

ANALYSE DIACHRONIQUE DE LA DYNAMIQUE DES MILIEUX NATURELS PAR TÉLÉDÉTECTION SATELLITAIRE

Dr. Julian C. Barbalata

Professeur, Université de Moncton (N.-B.) Canada

Commission VII, Working Group 5

KEY WORDS : Environment, Analysis, Change_Detection, Classification, Multispectral, Multitemporal

ABSTRACT

The hydrographical system of the Danube Delta and of the adjoining Black Sea shore presents major scientific and economical interest. This system represents one of the largest area on Earth covered by reed and constitutes the specific habitat for a rich fauna as well.

Between 1960-1989 a lot of unbalance have been produced by agricultural, piscicultural and silvicultural arrangements. They negatively affected the development of natural ornithological and forestry reserves. Since 1989, scientific and preservation purposes have prevailed against the economic ones, and in 1990 the Danube Delta has been declared a Biosphere Reserve.

The main goal of this study was to detect the changes occurred in the Danube Delta during the last twenty years based on photogrammetric and remote sensing methods. The study emphasizes the main morphohydrographical categories such as marine levees, alluvial lands, old streams as well as the evolution of vegetation. Temporal analyses of satellite images: MSS-Landsat 2, TM-Landsat 5, HRV-Spot and of aerial digitized images were performed in a computer environment with PCI-Easy Pace and R. Welch's Desktop Mapping System softwares. The analyses comprise: a) noise errors and radiometrical degradation preprocessing; b) geometrical corrections based on aerial triangulation measurements performed with Wild Aviolyt BC2 stereoplotter; resampling and merging of MSS, TM and SPOT data using cubic convolution; d) spatial enhancement using low, high and texture filters; e) multi-spectral enhancement using specific technics: image ratioing and ratio differencing, principal components analysis, optimisation of the visual analysis of the principal component channels; f) supervised maximum-likelihood classification and unsupervised clustering classification; g) post-classification comparison by change detection techniques.

RÉSUMÉ

Le système hydrographique du delta du Danube ainsi que de la zone côtière adjacente de la mer Noire présentent un intérêt scientifique et économique majeur. Ce système constitue une grande superficie de la Terre recouverte de roseau et représente en même temps l'habitat spécifique pour de nombreuses espèces d'oiseaux sauvages.

Pendant la période 1960-1989, les aménagements agricoles, sylvicoles, piscicoles et les cannaies ont produit un grand déséquilibre écologique, influençant négativement le développement des réserves naturelles ornithologiques et forestières du delta du Danube. Après 1989, vu l'importance de préserver ce milieu naturel, le delta du Danube a été déclaré réserve de la biosphère.

Dans ce contexte, le but principal de cette étude a été de détecter les changements survenus dans le paysage du delta pendant les vingt dernières années en utilisant des méthodes photogrammétriques et de télédétection. L'accent a été mis sur la géomorphologie générale, sur les formations caractéristiques (levées alluviales, cordons littoraux, anciens cours d'eau) et sur l'évolution de la végétation. L'analyse diachronique des images satellitaires: MSS-Landsat 2, TM-Landsat 5, HRV-SPOT, et des images photogrammétriques numérisées a été

effectuée dans un environnement micro-ordinateur avec les logiciels Easi-Pace de PCI et Desktop Mapping System de R. Welch. Cette analyse comprend: a) prétraitement relatif aux erreurs de bruit et dégradation radiométrique; b) corrections géométriques à partir de mesures d'aérotriangulation effectuées sur le restituteur analytique Wild Aviolyt BC2; c) sur-échantillonnage des données MSS, TM et SPOT par convolution bi-cubique; d) rehaussement spatial par l'application de filtres bas, haut et de texture; e) rehaussement multi-spectral par l'application des techniques spécifiques: ratio spectral, combinaisons arithmétiques, analyse des composantes principales et l'optimisation de l'analyse visuelle des canaux des composantes principales; f) classification assistée par la méthode de maximum de vraisemblance et non-assistée par l'analyse des groupements; g) filtrage post classification; h) détection des changements.

1. INTRODUCTION

Les changements de l'environnement impliquent la mise en oeuvre de nouvelles méthodes d'évaluation. Parmi ces méthodes, la télédétection présente un intérêt particulier, grâce à ses caractéristiques essentielles d'enregistrement et d'analyse. La télédétection, qui permet une vision globale des phénomènes, est en même temps le moyen d'étude privilégié pour contribuer à assurer une meilleure gestion de l'environnement. Les satellites d'observation de la Terre ont été fort utiles pour révéler les traumatismes régionaux ou continentaux et les données multitudes acquises nous ont informés sur des signes de dégradation de l'environnement dans plusieurs régions du monde. C'est dans ce cadre qu'a été entreprise cette étude consacré à l'évolution du milieu naturel du delta du Danube. L'utilisation des données satellitaires historiques MSS de Landsat, des données satellitaires à haute résolution HRV de SPOT et TM de Landsat, ainsi que des photographies aériennes à petite échelle, nous ont permis d'analyser les changements dans le paysage du delta du Danube au cours des vingt dernières années.

2. CADRE GÉOGRAPHIQUE

La superficie du delta proprement dit est de 4 152 km², dont la plus grande partie se trouve en territoire roumain (3 446 km², soit 82 %). La superficie de l'ancien golfe d'Halmyris, qui abrite aujourd'hui le complexe lagunaire Razim-Sinoe, est de 1 115 km², dont 863 km² sont occupés par des lacs. Les deux unités géographiques réunies totalisent 5 165 km², dont 732 km² (12,2 %) s'étendent sur la rive gauche du bras et du delta secondaire de Chilia, dans la Bessarabie du Sud.

Les limites géographiques de l'espace deltaïque ainsi définies sont entre 44° 47' 30" (extrémité de la levée de Perisor) et 45° 37' 30" (rive du lac de Sasic en Bessarabie du Sud) latitude Nord,

ainsi qu'entre 28° 44' 25" (bifurcation du bras Chilia) et 29° 46' (extrémité est du delta secondaire du bras Chilia, en Bessarabie) longitude Est.

Selon l'avis de nombreux scientifiques roumains et étrangers (Gastescu, 1992), l'origine du delta du Danube peut être placée dans le Pléistocène supérieur, quand, environ 13 000 ans B.P., le "cordon littoral initial" a commencé à se constituer dans la région centrale d'un golfe de la mer Noire; ce processus a duré presque vers 9 500 B.P., quand ce cordon, qui correspond à l'axe central de l'alignement des cordons de Jibriceni, Letea, Caraorman et Crasnicol, avait fini par fermer le golfe pour en faire un liman. Sans rien perdre des traits classiques d'un delta, le delta du Danube pourrait être également décrit comme une étendue plate, soit une plaine alluviale en cours de formation, avec une très légère pente de l'ouest vers l'est (0,006 %), d'où surgissent, hauts de quelques mètres à peine, le champ de Chilia et la levée fluviale de Stipoc et les cordons littoraux de Letea et de Caraorman, couverts de forêts.

Par rapport au "niveau zéro" d'altitude de la mer Noire, 20,5 % du delta se trouve au-dessous et 79,5 % au-dessus de ce repère. Les reliefs les plus importants se trouvent sur les cordons littoraux de Letea (12,4 m) et de Caraorman (7 m) et les grandes dépressions appartiennent aux bras du fleuve: 39 m pour le bras de Chilia, 34 m à Tulcea, 26 m pour le bras de Sfintu Gheorghe et 18 m à Sulina.

3. MATÉRIEL ET MÉTHODES

3.1. Matériel

Pour réaliser ce projet, ont été utilisées des données MSS de Landsat 2 (1975 - 1981), TM de Landsat 5 (1984), HRV (XS) de SPOT (1986 - 1993). Les caractéristiques de ces données sont présentées sur le tableau 1.

Tableau 1. Caractéristiques des données satellitaires

	1975	1981	1984	1986	1993
	24 juillet	5 juin	28 juin	27 mai	27 avril
Satellite	Landsat 2	Landsat 2	Landsat 5	SPOT 1	SPOT 1
Instrument	MSS	MSS	TM	HRV 2	HRV 2
Acquisition	←===== multibande =====→				
Bandes	1,2,3,4	1,2,3,4	1,2,3,4,5,6,7	1, 2,3	1,2,3
K/J	195/029	195/029	180/029	98/259	98/259
Résolution (mètres)	79 x 79	79 x 79	30 x30	20 x 20	20 x 20
Rectification (pixels)	±0,475	± 0,877	± 0,813	± 0,391	± 0,275

Les traitements numériques de ces images ont été effectués dans un environnement micro-ordinateur Unitek EISA 486-DX-50 avec 32 mégaoctets de RAM et 5,35 gigaoctets de mémoire sur les deux disques durs du système. La partie des traitements concernant l'application des méthodes photogrammétriques numériques a été effectuée avec le logiciel Desktop Mapping System (DMS) version 3.1. La partie des traitements de base des images satellitaires a été effectuée avec le logiciel PCI, version 5.2 EASI/PACE et, finalement, pour les sorties sur l'imprimante couleurs DeskJet 560 C de Hewlett-Packard on a utilisé le logiciel Idrisi pour Windows.

Les corrections géométriques ont été appliquées sur la base d'un réseau de points de contrôle déterminé à partir des mesures d'aérotriangulation effectuées sur le restitué analytique Wild Aviolyt BC2 (Barbalata, 1988, 1993).

Une campagne de vérité-terrain (1991-1993), effectuée par des chercheurs roumains a permis de recueillir les données nécessaires pour dresser une carte thématique et de valider la plupart des interprétations.

3.2. Méthode

La détection des changements à l'aide de données multibandes implique des traitements préliminaires, des classifications et des procédures spécifiques de type post-classification (Allum and Dreisinger, 1987; Hill and Sturm, 1991; Jensen *et al.*, 1995).

3.2.1. Traitements préliminaires. Pour assurer la comparabilité des données radiométriques multidates, il a fallu ramener les données MSS et TM à la résolution spatiale de l'image de

référence de HRV (XS).

À cause des résolutions différentes de ces capteurs, 80 m pour MSS, 30 m pour TM et 20 m pour HRV (XS) les données ont été soumises à un suréchantillonnage de 4 x 4 pour MSS et de 1,5 x 1,5 pour TM, ce qui a conduit à l'amélioration des contrastes et à la sélection de points d'appui. Les 35 points qui représentent des objets invariants ont servi au calcul des fonctions de transformation géométrique représentées par des polynômes de 3-ème degré. Ces transformations correspondent à l'ajustement des images sur-échantillonnées sur l'image de référence HRV (XS) d'avril 1993. Etant donné que les coordonnées obtenues après les transformations ne correspondent pas à un pixel précis, il a été nécessaire d'appliquer une convolution cubique. Cette fonction d'échantillonnage, qui utilise une approximation bicubique de 16 voisins les plus proches du pixel concerné, permet de modéliser l'image localement par une surface polynomiale (Defourny, 1994). À la fin on obtient des plans spectraux qui vont coïncider parfaitement au niveau de chaque pixel, avec l'image de référence. La précision de ces transformations varie selon les images utilisées. Les erreurs moyennes quadratiques pour chaque scène rectifiée sont présentées par le tableau 1. Dans le cas de la rectification des quatre images on constate que les précisions varient de ±0,275 à ± 0,877 pixels (tableau 1) et que les précisions observées par exemple pour la rectification de l'image TM- Landsat (juin 1984) sur l'image HRV-SPOT (avril 1993) en utilisant 35 points de contrôle, varient de ± 0,119 à ±1,207 pixels, avec un écart maxima de l'ordre de 20 m.

Des compositions-couleurs infrarouge ont été réalisées en appliquant les traitements suivants:

- étalement par la méthode d'égalisation des histogrammes,
- création de l'image composite à partir des 3 canaux les plus décorrélés dans le cas de l'image TM et à partir des 3 canaux spécifiques de HRV (XS),
- rééchantillonnage par convolution bi-cubique.

Les compositions colorées mettent très bien en évidence les caractéristiques géo-morphologiques du delta du Danube. On peut distinguer clairement les différents états du sol en fonction du degré d'humidité, notamment les étendues de grande humidité, représentées par les eaux courantes, les lacs, les eaux turbides et stagnantes, les restes des anciens méandres et les terrains marécageux, ensuite les étendues d'humidité modérée et faible, représentées par la structure parcellaire des terres agricoles et les sols sableux secs et nus. Les compositions colorées révèlent également les principales formations morpho-hydrographiques représentées par les cordons littoraux, les levées fluviales, les plaines continentales, les bras, les ruisseaux et les chenaux.

Un problème rencontré par l'utilisation des images historiques pour des fins d'analyse diachronique est représenté par la variation de l'angle d'incidence du Soleil, la variation dans les conditions atmosphériques et d'humidité. Il y a des facteurs qui affectent les valeurs de luminance des pixels, comme les différences de données de calibration des détecteurs appartenant aux différents systèmes de capteurs, la variation de l'angle d'incidence du Soleil, or la variation de la distance Soleil-Terre. Normalement, les données multitudes doivent être normalisées pour réduire la variation des valeurs de luminance et les ramener aux conditions spécifiques de l'image de référence.

À cause du manque d'informations concernant les caractéristiques atmosphériques et la réflectance bidirectionnelle des objets, nous avons adopté un modèle de correction qui tient compte des données de calibration du détecteur et des caractéristiques astronomiques, atmosphériques et l'angle de phase appartenant à la scène de référence (HRV). Le calage radiométrique a été effectué sur des objets invariants et pseudo-invariants [Chavez, 1989] : lacs, zones urbaines (Sulina, Sf. Gheorghe, Dunavat), portions du fleuve Danube, sablières sur la côte de la mer Noire, pour un total de 15 objets. La normalisation des images MSS et TM a été faite par l'application à chaque bande spectrale d'une équation de régression linéaire de type $y = ax + b$.

Les résultats de la normalisation sont représentés par les coefficients de calage a et b, ainsi que par les coefficients de

corrélation r (tableau 2).

En analysant le tableau 2 on constate que le gain associé avec l'image HRV du 27 mai 1986 est minime, alors qu'il est significatif pour les images historiques MSS.

Tableau 2. Paramètres d'équations de régression

Date	Capteur	Bande	Coef. a	Coef. b	Coef. r
1975 24 juillet	MSS	1	0,895	29,493	0,88
		2	0,638	26,572	0,86
		3	2,497	26,653	0,89
		4	3,415	30,451	0,79
1981 5 juin	MSS	1	2,379	19,503	0,85
		2	2,034	12,705	0,89
		3	1,856	23,172	0,78
		4	3,697	25,005	0,89
1984 28 juin	TM	1	1,175	28,505	0,86
		2	0,903	24,051	0,87
		3	1,305	31,015	0,87
		4	1,727	18,903	0,78
		5	1,503	21,441	0,89
1986 27 mai	HRV1	1	0,468	34,754	0,89
		2	0,681	29,195	0,85
		3	0,611	25,288	0,87

3.2.2 Classification

Une classification non-dirigée (Lee and Marsh, 1995) pour l'image de référence a fourni 14 classes. Les résultats ont été comparés avec les données de la campagne de vérité-terrain et finalement, après le regroupement des classes, une nouvelle classification dirigée de huit classes a été réalisée par la méthode de maximum de vraisemblance.

Cette classification a servi pour la validation des classifications effectuées sur les images MSS et TM.

On peut distinguer sur les images classifiées les catégories morpho-hydrographiques principales :

- les cordons littoraux (8 %) qui occupent le côté est du delta et qui sont placés presque à travers des bras du Danube. Les

principaux cordons littoraux sont représentés par les cordons Letea, Caraorman, Saraturile, Crasnicol.

- les levées fluviales (6 %) qui accompagnent les bras principaux et secondaires du fleuve et qui sont mieux représentées vers le sommet du delta, là où elles ont un aspect de plaines alluviales hautes de 2 à 5 m qui s'effilent vers la mer;

- les plaines continentales (3%) qui sont formées de dépôts de loess et qui sont représentées par la plaine de Chilia et par la zone centrale du cordon littoral de Stipoc ;

- les terrains marécageux, couverts tantôt d'eau, quand le fleuve est haut, tantôt d'une végétation palustre, qui occupent dans leur état naturel environ 67,2 % de la superficie du delta, et dont l'altitude varie entre -0,5 et 1 m ;

- les lacs (8 %) qui remplissent les dépressions qui se trouvent au-dessous du niveau zéro à l'ouest (delta fluviale) et au-dessous du niveau -0,5 m à l'est (delta maritime) où ils forment des complexes lagunaires. Les lacs occupaient en 1964 une superficie de 31 260 ha, soit 9,3 % du territoire du delta. En 1990, après l'assèchement de certains d'entre eux au profit des terrains agricoles, leur superficie totale n'était que de 25 800 ha, soit 8 %.

Les plus grands lacs du delta du Danube sont celui de Dranov (2 170 ha), le lac Rosu (1 445 ha), Gorgova (1 377 ha), Lumina (1 367 ha), Isac (1 101 ha), Merhei (1 057 ha) ;

- les bras, les ruisseaux et les chenaux principaux qui couvrent 5 % de la superficie, dont les bras seuls totalisent 4 %.

3.2.3. Traitements post-classification. Des études concernant le suivi des changements des caractéristiques de la végétation (Cihlar et al., 1991; Tucker et al., 1985; Marsh et al., 1992) sont basées sur l'indice de végétation normalisé. La réflexion différentielle de la végétation verte dans le spectre du visible et du proche-infra-rouge du spectre électromagnétique constitue l'argument de base théorique pour l'application de cette méthode (Karimoune et al., 1993; Weber et al., 1993; Wolter et al., 1995). Dans le cas de données MSS, l'indice de végétation NDVI, s'exprime par la relation :

$$NDVI(MSS) = (CH4 - CH2) / (CH4 + CH2)$$

où :

CH2 = les réflectances dans le rouge visible (0,6 - 0,7 microns)

CH4 = les réflectances dans le proche-infrarouge (0,8 - 1,1 microns).

Finalement, l'indice NDVI a été calculé en fonction du degré

d'absorption par la chlorophylle dans la bande rouge. Celle-ci est proportionnelle à la concentration de la chlorophylle dans les feuilles. L'indice NDVI a été calculé également en fonction de la réflectance dans la bande proche-infrarouge. Celle-ci est proportionnelle avec la verdure des feuilles et aux caractéristiques de la surface. Une autre version de l'indice de végétation, sous le nom de *Soil Adjusted Vegetation Index* (SAVI) (Huete, 1988) a été calculée. Dans le cas des données MSS la relation SAVI devient :

$$SAVI(MSS) = CH4 - CH2 / (CH4 + CH2 + 0,5) * 1,5$$

Pour certaines zones analysées, la comparaison entre les valeurs NDVI et SAVI a montré que les valeurs SAVI sont plus significatives pour le couvert végétal que les valeurs NDVI. Par conséquent, nous avons choisi l'indice de végétation SAVI pour caractériser l'état de la végétation dans le cas des données MSS (Lee and Marsh, 1995).

Comme dernière étape principale dans le cadre de l'analyse multitemporale sur la base des classifications des données NDVI et SAVI, nous avons appliqué une classification matricielle croisée qui s'est avérée très utile pour identifier les changements entre différentes dates. Les matrices résultantes nous ont permis d'obtenir pour les classes analysées :

- sur la diagonale principale, le nombre de pixels, ou le pourcentage de pixels qui n'ont pas subi de changement entre les deux dates analysées;

- au-dessus de la diagonale principale, le nombre de pixels, ou le pourcentage de pixels qui ont subi des changements positifs (augmentation);

- au-dessous de la diagonale principale, le nombre de pixels, ou le pourcentage de pixels qui ont subi des changements négatifs (diminution).

4. DISCUSSIONS ET CONCLUSIONS

Les résultats de cette étude nous montrent le potentiel des données historiques (MSS, 1975-1981), des données TM (1984) et HRV et de leur intégration dans des analyses multitemporales, pour obtenir des informations viables concernant le suivi des changements dans le milieu naturel du delta du Danube sur une période approximative d'une vingtaine d'années.

Une attention particulière doit être réservée aux traitements

préliminaires, car la qualité des analyses ultérieures dépend surtout, dans le cas des analyses diachroniques, de la prise en considération des caractéristiques des différents capteurs et des conditions atmosphériques spécifiques.

L'utilisation de l'indice de végétation SAVI, combinée avec l'analyse matricielle croisée, ont apporté des informations très utiles en ce qui concerne le pourcentage de changements des différentes classes de végétation des écosystèmes du delta du Danube. Les analyses détaillées et les résultats quantitatifs et qualitatifs sont présentés dans (Barbalata, 1995).

5. REMERCIEMENTS

Nous remercions tout particulièrement l'AUPELF-UREF qui a financé totalement les travaux de recherche associés à cette étude.

6. RÉFÉRENCES

Allum, J.A.E. and Dreisinger, B.R., 1987. Remote sensing of vegetation change near Inco's Sudbury mining. *International Journal of Remote Sensing*, 8(3), pp. 399-416.

Barbalata, J. C., 1988. Block triangulation at large scale using flight variant UMK camera photography. In: *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Kyoto, Japan, Vol. XXVII, Part B11, pp. 469-475.

Barbalata, C. J., 1993. Integration of the Aviolyt BC2 Analytical Stereo-Plotter into CARIS Geographic Information System. *Computers, Environment and Urban Systems*, 17(3), pp.239-242.

Barbalata, C.J., 1995. Étude de l'évolution du milieu naturel du delta du Danube par télédétection multi-temporelle. Université de Moncton, N.-B., Canada, Laboratoire de photogrammétrie, télédétection et SIG, Rapport no. 12-95, 80 p.

Chavez, P. S., 1989. Radiometric calibration of Landsat Thematic Mapper Images. *PE&RS*, 55(9), pp. 1285-1294.

Chilar, J., L. St-Laurent and Dyer, J. A., 1991. Relation between the normalized difference vegetation index and ecological variables. *Remote Sensing of Environment*, no 35, pp. 279-289.

Defourny, P., 1994. Évaluation et suivi de la végétation ligneuse en région tropicale sèche. In: F. Bonn(réd).

Télédétection de l'environnement dans l'espace francophone. AUPELF/Presses de l'Université du Québec, Québec, pp. 247-264.

Gastescu, P., 1992. Le delta du Danube. Ed. DTM, Bucuresti, Romania.

Hill, J. and Sturm, B., 1991. Radiometric correction of multitemporal Thematic Mapper data for use in agricultural land-cover classification and vegetation monitoring. *International Journal of Remote Sensing*, 12(7), pp. 1471-1491

Huete, A.R. 1988. A Soil-Adjusted Vegetation Index (SAVI). *Remote Sensing of Environment*, vol. 25, pp. 295-309.

Jensen, J.R., Rutchey, K., Koch, M.S. and Narumanali, S., 1995. Inland Wetland Change Detection in the Everglades Water Conservation Area 2A Using a Time Series of Normalized Remotely Sensed Data. *PE&RS*, 61(2), pp. 199-209.

Karimoune, S., Alexandre, J. et Ozer, A., 1993. Suivi par télédétection de la désertification dans la région de Zinder (Niger). In: J.-M. Dubois, F. Cavayas et P. Lafrance (réd.). *Télédétection appliquée à la cartographie thématique et topographique*. Édition AUPELF/Presses de l'Université du Québec, Québec, pp. 151-159.

Lee, C.T. and Marsh, S.E., 1995. The Use of Archival Landsat MSS and Ancillary Data to Map Historical Change in an Urban Riparian Habitat. *PE&RS*, 61(8), pp. 999-1008.

Marsh, S.E., Walsh, J.L., Lee, C.T. and Hutchinson, C.F., 1992. Comparison of multi-temporal NOAA-AVHRR and SPOT-XS satellite data for mapping land-cover dynamics in the West African Sahel. *International Journal of Remote Sensing*, 13(16), pp. 2997-3016.

Tucker, C.J., Vanpraet, M.J., Sharman, M.J. and Ittersum, G. Van, 1985. Satellite remote sensing of total herbaceous biomass production in the Senegalese Sahel : 1980-1984. *Remote Sensing of Environment*, vol. 17, p. 233-249.

Weber, C., Hirsch, J. et Serradj, A., 1993. Cartographie d'une forêt spécifique à partir de données satellitaires TM de Landsat et HRV de SPOT : la forêt alluviale de la Robertsau. In: J.-M. Dubois, F. Cavayas et P. Lafrance (réd.). *Télédétection appliquée à la cartographie thématique et topographique*. Édition AUPELF/Presses de l'Université du Québec, Québec, pp. 273-282.

Wolter, P.T., Mladenoff, D.J., Host, E. and Crow, T.R., 1995. Improved Forest Classification in the Northern Lake States Using Multi-Temporal Landsat Imagery. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 61(9), pp. 1129-1143.