

EVOLUTION DE L'OCCUPATION DES SOLS ENTRE 1984 ET 1993, SUR LE DOMAINE HAGUENAU-KARLSRUHE, A PARTIR DE DONNEES LANDSAT-TM

Tania Neusch
Institut de Photogrammetrie et de Télédétection
Université de Karlsruhe
Allemagne
neusch@ipf.bau-verm.uni-karlsruhe.de
Commission VII, Working Group 9

KEY WORDS: Landsat, Geometry, Radiometric, Correction, Classification, Land_Use, Change_Detection

ABSTRACT

The regular passage of satellites over the same geographic region provides images at different dates. Prior to the image classification, corrections of the geometric and radiometric deformations, which occur in the image formation process, are performed. During the classification of the corrected images, each pixel is assigned to a representative class. Having several classifications of the same area from different dates, one can determine the evolution of land use. Such information is useful in the environmental monitoring or for the regional planning. While evaluating the results one has to keep in mind the limitations of the used algorithms and subjective influence of the operator. Therefore one can not claim absolute truth.

KURZFASSUNG

Die regelmäßige Aufnahme derselben Region der Erdoberfläche liefert Bilder von verschiedenen Zeitpunkten. Vor der eigentlichen Bildauswertung erfolgen Korrekturen der geometrischen und radiometrischen Verzerrungen des Bildes, die während der Aufnahme entstehen. Die Klassifizierung dieser korrigierten Bilder ordnet jedes Bildelement einer Objektklasse zu. Wenn mehrere Klassifizierungen von demselben Gebiet zu verschiedenen Zeitpunkten zur Verfügung stehen, ist es möglich, die Veränderungen der Landnutzung zu bestimmen. Solche Informationen sind von großem Nutzen für die Umweltüberwachung oder für die hiesige Regionalplanung. Bei der Beurteilung der Ergebnisse darf man aber nicht die Grenzen der verwendeten Auswertalgorithmen und ebenso nicht die durch den Menschen eingebrachte Subjektivität bei der Auswertung vernachlässigen. Infolgedessen darf man nicht von einer absoluten Wahrheit sprechen.

RESUME

Le passage régulier des satellites au-dessus d'un même lieu géographique procure des images à différentes dates. L'exploitation de ces images doit être précédée de corrections, en raison des déformations géométriques et radiométriques subies par l'image lors du captage. La thématisation (classification) de ces images corrigées vise à aboutir à une catégorisation de la nature des objets captés. Si l'on dispose de plusieurs classifications d'un même territoire à des dates différentes, il est possible de déterminer l'évolution de l'occupation des sols au cours des années. Cela représente un atout considérable pour la gestion de l'environnement à grande échelle ou pour les planifications régionales. Toutefois, lors de cette estimation, il ne faudra pas négliger l'influence de la subjectivité de l'opérateur dans les phases du traitement. C'est pourquoi on ne pourra pas prétendre à une vérité absolue.

1 INTRODUCTION

Les moyens d'observation de la Terre offrent entre autres un outil des plus avantageux pour la planification du milieu, en raison de leur passage régulier au-dessus d'un même lieu géographique. Ils devraient ainsi pouvoir procurer une connaissance sur l'évolution de l'occupation des sols au cours des mois ou des années, sur un territoire relativement étendu.

Partant de cette dernière idée, un projet de fin d'études a été proposé, consistant à étudier l'évolution de l'occupation des sols dans la région couvrant Karlsruhe (Allemagne) et Haguenau (France), entre 1984 et 1993 (Neusch, 1995).

La première hypothèse suppose que cette évolution puisse être définie à partir de comparaisons de données LANDSAT de 1984 et de 1993, avec l'emploi des développements informatiques actuels et toutes les données disponibles et relatives à ces deux dates.

Les données collectées sont de tous types (images satellitaires, cartes topographiques,...). Plusieurs scènes LANDSAT étaient disponibles (image du 7/07/84, 30/06/93, 27/04/93 et 01/08/93).

La seconde hypothèse est que la constatation des changements survenus entre 1984 et 1993 puisse se faire non seulement qualitativement, mais aussi quantitativement. C'est dans ce cadre que se posera la question : "dans quelles limites peut-on assurer l'exactitude des changements constatés?"

2 DEFORMATIONS SPATIALES ET RADIOMETRIQUES DES IMAGES

Les images satellitaires brutes sont pourvues de déformations, ce qui ne les rend pas directement utilisables comme carte topographique. Ces déformations sont engendrées par certains effets qui agissent sur la géométrie et sur la radiométrie.

Les causes principales des effets sur la géométrie sont le relief, la courbure et la rotation de la Terre, l'erreur panoramique (Kraus and Schneider, 1988) illustrée dans la figure 1, les mouvements de la plateforme, etc...

Les effets sur la radiométrie, c'est-à-dire sur le contenu en information spectrale des pixels, sont dus au fait que les systèmes de télédétection utilisent le spectre électromagnétique comme porteur d'information. Les conséquences de ces effets sont fonction du domaine spectral

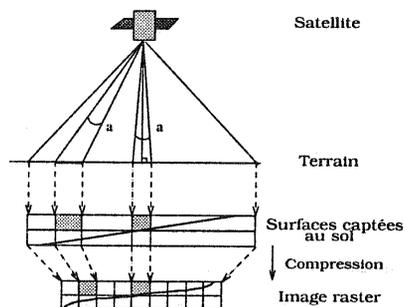


Figure 1: Erreur panoramique

utilisé dans les capteurs et de la réponse radiométrique de la surface captée (effets de bruit, de pertes d'exposition, effets causés par l'atmosphère, effets de pénombre et de réflectance bidirectionnelle).

La correction des effets que nous venons de citer est essentielle pour l'analyse à mener. D'une part, la correspondance géométrique des pixels avec la surface de captage au sol est importante pour localiser les changements que nous découvrirons. D'autre part, l'information radiométrique contenue dans un pixel est essentielle pour thématiquer l'image ultérieurement. Nous allons voir les méthodes de correction qui sont mises à disposition.

3 CORRECTION DES DEFORMATIONS

3.1 Les corrections géométriques

Les stations de réception se chargent d'effectuer une partie des corrections géométriques, mais beaucoup d'erreurs résiduelles subsistent. Le but de l'opération étant d'aboutir à une image superposable à une carte, deux méthodes de corrections sont envisageables (Bähr and Vögtle, 1991):

1. déterminer le modèle mathématique permettant le passage des coordonnées images aux coordonnées objet de chaque point. Cette méthode nécessite la connaissance des relations complexes entre la Terre et le système d'acquisition et laisse souvent sa place à la seconde méthode.
2. utiliser un polynôme (du premier, second ou troisième degré) et disposer d'un nombre suffisant de points de calage pour déterminer les coefficients.

Cette dernière méthode se réalise en 4 étapes principales:

- Repérage des points de calage: cette localisation se fait sur une carte topographique (ou une autre image déjà corrigée) et l'image captée non corrigée. On digitalise, sur une carte topographique, plusieurs points de calage facilement repérables et on saisit ensuite à l'écran les pixels correspondants, sur l'image non corrigée.
- Choix d'une fonction mathématique: on emploie le plus souvent des polynômes du 2^e ou du 3^e degré. Le choix du degré du polynôme se fera en fonction de l'erreur moyenne quadratique que l'on obtiendra après compensation avec chacun d'eux, mais aussi de la répartition des points de calage dans l'image.
- Résolution des équations: une fois le polynôme choisi et les coefficients déterminés, il suffit d'appliquer cette

équation aux coordonnées images de tous les pixels de l'image, afin d'en déduire leurs coordonnées géographiques.

- Réattribution des niveaux de gris: la transformation précédente a entraîné la déformation de la grille de pixels. On lui superpose alors une grille régulière, à laquelle on attribue les niveaux de gris correspondant. Les méthodes couramment employées sont celles du plus proche voisin et des interpolations.

L'exactitude de correction rendue possible par la méthode 1 ou 2 n'est pas seulement influencée par le modèle géométrique employé, mais aussi par la qualité de l'image captée, la précision du modèle numérique de terrain (MNT) et la saisie des points de calage.

Quelle que soit la méthode employée, le fait de baser toute la correction sur les points de calage n'est pas un moyen parfaitement sûr. La précision est moins bonne qu'elle le laisse paraître, car les zones entre les points de contrôle restent toujours incontrôlées et des sauts discrets d'un ou deux pixels risquent de passer inaperçus.

Une fois que tous les effets géométriques sont contournés, l'image, avant d'être utilisable, doit encore être corrigée des effets radiométriques qu'elle a subis au moment de la prise de vue.

3.2 Les corrections radiométriques

On peut distinguer des corrections radiométriques préliminaires, effectuées en partie par les stations de réception et des corrections secondaires, en raison d'effets dus au relief, au système d'acquisition, à la position du soleil, etc.

Les effets engendrés par le relief et la position du soleil, comme on le rencontre en zone montagneuse sont contournables en partie par le calcul. A l'IPF, on se fonde sur un MNT et sur l'angle d'illumination du soleil, pour déterminer une valeur approchée de la luminance vraie.

3.3 Méthode employée à l'IPF

Un programme a été conçu dans le but de corriger une image. Il utilise la seconde méthode de correction géométrique, puisqu'elle ne nécessite pas de connaissances sur les paramètres de prise de vue.

La première étape consiste à la correction des données brutes. Elle permet d'éliminer des erreurs systématiques apparaissant sur les images LANDSAT brutes.

L'étape suivante est la mesure des points de calage. Elle est réalisée à l'écran grâce à une image de référence (corrigée préalablement) couvrant le domaine d'étude. Le choix des points se concentre sur des intersections de routes ou de voies ferrées, qui sont des points facilement repérables et relativement précis.

La dernière et aussi la plus longue étape est la correction géométrique et radiométrique de l'image. Les premières phases du sous-programme concerné sont la réduction des points de calage au niveau de la mer, le calcul des coefficients du système d'équations et une compensation des erreurs résiduelles.

En pratique, près de 10 itérations ont été réalisées pour l'image de 1984. Nous avons écarté les points de calage mal saisis ou présentant de trop grands résidus et il s'est

avéré qu'après plusieurs itérations le polynôme de degré 2 engendrait de meilleurs résultats.

Les phases suivantes de ce sous-programme sont la création d'une grille régulière de points (avec coordonnées terrestres), le calcul des pentes et leur exposition par rapport au Pôle Nord (pour la correction radiométrique) et enfin le calcul, par interpolation bilinéaire, des coordonnées des pixels qui se situent à l'intérieur de la grille de points.

C'est en dernier lieu que s'effectuera la réattribution des niveaux de gris, par interpolation bicubique et en tenant compte de la correction radiométrique à effectuer pour chaque pixel.

La correction de l'image s'arrête ici. A présent, tout pixel possède sa propre valeur radiométrique et ses coordonnées UTM. A ce stade, les données brutes collectées sont utilisables et nous pouvons passer à leur traitement. En considérant des classes de signatures particulières, nous allons ranger chacun des pixels de l'image dans sa classe d'appartenance. Cette thématization de l'ensemble de l'image va se faire par classification.

4 CLASSIFICATIONS

Dans une scène satellitaire, les objets au sol sont captés dans n canaux différents. On peut positionner ces objets dans un espace spectral (chaque canal formant un axe) suivant ses réponses radiométriques et constater qu'ils occupent des positions différentes selon leur nature. Le but de la classification consiste à identifier, suivant des règles qui lui sont spécifiques, la classe à laquelle appartient chaque pixel de l'image.

La classification se décompose en trois étapes principales:

- L'établissement des classes par la recherche de signatures spectrales caractéristiques,
- La classification de chaque pixel en fonction de critères particuliers,
- Le contrôle des résultats.

On peut distinguer deux types de classifications: celles pour lesquelles la première étape est réalisée avec une connaissance a priori de la nature des pixels échantillons (supervisées) et celles pour lesquelles la recherche de signatures caractéristiques se fait automatiquement, sans connaissance préalable (non supervisées). Nous nous intéresserons à l'une du premier type, appelée Maximum Likelihood (ou encore maximum de vraisemblance).

4.1 Principe du Maximum Likelihood

Son procédé est sûrement le plus connu et le plus répandu parmi les procédés de classifications supervisées. Il se base sur des lois statistiques pour attribuer chaque pixel à la classe la plus probable et introduit pour cela deux hypothèses:

1. "un nuage de points caractéristique d'une classe possède une distribution normale".
2. "toutes les classes sont également probables"

Elles permettent de simplifier les expressions mathématiques et d'aboutir à la règle du maximum de vraisemblance:

$$\hat{p}(\omega_j/X) = \frac{f(X)_j}{\sum_{i=1}^k f(X)_i} \quad (1)$$

La classe j pour laquelle la probabilité conditionnelle $p(\omega_j/X)$ est maximale correspond à la classe d'appartenance la plus probable pour le vecteur X considéré.

Les seules inconnues sont les paramètres intervenant dans la fonction densité $f(X)$ (moyenne, covariance). Elles sont déterminées à partir de signatures spectrales caractéristiques pour chaque classe.

4.2 Saisie des échantillons

Nous avons distingué 15 classes différentes ("bâti dense", "peu dense", "feuillus", "conifères", etc.) et avons recherché des échantillons représentatifs par leur signature spectrale.

La saisie des zones d'apprentissage est vraisemblablement l'opération la plus laborieuse mais aussi la plus délicate de la classification. C'est d'elle dont dépendra la qualité de la classification, car la signature de ces pixels échantillons deviendra ensuite une référence lors de l'attribution des autres pixels.

Dans la réalité, les confusions entre certaines des 15 classes de signatures restent incontournables et donnent naissance à des chevauchements de signatures dans l'espace spectral (ex: "bâti dense" et "bâti peu dense"). C'est pourquoi nous avons ensuite employé des classes principales ("Eau", "Forêt", "Bâti", "Terres").

De plus, les signatures au sein d'une même classe peuvent être plus ou moins dispersées. Pour répondre à ces inconvénients de manière optimale, deux programmes ont été développés à l'Institut, visant d'une part à assurer la distribution normale du nuage et améliorer ses limites dans l'espace spectral et d'autre part, à minimiser les conflits entre les différentes classes de signatures saisies.

4.3 Méthode de classification

Pour les étapes suivantes, il serait intéressant de retrouver la valeur de confiance avec laquelle un pixel a été attribué à sa classe. C'est dans cette idée que l'IPF a développé un nouveau processus de classification, nommé "fuzzy" (Segl, 1995). Il effectue une classification avec le Maximum Likelihood, mais offre des valeurs de confiance de type Mahalanobis.

"Fuzzy" ne se limite pas à retenir la première classe la plus probable, mais aussi la seconde et troisième plus probable. L'image classifiée sera donc composée de six canaux. Les trois premiers sont consacrés aux trois classes les plus probables pour chaque pixel et les trois derniers aux trois valeurs de confiance correspondantes.

4.4 Classifications obtenues

Les processus précédemment cités sont ceux que nous avons employés pour classifier les images de 1984 et de 1993.

Il est difficile de juger de la qualité d'une classification lorsqu'il est impossible de vérifier l'ensemble des résultats sur le terrain. La zone d'étude peut être trop étendue et/ou la date de captage trop ancienne. La classification de l'image de 1984 regroupait les deux raisons. Il a toutefois été possible de comparer les premiers résultats à une petite classification de référence effectuée en 1984.

La classification de l'image de juin 1993 a reposé sur l'emploi de cartes topographiques, de connaissances du terrain et d'une classification déjà existante. Les résultats étaient jugés satisfaisants après contrôles ponctuels sur le terrain.

Le temps suscité par une classification ainsi que tous les critères pouvant intervenir sont témoins de la rigueur avec laquelle elle mérite d'être traitée. Les quelques pixels de rejets restant à ce stade seront éliminés par un processus de filtrage particulier.

5 RELAXATION ET DETECTION DES CHANGEMENTS

Une méthode baptisée "relaxation" a été développée à l'IPF, permettant de généraliser une classification, c'est-à-dire de combler les pixels non classifiés à l'aide d'un maximum d'information sur son entourage.

5.1 Relaxation

Le programme s'intéresse non seulement au voisinage spatial de chaque pixel (types de classes voisines), mais aussi aux valeurs de confiance correspondantes. Il tient compte de trois niveaux (les trois classes et valeurs les plus probables), tandis qu'un filtrage classique s'en tient à un.

Il aborde chaque pixel de la même manière et c'est à l'utilisateur de déterminer le degré de généralisation voulu, suivant l'information recherchée. Dans ce projet, il s'agit d'être prudent, puisque l'apparition d'un pixel isolé peut signifier qu'il y a eu un changement à cet endroit.

Disposant de toutes les classifications utiles, nous passons à présent à l'étude des changements.

5.2 Le programme de détection de changements

Le programme observe pixel par pixel sa classe d'appartenance dans l'image de 1984 et de 1993. Il observe plus particulièrement l'évolution des classes les plus probables (et la valeur de confiance associée), mais aussi des deuxième et troisième plus probables. D'autre part, il tient compte du degré de séparation des deux premières valeurs de confiance, afin de juger si l'attribution du pixel à la classe la plus probable s'est faite de manière indiscutable ou non.

La première classe la plus probable reste la plus simple à interpréter, puisque c'est elle qui a le plus de chances d'être représentative pour le pixel considéré. Par conséquent, l'interprétation du changement survenu entre les deux classes les plus probables est sûrement la plus sensée.

Le programme est encore relativement rigide à ce stade, puisqu'il faut que les deux images en entrée répondent à certaines conditions incontournables (type de classification, canaux avec classes et valeurs de confiance correspondantes, même nombre de canaux dans les deux images); c'est pourquoi il est parfois avantageux d'employer un autre programme.

5.3 Le programme calc

Le module "calc" est un module flexible pour la manipulation de données raster à l'aide d'expressions arithmétiques et logiques. Par la variété de fonctions et opérateurs dont il dispose, ce module est très puissant et permet de répondre à toutes sortes de besoins en traitements d'images, comme la comparaison de deux classifications. Son seul inconvénient réside dans la complexité d'écriture des commandes.

La distinction de catégories de valeurs de confiance alourdit considérablement l'ensemble, c'est pourquoi nous avons employé ce module uniquement dans les cas où le programme précédent est impuissant.

Nous disposons à présent de classifications de tous types (classes principales ou non, relaxées ou non, etc...) et des programmes permettant de détecter les différences entre deux classifications de ce type. Nous passons au coeur de la problématique.

6 RESULTATS

Nous nous attarderons plus particulièrement sur les évolutions constatables entre les deux images classifiées avec classes principales, afin de se limiter aux changements globaux et de contourner les conflits entre sous-classes.

6.1 Evolutions constatées

Notre interprétation s'appuyera sur les statistiques entre classes les plus probables, pour des raisons déjà citées en 5.2.

84/93	Eau	Forêt	Bâti	Terres	Σ 84
Eau	37 123	326	413	92	37 954
Forêt	1 255	701 071	2 956	65 817	771 099
Bâti	607	3 768	110 604	25 631	140 610
Terres	1 101	73 039	40 932	714 584	829 656
Σ 93	40 086	778 204	154 905	806 124	1 779 319

Tableau 1: Evolution en pixels (classes les plus probables)

La première colonne du tableau 1 comprend les classes principales distinguées dans l'image de 1984 et la première ligne celles de 1993, les valeurs représentant le nombre de pixels concernés dans l'image.

Le territoire englobé par le projet représente environ 2,5 millions de pixels, soit une surface au sol de 2 250 km². En 1984 (resp. 1993), sur ces 225 000 ha, environ 43 % (44 %) sont couverts de forêts, 47 % (45 %) de terres, 8 % (9 %) de bâti et 2 % (2 %) d'eau. Seule la classe de "Terres" a perdu du terrain.

De manière globale, la somme des pixels apparaissant dans le tableau 1 (1 779 319 pixels) représente 86 % de la totalité des pixels de l'image, donc 86 % des pixels ont subi une attribution certaine (relativement à nos seuils) tant en 1984, qu'en 1993. Ce premier résultat est encourageant.

Il est possible d'interpréter les changements survenus pour chaque classe, mais nous nous limiterons ici aux cas des classes "Eau" et "Bâti".

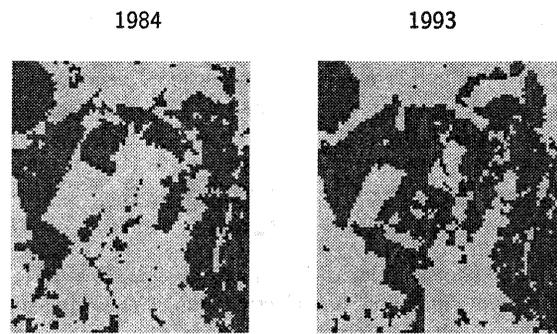
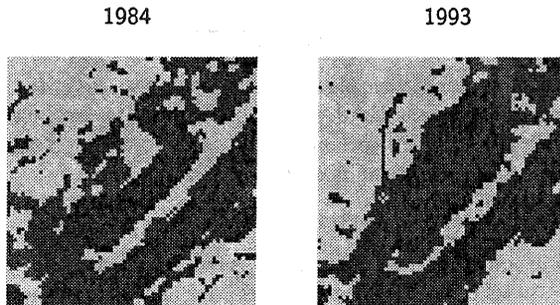
6.2 Illustrations

Exemple de la classe "Eau" :

Globalement, il y a eu une augmentation de 2 130 pixels d'eau de 1984 à 1993, ce qui, ramené au sol, représente presque 2 km² supplémentaires sur une surface totale de 1 600 km² environ. Les changements affectent surtout les eaux stagnantes (gravières, plans d'eau,...).

Sur 37 954 pixels d'"Eau" en 1984, 98 % d'entre eux restent de l'"Eau" et 1 % devient du "Bâti". Ce dernier phénomène se présente autour des gravières. Il signifie que l'emprise du sable a avancé en raison de creusées supplémentaires, et non pas qu'il a été construit autour du plan d'eau. Il se trouve que le gravier ou sable réfléchit de la même manière que le bâti. D'autre part, 1 % des pixels d'"Eau" devient "Forêt", ceci correspond aux avancées des herbes de rivages.

Les surfaces d'eau existantes en 1993 proviennent pour 3 % des forêts et cultures et pour 2 % de l'extension des gravières, comme le montrent les images ci-dessous. On distingue la classe "Eau" (gris-noir) qui s'étend au milieu de l'image, entre 1984 et 1993 au détriment de la "Terre" (gris pâle).



Exemple de la classe "Bâti" :

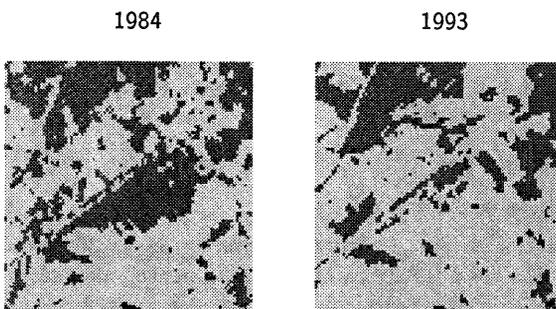
Globalement, il y a eu une augmentation de 14 300 pixels de bâti, soit presque 13 km² supplémentaires sur l'ensemble du projet.

Or, chose étrange, seuls 79 % des pixels de "Bâti" en 1984 se retrouvent en 1993...Le reste devient du sol nu et des exploitations agricoles ou des jardins ouvriers, ce qui semble improbable.

Ce phénomène est à attribuer à la présence de mixels (surface élémentaire de réponse spectrale non caractéristique). La classe de "Bâti peu dense" est la principale responsable de ces conflits, puisque par définition elle renferme aussi des jardins ouvriers.

Une telle transformation a tout de même trouvé lieu à Drüsenheim, à l'endroit même où se situaient des raffineries de pétrole en 1984. Elles semblent avoir disparues sur la classification de 1993.

La mairie de Drüsenheim nous a informé qu'elles ont été démontées pour être reconstituées en Afrique! Les images suivantes traduisent ce phénomène, avec en gris foncé, au centre, les pixels de classe "Bâti", la couleur gris pâle représentant la classe "Terre".



De manière plus nette, on observe un grand nombre de pixels devenus "Bâti", 26 % étant issus de la classe "Terres". La classe d'origine plus particulièrement concernée était la classe "Sol nu" de 1984. Par exemple, l'extension de l'usine Mercedes à Rastatt entre 1984 et 1993 a entraîné l'apparition d'un bloc de pixels de classe "Bâti" (gris foncé) parmi les pixels de "Terre" (gris clair), comme on peut l'observer au centre des images suivantes.

Que peut-on retenir de tous les changements constatés?

Sûrement pas une grandeur, mais un ordre de grandeur. Les statistiques les plus significatives sont celles issues des changements entre classes principales, car leurs attributions seront plus sûres que pour les classes simples, dont l'évolution nous importe moins.

Les classifications relaxées quant à elles sont intéressantes du point de vue visualisation des changements, tout en sachant que certaines attributions sont moins sûres que sur images non relaxées.

Comment juger de la qualité des classifications réalisées? Et par conséquent, comment juger les résultats obtenus du point de vue évolution de l'occupation des sols? Il faut considérer tout un ensemble de paramètres.

7 FIABILITE DES RESULTATS

Pour attribuer un degré de précision à des résultats de télédétection, il faut tenir compte de tous les paramètres qui risquent de les influencer.

7.1 Facteurs d'influence

On distingue ceux qui agissent au moment du captage, et ceux qui influencent les opérations ultérieures, menant aux résultats (Foeller, 1994).

On observe les facteurs influençant la mesure (la topographie, la courbure et la rotation de la Terre, l'atmosphère,...) et ceux intervenant lors du traitement de l'image (la qualité de saisie des points de calage, la précision des programmes employés,...).

7.2 Objectivité et subjectivité

La précision du résultat final dépend de celle de chacun des processus intermédiaires employés. Les algorithmes de détection de changements n'entraînent aucune perte de précision, puisqu'ils n'effectuent aucune transformation des données. Les seules pertes de précision peuvent provenir de la correction géométrique.

Un facteur tel que la qualité des programmes ou des processus de classification, est quantifiable, car on peut le traduire par la donnée d'une précision issue de formules spécifiques. Ce facteur est aussi reproductible quel que soit l'opérateur, c'est pourquoi nous dirons qu'il a une influence objective sur les résultats.

Par contre, les facteurs tels que le choix des classes d'objets et des zones d'apprentissage n'est pas scientifiquement quantifiable, car elle fait intervenir la vision, pensée, créativité ou imagination de l'opérateur.

On ne peut pas parler de précision dans ce cas, puisqu'il n'y a pas de moyen de quantifier la qualité du choix effectué (nature des échantillons), encore moins de la comparer à un choix théorique ou de référence (échantillons de référence). On ne peut donc pas prétendre obtenir un résultat absolu et affirmer que nous avons réalisée LA classification de telle image, puisqu'elle dépend directement de l'opérateur. On peut toutefois diminuer un peu l'influence de la subjectivité en travaillant avec des classes principales.

7.3 Exactitudes et contrôles

Que nous reste-t-il pour juger de l'exactitude des résultats de la classification ?

On peut penser aux valeurs de confiance, mais si la seconde valeur de confiance est très proche de la première, il est délicat d'affirmer que la classification soit juste.

Une autre solution est peut-être l'emploi de matrices de confusion, pour évaluer la probabilité d'engendrer une classification erronée à partir des pixels échantillons. Or, dans une classification, les problèmes naissent le plus souvent des zones qui n'ont pas de réponse radiométrique aussi caractéristique qu'un échantillon (Jacobs and Sties, 1993).

La meilleure solution, pour évaluer la qualité d'une classification, réside dans les contrôles sur le terrain, car en dehors de la réalité, la télédétection ne connaît pas de critère permettant de juger de l'exactitude de ses mesures sans que n'intervienne le paramètre de subjectivité. D'ailleurs, la réalité est sûrement le critère absolu de toute mesure, puisqu'elle contient les "mesures réelles", la "vérité terrain".

En pratique, une dizaine d'endroits où des changements significatifs se sont présentés ont été contrôlés sur le terrain. D'autres ont été validés par la connaissance de gens de la région ou ont été confirmés par leur présence dans les cartes topographiques les plus récentes. Il a bien sûr été constaté quelques changements qui se sont avérés inexistantes sur le terrain. Toutefois, en dehors des quelques pixels constituant un contre-exemple, les changements obtenus et validés soutiennent l'espoir que la globalité des résultats soit satisfaisante.

8 CONCLUSION

Les classifications réalisées avec l'image de 1984 et de 1993 ont représenté des coûts en temps non négligeables. Les résultats finaux peuvent être influencés par tellement de paramètres, que la rigueur de saisie de leurs échantillons et les répétitions des programmes qui mènent à elles étaient nécessaires.

Du point de vue quantitatif, il faut être prudent en raison du nombre de paramètres susceptibles d'erreur les résultats. On peut effectivement constater des évolutions fort probables et retenir les statistiques correspondantes, mais on ne peut certifier l'attribution de chaque pixel individuellement.

Toutefois, le côté très positif d'une telle étude est qu'elle permet d'affirmer que si l'on est en possession de deux classifications ou de deux images brutes captées à deux dates différentes, il est possible (sous condition de disposer de documents ou de pouvoir faire les contrôles sur le terrain) de déduire les changements survenus entre ces deux dates du point de vue occupation des sols, sur un grand territoire.

La connaissance de l'évolution de l'occupation des sols au cours des années peut être primordiale pour les planifications régionales, mais surtout pour le suivi des pays en

voie de développement ou du Tiers-Monde, beaucoup de ces pays ne disposant d'aucune carte topographique. De plus, l'extension des zones urbaines peut atteindre de si grandes vitesses, qu'une mise à jour de cartes ne pourrait pas suivre. Par contre des images satellitaires peuvent être exploitées assez rapidement et traduire les évolutions intéressantes tant pour le pays concerné que pour ses voisins.

Mais il ne faudra jamais oublier qu'il n'existe à ce jour aucun moyen de rendre une classification univoque, puisque chaque personne est unique, comme d'ailleurs chaque élément de la nature. Par conséquent, ces résultats chiffrés ou visuels ne sont pas reproductibles au pixel près et doivent être interprétés relativement aux facteurs pouvant les influencer.

REFERENCES

- Bähr, H.-P. and Vögtle, T. (1991). *Digitale Bildverarbeitung: Anwendung in Photogrammetrie, Kartographie und Fernerkundung*. Wichmann, Karlsruhe.
- Foeller, J. (1994). *Kombination der Abbildungen verschiedener operationeller Satellitensensoren zur Optimierung der Landnutzungsklassifizierung*. Master's thesis, Universität Karlsruhe, Karlsruhe.
- Jacobs, H. and Sties, M. (1993). *Mehrfache Landnutzungsklassifizierung und Analyse der Nutzungsänderung im Oberrheingraben*. Projekt Angewandte Ökologie (PAO), Universität Karlsruhe, Karlsruhe.
- Kraus, K. and Schneider, W. (1988). *Fernerkundung: Physikalische Grundlagen und Aufnahmetechniken*, volume 1. Dümmler, Bonn.
- Neusch, T. (1995). *Evolution de l'occupation des sols entre 1984 et 1993, sur le domaine Haguenau-Karlsruhe, à partir de données Landsat-TM*. Master's thesis, Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung, Karlsruhe.
- Segl, K. (1995). *Klassifizierung mit Hilfe von Spektral- und Formmerkmale am Beispiel von MOMS-02 Bilddaten*. PhD thesis, Universität Karlsruhe, Karlsruhe.