

Communication pour les 12èmes Journées du Réseau Erosion
Laboratoire de Science du Sol de l'INRA Orléans
Réseau Erosion de l'ORSTOM de Montpellier

**PRÉVISION DES RISQUES DE GLISSEMENT DE TERRAIN
DES SOLS D'ORIGINE VOLCANIQUE
EN AMÉRIQUE CENTRALE**

Jean Collinet
ORSTOM/CATIE-Renarm Cuencas

Grégoire Leclerc
CATIE-Laboratoire d'Analyse Géographique
gleclerc@computo.catie.ac.cr

Turrialba, Costa Rica
Septembre 1995

1. Problématique

L'évolution du profil des versants en région des cordillères d'Amérique Centrale provient dans la plupart des cas, de la succession des glissements de terrains. Au Costa Rica, par exemple, Burgos et Hyman (1995) ont recensé à partir d'images du satellite Landsat TM, plus de 1600 glissements de terrain dans la région de Limon, suite au tremblement de terre d'avril 1991 (Fig.1). Les masses de terre ainsi mobilisées et entraînées dépassent nettement celles arrachées et transportées par les flux hydriques superficiels. On a évalué (Hartshorn *et al*, 1982) et on a mesuré (Collinet et Mazariego, 1994) que les pertes en terres liées aux érosion hydriques superficielles pouvaient atteindre quelques centaines de tonnes par hectare et par an dans le cas de matériaux fragiles et peu protégés (200 à 350t ha-1 an-1 sur cendres volcaniques au El Salvador). Des calculs effectués sur des cicatrices de glissements de terrain montrent qu'il faut généralement multiplier par 10 à 50 les valeurs précédentes pour pouvoir réincorporer dans l'érosion générale les effets annuels de tels événements en régions particulièrement sensibles à cette forme d'érosion.

Même si les matériaux ainsi mobilisés n'atteignent pas toujours la vallée, ceux-ci, ameublés et peu cohésifs, sont facilement et rapidement repris par les autres formes de l'érosion hydrique et contribuent ainsi au comblement des vallées, voire aux sédimentations des réservoirs artificiels. La durée de vie d'un ouvrage hydroélectrique s'en voit alors diminuée et demande régulièrement des opérations de vidange extrêmement dommageables pour l'environnement. C'est une préoccupation importante des services chargés de la production et de la distribution de l'énergie hydro-électrique dans tous les pays de l'isthme centroaméricain. Dans ce contexte il est donc intéressant de voir dans quelles limites ces risques peuvent être prévus et quantifiés. Nous sommes aussi de plus en plus témoins de tragédies liées aux glissements de terrain de petite envergure, les populations rurales ayant été repoussées vers des zones de plus en plus escarpées suite à l'expropriation de terres des vallées par les grands producteurs.

2. Conception d'un modèle de prévision des risques de glissement de terrain

L'observation des sites à glissements de terrain fréquents actuels ou anciens a montré que parmi les facteurs de risque il convenait de considérer la **composante tangentielle, liée à la pente, des charges hydriques annuelles des sols d'origines volcaniques très microporeux** tels que les melanudands et fulvudands sur cendres et tuffés andésitiques tardi-tertiaires et les lithic ou typic-udivitrands sur cendres trachy-andésitiques quaternaires.

Les autres facteurs, également non exclusifs et souvent interconnectés, proviennent des effets des **secousses sismiques, même de faible intensité, intervenant sur des sols saturés thixotropes contenant des proportions importantes de gels allophaniques.**

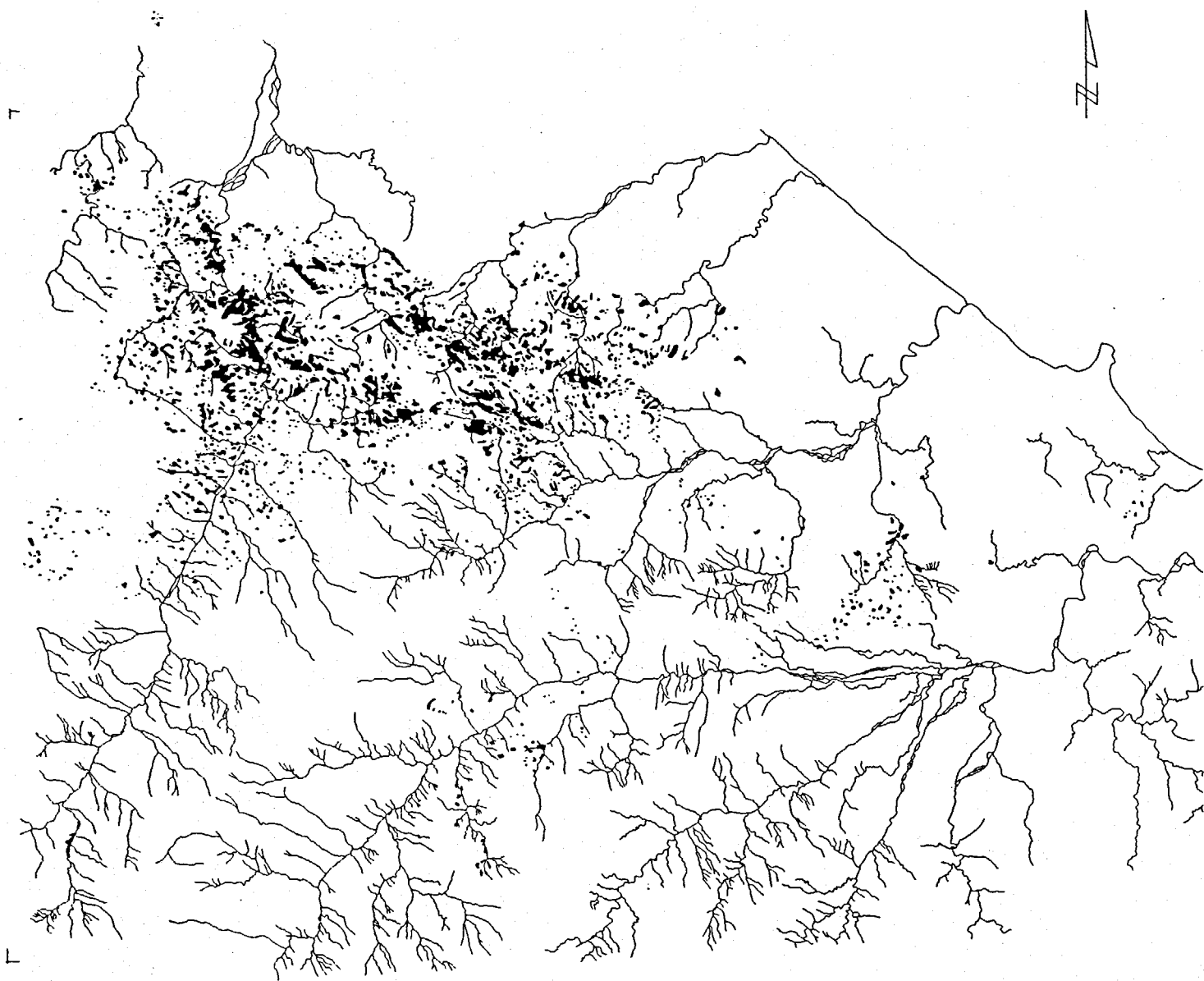


Figure 1. Glissements de terrain causés par le tremblement de terre du 21 avril 1991 (7,5 échelle Richter) dans la zone atlantique du Costa Rica. D'après Burgos et Hymann (1995).

2.1. Schéma général

On ne développera dans cette communication que les risques en rapport avec la saturation hydrique saisonnière soit la première composante mentionnée précédemment.

Tableau II: Volumes poraux de quelques sols représentatifs des vieilles plateformes ouest-africaines (mm d'eau par mètre de sol, données obtenues par l'analyse d'échantillons de sols "secs à l'air")

Types de sol Class.française	Poros. totale	Micropo- rosité	Point flétris	Eau utile	Macropo- rosité	Micro/ macro %
Brun eutr.vertiq	334	302	220	82	42	88
Isoh.brun vertiq	309	268	171	97	41	87
Ferrug.lessivé	268	186	68	118	82	69
Ferrug.peu lessi	400	324	242	106	76	81
Ferrall.moy.desa	309	154	75	79	154	50
ido	380	146	72	79	154	50
ido	350	272	193	80	78	78
Hydro.less.gley	433	203	34	169	230	47

2.2. Cas particulier des capacités hydriques des sols volcaniques

Les comparaisons qui précèdent s'établissent à partir d'échantillons de sols séchés à l'air. Les teneurs en eau, aux potentiels capillaires pF 2,5 3,0 et 4,2 représentent de façon théorique, des états de liaison entre les phases liquides et solides, ce en partant d'énergies faibles assimilées au remplissage de la microporosité (pF2,5 et 3,0) vers des énergies fortes correspondant aux limites d'utilisation de l'eau du sol par les plantes (pF 4,2). On sait quelles approximations entourent ces relations "énergie de rétention/géométrie porale/ comportements physiologiques des plantes". Mais le grief essentiel est celui de la géométrie "variable" des réservoirs poraux des sols volcaniques en fonction de leur état d'hydratation et surtout d'une déshydratation irréversible s'opérant notamment sur les échantillons destinés aux laboratoires.

La réversibilité de cette hydratation est déterminée par le comportement des gels allophaniques plus ou moins importants dans la phase minérale du sol, ce comportement détermine la dynamique des volumes poraux donc la capacité des réservoirs. Des différences importantes existent donc entre les valeurs obtenues sur échantillons traités "sec à l'air" et ceux maintenus humides avant leur analyse physique. Des mesures bien antérieures (Colmet Daages 1970) confortent les quelques nôtres et montrent par exemple que, les melanudands de la région de Turrialba ont, en situation humide, des capacités au champ de 80% en surface et que celle ci, toujours sur échantillons humides, pouvait atteindre 250 à 300% dans les horizons profonds (100-180cm). Le passage des 80% aux 300% se situe souvent vers les -25cm au delà desquels la charge allophanique des sols augmente nettement.

Cette prise en compte des caractéristiques physiques des sols in situ par rapport à celle obtenues sur échantillons remaniés et séchés fait partie des améliorations prévues du modèle.

Tableau II: Volumes poraux de quelques sols représentatifs des vieilles plateformes ouest-africaines (mm d'eau par mètre de sol, données obtenues par l'analyse d'échantillons de sols "secs à l'air")

Types de sol Class.française	Poros. totale	Micropo- rosité	Point flétris	Eau utile	Macropo- rosité	Micro/ macro %
Brun eutr.vertiq	334	302	220	82	42	88
Isoh.brun vertiq	309	268	171	97	41	87
Ferrug.lessivé	268	186	68	118	82	69
Ferrug.peu lessi	400	324	242	106	76	81
Ferrall.moy.desa	309	154	75	79	154	50
ido	380	146	72	79	154	50
ido	350	272	193	80	78	78
Hydro.less.gley	433	203	34	169	230	47

2.2. Cas particulier des capacités hydriques des sols volcaniques

Les comparaisons qui précèdent s'établissent à partir d'échantillons de sols séchés à l'air. Les teneurs en eau, aux potentiels capillaires pF 2,5 3,0 et 4,2 représentent de façon théorique, des états de liaison entre les phases liquides et solides, ce en partant d'énergies faibles assimilées au remplissage de la microporosité (pF2,5 et 3,0) vers des énergies fortes correspondant aux limites d'utilisation de l'eau du sol par les plantes (pF 4,2). On sait quelles approximations entourent ces relations "énergie de rétention/géométrie porale/ comportements physiologiques des plantes". Mais le grief essentiel est celui de la géométrie "variable" des réservoirs poraux des sols volcaniques en fonction de leur état d'hydratation et surtout d'une déshydratation irréversible s'opérant notamment sur les échantillons destinés aux laboratoires.

La réversibilité de cette hydratation est déterminée par le comportement des gels allophaniques plus ou moins importants dans la phase minérale du sol, ce comportement détermine la dynamique des volumes poraux donc la capacité des réservoirs. Des **différences importantes existent donc entre les valeurs obtenues sur échantillons traités "sec à l'air" et ceux maintenus humides** avant leur analyse physique. Des mesures bien antérieures (Colmet Daages 1970) confortent les quelques nôtres et montrent par exemple que, les melanudands de la région de Turrialba ont, en situation humide, des capacités au champ de 80% en surface et que celle ci, toujours sur échantillons humides, pouvait atteindre 250 à 300% dans les horizons profonds (100-180cm). Le passage des 80% aux 300% se situe souvent vers les -25cm au delà desquels la charge allophanique des sols augmente nettement.

Cette prise en compte des caractéristiques physiques des sols in situ par rapport à celle obtenues sur échantillons remaniés et séchés fait partie des améliorations prévues du modèle.

3. Représentation spatiale des risques: intégration du modèle dans un système d'information géographique

3.1. Détermination de la composante tangentielle de cisaillement du sol

Cette détermination provient de l'élémentaire composante de forces développées à partir d'une masse donnée contenue dans un secteur de versant plus ou moins pentu (Fig.3). La pression maximale saisonnière de la colonne d'eau en l'endroit considéré (P_w) se calcule en considérant la différence entre la saturation de la porosité totale en saison humide immédiatement après de fortes pluies et les deux tiers de la capacité au champ, considérant qu'il s'agit de l'état d'humectation moyen en saison sèche dans un sol où continue à fonctionner une ascension capillaire:

$$P_w = W_{pt} - 0,66 W_{cc} \quad (1)$$

avec P_w en kg.m^{-2} = pression exercée par la colonne d'eau

W_{pt} en mm = colonne d'eau correspondant à la porosité totale du sol sur 1,50m

W_{cc} en mm.cm-1 = colonne d'eau correspondant à la capacité au champ du sol sur 1,50m.

F_t (Newton: $\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-2}$), la force tangentielle de cisaillement opposable à un ensemble de tensions correspondant à la cohésion s. l. du sol rigide, est alors donnée par:

$$F_t = \sin a \cdot P_w \quad (2)$$

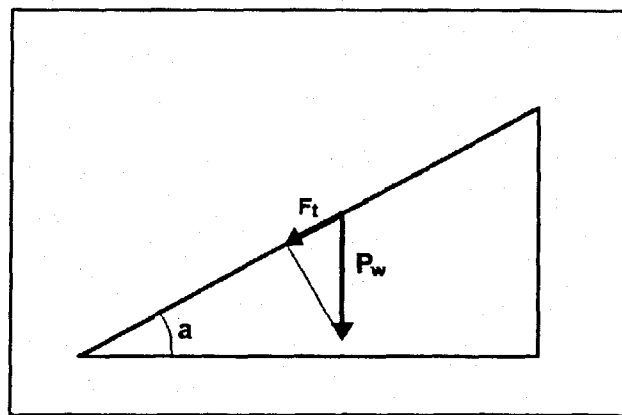


Figure 3: Détermination de la force tangentielle de cisaillement à partir de la pente et de la charge hydrique

3.2. Application aux sols du bassin versant du rio Reventado (versants du volcan Irazu, Costa Rica)

3.2.1. Description de la zone d'étude.

Notre zone d'étude se situe entre les longitudes $-83^{\circ}55'53''$ et $-83^{\circ}55'00''$ et les latitudes $9^{\circ}52'16''$ et $9^{\circ}58'46''$. Le rio Reventado, qui prend sa source à 2 km au sud-Ouest du cratère principal du Volcan Irazu, coule du Nord-Est au Sud-Ouest sur une distance de 12 km, passant d'une élévation de 3100 à 1600 msnm. La précipitation et évapotranspiration potentielle annuelles sont de 1687mm et 1666mm, respectivement.

Dans cette zone les roches prédominantes sont d'origine volcanique et datent du Pleistocène et Holocène. Il s'agit essentiellement de coulées de lave, lahars et couches pyroclastiques. La zone a connu plusieurs catastrophes, dont l'éruption du volcan Irazu en 1957 et la catastrophe de Taras (1964-1965), une avalanche de boue causée par l'endiguement du rio Reventado par le glissement de terrain de San Blas. Mora (1987) a recensé 16 glissements de terrain majeurs (dont la moitié sont actifs) dans le seul bassin versant du rio Reventado (21,5 km²). Les échantillons de forages des lahars de Cartago et Quircot, en aval du rio Reventado, démontrent que, durant le Pleistocène et l'Holocène, plusieurs avalanches de boue et de blocs de grandes dimensions ont suivi la déstabilisation des pentes en amont. Des catastrophes similaires se sont répétées dans l'histoire récente, par exemple en 1724, 1861, 1928, et 1951, ce qui a conduit à au moins deux déplacements totaux ou partiels de la ville de Cartago (appelée à l'époque Ciudad de lodo -Ville de boue).

3.2.2 Caractérisation des sols et calcul de la surcharge hydrique.

L'application de notre modèle repose sur un certain nombre d'informations directes ou élaborées (Sanchez, 1993).

(i) Une carte pédologique du bassin versant fut dressée à partir des documents à petite échelle existants. Une reconnaissance de terrain a permis de distinguer 3 situations morphopédologiques représentatives (Fig. 4) où l'on pouvait associer des types de sols à des types de paysages particulièrement tranchés et correspondant essentiellement à la combinaison des effets de l'altitude et des âges des cendres, lahars et autres produits pyroclastiques. Cinq profils furent reconnus et analysés: 1 RETES, 2 PRUSIA, 3 SAN DURAN, 4 ORTIGA, 5 LA RANCHERITA (voir la localisation des profils sur la même Fig. 4).

(ii) Les analyses ont permis de calculer les caractéristiques hydrophysiques de ces sols puis les pressions P_w exercées par la charge hydrique $W_{pt} - 0,66.W_{cc}$ sur une surface horizontale et pour une tranche de sol limitée arbitrairement à 150cm, approximation pouvant être levée par des relevés plus détaillés rendant compte des épaisseurs réellement soumises aux surcharges hydriques saisonnières (cf. conclusion). Ces données sont résumées sur le tableau III.

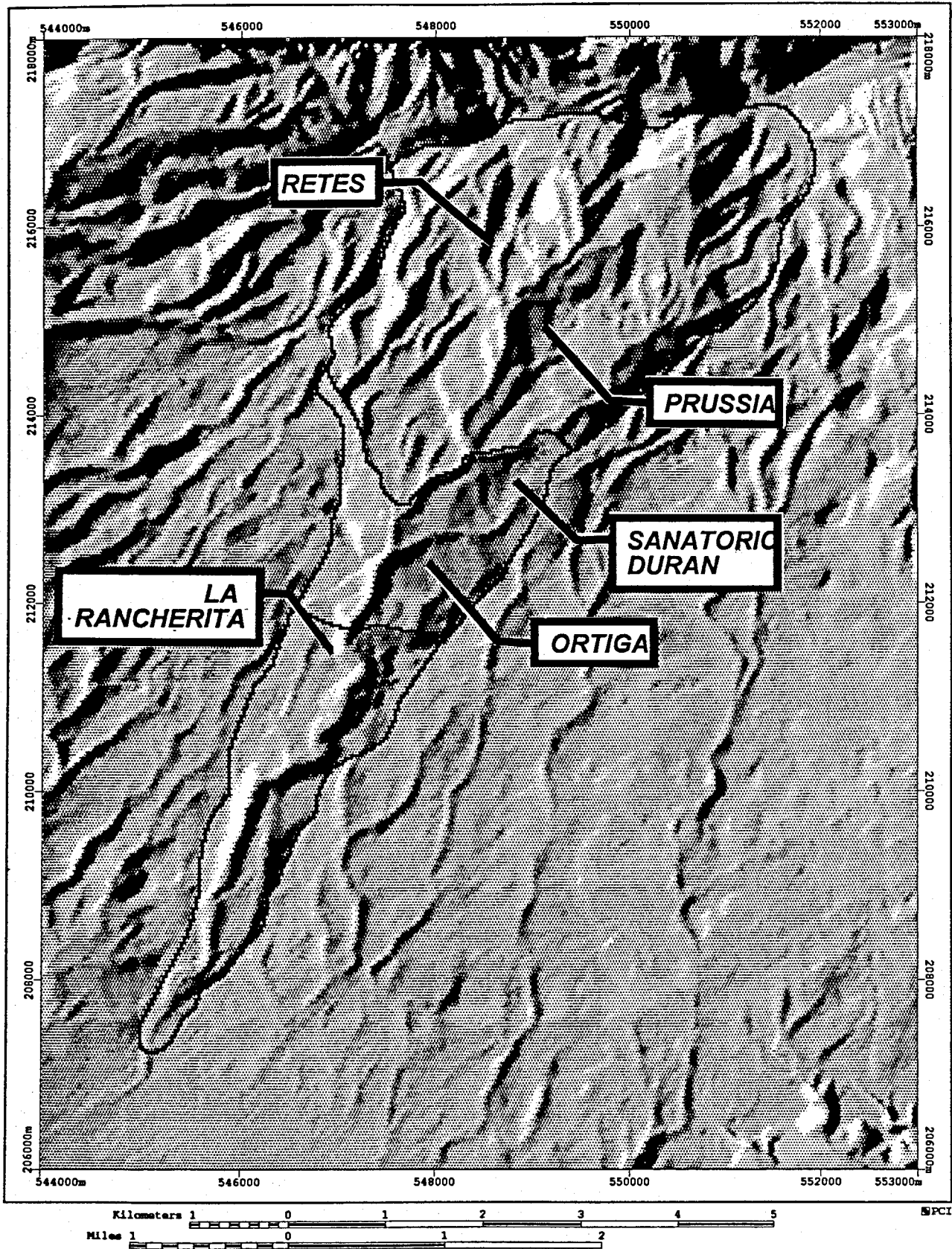


Figure 4. Modèle Numérique de Terrain ombré montrant les trois zones morphopédologiques et la localisation des profils représentatifs

Tableau III: Pression P_w (kg m^{-2}) exercée par la colonne d'eau $W_{px} - 0,66.W_{cc}$ sur une surface horizontale (analyses physiques sur échantillons de sols "secs à l'air")

1 RETES						
Profondeur (cm)	Epaisseur (cm)	A/L/S %	Porosité tot. %	0,66 CC %	Charge mm.cm^{-1}	Pression kg.m^{-2}
0-25	25	7/30/63	66,16	12,59	5,36	134,00
25-60	35	3/13/84	56,52	2,88	5,36	187,60
60-150	90	5/33/62	65,51	14,22	5,12	460,80
		Total	782,40			
2 PRUSIA						
Prof. (cm)	Epais. (cm)	A/L/S %	Porotot %	0,66 CC %	Charge mm.cm^{-1}	Pression kg.m^{-2}
0-22	22	7/30/63	63,07	15,30	4,78	105,16
22-65	43	11/28/61	61,53	15,26	4,53	194,79
65-150	35	9/35/56	64,63	18,23	4,64	394,40
		Total	694,40			
3 DURAN						
Prof. (cm)	Epais. (cm)	A/L/S %	Porotot %	0,66 CC %	Charge mm.cm^{-1}	Pression kg.m^{-2}
0-30	30	7/31/60	60,77	16,37	4,44	132,20
30-60	30	9/31/60	54,19	15,02	3,92	117,60
60-150	40	11/29/60	60,07	19,17	4,09	368,10
		Total	618,90			
4 ORTIGA						
Prof. (cm)	Epais. (cm)	A/L/S %	Porotot %	0,66 CC %	Charge mm.cm^{-1}	Pression kg.m^{-2}
0-22	22	17/29/54	65,75	22,70	4,31	94,82
22-50	28	13/29/58	57,69	18,78	3,99	111,72
50-150	100	17/33/50	65,27	23,67	4,16	416,00
		Total	622,54			
5 LA RANCHERITA						
Prof. (cm)	Epais. (cm)	A/L/S %	Porotot %	0,66 CC %	Charge mm.cm^{-1}	Pression kg.m^{-2}
0-30	30	21/35/44	60,45	25,92	3,45	103,50
30-80	50	21/29/50	62,97	24,09	3,89	194,50
80-150	70	21/33/46	62,59	22,63	4,00	280,00
		Total	578,00			

Enfinement trois profils ont été sélectionnés comme les plus représentatifs des trois zones morphopédologiques: les profils de PRUSSIA pour la zone supérieure (I), de ORTIGA pour la zone médiane (II), et LA RANCHERITA pour la zone basse (III). La carte des isoriques de la figure 6 a été construite à partir des données de ces profils.

Les abaques de la figure 5 montrent les variations de F_t avec la pente

(i) pour cinq sols du volcan Irazu: RETES, PRUSIA et DURAN sont des Udi- à Ustivdrands, ORTIGA et LA RANCHERITA sont des Fulvudands,

(ii) une comparaison est faite avec trois sols africains: STPAUL est un Haplustalf, ou Ferrugineux tropical lessivé à texture 27/19/54 sans EG, KORHOGO est un Ustox, ou

Ferrallitique moyennement désaturé remanié de texture 53/13/34 et 45%EG, TAI est un Orthox, ou Ferrallitique fortement désaturé hydromorphe de texture 42/15/43 avec 7%EG.

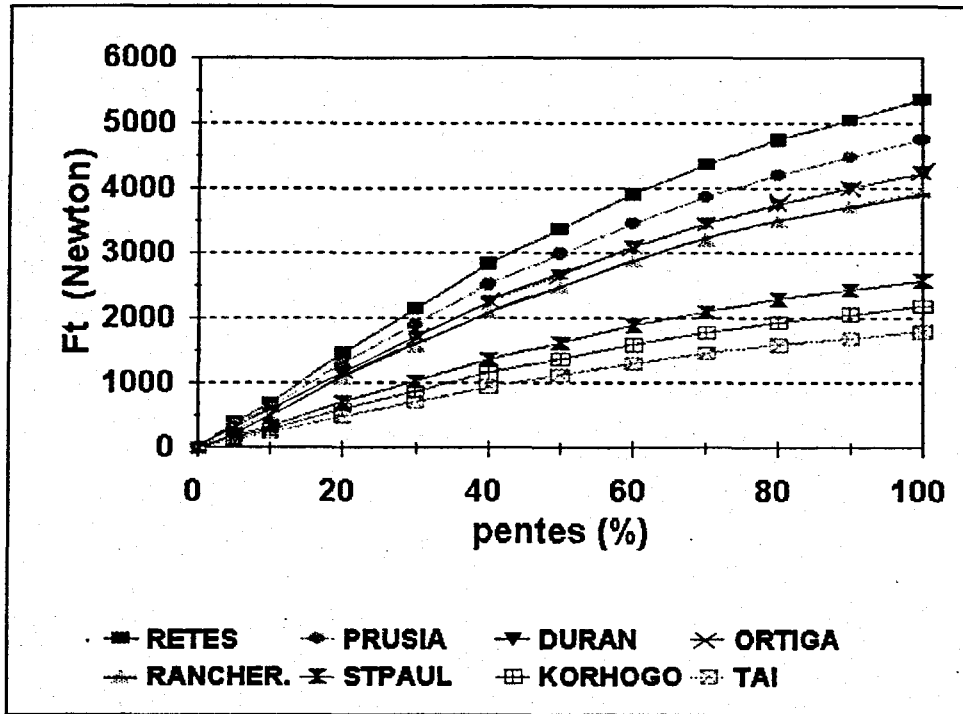


Figure 5: Forces tangentielles de cisaillement F_t des différents sols résultants de leurs caractéristiques hydriques et des pentes (analyses physiques sur échantillons de sols secs à l'air)

Toutes les données présentées sont obtenues à partir de l'analyse d'échantillons "secs à l'air", de ce fait la carte des isorisques générée (Fig. 6) ne représente qu'un classement relatif des domaines pédologiques les uns par rapport aux autres. Il conviendrait donc d'optimiser le modèle en tenant compte des capacités réelles des réservoirs soit en produisant des résultats d'analyse sur sols maintenus humides (mais pas de laboratoires proches), soit en connaissant a posteriori les taux de gels allophaniques des différents horizons et leurs effets sur la dynamique des réservoirs dont on connaîtrait les deux capacités en sec et en humide.

3.2.2 Utilisation du SIG.

L'application de notre méthode à l'aide d'anciennes techniques manuelles présenterait un inconvénient majeur: les cartes de pente traditionnelles établissent non pas la pente mais des classes de pente. Quelle valeur de a doit-on alors utiliser dans l'équation 2? En assignant à a la valeur moyenne de la pente pour chaque classe (ce qui nous vient naturellement à l'esprit), on sous-estime le risque pour certaines zones. De plus, de par la faible résolution spatiale des cartes de pente traditionnelles, certains points à haut risque peuvent passer inaperçus.

Ces inconvénients disparaissent avec l'utilisation d'un système d'information géographique (SIG). En effet les SIG permettent une représentation numérique de la topographie, le Modèle

Numérique de Terrain (MNT), à partir duquel des paramètres morphologiques tels que la pente du terrain peut être facilement calculés. Les MNT sont aussi utiles pour tracer le réseau de drainage, délimiter les bassins versants et déterminer l'aire drainée en un point et la courbure de la pente (lesquels peuvent être reliés à l'humidité du sol). Soulignons que l'ORSTOM a développé une chaîne de programmes spécialisés dans la production et le traitement de MNT, appelée DEMIURGE (Depraetere, 1993).

Nous avons utilisé le SIG matriciel IDRISI (version 4.1), développé à l'Université de Clark aux Etats Unis. Ce SIG de coût modeste comporte plus de 170 programmes regroupés en modules permettant la numérisation (saisie de cartes), la modélisation géographique matricielle et la conversion de formats de données, la génération de MNT à partir de courbes de niveau et calcul de la pente, de l'aspect et la délimitation de bassins versants, le traitement numérique d'images (affichage, classifications d'images satellitaires) et l'aide à la prise de décision (ensembles flous, matrices de comparaison par paires et analyse multi-critère et multi-objectif).

La zone d'étude est couverte par une carte topographique à échelle 1:50000 datant de 1981, pour laquelle des courbes de niveau ont été tracées de 20 mètre en 20 mètres. La création du MNT est la plus délicate car de celui-ci dépend la précision des prédictions de notre modèle. Elle s'est faite en 4 étapes :

- 1) Numérisation des courbes de niveau dans une fenêtre rectangulaire comprenant la zone d'étude; chaque courbe reçoit un code égal à l'élévation qu'elle représente.
- 2) Conversion des courbes de niveau à un format matriciel (taille de la cellule: 5x5 mètres);
- 3) Génération du MNT: le programme INTERCON détermine une valeur d'élévation pour chaque cellule de 5x5 mètres, par interpolation entre les courbes de niveau.
- 4) Filtrage par la médiane (fenêtre mobile 3x3) du MNT. Ensuite, compression du MNT à une cellule de 30x30 mètres. Chacune de ces cellules reçoit une valeur d'élévation égale à la moyenne des 36 cellules de 5x5 mètres correspondantes. Cette procédure permet d'éliminer les artéfacts (erreurs à haute fréquence spatiale) reliés à l'interpolation, qui apparaîtraient sur la carte de pentes. Le MNT ombré artificiellement est représenté sur la figure 4.

Le traitement SIG associant des informations géoréférencées "sol et leurs limites" - "pressions hydrostatiques à saturation" - "sinus des pentes classifiées" permet de sortir finalement une carte des isorisques de glissements de terrains (Fig. 6) qui sont les forces tangentielles de cisaillement F_t exprimées en Newton.

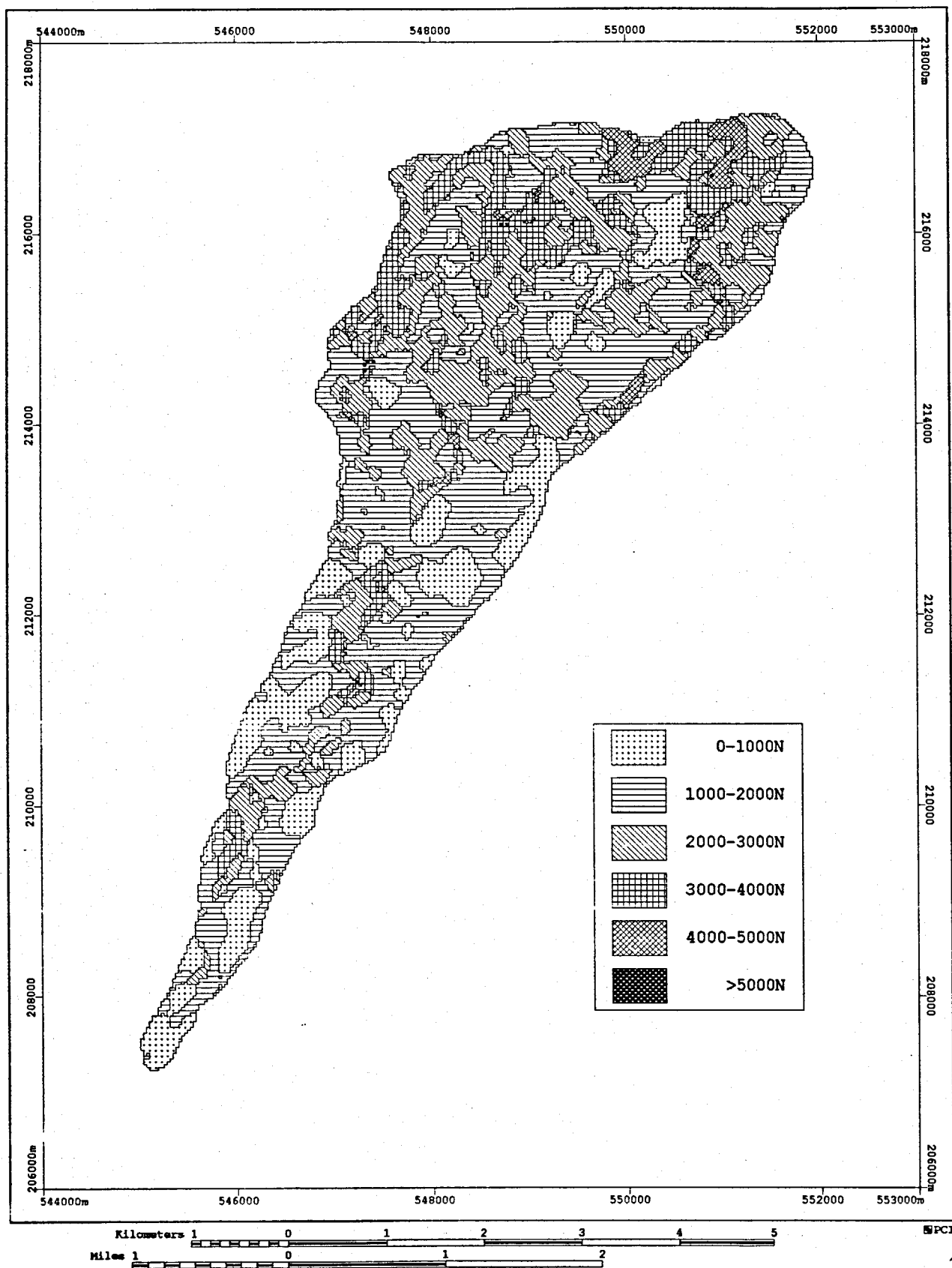


Figure 6. Carte des isorisques de glissements de terrain (généralisée avec un filtre de la modale dans une fenêtre mobile de 5x5).

Conclusion: amélioration du modèle, perspectives ouvertes

Ce modèle de prévision des risques de glissement de terrain en région de cordillère volcanique peut être amélioré de différentes façons:

(i) en passant d'un bilan hydrique annuel au bilan mensuel ce que permettent les informations climatiques de la région, ceci ajoutera une dimension temps particulièrement intéressante pour prévoir pour une zone donnée, les époques de risques maximums (ii) des cartes d'isoseismicité peuvent être ajoutées au SIG en apportant une attention plus particulière aux sols susceptibles de perdre leur rigidité par thixotropie, (iii) les informations pédologiques, voire géotechniques, peuvent être affinées notamment en ce qui concerne les épaisseurs de matériaux considérés comme hydriquement homogènes, ce qui revient à porter une attention sur les limites de ces horizons ou dépôts,

(iv) la détermination des capacités des réservoirs poraux des sols doit être faite *in situ* ou dans des conditions d'analyse permettant de maintenir intact l'agencement méso- et microstructuraux d'une phase minérale à plus ou moins forte composante allophanique. On passerait alors de la notion de risques relatifs, à celle de risques réels, et l'on a vu qu'il conviendrait alors de multiplier par 3 ou 4 les surcharges hydriques saisonnières profondes donc les contraintes que celles-ci génèrent.

(v) l'introduction de paramètres morphologiques de paysages (par exemple courbure de la pente -Niemann et Howes, 1991), de paramètres hydrologiques (par exemple aire drainée en chaque point) et de l'effet de la couverture du sol, et la validation statistique à partir de cartes de glissements de terrain inventoriés.

L'intégration des informations de la physique des sols et l'utilisation conjointe d'un outil SIG bien maîtrisé paraissent inévitable dans le difficile travail de prévision des risques de glissement de terrain. Ce travail n'est qu'un rapport d'étape pour voir justifier un programme de recherche dans un domaine extrêmement sensible en Amérique Centrale.

Bibliographie

A. Burgos et G. Hymann, 1995. *Communication personnelle*.

J. Collinet et M. Mazariago, 1994. *Rehabilitación de los suelos volcánicos degradados utilizando abonos orgánicos*. ORSTOM/CATIE, El Salvador - Amérique centrale, 10p.

F. Colmet Daages, 1970. *Étude de quelques sols dérivés de cendres volcaniques du Costa Rica*. Publication ORSTOM/Antilles n°80 (Centre ORSTOM de Martinique), 60p.

C. Depraetere, 1993. *DEMIURGE, Digital Elevation Model In Urgency. TOPOLOG-OROLOG-LAMONT*. Fiches techniques.

H. Jeffrey Leonard, 1986. *Recursos naturales y desarrollo económico en América central. Un perfil ambiental regional*. IIED (Instituto Internacional para el Ambiente y el Desarrollo), 267p.

G. Hartshorn et al, 1982. *Costa Rica. Country Environmental Profile. A field study.* Tropical Soil Center, USAID, 123p.

S. Mora, 1987. *Análisis Preliminar de la amenaza y vulnerabilidad potenciales generadas por el río reventado y el deslizamiento de San Blás, Cartago, Costa Rica.* Tecnología en marcha, 9 (1), 19-37.

K. O. Niemaa et D. E. Howes, 1991. *Applicability of digital terrain models for slope stability assessment.* ITC Journal 3, 127-137.

O. Sanchez, 1993. *Determinación de áreas críticas mediante sistemas de información geográfica, cuenca del río reventado, Costa Rica.* Thèse de Maîtrise, CATIE. 187p.