Télédétection, 2006, vol. 6, n° 3, p. 215-231
© 2006 CONTEMPORARY PUBLISHING INTERNATIONAL
Publié sous l'enseigne *Éditions Scientifiques GB*

APPLICATION DE LA DÉTECTION DES CHANGEMENTS À L'ÉTUDE DE LA DYNAMIQUE DE LA VÉGÉTATION DES MONTS DE BUCEGI (CARPATES MÉRIDIONALES, ROUMANIE)

Bogdan MIHAI, Ionut SAVULESCU, Ionut SANDRIC et Razvan OPREA

Université de Bucarest, Faculté de géographie,
07000 boulevard N. Bălcescu no 1, Bucarest, Roumanie.
Téléphone / télécopieur : + 40-21-315.30.74 ;
courriel : bogdan@geo.unibuc.ro ; savulescui@yahoo.com ; sandricionut@yahoo.com ;
opreaconstrazvan@yahoo.com

Soumis le 9 août 2005 ; revise le 3 février 2006 ; accepté le 31 octobre 2006

L'étude des transformations de l'étagement de la végétation des monts de Bucegi a été développée pour apprécier les changements les plus importants des paysages durant la dernière décennie. L'analyse a été faite sur des mosaïques d'images d'été de TM et de ETM+ de Landsat de 1989-1990 et de 2000 provenant de la base de données de la GLCF (Global Land Cover Facility). Après des corrections radiométriques et topographiques, des classifications thématiques dirigées (maximum de vraisemblance) de la végétation ont été réalisées. La différence des deux images satellitaires montre une forte régénération naturelle des hêtraies au cours de cette décennie. Deux types d'analyse pour compléter le portrait de cette évolution ont été ajoutés. L'érosion des sols a été évaluée au moyen de la différence entre les indices NDVI et au moyen de classifications thématiques des zones sans végétation. On peut conclure à une intensification de l'érosion sur les plateaux structuraux des Bucegi à cause du tourisme mal organisé et de l'existence de plus en plus d'avalanches sur les escarpements ensoleillés.

Mots clé : Bucegi, Landsat, classification dirigée, normalisation topographique, érosion, évolution du couvert végétal, tourisme

APPLICATION OF CHANGE DETECTION TO THE STUDY OF VEGETATION DYNAMICS IN THE BUCEGI MOUNTAINS (SOUTHERN CARPATHIANS, ROMANIA)

The Bucegi Mountains represent one of the most dynamic touristic area in the Romanian Carpathians. This remote sensing based analysis focuses on the use of two Landsat TM and ETM+ summer mosaics downloaded from the GLCF (Global Land Cover Facility) database and covering the period between 1989 / 1990 and 2000. After applying radiometric and topographical corrections, supervised classifications (maximum likelihood) and image differences were performed on two classifications. The results confirm the natural regeneration of beech forest areas during this decade. The analysis also included the differenciation of the NDVI for both mosaics. This confirmed the intensification of the vegetation cover quality decrease, especially on the high structural plateaus where dwarf pines are replaced by pastures and barren grounds. Erosional features within the landscape are related to the uncontrolled traffic along chaotic trails as well as the intensification of avalanches and rockfalls on the sunny steep slopes. The recent real estate boom in Sinaia and Busteni-Poiana Tapului was confirmed by the mapping of eroded areas through image difference change detection.

Key words : Bucegi, Landsat, supervised classification, topographic normalization, erosion, vegetation evolution, tourism.

1 . INTRODUCTION

Les régions montagneuses ont vraiment attiré l'intérêt scientifique des professionnels de la télédétection malgré les difficultés liées à l'utilisation d'images satellitaires dans ce milieu (Dedieu, 1993). Les documents internationaux, tel que l'Agenda 21 de Rio de Janeiro, en 1992, insistent sur la fragilité des environnements montagnards dans le contexte des changements climatiques (Beniston, 2000, 2003) et sur leur dégradation qui résulte de la surexploitation à cause de la grande énergie potentielle de ces régions (Delannoy et Rovéra,1996).

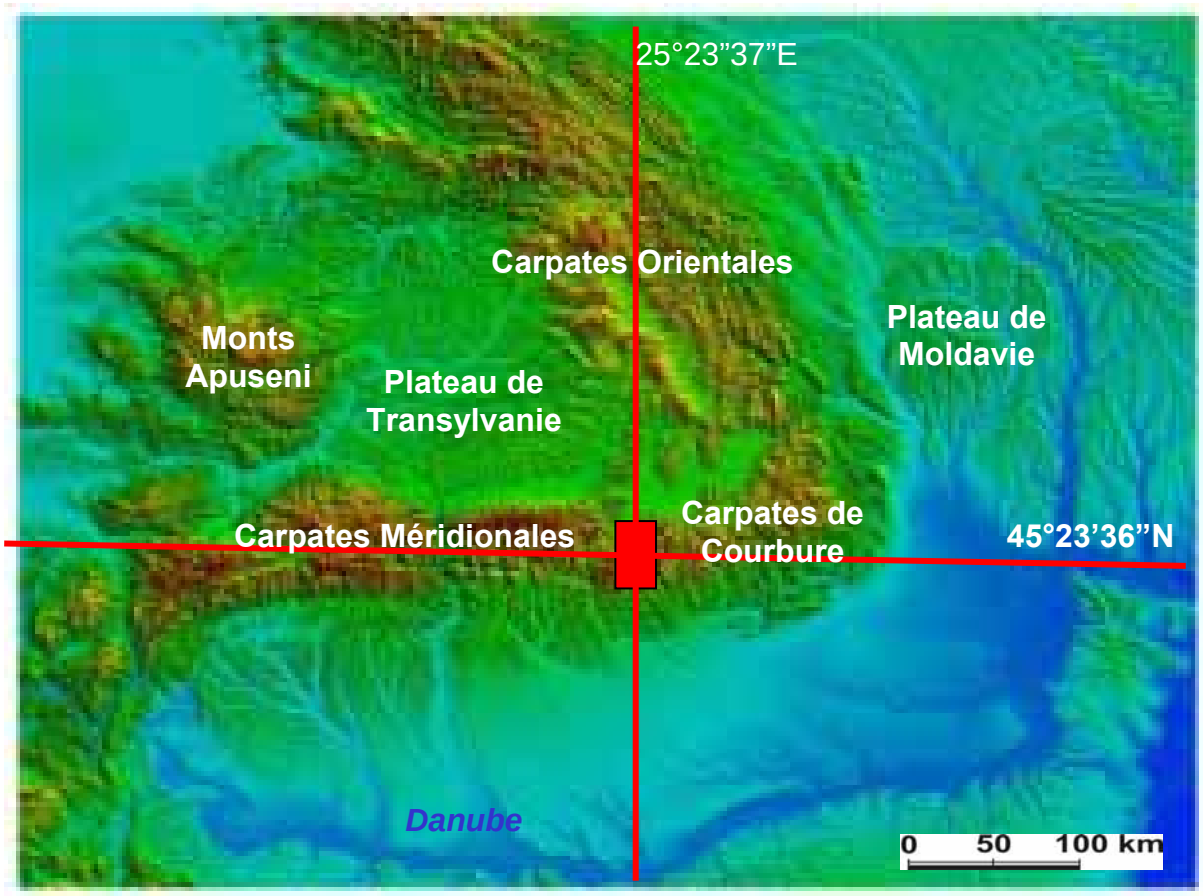
L'analyse diachronique des paysages est une des méthodes les plus importantes pour l'étude des changements environnementaux (Haynes-Young, 2000). Pour les monts de Bucegi, la procédure de détection des changements a été adaptée aux images des capteurs de Landsat, les seules qui nous étaient accessibles à ce moment. En effet, les images TM et ETM+ de Landsat ont longtemps été utilisées pour analyser la dynamique de la végétation. Ces images ont l'avantage d'une bonne résolution spatiale et d'une grande couverture temporelle (Lillesand *et al*., 2003 ; Short *et al*., 2004). Les images sont aussi accessibles en termes de prix et de qualité. La bibliographie récente est riche en recherches sur l'application de la méthode de détection des changements de la couverture végétale et de l'occupation des terres avec des images des capteurs de Landsat (par exemple Millette *et al*., 1995 ; Toutoubalina and Rees, 1999 ; Rigina *et al*., 1999 ; Lopez *et al*., 2001 ; Woodcock *et al*., 2001 ; Rees *et al*., 2003 ; Tømmervik *et al*., 2003). En Europe de l'Est, Feranec *et al.* (2000) ont intégré des données des capteurs de Landsat avec le système de classification CORINE Land Cover pour faire des cartes généralisées de l'évaluation de la dynamique de l'occupation des terres entre 1976-1991.

L'étude vise l'approche par télédétection de la dynamique des paysages de montagne, la

localisation des espaces avec une dynamique active de la végétation et de la dégradation des terres dans le cadre du massif le plus visité des Carpates. Les monts de Bucegi sont maintenant reconnus comme un parc naturel important des points de vue scientifique et touristique. En Roumanie, c'est la première région montagneuse où l'approche de la détection des changements est utilisée et ce pourrait être un modèle pour une analyse diachronique des paysages.

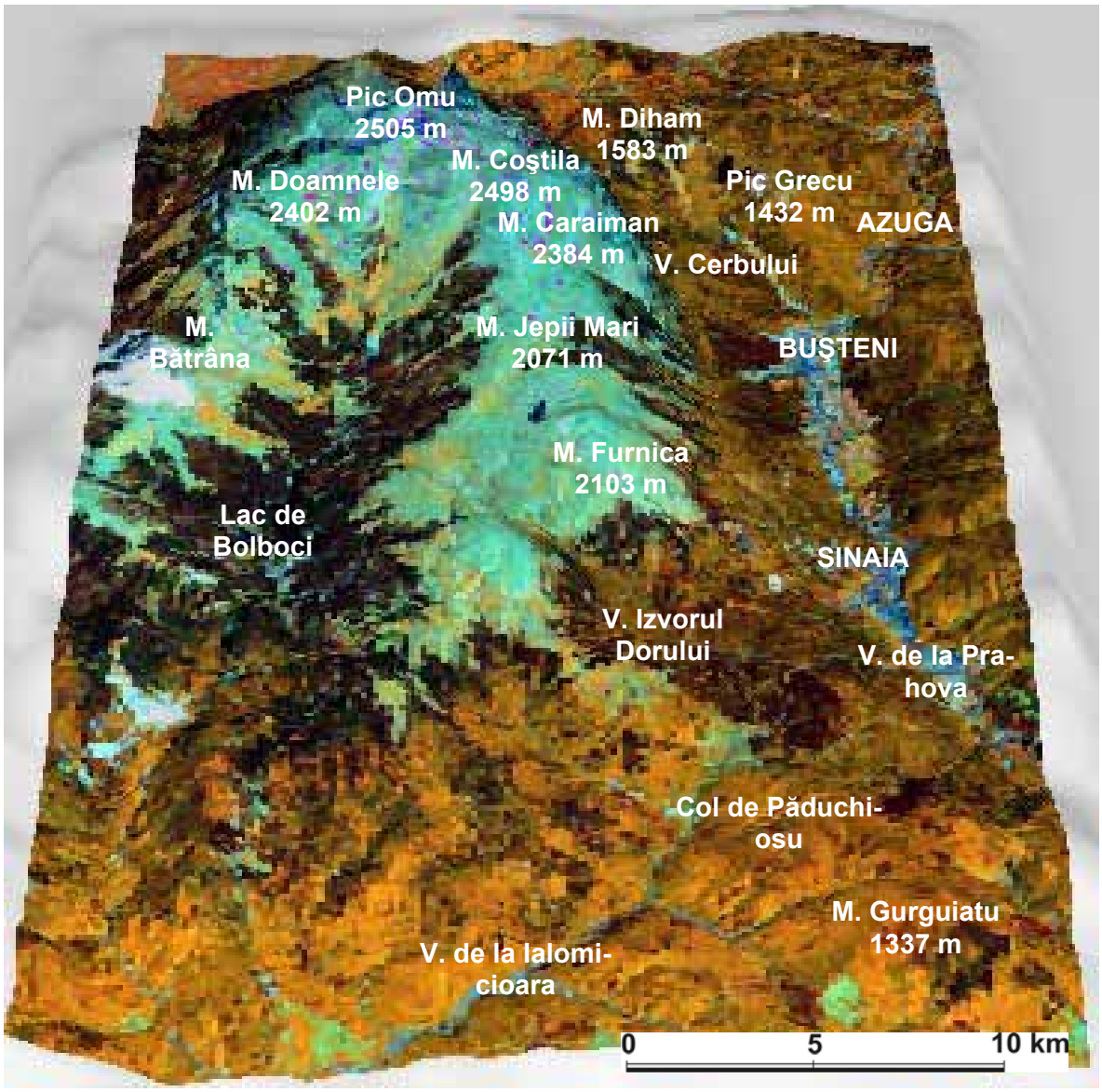
2. SITE D'ÉTUDE

Les monts de Bucegi s'étendent sur une superficie de 395 km², à l'ouest de la Courbure des Carpates (Carpatii de Curbura). Le plus haut pic, celui d'Omu, à 2 505 m d'altitude, est le centre orographique principal de cette montagne (figure 1). Par rapport aux vallées de la Prahova et de la Cerbu, et de la Bratei à l'est ainsi que du couloir de la Bran-Rucar vers le nord-ouest, les monts de Bucegi représentent un synclinal perché avec une énergie de relief de plus de 1 500 m. Au nord des monts de Bucegi, autour du pic d'Omu, un complexe de dix cirques et vallées glaciaires s'est développé pendant le Pléistocène. Maintenant, on y trouve une zone de cryonivation. Avec un tel écart d'altitude, les paysages montrent un très net étagement superposé à une lithologie où les conglomérats, les grès et les calcaires du Mésozoïque dominent.



(MNA : SRTM , 2000. Global Land Cover Facility)

FIGURE 1 : Localisation des monts de Bucegi dans les Carpates roumaines**.** *Location of the Bucegi Mountains in the Romanian Carpathians.*



(M. - Mont; V. - Vallée)

FIGURE 2 : Les monts de Bucegi. MNA réalisé avec des données de ETM+ de Landsat d'août 2000. Les zones de végétation différenciées sur l'image fausses couleurs avec la combinaison des bandes 4-5-3. On peut noter la différence entre les feuillus et les conifères ainsi qu'entre les alpages et les boisés. *Bucegi Mountains. DEM derived from the Landsat ETM+ data of August 2000. The vegetation zones (conifers, deciduous forests and meadows) can easily be differenciated on this false colour 4-5-3 combination.*

La couverture végétale des monts de Bucegi comprend tous les étagements végétaux des Carpates méridionales (Alpes de Transylvanie, d'après de Martonne, 1981) sur une surface limitée. Les différences dans la végétation sont très visibles sur le MNA (modèle numérique d'altitude) et les données de ETM+ de Landsat (figure 2).

La configuration simplifiée de cet étagement de la végétation montre la situation d'une moyenne montagne tempérée (Chardon, 1989). Le relief (figure 3), le topoclimat et l'influence antropogénique ont généré des situations particulières, illustrées par la configuration de la limite supérieure du boisé et le rapport feuillus-conifères dans les vallées de la Prahova et de l'Ialomita. En même temps, on observe l'asymétrie entre les versants sud, où les hêtraies dominent, et l'ubac, où les conifères dominent. L'étagement de la végétation dans les monts de Bucegi comprend :

- l'étage alpin à plus de 2 200-2 250 m d'altitude, avec des alpages de *Carex curvula,* de *Festuca supina,* de *Juncus trifides*, etc. ;
- l'étage subalpin au-dessus de la limite supérieure du boisé, jusqu'à 2 000-2 250 m d'altitude, où le Pin nain *(Pinus mugo)* domine et s'est associé

avec *Juniperus nana*, *Vaccinum myrtillus*, *Vaccinum vitis-idaea*, *Nardus stricta*, *Festuca supina*, etc. ;

- les boisés de conifères entre 1 400-1 500 m et 1 800 m d'altitude ; des facteurs d'importance locale ont rehaussé la limite supérieure du boisé jusqu'à 1 860 m en ubac ; en adret, les boisés commencent au-dessus de 1 400-1 500 m à cause du déboisement pour les pâturages ; l'épicéa *(Picea abies)*, le mélèze et le sapin *(Abies alba)* forment ces grands boisés ;
- les boisés de feuillus sont dominés par les hêtraies *(Fagus silvatica)* ; des boisés mixtes font la transition entre les boisés de feuillus et ceux de conifères ; des conditions locales du sol et du topoclimat aident les hêtraies à monter sur les pentes et, en même temps, les épicéas à descendre les versants.

La littérature sur les monts de Bucegi est riche en ouvrages strictement centrés sur les éléments environnementaux, comme la géologie et la tectonique (Oncescu, 1943 ; Patrulius, 1969), la géomorphologie et la genèse du relief (Vâlsan, 1939 ; Mihailescu, 1963; Micalevich-Velcea, 1961 ; Velcea, 1987), le climat (Stoenescu, 1951 ; Teodoreanu, 1980 ; Paun, 1998), le couvert végétal (Puscaru *et al.*, 1956 ; Beldie, 1967) et les sols (Chirita, 1969). D'autres ouvrages touchent la morphométrie des rivières et les formations meubles des pentes (Zavoianu, 1978 ; Grecu and Comanescu, 2000). Des contributions plus récentes traitent de l'évaluation du paysage montagnard dans les bassins supérieurs de la Prahova et de l'Izvoru Dorului (Oprea, 2004). Dans la littérature roumaine et internationale, il n'y a pas de recherche publiée sur la dynamique des paysages et l'aménagement à l`aide des SIG et de la télédétection pour les Bucegi. Cependant, Oprea (2004) a utilisé la modélisation numérique pour évaluer les particularités du bassin montagnard de la Prahova, mais qui ne couvre que la partie est des Bucegi.

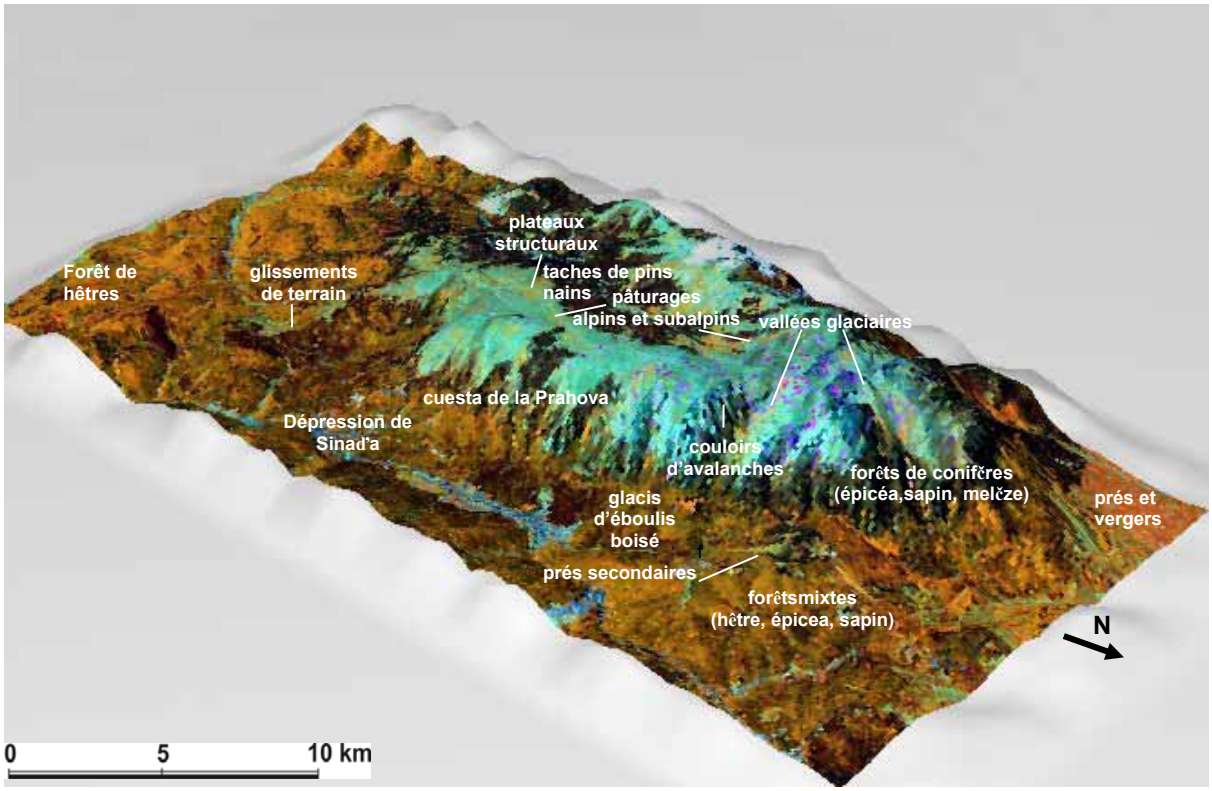


FIGURE 3 : Les monts de Bucegi vus du nord-est. Traits principaux du paysage de synclinal perché et de la région voisine. MNA réalisé avec des données de ETM+ de Landsat d'août 2000. *Bucegi Mountains from the north-east. Main landscape features of the upstanding syncline and the neighbouring area. DEM derived from the Landsat ETM+ data of August 2000.*

3. MATÉRIEL ET MÉTHODES

Dans cette étude, on utilise des images TM et ETM+ de Landsat à résolution spatiale moyenne, lesquelles offrent une bonne couverture spatiale des 390 km² des monts de Bucegi. Leur qualité spectrale, particulièrement la bande dans le proche et moyen infrarouge, permet la différenciation facile des groupements végétaux et de l'étagement de la végétation (Lillesand *et al*., 2003).

Les images sélectionnées sont distantes d'une décennie (18 août 1989 et 21 août 1990 et 5 juin 2000). et ont été acquises à un moment favorable de l'année, le mois d'août, et à une heure spécifique de la journée, 7 h 30. Chaque bande spectrale a été téléchargée de la base de données de la GLCF (Global Land Cover Facility) de l'Université du Maryland et combinées en composition fausses couleurs à l'aide du module d'observation du logiciel ENVI RT 4.0. En août, la phénologie de la végétation est presque similaire d'une année à l'autre, mais de petites différences proviennent des réponses spectrales influencées par l'apport d'humidité. La couverture nuageuse est faible (2-3 %). Dans la montagne, à cette période de l'année, les cumulus se développent plus tard qu'à l'heure d'acquisition des images. Le seul problème réside dans les petits nuages qu'on a isolés à l'aide de masques sur l'image de l'année 2000.

Les différences de phénologie de la végétation sont un autre problème. La région des Bucegi est remarquable par un étagement bien différencié des forêts et des alpages. Les feuillus et les conifères sont très différents en ce qui regarde leurs signatures spectrales, en toute saison de l'année. Nous n'avons pas voulu séparer les feuillus par typologie végétale parce que ces boisés sont très uniformes (les hêtraies y dominent). Les phénophases au juin et en août se trouvent près des maxima des cycles végétaux. En été, les alpages ont des valeurs différentes de réflectance, en comparaison des boisés : c'est le temps des pâturages et aussi d'un intense trafic touristique. La qualité des couvertures herbeuses en sont donc affectées.

La grande étendue des monts de Bucegi rend nécessaire la création des deux mosaïques, en projection UTM / WGS 84, qu'on a normalisées par réflectance, après l'étalonnage indépendant des images composantes. Les images les plus récentes ont la même date d'acquisition et, évidemment, il n'y a pas eu de problèmes de différences spectrales.

Les corrections géométriques étaient déjà réalisées par les créateurs de la base de données de la GLCF qui ont aussi orthorectifié les images TM et ETM+. Nous avons vérifié sur le terrain avec un récepteur GPS Garmin la précision réelle de ces corrections. Nous avons introduit dans la mémoire du récepteur GPS plus de 30 points le long des routes de la vallée de la Prahova, sur chaque image. Nous avons contrôlé la superposition des points avec les pixels le long des routes et nous avons obtenu une bonne précision de corrections géométriques, soit ± 30 m, ce qui représente la dimension approximative d'un pixel TM ou ETM+ sur le terrain. Cette valeur peut être considérée comme satisfaisante pour le traitement des images.

Pour les images de 1989-1990, nous avons utilisé le logiciel ENVI RT 4.0, avec son module de mosaïques, pour obtenir une image uniforme et pour unifier les deux histogrammes.

La phénologie de la végétation a été un problème à résoudre. Les deux images appartiennent à des années différentes. Après la normalisation de la mosaïque TM, nous avons comparé le résultat avec les cartes géobotaniques (à 1 : 500 000) qui accompagnent la carte des sols de la Roumanie à l'échelle de 1 : 200 000 (les feuilles de Braşov, 1975 et de Târgovişte, 1970). Nous avons remarqué une bonne correspondance entre les limites des étages de la végétation au sud des monts des Bucegi, où les deux images se joignent l'une à l'autre.

Les deux moments de référence choisis présentent la situation d'avant les transformations socio-économiques de la fin des années 1980 et de la fin des années 1990, soit après une décennie de changements dans le tourisme de montagne ainsi que de libéralisations foncière et immobilière.

La différence entre les images (figure 4) a été choisie comme algorithme de la procédure de détection des changements (Sabins, 1997 ; Lillesand *et al*., 2003). Des erreurs de corrections géométriques de moins de 15 m favorisent cette opération. Le problème caractéristique pour les applications de la télédétection en montagne est l'effet de la topographie qui affecte l'uniformité et la qualité des données (Dedieu, 1993 ; Millette *et al.,* 1995). La correction de l'effet topographique doit être basée sur un modèle numérique d'altitude (MNA). Dans ce cas, nous disposions d'un MNA avec une bonne résolution, mais les cartes topographiques au 1 / 25 000 (équidistance entre les courbes de niveau de 10 m) utilisées ont des lacunes en regard des escarpements les plus pentus.

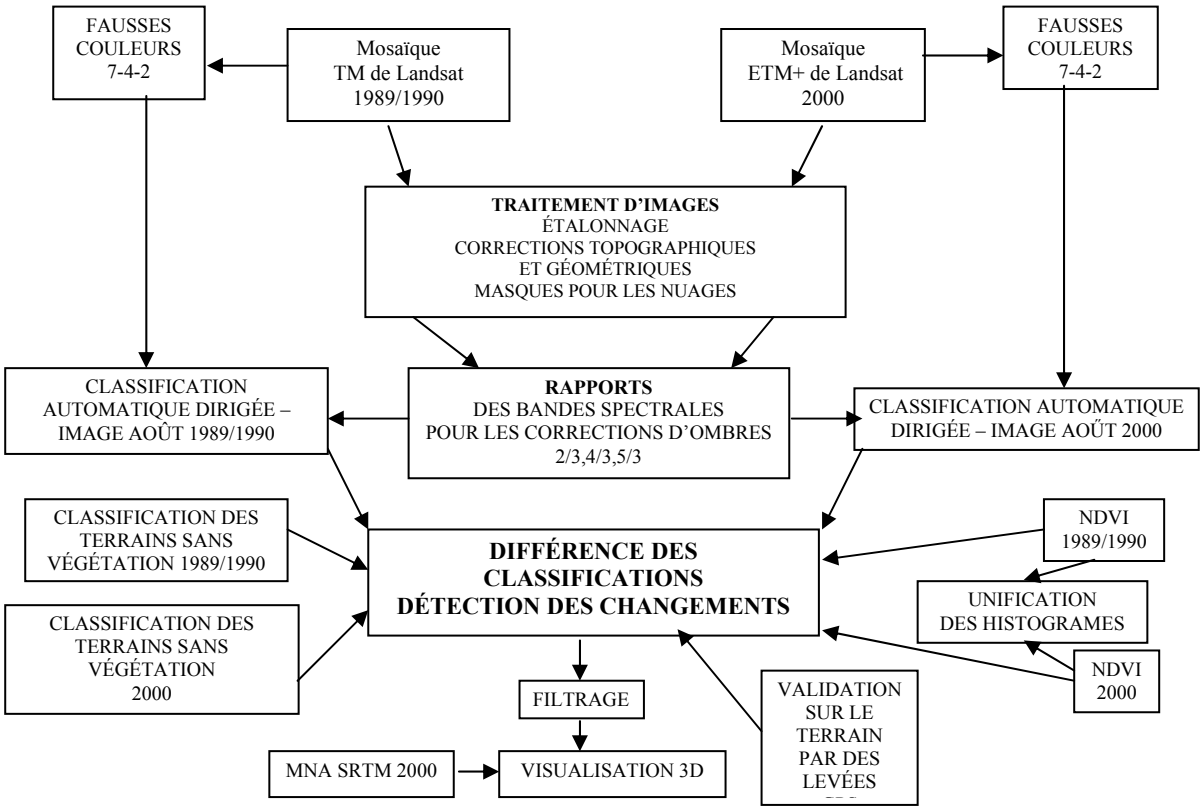


FIGURE 4 : Schéma de l'analyse de détection des changements. *Flow chart of the change detection analysis.*

La seule solution à notre portée était l'utilisation d'un MNA à 90 m de résolution. Ce MNA est connu comme le modèle SRTM (*Space Radar Topographic Mission*) (University of Maryland, 2004). On a aussi comparé la fidélité de ce MNA avec la réalité de terrain. Pour ce faire, nous avons utilisé une sous-image HRV(P) de SPOT et des photographies aériennes au 1 / 10 000 pour les escarpements du nord des Bucegi, autour du pic d'Omu, qui représente une superficie de 50 à 55 km^2. L'image HRV a été calibrée par réflectance et après nous avons réalisé les corrections géométriques à l'aide de points obtenus à partir des cartes topographiques 1 / 25 000. Nous avons observé en trois dimensions cette sous-image afin de valider le MNA et nous avons constaté les plus grandes erreurs sur les escarpements. Des thalwegs torrentiels dans le MNA ne se superposaient plus (différences moyennes de 50 m) sur les signatures qui y correspondaient sur les images HRV. Des photographies aériennes en noir et blanc ont aidé la validation par observation visuelle.

Finalement, nous avons aussi abandonné cette possibilité à cause des grandes erreurs qui caractérisent les escarpements plus pentus que 45° et qui représentent la plus grande partie du versant vers la vallée de la Prahova et aussi des parties des parois des cirques glaciaires au nord des Bucegi. Nous avons décidé de n'utiliser ce MNA que pour observer le terrain en trois dimensions. Utilisant le module de correction topographique du logiciel IDRISI Kilimanjaro, nous avons obtenu des erreurs significatives dans la régression linéaire entre les valeurs spectrales et les valeurs générées du MNA dans les zones d'ombres pour des dates correspondantes (*hillshade*).

Dans des études similaires dans l'Himalaya, Millette *et al.* (1995) ont utilisé une autre procédure pour la correction des zones topographiques qui sont affectées par l'ombre, qui altère la qualité des données d'un versant à l'autre. Ces auteurs ont expérimenté des rapports de bandes spectrales qui peuvent diminuer l'effet de l'ombre sur des versants végétalisés, soit les rapports des bandes 2 / 3, 4 / 3 et 5 / 3 dans le système RVB. Les ombres sont une caractéristique de la partie du spectre visible. En infrarouge, l'effet est neutralisé et on peut ainsi corriger les images, car la végétation verte est fortement réfléchie dans le vert et c'est le contraire dans le bleu et le rouge. La réponse dans l'infrarouge est aussi importante. Par ces rapports, on peut diminuer les effets des ombres sur les versants ouest (couverts par les boisés et les alpages) et on obtient de nouvelles images en fausses couleurs pour les classifications dirigées.

Les classes choisies sont considérées comme les plus représentatives et les plus faciles à différencier par la signature spectrale des pixels correspondants. Nous avons choisi seulement les classes principales d'occupation du sol qui sont importantes pour l'étude de la végétation. Le seul problème, ce sont les terrains sans végétation (substratum rocheux sur les escarpements, zones bâties, routes), très difficiles à différencier par la signature spectrale pendant l'été. Les composantes principales n'ont plus apporté de bons résultats. L'intention de créer des classes très représentatives pour définir la dynamique végétale est essentielle.

Le seul problème qui reste, c'est la confusion entre les roches nues (conglomérats, grès et calcaires) et les espaces bâtis des villes, résultant de l'effet de la similitude de la typologie des matériaux. C'est la raison pour laquelle nous avons utilisé le rapport espace bâti - végétation et réseau routier - végétation par rapport aux indices de différenciation de la végétation (NDVI – *Normalized Difference Vegetation Index*) et par la différence des surfaces de sol nu et sans végétation que nous avions classifiées en fausses couleurs avec le rapport de bandes 7-4-2.

L'application a été centrée seulement sur la couverture végétale. Nous avons isolé tous les terrains sans végétation qui peuvent contenir des catégories difficiles à délimiter à une résolution de 30 m. La différence des densités (*density slicing*) et la validation sur le terrain et à l'aide de l'image HRV (de juillet 1997) permet d'apprécier la qualité de la délimitation. Le résultat du croisement des valeurs des pixels (calculé par le module de géostatistique du logiciel IDRISI Kilimanjaro) se trouve dans les limites représentatives ($r^2 = 0,8$).

La validation des résultats a été faite au moyen de levées au GPS. Nous avons utilisé environ 150 points dispersés de manière arbitraire dans tout le territoire, et particulièrement à la limite entre les boisés et les alpages, les pins nains et les alpages, dans des clairières et aussi dans les villes. Des relevés pédologiques ont également été faits sur les hautes surfaces structurales des monts de Bucegi. Par l'intermédiaire du module de classification ENVI RT 4.0, nous avons obtenu les matrices des erreurs pour chaque classification au niveau des classes. Les valeurs moyennes étaient satisfaisantes pour la présente analyse.

Au cours de l'été 2004, nous avons d'abord mis à jour la carte des sols des monts de Bucegi au moyen de sondages dans les podzols fossilisés développés dans les sédiments des zones de solifluxion et de déflation récentes, qui couvrent de grandes surfaces et qui ont affecté la partie supérieure des sols non végétalisés des hauts plateaux (basin de l'Izvoru Dorului). Nous avons aussi examiné les endroits affectés tant par de gros éboulis au pied des escarpements que par d'importantes avalanches lors de l'hiver 2003-2004 (vallées glaciaires de la Cerbu et de la Moraru au nord-est des monts de Bucegi). Nous avons enfin fait le suivi sur le terrain de la dynamique des constructions dans les villes de Busteni et de Sinaia, entre 1994 et 2000.

4. RÉSULTATS

L'algorithme choisi pour la détection des changements est le plus simple possible, soit la différence des images multidates. Les deux images ont été remplacées par des classifications thématiques obtenues à l'aide de l'algorithme du maximum de vraisemblance des pixels. Les différences de signature entre les images de la même saison au niveau des boisés et des alpages sont dues au dynamisme des écosystèmes. La phénologie dans la même saison peut introduire des signatures un peu différentes de la végétation dans le proche infrarouge (la consistance de la biomasse à la surface) après des saisons sèches ou pluvieuses. C'est la raison pour laquelle noua avons choisi d'utiliser les différences entre les classifications dirigées sur les images multidates. La précision des changements n'a pas été évaluée sur le terrain, mais on peut estimer la moyenne des deux classifications. En effet, la superficie des pins nains a été réduite de 3 à 4 ha autour du chalet et de l'hôtel de Piatra Arsa, construit en 1985-1990 (Oprea, 2005), ce qui est comparable au résultat de notre analyse (5-5,5 ha).

Par l'analyse de détection des changements, nous avons d'abord suivi l'évolution spatiale de la couverture végétale de la région d'étude. La classification thématique au moyen de l'algorithme du maximum de vraisemblance n'a permis de bien différencier que quatre classes : 1) les boisés de conifères et les taches de pins nains de l'étage subalpin (*Pinus mugo*) ; 2) les hêtraies ; 3) les alpages et 4) les terres sans végétation (figures 5 et 6). Pour ces quatre classes, nous avons obtenu une précision globale de classifications d'environ 90 % par rapport aux régions prises comme échantillons. Les meilleurs résultats concernent les boisés et les alpages.

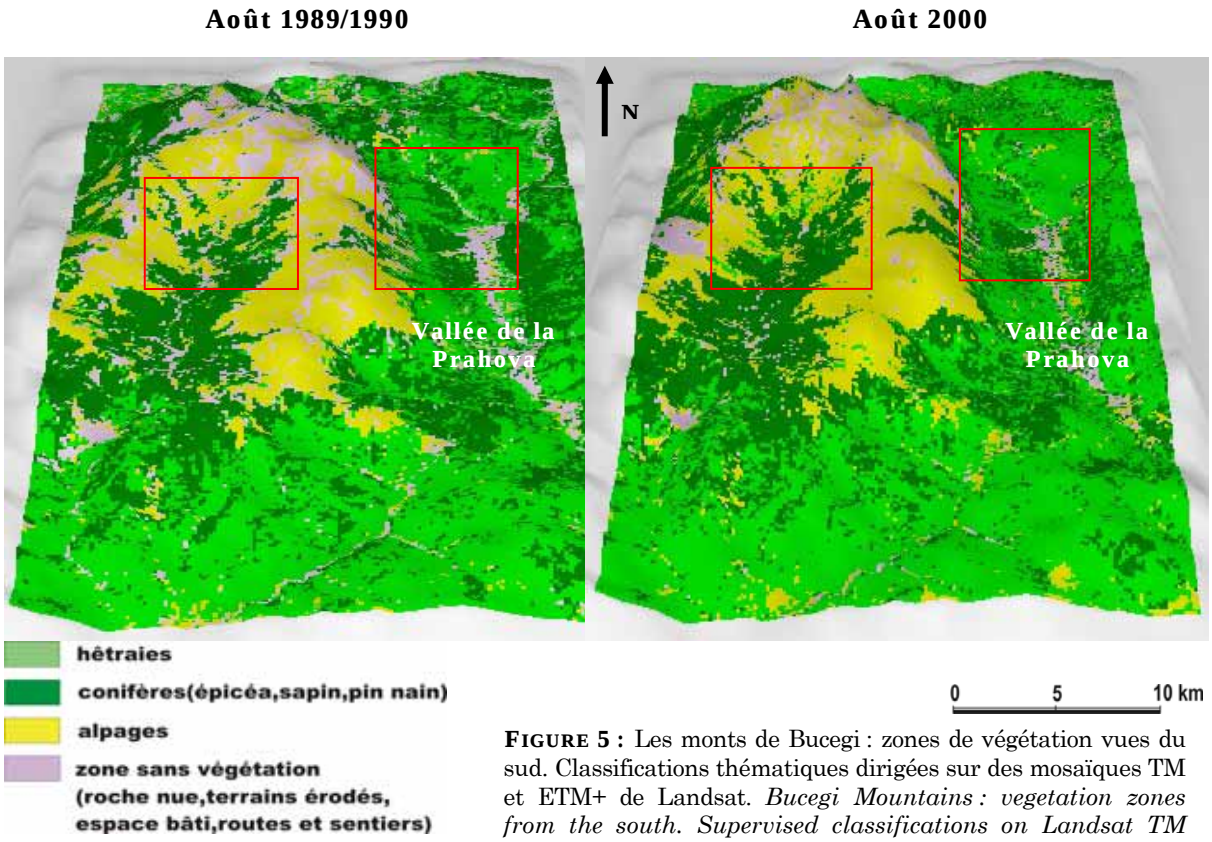


FIGURE 5 : Les monts de Bucegi : zones de végétation vues du sud. Classifications thématiques dirigées sur des mosaïques TM et ETM+ de Landsat. *Bucegi Mountains : vegetation zones from the south. Supervised classifications on Landsat TM and ETM+ mosaics.*

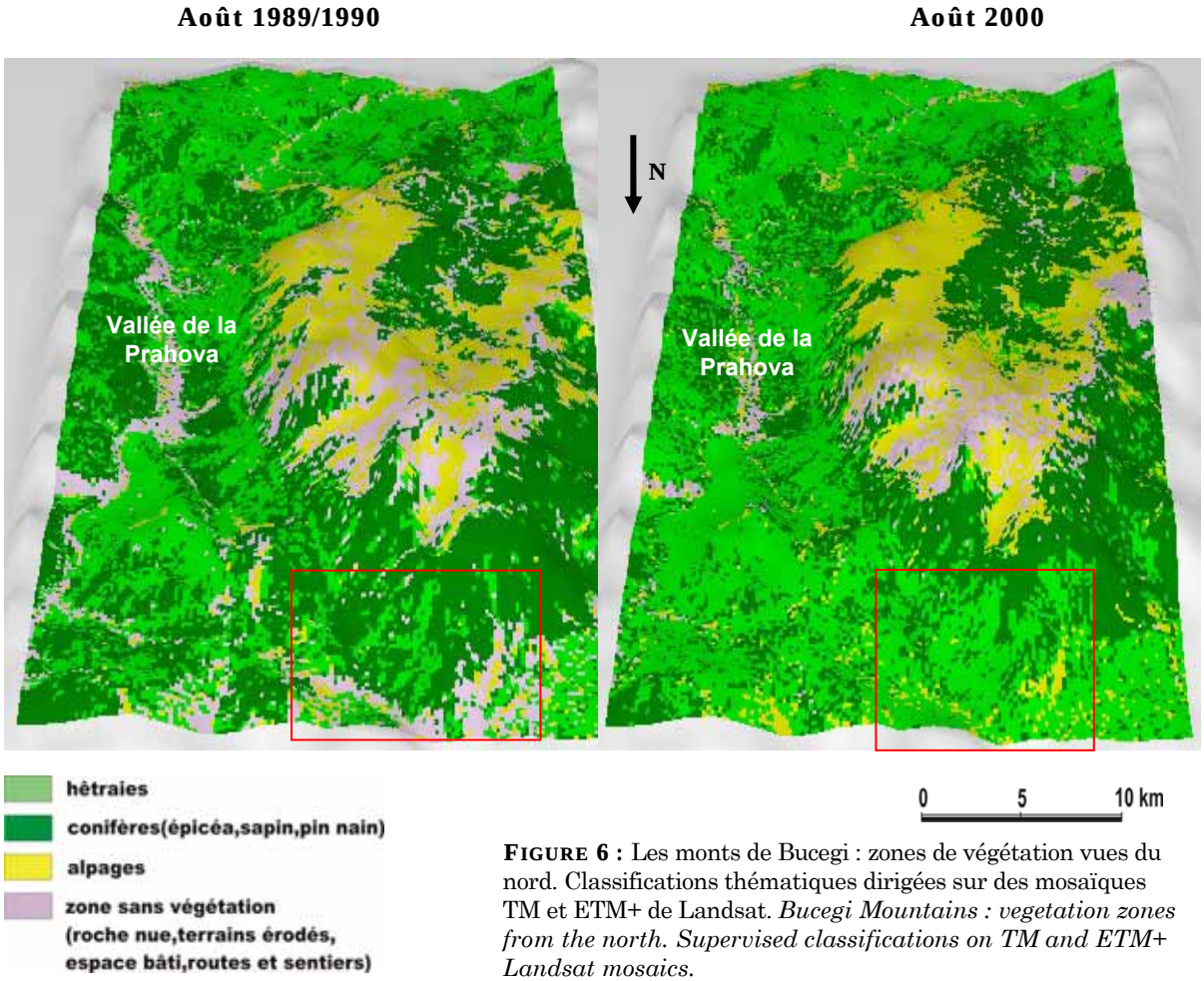


FIGURE 6 : Les monts de Bucegi : zones de végétation vues du nord. Classifications thématiques dirigées sur des mosaïques TM et ETM+ de Landsat. *Bucegi Mountains : vegetation zones from the north. Supervised classifications on TM and ETM+ Landsat mosaics.*

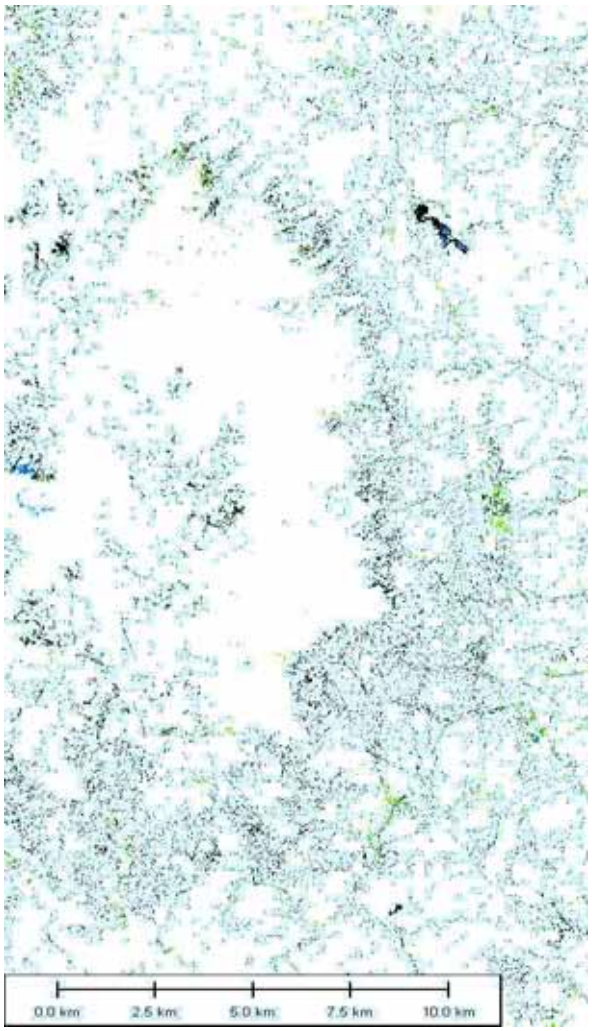
La différence entre les deux images, de 1989-1990 et 2000, montre d'abord la transformation des surfaces de boisés de conifères (figure 7). En effet, la superficie de ces boisés a enregistré un recul très significatif pour une période de seulement 11 ans.

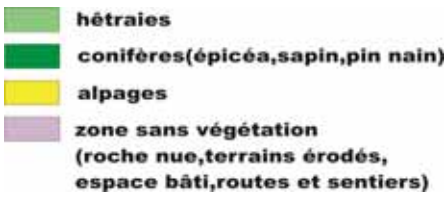
En contrepartie, on a enregistré une augmentation de la superficie des boisés de feuillus (hêtraies), remplaçant les conifères pour une superficie de 40 km², ce qui représente un rythme de changement de 3 à 4 km² par année.

Conifères



Hêtraies





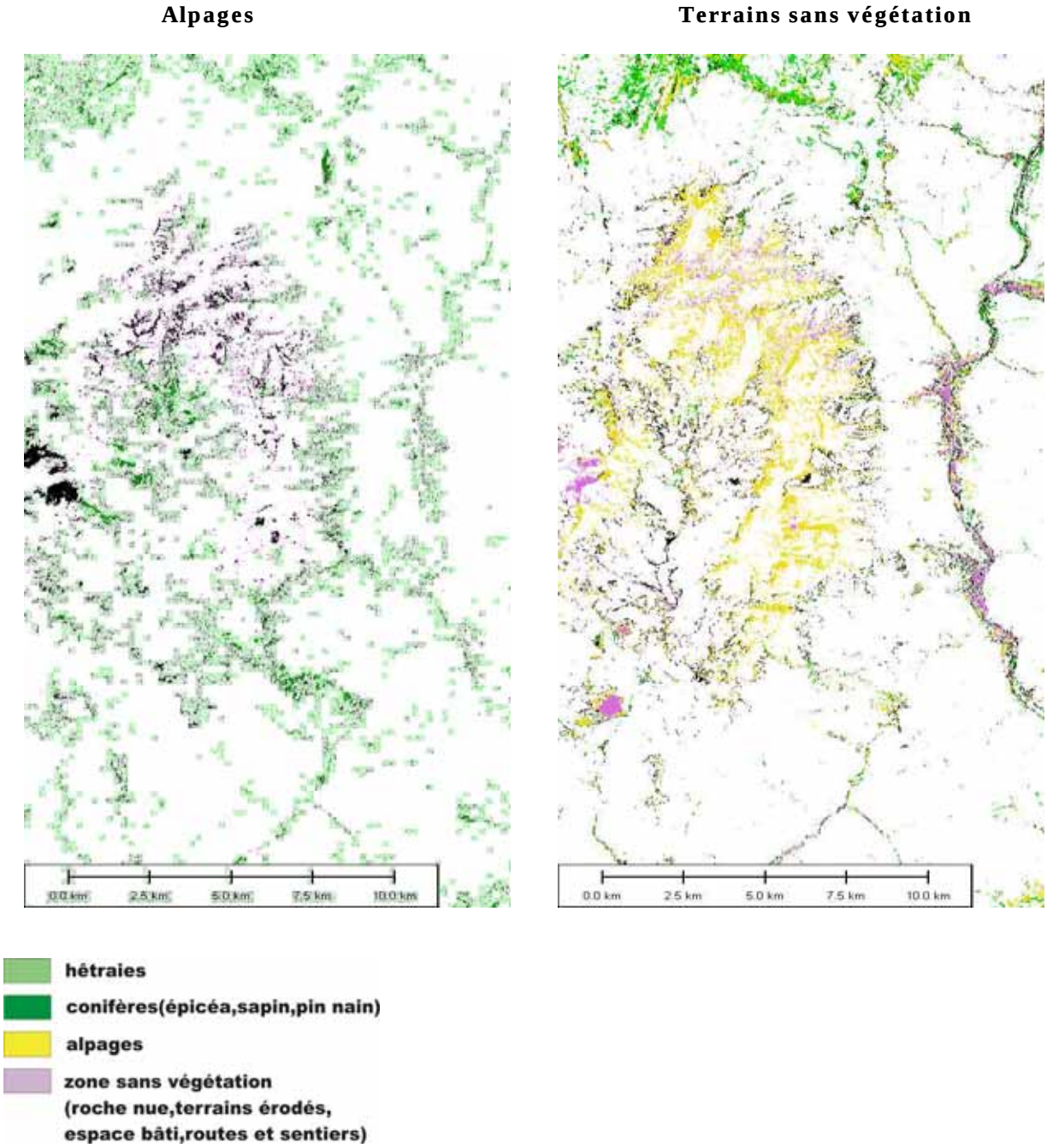


FIGURE 7 : Évolution des zones de végétation entre 1989-1990 et 2000. *Evolution of vegetation area between 1989-1990 and 2000.*

Les raisons de cette évolution spectaculaire peuvent être liées à la stratégie de développement imposée par les ingénieurs forestiers. Avant 1950, on a intensément exploité le bois à des fins commerciales et, particulièrement, pour les scieries situées dans toute la vallée de la Prahova. Les boisés de la Couronne de Roumanie ont été les moins affectés aux alentours de la résidence de Sinaïa. De grandes forêts d'État ont été défrichées et, aujourd'hui, on observe autour des villes, comme Busteni et Azuga, des ravinements boisés. La faible densité de chemins forestiers et l'augmentation du prix du bois ont généré une très forte pression sur les boisés les plus accessibles de la région (le long de la vallée de la Prahova) et sur les hêtraies de la basse montagne. Les surfaces recouvertes par les boisés de feuillus au détriment des boisés de conifères sont plus importantes à l'est et au nord des monts de Bucegi, particulièrement dans la vallée de la Prahova (figures 5 et 6). L'exploitation des boisés

de la vallée de la Ialomita, moins accessibles, s'est faite plus tardivement par rapport à la vallée de la Prahova. L'intensification du déboisement a généré une augmentation de l'érosion des sols. Après la Deuxième Guerre mondiale, on a initié un fort reboisement des terres déboisées dans l'étage des hêtraies. Les projets de reboisement ont visé des terres où le sol a été fortement érodé. On a choisi l'épicéa pour ce projet en tenant compte de ses particularités écologiques : 1) racines peu profondes qui permettent le développement sur des sols peu profonds, riches en matériel grossier et avec peu de matière organique ; 2) période de croissance très courte.

Dans les derniers 20 ans, les stratégies d'aménagement des boisés ont beaucoup changé. On peut observer (figure 7) le remplacement par des hêtres et d'autres feuillus, comme le bouleau, et par des conifères comme l'épicéa qu'on avait plantés dans l'étage des hêtraies. Les boisés mixtes sont reconnus comme des écosystèmes plus stables que les boisés homogènes. Leur rôle climatique, hydrologique et de protection des sols sur les versants est une réalité incontestable. Les boisés d'épicéas de basse montagne (moins de 1 400 m d'altitude) sont les plus sensibles aux maladies et aux chablis pendant les tempêtes. C'est la raison pour laquelle environ 40 km² de boisés d'épicéas ont été remplacés par des boisés de feuillus (hêtraies), au nord et à l'est des monts de Bucegi.

Cette étude nous confirme aussi à nouveau la tendance presque généralisée du déplacement en altitude des étages naturels : ce serait un des effets du réchauffement planétaire du climat. Ce processus est aussi confirmé par des études dans les Alpes (Hamilton, 1999 ; Beniston, 2000, 2003) et, également, dans les Tatras (Plesnik, 1971 ; Kotarba and Krzemien, 1987) et les Carpates Roumaines (Balteanu, 2000), dans les Retezat (Geanana, 2004), dans les Fagaras (Voiculescu, 2002) ou dans les Iezer-Papusa (Mihai *et al.*, 2005).

Des surfaces de boisés de conifères, visiblement de faible étendue, ont été remplacées par des alpages (1,9 km²) et des zones sans végétation (2,3 km²) (figure 8). C'est le cas des zones de pins nains du plateau des Bucegi, qui ont la même signature spectrale que les épicéas, les sapins ou les pins, et qui subirent une forte régression à cause du surpâturage des dernières décennies et du tourisme mal organisé autour des chalets et le long des routes et des sentiers. C'est le cas à Babele-Piatra Arsa et à Caraiman-Costila, ou par la création de pistes de ski à Cota 2000-Varful cu Dor (figure 7). Les couloirs d'avalanches sur les escarpements structuraux ont aussi détruit la continuité des boisés de conifères comme c'est le cas sur les pentes des monts de Costila ou de Caraiman et autour du pic d'Omu. On rencontre une situation similaire autour des villes de la vallée de la Prahova où les boisés sont déjà affectés par la construction de bâtiments, après le boom immobilier de la dernière décennie.

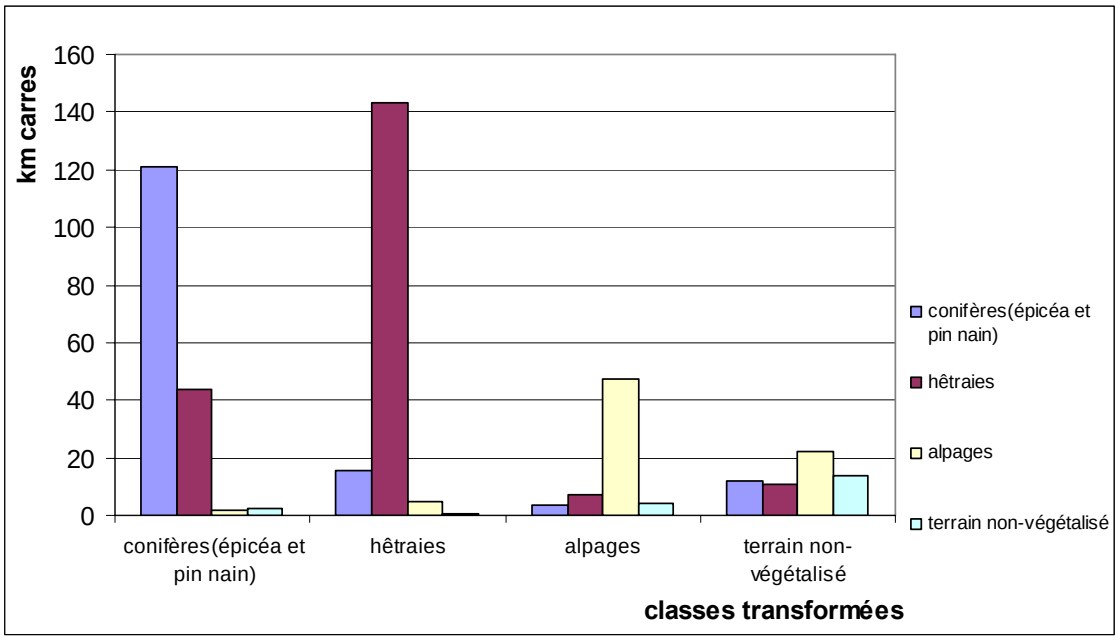


FIGURE 8 : Statistiques des changements entre 1989-1990 et 2000 dans les zones de végétation (en km²). *Statistics of the changes observed in vegetation areas between 1989-1990 and 2000 (km²).*

Les surfaces sans végétation ont subi une dynamique significative. Dès 1989-1990, elles sont remplacées par des boisés de conifères (12 km^2) et, plus fréquemment, par des alpages (22,2 km^2). Par exemple, on peut constater les surfaces des boisés de hêtres qui couvrent des terrains dégradés par l'érosion sur les monts de Diham, au nord des monts de Bucegi (figure 7). Sur les plateaux structuraux des Bucegi, à plus de 2 000 m d'altitude, on peut aussi noter la reconstruction progressive des alpages dans les zones de roche à nu et dans les espaces où le pâturage a été interdit (Vanturis, Dichiu, Doamnele, etc.), là où la flore de montagne est en reconstitution. C'est aussi le résultat de quelques projets de recherche pour réduire l'érosion de surface dans la région du chalet Babele (information région du chalet Babele (information orale, Station de recherches pour les Alpages de Brasov, 2004). Après la destruction des grands peuplements de pins nains qui couvraient, il y a un siècle, presque tous les plateaux structuraux, ces derniers ont été affectés par une érosion accélérée. Les podzols des secteurs de basse altitude sont aujourd'hui couverts par d'épaisses couches de sédiments éoliens ou soliflués, qui sont affectées par une forte érosion le long des bordures les plus élevées des plateaux (figure 9C). Le contrôle de ce phénomène est loin d'être maîtrisé car les réseaux de sentiers et de routes mal utilisés ont détruit plus que 50 % de la superficie des hauts plateaux (figures 9A, B).

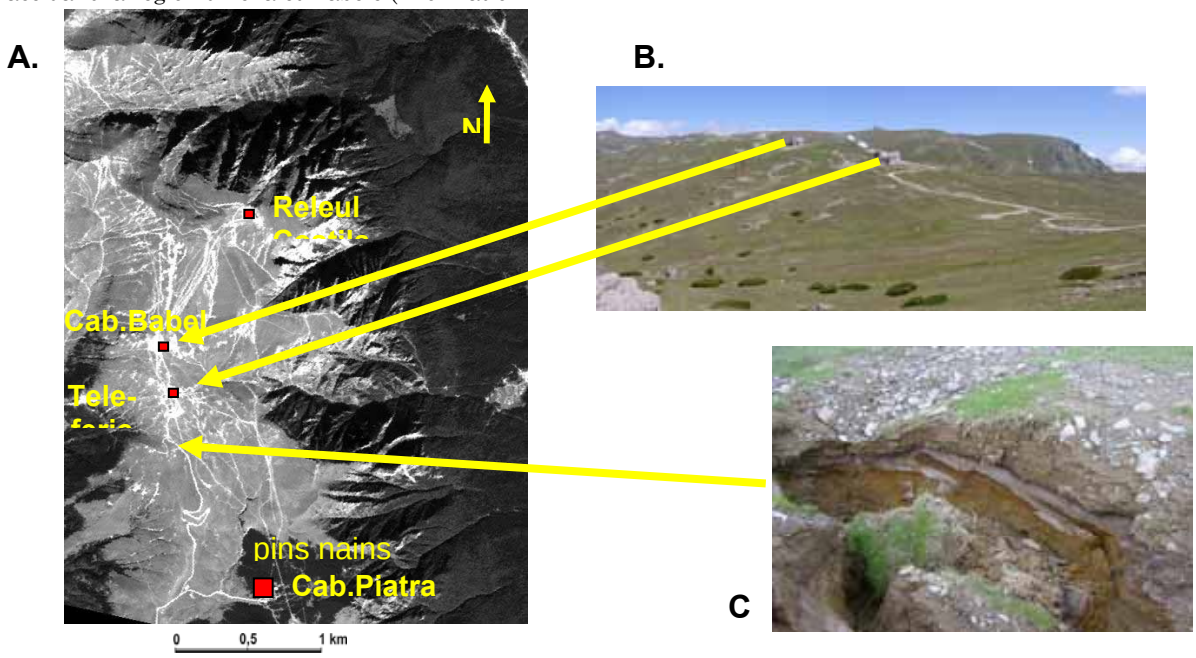


FIGURE 9 : Érosion des sols sur le plateau de Bucegi. A) image HRV(P) de SPOT de juillet 1997 ; B) les petites taches de pins nains sur le vaste plateau affecté par l'érosion ; C) les podzols fossilisés dans le bassin d'Izvoru Dorului.*Soil erosion process on the Bucegi Mountain Plateau. A) SPOT HRV(P) image of July 1997 ; B) small dwarf pine spots on the eroded Bucegi Plateau ; C) fossilized podzols from the Izvoru Dorului catchment.*

Pour compléter ces résultats, des analyses ont été faites au moyen d'indices normalisés pour la différenciation de la végétation (NDVI). Les résultats montrent des tendances tant à la dégradation qu'à la reconstitution de la végétation. Le codage en couleurs et l'observation en trois dimensions (figure 10) nous permettent d'identifier facilement ces transformations dans le couvert végétal. Dans la haute région des monts de Bucegi, les plateaux montrent une forte diminution de cet indice. Ceci serait dû à l'effet de l'érosion des hautes surfaces où les vents et la solifluxion affectent les sols peu profonds et les couches sableuses (Stoenescu, 1951). La deuxième situation deuxième situation caractéristique est observée dans des secteurs de talwegs de petits cours d'eau (rivières Izvoru Dorului, Obarsia, Ialomicioara Paduchiosului, etc.). On observe en même temps une dégradation de la végétation le long des couloirs d'avalanches sur les escarpements plus pentus que 45°. L'effet des éboulis sur les boisés est évident sur toutes les pentes des cirques glaciaires (Malaesti et Tiganesti sont les plus importants). La dégradation des alpages est la plus évidente le long de la vallée de la Prahova, où l'on a bien protégé les boisés des versants pour protéger les villes contre les risques géomorphologiques dans le cadre des plans

d'urbanisme. Enfin, la forte pression immobilière a remplacé les alpages par des constructions dans les villes touristiques et autour des espaces déjà bâtis comme à Sinaia ; les restrictions de la période socialiste ont disparu en 1990-1991 et les résidences secondaires sont apparues sur les terrasses et les cônes des torrents. La comparaison des résultats de l'analyse des changements de l'indice NDVI avec les changements dans les classes de végétation montrent que les espaces de clairières dans les boisés de différentes compositions sont remplacées par de la végétation arborescente et leur valeur de NDVI augmente donc dans la moyenne montagne des Bucegi malgré peu de tourisme et de pastoralisme. Des erreurs de superficie peuvent cependant provenir de petits nuages qu'on n'a pas couverts avec des masques en raison de leur dimension plus réduite. Ce NDVI augmente aussi dans les espaces des boisés et sur les crêtes des escarpements non affectées par les avalanches.

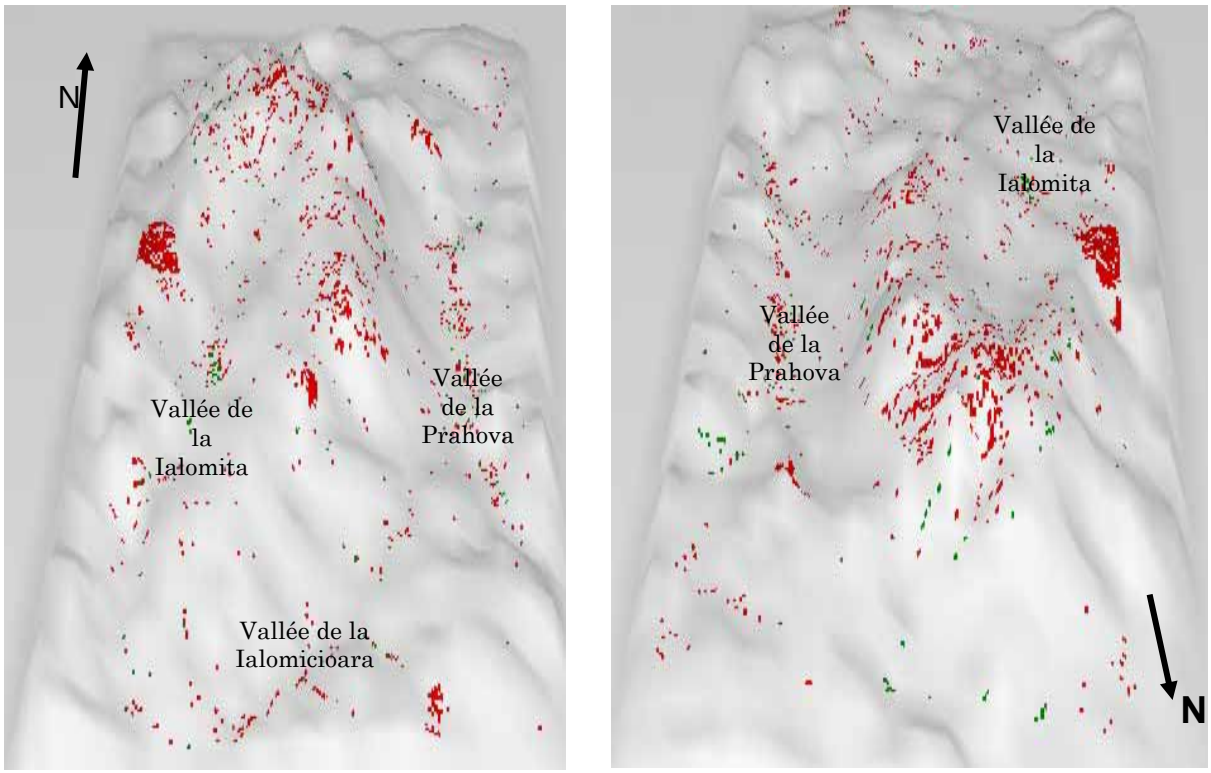


FIGURE 10 : Changements de l'indice normalisé de la végétation (NDVI) entre 1989-1990 et 2000.
Changes in the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) between 1989-1990 and 2000.

Voyons maintenant les changements des terrains affectés par l'érosion. Leur analyse a été validée par de la réalité de terrain, particulièrement des relevés pédologiques et de dynamique de l'érosion des sols. La classification thématique dirigée des terrains érodés est basée sur l'utilisation des deux mosaïques d'images TM et ETM+ en fausses couleurs avec la combinaison de bandes 7-4-2, où la bande 7 permet d'identifier les altérites et les sols à nu. Nous avons différencié les classifications (à une classe seulement) des deux dates afin d'obtenir une image des surfaces rocheuses et des sols nus. Le codage des couleurs et l'observation en trois dimensions (figure 11) mettent en évidence une situation complexe où les terrains érodés se sont développés autour des chalets du plateau des Bucegi et des domaines skiables des monts de Bucegi, près de Sinaia ainsi que sur les de Sinaia ainsi que sur les escarpements, mais aussi autour des bergeries (Clabucetul Baiului). On remarque aussi une forte reconstitution du couvert végétal le long des plaines alluviales de la Prahova et de ses tributaires ainsi que sur les pentes nord où les hêtraies montent en altitude et couvrent les petites clairières et les terrains érodés. Le rapport avec le NDVI s'avère peu expressif, à cause des erreurs au niveau du MNA. Nous n'avons pas filtré le résultat qui met en évidence les terrains sur les escarpements qui sont très complexes du point de vue de la dynamique végétale. Sur ces terrains, alternent des parois très pentues où les arbres luttent pour monter vers les cimes ensoleillées et des couloirs d'avalanches qui se sont développés au détriment des boisés.

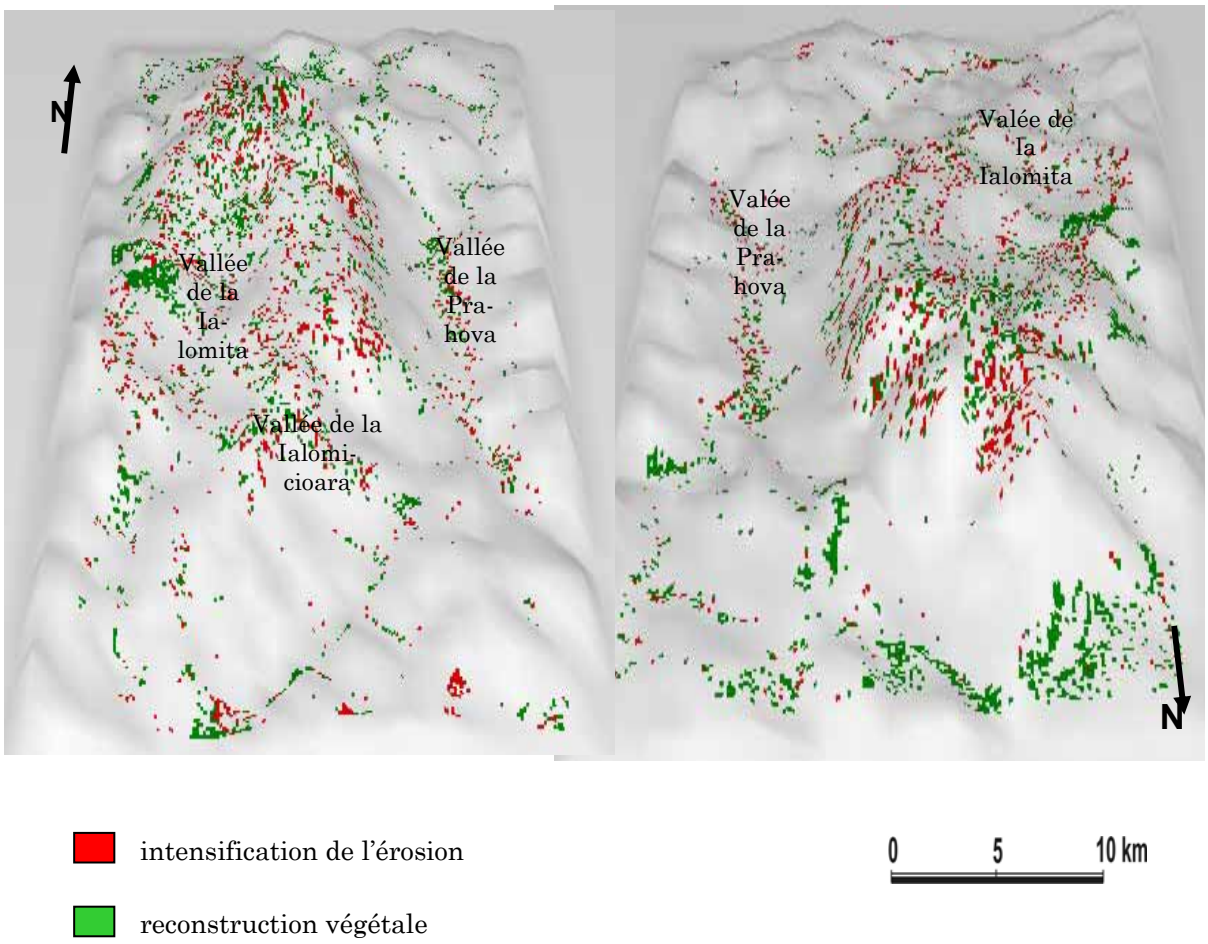


FIGURE 11 : Changements des terres affectées par l'érosion entre 1989-1990 et 2000. *Changes in the soil cover affected by erosion between 1989-1990 and 2000.*

Une autre situation de changement peut être observée sur une image de détail dans la vallée de la Prahova, entre les villes touristiques de Sinaia et de Busteni (figure 12). La forte pression immobilière d'après 1990 montre que l'espace végétalisé devient de plus en plus restreint. La partie la plus dynamique se présente dans la ville de Busteni-Poiana Tapului, où la dispersion des maisons a été plus forte avant 1990, quand la fonction dominante était l'industrie du papier et du bois. On y observe l'industrie du papier et du bois. On y observe une intensification de l'érosion sur les chantiers des nouvelles résidences secondaires et une revégétalisation autour des nouvelles villas. Par contre, la dispersion des pixels à Sinaia, montre un habitat plus compact et peu dynamique durant cette période. Le prix des terrains et l'accès aux services dans des conditions plus difficiles ont engendré cette configuration ponctuelle des changements.

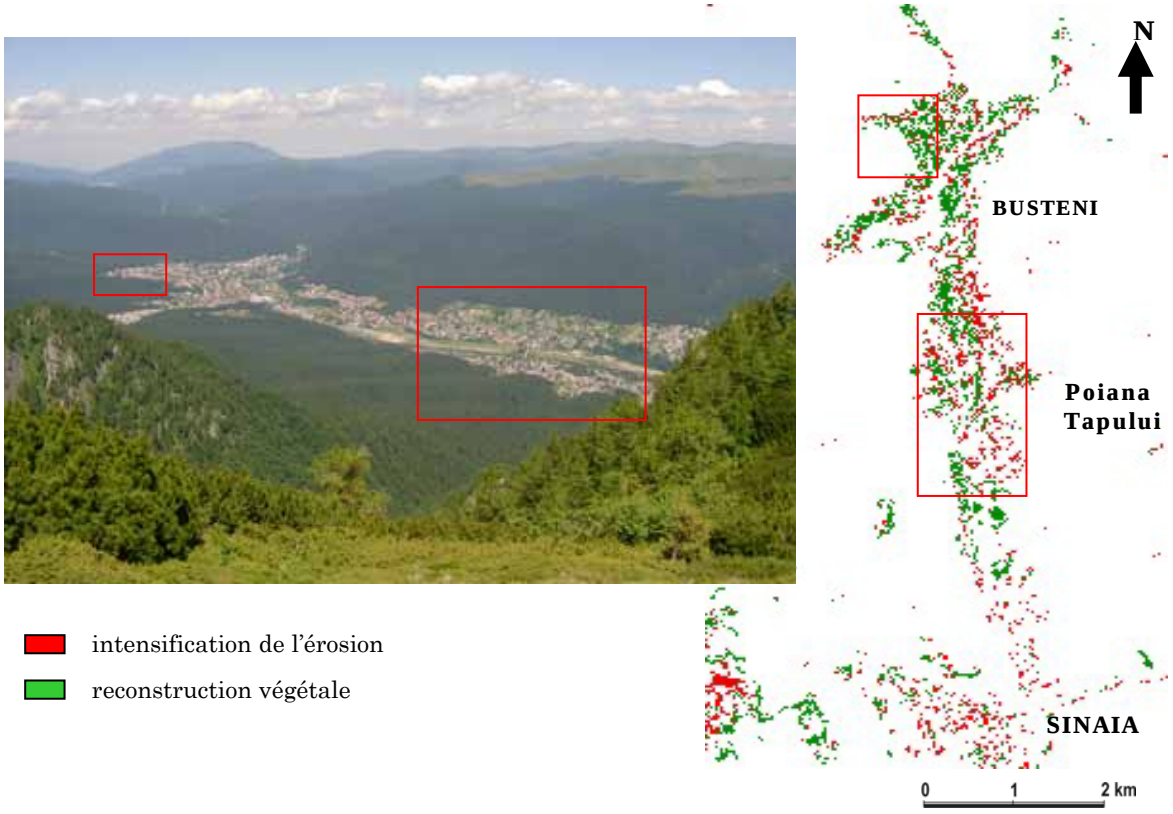


FIGURE 12 : Dynamique des terres érodées dans la région de Busteni-Poiana Tapului entre 1989-1990 et 2000.
Dynamics of eroded surfaces in the Busteni-Poiana Tapului area between 1989-1990 and 2000.

5. DISCUSSION

L'analyse que l'on vient de développer a un caractère général : on peut maintenant connaître les problèmes du terrain et dresser un diagnostic de la dynamique des paysages. La résolution spectrale a posé de réels problèmes dans la différenciation des signatures pour les conifères, comme les pins nains et les épicéas, ou entre les sols nus et les bâtiments. Beaucoup de confusion peut provenir de la résolution spatiale moyenne. On peut étudier de grands espaces et les images sont accessibles, mais les détails sont limités et confus en fausses couleurs. La validation des classifications avec la réalité de terrain est donc nécessaire. La correction des ombres sur les versants est essentielle pour les régions les plus pentues et, pour cette raison, on doit disposer d'un MNA plus précis en ce qui concerne la correction de l'interprétation.

Les résultats montrent une tendance à la constitution végétale possible dans tous les endroits favorables. Le changement a été évalué avec des classifications dirigées et les erreurs dans ces classifications peuvent expliquer la qualité de l'analyse. Les matrices d'erreurs (à l'aide du logiciel ENVI 3.4) montrent une précision de plus de 90 % pour chaque classification. Pour apprécier les erreurs, nous n'avons utilisé que les échantillons des régions d'intérêt (en anglais les *ROI*). Nous avons établi les échantillons avec l'apport des photographies numériques que nous avons réalisées pendant l'été 2004 et aussi à l'aide des photographies aériennes de 1972. Il aurait été plus précis de dresser les matrices en comparaison avec une carte numérique de la végétation, mais les cartes disponibles sont trop vieilles (années 1960) et à une échelle trop petite (1 / 500 000).

6. CONCLUSION

L'analyse des transformations des paysages montagnards avec les données TM et ETM+ de Landsat s'avère très utile grâce à la différence spectrale des types de couverture des terres et de la structure des paysages. Les corrections radiométriques et topographiques sont vraiment nécessaires à cause des effets introduits par l'ombrage des versants. Les rapports des bandes spectrales peuvent aider le traitement des images satellitaires et peuvent remplacer l'utilisation des MNA, lesquels ne sont pas toujours accessibles. Les meilleurs résultats sont obtenus pendant la saison estivale alors que les ombres sont les plus courtes. On doit aussi compter sur la phénologie parce que l'été est la saison optimale pour obtenir une

male pour obtenir une meilleure classification de la végétation dans la montagne.

La qualité des résultats dépend beaucoup de la qualité des données. Les corrections géométriques exigent une vérification préalable sur le terrain avant de commencer l'analyse des images. Beaucoup de difficultés surgissent quand on utilise des images de moyenne résolution spatiale pour analyser des espaces restreints avec des taches de végétation (tels que les pins nains sur le plateau des Bucegi). La simple différence entre les images n'est pas une approche utile à cause des différences de signature des mêmes objets pendant la même saison. Les classifications doivent remplacer cette méthode, mais seulement après une estimation de leur précision. Le tableau des changements n'est pas complet, si l'on ne prend pas en considération les transformations des éléments connexes, par exemple le sol par rapport à la végétation.

Les monts de Bucegi (le parc naturel des monts de Bucegi) subissent une très forte influence anthropique à cause du tourisme et des pâturages, particulièrement sur le plateau structural principal. Les boisés de hêtres ont subi une très forte régénération dans les zones de roches perméables qui offrent de bonnes conditions pour la croissance de *Fagus silvatica* (conglomérats, grès et calcaires). Les boisés de conifères sont en régression et on peut observer que les hêtraies les remplacent. L'érosion des terres s'est intensifiée sur le plateau de Bucegi, mais aussi dans les villes de Sinaia et de Busteni-Poiana Tapului, sous la pression de nouvelles constructions. Sur les escarpements ensoleillés, on a observé une augmentation de la fréquence des avalanches qui ont détruit le sol sur les banquettes structurales (les branes, dans le langage populaire).

Les résultats peuvent confirmer la tendance au reboisement des surfaces où les conifères ont été arrachés par les vents, les crues et les avalanches. On remarque aussi une bonne préservation des boisés destinés à la protection du sol, le long de la vallée de la Prahova et autour du lac Bolboci sur la Ialomita. Les résultats montrent, d'une façon générale, une situation de dynamique paysagère. Les recherches doivent continuer dans des directions plus précises comme :

- la dynamique de l'érosion linéaire et superficielle sur les hauts plateaux ;
- l'organisation équilibrée des réseaux de sentiers dans le parc naturel ;
- l'étude des rapports de la pression immobilière dans les villes touristiques de la vallée de la Prahova avec la végétation et l'érosion des terrains ;
- la dynamique des processus naturels dans les domaines skiables.

Pour ces recherches, on peut utiliser des images de très haute résolution en combinant des images de type Pan Sharpened (panchromatiques HRV de SPOT, d'Ikonos ou de QuickBird) avec des images des capteurs de Landsat. Une autre possibilité serait l'intégration d'images radar pour obtenir des MNA.

Remerciements

Des remerciements vont à la Faculté de géographie de l'Université de Bucarest pour son encouragement au développement de la recherche dans le cadre du Laboratoire de télédétection ainsi qu'à l'Université du Maryland pour avoir facilité l'accès aux images TM et ETM+ de Landsat de la base des données GLCF (Global Land Cover Facility).

Références

Balteanu, D. (2000) Present-day geomorphological processes and environmental change in the Romanian Carpathians. P. 123-128, in Balteanu, D., Popescu, N. and Ielenicz, M. (réd.) Geomorphology of the Carpatho-Balkan Region. Ed. Corint, Bucureşti, 240 p.

Bălăceanu, V., Râşnoveanu, I., Râşnoveanu, A., Neacşu, M. şi Dragu, I. (1975) Harta Solurilor României, scara 1 : 200 000 (Foaia Braşov), in N. Florea, V. şi Bălăceanu (réd.), Institutul Geologic Bucureşti.

Beldie, Al. (1967) Flora si vegetatia Muntilor Bucegi. Ed. Academiei, Bucuresti, 578 p.

Beniston, M. (2000) Environmental change in mountains and uplands. Arnold / Hodder and Stoughton / Chapman and Hall Publishers, London and Oxford University Press, New York, 172 p.

Beniston, M. (2003) Climatic change in mountain regions. A review of possible impacts. Climatic Change, vol. 59, p. 5-31.

Chardon, M. (1989) Montagnes et milieux montagnards. Géographie physique des montagnes. Institut de géographie alpine, Grenoble, 240 p.

Chirita, C. (réd.) (1969) Solurile Muntilor Bucegi. Ed.Academiei, Bucuresti, 450 p.

Dedieu, J.-P. (1993) Télédétection appliquée à l'environnement et systèmes d'information géographique : le cas des images en zone de montagne. Les dossiers de la Revue de géographie alpine, no 9, p. 59-62.

Delannoy, J.-J. et Rovéra, G. (1996) L'érosion dans les Alpes occidentales : contribution à un bilan des mesures et des méthodes. Revue de géographie alpine, vol. 84, no 3, p. 87-101.

De Martonne, E. (1981) Cercetari asupra evolutiei morfologice a Alpilor Transilvaniei. Ed. Academiei, Bucuresti, 271 p.

Feranec, J., Suri, M., Otahel, J., Cebecauer, T., Kolar, J., Soukup, T., Zdenkova, D., Waszmuth, J., Vijdea, V., Vijdea, A. M. and Nitica, C. (2000) Inventory of major landscape changes in the Czech Republic, Hungary, Romania and Slovak Republic 1970s-1990s. Applied Geography, vol. 2, no 2, p. 129-139.

Geanana, M. (2004) Limita superioara a padurii in Muntii Retezat. Ed. Universitatii Bucuresti, 147 p.

Grecu, F. and Comanescu, L. (2000). Surface formations in the Bucegi Mountains. Valea Cerbului case study. P. 89-99, in Balteanu, D., Popescu, N. and Ielenicz, M. (réd.) Geomorphology of the Carpatho-Balcanic Region. Ed. Corint, Bucuresti, 240 p.

Hamilton, L.S. (réd.) (1999) Forêts et sylviculture en montagne. P. 249-278, in Ives, J. D. et Messerli, B. (réd.) Les montagnes dans le monde. Une priorité pour un développement durable. Glénat, Grenoble 500 p.

Haynes-Young, R. (2000) Teledetecţia modificărilor mediului înconjurător, Schimbări majore ale mediului. P. 20-38, in N. Roberts (réd.) Schimbari globale ale mediului. Ed. All, Bucuresti, 496 p.

Kotarba, A. and Krzemien, K., (1987) High mountain denudational system of Polish Tatra Mountains. Ossolineum, Wroclaw, 106 p.

Lillesand, Th., Kiefer, R. and Chipman, J.W. (2003) Remote sensing and image interpretation. John Wiley and Sons, New York, 763 p.

Lopez, E., Boco, G., Mendoza, M. and Duhan, E. (2001) Predicting land-cover change in the urban fringe. A case study in Morelya City, Mexico. Landscape and Urban Planning, vol. 55, p. 271-285.

Micalevich-Velcea, V. (1961) Masivul Bucegi. Studiu geomorphologic. Ed. Academiei, Bucuresti, 151 p.

Mihai B., Savulescu, I. şi Sandric, I. (2005) Dinamica peisajului alpin, subalpin si forestier in Muntii Iezer. Analiza change detection. Comunicari de Geografie, no 9, Editura Universitatii din Bucuresti, p. 51-56.

Mihailescu, V. (1963) Carpaţii Sud-estici. Ed. Ştiinţifică, Bucureşti, 373 p.

Millette, Th., Tuladhar, A.R., Kasperson, R.E. and Turner, B.L. (1995) The use and limits of remote sensing for analyzing envi-

ronmental and social change in the Himalayan Middle Mountains of Nepal. Global Environmental Change, vol. 5, no 4, p. 367-380.
Oncescu, M. (1943) Région de Piatra Craiului-Bucegi. Étude géologique, An. Institutul Geologic Roman, no 22, p. 82-124.
Oprea, R. (2004) Bazinul montan al Prahovei. Potential natural si al impactului antropic asupra peisajului. Thèse de doctorat. Ed. Universitara, Bucuresti, 164 p.
Patrulius, D. (1969) Geologia Masivului Bucegi si a Culoarului Dambovicioara. Ed. Academiei, Bucuresti, 321 p.
Paun, C. (1998) Carpatii dintre Valea Dambovitei si Valea Buzaului. Studiu climatologic. Ed. Macarie, Targoviste, 204 p.
Plesnic, P. (1971) Horna hranica lesa vo Vysokych a v Belanskych Tatrách. Veda, Bratislava, 290 p.
Puscaru, D., Puscaru-Soroceanu, E., Pauca, A. şi Serbanescu, I. (1956) Pasunile alpine din Muntii Bucegi. Ed. Academiei, Bucuresti, 512 p.
Rees, W. G., Williams, M. and Vitebski, P. V. (2003) Mapping land cover change in a reindeer herding area of the Russian arctic using Landsat TM and ETM+ imagery and indigenous knowledge. Remote Sensing of the Environment, no 85, p. 441-452.
Rigina, O., Baklanov, A., Hagner, O. and Olson, H. (1999) Monitoring of forest damage in the Kola Peninsula, Northern Russia due to smelting industry. The Science of the Total Environment, no 229, p. 147-163.
Sabins, F. J. (1997) Remote Sensing : principles and interpretation. Freeman, London-New York, 494 p.
Short, N., Stoney, W., Rosalanka, J., Love, J., Robinson, J. and Weissel, J. (2004) The Remote Sensing Tutorial. NASA Goddard Space Flight Centre, http://rst.gsfc.nasa.gov/
Spirescu, M., Parichi, M., Muică, N., Andrei, Gr., Niţu, I., Mucenic, I. şi Şerbănescu, I. (1970) Harta Solurilor României, scara 1 : 200 000 (Foaia Braşov), in N. Florea (réd.), Institutul Geologic Bucureşti.
Stoenescu, S. (1951) Clima Bucegilor. Ed. Tehnica, Bucuresti, 220 p.
Teodoreanu, E. (1980) Culoarul Rucăr-Bran. Studiu climatic şi topoclimatic. Ed.Academiei, Bucureşti, 165 p.
Toutoubalina, O. V. and Rees, W. G. (1999) Remote sensing of industrial impact on Arctic vegetation around Noril'sk, northern Siberia: preliminary results. International Journal of Remote Sensing, vol. 20, no 15-16, p. 2979-2990.
Tømmervik, H., Høgda, K. A. and Solheim, I. (2003) Monitoring vegetation changes in Pasvik –Norway and Pechenga in Kola Peninsula (Russia) using multitemporal Landsat MSS / TM data. Remote Sensing of the Environment, no 85, p. 370-388.
University of Maryland (2005) Global Land Cover Facility. http://www.glcf.umiacs.umd.edu.
Vâlsan, G. (1939) Morfologia Văii superioare a Prahovei şi a regiunilor vecine. Buletinul Societatii Regale Române de Geografie, no 58, Bucureşti, p. 1-44.
Velcea, V. (1967) Probleme de geografie aplicata in masivele Bucegi, Postavaru-Piatra Mare si Garbova. Studia Universitatis Babes-Bolyai. Geografie, vol. 12, no 2, Cluj-Napoca, p. 121-125.
Velcea, V. (1987) Masivul Bucegi. P. 245-250, in Badea L. (réd.) Geografia Romaniei, vol. 3, Ed. Academiei, Bucuresti.
Voiculescu, M. (2002) Studiul potenţialului geoecologic al Masivului Făgăraş şi protecţia mediului înconjurător. Ed. Mirton, Timişoara, 357 p.
Woodcock, C., Macomber, S., Pax Leney, M. and Cohen, W. (2001) Monitoring large areas for forest change using LANDSAT : generalization across space, time and LANDSAT sensors. Remote Sensing of the Environment, no 78, p. 194-203.
Zavoianu, I. (1978) Morfometria bazinelor hidrografice. Ed. Academiei, Bucuresti, 174 p.