

ROGNANT, L. (2000): *Triangulation Contrainte de Delaunay: Application à la représentation de MNT et à la fusion de MNT radar*. Thèse de Doctorat de l'Université Joseph Fourier (Grenoble I) soutenue le 21 Septembre.

ROUSSEAU, F. (2003): *Etude de la représentation du relief sur les application*. Revue internationale de géomatique. Numéro 4/2003 édition Lavoisier.

SHEWCHUK, J. (1996): *Triangle: Engineering a 2D Quality Mesh Generator and Delaunay Triangulator*, First Workshop on Applied Computational Geometry (Philadelphia, Pennsylvania), pages 124-133, ACM, May.

WECHSLER, S. (1999): *Results of the DEM User Survey*, <<http://web.syr.edu/~srperlit/survey.html>>

WEIBEL, R., HELLER, M.: *Digital Terrain Modeling*, in "Geographical Information Systems" pp. 269-97, ed. by David J. Maguire et. al., Longman Group, UK.

WISE, S. (2000): *Assessing the quality for hydrological applications of digital elevation models derived from contours*. *Hydrological Processes*. 14, 1909-1929.

WOOD, J. (1996): *The Geomorphological Characterization of Digital Elevation Models*, Ph.D. Dissertation, Department of Geography, University of Leicester, Leicester, UK.

ZHU, H. (1999): *Flat feature processes from triangulated irregular networks for hydrological modeling*, In conference actes of Geocomputation, Fredericksburg, VA, USA

¹Institut Géographique National
Laboratoire COGIT, Paris
²Université de Bucarest
Faculté de Géographie
Dep. de Géomorphologie

Imagerie satellitale et suivi du risque naturel en Roumanie: glissement de terrain sur la vallée de Prahova

Abdelkader ABDELLAOUI¹, André OZER²,
Ileana Georgeta PĂTRU, Mihai IELENICZ³

Mots clef: Imagerie satellitale, risques naturels, action anthropique, glissement, Landsat TM, SPOT
Aportul imaginilor satelitale în studiul alunecărilor de teren (Valea Prahovei). Studiul imaginilor satelitale în analiza alunecărilor de teren evidențiază: eterogenitate spațială, delimitarea arealelor, estimarea reactivării alunecărilor de teren. L'ACP (analiza componentelor principale) este tehnica matematică utilizată în interpretarea imaginilor satelitale ce permite limitarea unui sistem complex de corelații. În cazul imaginilor satelitale procesul constă în construirea de canale de decorelare pentru a evidenția la nivel de pixel încălcarea spațială a arealului studiat.

Introduction

La Roumanie est exposée à divers risques naturels parmi lesquels les glissements représentent la forme la plus fréquente. L'apparition d'un glissement de terrain est le résultat de la conjonction de plusieurs facteurs qui peuvent être: permanents (peu ou pas variables dans le temps; dus à la présence de plans de rupture préférentiels par exemple, pente de terrain, etc.) ou semi permanents (évolution dans le temps due à la teneur en eau des matériaux, à l'érosion en bas des pentes, à l'action anthropique). Lorsque l'un des facteurs subit une forte variation dans un laps de temps très court, il peut engendrer une déstabilisation du matériau et provoquer un glissement ou réactiver un glissement préexistant; il peut s'agir, par exemple, d'un épisode pluvieux exceptionnel ou d'une action anthropique.

Ces deux facteurs (pluviométrie et action anthropique) ont effectivement subi une forte variation sur une échelle de temps courte pour la vallée de Prahova; en effet, l'analyse de la quantité moyenne des précipitations entre 1990 et 1996 montre une alternance des années sèches (1990—36,93 mm; 1991—31,1 mm; 1994—49,1 mm) et des années pluvieuses (1992—79,89 mm; 1993—61,54 mm; 1995—62,9 mm) avec un maximum très

marqué en 1997 (pour la seule journée du 3 août 1997—mois sec en général, il est tombé 94.3 mm de pluie, soit 2 à 3 fois la moyenne mensuelle des autres années). D'autre part, au niveau du facteur anthropique, le nombre des constructions à Breaza est passé de 820 bâtiments, en 1905 à 8 486 bâtiments, en 2002, soit une multiplication par un facteur supérieur à 10 sur un intervalle de 97 ans; de plus depuis 1996, les constructions deviennent de plus en plus imposantes, ce qui augmente la pression sur le sol. Les conséquences enregistrées sont significatives pour la région de Breaza: 1 100 fermes affectées, 8 maisons détruites; un chemin détruit par endroits et de nombreux terrains situés sur le versant affectés par les vagues de glissement.

Ce constat nous amène à nous interroger sur la faisabilité d'un système d'aide à l'estimation et au suivi du phénomène de glissement et sur l'apport de l'imagerie satellitale pour la réalisation de cet outil.

L'image satellitale enregistre la réponse de la surface à une excitation électromagnétique extérieure pouvant se situer dans l'une des gammes de longueurs d'onde du visible ou du proche infra rouge, de l'infra rouge thermique ou des hyper fréquences. Le phénomène de

glissement se manifeste par des variations de l'état de surface et serait donc appréhensible à partir de l'imagerie satellitale pour peu que l'échelle de variation corresponde à la résolution spatiale de l'image.

I. L'imagerie satellitale et son usage pour délimiter les zones de glissement

I.1. Impact du glissement de terrain sur l'état de surface. Le glissement de terrain est un phénomène dynamique se traduisant généralement par une modification de l'état de la surface du sol: déplacement ou accumulation de masse, altération de la couverture végétale, changement d'organisation de l'espace; sa mise en évidence nécessite ainsi des observations multitudes. Les effets du glissement peuvent également se ressentir sur la végétation, le bâti, les routes et voies de communication.

La couverture végétale peut être observée sur l'image satellitale et l'on pourra, théoriquement estimer un taux de couverture; il faudra cependant plusieurs images de la zone d'étude à plusieurs dates pour pouvoir déduire s'il y a effectivement variation du taux de couverture et si cette variation est due à un phénomène de glissement. Les routes sont normalement détectées sur l'image; le suivi du tracé pourra éventuellement nous renseigner sur un effondrement probable, une coupure. Le bâti isolé par contre ne pourra pas être observé sur une image moyenne résolution (Landsat TM ou SPOT 20m).

Ces considérations nous permettent d'orienter nos traitements vers la détection d'objets observables (sol, végétation, routes et zones urbanisées).

I.2. Les premiers traitements. Le premier travail consiste à délimiter la zone d'étude sur l'image satellitale; la difficulté est d'autant plus grande que la zone à délimiter est petite; à titre indicatif notons qu'une scène Landsat TM couvre une superficie de $130 \text{ km} \times 130 \text{ km}$ alors que notre zone d'étude ne s'étend que sur $3 \text{ km} \times 1,5 \text{ km}$.

Une fois la zone délimitée on effectue une extraction de la fenêtre correspondant au site

d'étude; une amélioration de contraste s'avère alors généralement nécessaire. Cette amélioration consiste à étirer ou dilater l'histogramme des occurrences de niveaux de luminances (en réalité, les comptes numériques). Rappelons à cet effet que le signal enregistré par les capteurs est codé sur 8 bits, c'est-à-dire une échelle de valeurs s'étendant de 0 à 255. Cependant, les conditions de prise de vue, notamment lorsque les conditions atmosphériques provoquent une forte atténuation du signal, réduisent parfois considérablement la dynamique de l'image. Seule une partie des 256 valeurs disponibles de tons de gris est utilisée. La visualisation de l'image à l'écran (ou sur imprimante) est alors terne, sans contrastes et difficile à « voir » et à interpréter. La transformation consiste alors à distribuer les barres de fréquences sur l'ensemble de la gamme disponible. Les figures suivantes illustrent ce principe (Fig. 1, 2).

Nous avons par la suite réalisé une composition colorée à partir des canaux bleu, vert et rouge de Landsat (canaux TM1, TM2 et TM3) pour lesquels une amélioration de contraste par étalement de la dynamique a été réalisé au préalable; nous obtenons l'image colorée de la figure (2) sur laquelle nous avons positionné notre zone d'étude.

I.3. La décorrélation de l'information: l'Analyse en Composantes Principales. Une image multispectrale d'une scène est constituée d'enregistrements suivant différents canaux (Fig. 3) spectraux, caractéristiques du satellite d'observation (Landsat, SPOT). Les images d'une même scène enregistrées suivant les différentes bandes spectrales du capteur sont hautement corrélées (redundance de l'information). Compte tenu de l'abondance d'informations à traiter, le but de l'analyse en composantes principales (ACP) est de condenser les données originelles en de nouveaux groupements de façon à ce qu'ils ne présentent pas de corrélation entre eux et soient ordonnés en terme de pourcentage de variance apportée par chaque composante.

L'analyse en composantes principales (ACP) est une technique mathématique per-

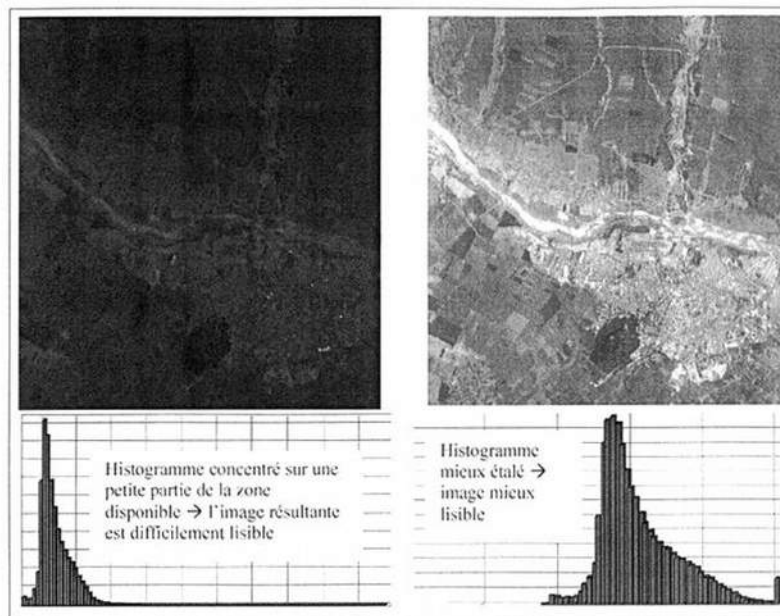


Figure 1. Amélioration de la dynamique par d'histogramme



Figure 2. Composition colorée TM1, TM2, TM3

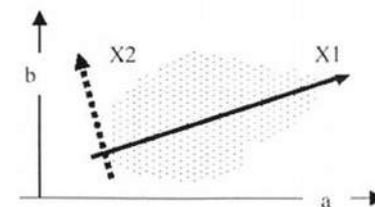


Figure 3. a, b axes initiaux; X1, X2 nouveaux axes

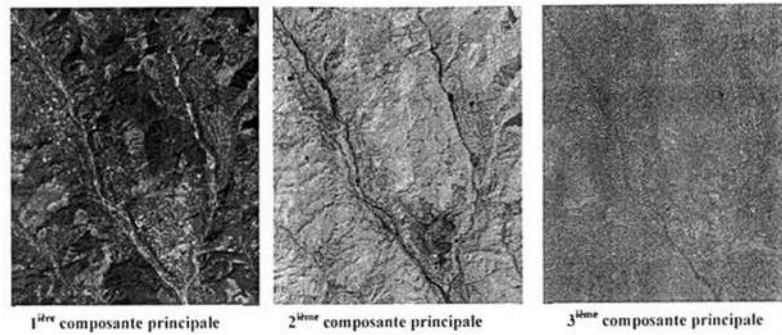


Figure 4. Les trois premières composantes principales

mettant de réduire un système complexe de corrélations en un plus petit nombre de dimensions. Géométriquement, le processus de la mise en facteurs revient à placer des axes dans un nuage de points. Un premier axe, encore appelé première composante principale, sera placé selon l'allongement privilégié du nuage. Par convention, nous représentons la deuxième dimension par une droite perpendiculaire à la première composante principale. Ce deuxième axe, ou deuxième composante principale, se définit comme la droite qui « explique » (le mot n'a pas ici de signification causale) la plus grande partie de l'information restante (aucune autre droite qui « expliquerait » autant ou davantage ne pourrait être tracée perpendiculairement à la première composante principale. Les droites suivantes seraient perpendiculaires aux axes précédents et contiendraient de moins en moins d'information. L'analyse en composantes principales est ainsi une méthode de réduction du nombre de caractères permettant des représentations géométriques des individus et des caractères; dans le cas de l'image satellitaire multibande, le processus consiste à construire de nouveaux canaux décorrélés entre eux et tels que les deux ou trois premiers contiennent jusqu'à 95% de l'information totale. Cette réduction ne sera possible que si les p caractères initiaux ne sont pas indépendants et ont des coefficients de corrélation non nuls.

L'ACP est une méthode factorielle car la réduction du nombre des caractères ne se fait

pas par une simple sélection de certains d'entre eux, mais par la construction de nouveaux caractères synthétiques obtenus en combinant les caractères initiaux au moyen des « facteurs ». C'est une méthode linéaire car il s'agit de combinaisons linéaires.

Nous avons appliqué cette méthode à la zone de Breaza et nous obtenons les résultats suivants:

Comme on doit s'y attendre, parmi les six nouveaux canaux de l'analyse en composantes principales, seuls les deux premiers nous apportent de l'information utile: sur la première composante principale est concentrée la quasi totalité de l'information présente sur les six canaux originaux (TM1, TM2, TM3, TM4, TM5 et TM7); la deuxième composante principale met en évidence le réseau hydrographique; les deux branches de cours d'eau sont très nettement visibles en noir sur l'image; la troisième composante principale commence déjà à ne plus contenir beaucoup d'information; dans ce cas précis elle est quasiment inexploitable; il arrive cependant que la troisième composante apporte une partie complémentaire de l'information (Fig. 4).

Nous avons amélioré la première composante principale par un étallement de dynamique ce qui nous a permis de délimiter de façon plus précise les trois agglomérations présentes sur l'image ainsi que la zone de glissement (Fig. 5).

Une combinaison linéaire des canaux ACP1 et ACP2 permet d'affiner l'appréhension des zones urbanisées; on voit ainsi de façon très nette la morphologie de Campina et Breaza; le tracé des voies est très visible malgré la résolution de l'image (30 m) et l'importance de ces deux agglomérations (donc des voies).

Cette image a été obtenue par l'algorithme suivant:



Figure 5. Amélioration de contraste sur ACP1

Pour tenter de mettre en évidence les surfaces bâties, nous avons isolé les pixels de forte réflectance (il s'agit en fait des pixels dont le compte numérique est élevé, ce qui devrait correspondre aux objets les plus réfléchissants: lit majeur, clairière, construction, etc.); nous obtenons l'image suivante (Fig. 6).

Sur cette figure, les voies de communication (routes, chemins) ne sont plus visibles en tant que linéaires; les lits majeurs des deux branches de fleuve sont nettement visibles (sol calcaire et sable très réfléchissant); les zones bâties apparaissent également en blanc sur cette image; certains bâtiments isolés sont également visibles; par contre le reste du paysage est complètement estompé.

Une autre combinaison des deux premières composantes principales permet d'aller encore plus loin dans l'amélioration de la restitution de l'information; nous avons en effet testé l'algorithme d'amélioration d'images (Fig. 7).

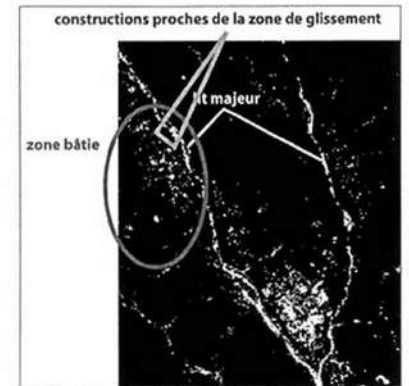


Figure 6. Transformation de la dynamique

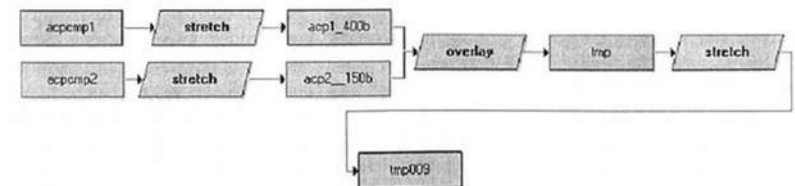


Figure 7. Algorithme d'amélioration d'images

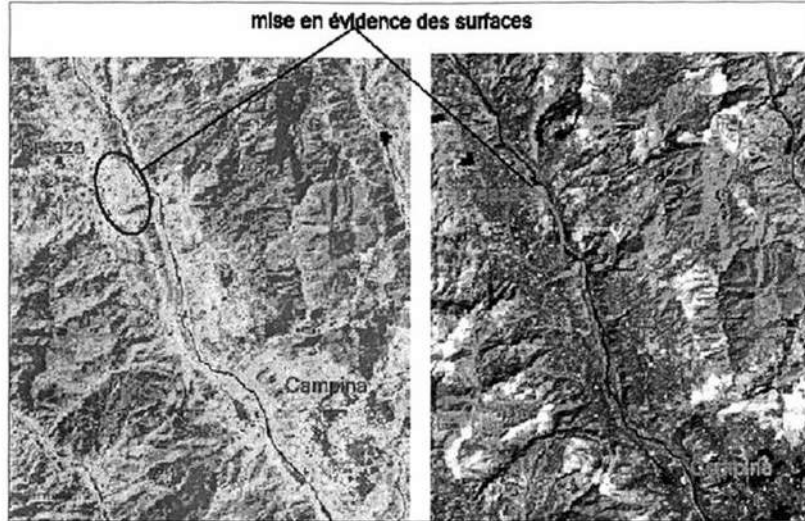


Fig. 8. Le bâti apparaît en rouge sur la visualisation en couleur et en blanc clair sur la visualisation en niveaux de gris.

Cet algorithme nous permet d'obtenir l'image résultat suivante que nous visualisons dans une échelle de niveau de gris et au moyen d'une palette de couleur.

1.4. Géoréférencement et calage. Dans la plupart des projets SIG, on procède tout d'abord à un découpage géographique de l'espace, qui délimite la zone d'étude. La première étape est de géoréférencer cet espace, c'est à dire le délimiter précisément par des coordonnées cartographiques (ou géographiques). C'est cette conformité qui permettra de superposer des plans de diverses natures. Pour assurer cette superposition, les différentes couches d'informations géographiques doivent avoir le même système de projection.

La Terre est un géoïde (en prenant le niveau moyen des mers), c'est à dire une sphère irrégulière, pour la représenter, il faut donc trouver un modèle mathématique qui corresponde le mieux à la surface topographique de la Terre. La surface utilisée est donc un ellipsoïde (dit de révolution), un volume géométrique régulier proche du géoïde. Les Ellipsoïdes de référence sont celui de

Newton au 17e, puis de Clarke dès 1880 et de Hayford depuis 1924. Afin de représenter cet ellipsoïde sur un plan, on utilise différents systèmes de projections:

- conforme de Mercator: conserve les angles mais altère les surfaces (cartes militaires, de navigation)
- équivalente de Lambert: conserve les surfaces mais altère les angles (cartes politiques, démographiques)
- aphyllactique qui altère les angles et les surfaces

Interprétation et conclusion

Les divers traitements des données satellitaires ne suffisent pas, pour un secteur aussi restreint que celui du glissement de terrain de Breaza, pour étudier ce phénomène. Seule l'analyse stéréoscopique classique à partir de photographies aériennes autorise l'étude géomorphologique de tels transports de masse.

Par contre, l'analyse des données satellitaires souligne des facteurs explicatifs de ces glissements comme une grande hétérogénéité du versant de la Prahova à hauteur de Breaza

comme on le voit de façon assez nette sur l'image ASTER de 2003 (Fig. 6). Le graphe 4 montre cette hétérogénéité sur un transect de l'image ASTER 2003, parallèle au lit de la Prahova. Sur l'image ASTER par exemple (Fig. 7, 8) cette hétérogénéité se traduit par une diversité de couleur des pixels due à la juxtaposition de teintes rouges sombre (végétation dense de feuillus), rouge clair (pâturage arboré sur versant) et des zones gris-clair où le minéral domine, témoin de terrains dénudés soit par l'érosion, soit par des surfaces de décrochement, soit encore par des rejets d'inertes par le sommet.

Il faut souligner que les versants « normaux » de la Prahova présentent une couleur rouge sombre homogène témoin de versants boisés en liaison avec la forte pente des versants.

Les images satellitaires mettent aussi en évidence d'autres éléments qui peuvent

mieux expliquer le développement de glissement à cet endroit:

- A la base du versant, le tracé concave de la Prahova au droit du glissement de terrain, permet d'expliquer l'érosion latérale du cours d'eau et donc le sapement à la base du versant.

- Au sommet, le plateau présente une densification croissante de l'habitat (mise en évidence lorsqu'on compare de données multi-sources: photographies aériennes, cartes topographiques et diverses images satellitaires), ce qui exerce une pression sur le versant.

- Enfin, toujours sur le plateau, l'image satellitale souligne l'organisation du réseau routier et surtout l'existence d'une route perpendiculaire au versant et une pente régulière vers celui-ci, qui ne peut que drainer l'eau du nouveau lotissement vers le versant qui, lors de fortes précipitations ne fait qu'accélérer le déclenchement des transports de masse.

BIBLIOGRAPHIE

- DIKAU, R., BRUNSDEN, D., SCHROTT, L., ISBEN, M.-L. (eds.) (1996), *Landslide Recognition. Identification, Movement and Causes*. John Wiley & Sons, Chichester, 274 pp.
- GRECU, Florina (2002), *Risk - prone Lands in Hilly Regions: Mapping Stages*, in *Applied Geomorphology*, edited by R.J. ALLISON, Ed. John Wiley & Sons, Ltd. Chichester, England, p. 49-64, 6 fig., 6 table.
- GRECU, Florina (2002), *Mapping geomorphic hazards in Romania: small, medium and large scale representations of land instability*, *Géomorphologie: relief, processus, environnement*, 2, p. 197-206.
- IELENICZ, M., PĂTRU, Ileana, (1997), *A slope model for the Curvature Subcarpathians, Romania*, in revista *Z. Geomorph N. F. Berlin-Stuttgart*, august, p. 179-184.
- IELENICZ, M., PĂTRU, Ileana, BOGDAN, M. (1999), *Some Geomorphologic Types of Landslides in Romania*, *Transactions Japanese Geomorphological Union*, Volume 20, nr. 3, may, in colaboare p. 287-296.
- IELENICZ, M., PĂTRU, I., GHINCEA, M. (2003), *Subcarpații României*, Editura Universitatii București.
- TERHORST, B., KIRSCHHAUSEN, D. (2001), *Legends for mass movements in the MABIS-Project*. *Zeitschrift für Geomorphologie*, Supplement Band 125, p. 177-192.
- TURNER, A.K., SCHUSTER, R.L. (eds.) (1996), *Landslides: investigation and mitigation*, Transportation Research Board, Special Report 247, National Research Council. National Academy Press, Washington D.C., 673 p.

¹Université Paris 12

²Université de Liège

³Université de Bucarest