évaluation du risque

Cette étude a permis de disposer rapidement d'une carte de susceptibilité, certes préliminaire, à l'échelle d'une municipalité brésilienne en prenant en compte les principaux facteurs de prédisposition connus et en évaluant leurs poids respectifs. L'intérêt de la méthode utilisée ici réside essentiellement dans l'utilisation de données d'entrée gratuites (Google Earth, Landsat, ASTER GDEM), ce qui la rend peu coûteuse et facilement applicable à de vastes territoires, à une période où se fait sentir au Brésil le besoin d'une cartographie généralisée des aléas et des risques naturels. L'utilisation de ce type de données d'entrée offre des perspectives de développement important, car l'accès aux données gratuites, à des résolutions toujours plus fines, devrait se multiplier dans les années à venir. Même si des améliorations sont encore possibles concernant les variables utilisées (notamment par l'utilisation de données d'entrée plus nombreuses et/ou plus précises), puis au moment de la validation du modèle par la mise en place d'autres procédures (tests statistiques), les résultats de cette étude apparaissent comme cohérents et la méthode semble donc reproductible à large échelle vers d'autres secteurs ou régions du Sud-Est du Brésil.

Dans une perspective d'aide à la décision, la cartographie de la susceptibilité apparaît comme un préalable indispensable à l'évaluation du risque « glissement de terrain », pouvant participer à une meilleure gestion du risque et à l'élaboration des futurs plans de prévention. Des transferts bilatéraux de

connaissances/compétences entre les équipes scientifiques françaises et brésiliennes travaillant sur la cartographie du risque « glissement de terrain » sont envisagés, dans le cadre d'échanges et programmes internationaux actuellement en projet. Une validation du modèle étalonnée sur une région plus étendue est également en cours.

Remerciements

Les auteurs remercient Ana Luiza Coelho Netto et André de Sousa Avelar (Universidade Federal do Rio de Janeiro, laboratório Geoheco) pour les échanges constructifs occasionnés par leur venue à Paris lors de la 8^e Conférence Internationale de Géomorphologie (IAG Paris 2013, 27-31 août 2013), puis en tant que Professeure invitée (A.L. Coelho Netto) à l'Université Paris-Diderot en septembre 2013. Ces premiers échanges ont permis de comparer les intérêts et limites des différentes méthodologies utilisées pour la cartographie de la susceptibilité, et de discuter de l'influence des principaux facteurs de prédisposition et de déclenchement des glissements de terrain, notamment dans la région touchée par la catastrophe de 2011. Les auteurs remercient également Alexandre Poiraud ainsi qu'un relecteur anonyme pour leurs remarques constructives qui ont permis d'améliorer la qualité de l'article.

Références bibliographiques

- AVELAR, A.S., COELHO NETTO, A.L., LACERDA, W.A., BECKER, L.B. & MENDONÇA, M.B. (2011) – « Mechanisms of the Recent Catastrophic Landslides in the Mountainous Range of Rio de Janeiro, Brazil », *Proceedings 2nd World Landslide Forum*, Rome, pp. 1-5.
- BIZZI, L.A., SCHOBENHAUS, C., VIDOTTI, R.M. & GONÇALVES, J.H. (Ed.) (2003) – *Geologia, tectônica e recursos minerais do Brasil. Texto, Mapas & SIG*. Serviço Geológico do Brasil-CPRM, Brasília, CD-Rom.
- COELHO NETTO, A.L., AVELAR, A.S. & LACERDA, W.A. (2010) – « Landslides and Disasters in Southeastern and Southern Brazil », in: E.M. Latrubesse (Ed.), *Natural Hazards and Human-Exacerbated Disasters in Latin America*, Developments in Earth Surface Processes, vol. 13, pp. 223-243.
- COELHO NETTO, A.L., AVELAR, A.S., FERNANDES, M.C. & LACERDA, W.A. (2007) – « Landslide susceptibility in a mountainous geoecosystem, Tijuca Massif, Rio de Janeiro: The role of morphometric subdivision of the terrain », *Geomorphology*, vol. 87, n°3, pp. 120-131.
- COELHO NETTO, A.L., SATO, A.M., AVELAR, A.S., VIANNA, L.G.G., ARAUJO, I.S., CROIX, D., LIMA, P., SILVA, A.P. & PEREIRA, R. (2011) – « January 2011: the Extreme Landslide Disaster in Brazil », *Proceedings 2nd World Landslide Forum*, Rome, pp. 1-6.
- FELL, R., COROMINAS, J., BONNARD, C., CASCINI, L., LEROI, E. & SAVAGE, W. (2008) – « Guidelines for landslide susceptibility, hazard and risk zoning for land use planning », *Engineering Geology*, vol. 104, n°3-4, pp. 85-98.
- LACERDA, W. A. (2007) – « Landslide Initiation in Saprolite and Colluvium in Southern Brazil: Field and Laboratory Observations », *Geomorphology*, vol. 87, n°3, pp. 104-119.

- MALET, J.-P., THIERY, Y., MAQUAIRE, O. & PUISSANT, A. (2006) – « Analyse spatiale, évaluation et cartographie du risque "glissement de terrain" », *Revue Internationale de Géomatique*, vol. 16, n°3-4, pp. 499-525.
- PIEL, C. (2013) – *Évaluation et cartographie de la susceptibilité des versants aux glissements de terrain. Application à la région de Nova Friburgo (État de Rio de Janeiro, Brésil)*. Mémoire de master 2 « Espaces, Dynamiques des Milieux et Risques », université Paris-Diderot, 73 p.
- PRADHAN, B. OHB, H.J. & BUCHROITHNER, M. (2010) – « Weights-of-evidence model applied to landslide susceptibility mapping in a tropical hilly area », *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, vol. 1, n°3, pp. 199-223.
- REGMI, N.R., GIARDINO, J.R. & VITEK, J.D. (2010) – « Modeling susceptibility to landslides using the weight of evidence approach: Western Colorado, USA », *Geomorphology*, vol. 115, pp. 172-187.
- SAWATZKY, D.L., RAINES, G.L., BONHAM-CARTER, G.F. & LOONEY, C.G. (2004) – *ArcSDM2: ArcMAP extension for spatial data modelling using weights of evidence, logistic regression, fuzzy logic and neural network analysis* - <http://ntsर्व.gis.nrcan.gc.ca/sdm/>
- THIERY, Y. (2007) – *Susceptibilité du bassin de Barcelonnette (Alpes du sud, France) aux "mouvements de versant" : cartographie morphodynamique, analyse spatiale et modélisation probabiliste*. Thèse de doctorat, université de Caen Basse-Normandie, 443 p.
- THIERY, Y., MALET, J.-P., STERLACCHINI, S., PUISSANT, A. & MAQUAIRE, O. (2007) – « Landslide Susceptibility Assessment by Bivariate Methods at Large Scales: Application to a Complex Mountainous Environment », *Geomorphology*, vol. 92, n°1-2, pp. 38-59.
- VAN WESTEN, C.J. (2004) – « Geo-Information Tools for Landslide Risk Assessment: an Overview of Recent Developments », *Proceedings 9th International Symposium on Landslides*, Leiden, Balkema, pp. 39-56.
- VIJITHA, H., KRISHNAKUMAR, K.N., PRADEEPA, G.S., NINU, M.V., KRISHNANA & MADHUC, G. (2014) - « Shallow landslide initiation susceptibility mapping by GIS-based weights-of-evidence analysis of multi-class spatial data-sets: a case study from the natural sloping terrain of Western Ghats, India », *Georisk: Assessment and Management of Risk for Engineered Systems and Geohazards*, vol. 8, n°1, pp. 48-62.