

MODELISATION DE LA COMPREHENSION VISUELLE DES IMAGES
DE TELEDETECTION : ESSAI DE SIMULATION NUMERIQUE
DE LA PHOTOINTERPRETATION ANALYTIQUE

G. FLOUZAT

Centre d'Etude Spatiale des Rayonnements, Toulouse

RESUME

Les limitations rencontrées avec la plupart des traitements d'images de télédétection dans des buts de cartographie des ressources renouvelables ont conduit à rechercher une autre approche pour l'exploitation des données.

Le concept proposé dans ce papier est de décomposer l'analyse réalisée par la photointerprétation analytique en phases objectives qui sont ensuite simulées numériquement.

Les principes théoriques de l'interprétation analytique sont posés et trois groupes de critères d'interprétation sont définis. Les fonctions correspondantes à remplir par la simulation numérique sont alors décrites. Un exemple d'application de cette démarche est ensuite présenté.

Il apparait que cette approche de modélisation peut être envisagée comme la lecture d'une image faisant appel à une grammaire spécialisée.

ABSTRACT

The inadequacies in most data processing methods of remote sensing imagery for the purpose of renewable resources mapping have lead to search for another approach to exploit the data.

The concept proposed in this paper is to split up the analytical photointerpretation into logical stages which are numerically simulated in a following phase.

The theoretical principles of analytical photointerpretation and three groups of interpretation criteria are defined. The corresponding functions to be realised by the numerical simulation are described. An exemple of applications of this methodology is given.

It seems that this modelling approach can be considered as an image reading which uses a specific grammar.

I - INTRODUCTION

Dans les travaux méthodologiques concernant la cartographie automatique de la végétation par télédétection, deux limitations apparaissent souvent dans les résultats des procédures supervisées : ce sont les erreurs dues au fait que différents objets au sol ont des caractéristiques identiques dans l'image et que le même objet peut avoir des caractéristiques différentes en plusieurs lieux de la même image. Dans un grand nombre de cas, le photointerprète spécialiste de cartographie botanique corrige ces mauvaises déterminations par ses connaissances thématiques appliquées au résultat du traitement des images.

L'idée proposée pour pallier à ces insuffisances est une démarche simulant le raisonnement thématique de l'interprète en plus de l'initialisation du traitement de l'image de télédétection par des parcelles d'entraînement.

L'exemple choisi pour illustrer cette approche est un cas simple : il s'agit de discriminer deux types de formations boisées de la vallée de la Garonne dont la réflexion spectrale et l'organisation locale sont identiques au niveau de perception permis sur ce paysage par une image Landsat.

Ce travail a plusieurs aspects qui ne sont pas encore totalement approfondis et fait partie de recherches sur l'analyse de texture des images de télédétection et sur la cartographie de la végétation assistée par ordinateur.

Ces programmes sont conduits dans l'équipe formée par des laboratoires du CNRS à Toulouse (CESR, CERR, ICITV, CIMA)* et sont soutenus par le comité scientifique de l'ATP télédétection (FLOUZAT, 1980, 1981).

II - THEORIE DE L'INTERPRETATION ET DE LA SIMULATION

II.1 SCHEMA GENERAL

Les réflexions théoriques et les résultats présentés dans ce papier s'intègrent dans un objectif plus vaste de simulation de la compréhension visuelle des images et d'amélioration des aides automatiques à l'interprétation.

Elles excluent les approches relevant de la mise en oeuvre de base de données externes à l'image.

Un tel cadre nécessite de dégager un schéma général théorique permettant de guider la formulation des algorithmes adaptés au problème thématique.

* CNRS : Centre National de la Recherche Scientifique

CESR : Centre d'Etude Spatiale des Rayonnements - Toulouse

CERR : Centre d'Ecologie des Ressources Renouvelables - Toulouse

ICITV : Institut de la Carte Internationale du Tapis Végétal - Toulouse

CIMA : Centre Interdisciplinaire de Recherche sur les Milieux Physiques et l'Aménagement Rural - Toulouse

ATP : Action Thématique Programmée de Télédétection au CNRS

posé. Une proc

Phase A : la
rég
lois

Phase B : l'ob
tect
néce
logi
des

Phase C : l'au
simu
ains

Le s

Phase
Lois de développ des écos
Connaiss phénomènes
Objet sur le ter

Ce m
se situent à l
souvent remarq
entre les phase
au fait que les
étudié.

Para
être actuelleme
tection. Ainsi
photointerprète
terrain. Or, la
faculté de pro

C'es
le développeme
existe les base
problèmes de r
ces bases sont
(à l'exception
automatique de

posé. Une procédure logique reliant les trois phases suivantes s'impose :

Phase A : la nature des phénomènes naturels étudiés est la conséquence des lois régissant le développement des écosystèmes. La connaissance de ces lois est indispensable à la compréhension des paysages observés.

Phase B : l'obtention d'informations sur ces phénomènes naturels par télédétection est faite par l'interprétation de l'image. Il est donc nécessaire d'élaborer des règles d'interprétation objectives et logiques correspondant aux lois de l'écologie et de la géographie des paysages.

Phase C : l'automatisation de ces règles d'interprétation est le moyen de simulation numérique recherché. Des algorithmes adaptés reproduiront ainsi les règles d'interprétation.

Le schéma général suivant peut ainsi être proposé :

Phase A	→	Phase B	→	Phase C
Lois de développement des écosystèmes		Règles d'interprétation		Algorithmes de simulation
Connaissance des phénomènes naturels		Critères et règles d'interprétation objectifs		Automatisation des critères et des règles
Objet sur le terrain		Texture dans la donnée-image		Symbole dans l'image-résultat

Ce modèle de procédure laisse supposer que les difficultés essentielles se situent à l'automatisation entre les phases B et C. En effet, les résultats souvent remarquables obtenus par photointerprétation indiquent que les relations entre les phases A et B ont été largement maîtrisées. Cette cohésion est due au fait que les photointerprètes sont fréquemment des spécialistes du thème étudié.

Paradoxalement, l'imbrication étroite des deux premières phases paraît être actuellement une limitation au développement du modèle complet en télédétection. Ainsi, les règles d'interprétation utilisées relèvent souvent de la photointerprétation globale dans laquelle interviennent les connaissances de terrain. Or, la réalisation d'algorithmes exécutant ces règles impliquent la faculté de produire des critères objectifs faisant appel uniquement à l'image.

C'est donc d'une photointerprétation analytique performante que dépend le développement des relations entre phases A, B et C. Malheureusement, s'il existe les bases théoriques des graphes pour ce type d'interprétation dans les problèmes de réseaux (GUY, 1970 ; BOUILLE, 1973 ; FONTANEL, 1974 ; BRACONNE, 1975), ces bases sont pratiquement inexistantes dans la photointerprétation aréolaire (à l'exception de travaux en URSS peu diffusés) nécessaire en cartographie automatique de la végétation.

II.2. BASES THEORIQUES DE L'INTERPRETATION

Une partie de ce travail consiste à contribuer à la formalisation théorique d'une photointerprétation analytique adaptée à l'étude des paysages végétaux. La disponibilité d'une telle théorie permettrait d'utiliser dans les algorithmes de simulation (Phase C) les outils mathématiques les plus adaptés.

Dans ce but, les trois points suivants semblent être les premiers éléments à retenir. Ils résultent de bases posées pour l'automatisation de la stratification des images de télédétection (FLOUZAT, 1977).

II.2.1 Postulats de base en photointerprétation

Une image est constituée de points élémentaires pour lesquels il est admis que :

- des caractères sont identifiables,
- ces caractères peuvent se répéter,
- des classes de caractères peuvent être définies.

L'image peut être analogique ou numérique, ces postulats restent valables et sont indépendants de notions de terrain. Les relations faisant correspondre un type d'objet à une classe de caractères font appel à la définition de propriétés identiques dans l'espace terrain et dans l'espace image (exemple : une plantation d'arbres est formée d'éléments dont les caractères de couleur caractéristique, de forme pseudo-circulaire et d'alignement existent sur le terrain -en vue verticale- et sur la photographie aérienne prise verticalement.

Ces propriétés sont construites avec des critères d'interprétation traduisant la nature des objets au sol dans l'image.

II.2.2. Dualité de la perception en photointerprétation

La perception des caractères dans l'image par le photointerprète est généralement réalisée de façon simultanée à deux niveaux imbriqués. Cette dualité est fondamentale dans la compréhension visuelle des images, et, par conséquent, fondamentale pour les recherches de modélisation du comportement de l'interprète.

Elle consiste en une lecture de l'image où sont appréciés à la fois les caractères du plus petit élément discernable et de la région immédiatement voisine. Cette double approche est donc simultanément :

- ponctuelle : plus petit élément visible sur la photographie aérienne ou pixel sur une image numérique.
- aréolaire : environnement immédiat du point considéré qui soit apparemment homogène ou de taille fixée.

Il est évident que l'interprète peut fixer sa lecture ponctuelle à un groupe de points plus ou moins grand. La lecture aréolaire concerne la surface correspondante. Cette remarque montre que la compréhension de l'image peut être volontairement fixée à un niveau de perception adapté au problème posé.

II
interprétation
permet d'iden

- 1
- 1

L'i
l'élément con
comme le prod

Tex

La
modéliser les
(les) règle(s)

La
utilise des c

- 1
(

- 1
Les

principales :

- c
I
i

- c
I
n

d
p
L

g
e
1

a
d

- c
I
1

d
r

- c
I
1

d
r

- c
I
1

d
r

- c
I
1

d
r

- c
I
1

d
r

Il n'y a donc pas lieu de distinguer différentes approches de photo-interprétation analytique puisque le principe ne change pas. Cette compréhension permet d'identifier un élément d'image à partir de :

- la nature de ses caractères,
- l'organisation de ses caractères.

L'imbrication de ces deux termes conduit à apprécier la "texture" de l'élément considéré. La texture dans une image peut ainsi être considérée comme le produit suivant :

Texture = Primitive * Arrangement.

La simulation numérique de l'interprétation d'une texture doit donc modéliser les critères et les règles définissant la (les) primitive(s) et la (les) règle(s) d'organisation de ces critères.

II.2.3. Critères et règles d'interprétation

La définition de caractères et de classes de caractères dans l'image utilise des critères qui définissent :

- la couleur, la forme et la dimension des éléments de primitives (une classe d'élément = une primitive)
- l'organisation, le placement et les positions relatives des éléments.

Les critères nécessaires peuvent être groupés en trois familles principales :

- critères énergétiques (ou d'intensité) :
Ils définissent la densité optique, le ton de gris, la couleur ou la signature spectrale. Ils correspondent souvent à la première interprétation pour les principales classes d'objets dans l'image.
- critères géométriques :
Ils définissent la forme, la dimension des éléments et leur organisation lorsqu'elle est ordonnée ou donne lieu à des relations de position typiques. Ils consistent principalement en surface, périmètre, corde, chemin géodésique, direction, noeuds, etc... La nature de leurs limites communes sont également des critères géométriques (frontières, squelettes). Ces critères relèvent essentiellement de la géométrie, de la topologie ou de la morphologie. Ainsi, dans le domaine de la morphologie mathématique, les algorithmes existant (SERRA, 1982) paraissent adaptés à la simulation de critères géométriques d'interprétation.
- critères statistiques :
Ils définissent l'organisation et l'arrangement des éléments lorsque leur répartition est aléatoire. Ils prennent en compte la densité des caractères, leur fréquence locale dans un ou plusieurs environnements immédiats. Ces critères sont en jeu lorsque :

- * le pixel ou la plus petite partie visible de l'image sont de dimensions supérieures ou égales aux éléments clairement identifiés du paysage (avec une approche ponctuelle au niveau du pixel).

* l'approche ponctuelle de l'interprétation se situe au niveau d'un élément d'image tel que la perception de ces éléments du paysage ne soit pas possible.

En fait, il apparait que critères géométriques et statistiques correspondent à deux compréhensions différentes imposées par le niveau de perception de l'image. Cette notion est évidemment liée à l'échelle de prise de vue ou à la taille du pixel. Les règles d'interprétation utilisant ou appliquant ces critères sont choisies intuitivement en fonction de l'organisation des frontières entre les primitives (par exemple, l'interprétation de deux images sur une région agricole donnera des résultats différents selon que les limites des parcelles sont évidentes ou floues). Sur ce plan de la structure des limites, il manque également un modèle d'approche permettant un choix objectif du type de critères à retenir.

Dans l'immédiat, pour être simulés numériquement, ces critères devront faire appel à des formulations objectives telles que les règles de :

- voisinage et métriques de mesure de proximité, ressemblance, similitude des textures dans l'espace de l'image ou dans l'espace des textures,
- connexités et frontières définissant des composantes connexes organisées ou non et des relations objet/fond mesurables.

Ces éléments théoriques sont suffisants pour présenter la suite de ce travail. Cependant, des actions sont en cours pour mieux définir les trois familles de critères d'interprétation. En effet, leur connaissance conditionne la nature des règles d'interprétation et facilite leur modélisation numérique. En particulier, l'éventualité de proportions constantes de différents critères pour caractériser des paysages végétaux montre les limites de simulations numériques non adaptées. (Exemple évident : l'inadaptation des techniques multi-spectrales à l'analyse de position).

II.3 PRINCIPES DE SIMULATION NUMERIQUE DE L'INTERPRETATION

II.3.1 Fonctions à remplir par la simulation numérique

La première règle d'interprétation (Phase B) à simuler concerne l'action de stratification. Cette opération consiste à découper la surface étudiée en régions de même apparence. Il est postulé que les aires obtenues correspondent généralement à des régions naturelles sur le terrain (pour la similitude des propriétés d'organisation interne). L'interprétation appliquée à une telle zone peut alors chercher la correspondance des textures caractéristiques avec des objets naturels. Les relations obtenues sont significatives puisque les connaissances thématiques sont extraites des zones d'égal raisonnement (LIPPMAN, 1981). La simulation numérique de la stratification doit donc développer des opérateurs de segmentation zonale.

Selon relations su

Zona ou

Bien interpréti de limiter l

La de d'observatio l'image en t obtenus peuv senter la du

La tr consiste à r tation par c car elle dét phase C) dan

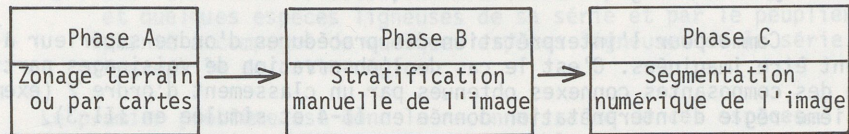
Si l originelle, de nouvelles

Dans sont considé préttation so dans les cas Par exemple dans l'image traiter une

La s donné au rés appelée dans de texture (FLOUZAT, 19

La m préttation es tifier quel le fait un critères d' présence et régions de r position à la deuxième permet une s sant les zon

Selon le schéma général du paragraphe II-1, cette action répond aux relations suivantes entre les phases A, B et C.



Bien que cette règle ne représente qu'un cas dans la méthode de photointerprétation analytique, son importance doit être soulignée, car elle permet de limiter les erreurs en cartographie automatique de la végétation.

La deuxième fonction à simuler concerne la double approche à deux niveaux d'observation. Les algorithmes utilisés dans la phase C doivent donc traiter l'image en tenant compte d'environnements de taille variable. Les résultats obtenus peuvent faire l'objet d'un classement qui les fusionne afin de représenter la dualité de la compréhension visuelle.

La troisième fonction est la simulation numérique proprement dite. Elle consiste à représenter le mieux possible les critères et les règles d'interprétation par des opérateurs spécialisés. Cette fonction est la plus importante car elle détermine la qualité de la modélisation (passage de la phase B à la phase C) dans la procédure générale.

Si les résultats sont fournis dans une structure identique à l'image originelle, il est possible de traiter une image déjà classée pour lui appliquer de nouvelles transformations : c'est la notion de classification de 2e ordre.

II.3.2. Notion de classification de deuxième ordre

Dans la photointerprétation des règles sont appliquées à des textures qui sont considérées comme des objets identifiés pour que le raisonnement d'interprétation soit plus élaboré. Cette assimilation des phases A et B est fréquente dans les cas où des relations évidentes font correspondre 1 texture à 1 objet. Par exemple, les propriétés de couleur d'un objet végétal et de sa représentation dans l'image sont souvent à l'origine de ces relations. Il y a donc le besoin de traiter une information déjà ordonnée en classes thématiques.

La simulation numérique de cette démarche consiste à appliquer un opérateur donné au résultat d'un autre traitement de l'image. C'est cette action qui est appelée dans ce papier classification de deuxième ordre. Des procédures d'analyse de texture de paysages (VERGER, 1980) ou d'aides automatiques à la stratification (FLOUZAT, 1977) correspondent à cette démarche.

La mise en oeuvre la plus immédiate pour représenter une première interprétation est un classement spectral. En effet, il est toujours possible d'identifier quelques catégories d'objets au sol par leurs propriétés spectrales comme le fait un cartographe. Des informations peuvent alors être obtenues par des critères d'interprétation de cette première carte. En particulier, la densité de présence et l'organisation des points des différentes classes indiquent des régions de même apparence. La modélisation de ces critères de densité et de position a été réalisée et se trouve décrite au paragraphe III.2 (simulation de la deuxième règle d'interprétation dans l'exemple présenté). Cet algorithme permet une segmentation (phase C) qui simule la stratification (phase B) définissant les zones d'égal raisonnement.

Son intérêt réside dans les résultats plus significatifs obtenus car les données traitées ne sont pas des valeurs radiométriques abstraites mais des textures ayant une signification thématique.

Comme pour l'interprétation des procédures d'ordre supérieur à 2 peuvent être imaginées. C'est le cas de l'observation de voisinages particuliers entre des composantes connexes obtenues par un classement d'ordre 2 (exemple : troisième règle d'interprétation donnée en II-4 et simulée en III-3).

II.3.3 Organisation des algorithmes de simulation

Dans la technique retenue, les algorithmes de simulation comprennent deux opérateurs distincts mais complémentaires.

Le premier est une fonction spatiale qui détermine le niveau d'approche. Il définit l'environnement, la partie d'image sur laquelle s'applique le second opérateur. Trois groupes de paramètres caractérisent les composantes de cette fonction :

- la forme de l'élément d'image considéré,
- la dimension de l'élément d'image considéré,
- le déplacement de l'élément d'image considéré.

Le second opérateur est une fonction numérique qui consiste en une règle de décision affectant une valeur donnée à l'élément d'image traité. La règle de décision est constituée par des lois qui simulent les règles d'interprétation retenues et qui affectent les pixels définis par le premier opérateur.

L'organisation d'un algorithme de simulation (S) peut donc être schématisée comme l'opération suivante :

Fonction (S) = fonction spatiale * fonction décision.

Le double niveau de perception en photointerprétation est ainsi représenté par deux applications de l'algorithme où seule la fonction spatiale fait varier la dimension de l'élément d'image traité.

Cette formulation des algorithmes d'aides automatiques à l'interprétation est relativement générale. En particulier, si le premier opérateur définit un seul pixel et si le second calcule un caractère spectral, l'algorithme est une classification multidimensionnelle. Les trois groupes de critères d'interprétation peuvent donc être simulés selon le même concept.

II.4 REGLES D'INTERPRETATION A SIMULER

Dans l'exemple de simulation retenue, l'expérience AGRESTE avait montré la difficulté de discriminer spectralement et localement les plantations de peuplier des formations boisées naturelles avec des images de Landsat 2 (FLOUZAT, 1978 et 1981 b). L'application d'une méthodologie simulant la photointerprétation analytique sur le même sujet avec une image de même caractéristique (Landsat 3, 15-11-1981) est donc intéressante.

Le raisonnement se compose des 4 règles (phase B) décrites ci-dessous qui découlent de la connaissance des écosystèmes locaux (phase A).

Les conditions climatiques régionales et l'utilisation des terres font qu'une première règle de phase A peut ainsi être formulée :

A1 : Les formations boisées sont constituées par le chêne pédonculé et quelques espèces ligneuses de sa série et par le peuplier planté accompagné de quelques espèces ligneuses de la série hygrophile de cette région.

Le premier problème est donc la reconnaissance de ces espèces. L'ensemble de ces formations boisées est identifiable par sa couleur ou sa signature spectrale (les arbres fruitiers ayant généralement perdu toutes leurs feuilles à cette date). La règle B1 peut ainsi être :

B1 : *Les pixels "Forêt" (peuplier + chêne) sont interprétés comme les points de forte densité optique (faible réflectance) dans le visible et de densité optique moyenne dans le proche infra-rouge.*

La physionomie du paysage montre que le peuplier est localisé dans des zones essentiellement boisées (en plantations) et peu exploitées pour l'agriculture. Cette approche zonale conduit à la règle A2 :

A2 : Les plantations de peupliers sont dans des zones principalement occupées par des formations boisées et peu utilisées par l'agriculture.

L'interprétation de cette répartition peut être faite par une approche aréolaire (règle B2) à la suite de la première identification où les conditions phénologiques permettent un classement acceptable des terres agricoles.

B2 : *Les pixels de peupliers sont dans des strates à forte densité de boisement et à faible densité de terres agricoles.*

Une loi simple de l'écologie donne la règle A3 :

A3 : Les plantations de peupliers sont installées dans des stations où l'alimentation en eau des racines est facilement satisfaite.

Dans le site étudié, ces stations sont localisées à l'intérieur du lit mineur de la Garonne. Des critères géométriques permettent de retenir les propriétés intéressantes de ce lit "mineur". Il est situé de part et d'autre de la Garonne (parfois d'un seul côté) et, de chacun de ses points, un chemin ne traversant que sa surface peut conduire en tout autre de ses points (du même côté du fleuve). A cette notion de contact et de continuité correspond la règle B3 :

B3 : *Les pixels de peupliers sont dans des zones connexes et voisines de la Garonne.*

La détermination des points de l'image représentant le peuplier découle de l'ensemble (A4) des lois de terrain indiquées en A1, A2 et A3. La localisation des pixels de peuplier correspondant est donc obtenue par la somme (B4) des règles B1, B2 et B3.

A4 : Les peupliers sont situés dans des stations "forêt" et dans des zones fortement boisées et à peu d'agriculture dont la disponibilité en eau est satisfaisante.

B4 : Les pixels "peupliers" sont des pixels "forêt" appartenant aux zones à forte densité de boisement et à faible densité de terres agricoles qui sont connexes et voisines de la Garonne.

En référence aux règles A1 et B1, le chêne pédonculé est la partie complémentaire du peuplier dans l'ensemble "forêt". La règle B'4 peut donc, être énoncée ainsi :

B'4 : Les pixels "chêne pédonculé" sont les pixels "forêt" qui ne sont pas des pixels "peupliers".

Il y a donc 4 règles d'interprétation à simuler pour réaliser la modélisation de cette discrimination peuplier-chêne pédonculé que peut effectuer un cartographe.

III - SIMULATION DE L'INTERPRETATION ET TRANSFORMATION D'IMAGE

III.1 SIMULATION DE LA PREMIERE REGLE

Les caractéristiques de l'image Landsat permettent généralement d'identifier les formations forestières par leurs propriétés spectrales. Dans le cas de la vallée de la Garonne, 3 parcelles d'entraînement indiquent les signatures spectrales caractéristiques.

La simulation de la règle B1 est faite par une méthode d'hypercubes (seuillages multidimensionnels par bornes inférieures et supérieures). Pour améliorer l'efficacité de cette technique, une variante a été proposée afin de mieux cerner les nuages de pixels échantillonnés dans l'espace des canaux (FLOUZAT, 1979). Elle consiste à définir une classe spectrale (N,M) par une somme de sous-classes (n,m) obtenues également par seuillage dans différents canaux (i,j) (figure 1).

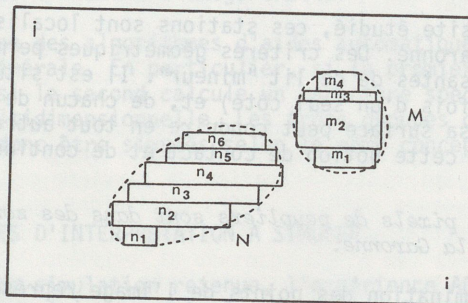


Figure 1 : Classes N et M obtenues par la définition des sous-classes n et m.

Cette approche permet de déterminer une partition d'un espace N^k qui peut avoir une forme voisine de celles définies par des distances géométriques en classification multidimensionnelle.

III.2 TRANSFORMATION MULTIDIMENSIONNELLE D'UNE IMAGE CLASSEE

La simulation de la règle B2 est exécutée en 2 temps :

- transformation multidimensionnelle d'une image déjà classée,
- application d'un classement à la nouvelle image obtenue.

III.2.1 Principe de la transformation

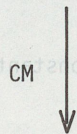
La simulation nécessite la définition de zones homogènes par des proportions constantes de différents éléments identifiés (classification de deuxième ordre). Pour cela, l'algorithme correspondant se compose de deux parties :

La transformation proprement dite consiste à affecter à chacun des points de l'image n valeurs égales à la fréquence locale des n taxons classés. L'image transformée est donc une donnée à n dimensions où l'espace original des canaux est remplacé par l'espace des classes. De ce fait, l'image obtenue est munie de propriétés originales (III.2.2.). La transformation peut ainsi être représentée de la façon suivante où il est convenu que :

- I est l'image de départ
- J^k est l'ensemble des images dans les k canaux
- P_i est la valeur radiométrique du pixel
- x_i, y_i sont les coordonnées de p_i définies dans X, Y qui est le repère géographique ligne-colonne de I

donc : $p_i = (x_i, y_i)$ avec $x_i \in X$ et $y_i \in Y$
 n est le nombre de classes de l'image classée

Image départ $I \subset J^k, I = \{p \in N^k\}$ tq $p = (p_1, \dots, p_k)$



CM classement multidimensionnel

Image classée $I \subset J, J = \{p \in C\}$

$C = \{1, 2, 3, \dots, n\} \subset N$



TM transformation dans l'espace des classes

Image résultat $I \subset J^k, I = \{p \in N^n\}$ tq $p = (p_{c_1}, p_{c_2}, \dots, p_{c_n})$

$c_1, \dots, c_n =$ indices des n canaux créés.

La deuxième partie de l'opérateur de simulation de la règle B2 est le classement appliqué à plusieurs dimensions de la nouvelle image. Le résultat se présente sous forme de zones compactes où le rapport périmètre/surface est faible. De telles zones ont des densités de présence des différentes classes de l'image-origine qui sont constantes.

III.2.2. Propriétés de l'image transformée

L'image provenant de la transformation dans l'espace des classes conduit à une famille de fonctions de segmentation. Ceci est dû aux propriétés

décrites ci-dessous.

a- La structure de l'image résultat est identique à la structure de l'image-origine.

Cette similitude permet d'appliquer des opérateurs "classiques" à cette donnée multidimensionnelle.

- amélioration des contrastes,
- combinaison des canaux,
- seuillages multiples,
- classifications diverses.

L'intérêt est que de tels traitements sur l'image transformée fournissent des résultats originaux puisque l'information est de nature différente.

b- La nature de l'information est une probabilité locale d'appartenance à une classe de départ donnée. C'est ce fait qui permet la segmentation zonale et simule la perception aréolaire. Par analogie avec l'information multispectrale, le voisinage est un pixel où les radiométries sont les fréquences de présence des différentes classes. Chaque pixel auquel est attribué l'information pour une position de la fonction spatiale dispose ainsi d'une sorte de "signature thématique".

c- La signature multidimensionnelle a des propriétés thématiques permettant des traitements déterministes. Comme dans l'image d'origine, chaque pixel est un vecteur qui donne les importances relatives de classes de départ dans un voisinage donné. Il est donc possible d'extraire les pixels répondant à une composition de l'occupation des terres préfixée sans échantillonnage. Des traitements déterministes sont ainsi possibles avec la même signification qu'une démarche supervisée mais sans parcelles d'entraînement.

d- La somme des valeurs du vecteur créé p est une constante (A).

$$p = (p_{c1}, \dots, p_{cn}) \text{ tq } p_{c1} + p_{c2} + \dots + p_{cn} = A$$

et $A = V_x \times V_y$ où V_x et V_y sont les longueurs en X et Y de la fenêtre traitée.

Cette propriété permet de définir une valeur ou une somme de valeurs du vecteur en connaissant seulement une partie de ce vecteur. Ces informations peuvent donc être obtenues sans parcelles d'entraînement.

e- Les corrélations négatives entre les valeurs des pixels dans les canaux créés réduisent l'information nécessaire à la segmentation. Aussi, lorsque deux canaux ont des coefficients de corrélation proches de -1 , les zones correspondantes peuvent être obtenues uniquement par seuillage sur l'un d'entre eux. Le seuillage sur le second canal est inutile puisqu'il définit le complément.

Ces propriétés conduisent à des images lissées à "segmentation zonale" par une classification de deuxième ordre. Ces facteurs en font donc une bonne simulation des règles de stratification manuelle.

III.3 SIMULATION DE LA TROISIEME REGLE : COMPOSANTES CONNEXES SIGNIFICATIVES.

Le résultat de la classification de deuxième ordre sur l'image transformée est formé de zones compactes qui sont les entités intéressantes. Ce caractère morphologique fait que ce ne sont plus les pixels qui sont traités mais les composantes connexes.

Pour que les composantes connexes significatives soient retenues, la règle B3 indique qu'elles doivent être voisines de la Garonne. Ce voisinage est détecté par la méthode suivante. Une image bidimensionnelle est formée :

- de la classe des zones à grande fréquence locale de forêt et à faible fréquence locale de terres agricoles,
- de la classe des zones à grande fréquence locale de surfaces en eau obtenue par la transformation dans l'espace des classes.

Ces deux classes sont considérées comme des canaux auxquels est appliqué un classement mettant en évidence les points communs et voisins entre les deux ensembles. Sont alors extraites les composantes connexes du premier canal de cette image si elles ont des points communs ou voisins avec la classe "Eau".

Le résultat peut contenir des éléments sans intérêt qui introduisent des données finales fausses. En effet, les composantes connexes "Eau" qui sont compactes et de petites surfaces ne représentent pas la Garonne. Elles peuvent ainsi provoquer la rétention d'entités non significatives. Un filtrage sur ces critères de forme s'imposerait alors sur la canal "Eau" de cette image bidimensionnelle. Cependant, cette opération a paru inutile puisqu'elle n'affecte pas le développement de la méthode. Le résultat final (IV-2) montre que le nombre de pixels ainsi retenus peut être négligé.

III.4 QUATRIEME REGLE : DETERMINATION DES PIXELS RECHERCHES

La quatrième règle (B4) de détermination des pixels "peupliers" étant la somme des règles précédentes (B1 + B2 + B3), sa simulation est effectuée par la somme (C1 + C2 + C3) des simulations précédentes.

Or, la règle B3 représente une sélection des données obtenues en B2. La simulation numérique C4 de la règle B4 peut donc se ramener à l'opération :

$$C4 = C1 + C3$$

L'algorithme de simulation est donc simple puisqu'il s'agit de réaliser l'intersection de deux ensembles définis par :

- la classe forêt de la simulation de la première règle
- les composantes connexes significatives de la simulation de la troisième règle.

Le résultat est donc immédiat et contient les pixels déterminés par la définition des points de peupliers.

Les pixels de chêne pédonculé forment l'ensemble complémentaire du peuplier dans les pixels de forêt (règle B'4).

IV - PROCEDURE GENERALE ET RESULTATS

IV.1 SCHEMA DE SYNTHESE

La procédure générale de simulation de l'interprétation dans l'exemple choisi répond au schéma de base donné en II.1. Elle peut être résumée synthétiquement par le tableau ci-dessous :

Phase A : Lois	Phase B : Règles	Phase C : Algorithmes
A1 : Forêt = Chêne pédonculé + peuplier	B1 : Densité optique caractéristique	C1 : Seuillage multispectral
A2 : Peupliers en plantations groupées	B2 : Strates fortement boisées, peu agricoles	C2 : Transformation dans l'espace des classes et seuillage multidimensionnel
A3 : Problème de l'alimentation en eau	B3 : Zones connexes et voisines de la Garonne	C3 : Choix des composantes connexes significatives
A4 : A1 + A2 + A3	B4 : B1 + B2 + B3 B'4 : Chêne = complément de peuplier dans B1	C4 : C1 + C3

Ce schéma entraîne la remarque suivante : aucune des trois premières règles n'est suffisante pour discriminer totalement les deux formations boisées ; c'est leur ensemble qui est déterminant. Ceci correspond bien à un processus d'interprétation où souvent, c'est la réunion de plusieurs critères qui conduit à la meilleure compréhension de l'image. Une démarche de ce type est formulée théoriquement par JEANSOULIN (1982) avec les ensembles flous où, seule, la "somme" de plusieurs fonctions est significative. Il existe donc diverses possibilités de modélisation de cette approche analytique.

IV.2 RESULTATS SUCCESSIFS

Le seuillage multispectral (C1 dans le schéma de synthèse) est appliqué aux deux canaux de l'image Landsat utilisée dont les figure 2 (canal 5) et figure 3 (canal 7) donnent des visualisations. Le résultat de ce classement est présenté par la figure 4. Quatre classes apparaissent du noir au gris clair : eau, forêt, terres agricoles, vergers et fruitiers.

Le deuxième algorithme de simulation (C2) est la transformation d'image dans l'espace des classes. Les figures 5,6 et 9 sont des visualisations des canaux "Forêt", "Terres agricoles" et "Eau" de l'image obtenue. L'algorithme C2 est complété par le seuillage bidimensionnel des canaux "Forêt" et "Terres agricoles" dont le résultat est présenté en figure 7.



S

tion dans l'exemple
résumée synthé-

C : Algorithmes
seuillage spectral
transformation dans espace des classes seuillage multi- dimensionnel
choix des composantes annexes significatives
+ C3

les trois premières
formations boisées ;
à un processus
critères qui conduit
type est formulée
où, seule, la
onc diverses

nthèse) est
figure 2 (canal 5)
de ce classement
noir au gris clair :

ansformation
des visualisations
tenue.
des canaux "Forêt"
7.

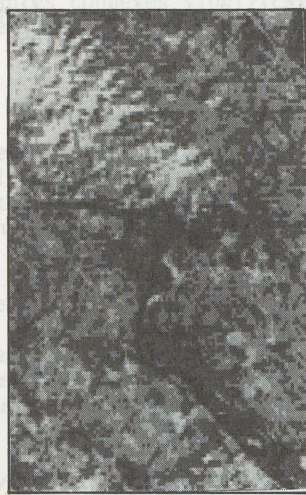


Figure 2

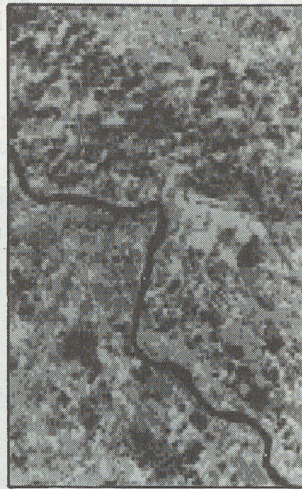


Figure 3

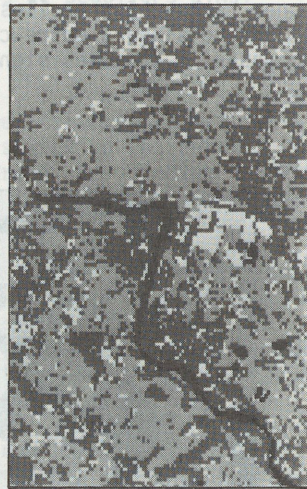


Figure 4

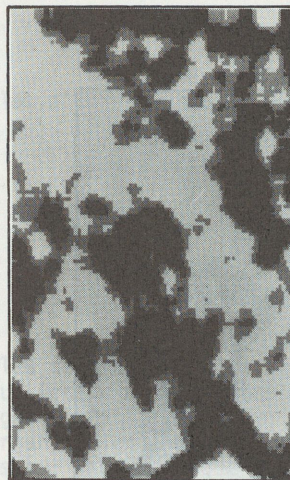


Figure 5

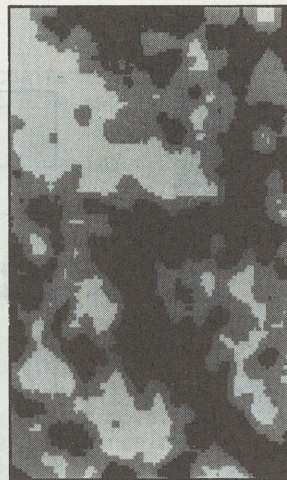


Figure 6

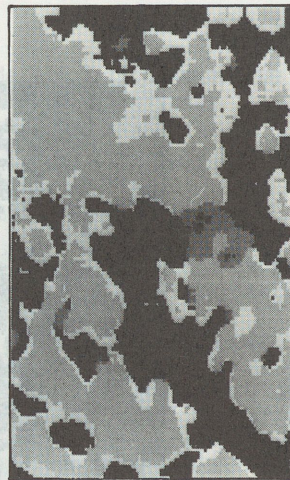


Figure 7

IV - PROCEDURE GENERALE ET RESULTATS

Ce deuxième résultat intermédiaire permet d'extraire uniquement les zones recherchées = elles sont visualisées dans la figure 8. Les intersections et les voisinages entre ces pixels et ceux de la figure 9 sélectionnent les composantes connexes significatives (algorithme C3, figure 10).

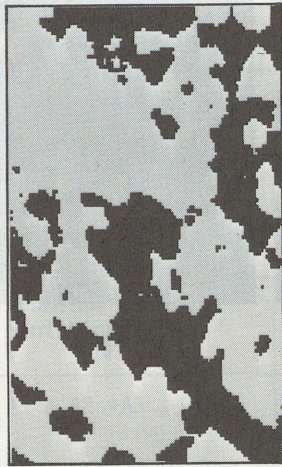


Figure 8

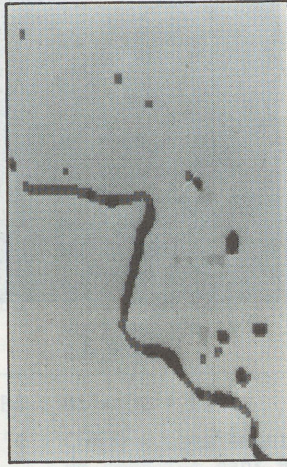


Figure 9

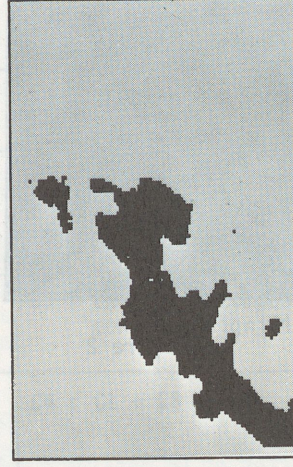


Figure 10

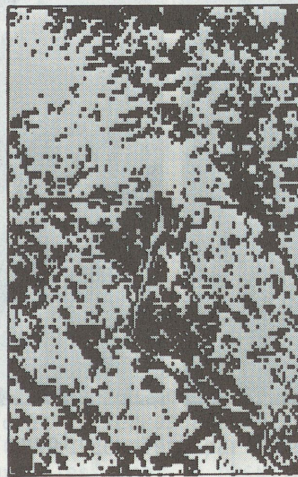


Figure 11

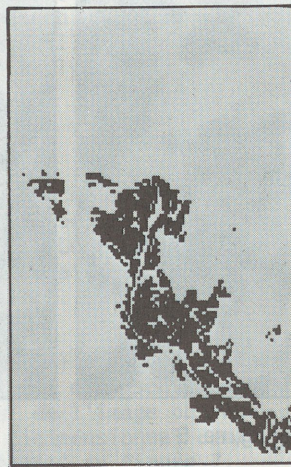


Figure 12

La
pixels "Forêt
santes conn
recherchés s

de deuxième
significativ
et d'exploit
chisation de

de l'enchaîn
à l'exceptio
tements se r
la procédure
succession d

évident que
traduites. E
attendues de
le domaine d
permettant d
aide précieu

Un
règles d'int

In
tracking u
Earth by In

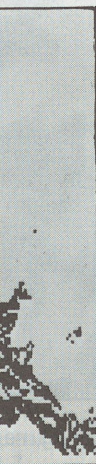
(où : CM = c
des classes

S
règles de sy
et un vocabu
images. La p
l'organisati
plus sur une
traitements
par rapport
avec cet exe
photointerpr
des images.
technique d
compréhensio

uniquement les
Les intersections
ectionnent les
)



Figure 10



La détermination des pixels recherchés est obtenue par l'ensemble des pixels "Forêt" (figure 11 ; extraite de la figure 4) contenus dans les composantes connexes significatives (figure 10). Les pixels de peupliers ainsi recherchés sont donnés en figure 12.

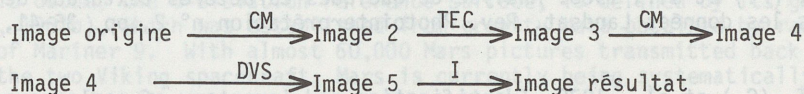
Ces résultats successifs mettent en évidence l'intérêt de traitements de deuxième ordre. L'extraction de caractéristiques (sélection des entités significatives) fait même appel à un traitement d'ordre 3. Ce principe d'analyse et d'exploitation de résultats d'une phase précédente correspond à la hiérarchisation des opérations en photointerprétation analytique.

La définition des simulations numériques des règles et la description de l'enchaînement des opérateurs semblent indiquer une procédure longue. Or, à l'exception de la transformation dans l'espace des classes, tous les traitements se ramènent à des intersections d'ensembles bornés. Le déroulement de la procédure générale de simulation de ce raisonnement est donc constitué d'une succession d'opérations simples, ce qui en fait un algorithme performant.

Sur le plan de la définition des règles d'interprétation, il est évident que certaines lois de l'écologie et de la géographie ne peuvent être traduites. En dehors de cette limitation, il faut noter que les performances attendues de cette méthodologie entraînent un besoin nouveau de recherche dans le domaine de l'interprétation des images. En effet, des principes généraux permettant de trouver des règles d'interprétation significatives seraient une aide précieuse à la mise en oeuvre de ces techniques de simulations numériques.

V - CONCLUSION

Un résumé de l'enchaînement des phases C de simulation numérique des règles d'interprétation peut être représenté par la séquence suivante :



(où : CM = classement multidimensionnel, TEC = transformation dans l'espace des classes, DVS = détection des voisinages significatifs, I = intersection).

Si l'on admet une analogie entre image et mots, entre opérateurs et règles de syntaxe, il est possible d'envisager une grammaire (ensemble de règles) et un vocabulaire (ensemble d'images) conduisant à une lecture objective des images. La puissance d'un langage complet peut ainsi être imaginée. En effet, l'organisation d'une "phrase" (séquence d'extraction d'informations) ne repose plus sur une technique spécifique mais sur un arrangement "intelligent" de traitements successifs. Or, ces traitements peuvent être en nombre très limité par rapport au nombre de leurs combinaisons significatives. L'idée proposée avec cet exemple de discrimination forestière consiste donc à automatiser la photointerprétation analytique en la considérant comme une théorie de la lecture des images. Cette démarche paraît correspondre typiquement à la nature de cette technique d'interprétation. Des progrès sensibles dans la modélisation de la compréhension visuelle des images semblent donc possibles par cette approche.

VI - REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- FLOUZAT, (G.) et al., 1981. Recherche de fonctions texturantes. Application au zonage écographique et à la cartographie de l'occupation des terres d'un bassin versant : l'Aveyron. Projet soutenu par l'ATP Télédétection 1981.
- FLOUZAT, (G.) et al., 1982. Caractérisation de l'organisation des paysages végétaux par application de la morphologie mathématique à l'imagerie de simulation SPOT. Projet soutenu par l'ATP Télédétection 1982.
- BOUILLE, (F.) 1973. Contribution à la digitalisation et à l'analyse des cartes géologiques. Thèse Doctorat d'Etat - Université de Paris VI, 1973.
- BRACONNE, (S.) 1975. Utilisation des structures topologiques en vue d'une cartographie automatique à partir des images de télédétection. Thèse Doctorat de Spécialité. Université de Paris VI, 1975.
- GUY, (M.) 1970. Traitement des images et méthodes d'exploitation Geoforum, n° 3, pp. 47-62, Paris.
- FONTANEL, (A.) et al. 1974. Cartographie automatique : exemples de réalisation partielle d'un système. Bull. Soc. Fr. Photogram. n° 56, pp. 29-38, Paris, Octobre 1974.
- FLOUZAT, (G.), 1977. Une méthode d'aide automatique à la stratification des images de télédétection. Rapport CESR n° 77-735, Toulouse, Juillet 1977.
- SERRA, (J.), 1982. Mathematical Morphology in Image Analysis. Acad. Press. New-York, 1982.
- LIPPMAN, (M.) et al., 1981. L'occupation du sol en milieu méditerranéen, télé-analyse et zonage thématique dans la région d'Aix-en-Provence. 4ème Coll. Inter. GDTA, Toulouse, Juin 1981.
- VERGER, (F.) et al., 1980. Analyse de quelques caractères texturaux de paysages d'après les données Landsat. Rev. Photointerprétation n° 2, pp. 35-41, Paris 1980.
- FLOUZAT, (G.) et al., 1978. Identification and inventory of poplar groves. Chap. 4 in AGRESTE exp. final. rep. NASA experiment n° 28790. Ispra, Juin 1978.
- FLOUZAT, (G.) et al., 1981. Application de la télédétection à la populiculture. Rev. For. Franç. V.P. 23, n° 6, pp. 478-493. Paris, Novembre 1981.
- JEANSOULIN, (R.) 1982. Les images multisources en télédétection : Mise en correspondance numérique et analyse de la structure géométrique. Thèse Doctorat d'Etat. INP Toulouse, Juin 1982.

ABSTRACT.- F
wavelength
topograph
sensed da
spacecraf
maps are
Mariner 9
A gl
topograph
include:
radar sou
By u
spacecraf
compiled
technolog

Remote-
mapping. To
remotely sen
received fro
A globa
combining me
1978). They
radiometer (I
the Mariner
topographic
field (Wu, 1
tracking of
Earth by the
mapped in gr
By usin
photographs,
topographic
altimetry da
topographic
topographic
radar (SAR)
photogrammet
stereo image
1980b)
Technic
compilation

Remote
provided bro