

## Une nouvelle analyse multi-temporelle d'images satellitaires, les résidus de l'Analyse en Composantes Principales. Un cas d'étude: une série d'images Landsat Thematic Mapper de la Camargue, France

T. NAIZOT†, Y. AUDA\*‡, A. DERVIEUX§, J. THIOULOSE¶  
et M. F. BELLAN‡

†Laboratoire de télé-analyse espace et société, CAMS, EHESS,  
2 rue de la Charité, 13002 Marseille, France

‡Centre de télédétection, Laboratoire d'écologie terrestre, CNRS,  
13 avenue du colonel Roche, 31029 Toulouse, France

§Dynamiques Écologiques et Sociales en Milieu Deltaïque,  
Laboratoire d'écologie, CNRS, 1 Rue Parmentier, 13200 Arles, France

¶Laboratoire de Biométrie et Biologie Evolutive, Université Lyon 1,  
CNRS, Bat 711, 69622 Villeurbanne, France

(Reçu le 10 janvier 2002; version révisée le 21 août 2002)

**Résumé.** Les méthodes d'analyses de séries temporelles d'images satellitaires sont nombreuses. Après une brève revue de ces méthodes, une nouvelle approche est proposée. Elle consiste à calculer les résidus de l'ACP (Analyse en Composantes Principales) du tableau des NDVI par la procédure suivante: calculer les variables NDVI à chacune des dates; construire le tableau de données espace  $\times$  temps, par accollement des variables NDVI; réaliser l'ACP de ce tableau; déterminer le nombre,  $k$ , de facteurs de l'ACP explicatifs des structures stables au cours du temps du paysage; et calculer les résidus entre le tableau NDVI et celui reconstruit à partir des  $k$  facteurs. Cette méthode appliquée à l'analyse d'une série de trois scènes Landsat TM acquises en 1983, 1984 and 1993 sur la Camargue (France) a permis de séparer les structures permanentes d'occupation du sol de leurs variations annuelles. La spécificité de cette région, appelée 'île Camargue', qui est totalement sous le contrôle des systèmes d'irrigation mis en place par l'homme, apparaît ainsi nettement.

**Abstract.** Numerous methods exist for the analysis of changes applied to time series of satellite images. After a quick review of these methods, a new approach is proposed. This approach is based on residuals computed from PCA (Principal Component Analysis) on a NDVI table. It consists of: computing the NDVI variable for each date; building a space  $\times$  time table which joins NDVI variables; carrying out a PCA on this table; choosing the number,  $k$ , of factors of PCA which explain time invariant landscape structures; and computing residuals between NDVI table and the table computed from the  $k$  factors. This method applied to the analysis of a series of three Landsat TM scenes acquired in 1983, 1984 and 1993 on the Camargue region (France) allows separation of the permanent land use structure from its annual variations. The specificity of the so called 'island Camargue' is clearly shown; control of water exchanges by man alters the land use every year.

---

\*Auteur pour la correspondance: Y. Auda, CESBIO – LADYBIO BPI 2801, 31401 Toulouse Cedex 4, France; e-mail: Yves.Auda@cict.fr

## 1. Introduction

Le paysage camarguais constitue un bon exemple pour tester des méthodes nouvelles car les modifications subies par ce milieu s'effectuent à un rythme relativement élevé. Les pratiques de gestion agraire par la mise en eau des marais de chasse ou leur réservation aux cultures dépendent de décisions annuelles. De plus, les espaces naturels camarguais supportent d'importantes variations dues aux aléas climatiques perceptibles sur des durées de l'ordre de quelques années.

La littérature consacrée à l'analyse multi-temporelle d'images satellitaires est volumineuse et il est facile de trouver des références récentes traitant de ce sujet (van Wagendonk and Root 2003). Une revue bibliographique a permis de proposer une classification de ces techniques. Pourtant, aucune n'est totalement satisfaisante et nous avons été amenés à rechercher une méthode d'analyse de données qui puisse s'appliquer aux images satellitaires et rendre compte assez exactement de l'évolution de l'occupation du sol.

## 2. Problématique

Toutes les analyses de séries temporelles d'images satellitaires ont pour objectif de résumer une information organisée selon trois critères: le temps (date d'acquisition), l'espace (pixel) et les variables (canaux radiométriques).

Cinq stratégies d'analyse du triplet (Espace, Temps, Canaux) présentées sur la figure 1, sont envisageables. Elles diffèrent par la mise en forme des données qui confèrent certaines propriétés aux analyses des tableaux ainsi constitués.

### 2.1. Les méthodes classiques

La première stratégie « accollement » est utilisée par Byrne *et al.* (1980), Richards (1984) et Ingebritsen and Lyon (1985). Elle consiste à accoler les tableaux de façon à n'en former qu'un seul comportant en colonnes les canaux, et en lignes l'espace. Le temps associé à un pixel, ou pour être plus précis la date d'acquisition de l'image à laquelle il appartient, n'intervient plus dans le fonctionnement de l'analyse. Les résumés numériques, calculés à partir de ces tableaux accolés, ne seront donc pas optimaux par rapport à la détection des structures temporelles.

Une variante de cette stratégie, mise en oeuvre par Li and Yeh (1998), Koch (2000), consiste à accoler les tableaux en faisant coïncider en ligne l'espace; les colonnes correspondent aux canaux enregistrés aux différentes dates. Le tableau ainsi construit n'est pas non plus optimal pour détecter les structures temporelles car l'effet temps ne peut être dissocié de l'effet canal.

La deuxième stratégie « indice » consiste à résumer l'information apportée par les canaux par une seule variable, en l'occurrence un indice. Pour caractériser la végétation, l'indice NDVI est couramment utilisé car sa corrélation à la biomasse active est prouvée (Tucker 1979). Les travaux utilisant le NDVI (Normalised Difference Vegetation Index) dans une approche temporelle sont nombreux (Eastman and Fulk 1993, Guerif *et al.* 1996, Richard et Pocard 1998). Le défaut majeur lié à l'utilisation des indices est de préjuger de la meilleure combinaison de canaux utile à la description des structures spatio-temporelles. Par exemple, pour le NDVI, ne pas incorporer le canal 5 (MIR) de Landsat Thematic Mapper conduit à une perte d'information comme l'attestent Trichon *et al.* (1999).

La troisième stratégie « combinaison » cherche à révéler préférentiellement les structures temporelles. Eastmann (1999: p. 126) pose très simplement la logique de la comparaison d'images satellitaires en proposant de soustraire deux images d'une

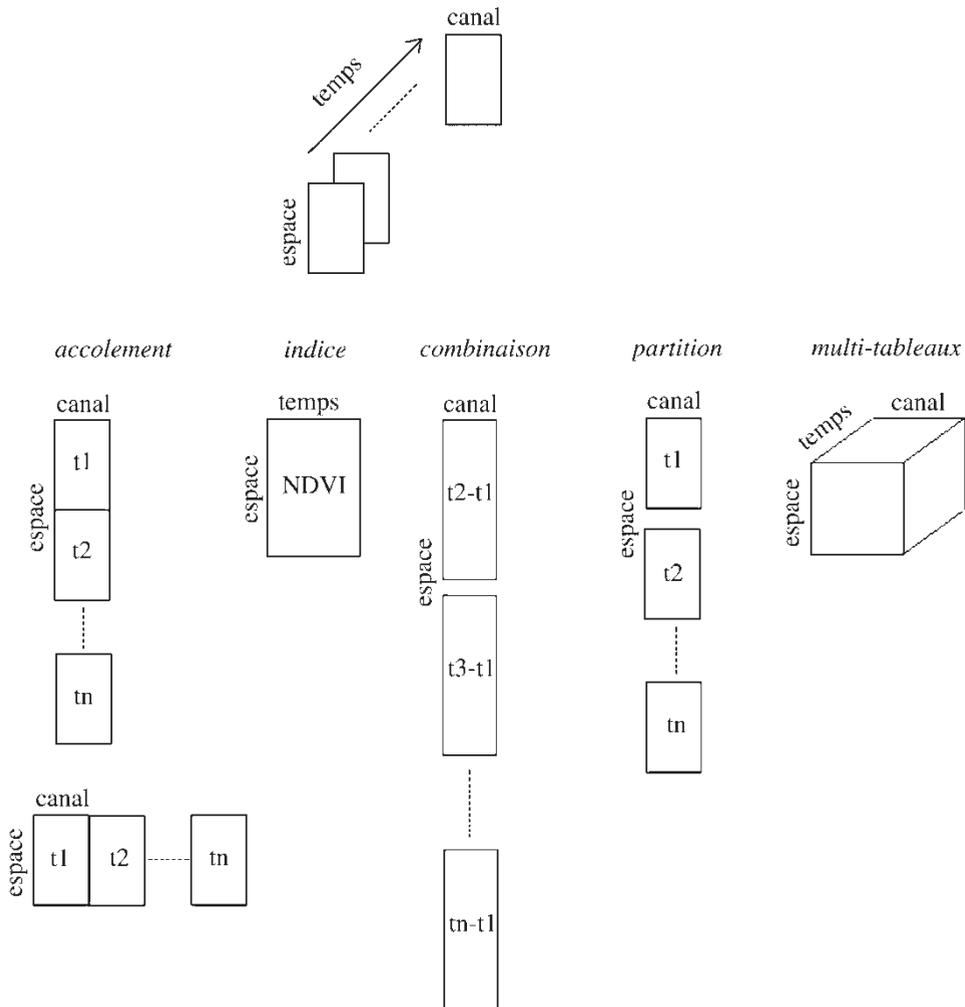


Figure 1. Stratégies d'analyse de séries temporelles d'images satellitaires. Les données qui dépendent du triplet (Temps, Espace, Canaux) peuvent être analysées selon cinq stratégies.

même zone acquises à deux dates différentes. Gong (1993), Moisan *et al.* (1999) appliquent cette technique à un ensemble d'images bien qu'elle soit très sensible aux variations du capteur entre la date de référence et les autres dates.

La quatrième stratégie « partition » réalise autant d'analyses séparées qu'il y a de dates d'acquisition, puis la synthèse est effectuée selon une procédure qui peut être visuelle ou numérique (Lodwick 1979, Singh 1986). L'interprétation peut cependant s'avérer laborieuse lorsque le nombre de dates est grand.

Les méthodes « multi-tableaux », présentées comme la cinquième stratégie, apportent une solution à ce dernier problème. Plus précisément, l'analyse triadique partielle qui traite de cubes de données permet de décomposer les sources de variabilité en fonction du triplet (espace, temps, canaux) (Thioulouse and Chessel 1987).

Cependant, compte tenu du fait que nous nous intéressons principalement à la végétation, nous préférons adapter la deuxième stratégie basée sur le NDVI.

## 2.2. La méthode proposée

L'analyse en composantes principales centrée (ACP) du tableau NDVI (deuxième stratégie) est largement utilisée pour traiter de séries temporelles d'images satellitales. Le plus souvent, les changements sont recherchés dans les derniers facteurs (Richards 1984, Fung and LeDrew 1987, Siljeström and Lopez 1995) ce qui n'est pas forcément optimal. Les contraintes numériques peuvent créer, en particulier pour les derniers facteurs, une information sans signification biologique (effet Guttman). Pour notre part, et c'est la principale originalité de notre démarche, nous préférons identifier les facteurs explicatifs des structures stables au cours du temps puis calculer les résidus. Cette procédure bien connue en analyse de données n'a pas été, à notre connaissance, appliquée à des données satellitales. Elle est explicitée par Lebart *et al.* (1977: p. 16), reprise par Carrel *et al.* (1986) et mise en oeuvre par Thioulouse (1989). Le mode de calcul est précisé en annexe.

Les résidus correspondent aux écarts entre les données et le modèle fondé sur les corrélations entre variables. Leur cartographie exprime donc, dans notre cas, les changements par rapport à une structure commune à toutes les dates, en grande partie débarrassée des fluctuations qui peuvent être dues au capteur ou à l'atmosphère.

## 3. Description des données et de la zone d'étude

La zone étudiée correspond au delta du Rhône situé dans le sud de la France. Elle est circonscrite par les deux bras du Rhône (petit Rhône et grand Rhône) et la mer comme le montre la figure 2. L'aire couverte par cette zone est d'environ 3000 km<sup>2</sup>.

La Camargue se décompose en trois grandes zones: une partie nord du delta plutôt dédiée à l'agriculture, une partie centrale « naturelle » qui englobe nombre d'étangs et une partie sud qui comprend des marais et des lagunes semi-halines.

Les données sont composées d'un extrait de trois images Landsat Thematic Mapper (résolution 30 m) qui couvrent la Camargue aux dates du 14 juillet 1984, du 13 août 1989 et du 23 juillet 1993. Les dates ont été choisies le plus proche possible de la période estivale, fin juillet – début août, afin de minimiser les différences dues aux stades phénologiques, de différencier les espaces « naturels » et les différents types de culture. Ces choix sont guidés par Guerif *et al.* (1996) qui ont effectué un suivi de la zone agricole du nord du delta camarguais à partir d'images SPOT acquises entre février et septembre d'une même année.

Avant de calculer le NDVI, les données doivent être transformées en réflectance (Markham and Baker 1986) car, comme le montre Guyot et Gu (1994), les NDVI calculés à partir des données brutes ne peuvent qu'être difficilement comparés.

Les corrections géométriques utiles à la superposition des images sont des plus simples. Une translation des images les unes par rapport aux autres suffit à obtenir une superposition d'une bonne précision. Elle est évaluée au demi-pixel (15 m) par l'observation d'éléments marquants du paysage tels les berges du Rhône. Cette facilité de traitement évite de recourir à des corrections géométriques plus complexes qui entraîneraient inévitablement des altérations de la valeur radiométrique des pixels.

Les données ainsi transformées permettent de construire un tableau NDVI similaire à celui de la stratégie « indice » de la figure 1. Ce tableau espace × temps comporte 3328000 lignes (2048 × 1625 pixels) et 3 colonnes (les 3 dates d'acquisition des images).

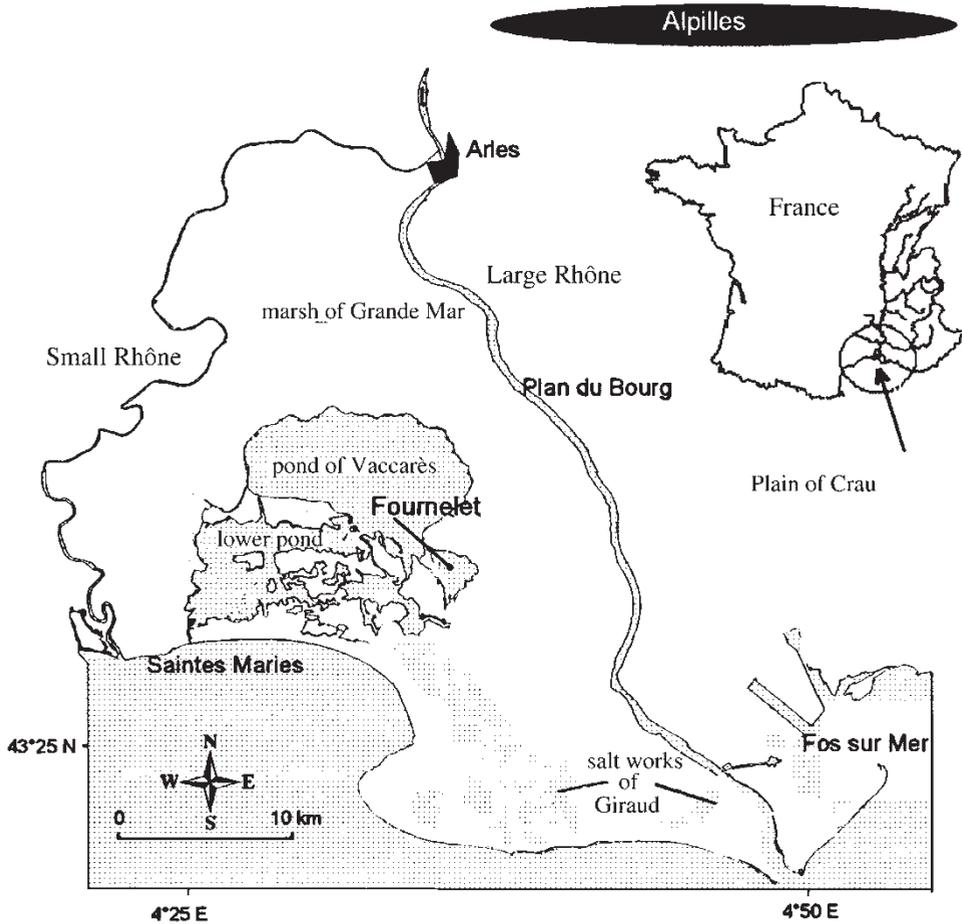


Figure 2. Carte de situation de la Camargue, France.

#### 4. Deux zones test

L'ACP du tableau NDVI fournit un ensemble de résultats dont l'interprétation repose sur une connaissance du terrain en deux lieux matérialisés par deux cadres sur la figure 3: des vergers dans la plaine de Crau et une exploitation agricole située au nord du Vaccarès. La zone de vergers bien qu'extérieure à la Camargue a été choisie pour la simplicité du phénomène observé: la zone défrichée s'étend progressivement au cours des trois années. L'exploitation agricole a été retenue car une enquête réalisée auprès de l'exploitant a permis de connaître très précisément les cultures pratiquées dans chacune des parcelles au cours du temps.

Avant de débiter l'interprétation thématique, intéressons nous aux aspects numériques des résultats de l'ACP. Ses principes sont rappelés en annexe. La figure 4, graphe des valeurs propres, montre une rupture de pente entre les deux facteurs et nous conduit à n'interpréter que le facteur 1. La figure 5, carte factorielle des dates, ne les différencie pas. Ces résultats s'expliquent aisément par le petit nombre de colonnes du tableau et la forte redondance des informations entre colonnes. En conséquence, l'interprétation thématique se limite à étudier des cartes construites à partir des coordonnées ligne du premier facteur.

La figure 6 cartographie les différents éléments utiles à l'interprétation du

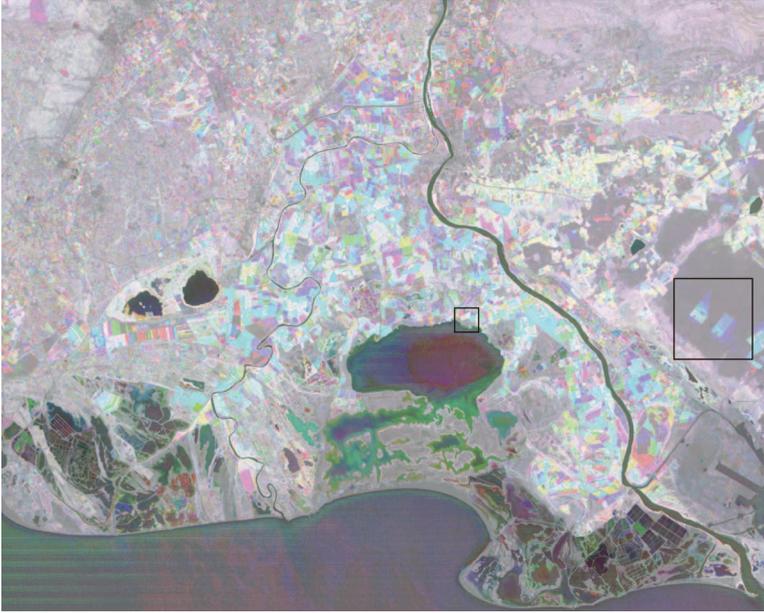


Figure 3. Composition colorée des NDVI calculés pour trois images TM acquises en 1984 (rouge), 1989 (vert) et 1993 (bleu). Les deux fenêtres tracées au nord du Vaccarès et dans la plaine de Crau matérialisent les zones de vérité terrain qui seront décrites respectivement dans les figures 5 et 6.

défrichement progressif de la steppe graminéenne du Coussou de la plaine de Crau au profit des vergers. Le suivi de leur extension est aisé à partir de la cartographie du NDVI (b). La zone concernée apparaît nettement en vert sur la cartographie des coordonnées factorielles (d F1). L'évolution peut être suivie par la cartographie au

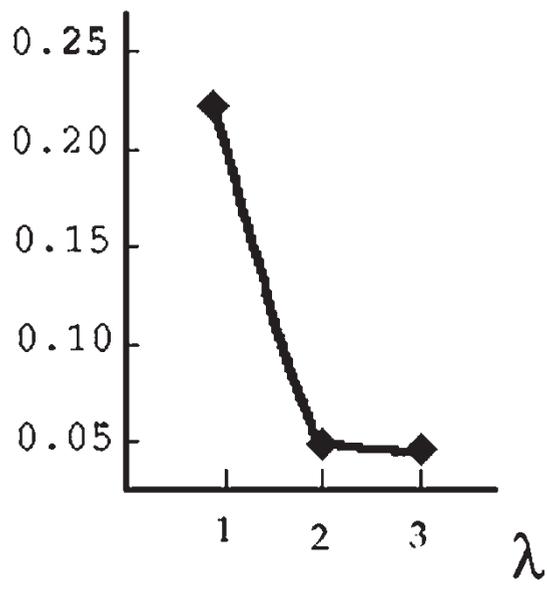


Figure 4. Graphe des valeurs propres de l'ACP pratiquée sur le tableau NDVI.

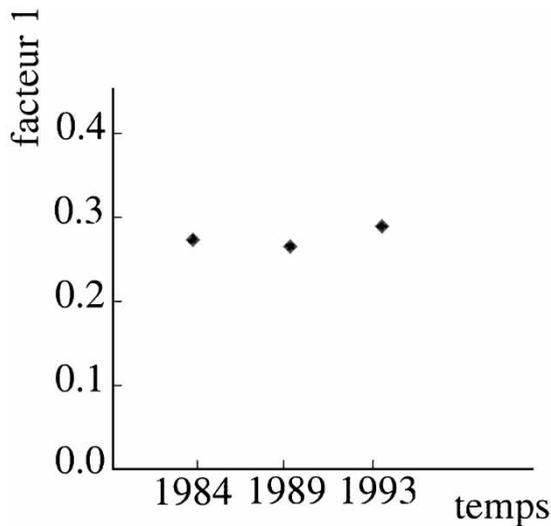


Figure 5. Carte factorielle des dates de l'ACP pratiquée sur le tableau NDVI.

cours du temps des résidus (*c*). Les zones déficitaires en chlorophylle par rapport au modèle de la permanence de l'occupation du sol apparaissent en vert foncé tandis que les zones excédentaires sont rouges. L'utilité première de cette figure est de fournir un cas d'école nécessaire à la compréhension du fonctionnement de l'analyse et elle n'apporte que peu de renseignement par rapport à la seule observation du NDVI. Notons cependant que la couleur verdâtre du fond de la carte des résidus en 1989 qui traduit une diminution de la biomasse active dans la photosynthèse de la steppe graminéenne s'observe moins distinctement sur la carte des NDVI. Cette observation doit être reliée à la sécheresse exceptionnelle de cette année.

La figure 7 qui cartographie une exploitation agricole est plus difficile à lire car l'occupation du sol n'évolue pas progressivement mais varie en fonction des rotations de culture. Au centre de l'image, la partie continuellement cultivée en riz au cours des trois années est représentée en vert sur la carte des coordonnées factorielles (*d* F1) ce qui la différencie des autres parcelles. Cette partie est d'une couleur peu soutenue sur chacune des cartes de résidus (*c*). Par contre, les parties qui n'ont pas été continuellement cultivées en riz apparaissent en rouge lorsqu'elles le sont, en vert quand elles ne le sont pas. Après avoir compris le fonctionnement de l'analyse à partir de ces vérités terrain, examinons l'ensemble du delta camarguais.

## 5. Résultats

La représentation graphique du tableau NDVI dans la mesure où il comporte trois colonnes (3 dates), se prête à une composition colorée (figure 3). Cette carte constitue les données initiales avant leur traitement qui vise à les décomposer en une carte d'occupation du sol permanente et une carte des changements d'occupation du sol.

La Cartographie du premier facteur de l'ACP fournit, sur la figure 8, une représentation des structures permanentes du delta durant les dix années de l'étude. L'analyse oppose le caractère minéral des salins du midi (en rouge) aux zones cultivées (en vert). Les zones en eau qui correspondent à la mer et aux étangs sont

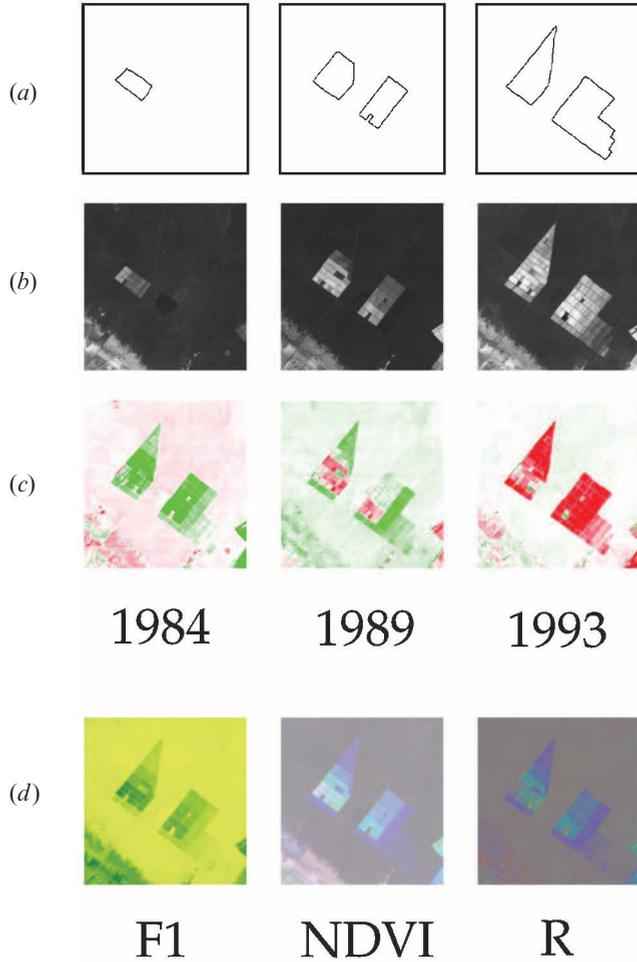


Figure 6. Interprétation de l'analyse sur une zone test composée de vergers. (a) Évolution connue de l'implantation des vergers au cours des trois années de l'étude (1984, 1989, 1993). (b) Cartographie des NDVI. (c) Cartographie des résidus de l'ACP pratiquée sur les NDVI. Les valeurs négatives sont représentées en vert, les positives en rouge. L'intensité de la couleur est proportionnelle à leur valeur absolue. (d F1) cartographie du premier facteur de l'ACP. (d NDVI) Composition colorée des NDVI calculés aux trois dates. (d R) Composition colorée des résidus calculés aux trois dates.

considérés par l'analyse comme intermédiaires dans ce gradient minéral/végétal tandis que les espaces «naturels» (en jaune) se rapprochent des zones agricoles par leur caractère végétalisé. Ce modèle fourni par l'ACP décrit assez finement l'occupation du sol camarguais mais il ne dit rien sur ses modifications temporelles. Au contraire, il met en évidence les permanences temporelles des principaux éléments paysagers.

Pour appréhender les évolutions temporelles, et c'est l'originalité de notre démarche, les résidus considérés comme les écarts à ce modèle de permanence de l'occupation du sol sont cartographiés. La composition colorée des résidus des trois années est un bon exemple de représentations utiles à l'analyse du fonctionnement

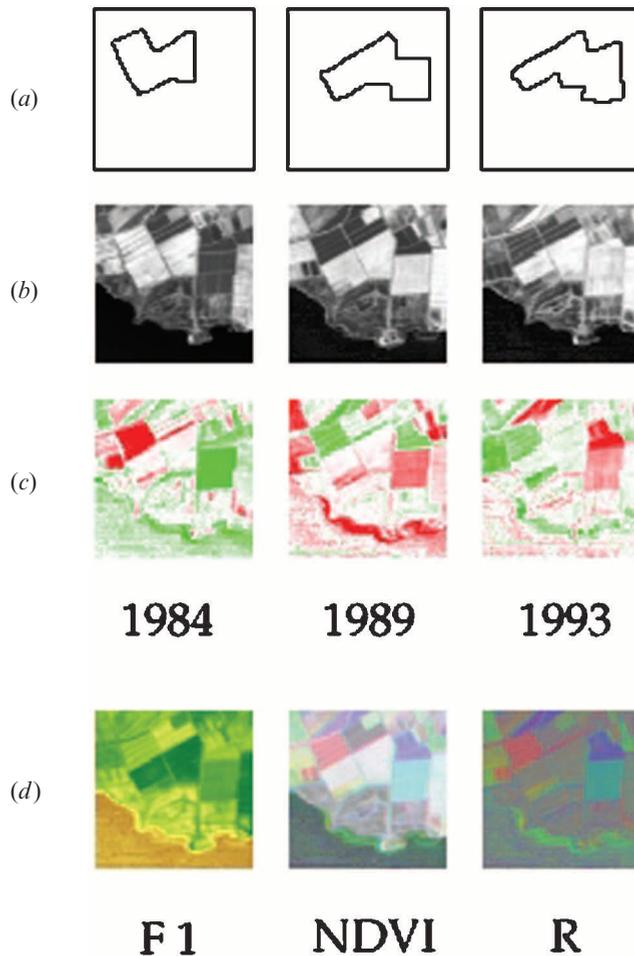


Figure 7. Interprétation de l'analyse sur une zone test composée d'une exploitation agricole. (a) Évolution connue des parcelles plantées en riz au cours des trois années de l'étude (1984, 1989, 1993). (b) Cartographie des NDVI. (c) Cartographie des résidus de l'ACP pratiquée sur les NDVI. Les valeurs négatives sont représentées en vert, les positives en rouge. L'intensité de la couleur est proportionnelle à leur valeur absolue. (d F1) cartographie du premier facteur de l'ACP. (d NDVI) Composition colorée des NDVI calculés aux trois dates. (d R) Composition colorée des résidus calculés aux trois dates.

de l'écosystème Camargue. Sur la figure 9, les zones de couleur bistre correspondent à des écarts au modèle faibles et indiquent les grandes zones invariantes d'occupation du sol. La mer, les salins du midi ou certaines parties de la plaine de Crau n'ont effectivement pas subi de grandes modifications au cours des dix années de l'étude. Au contraire, des résidus importants traduisent des modifications annuelles dans l'occupation du sol. Par comparaison à la composition colorée des NDVI (figure 3), cette carte des résidus gomme toute structure permanente en les représentant en couleur bistre et souligne les éléments qui ont varié entre 1984 et 1993.

Les plus fortes variations se constatent dans les zones irriguées au nord de la

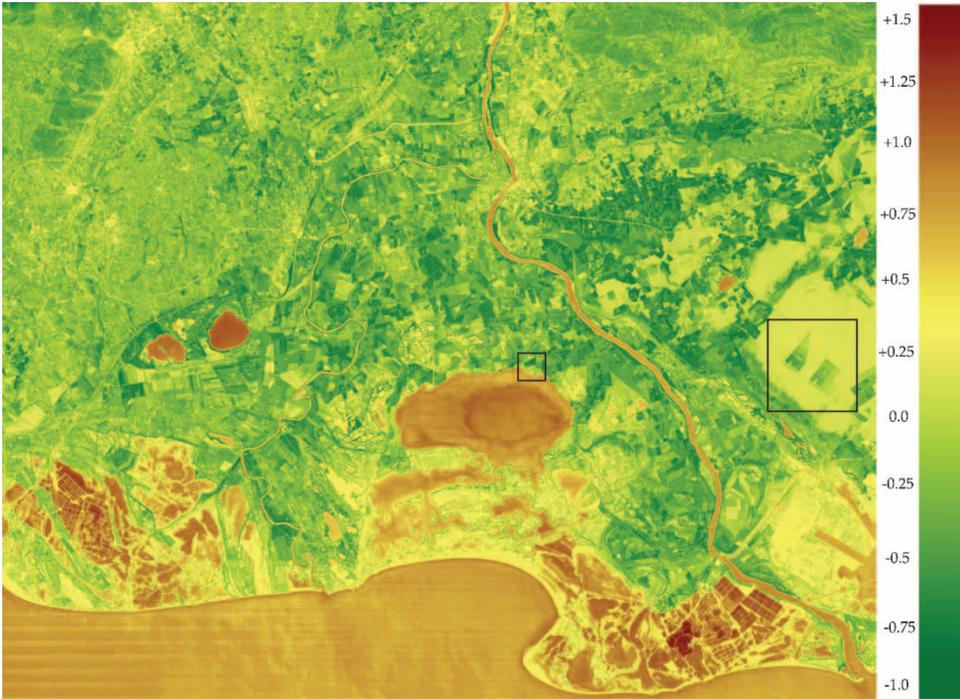


Figure 8. Cartographie du premier facteur de l'ACP réalisée sur les NDVI accolés de trois images Thematic Mapper acquises en juillet 1984, août 1989, juillet 1993. L'échelle à droite fournit la correspondance entre les valeurs des coordonnées factorielles et leur couleur de représentation.

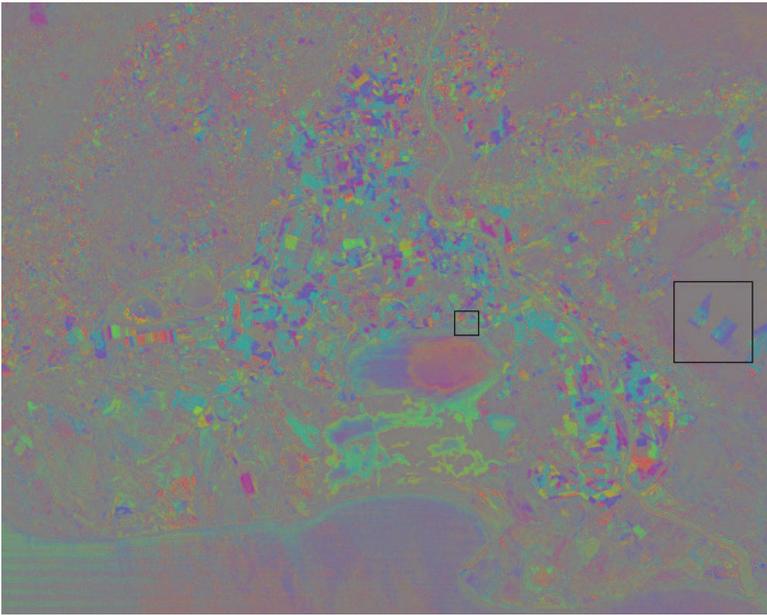


Figure 9. Cartographie par composition colorée des résidus de l'ACP pratiquée sur les NDVI pour les trois dates 1984, 1989 et 1993.

Camargue et autour du grand Rhône dans la partie sud. Le découpage parcellaire est mis en valeur par la couleur vive de certaines parcelles qui tranche avec les espaces entre parcelles de couleur blanche. Ces observations sont à relier avec les pratiques culturales en Camargue fondées sur la rotation des cultures (Naizot *et al.* 1997).

Les parcelles de couleur cyan révèlent une augmentation du NDVI en 1989 qui se maintient en 1993. Il s'agit pour les terres cultivées de Camargue de parcelles cultivées pendant l'année 1984 en blé, tournesol ou maïs. Leur NDVI est faible car au moment des observations, elles étaient soit à maturation, soit récoltées. Puis, en 1989 et 1993, ces mêmes parcelles furent cultivées en riz. Les parcelles teintées de rouge indiquent une activité chlorophyllienne moins intense en 1989 qui s'explique par un abandon de leur culture en riz à cette date. La teinte blanche correspond à un NDVI élevé durant toutes les observations. Il s'agit de parcelles dont la culture du riz a été maintenue de 1984 à 1993. Les parcelles teintées de jaune sont des parcelles avec un NDVI élevé excepté en 1993 montrant à l'évidence la mutation agricole à cette date. La concentration de ces modifications au niveau du delta confirment que l'île Camargue se distingue des autres milieux environnants par sa gestion hydraulique dont les répercussions interviennent à très court terme pour des échelles de temps de l'ordre d'une année.

A l'extérieur du delta, la teinte rougeâtre des Alpilles au nord-est ou sur le pourtour de la steppe de la Crau montre l'effet de la sécheresse de 1989 sur les couverts végétaux qui a conduit probablement à une diminution de la masse foliaire de ces formations. A l'intérieur du delta, cet effet sécheresse est nettement traduit par la teinte verte ourlant le Vacarès et les étangs inférieurs témoignant de leur assèchement partiel ou total concomitant de la baisse des niveaux d'eau.

## **6. Conclusion**

Pour appréhender le fonctionnement du système camarguais au travers des images satellitales, il est nécessaire de disposer d'une méthode qui permette, aux échelles de temps de l'étude, (i) de s'affranchir des contraintes techniques liées à l'acquisition des données, (ii) de caractériser les structures permanentes et (iii) de révéler les changements de l'occupation du sol. La méthode utilisée répond à ces trois objectifs.

L'ACP repose sur un calcul de covariance entre les variables NDVI. Elle permet de s'acquitter pour une grande partie des caractéristiques qui ne sont propres qu'à l'ensemble d'une image et qui sont surtout liées à la prise de mesures (capteurs ou conditions atmosphériques). Dans notre exemple, le premier facteur identifie les structures permanentes de l'occupation du sol ce qui valide complètement la méthode des résidus employée pour révéler les changements dans cette occupation du sol.

Les résultats obtenus confirment le bien fondé de cette démarche. Sur la figure 8, à petite échelle, la subdivision de l'espace en trois grands thèmes est manifeste. Le nord supporte une agriculture irriguée. Le centre est composé d'espaces naturels dont le parc national est l'élément le plus représentatif au yeux du grand public. Le sud-est est voué à l'industrie des salins du midi. Mais, au delà de cette partition tranchée, il est indispensable d'augmenter l'échelle d'observation spatiale pour comprendre les équilibres et les évolutions de ce milieu dans toute sa complexité. Sur la figure 9, quand l'échelle d'analyse permet de distinguer le parcellaire, le milieu devient beaucoup moins homogène et des phénomènes de changement d'occupation du sol sont perceptibles à l'échelle des dix années de l'étude. Ces

observations cartographiques confirment les réaffectations successives du sol en zone agricole, les modifications des milieux naturels sous la dépendance de l'hydrométrie et de la salinité attestées par Picon (1988).

Au delà de ces constatations, il convient d'étendre notre analyse au fonctionnement du système Camargue. La concentration des variations d'occupation du sol sur une courte échelle de temps est indicatrice d'une ré-orientation rapide du système cultural particulièrement perceptible en 1989. Ceci n'est pas un fait nouveau en ce qui concerne l'agriculture camarguaise qui est devenue depuis au moins la seconde moitié du XIXe siècle une économie de spéculation liée aux profits autorisés par la conjoncture économique et à la possibilité rapide de transformation du système de culture grâce à l'investissement massif de capitaux au moment nécessaire.

### Remerciements

Ce travail a été réalisé dans le cadre du Programme National de Recherches sur les zones Humides (PNRZH), financé par le ministère de l'environnement et de l'aménagement du territoire et les agences de l'eau.

### Annexe. Rappel de la procédure de calcul en ACP centrée

#### A1. Préparation

Soit X le tableau de données de terme général  $x_{ij}$ .  $x_{ij}$  est la valeur prise par l'individu  $i$  par la variable  $j$ .

Le tableau centré Y est défini par  $y_{ij} = x_{ij} - m_j$   $1 \leq i \leq p$   $1 \leq j \leq p$   
avec les moyennes

$$m_j = 1/n \sum_{i=1}^n x_{ij} \quad 1 \leq j \leq p$$

La matrice de covariance R est définie par

$$r_{jk} = 1/n \sum_{i=1}^n (x_{ij} - m_j)(x_{ik} - m_k) \quad 1 \leq j \leq p \quad 1 \leq k \leq p$$

#### A2. Diagonalisation

La diagonalisation de la matrice R donne les vecteurs propres centrés

$u_1 \dots u_k \dots u_p$

rangés en colonnes dans la matrice U de terme général  $u_{kj}$   $1 \leq k \leq p$   $1 \leq j \leq p$   
et les valeurs propres associées  $\lambda_1 \dots \lambda_k \dots \lambda_p$

#### A3. Coordonnées factorielles

Les coordonnées factorielles des lignes sont calculées par

$$l_{ik} = \sum_{j=1}^p y_{ij} u_{jk} \quad 1 \leq i \leq n \quad 1 \leq k \leq p$$

Les coordonnées factorielles des colonnes sont calculées par

$$c_{jk} = u_{jk} \lambda_k \quad 1 \leq j \leq p \quad 1 \leq k \leq p$$

## A4. Reconstruction du tableau

Le tableau centré Y est approché par une série de modèle dérivés uniquement de lui-même par les formules de reconstitution

$$z_{ijk} = \sum_{f=1}^k \sqrt{\lambda_f} c_{jf} l_{if} \quad 1 \leq i \leq n \quad 1 \leq j \leq p$$

Ainsi le modèle de rang 1 reconstruit les données par

$$z_{ijl} = \sqrt{\lambda_1} c_{jl} l_{il}$$

## A5. Résidus

Le tableau des résidus également nommé « écarts au modèle » est de terme général

$$e_{ijk} = y_{ij} - z_{ijk}$$

soit pour le modèle de rang 1

$$e_{ijl} = y_{ij} - z_{ijl}$$

**Bibliographie**

- BYRNE, C. F., CRAPPER, P. F., and MAYO, K. K., 1980, Monitoring land-cover change by principal component analysis of multitemporal Landsat data. *Remote Sensing of Environment*, **10**, 175–184.
- CARREL, G., BARTHELEMY, D., AUDA, Y., et CHESSEL, D., 1986, Dépouillement graphique d'une analyse en composante principale normées: utilisation en hydrobiologie. *Acta Oecologia, Oecologica Generalis*, **7**, 189–203.
- EASTMAN, J. R., and FULK, M., 1993, Long sequence time series evaluation using standardized principal components. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, **59**, 1307–1312.
- EASTMAN, J. R., 1999, *Idrisi 32, Guide to GIS and Image Processing, volume 2* (Worcester: Clark Labs).
- FUNG, T., and LEDREW, E., 1987, Application of principal components analysis to change detection. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, **53**, 1649–1658.
- GUERIF, M., BLÖSER, B., ATZBERGER, C., CLASTRE, P., GUINOT, J.-P., et DELECOLLE, R., 1996, Identification de parcelles agricoles à partir de la forme de leur évolution radiométrique au cours de la saison de culture. *Photo-Interprétation*, **1996/1**, 12–21 et 35–42.
- GONG, P., 1993, Change detection using principal component analysis and fuzzy set theory. *Canadian Journal of Remote Sensing*, **19**, 2–29.
- GUYOT, G., and GU, X. F., 1994, Effect of radiometric corrections on NDVI determined from SPOT-HRV and Landsat-TM data. *Remote Sensing of Environment*, **49**, 169–180.
- INGEBRITSEN, S. E., and LYON, R. J. P., 1985, Principal component analysis of multitemporal image pairs. *International Journal of Remote Sensing*, **6**, 687–696.
- KOCH, M., 2000, Geological controls of land degradation as detected by remote sensing: a case study in Los Monegros, north-east Spain. *International Journal of Remote Sensing*, **21**, 457–473.
- LEBART, L., MORINEAU, A., et TABARD, N., 1977, *Techniques de la description statistique. Méthodes et logiciels pour l'analyse de grands tableaux* (Paris: Bordas).
- LI, X., and YEH, A. G. O., 1998, Principal component analysis of stacked multi-temporal images for the monitoring of rapid urban expansion in the Pearl River Delta. *International Journal of Remote Sensing*, **19**, 1501–1518.
- LODWICK, G. D., 1979, Measuring ecological changes in multitemporal Landsat data using

- principal components. *Proceedings of the 13th International Symposium on Remote Sensing of Environment, Ann Arbor, Michigan*, pp. 1131–1141.
- MOISAN, Y., BERNIER, M., et DUBOIS, J.-M., 1999, Détection des changements dans une série d'images ERS-1 multitudes à l'aide de l'analyse en composantes principales. *International Journal of Remote Sensing*, **20**, 1149–1167.
- MARKHAM, B. L., and BAKER, J. L., 1986, Landsat MSS and TM post-calibration dynamic ranges, exoatmospheric reflectances and at-satellite temperatures. EOSAT Landsat Tech. Notes 1: 3–7. Lanham, Maryland.
- NAIZOT, T., PICON, B., et CHATELAIN, A., 1997, La Camargue, nature jardinée ou jardin naturel? Extension rizicole et devenir d'une zone humide; 1984–1994. *Photo-interpretation, images aériennes et spatiales 97/1 et 2*, 9–20 et 53–56.
- PICON, B., 1988, *L'espace et le temps en Camargue* (Arles: Actes Sud).
- RICHARDS, J. A., 1984, Thematic mapping from multitemporal image data using the principal components transformation. *Remote Sensing of Environment*, **16**, 35–46.
- RICHARD, Y., and POCCARD, L., 1998, A statistical study of NDVI sensitivity to seasonal and interannual rainfall variations in Southern Africa. *International Journal of Remote Sensing*, **19**, 2907–2920.
- SILJESTRÖM, P., and LOPEZ, A. M., 1995, Monitoring burnt areas by principal components analysis of multi-temporal TM data. *International Journal of Remote Sensing*, **16**, 1577–1587.
- SINGH, A., 1986, Change detection in the tropical environment of north-eastern India using Landsat. In *Remote Sensing and Tropical Land Management*, edited by M. J. Eden and J. T. Parry (Chichester: John Wiley), pp. 237–254.
- THIOULOUSE, J., 1989, Statistical analysis and graphical display of multivariate data on the Macintosh. *Computer Applications in the Biosciences*, **5**, 4, 287–292.
- THIOULOUSE, J., et CHESSEL, D., 1987, Les analyses multi-tableaux en écologie factorielle. I De la typologie d'état à la typologie de fonctionnement par l'analyse triadique. *Acta Oecologia, Oecologica Generalis*, **8**, 463–480.
- TRICHON, V., DUCROT, D., and GASTELLU-ETCHEGORRY, J. P., 1999, SPOT 4 potential for the monitoring of tropical vegetation. A case study in Sumatra. *International Journal of Remote Sensing*, **20**, 2761–2785.
- TUCKER, C. J., 1979, Red and infrared linear combination for monitoring vegetation. *Remote Sensing of Environment*, **8**, 127–150.
- VAN WAGTENDONK, J. W., and ROOT, R. R., 2003, The use of multi-temporal Landsat Normalised Difference Vegetation Index (NDVI) data for mapping fuel models in Yosemite National Park, USA. *International Journal of Remote Sensing*, **24**, 1639–1651.