

EVALUATION DU CHANGEMENT DE L'OCCUPATION DU SOL A L'AIDE DES IMAGES LANDSAT ET SPOT : CHAMP VOLCANIQUE DE LA SIERRA CHICHINAUTZIN (MEXIQUE).

Noyola-Medrano, Cristina

U. de Guanajuato, División de Ingenierías, Departamento de Ingeniería en Geomática e Hidráulica, Avenida Juárez N° 77, zona centro, 36000, Guanajuato, Gto., México,
cnoyola@quijote.ugto.mx

Mering, Catherine

Université Paris 7, PRODIG UMR 8587, 59 rue Nationale, Dalle "Les Olympiades",
bâtiment Montréal, 75013 Paris, France, mering@univ-paris-diderot.fr

Rojas Beltrán, Marco Antonio

Université Paris 7, PRODIG UMR 8587, 59 rue Nationale, Dalle "Les Olympiades",
bâtiment Montréal, 75013 Paris, France, marbel_red@yahoo.com

RÉSUMÉ

Le Champ Volcanique de la Sierra Chichinautzin (CVSC) se trouve dans la partie centrale de l'Axe Volcanique Mexicain (AVM). Le CVSC borde au sud l'une des plus grandes mégapoles du monde, la ville de Mexico. Il existe aussi d'autres grandes concentrations démographiques qui exercent une forte pression sur la région. Par conséquent, les facteurs naturels ne sont pas les seuls à l'origine de l'érosion observée dans la région. L'activité anthropique est aussi un facteur important à considérer. La procédure la plus efficace pour mesurer le degré de changement de l'environnement due à l'activité anthropique est l'étude multi-date de la couverture végétale. Pour cela, le but de ce travail est l'analyse de l'évolution actuelle de l'occupation du sol à partir des techniques de la télédétection, afin de mieux comprendre le rôle respectif des facteurs naturels et anthropiques contrôlant cette évolution. A ce propos, nous avons réalisé une approche diachronique portant sur des données datant de 1973 à 2003 (images Landsat MSS et SPOT). Les cartes d'occupation du sol que nous avons obtenues ont été produites à partir de différentes procédures d'analyse d'image (spectral, textural et morphologie mathématique), car la seule classification multispectrale s'est avérée inefficace pour réaliser une cartographie de l'occupation du sol à partir des images. Les cartes d'occupation obtenues dans ce travail sont de bonne qualité comme l'indiquent les indices d'exactitude (75% pour la carte de 1973 ; 80% pour la carte de 1986 et 86% pour la carte de 2003). Ces résultats nous ont permis aussi d'observer que la qualité de la classification est liée à la résolution de l'image. Ainsi, les meilleures qualités d'extraction, sont obtenues avec les images SPOT dont la taille de pixel est de 20 mètres.

Les cartes d'occupation du sol obtenues à partir de la télédétection ont été utilisées pour quantifier le taux de changement (T_c) de surface occupée par chaque classe. Les résultats indiquent que la période la plus changeante est entre 1973 et 1986 et que la

classe prairies-maquis est la couvert végétal le plus touché par la régression (8%) suivi par les couvertures de « sol nu » et « forêt tropicale », dont leurs régressions sont de 6,3% et 6% respectivement. En revanche, les classes « cultures » et « bâti » connaissent les croissances les plus fortes (5% et 4% respectivement). Les observations réalisées pour la période 1973-2003 indiquent que la classe qui a progressé le plus est la « zone de bâti » avec une croissance de 4%, tandis que la couverture de « forêt tropicale » a expérimenté une diminution de 2,4% pendant ces 30 dernières années. Si l'on constate que les zones de réserve naturelle ont été peu touchées pendant ces 30 dernières années, on observe toutefois, de légers signes d'anthropisation à l'intérieur de la zone de réserve, tels que l'apparition des champs de cultures et des petits villages. D'après les observations et les résultats produits au cours de ce travail, nous avons mis en évidence que dans le CVSC, le principal facteur de transformation du terrain est de type anthropique

Mots clé : Evolution de l'occupation du sol, télédétection, Landsat MSS, SPOT, Chichinautzin, Mexique

INTRODUCTION

Les études sur le changement dans l'occupation et l'utilisation du sol sont d'une grande importance car ils permettent de connaître les tendances actuelles dans les processus de déforestation, dégradation, désertification et perte de la biodiversité d'une région déterminée (Lambin et al. 2001). Il existe des facteurs naturels, comme le climat, le vent, la pluie etc., qui favorisent les variations de la couverture végétale (Thompson et al. 1999). Néanmoins, pendant les dernières décennies, les activités humaines sont le principal déclencheur de la transformation des écosystèmes (Vitousek et al. 1997). Par exemple, on estime que la perte de forêts depuis les débuts de l'humanité jusqu'au temps présent varie d'un tiers à la moitié de la surface d'origine (McKee et al. 2003). Cette perte accélérée de la couverture forestière entraîne la disparition de la réserve génétique inhérente aux écosystèmes autochtones. Les conséquences les plus évidentes sont la perte du potentiel d'utilisation du sol pour le bien-être humain et la perte d'habitat en général (Velázquez et al. 2002). Au Mexique, la diminution du couvert végétal ne concerne pas seulement la couverture forestière mais aussi d'autres types de couvertures comme celles des prairies, maquis, mangroves. Dans le cas du CVSC, la perte de la couverture végétale est provoquée principalement par : 1) La progression des terres agricoles et d'élevage ; 2) la construction de routes, carrières, infrastructures urbaines et touristiques ; 3) l'exploitation forestière incontrôlée ; 4) la pollution atmosphérique ; 5) les incendies ; 6) la pression démographique (croissance urbaine et agricole, pollution, etc.) ; 7) les mauvaises pratiques d'exploitation des terres ; et 8) le manque de contrôle des autorités et de politiques publiques de préservation (López-Paniagua et al. 1996).

La procédure la plus efficace pour mesurer le degré de changement de l'environnement est l'étude multi-date de la couverture végétale (Lambin et al. 2001 ; Vågen, 2006). C'est pourquoi, dans ce travail, nous proposons d'évaluer le changement récent de

l'occupation du sol dans le CVSC à partir de l'analyse diachronique des images Landsat MSS pour la date 1973 et des images SPOT datés de 1986 et 2003.

LA ZONE D'ÉTUDE.

Le CVSC est contrasté d'un point de vue topographique, géologique et climatique. Cette région se trouve dans la partie centrale de l'Axe Volcanique Mexicaine (AVM) qui traverse le Mexique, des côtes du Pacifique jusqu'au Golfe du Mexique. La composition la plus fréquente est basaltique calc-alkaline (Marquez et De Ignacio, 2002). Le point le plus élevé du CVSC dépasse les 3500 mètres d'altitude et le point le plus bas descend à des altitudes inférieures à 800 mètres (Tapia-Varela et López-Blanco, 2002). Ces forts contrastes altimétriques déterminent l'existence de différents climats qui vont des climats froids au cœur de la Sierra Chichinautzin jusqu'aux climats chauds de la partie la plus méridionale de la zone (Jazcilevich et al. 2005).

Le CVSC correspond au bord sud d'une des plus grandes mégaloilles du monde, la ville de Mexico. Il existe aussi d'autres grandes populations démographiques près de la zone d'étude comme la ville de Cuernavaca au sud (Figure 1). Par conséquent, l'activité anthropique est un facteur important à considérer (Aguilar, 2008).

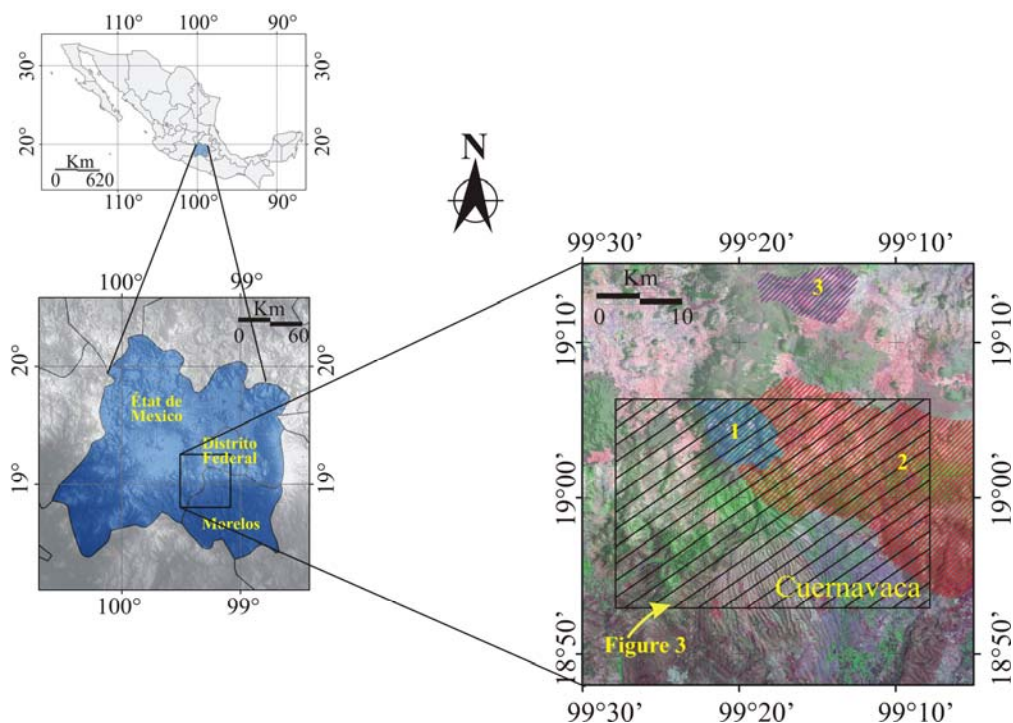


Figure 1. Localisation du CVSC et distribution géographique des réserves naturelles : 1) Parc National de Lagunas de Zempoala, 2) Corridor Biologique Chichinautzin et 3) Parc National Cumbres del Ajusco.

Il existe en effet divers facteurs qui justifient le fait de prendre en considération les changements d'utilisation du sol dans le CVSC. Parmi les facteurs importants de la région, on peut mentionner qu'une portion du CVSC fait partie d'un secteur de protection de la flore et de la faune sauvage (INE, 1996) (Figure 1). Les différentes études réalisées dans cette région indiquent la présence d'environ 860 espèces de plantes où 30 sont endémiques du Mexique (Bonilla-Barbosa et Viana 1997 ; Sánchez-Cordero et al. 2005). Par ailleurs, 56 espèces de reptiles et 24 espèces de d'amphibiens ont été jusqu'à présent décrites dans la région (NOM-059-ECOL-1994.1995 ; INE, 1996 ; Castro et al. 2006). En plus, une partie de ce secteur correspond à une zone de grande infiltration d'eau pour les départements de Morelos et Mexico (Tapia-Varela et López-Blanco, 2002 ; Carrera-Hernández et Gaskin, 2008).

Les différents types d'activités qui accélèrent les processus d'érosion des sols et le bilan du changement peut être mené à bien par l'évaluation du changement d'utilisation du sol que nous allons mettre en évidence à partir de l'analyse multi-temporelle des images satellites, ce qui permettra de savoir indirectement si les zones de réserve et les zones d'infiltration d'eau restent effectivement bien préservées pendant les trois dernières décennies.

METHODOLOGIE

Pour réaliser notre analyse, nous avons choisi une image Landsat MSS du 23 novembre 1973, et deux images SPOT datées respectivement du 21 novembre 1986 et du 19 janvier 2003. Toutes les images sont prises en saison sèche car nous avons été attentifs à ne pas comparer des images de saisons différentes, ce qui pourrait donner lieu à des résultats non comparables. Tout d'abord, nous avons géoréférencé les images en utilisant le système WGS84 avec la projection UTM 14 nord. Puis, nous avons réalisé un découpage des images en sélectionnant les parties qui correspondent à la même portion de l'espace à partir des coordonnées géographiques de notre zone d'étude.

Sur la figure 2, nous montrons un diagramme qui résume la séquence des traitements que nous avons effectués sur les images satellite. Tout d'abord, la visualisation d'une image dans une composition colorée RVB (rouge, vert, bleu) ; ensuite, une classification automatique non dirigée. Si le résultat de la classification ne permet pas l'identification des classes recherchées, on effectue une Analyse en Composantes Principales (ACP) sur des parties de l'image qui présentent de confusions de classes. Puis, on utilise des filtres texturaux comme l'entropie pour mieux séparer les zones de bâti et des cultures. Dans le cas des surfaces végétales, si elles ne sont pas bien séparées, on utilise donc, un indice de végétation (NDVI) pour mieux séparer ces classes. Par la suite, on obtient une carte d'occupation du sol pour chaque date analysée.

Afin d'évaluer le plus objectivement possible la qualité de l'extraction que nous avons opérée et par conséquent, les résultats obtenus à partir de ces extractions, nous avons procédé à un contrôle de qualité à travers le calcul d'une matrice de confusion (Foody,

2002) en utilisant comme matériel de référence, la cartographie éditée par l'INEGI (Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática) et en réalisant des révisions sur le terrain. Finalement on effectue la comparaison diachronique et on localise pour chaque classe analysée, les surfaces en progression, les surfaces en régression et les surfaces invariantes

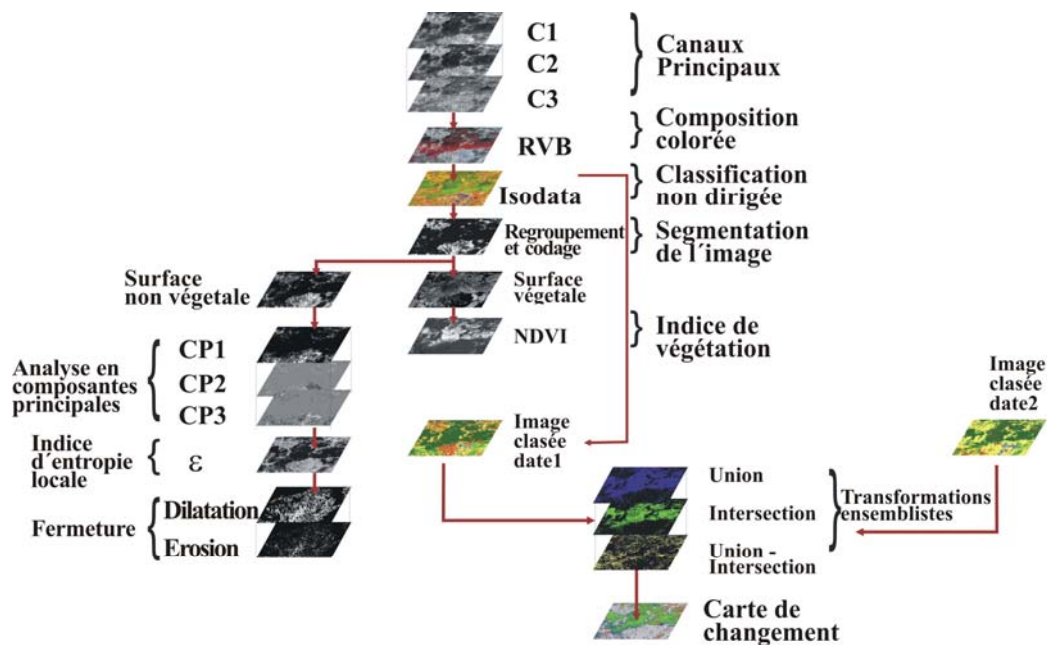


Figure 2. Procédure suivie pour l'obtention de la carte de changement d'occupation du sol à partir du traitement numérique des images satellite. Tout d'abord, la visualisation d'une image dans une composition colorée RVB; ensuite, une classification automatique non dirigée. Dans tous cas, si le résultat de la classification ne permet pas l'identification des classes recherchées, on effectue des autres analyses.

RÉSULTATS

Les cartes d'occupation du sol.

Les cartes résultantes du traitement par télédétection sont présentées sur la figure 3. Nous pouvons constater que les classes les plus répandues sont l'agriculture et la forêt d'altitude qui occupaient plus du 70% de la surface totale ; tandis que les classes qui présentent les proportions les plus petites sont : le sol nu, la zone urbaine et la forêt tropicale basse. Toutes les trois représentent moins de 10 % du total de la surface. L'analyse visuelle de ces trois cartes nous permet de constater que les principaux changements sont : a) la croissance des zones de bâti entre 1973 et 2003 ; b) le progrès des surfaces de cultures et c) des fluctuations des surface occupées par les « prairies – maquis » et les « sols nus ». La classe qui semble être la plus stable durant cette période,

est la forêt d'altitude qui occupe environ 45% de la surface pour les trois dates analysées.

L'évaluation de nos résultats à partir des matrices de confusion, nous permet de constater que les indices Kappa (0,686 pour l'image Landsat 1973 ; 0,747 pour l'image SPOT 1986 et 0,840 pour l'image SPOT 2003) et la mesure d'exactitude (75,09%, 80,07% et 86,89%) pour les trois cartes, indiquent que les classifications sont de bonne qualité. Pour mener à bien ces évaluations nous avons utilisé comme matériel de référence, la cartographie éditée par l'INEGI et quelques zones que nous avons reconnu sur le terrain. D'après l'analyse de la qualité de nos données, nous pouvons conclure que la qualité de la classification est liée à la résolution de l'image, puisque les meilleures qualités d'extraction, sont obtenues avec les images SPOT dont la taille de pixel est de 20 mètres, tandis que l'image Landsat a une qualité d'extraction un peu moins élevée comparativement

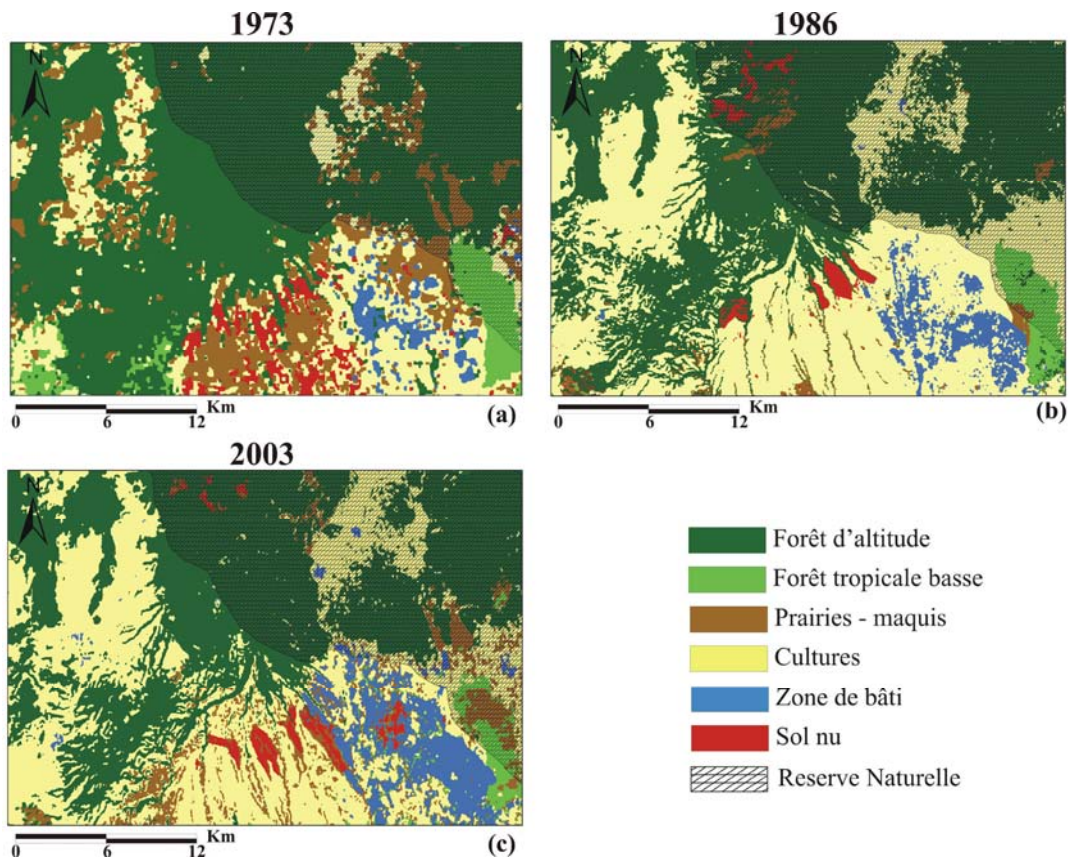


Figure 3. Extraits des cartes de l'occupation du sol en 1973, 1986 et 2003. Elles ont été obtenues à partir de l'analyse des scènes Landsat MSS, et SPOT.

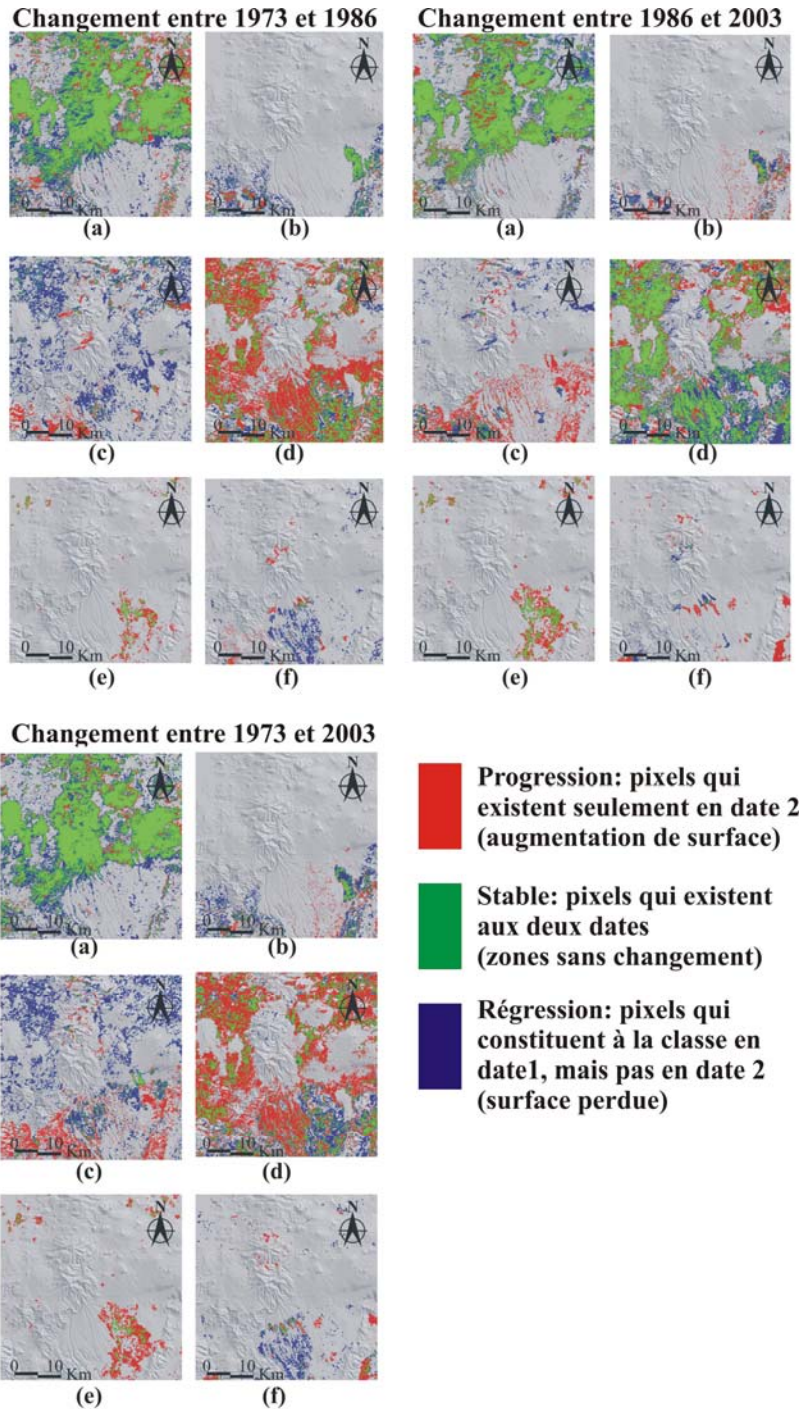


Figure 4. Cartographie de l'évolution de l'occupation du sol entre les dates 1973 - 1986, 1986 - 2003 et 1973 - 2003: a) classe « forêt d'altitude » ; b) classe « forêt tropicale » ; c) classe « prairies - maquis » ; d) classe « agriculture » ; e) classe « zone bâti » et f) classe « sol nu ».

Evolution de l'occupation du sol

Afin de montrer l'évolution de chaque classe d'occupation du sol au cours du temps, nous avons utilisé une série de transformations ensemblistes ; la relation entre la même classe à deux dates différentes, nous permet d'extraire les zones « stables », de « régression » et de « progression » de cette classe. On considère que T1 représente l'ensemble de pixels de la date 1 et que T2 est l'ensemble de pixels pour la date 2.

Quantification du taux de changement

Après de l'établissement des différents types de liaisons entre les trois dates, nous avons calculé les taux de changement entre les surfaces des classes d'occupation du sol entre les dates 1973 – 1986 (T1 – T2), les dates 1986 - 2003 (T2 – T3) et les dates 1973 -2003 (T1 – T3). Pour cela, nous avons utilisé l'équation proposée par la FAO en 1996 et dont l'utilisation est très courante dans les études sur le changement d'occupation du sol (Velazquez et al.2002 ; Noyola-Medrano, 2006) Les valeurs positives représentent une progression de la surface de la classe pendant la période analysée et les valeurs négatives indiquent la perte de surface d'une classe entre les deux dates. Les valeurs proches de zéro nous indiquent que la classe reste relativement stable entre les deux dates (tableau 1, 2 et figure 5).

Evolution de l'occupation du sol entre 1973 et 1986

Sur la figure 4, on observe que la classe dont la surface reste la plus stable dans le temps, est la classe de la forêt d'altitude, outre qu'il s'agit de la classe la plus étendue aux deux dates. En revanche, ce sont les classes de cultures et de prairies – maquis qui sont les plus fluctuantes. Une autre classe qui montre des forts changements est la classe « zone urbaine » qui est concentrée principalement au sud du CVSC. Une telle évolution est liée à une forte croissance actuelle de la population de la région. En effet, les augmentations les plus importantes de la population ont eu lieu entre les décennies 70 et 80 (INEGI, 1981 ; Small et Naumann, 2001).

	1973	1986		
CLASSES	SURFACE (Km²)	SURFACE (Km²)	T1 - T2	Tc1
FORÊT D'ALTITUDE	1049,8	923,1	126,6	-0,0098
FORÊT TROPICALE	144,5	67,3	77,1	-0,0571
PRAIRIES - MAQUIS	381,8	130,3	251,5	-0,0794
CULTURES	518,2	988,2	-470,0	0,0509
ZONE DE BÂTI	33,8	59,1	-25,2	0,0438
SOL NU	68,3	28,4	39,9	-0,0652
TOTAL	2196,4	2196,4		

Tableau 1. Changement d'occupation du sol entre 1973 et 1986. T1 = surface à la date 1 ; T2 = surface à la date 2 ; Tc1 = taux de changement entre les dates 1973 et 1986. Les aires cultivées ont sensiblement progressé pendant cette période (couleur orange). A l'inverse, nous pouvons constater une forte diminution des surfaces de « prairies – maquis » (couleur bleue).

Les résultats du calcul de taux de changement entre 1973 et 1986 (Tc1) montrent que la classe « cultures » présente une importante progression avec un Tc1 de 0,0509, soit plus de 470 km² de croissance durant une période de 13 années (tableau 1). Ce résultat est mis aussi en évidence par la figure 5, où nous pouvons percevoir plus clairement d'autres changements importants tels que la diminution des surfaces des classes « prairies – maquis » (-8%) et « sol nu » (-6,5%) et la progression des surfaces de la classe « zone de bâti » (4%).

Evolution de l'occupation du sol entre 1986 et 2003

Pendant cette période la classe forêt d'altitude présente une grande stabilité entre les deux dates (figure 4), mais nous pouvons aussi observer un comportement similaire pour la classe « cultures » qui présente un grand nombre de pixels en commun avec la classe correspondante en 2003 (988 contre 938 ; tableau 2). Dans le cas de cette dernière classe, sur la figure 4 (d), il est clair qu'elle a perdu une proportion considérable de sa surface au profit des zones de bâti (figure 4e). Sur le figure 5 nous observons que les changements durant cette période ne sont pas aussi importants que durant la période précédente. Cependant, nous pouvons noter que les classes « sol nu », « prairies – maquis » et « zones de bâti » présentent des progressions légèrement plus élevées que le reste des classes (Tc2 de 0,0243 ; 0,0261 et 0,0399 respectivement). En regardant les figures 4 et 5, nous pouvons donc établir que l'occupation du sol pendant la période comprise entre 1986 et 2003 montre une stabilité globale, en particulier de la « forêt d'altitude » et des « cultures ». Si les classes de « zones de bâti », « sol nu » et « prairies – maquis » présentent de légères progressions durant cette période (3,8%, 2,6% et 2,4 respectivement ; figure 5), une grande proportion des surfaces de ces classes reste stable (figure 4). Une grande partie de la zone préserve bien la couverture de la forêt jusqu'à 2003 et correspond à la zone de réserve (figure 3). Néanmoins, il y a des zones à l'intérieur de cette région qui montrent des signes d'anthropisation, comme par exemple les cultures et les petits villages (figure 3).

	1986	2003		
CLASSE	SURFACE (Km ²)	SURFACE (Km ²)	T2 - T3	Tc2
FORÊT D'ALTITUDE	923,1	828,7	94,5	-0,0063
FORÊT TROPICALE	67,3	69,9	-2,6	0,0023
PRAIRIE - MAQUIS	130,3	202,0	-71,7	0,0261
CULTURES	988,2	938,1	50,1	-0,0031
ZONE DE BÂTI	59,1	114,9	-55,8	0,0399
SOL NU	28,4	42,8	-14,4	0,0243
TOTAL	2196,4	2196,4		

Tableau 2. Changement d'occupation du sol entre 1986 et 2003. T2 = surface à la date 2 ; T3 = surface à la date 3 ; Tc2 = taux de changement entre les dates 1986 et 2003. Les changements sont faibles et il s'agit seulement de la progression des classes « prairies – maquis », « bâti » et « sol nu » (couleur orange).

Bilan final de l'évolution de l'occupation du sol dans le CVSC

Sur la figure 5 nous observons l'ensemble de résultats obtenus à partir du calcul du taux de changement pour trois périodes de temps : a) 1973 – 1986 (13 ans) ; b) 1986 – 2003

(17 ans) et c) 1973 – 2003 (30 ans). Nous pouvons constater que les changements les plus spectaculaires ont eu lieu entre les années 1973 et 1986. Les deux autres comparaisons montrent des changements plus modérés. Cependant, nous pouvons observer que, dans les trois cas, la classe « zones de bâti », présente environ 4% des augmentations de surface, indiquant une progression constante pendant les trois périodes de temps analysées. Pendant les trois périodes, les classes qui ont progressé les plus sont les « cultures » et les « zone de bâti » qui ont connu les augmentations les plus fortes entre 1973-1986 et 1973-2003 (major à 4% dans les deux cas).

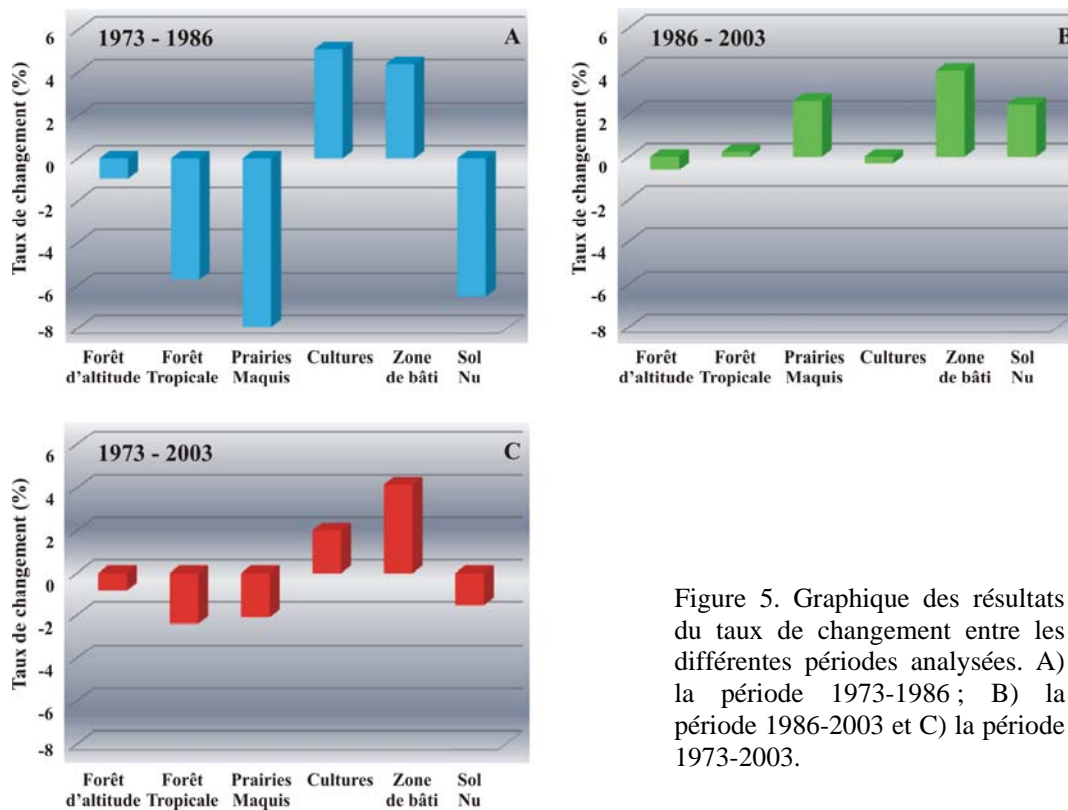


Figure 5. Graphique des résultats du taux de changement entre les différentes périodes analysées. A) la période 1973-1986 ; B) la période 1986-2003 et C) la période 1973-2003.

CONCLUSION

A vu des résultats obtenus, nous avons considéré que les extractions faites sur les images satellites, à partir de classifications automatiques sont de qualité suffisante (Exactitudes 75,09% pour l'image MSS du 1973, 80,07% pour l'image SPOT du 1986 et 86,89% pour l'image SPOT du 2003) pour pouvoir établir que les changements observés sur les images correspondent effectivement à des variations de l'occupation du sol durant ces 30 dernières années. Nous avons constaté que les changements les plus importantes ont eu lieu dans la première période analysée (1973 – 1986) et qu'ils concernent essentiellement les classes de « zones de bâti » et « cultures » qui ont connu les plus grandes progressions (4% et 5% respectivement). En revanche, les

changements opérés pendant la deuxième période (1986 – 2003) sont moins importants, même si on observe une légère diminution des surfaces de forêt d'altitude qui a été remplacée par des sols nus et des zones de bâti. L'analyse de l'ensemble de la période (1973 – 2003) nous permet de corroborer l'hypothèse d'un accroissement de l'anthropisation du milieu dans cette région. Si l'on constate que les zones de réserve naturelle ont été peu touchées pendant ces 30 dernières années, on observe toutefois, de légers signes d'anthropisation à l'intérieur de la zone de réserve, tels que l'apparition des champs de cultures et des petits villages (Figure 3). Par ailleurs, on observe aussi une légère progression de la forêt d'altitude, reforestation qui ne concerne pas les régions de la forêt tropicale qui se trouvent dans des zones les plus densément peuplées du CVSC

REMERCIEMENT

Les auteurs remercient à ISIS, par faciliter l'accès à l'imagerie SPOT, ainsi qu'au Pôle Image de l'Université Paris 7 et à l'équipe de recherche PRODIG. Cristina Noyola remercie au CONACYT par les bourses accordées pour des études de doctorat à l'université de Paris 7 et postdoctorat au IPICYT, ainsi qu'à la SEP par la bourse complémentaire. Une reconnaissance spéciale à SFERE pour le financement accordé pour la réalisation des séjours sur le terrain. Finalement, nous exprimons notre remerciement au rapporteur du Comité Exécutif d'ICA par ses recommandations qui ont aidé à améliorer l'écrit original.

BIBLIOGRAPHIE

- Aguilar, A.G. 2008. Peri-urbanization, illegal settlements and environmental impact in Mexico City. *Cities*, 25(3), pp. 133-145
- Bonilla-Barbosa, J. R.; Viana, L.J. 1997. Parque Nacional Lagunas de Zempoala. Listados Florísticos de México. Instituto de Biología, UNAM, 31 p.
- Carrera-Hernández, J.J., Gaskin, S.J. 2008. Spatio-temporal analysis of potencial aquifer recharge: Application to the Basin of Mexico. *Journal of Hydrology*, 353(3-4), pp. 228-246.
- Castro-Franco, R.; Vergara-García, G.G.; Bustos-Zagal, M.G.; Mena-Arizmendi, W. 2006. Diversidad y distribución de anfibios del Estado de Morelos, Mexico". *Acta Zoologica Mexicana*, 22(1), pp. 103-117.
- FAO. 1996. Forest resources assessment 1990. Survey of tropical forest cover and study of change processes. Forestry Paper, 130, Roma, 152 p.
- Foody, G.M. 2002. Status of land cover classification accuracy assessment. *Remote Sensing of Environment*, 80, pp. 185-201.
- Instituto Nacional de Ecología – INE -. 1996. Atlas de Reservas de la Biosfera y otras áreas naturales protegidas, México.
- Instituto Nacional de Geografía, Estadística e Informática – INEGI -. 1981. Tabulados básicos. X Censo General de Población y Vivienda, 1980. 1 CD
- Jazcilevich, A.D., García, A.R., Caetano, E. 2005. Locally induced surface air confluence by complex terrain and its effects on air pollution in the valley of Mexico. *Atmospheric Environment*, 39(30), pp. 5841-5849.
- Lambin, E.F. et al., 2001. The causes of land-use and land-cover change: moving beyond the myths. *Global Environmental Change*, 11, pp. 261-269.
- López-Paniagua, J., F. J. Romero y A. Velázquez. 1996. Actividades humanas y su impacto en el hábitat del conejo zacatuche. In: Velázquez, A., F.J. Romero y J. López-Paniagua (Eds). *Ecología y*

- conservación del conejo zacatuche *Romerolagus diazi* y su hábitat. Fondo de Cultura Económica/ Universidad Autónoma de México, pp. 119-132.
- Marquez, A.; De Ignacio, C. 2002. Mineralogical and geochemical constraints for the origin and evolution of magmas in Sierra Chichinautzin, Central Mexican Volcanic Belt. *Lithos*, 62, pp. 35-62.
- McKee, J.K.; Sciulli, P.W.; Foose, C.D.; Waite, T.A. 2003. Forecasting global biodiversity threats associated with human population growth. *Biological Conservation*, 115, pp. 161-164.
- NOM-059-ECOL-1994.1995. Norma Oficial Mexicana NOM-059-ECOL-1994. In: *Gaceta Ecológica*. Secretaria de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca, 7(33), pp. 8-72
- Noyola-Medrano, M.C. 2006. L'évolution morphologique actuelle du Champ Volcanique de la Sierra Chichinautzin (Mexique) à partir de l'analyse tomomorphométrique des cônes de scories et du changement de l'occupation du sol. Tesis Doctorat. Université Paris 7 Denis-Diderot.
- Sánchez-Cordero, V. Illoldi-Rangel, P., Linaje, M., Sarkar, S., Peterson, T. 2005. Deforestation and extant distributions of mexican endemic mammals. *Biological Conservation*, 126(4), pp. 465-473.
- Small, C.; Naumann, T. 2001. The global distribution of human population and recent volcanism. *Environmental Hazards*, 3, pp. 93-109.
- Tapia-Varela, G.; Lopez-Blanco, J. 2002. Mapeo geomorfológico analítico de la porción central de la Cuenca de México: unidades morfogenéticas a escala 1: 100,000". *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 19(1), pp. 50-65.
- Thompson, R. S.; Anderson, K. H.; Bartlein, P. J. 1999. Atlas of Relations Between Climatic Parameters and Distributions of Important Trees and Shrubs in North America. U.S. Geological Survey, Professional Paper 1650, part A and part B.
- Vågen, T.G. 2006. Remote sensing of complex land use change trajectories—a case study from the highlands of Madagascar. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 115(1-4), pp. 219-228.
- Velázquez, A., et al., 2002. "Patrones y tasas de cambio de uso del suelo en México". *Gaceta Ecológica*, 62, pp. 21-37.
- Vitousek, P.M., Mooney, H.A., Lubchenco, J., Melillo, J.M. 1997. Human domination of Earth's ecosystems. *Science*, 277, pp. 494-499.