

JOURNÉES TÉLÉDÉTECTION

**IMAGES SATELLITE ET MILIEUX TERRESTRES
EN RÉGIONS ARIDES ET TROPICALES**

BONDY
du 14 au 17 novembre 1988

Editions de l'ORSTOM

INSTITUT FRANÇAIS DE RECHERCHE SCIENTIFIQUE POUR LE DÉVELOPPEMENT EN COOPÉRATION

Collection COLLOQUES et SÉMINAIRES

PARIS 1990

La loi du 11 mars 1957 n'autorisant, aux termes des alinéas 2 et 3 de l'article 41, d'une part, que les «copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective» et, d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans un but d'exemple et d'illustration, «toute représentation ou reproduction intégrale, ou partielle, faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ayants cause, est illicite» (alinéa 1er de l'article 40).

Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une contrefaçon sanctionnée par les articles 425 et suivants du Code pénal.

AVANT-PROPOS

Organisées pour la première fois à BONDY par l'Unité de Télédétection ces journées avaient pour objectifs:

- une **présentation des recherches menées actuellement** au sein du Laboratoire en collaboration avec les chercheurs de l'ORSTOM et d'autres organismes français (Universités, CNRS) et étrangers.
- une **occasion d'échange** avec d'autres équipes françaises travaillant sur des problématiques analogues ou complémentaires.

Plus d'une vingtaine d'exposés, suivis de discussions, parfois trop rapides faute de temps, ont permis d'illustrer et d'approfondir les **trois principaux thèmes de recherches** conduits actuellement au laboratoire. Ces thèmes se réfèrent, pour l'essentiel, à l'utilisation des images des satellites d'observation de la Terre tels que LANDSAT et SPOT:

= **Images SATellite et CARTOgraphie des états de surface (SATCARTO)** avec deux séries d'exposés:

- une première série concerne l'étude des facteurs de la luminance liés aux propriétés spectrales des couvertures minérales et végétales mais aussi à la géométrie du système soleil-surface-capteur.
- dans la seconde, sont présentées des opérations de recherches menées dans différents domaines thématiques.

= **Images SATellite et analyse quantitative des FORMes (SATFORM)** avec deux aspects principaux:

- d'une part, l'analyse de la texture sur les images satellites (état de l'art, applications) et plus généralement l'organisation spatiale des objets.
- d'autre part, l'extraction d'objets sur les images.

= **Images SATellite MODélisation et automatisation de la production d'information (SATMOD):**

- un premier ensemble de communications situe l'intérêt de la Télédétection spatiale pour la production d'information dans le cadre de la sécurité alimentaire et des statistiques agricoles.
- enfin les deux derniers exposés sont consacrés à la présentation de systèmes experts pour la cartographie par télédétection.

V

*

COMITE D'ORGANISATION

**Marcel POUGET, Catherine MERING
Haja ANDRIANASOLO**

*

ADMINISTRATION

Nicole DELARBRE

*

EDITION DES DOCUMENTS

Liliane ZURETTI

VII

INTERVENANTS

ANDRIANASOLO Haja

CENTRE ORSTOM
LIA. Unité Télédétection
72 Route d'Aulnay
93140 BONDY

BARBARY Olivier

CENTRE ORSTOM,
Apartado Posta 4196,
QUITO, EQUATEUR

BEAUDOU Alain

CENTRE ORSTOM
72 Route d'Aulnay
93140 BONDY

CERVELLE Bernard

Laboratoire de Minéralogie-
Cristallographie de Paris,
Tour 16
4 place Jussieu
75252 Paris CEDEX 05

COURADE Georges

UR "Maîtrise de la Sécurité
Alimentaire"
Département MAA
CENTRE ORSTOM
213 rue Lafayette
75480 Paris CEDEX 10

DA SILVA MADEIRA NETTO José

CENTRE ORSTOM,
L.I.A, Unité de Télédétection
72 Route d'Aulnay
93140 BONDY
et
CPAC/EMBRAPA
CXP 70/0023
CEP 73000 PLANALTINA
(DF)
BRESIL

DANDJINOU Toundé

CSGS - Centre de Sédimentologie et
de Géochimie de la Surface
1 rue Blessig
67084 Strasbourg CEDEX

VIII

DEBAINE Françoise

CNRS, UA 0141,
Laboratoire de Géographie Physique
1 Place Aristide Briand
92195 MEUDON
ORSTOM, LIA, Unité de Télédétection,
72 route d'Aulnay
93140 BONDY

DESTIVAL Isabelle

Institut Géographique National ENSG
Laboratoire de recherche COGIT 2,
avenue Pasteur
94160 SAINT-MANDÉ

DEVINEAU Jean Louis

URA 136 CNRS / ORSTOM
Unité de télédétection de Bondy
CENTRE ORSTOM
72 Route d'Aulnay
93140 BONDY

DUREAU Françoise

CENTRE ORSTOM
UR5E Département SDU
72 Route d'Aulnay
93140 BONDY

EBERHARD Jean-Michel

CENTRE ORSTOM
LIA. Unité de Télédétection
72 Route d'Aulnay
93140 BONDY

ESCADAFAL Richard

CENTRE ORSTOM
LIA. Unité de Télédétection
UR 3J Département MAA
72 Route d'Aulnay
93140 BONDY

ETIFIER Agnès

CENTRE ORSTOM
LIA. Unité de Télédétection
72 Route d'Aulnay
93140 BONDY

GUILLOT Bernard

Antenne ORSTOM
BP 147
22 302 LANNION

IX

JACQUEMINET Christine

CENTRE ORSTOM
LIA. Unité de Télédétection
72 Route d'Aulnay
93140 BONDY

LAMACHERE Jean Marie

CENTRE ORSTOM
BP 182
OUAGADOUGOU
BURKINA FASO

LE MEN Hervé

Ingénieur géographe
Laboratoire COGIT
IGN-2 avenue Pasteur
94160 SAINT-MANDÉ

LORTIC Bernard

CENTRE ORSTOM,
L.I.A. Unité de Télédétection
UR5F département SDU
72 Route d'Aulnay
93140 BONDY

MARLIAC Alain

CENTRE ORSTOM
Département SDU
72 Route d'Aulnay
93140 BONDY

MERING Catherine

CENTRE ORSTOM
L.I.A. Unité de Télédétection
72 Route d'Aulnay
93140 BONDY

MICHEL Alain

CENTRE ORSTOM,
L.I.A. Unité de Télédétection
72 Route d'Aulnay
93140 BONDY

PION Jean.Claude

Institut de géologie
ORSTOM UR1D Département TOA
1 Rue Blessig
67084 STRASBOURG Cedex

PONCET Yveline

CENTRE ORSTOM
UR3J Département MAA
72 Route d'Aulnay
93140 BONDY

X

POUDIOUGO Paul

CENTRE ORSTOM
L.I.A, Unité de Télédétection
72 Route d'Aulnay,
93140 BONDY

POUGET Marcel

CENTRE ORSTOM
L.I.A, Unité de Télédétection
72 Route d'Aulnay
93140 BONDY

RAKOTO-RAVALONTSALAMA Mamy

CENTRE ORSTOM,
L.I.A, Unité de Télédétection
72 Route d'Aulnay
93140 BONDY
et
CENTRE ORSTOM,
La REUNION

ROQUIN Claude

CSGS - Centre de Sédimentologie et
de Géochimie de la Surface
1 rue Blessig
67084 Strasbourg CEDEX

SHARMAN Martin

CEE
Centre Commun de recherche
21020 Ispra Varese
ITALIE

TRIBOULET Christine

CENTRE ORSTOM
L.I.A, Unité de Télédétection
72 Route d'Aulnay
93140 BONDY

YESOU Hervé

CSGS - Centre de Sédimentologie et
de Géochimie de la Surface
1 rue Blessig
67084 Strasbourg CEDEX

XI

SOMMAIRE

THEME : IMAGES SATELLITE ET CARTOGRAPHIE DES ETATS DE SURFACES (SATCARTO)

Bernard CERVELLE REFLEXION DE LA LUMIERE SOLAIRE PAR LES MATERIAUX MINERAUX : QUELQUES ELEMENTS -----	3
Richard ESCADAFAL LES PROPRIETES SPECTRALES DES SOLS -----	19
Jean Louis DEVINEAU PROPRIETES SPECTRALES DE LA VEGETATION -----	43
Hervé LE MEN CORRECTIONS D'ECLAIREMENT ET CALIBRATION ABSOLUE DES IMAGES SPOT;EFFETS DE STEREOADIOMETRIE -----	51
Alain MICHEL, Bernard LORTIC, Françoise DUREAU, Olivier BARBARY STRATIFICATION DE L'ESPACE URBAIN QUITENIEN DANS UNE PROBLEMATIQUE DEMOGRAPHIQUE. APPLICATION A QUITO (EQUATEUR) -----	57
Jean Louis DEVINEAU CONTRIBUTION A LA CARTOGRAPHIE DES ETATS DE SURFACE D'UN BASSIN VERSANT SAHELIEU ET AU SUIVI DE LEUR EVOLUTION : RECOUVREMENT DE LA VEGETATION ET PHYTOMASSE HERBACEE -----	69
Christine TRIBOULET, Yveline PONCET, Alain BEAUDOU, Alain MARLIAC GEOARCHEOLOGIE AU NORD CAMEROUN -----	79
José DA SILVA MADEIRA NETTO CARACTERISTIQUES SPECTRALES D'UNE PEDOSEQUENCE EN REGION TROPICALE (PLATEAU CENTRAL BRESILIEU). -----	89
Marcel POUGET, Edouard LE FLOC'H, Sonia KAMAL, Boshra SALEM UTILISATION DES DONNEES SPOT POUR LA CARTOGRAPHIE DES RESSOURCES RENOUVELABLES APPLICATION À LA RÉGION COTIERE NORD-OUEST DE L'EGYPTE -----	103
Jean Claude PION, Claude ROQUIN, Toundé DANDJINO, Hervé YESOU ETUDE DES LATERITES PAR TELEDETECTION. CARTOGRAPHIE THEMATIQUE DE BANANKORO ET DAGADAMOU, CORRELATION DES DONNEES GEOCHIMIQUES, COMPARAISON MULTITEMPORELLE ET CLASSIFICATION DES IMAGES SPOT AU SUD - MALI -----	144

XII

THEME : IMAGES SATELLITE ET ANALYSE QUANTITATIVE DES FORMES (SATFORM)

Yveline PONCET LA FORME: UN POINT DE VUE DE "THEMATICIEN" -----	159
Paul POUADIOGO TEXTURE:UN ETAT DE L'ART -----	167
Jean-Michel EBERHARD CARACTERISATION DES QUARTIERS PERIPHERIQUES DE MEXICO SUR IMAGE SPOT: ANALYSE COMPAREE DE LA TEXTURE SUR LES DONNEES MULTIBANDES -----	179
Catherine MERING PRESENTATION DE QUELQUES METHODES DE LA MORPHOLOGIE MATHEMATIQUE PERMETTANT DE CARACTERISER UNE STRUCTURE SUR UNE IMAGE BINAIRE	193
Christine JACQUEMINET CARACTERISATION QUANTITATIVE DE L'ORGANISATION SPATIALE DES AIRES DE LIGNEUX EN MILIEU SAHELIEU A PARTIR DES IMAGES SATELLITAIRES SPOT -----	213
Françoise DEBAINE EXTRACTION DE RESEAUX LINEEIERES A PARTIR DES IMAGES SPOT. EXEMPLE PRIS DANS UNE REGION SEMI-ARIDE : LE NORD-OUEST DE L'INDE -----	225
Isabelle DESTIVAL - Hervé Le MEN DECOMPOSITION DE COURBES DIGITALISEES EN SEGMENTS DE DROITES (POUR LE SUIVI DES RESEAUX LINEAIRES SUR LES IMAGES SPOT) -----	241
Mamy RAKOTO-RAVALONTSALAMA METHODES DE SEGMENTATION AUTOMATIQUE D'IMAGE -----	251

XIII

THEME : IMAGE SATELLITE MODELISATION ET AUTOMATISATION DE LA PRODUCTION D'INFORMATION (SATMOD)

Georges COURADE SECURITE ALIMENTAIRE : L'INSUFFISANCE DES SYSTEMES ACTUELS D'INFORMATION ET LA TELEDETECTION -----	263
Martin SHARMAN APPLICATION DE LA TELEDETECTION AUX STATISTIQUES AGRIQUES POUR L'EUROPE -----	269
Bernard GUILLOT L'UTILISATION DES SATELLITES METEOROLOGIQUES POUR L'ESTIMATION DE LA PLUIE EN ZONE SAHELO-SOUDANIENNE AU CENTRE DE METEOROLOGIE SPATIALE DE LANNION -----	279
Haja ANDRIANASOLO DECOMPOSITION D'UN ESPACE REGIONAL POUR UNE APPROCHE INTEGREE -----	287
Catherine MERING DEVELOPPEMENT DE SYSTEMES EXPERTS POUR LA CARTOGRAPHIE PAR TELEDETECTION -----	301
Agnès ETIFIER LES ALGORITHMES PARTICULIERS DE CIME.2 -----	321

THEME :

**IMAGES SATELLITE : CARTOGRAPHIE DES ETATS DE SURFACES
(SATCARTO)**

REFLEXION DE LA LUMIERE SOLAIRE PAR LES MATERIAUX MINERAUX : QUELQUES ELEMENTS

Bernard CERVELLE

RESUME

L'intensité de la lumière solaire réfléchi par chaque pixel de sol terrestre, pour différentes longueurs d'onde du spectre visible et IR, est à la base de l'information qui parvient aux capteurs des satellites de télédétection en mode passif.

La principale propriété intrinsèque qui contrôle le signal réfléchi vers le capteur est la somme pondérée des absorptions optiques des matériaux qui composent le sol, la végétation et les roches. Cette absorption dépend pour l'essentiel de leur nature cristalochimique : teneurs, valences et coordinations des métaux de transition (Fe II, Fe III, Cu, etc...), fréquence de vibrations des molécules (eau, groupements hydroxyyles, carbonatés, silicatés, etc...).

Le deuxième facteur dominant est l'état morphologique de la surface, à l'échelle ponctuelle (granulométrie, rugosité, microrelief). En effet, la micromorphologie d'une surface influe de façon prépondérante sur ses propriétés de rétrodiffusion.. Un exemple simple, celui de H₂O, illustre le phénomène : selon que ce corps chimique est sous forme d'eau -dont la surface est un miroir soumis aux lois de la réflexion spéculaire (lois de Fresnel) - ou de neige - dont la superficie est une poudre obéissant aux lois de la réflexion diffuse (théorie de Kubelka-Munk)-, ce matériau fournit des images de télédétection soit très foncées (la mer), soit très claires (la neige). Pourtant, cristaux de neige et eau ont des propriétés optiques intrinsèques assez voisines dans le spectre visible. La règle de Rayleigh discrimine très bien ces différents comportements.

L'étude des données spectrales transmises par les satellites permet donc, en principe, de différencier les matériaux d'un pixel, supposé homogène, selon la forme de leur courbe de réflectance, et d'apprécier leur état de surface grâce à l'examen de leur valeur moyenne de réflectance diffuse.

Dans la pratique, l'interdépendance de tous ces phénomènes conduit à devoir résoudre un problème comportant quelques données satellitaires et de nombreux paramètres inconnus au sol et dans l'atmosphère. En général, ce problème se complique encore du fait de l'hétérogénéité des matériaux contenus dans un même pixel, surtout si le capteur privilégie la résolution spectrale aux dépens de sa résolution spatiale.

L'analyse statistique des données spatiales actuelles est ainsi le meilleur moyen d'en tirer profit pour la cartographie, en prenant en compte non seulement la radiométrie des images, mais également les éléments de morphologie qu'elles contiennent.

I. INTRODUCTION

Les principaux matériaux de la surface terrestre susceptibles de réfléchir la lumière solaire vers les satellites de télédétection sont l'eau et sa forme cristallisée, neige ou glace, la végétation, composée de matière cellulosique et de pigments, enfin les roches et les sols, assemblages plus ou moins cohérents de minéraux.

Pour un éclairage donné (longueur d'onde, direction, irradiance), l'intensité de la réflexion au niveau du sol dépend donc, en premier lieu, de la composition chimique du matériau réflecteur. Le deuxième facteur essentiel qui contrôle cette réflexion est la morphologie de la surface, à l'échelle du relief, en général, mais aussi à l'échelle de la rugosité, c'est-à-dire de la micromorphologie de cette surface.

Nous envisagerons ici l'influence de la micromorphologie et de la nature chimique d'une surface sur ce que l'on convient d'appeler "signature spectrale" d'objets minéraux présents à la superficie de la Terre, ceci pour des longueurs d'onde du domaine visible et infrarouge du spectre solaire.

II. REFLEXION SPECULAIRE ET REFLEXION DIFFUSE

II.1. Transition réflexion spéculaire-réflexion diffuse

La distinction entre réflexion diffuse et réflexion spéculaire n'est pas liée aux propriétés chimiques d'une surface réfléchissante, mais à sa morphologie, envisagée à une échelle comparable à la longueur d'onde d'observation.

Un exemple simple permet d'illustrer cette dichotomie : l'eau, H_2O , sous forme liquide, est un *miroir* plan se comportant de façon *spéculaire* vis-à-vis de la lumière visible.

Son équivalent cristallisé, la *neige*, qui possède pourtant les mêmes propriétés optiques dans le domaine visible, est une *poudre* qui réfléchit de façon *diffuse* la lumière.

Or, tout télédécteur a constaté, sur une image SPOT, que la mer est très sombre, donc de réflexion spéculaire très faible, alors que la neige est d'un blanc éclatant, donc de réflexion diffuse très élevée. Réflexions spéculaire et diffuse sont deux phénomènes séparés par une règle empirique définissant

les conditions morphologiques de la transition surface lisse (miroir spéculaire) \mapsto surface rugueuse (poudre diffusante). Cette règle, couramment appelée *critère de Rayleigh*, s'écrit comme suit :

$$d = \frac{\lambda}{8 \cos \theta} \text{ , relation dans laquelle :}$$

- d est le diamètre moyen des particules constituant le matériau, ou de ses irrégularités de surface.
- λ la longueur d'onde de lumière, et
- θ l'angle d'incidence.

A titre d'exemple, la *transition lisse/rugueux* intervient pour $d \neq 0,1 \mu\text{m}$, sous incidence sub-normale en lumière visible (SPOT), et pour $d \neq 3 \text{ cm}$ pour une onde radar en bande L (easat).

Si $d < \frac{\lambda}{8 \cos \theta}$, la surface réfléchit spéculairement,

Si $d > \frac{\lambda}{8 \cos \theta}$, la réflexion est diffuse.

II.2. Lois de la réflexion spéculaire (simplifiées)

Pour simplifier, nous restreignons le formalisme au cas d'une lumière sous incidence normale ($\cos \theta = 1$).

La *réflexion spéculaire* R_S est donnée par la *relation de Fresnel* :

$$R_S = \frac{(n - N)^2 + k^2}{(n + N)^2 + k^2}$$

relation dans laquelle n et k sont respectivement l'indice de réfraction et le coefficient d'absorption du matériau réflecteur. Le coefficient k est défini en transmission par la loi de Beer-Lambert :

$$I = I_0 \exp \left(- 4 \Pi \frac{k d}{\lambda_0} \right) \text{ , avec } \lambda_0 = \text{longueur d'onde dans le vide, } d = \text{épaisseur de}$$

matériau traversé, I et I_0 = intensités respectivement transmise et incidente. Dans la relation de Fresnel, N est l'indice de réfraction du milieu dans lequel le matériau se trouve immergé ; en télédétection terrestre, c'est de l'air : $N = 1$.

La relation de Fresnel indique que R_S *augmente avec l'indice de réfraction* - un *diamant* est plus "brillant" que du verre - et *avec le coefficient d'absorption* - un *métal poli* est plus réfléchissant qu'une lame de quartz.

La réflexion spéculaire est donc prépondérante pour les matériaux fortement absorbants, quand ils sont polis (oxydes, sulfures, métaux).

A l'inverse, R_s est très faible pour les matériaux transparents ($k \neq 0$). Appliquée au cas de l'eau ($n = 1,33$), la relation de Fresnel se simplifie :

$$R_s = \frac{(n - 1)^2}{(n + 1)^2}, \text{ ce qui entraîne } R_s^{\text{eau}} = 0,02 \text{ soit } 2 \%$$

Cette très faible valeur explique pourquoi une surface d'eau calme apparaît très sombre sur une image de télédétection. Notons enfin que la réflexion spéculaire ne suppose pas de pénétration de la lumière dans le matériau, que c'est un phénomène directionnel, pour lequel l'angle de réflexion θ_r est égal à l'angle d'incidence θ_i . Une seule direction, telle que $\theta_r = \theta_i$, permet de recevoir le faisceau réfléchi spéculairement.

II.3. Lois de la réflexion diffuse (simplifiées)

Les lois de la réflexion diffuse découlent d'un traitement empirique. Le plus connu est celui de Kubelka et Munk : il présente l'avantage d'être relativement simple.

II.3.1. Théorie de Kubelka -Munk

La réflexion diffuse, qui intervient dès lors que le diamètre moyen d des particules - ou des irrégularités - composant la surface, est supérieur à $\frac{\lambda}{8 \cos \theta}$, est une quantité dont l'expression mathématique repose sur un traitement statistique.

L'hypothèse fondamentale est la loi de Lambert, qui suppose que l'intensité I du rayonnement diffusé par une surface rugueuse d'un matériau faiblement absorbant est :

$$I = \left(\frac{I_0}{\pi} \right) \cos \theta_i \cdot \cos \theta_r$$

où I_0 et I sont les intensités respectivement incidente et réfléchie, θ_i l'angle d'incidence et θ_r l'angle de réflexion.

Cette relation a été vérifiée expérimentalement dans ses conséquences, tout au moins pour des angles θ_i et θ_r inférieurs à 30° , et pour des matériaux peu absorbants. Les surfaces répondant à ce critère sont dites lambertiennes. Cela signifie que le rayonnement rétrodiffusé est distribué symétriquement par rapport à un axe perpendiculaire à la surface, quelque soit l'angle d'incidence.

L'indicatrice de réflexion diffuse est donc une sphère, et la radiation diffusée est *non polarisée*, quel que soit l'état de polarisation du rayon incident. La réflexion diffuse est un phénomène *multi directionnel*, à l'inverse de la réflexion spéculaire.

Le traitement statistique de la réflexion diffuse R_d aboutit à la relation suivante :

$$\frac{(1 - R_d)^2}{2 R_d} = \frac{k'}{s} \text{ (relation de Kubelka-Munk) où } R_d \text{ est la réflectance diffuse,}$$

pour une longueur d'onde donnée, d'une couche épaisse de particules d'un matériau, k' un coefficient dépendant de l'absorbance de ce matériau et s un coefficient de diffusion.

On entend par couche épaisse celle qui ne laisse pas passer de lumière au travers d'elle. Cette condition est pratiquement remplie pour des épaisseurs de 1 à 2 mm de poudre de granulométrie comprise entre 10 et 40 μm , par exemple.

La grandeur $\frac{(1 - R_d)^2}{2 R_d}$ est souvent notée $f(R)$ ou $f(R_d)$, ou $f(KM)$ et est appelée *fonction de rémission ou de Kubelka-Munk*.

En prenant le logarithme de cette fonction, on obtient :

$$\log f(R_d) = \log k' - \log s$$

L'expérience a montré que, pour des particules de diamètre d supérieur à deux fois la longueur d'onde d'étude ($d > 2 \mu\text{m}$ pour le domaine visible), s était un paramètre indépendant de d , mais dépendant de la granulométrie.

Dans ces conditions, étant donné que k' dépend directement de l'absorbance du matériau, le graphe du logarithme de la fonction de Kubelka-Munk en fonction de λ correspond au spectre d'absorbance du matériau déterminé par transmission, à un déplacement d'ordonnée près ($-\log s$).

Pour des matériaux constitués de *particules très fines* ($\frac{\lambda}{8 \cos \theta} < d < 2 \lambda$),

telles que poussières, aérosols,...., le coefficient de diffusion s suit les lois de la *diffusion Rayleigh*, avec dépendance en λ^{-4} . La théorie la plus couramment utilisée est alors celle de Mie. Cette diffusion par des aérosols est très importante en télédétection, car elle conditionne les phénomènes de transmission de la lumière solaire, incidente et réfléchi, au travers de l'atmosphère. Son étude sort du cadre de cet exposé.

La *théorie de Kubelka-Munk*, qui se vérifie très bien pour des matériaux relativement peu absorbants, est de loin la plus largement utilisée, aussi bien par les chimistes que par les minéralogistes. Elle présente cependant l'inconvénient de ne pas relier clairement la réflectance diffuse aux constantes optiques du matériau : que sont k' et s , par exemple, par rapport au coefficient d'absorption k , à l'indice de réfraction n , enfin à la granulométrie (ou "rugosité") d . Pour répondre à ces questions, Simmons a proposé un autre traitement qui ne contredit pas celui de Kubelka-Munk, mais le précise.

Simmons a déterminé des équations à partir d'un modèle de matériau composé de grains de poudre de granulométrie uniforme et de morphologie sphérique. Il obtient :

(relation de Simmons)

$$R_d = \exp \left(-2n \left(\frac{k \times d}{s} \right) \frac{1}{2} \right) \quad (\text{relation de Simmons})$$

où n et k sont les deux constantes optiques (indice de réfraction et coefficient d'absorption défini selon la loi de Beer-Lambert) et d le diamètre des particules.

Combiné à la fonction de Kubelka-Munk, le formalisme de Simmons conduit à :

$$f(R_d) = \frac{(1 - R_d)^2}{2R_d} = \frac{k}{s} = 2n^2 \frac{k \times d}{3}$$

On en tire :

$$s = d^{-1} \text{ et } k' = \frac{2n^2 k}{3}$$

Des mesures de k par plusieurs méthodes directes (en transmission) et indirectes (en diffusion) ont confirmé la validité de ces relations.

En reprenant notre exemple initial du matériau H_2O , sous sa forme neige, agglomérat de cristaux réguliers, on peut déterminer la réflectance diffuse d'un champ de neige grâce à la relation de Simmons. Avec $d \approx 0,1$ cm, $k \approx 0,002$ cm^{-1} , $n = 1,33$, le calcul conduit à $R_d = 0,97$, soit 97 %. Cette valeur élevée explique la très forte luminosité des surfaces neigeuses en télédétection, de même que la relation de Fresnel expliquait la très faible réflectance - spéculaire - d'une surface d'eau, le matériau ayant pourtant pratiquement les mêmes propriétés optiques intrinsèques dans les deux cas.

11.3.2. Influence des différents paramètres sur la réflectance diffuse

11.3.2.1. Indice de réfraction et coefficient d'absorption

La relation de Simmons montre clairement que la réflectance diffuse R_d diminue quand le coefficient d'absorption et/ou l'indice de réfraction augmente. Un bon écran diffuseur est donc constitué de particules transparentes et de faible indice de réfraction.

R_d varie donc aussi à l'inverse de la réflectance spéculaire R_s , comme nous l'avons vu dans le cas de H_2O . Notons aussi que la réflexion diffuse implique une pénétration de la lumière dans le matériau ; le spectre de réflectance diffuse est donc équivalent au spectre de transmission acquis sur une lame mince du même matériau.

11.3.2.2. Coefficient de diffusion en fonction de la longueur d'onde

La formulation de la fonction de Kubelka et Munk néglige l'influence de la longueur d'onde sur le coefficient de diffusion. On peut cependant l'introduire ainsi (R.V. Morris et al., 1982) :

$$s = c. \lambda^{-D}$$

où le paramètre c est une constante et l'exposant p tel que : $0 < p < 4$. La valeur $n = 4$ correspond à la diffusion Rayleigh qui s'applique au cas où la taille des particules diffusantes est petite, (cas des aérosols), par rapport à la longueur d'onde, et la valeur $p = 0$ au cas inverse. En utilisant l'équation précédente, la formulation de la fonction $f(R)$ devient :

$$f(R) = \left(\frac{k}{c}\right) \cdot \lambda^p$$

a) *Hypothèse où la diffusion est indépendante de λ ($p = 0$). C'est le cas où la théorie de Kubelka-Munk s'applique correctement.*

La relation précédente se réduit à :

$$f(R) = \frac{k}{c}.$$

Pour des granulométries différentes (c varie à l'inverse de la taille des particules) de la même poudre (k constant), on doit observer que :

- La réflectance croît lorsque la taille d des particules décroît, corrélativement à la distance parcourue par la lumière dans les particules ;
- Il n'y a pas de relation linéaire entre la réflectance R_d et k/c ;
- La position des bandes éventuelles est identiques pour toutes les granulométries.

b) *Hypothèse où la diffusion est dépendante de λ .*

La relation de Kubelka-Munk s'écrit :

$$f(R) = \frac{(1 - R_d)^2}{2 R_d} = \frac{k}{c} \cdot \lambda^p$$

Considérons un milieu hypothétique tel que $k(\lambda) = \text{constante}$, c'est-à-dire dont le coefficient d'absorption ne dépend pas de la longueur d'onde. On a, en dérivant la relation ci-dessus (avec $R_d = R$ pour simplifier l'écriture):

$$df \frac{(R)}{dR} = - \left[\frac{(1 - R^2)}{2R^2} \right]$$

$$df \frac{(R)}{d\lambda} = \frac{k}{c} \cdot p \cdot \lambda^{p-1}$$

$$\frac{dR}{d\lambda} = - \frac{2R^2}{(1 - R^2)} \cdot \frac{k}{c} \cdot p \cdot \lambda^{p-1}$$

Dans les limites physiques permises, $\frac{dR}{d\lambda}$ est < 0 . Ainsi, pour un matériau

hypothétique présentant un coefficient d'absorption k tel $k(\lambda) = \text{csnte}$ (spectre k "plat"), le spectre de réflectance, du seul fait du coefficient de diffusion, présenterait une pente négative.

En combinant les deux hypothèses a) et b), on constate:

- Une pente *négative* des spectres de l'hypothèse b) par rapport aux spectres de l'hypothèse a).
- Un *déplacement apparent des bandes d'absorption*, et donc de réflexion, vers les grandes longueurs pour les spectres b) par rapport aux spectres a). Le calcul, montre f sur des exemples précis, que ce déplacement peut atteindre 10 à 40 nm pour des bandes à 0,9 et 1,8 μm avec l'exposant $p = 2$, ceci du seul fait de l'effet de la variation du coefficients avec la longueur d'onde.

En pratique, on admet que le coefficient de diffusion est indépendant de la longueur d'onde si le diamètre des particules est supérieur à deux fois la longueur d'onde incidente ; appliquée au domaine spectral 0.4-2.5 μm , l'approximation implique un diamètre des particules supérieur à 5 μm . Lorsque cette condition est remplie, les effets dus aux variations de granulométrie sont limités aux observations faites dans l'hypothèse f a). C'est heureusement le cas pour la plupart des rugosités de la surface terrestre observée par télédétection. Néanmoins, l'effet doit être gardé en mémoire,, en particulier pour les argiles et les sols en général.

II.3.2.3. Coefficient de diffusion en fonction de la granulométrie

La variation du coefficient de diffusion s en fonction de la granulométrie a été étudiée expérimentalement. Il est bien connu que lorsque l'on broie un minéral, la poudre obtenue s'éclaircit quand la granulométrie diminue. Simultanément, la couleur, si le minéral est coloré, s'estompe. En effet, s varie à l'inverse de d , comme l'a montré Simmons ($s = d^{-1}$).

Les spectres de deux poudres du même minéral peu absorbant mais de granulométries différentes seront décalés l'un par rapport à l'autre selon l'ordonnée, décalage correspondant à une différence de valeur de s . Simultanément, les spectres auront tendance à s'aplatir lorsque la granulométrie diminue.

II.3.2.4. Influence de l'absorption du milieu diffusant

La théorie de Kubelka-Munk n'est rigoureusement valable que lorsque l'absorbance du milieu diffusant est faible, parce qu'elle ne prend pas en compte la composante spéculaire R_s de la réflexion diffuse.

En effet, dans le domaine de longueur d'onde où l'absorption k est forte, par exemple au maximum d'une bande d'absorption, la réflectance spéculaire :

$R_s = \frac{(n-1)^2 + k^2}{(n+1)^2 + k^2}$ (relation de Fresnel) n'est plus négligeable, et la réflectance diffuse au sens strict :

$R_d = \exp[-2n(kd/3)^{1/2}]$ (Simmons) diminue.

La réflexion diffuse au sens large, résultant de la combinaison des deux phénomènes, suit donc d'autant moins la loi de Kubelka-Munk que k est élevé. La part de R_s qui s'ajoute à R_d dans les zones de plus forte absorption compense partiellement la diminution de R_d . Cela se traduit sur les spectres par une moins bonne résolution, les courbes ayant tendance à s'aplatir.

II.4. Conclusions sur les contributions spéculaire et diffuse de la réflectance des sols

Dans la pratique, *réflexion spéculaire et réflexion diffuse coexistent* dans le phénomène de rétrodiffusion de la lumière solaire par les matériaux terrestres.

Par exemple, les lamelles de mica d'un granite frais alimentent le signal plutôt en composante spéculaire, les grains de feldspath plutôt en composante diffuse.

La *granulométrie* des matériaux et les *rugosités* de surface influent, non seulement pour *modifier le signal* pour une longueur d'onde donnée, mais aussi pour *déplacer les maximums* et les minimums d'un spectre de réflectance diffuse.

En corollaire, l'attribution des événements - *maxima, minima*, épaulements, points d'inflexion - d'un spectre à un minéral ou à un élément chimique est délicate, parce que la micromorphologie de la surface contribue de façon non négligeable au positionnement de ces événements par rapport à la longueur d'onde.

Dans l'état actuel des techniques, on peut s'attendre à ne pouvoir détecter que des faits cristallographiques ou lithologiques majeurs : minéraux en grande proportion, éléments chimiques à teneurs élevées, signatures spectrales très marquées, pixels d'une très grande homogénéité minéralogique, rugosité et microrelief régulier, etc...

A côté de la micromorphologie de la surface, l'autre grand paramètre qui contrôle la réflectance des surfaces minérales est leur *composition chimique*, par l'intermédiaire de leur absorption optique.

III. VARIATION DE LA REFLECTANCE VIS-IR DES SURFACES MINÉRALES EN FONCTION DE LEUR COMPOSITION CHIMIQUE

Toutes les relations exprimant la réflectance, spéculaire ou diffuse, d'une surface font intervenir de manière prépondérante le *coefficient d'absorption* k du ou des matériaux constituant cette surface.

Or k peut varier extrêmement rapidement en fonction de la longueur d'onde d'observation. C'est donc ce paramètre qui sera le principal contrôleur des signatures spectrales grâce auxquelles les télédéTECTEURS cherchent à identifier, ou tout au moins à discriminer, les composants des surfaces observées.

Comment le coefficient d'absorption k des matériaux minéraux est-il relié à leur composition chimique et à leur structure cristalline ? Pour répondre à cette question, il est nécessaire de considérer séparément les différents domaines spectraux.

L'absorption optique peut en effet être soit d'origine électronique, traduisant une absorption d'énergie lumineuse par déplacements d'électrons, essentiellement dans le domaine ultraviolet (UV), visible (VIS) et proche infrarouge (PIR) ; soit d'origine vibrationnelle, l'énergie lumineuse étant absorbée par les vibrations de groupements moléculaires entrant en résonance avec les vibrations lumineuses. Ce deuxième type d'absorption optique intervient, pour ce qui concerne les domaines spectraux utilisés en

téledétection, pour des énergies du moyen infrarouge (MIR) et de l'infrarouge thermique (TIR).

III.1. Absorption optique d'origine électronique

Dans le domaine VIS-PIR utilisé par les satellites de téledétection, on peut grossièrement distinguer trois types d'absorption résultant du déplacement d'électrons.

III.1.1. Transitions d'électrons de la bande de valence à la bande de conduction. (absorption métallique)

Les électrons entourant certains atomes étant très peu liés au noyau, l'énergie lumineuse suffit à les faire passer de la couche électronique externe de l'atome vers un état où ils sont totalement libres, délocalisés. Les matériaux contenant ce types d'atomes sont donc de bons conducteurs électriques : ce sont les métaux, caractérisés par une très forte *absorption métallique* sur la totalité du domaine spectral considéré.

Ces matériaux sont opaques, même en lame mince, leur réflectance diffuse est très faible, leur réflectance spéculaire - s'ils sont polis, ce qui est rare dans la nature - est très élevée.

A la surface de la Terre, les métaux sont pour la plupart oxydés (oxydes) ou sulfurés (sulfures), ces produits plus complexes étant soumis, pour l'essentiel, à un deuxième type d'absorption, dite par "transfert de charges".

III.1.2. Absorption optique par transfert de charges (UV-VIS)

Les transferts d'électrons entre atomes (cation \rightarrow cation ou cation \rightarrow anion), dits *transferts de charge* (TC), nécessitent des énergies lumineuses plus élevées. Ils sont donc à l'origine de bandes d'absorption intenses centrées dans l'UV. Ils intéressent cependant la téledétection, car le flanc de plus basse énergie des bandes de TC empiète souvent sur le domaine visible, de sorte que la *réflectance diffuse*, inversement proportionnelle à l'absorption, des matériaux soumis aux TC *augmente* quand on progresse de la partie *bleue vers la partie rouge* du spectre visible.

III.1.3. Absorption optique par transitions électroniques intra-atomiques (absorption sélective : VIS-PIR)

A l'intérieur d'un atome, les électrons peuvent se trouver sur différents niveaux d'énergie, c'est-à-dire se situer sur différentes couches électroniques plus ou moins éloignées du noyau, selon des règles strictes dites règles de sélection. En l'absence de lumière, les électrons sont sur leur niveaux de base, au repos.

Sous l'influence d'une énergie lumineuse $\frac{hc}{\lambda}$, ils peuvent changer de niveau et passer, selon certaines règles, du niveau de base à un niveau excité séparé du précédent par une énergie E . Pour les longueurs d'onde pour lesquelles $E = \frac{hc}{\lambda}$, l'énergie de la lumière incidente est alors absorbée (*absorption*

sélective). Il se trouve que les atomes pour lesquels $E = \frac{hc}{\lambda}$, λ appartenant aux domaines VIS ou PIR utilisés en télédétection, sont les éléments de transition du tableau de Mendeleiev (structure électronique 3 d) et les terres rares (lanthanides, structure électronique 4 f).

Les terres rares sont en faible proportion à la surface de la Terre, et leurs bandes d'absorption sont assez étroites : elles influent donc peu sur les signatures spectrales des roches qui les contiennent. Par contre, les éléments de transition (Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu) sont beaucoup plus fréquents. Dans le domaine VIS-PIR, ils provoquent des bandes d'absorption qui se surperposent au flanc de basse énergie des grandes bandes de TC. Parmi ces métaux de transition, le fer est présent en proportion de 80 % dans la croûte terrestre. Ainsi, le fer, sous toutes ses formes et sous toutes ses valences, est le *principal signataire des données de télédétection* dans le domaine VIS-PIR. Les autres éléments de transition pourront être détectés s'ils sont en proportion anormalement élevée en surface. Quels sont les différents facteurs qui déterminent la position précise des bandes d'absorption sélective ?

III.1.4. Paramètres cristallochimiques influençant la position des bandes d'absorption VIS-PIR

Les paramètres qui déterminent la position des bandes d'absorption VIS-PIR sont ceux qui influent sur l'énergie E séparant les niveaux de base des électrons des atomes au repos et les niveaux excités par la radiation lumineuse. Ces paramètres sont :

- a) *La valence de l'ion* : par exemple Fe^{+2} confère une couleur verte à un matériau qui le contient, traduisant l'existence d'une "fenêtre" de transmission, entre deux bandes d'absorption, vers 500-600 nm. Fe^{3+} donne une couleur rouille, les bandes d'absorption entourant une fenêtre de transmission vers 600-700 nm.
- b) *La coordination du cation* : les anions qui entourent un cation de transition déterminent autour de lui un polyèdre de coordination, dont le nombre de sommets, la forme et la symétrie, ainsi que les distances entre le cation central et les anions aux sommets, vont conditionner la position des bandes d'absorption sélective.
- c) *La nature des anions* : O_2^{--} et S^{--} sont des anions, des ligands fréquents qui complexent les éléments de transition.

En résumé, tous les paramètres susceptibles de modifier le champ cristallin (voir la théorie du champ cristallin) vont influencer sur la position précise des bandes d'absorption dans le domaine VIS-PIR.

III.1.5. Paramètres externes influençant la position des bandes d'absorption

Valence, coordination, symétrie des sites cristallins, distances métal-ligands, nature des ligands sont des *facteurs cristallochimiques* intrinsèques qui sont eux-mêmes soumis aux *conditions thermodynamiques* de formation et d'existence des minéraux constituant les roches et les sols. Par exemple, la valence du fer dans un minéral sera fonction du potentiel d'oxydo-réduction du milieu de formation ou d'évolution du minéral. Autre exemple : une augmentation de température, en augmentant l'amplitude de vibration

des atomes (agitation thermique), provoque un *élargissement* des bandes d'absorption. Elle provoque aussi un accroissement des distances métal-ligand (expansion thermique), donc une diminution de l'énergie du champ cristallin, donc un *déplacement des bandes d'absorption* vers des plus grandes longueurs d'onde. L'augmentation de pression a un effet inverse, par compression des structures cristallines. Ces déplacements de bande d'absorption entraînent donc des modifications de valeur de réflectance diffuse pour une longueur d'onde donnée.

III.1.6. Variabilité des signatures spectrales

A supposer qu'un pixel de la surface terrestre soit minéralogiquement homogène, la signature spectrale VIS-PIR de ce pixel sera donc fonction de la composition chimique des minéraux dominants, y compris et surtout en ce qui concerne ses *teneurs en éléments de transition*. Il suffit, par exemple, de quelques pour cents de Fe^{3+} pour colorer en brun un calcaire normalement blanc : la signature spectrale décelée sera celle du fer trivalent, et non celle du calcaire CO_3Ca .

A la surface de la Terre, la température peut-être considérée comme stable du fait de l'atmosphère. Ce n'est pas le cas sur *d'autres planètes*, où la recherche de signatures spectrales doit tenir compte d'*écarts thermiques* importants.

Sur Terre, les roches en surface sont très altérées, la *couche d'altération*, souvent composée d'oxydes, rendant ces roches opaques aux rayons solaires. Les signatures spectrales ne sont alors pas représentatives de la roche saine.

L'action des agents météorologiques a souvent pour conséquence de *décomposer les roches*, de les transformer en sable ou en argile, puis en mélange d'oxydes et d'hydroxydes, tels les latérites. Pour ces dernières, les signatures spectrales sont celles du fer trivalent. *Pour les argiles*, les principales signatures spectrales sont liées à l'existence d' H_2O ou de radicaux hydroxyles OH^- intervenant dans la constitution de leur structure.

Pour les minéraux des argiles, l'absorption est donc très dépendante des fréquences de vibrations moléculaires.

III.2. Absorption optique d'origine moléculaire

Les énergies mises en jeu pour provoquer des vibrations de molécules sont du domaine infrarouge, dont la totalité n'est pas utilisable en télédétection du fait de l'absorption par l'atmosphère.

III.2.1. Domaine 1,3 - 2,5 μm (PIR-MIR).

Aux environs de 1,4 et de 1,9 μm , les vibrations des molécules d'eau rendent l'atmosphère opaque ; une "fenêtre", vers 1,6 μm , reste cependant "ouverte", pour laquelle les minéraux présentent peu d'événements au titre de l'absorption optique.

Par contre, entre 2,0 et 2,5 μm , les vibrations propres des groupements OH^- provoquent l'apparition de bandes d'absorption caractéristiques des

différents types d'argiles. En conséquence, le rapport des réflectances des roches dans le domaine $2,0 - 2,5 \mu\text{m}$ à celles du domaine $1,6 \mu\text{m}$ donnera une idée du *degré d'altération des roches*. Par ailleurs, une télédétection à *haute résolution spectrale* devrait permettre de différencier des types d'argiles, à condition que les pixels soient suffisamment petits (haute résolution spatiale) pour être considérés comme minéralogiquement homogènes.

III.2.2. Domaine $3,0 \rightarrow 5,0 \mu\text{m}$ (MIR)

Dans ce domaine, les vibrations moléculaires dans les matériaux rocheux sont assez uniformément actives, les réflectances des roches sont donc relativement faibles. Les événements détectables sont liés à des *émissions intenses de lumière*, telles que celles produites par des feux de forêts et par des coulées de lave en fusion.

Entre $5,0$ et $8 \mu\text{m}$, l'atmosphère absorbe totalement le rayonnement solaire.

III.2.3. Domaine $8 - 14 \mu\text{m}$ (TIR)

Dans le domaine de l'infrarouge thermique, les matériaux minéraux sont capables *d'émettre de l'énergie lumineuse* en restituant la chaleur d'origine solaire qu'ils ont emmagasinée. En particulier, les groupements SiO_4 des silicates, minéraux essentiels de la croûte terrestre, sont soumis à des vibrations d'agitation thermique. Les positions précises des bandes d'absorption qui en résultent dépendent principalement de la distance entre les tétraèdres SiO_4 . Par exemple, le maximum d'absorption se trouve à $8,5 \mu\text{m}$ pour le quartz, à $10 \mu\text{m}$ pour l'olivine $(\text{Fe}, \text{Mg})_2 \text{SiO}_4$.

D'un autre côté, l'intensité des bandes dépend de l'aptitude des roches à emmagasiner de la chaleur solaire : capacité thermique, conductibilité, et donc *propriétés physiques en volume*, densité, hygrométrie, porosité. Le domaine TIR permet donc de différencier des roches souvent d'aspect semblable dans le domaine VIS, telles que calcaires, dolomies, roches quartziques, ou encore des roches normalement très sombres, telles que les roches volcaniques ou certains granites. Ce type de télédétection TIR est moins soumise aux conditions de surface que celle pratiquée dans le domaine VIS-PIR.

Là encore la position précise des bandes d'absorption dépend de nombreux paramètres physiques et chimiques, difficiles à séparer quantitativement.

IV. CONCLUSION

En conclusion de cet exposé extrêmement rapide et succinct, on peut dire que, quel que soit le domaine spectral considéré, de nombreux paramètres minéralogiques, cristallographiques, thermodynamiques et morphologiques contrôlent l'absorption, donc la rétrodiffusion de la lumière solaire par les matériaux minéraux.

Dans la plupart des cas, les pixels observés sont, de surcroît, hétérogènes, composés de plusieurs roches, elles-mêmes constituées de nombreux minéraux, eux-mêmes plus ou moins "colorés" par des éléments de transition

comme constituants secondaires ou même en impuretés. Les signatures spectrales des roches ou des sols résultent donc de la *somme des réflexions optiques élémentaires* des minéraux qui les composent, pondérés par leurs proportions respectives à l'affleurement.

Tout l'art de la télédétection consiste donc à séparer ces différentes signatures spectrales, et à attribuer chacune d'elles à un événement cristalochimique. Encore faut-il que la surface soit représentative de la roche en masse, et peu contaminée par des poussières venant d'autres horizons, par des croûtes d'altération ou des micro-organismes masquant la roche saine.

Face à cette extrême variabilité, la radiométrie acquise par les satellites actuels paraît bien pauvre. Cette pauvreté est compensée par la possibilité de combiner plusieurs domaines spectraux, et surtout par le nombre élevé de pixels contenus dans une image, surtout si la résolution spatiale du capteur est grande : le traitement analytique des signatures spectrales peut alors être conforté par un traitement statistique.

En règle générale, l'identification directe des cibles ne paraît guère possible, à l'exception de celles de grandes étendues homogènes contenant des matériaux bien typés.

Par contre, la différenciation des terrains est réalisable avec un jeu de bandes spectrales adapté à la minéralogie des cibles à détecter, l'idéal étant d'avoir à sa disposition un système satellisé programmable en fonction des sols à discriminer.

Une simulation réalisée en laboratoire à partir de nombreuses données de terrains à haute résolution spectrale montre qu'un jeu d'une douzaine de bandes de 20 nm de large, programmables en longueur d'onde tout le domaine optique (VIS+PIR+MIR+TIR), suffit pour différencier la plupart des terrains.

Des *contrôles au sol*, en quelques points de zone bien contourées par traitement statistique, permettent ensuite d'*identifier les sols*, les roches que l'on a différenciés sur l'image.

En tout état de cause, la *résolution spatiale*, doit-être maintenue aussi *élevée* que possible, de manière à observer des pixels suffisamment homogènes et éviter, au moins pour les roches, des mélanges de signatures spectrales trop complexes pour être séparées.

BIBLIOGRAPHIE DE BASE

- BURNS R.G. (1970) - Mineralogical applications of crystal field theory, Cambridge University Press, 224 pages.
- HAPKE B. (1981) - Bidirectional reflectance spectroscopy, J. Geophysical Research, 86, Theory (1) et Experiments and Observations (2), pp. 3039-3060.
- GERVELLE B. (1989) - SPOT : des yeux braqués sur la Terre, Presses du CNRS, 220 pages, 95 francs.
- CLARK R.N. et ROUSH T.L. (1984) - Reflectance spectroscopy : quantitative analysis techniques for Remote Sensing Applications, J. Geophysical Research, 89, pp. 6329-6340.
- HUGUENIN R.L. et JONES J.L. (1986) - Intelligent information extraction from reflectance spectra : absorption bands position, J. Geophysical Research, 91, pp. 9585-9598.
- HUNT G.R. (1979) - Near infrared (1.3 - 2.4 μm) spectra of alteration minerals. Potential for use in Remote Sensing, Géophysics, 44, pp. 1974-1986.
- HUNT G.R., SALISBURY J.W., LENHOFF C.J. (1970-1976). Visible and near-infrared spectra of minerals and rocks.
 I. Silicate minerals, Modern Geology, 1970, vol. 1, p. 283-300.
 II. Carbonates, Modern Geology, 1971, vol. 2, p. 23-30.
 III. Oxides and hydroxides, Modern Geology, 1971, vol. 2, p. 195-205.
 IV. Sulphides and sulphates, Modern Geology, 1971, vol. 3, p. 1-14.
 V. Halides, phosphates, arsenates, vanadates and borates, Modern Geology, 1972, vol. 3, p. 121-132.
 VIII. Intermediate igneous rocks, Modern Geology, 1973, vol. 4, p. 237-244.
 IX. Basic and ultrabasic igneous rocks, Modern Geology, vol. 5, p. 15-22.
 XI. Sedimentary rocks, Modern Geology, 1976, vol. 5, p. 211-217.
 XII. Metamorphic rocks, Modern Geology, 1976, vol. 5, p. 219-228.
- KAHLE A.B. (1980) - Surface thermal properties in Remote Sensing in geology, John Wiley, pp. 257-274.
- MENDELL W.W. et MORRIS R.V. (1982) - Band quantification in reflectance spectroscopy, Lunar and Planetary Sciences, XIII, pp. 513-514.
- MORRIS R.V., NEELY S.C. et MENDELL W.W. (1982) - Application of Kubelka-Munk theory of diffuse reflectance to geologic problems : the role of scattering, Geophys. Res. Letters, 9, pp. 113-116.
- SIMMONS E.L. (1972) - Relation of the diffuse reflectance remission function to the fundamental optical parameters, Optica Acta, 19, pp. 845-851
- Economic Geology (1983) - Numero special télédétection en géologie, volume 218. Satellite Remote Sensing (1984) : Review and Preview, Remote Sensing Society, G.B.. Imaging Spectrometry for Land Applications (1988). ESA publication SP 1101.

BIBLIOGRAPHIE DE L'AUTEUR SUR LE SUJET

- CERVELLE B. (1971) - Contribution à l'étude des propriétés optiques des minéraux fortement absorbants. *Bull. Bur. Rech. Geol. Minières*, Section II, n° 5, 9-34.
- CERVELLE B., BAHU C. (1974) - Mesure au microscope de la réflectance, diffusée à 45° du faisceau incident, d'une poudre monominérale, en fonction de la taille des grains (entre 80 et 8 μm) et de leur absorption. *C.R. Acad. Sc. Paris*, 278, Série D, 1657-1660.
- CERVELLE B., MALEZIEUX J.M., CAYE R. (1977) - Expression quantitative de la couleur, liée au spectre de réflectance diffuse, de quelques roches et minéraux. *Bull. Soc. fr. Minéral. Cristallogr.*, 100, 185-191.
- CERVELLE B.D., LEVY C., HENRTN F.M., SHADLUN T.N. (1978) - Développements récents dans la mesure au microscope des réflectances spectrales des minéraux opaques. *Bull. Minéral.*, 101, 234-244.
- CERVELLE B.D. - The reflectance of absorbing anisotropic minerals (1979). *Geological Survey of Ireland*, Special Paper n° 3, 49-58.

- DOLLFUS A. , CERVELLE B.D. , HUA C.T. , MANDEVILLE J.C. - Reflectance spectroscopy extended to UV for Terrestrial, Lunar, and Meteoritic samples. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 44, 1293-1310, 1980.
- MAQUET M. , CERVELLE B.D. , GOUET G. (1981) - Signatures of Ni²⁺ and Fe³⁺ in the optical spectra of limonitic ore from New Caledonia, *Mineralium Deposita*, 16, 357-373, 1981.
- CERVELLE B.D. , MAQUET M. , BOTHORELA. A. (1981) - Signatures spectrales de minerais latéritiques nickelifères. *Spectral Signatures of Objects in Remote Sensing I*, 5, 117-124, 1981 (Editions INRA).
- CERVELLE B. , CHAYE -D'ALBISSIN M. , GOUET G. , VISOCEKAS R. (1982) - Absorption Spectra of Crystalline Limestone experimentally deformed and tectonized, *Tectonophysics*, 89, 379-397.
- BOTHOREL A. , CERVELLE B. , CHOROWICZ J. , TAMAIN G. , BOUCHET Ph. (1983) - Signatures spectrales et réalités terrain de zones minéralisées au Sud Maroc, *Spectral Signatures of objects in Remote Sensing II*, 23, 101-109, INRA Editeur.
- BOTHOREL A. , CERVELLE B. , CHOROWICZ J. , TAMAIN G. , ALEM E. M. (1984) - Spectral signatures (visibles near infrared) of rocks and ores ; application to Remote Sensing of three types of ores bodies from S. Morocco. *Modern Geology*, 8, 277-294.
- BOUCHET Ph. , CERVELLE B. , CHOROWICZ J. (1984) - Contribution to spectral signature research on ore bodies found in South Morocco, at three levels of investigation : satellite, ground and laboratory, *Remote Sensing for Geological Mapping*, IUGS Publications, 18, p.251-266.
- CERVELLE B. , BOUCHET Ph. , CHOROWICZ J. , TAMAIN G. , ALEM E. M. (1985). Signatures spectrales et cartographie de gisements miniers au Sud du Maroc, *Spectral Signatures of Objects in Remote Sensing III*" ESA Editions, SP 247, pp. 475-480.
- CERVELLE B. , CHOROWICZ J. , EPIARD-MOREAU L. , RUDANT J.P. , BOTHOREL A. (1985) - Evaluation de SPOT pour la cartographie de roches sédimentaires et volcaniques, *Spectral Signatures of Objects in Remote Sensing III*" ESA Editions, SP 247, pp. 419-424.
- CERVELLE B. , CHOROWICZ J. (1986). La télédétection des ressources minérales. *La Recherche*, n° 174, pp. 152-161.
- CERVELLE B. (1986) - Aspects spectrométriques de la télédétection électromagnétique (visible, infrarouge proche et thermique et hyperfréquence radar), *Méthodes Spectroscopiques appliquées aux minéraux*". Editions S.F.M.C., vol. 2, pages 617-648.
- CERVELLE B. , CHOROWICZ J. , RUDANT J.P. , TAMAIN G. , ALEM E.M. , BEKKALI E.M. (1987) - Evaluation des données SPOT-1 pour l'activité minière : exemple de la mine d'argent d'Imiter, Maroc. *"SPOT 1 : Image Utilization, Assessment, Results"*, Cepadues-Editions, CNES, pp. 743-748.
- RUDANT J. P. , CERVELLE B. , CHOROWICZ J. , LOUAHALA S. et al. (1988) - Evaluation des données VARAN en géologie et en géomorphologie sur le Sud-Est de la France. *"Spectral Signatures of Objects in Remote Sensing IV"* ESA SP 287, pp. 47-50.
- LOUAHALA S. , CERVELLE B. , CHOROWICZ J. , RUDANT J.P. , SCANVIC J.Y. (1988) - Intérêt de la radiométrie à haute résolution spatiale pour la cartographie en région méditerranéenne, *"Spectral Signatures of Objects in Remote Sensing IV"*, ESA SP 287, pp. 311-314.
- RIAZANOFF S. , CERVELLE B. , CHOROWICZ J. (1988) - Ridge and valley line extraction from digital terrain models, *Int. J. Remote Sensing*, 9, pp. 1175-1183.
- CERVELLE B. , CHOROWICZ J. , RUDANT J.P. , TAMAIN G. , ALEM E.M. (1988) - Caractérisation des roches par spectrométrie de terrain à Haute Résolution Spectrale visible et IR proche. *"Spectral Signatures of Objects in Remote Sensing IV"*, ESA SP 287, pp. 319-322.
- EMRAN A. , CHOROWICZ J. , CERVELLE B. , LYBERIS N. , TAMAIN G. , ALEM E.M. (1988) - Cartographie géologique et analyse de la fracturation du Sud de l'Anti-Atlas central (Maroc) à partir d'une image Landsat MSS, *Photo Interprétation*, 1988-2, pp. 1-10.

LES PROPRIETES SPECTRALES DES SOLS

Richard ESCADAFAL

RESUME

Les sols sont avec la végétation les principaux composants des surfaces terrestres observées par les satellites de télédétection. Ils sont même le composant principal lorsque la végétation est peu abondante pour des raisons climatiques ou culturelles.

Leurs propriétés spectrales sont mesurées de façon précise au laboratoire. Elles dépendent principalement de la teneur, en argiles, en carbonates, en matières organiques, et en eau. Tous ces composants ont également une influence nette sur la couleur observée à l'oeil nu. Celle-ci peut être reliée aux mesure de réflectance dans le domaine visible par des lois simples que nous avons mises en évidence. Par contre, la dominante minéralogique s'exprime surtout dans l'infrarouge moyen.

La réflectance d'une surface naturelle de sol, mesurée sur le terrain, dépend en plus de la configuration soleil-capteur-cible et de la rugosité de la surface. Différents modèles permettent de rendre compte de ces effets. De plus, dans le cas des régions arides de la Tunisie, nous avons montré que des surfaces hétérogènes peuvent être décomposées "états de surface élémentaires". La réflectance au niveau d'un pixel est alors une moyenne pondérée des propriétés spectrales élémentaires.

Plutôt qu'une "signature spectrale", ces différentes approches permettent de prévoir le *comportement spectral* d'un sol dans différents cas de figure. Avec les nouveaux capteurs de télédétection prévus, ces études sont amenées à se développer rapidement.

INTRODUCTION

Les images que nous utilisons dans les applications de la télédétection à la cartographie thématique (en particulier des ensembles sols-végétation) sont le plus souvent celles que fournissent les satellites à haute résolution spatiale (Landsat, Spot).

Ces images sont des ensembles de mesures du rayonnement solaire réfléchi par la surface de la Terre, ordonnées sous une forme matricielle, et couvrant un domaine spectral s'étendant de 400 à 2200 nm, soit du visible à l'infrarouge moyen.

Pour interpréter l'aspect multispectral de ces images il faut analyser l'interaction du rayonnement solaire avec les composants de la surface de la Terre. Les effets atmosphériques, qui ont fait l'objet d'études détaillées par les physiciens, ne sont pas discutés ici (voir DESCHAMPS et al., 1985).

Dans le présent ouvrage, CERVELLE (1989) rappelle les bases physiques de la réflexion de la lumière solaire par les matériaux minéraux. Par rapport à ce cas général des minéraux et des roches, celui des sols est relativement simplifié :

- les sols sont la partie la plus superficielle de la croûte terrestre. Ils sont donc plus *facilement observés par les satellites* que les roches, car ils affleurent souvent, que ce soit pour des raisons climatiques (végétation peu couvrante des régions sèches), ou culturelles (défrichements, labours);
- les sols sont formés à partir des produits, *relativement peu nombreux*, de l'altération des roches ; à noter que, plus les sols sont altérés, moins leurs constituants sont nombreux;
- les sols sont ainsi constitués de particules de minéraux argileux, de quartz, d'oxydes et hydroxydes de fer, de matières organiques, de carbonates, de feldspaths et c.. Ces particules sont assemblées en agrégats de taille très variable. Mais, dans tous les cas, les sols sont des composants "rugueux" pour la lumière solaire, selon le critère de Rayleigh - à l'exception peut-être des sols engorgés (voir CERVELLE, 1989).

Pour le pédologue, il est indispensable de connaître les propriétés spectrales des sols pour tirer des informations de nature pédologique des images spatiales. Mais le télédécteur devra aussi connaître ces mêmes propriétés pour pouvoir modéliser le comportement spectral des cibles, en particulier des ensembles sols-végétation, très largement dominants à la surface du Globe.

Les propriétés spectrales des sols sont plus particulièrement abordées dans deux traités de télédétection (MULDERS, 1988; GUYOT, 1989). Dans cet article, nous proposons une revue des connaissances sur ce sujet, sous la forme d'un condensé d'un chapitre d'un ouvrage récent (ESCADAFAL, 1989).

I. LA REFLECTANCE SPECTRALE MESUREE AU LABORATOIRE

I.1. Méthodologie

La *réflectance spectrale* est le rapport de l'énergie réfléchie par rapport à l'énergie incidente en fonction de la longueur d'onde. Sa mesure précise se fait au laboratoire avec un spectrophotomètre sur de petits échantillons, de l'ordre de 1 cm. Ce rapport peut varier en fonction des angles d'illumination et de visée. Pour s'affranchir de ces variations, on mesure la réflectance *hémisphérique* en employant une sphère intégratrice (fig.1).

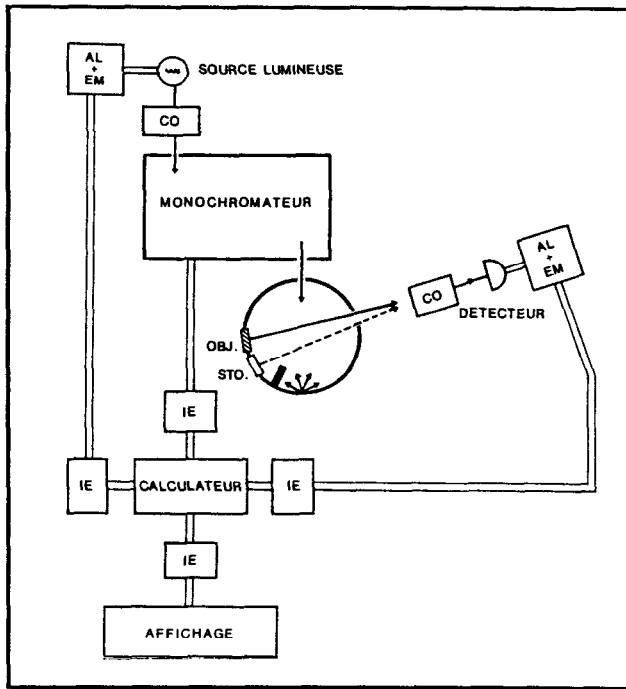


Figure 1. Schéma des principaux composants d'un spectrophotomètre équipé pour la mesure de la réflectance spectrale diffuse.

Cette technique, utilisée sur des matériaux très variés, a été appliquée aux sols par SHIELDS et al. (1966), CONDIT (1970) et plus récemment COURAULT (1986). Avec un tel appareillage, les échantillons de sols doivent être placés verticalement, il faut donc soit les coller sur un support, soit les mettre dans des boîtes. Cette dernière solution est préférable, elle permet d'éviter de souiller l'intérieur de la sphère et de faire la mesure sur une épaisseur suffisante.

En utilisant comme couvercle de la boîte une mince lame de fluorine, très transparente à toutes les longueurs d'onde utilisées, les mesures ne sont pratiquement pas altérées. Remarquons enfin que ce système permet également de traiter des échantillons humides si nécessaire. L'ensemble des précautions opératoires ont été revues et détaillées récemment par FERNANDEZ et SCHULZE (1987).

Dans le cas des courbes de sols que nous allons analyser, les échantillons ont été séchés à l'air, puis tamisés à 2 mm et placés dans des boîtes pour déterminer les propriétés spectrales de la terre fine.

1.2. Les courbes obtenues

La fig.2 présente un exemple de courbes de réflectance spectrale obtenues au laboratoire pour 4 échantillons de surface très différents prélevés dans le sud de la Tunisie. Le tableau 1 précise les caractéristiques de ces échantillons.

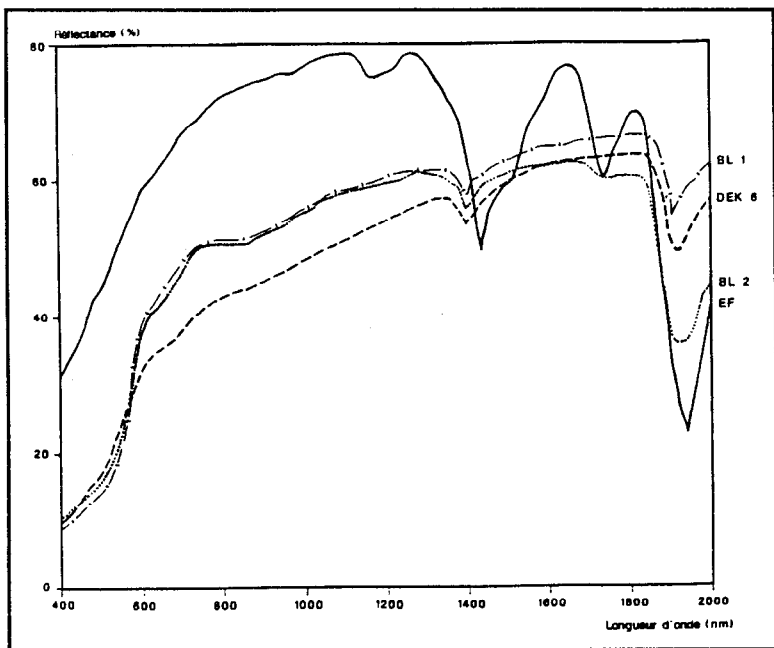


Figure 2 Exemple de courbes de réflectance diffuse obtenues au laboratoire pour 4 échantillons de sols du Sud Tunisien.

Réf.	couleur Munsell	granulométrie			CaCO ₃	Fer total	matière organ.
		A	L	S			
BL1	5 YR 6/8	2	6	92	1,5	0,3	0
BL2	5 YR 5,5/8	5	14	81	2,9	0,8	0
DEK6	10 YR 6/4	10	18	73	7,8	1,1	0,35
E.F.	10 YR 8/2	(gypse : 73)			3,0	0	0,35

A: argile, L: limons, S: sables (%)

Nature des échantillons:

BL1: sable fin quartzueux éolien (ESESf)*,

BL2: sol nu sablo-limoneux à nodules calcaires (EESsn)*,

DEK6: sol nu limono-sableux sur marnes (EESsn)*,

E.F.: croûte gypseuse affleurante (ESEgy)*,

Tableau 1 Caractéristiques de 4 échantillons de surface de sols de la région de Tataouine soumis aux mesures spectrophotométriques

Ces courbes montrent que les caractéristiques spectrales les plus spectaculaires sont concentrées dans le domaine spectral infrarouge.

Pour tester le degré de généralité de cette observation, nous avons réalisé une analyse détaillée d'un ensemble de 84 courbes de réflectance d'échantillons de sols prélevés sous différents climats, mesurées au cours de plusieurs études menées à l'INA-PG sous la direction de M.C. GIRARD (COMBE, 1984 ; TRAUBE, 1985 ; COURAULT, 1986).

L'analyse statistique de ces courbes a montré que leur allure se différencie nettement dans les deux domaines spectraux, visible et infrarouge (COURAULT et al., 1988).

Dans le **domaine visible**, les courbes sont toujours monotones croissantes. Trois grands types se distinguent (fig.3a):

- a) réflectance basse, courbe faiblement concave,
- b) réflectance élevée, courbe plus ou moins convexe,
- c) réflectance faible à assez élevée, courbe concave, puis convexe.

Cette division en trois grands types est corroborée par les travaux de CONDIT (1970), qui a obtenu des résultats similaires sur une série de 285 échantillons de sols des U.S.A. Par ailleurs, l'allure générale des courbes est très semblable à celles décrites par d'autres auteurs même lorsqu'ils ont utilisé des appareillages sensiblement différents (STONER et al., 1980).

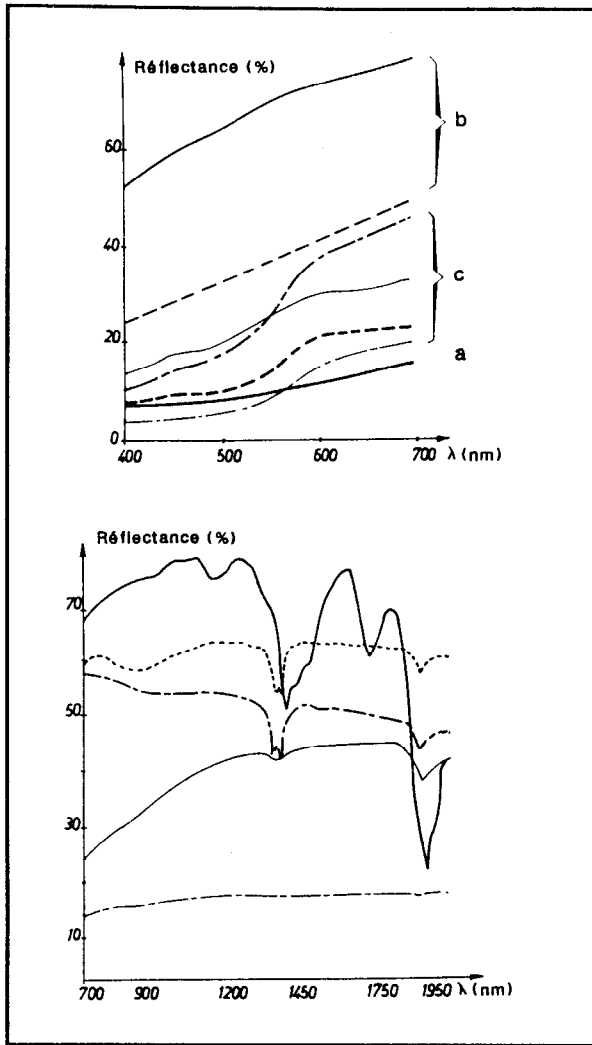


Figure 3. Principaux types de courbes de réflectance spectrale observées sur la série des 84 échantillons de sols étudiées.

Nous verrons plus loin que *l'aspect globalement monotone croissant* est une caractéristique qui a des conséquences importantes du point de vue des relations avec la *couleur*.

Dans le **domaine infrarouge**, les courbes observées sont plus complexes (fig.3b).

Plusieurs bandes d'absorption apparaissent particulièrement autour des 900, 1450, 1750 et 1950 nm.

Contrairement au domaine visible et proche infra-rouge, les propriétés des sols dans l'infrarouge moyen ont été très peu étudiées. Ceci est lié au fait que les développements technologiques dans ce domaine sont récents (instruments de laboratoire, de terrain ou embarqués sur satellites).

Cinq grands types de courbes ont été reconnus dans notre série d'échantillons, ils correspondent à des groupes d'échantillons qui se distinguent essentiellement par leur composition minéralogique.

Ceci nous amène à aborder les relations entre réflectance spectrale et composition des sols.

1.3. Relations avec les constituants

Les matériaux pédologiques peuvent être considérés comme des assemblages de particules minérales, plus ou moins liées entre elles (souvent par des matières organiques), les vides étant occupés par de l'air et de l'eau.

La connaissance des spectres de réflectance des différents constituants est l'étape préliminaire à l'interprétation des spectres de sols.

1.3.1. Propriétés spectrales des constituants des sols

L'interaction de la matière avec les radiations électromagnétiques fait intervenir de nombreux phénomènes ; pour ce qui concerne l'interaction avec les constituants minéraux des sols, les plus importants sont rappelés par HUNT (1980), KAHLE (1984), MULDER (1987) et CERVELLE (1989).

Nous en retiendrons que les propriétés spectrales de ces matériaux sont dues essentiellement à deux types de phénomènes physiques :

- des *transitions électroniques* qui nécessitent des énergies importantes et interviennent, sous forme de pics assez larges, dans l'ultraviolet (UV) et le visible,
- des *phénomènes vibratoires* concernant des bandes plus étroites au delà de 2500 nm, mais dont on peut observer des harmoniques à partir de 1300 nm.

Les spectres de différents minéraux purs à l'état particulaire, et en particulier ceux trouvés en abondance dans les sols, sont disponibles dans la littérature, principalement grâce à la série de publications de HUNT et al. (voir CERVELLE, dans ce même ouvrage).

Les éléments les plus courants dans les minéraux et les sols, à savoir le silicium, l'oxygène et l'aluminium ne présentent pas de niveaux énergétiques susceptibles de produire des caractéristiques remarquables dans les spectres visibles et infrarouge.

A l'exception de la silice pure, les minéraux formés à partir de ces éléments présentent pourtant des spectres particuliers. La structure cristalline surimpose ses effets, déplaçant les niveaux de transitions électroniques des ions individuels. Cet effet est très net dans le cas des minéraux contenant du fer et du manganèse.

De fait, les bandes d'absorption observées dans le domaine visible et proche infrarouge des spectres des roches et des sols sont dues principalement à la présence de fer, d'eau, de groupements hydroxyles ou de carbonates.

L'effet des **ions ferriques** se manifeste dans l'ultra-violet et le bleu (transitions électroniques), puis autour de 1000 nm (effet du champ cristallin). C'est particulièrement net dans le cas de la goéthite et de l'hématite, minéraux très souvent présents dans les sols (fig.4).

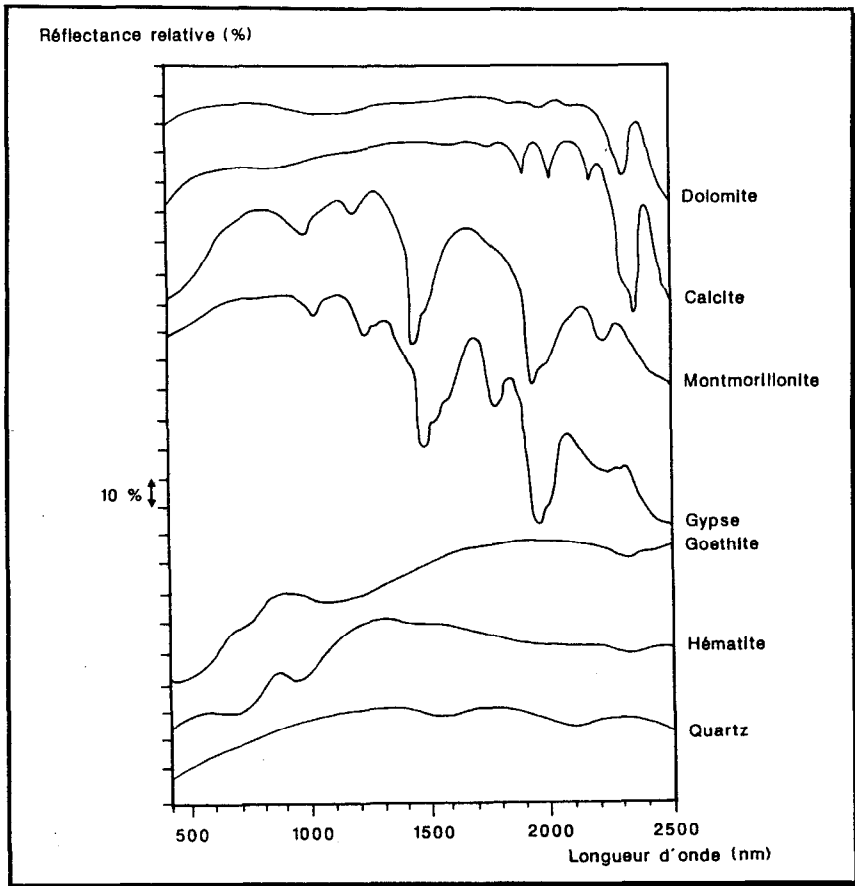


Figure 4. Courbes de réflectance de quelques minéraux fréquents dans les sols.

Les **groupements hydroxyles (-OH)** ont une bande d'absorption fondamentale à 2770 nm, mais plusieurs harmoniques se manifestent à des longueurs d'onde plus courtes. Dans le cas de l'eau, les bandes harmoniques étroites observées à 1400 et 1900 nm pour l'eau libre, se décalent et s'étalent dans le cas de l'eau adsorbée sur les minéraux argileux, ou de l'eau constitution du gypse (fig.4). Les bandes d'absorption caractéristiques des *carbonates* apparaissent principalement au delà de 2000 nm, comme l'illustre bien les cas de la calcite et de la dolomie (fig.4).

En ce qui concerne les composés organiques des sols, ce sont généralement des mélanges complexes de glucides, peptides, lipides, cires, résines, acides fulviques, acides humiques et humines. Ces mélanges complexes sont globalement absorbants dans le visible, d'où leur couleur foncée (FLAIG et al., 1975).

1.3.2. Interprétation des spectres de sols

Différents auteurs ont obtenus des indications **qualitatives** par simple comparaison des courbes de réflectance de sols avec celles des composants purs que nous venons de voir (BAUER et al., 1980 ; STONER et BAUMGARDNER, 1981 ; BAUMGARDNER et al., 1985).

Ainsi, une nette bande d'absorption dans le bleu, est une forte présomption de présence d'*oxydes de fer*, alors qu'une réflectance basse à toutes les longueurs d'onde indique la présence de *matières organiques*.

L'augmentation de la *teneur en eau* se traduit par une diminution générale de la réflectance à toutes les longueurs d'onde, et l'apparition des bandes d'absorption caractéristiques à 1400 et 1900 nm, comme l'illustre la fig.5 dans le cas d'un sol limoneux (BOWERS et HANK, 1965).

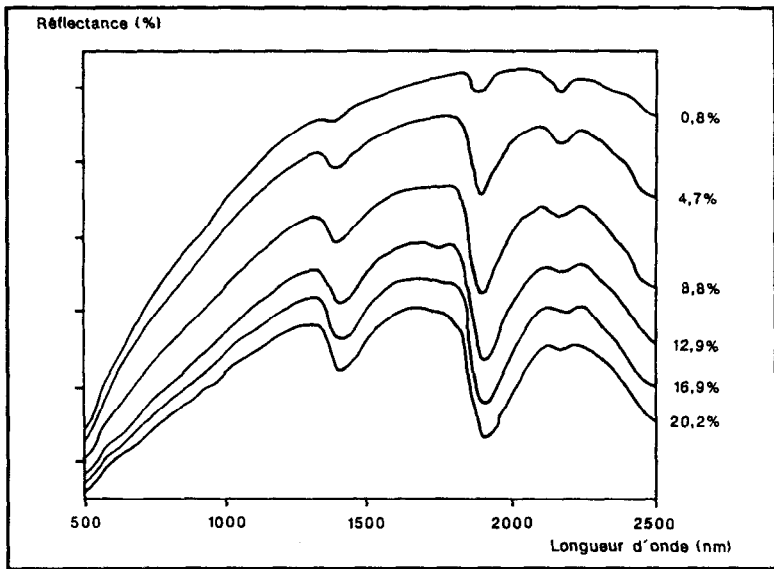


Figure 5. Influence de la teneur en eau sur la réflectance d'un sol limoneux.

L'influence de l'humidité sur la réflectance a été souvent étudiée au laboratoire, notamment sur des constituants isolés (kaolinite, par exemple, PROST et al., 1983). En dehors de résultats partiels obtenus au laboratoire, la relation entre teneur en eau et pourcentage d'absorption n'est pas linéaire et varie beaucoup avec le type de sol. Cependant PETERSEN et al. (1979) et CIERNIEWSKI (1985) ont montré que les teneurs en eau sont plus facilement comparées à la réflectance si elles sont exprimées en potentiel (pF).

D'une façon générale, la mise en évidence de **relations quantitatives** entre réflectance et composition n'est pas simple.

En effet, les sols sont des mélanges complexes de particules de nature, de taille, de formes et d'arrangements très variés, alors que les courbes de composants purs ont été déterminées séparément sur des poudres calibrées.

1.3.2. Interprétation des spectres de sols

Différents auteurs ont obtenus des indications **qualitatives** par simple comparaison des courbes de réflectance de sols avec celles des composants purs que nous venons de voir (BAUER et al., 1980 ; STONER et BAUMGARDNER, 1981 ; BAUMGARDNER et al., 1985).

Ainsi, une nette bande d'absorption dans le bleu, est une forte présomption de présence *d'oxydes de fer*, alors qu'une réflectance basse à toutes les longueurs d'onde indique la présence de *matières organiques*.

L'augmentation de la *teneur en eau* se traduit par une diminution générale de la réflectance à toutes les longueurs d'onde, et l'apparition des bandes d'absorption caractéristiques à 1400 et 1900 nm, comme l'illustre la fig.5 dans le cas d'un sol limoneux (BOWERS et HANK, 1965).

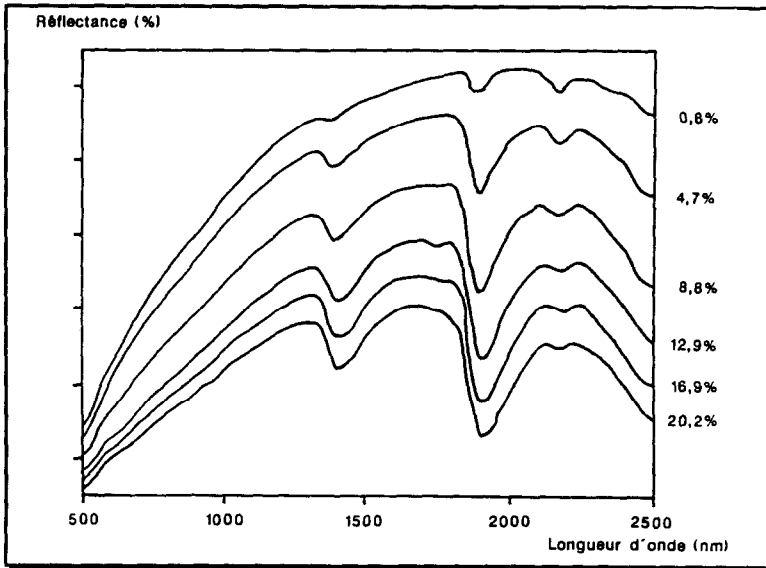


Figure 5. Influence de la teneur en eau sur la réflectance d'un sol limoneux.

L'influence de l'humidité sur la réflectance a été souvent étudiée au laboratoire, notamment sur des constituants isolés (kaolinite, par exemple, PROST et al., 1983). En dehors de résultats partiels obtenus au laboratoire, la relation entre teneur en eau et pourcentage d'absorption n'est pas linéaire et varie beaucoup avec le type de sol. Cependant PETERSEN et al. (1979) et CIERNIEWSKI (1985) ont montré que les teneurs en eau sont plus facilement comparées à la réflectance si elles sont exprimées en potentiel (pF).

D'une façon générale, la mise en évidence de **relations quantitatives** entre réflectance et composition n'est pas simple.

En effet, les sols sont des mélanges complexes de particules de nature, de taille, de formes et d'arrangements très variés, alors que les courbes de composants purs ont été déterminées séparément sur des poudres calibrées.

Ainsi, dans la majorité des travaux sur ce thème les auteurs ont recherché des *corrélations empiriques* entre teneur d'un constituant et propriétés spectrales de certains types de sols (DA COSTA, 1979).

Nous verrons dans le paragraphe consacré à la couleur que les recherches sur les relations quantitatives entre cette variable et les teneurs en différents constituants ont été les plus poussées.

1.3.3. Le cas des sols étudiés

Aux différents types de courbes observées pour la série des 84 échantillons étudiés correspondent globalement des ensembles de sols qui se distinguent bien par leur composition (fig.3).

Ainsi, dans le domaine visible,

- le type 1 correspond aux sols fortement organiques (teneur supérieure à 8 %),
- le type 2 caractérise les sols riches en calcium (carbonates, sulfates) mais pauvres en matière organique et en fer
- le type 3, concavo-convexe est typique des échantillons à oxydes de fer ; on reconnaît dans cette forme de la courbe l'influence de l'hématite.

Dans le domaine infrarouge, on reconnaît surtout l'influence des minéraux hydratés (le gypse, avec une forte bande d'absorption) et des carbonates (absorption plus faible).

Quant aux échantillons de surface des sols de Tunisie (voir les 4 courbes données en exemple fig.2), ils sont très pauvres en matières organiques.

Les courbes visibles sont donc du type 2 pour les surfaces très calcaires ou gypseuses, et du type 3 pour les autres. Dans ce cas, la pente de la courbe croît avec les teneurs en oxydes de fer, ce qui se traduit au niveau de la couleur.

Sur ce schéma on remarque que visible et proche infrarouge sont complémentaires. Ainsi, les échantillons BL1 et BL2 qui ont des courbes pratiquement identiques dans le visible, se distinguent très bien au delà de 1600 nm.

Inversement, BL1 et DEK6 sont voisins dans l'infrarouge, mais nettement différents dans le visible, ce qui se manifeste par une couleur différente (voir tab.1). Ce dernier aspect introduit le paragraphe suivant.

1.4. Etude des relations entre couleur et réflectance

1.4.1. Importance de la couleur

1.4.1.1. Couleur, description et classification des sols

D'une façon générale, la couleur est une donnée de sol très utilisée et depuis longtemps. Par exemple, de nombreux noms vernaculaires (ou scientifiques qui en sont dérivés) sont en lien avec la couleur.

De fait, la couleur a été retenue comme critère de classement dans de très nombreux systèmes de classification des sols (SEGALEN, 1977) et elle est un élément très important de description et de discrimination des sols sur le terrain.

Plusieurs auteurs se sont intéressés aux problèmes méthodologiques liés à l'appréciation et à la mesure de la couleur des sols, et leur conséquences sur le rôle de ce critère dans les classifications (SHIELDS et al., 1966 ; KARMANOV, 1970 ; MELVILLE et ATKINSON, 1985).

1.4.1.2. Couleur et composition des sols

Globalement, les effets des principaux constituants sur la couleur des sols ont été résumé par TAILOR (1982). Des divers travaux publiés sur le sujet on peut retenir les points suivants :

- la présence de matières organiques en quantité notable (plus de 2 %) se traduit par une couleur foncée (clarté Munsell faible), correspondant à une faible réflectance dans toutes les longueurs d'onde (SHIELDS et al., 1968 ; LEGER et al., 1979 ; KRISHNAN et al., 1980).
- des taches de couleur noirâtres (oxydes de manganèse), verdâtres ou bleuâtres (carbonates et sulfates d'hydroxydes ferreux) sont rencontrées dans certains sols, mais rarement à leur surface,
- les carbonates et aluminosilicates ont une couleur claire, liée à une réflectance élevée dans le domaine visible, qui varie sensiblement avec la taille des particules (LEU, 1977). Cette couleur est souvent masquée par celle des autres composés,
- les différentes formes d'*oxydes de fer* (voir SCHWERTMANN et TAYLOR, 1977) sont responsables de la couleur des sols *jaunes, orangés et rouges*.

L'influence de la texture sur la couleur et la réflectance a été étudiée sur des mélanges de proportions variées de sable et d'argile. GERBERMANN et NEHER (1979) ont montré que plus l'échantillon est sableux, plus la couleur est claire.

C'est la recherche de relations entre certaines **couleurs** et la présence des **différentes formes d'oxydes de fer** qui a très nettement suscité le plus grand nombre de travaux. En effet, la mise en évidence de telle relations serait une possibilité très intéressante de diagnostic de terrain.

Dans le domaine ferrallitique, SEGALEN (1969) a montré que la couleur jaune est due à la présence de goethite seule. Par contre, dans les sols rouges il y a toujours une petite quantité de produits ferrugineux amorphes, en plus des produits cristallisés colorés (goethite, hématite, magnétite). Depuis ces premiers travaux ont été confirmés KARMANOVA (1981), qui précise que ce sont les produits amorphes qui ont le pouvoir colorant le plus élevé; ROBERT et al. en ont apporté la preuve expérimentale en 1983.

Pour ce qui est de l'**aspect quantitatif**, KARMANOVA signale dans son article de 1981 une relation entre la pureté de la couleur Munsell et la teneur en oxydes de fer observée dans les sols de texture fine à moyenne.

TORRENT et al. (1980, 1983) ont cherché à préciser ce type de relations, en proposant divers *indices de rougeur* (redness rating) formulés empiriquement sur la base des données Munsell. Des corrélations significatives ont été mis en évidence entre ces indices et la teneur en hématite de différents échantillons de sols du Brésil et d'Europe (fig.6).

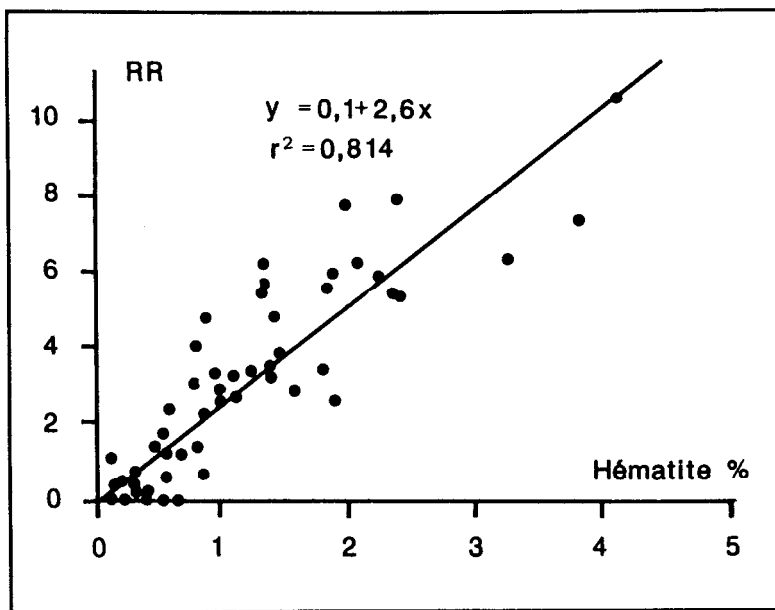


Figure 6. Corrélation entre l'indice RR et la teneur en hématite d'une série d'échantillons de sols d'Europe.

Plus récemment, BARRON et TORRENT (1986) ont élaboré un modèle de l'effet colorant de l'hématite en appliquant la théorie de mélange des pigments de KUBELKA-MUNK (1931) à des données spectrophotométriques d'une série de 98 échantillons de sols. Ainsi, grâce à une approche colorimétrique, on s'oriente actuellement vers une meilleure compréhension des relations entre couleurs et composition des sols.

1.4.1.3. Couleur et télédétection des sols

L'augmentation du taux de matière organique ou d'humidité provoque une diminution de la réflectance dans l'ensemble des canaux visibles. Dans les deux cas cela se traduit par un assombrissement de la couleur. Inversement, celle-ci augmente lorsque la teneur en calcaire croît (GIRARD, 1977).

Divers travaux concernent les relations entre couleur Munsell et réflectance des sols dans les bandes spectrales des satellites, particulièrement MSS4 (500 à 600 nm) et MSS5 (600 à 700 nm).

DA COSTA (1979) dans une étude statistique systématique d'une série de données de 563 échantillons de sol a observé une corrélation multiple significative entre la *pureté* et la réflectance dans la bandes MSS4 (avec un terme négatif) et MSS5 (avec un terme positif).

Par contre, dans une étude des paramètres physiques détectables par Landsat MSS, SALMON-DREXLER (1977) souligne l'intérêt des rapports de canaux MSS4/MSS5 pour distinguer les sols d'après leur *teinte*, alors que la somme des deux est liée à la *clarté*.

HORWATH et al.(1983) quant à eux limitent le rôle de la couleur à un *indice de brillance mesuré* sur les planches Munsell et observent que cet indice est une des variables importantes expliquant les données radiométriques Landsat enregistrées sur les parcours de l'Arizona.

Dans le Sud Tunisien, autre région aride, les données des canaux MSS4 et 5 ont permis de distinguer différents types de surfaces de sol d'après leur rugosité liée à la *brillance* de l'image (MSS4+5) et d'après la pureté de leur couleur, corrélée avec le rapport MSS5/4 (ESCADAFAL, 1984 ; ESCADAFAL et POUGET, 1986).

Face à ces résultats peu concordants, nous avons cherché à préciser la *nature physique des relations entre la réflectance spectrale et la couleur des sols*, mesurée au laboratoire ou appréciée sur le terrain. La couleur étant une sensation **visuelle**, par définition, cette partie ne concerne donc que le domaine **visible** du spectre (380-770 nm).

1.4.2. Apport de la colorimétrie

La perception des couleurs est un phénomène psycho-physique dépendant du contexte et des individus. L'objet de la *colorimétrie* est d'établir les relations entre les sensations visuelles et les caractéristiques physiques des objets et de la lumière qui les éclaire, en spécifiant les conventions et conditions d'application.

Plusieurs traités y sont consacrés (KOWALISKI, 1978; WYSZECKI et STILES, 1982). Nous avons utilisé les lois de la colorimétrie pour calculer la couleur à partir de la courbe de réflectance spectrale, dans le cas de notre série de 84 échantillons de sol .

Suivant ces lois, un objet de propriétés spectrales données, éclairé par une lumière de composition donnée, apparaît à un observateur moyen **sous une couleur précise et une seule**, que l'on peut déterminer par calcul. Ceci est bien entendu applicable aux sols.

Cependant, à cause du **métamérisme**, cette relation entre réflectance et couleur n'est pas bijective : **il n'est pas possible, en général, de prévoir la courbe de réflectance d'un objet d'après sa couleur.**

Le métamérisme est le phénomène par lequel des objets de *propriétés spectrales différentes* peuvent produire la *même sensation colorée*. Cette caractéristique de la vision humaine est très exploitée pour la reproduction des couleurs, notamment dans les techniques d'impression, photographiques, ou de télévision. Elle a fait l'objet de nombreuses études et simulations complexes.

En ce qui concerne notre objet, l'un des résultats les plus importants de ces calculs est le fait que *les courbes de réflectance d'objets dont les couleurs sont métamères doivent nécessairement s'entrecroiser*, de 3 à 5 fois au minimum (OHTA et WYSZECKI, 1977). Or, *les courbes de réflectance des sols sont monotones croissantes* dans le visible (voir plus haut). Ainsi, il est très peu probable que des courbes spectrales de sols de même couleur s'entrecroisent, et donc que le métamérisme soit fréquent dans le cas des sols. De fait, par une modélisation basée sur une régression multiple nous avons montré qu'il est *possible de reconstruire la courbe de réflectance spectrale à partir de la couleur* (ESCADAFAL et al., 1988a).

1.4.3. Estimation de la couleur sur le terrain

Nous venons de voir que la détermination précise de la couleur des sols requiert des mesures spectrophotométriques en laboratoire. Mais les pédologues estiment le plus souvent la couleur des sols sur le terrain par

comparaison visuelle avec les planches de l'atlas Munsell des couleurs de sols (PENDLETON et NICKERSON, 1951 ; JAMAGNE, 1967).

Dans le système Munsell les couleurs sont hiérarchisées en distinguant d'abord la teinte (hue, en anglais), puis la clarté (value), et enfin la pureté (chroma), qui exprime la saturation de la couleur. A chaque planche correspond une teinte, elle présente des échantillons de clarté croissante en ordonnée et de pureté croissante en abscisse. Dans ce système *une couleur donnée est caractérisée par des coordonnées de type cylindrique* (voir fig.7).

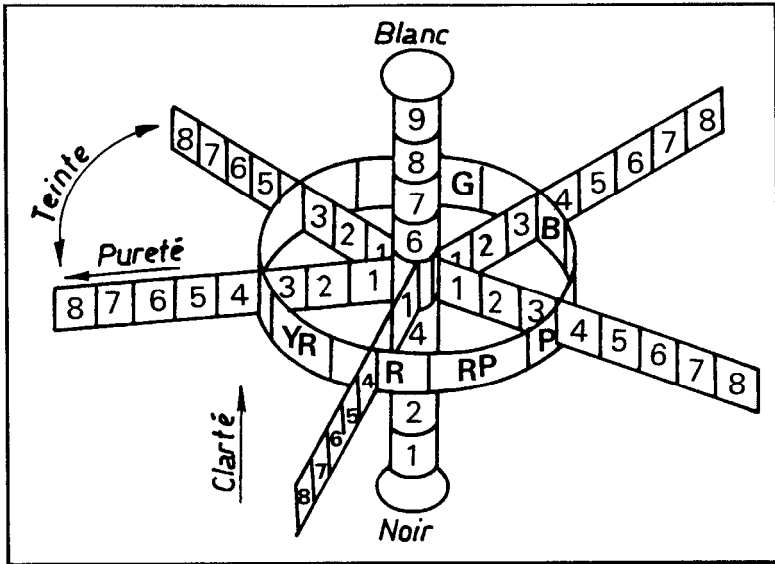


Figure 7. L'espace des données Munsell et ses coordonnées cylindriques.

La couleur de l'échantillon de sol est déterminée comparée à la lumière du jour, avec les étalons colorés des planches. La précision de cette méthode de détermination des couleurs dépend beaucoup du soin que l'on y apporte, comme l'ont rappelé récemment MELVILLE et ATKINSON (1985). En utilisant des tables de conversion nous avons montré qu'il y a une bonne corrélation entre les couleurs calculées d'après les données de laboratoire et ces couleurs estimées sur le terrain (ESCADAFAL et al., 1988b).

1.4.4. Couleur Munsell et réflectance

A partir de notre étude colorimétrique nous avons recherché une relation simple entre couleur et réflectance. En utilisant les spectres de nos échantillons de sol, nous avons simulé les valeurs de réflectance dans les différentes bandes des capteurs MSS et TM des satellites Landsat.

Nous les avons comparées avec les couleurs Munsell, exprimées en composantes rouge, verte et bleue (R, G, B, du système colorimétrique international C.I.E., voir WYSZECKI et STILES, 1982).

Nous avons mis en évidence *une corrélation très forte entre ces coefficients R,G,B et les bandes spectrales Landsat correspondant respectivement aux gammes des longueurs d'ondes rouges, vertes et bleues, soit les canaux 3, 2 et 1 dans le cas du Thematic Mapper* (ESCADAFAL et al., 1989).

Comparativement les corrélations entre coordonnées Munsell et réflectance sont médiocres (à l'exception de la clarté, liée au niveau moyen de réflectance). Ceci explique les difficultés rencontrées jusqu'à présent pour interpréter la couleur Munsell.

1.5. Discussion

On peut constater que les propriétés spectrales des sols mesurées au laboratoire sont en relation plus ou moins étroites avec les données que le pédologue a l'habitude de prendre en compte, en particulier sur le terrain.

Ainsi la dominante minéralogique du sol a une nette influence sur la couleur et sur le comportement spectral dans le moyen infra-rouge. La présence de matières organiques et/ou d'eau libre ont pour effet commun de diminuer la réflectance dans toutes les longueurs d'onde. Nous avons montré que la couleur elle-même, classiquement observée et estimée sur le terrain, est en fait une grandeur étroitement liée par des lois physiques aux propriétés spectrales des sols dans le domaine visible.

Pendant, les relations quantitatives entre données de réflectance spectrale et composition des sols n'ont pu être établies jusqu'à présent que dans des cas assez particuliers.

II. LES PROPRIETES SPECTRALES DES SOLS SUR LE TERRAIN

Nous ne nous sommes intéressés pour le moment qu'à la réflectance hémisphérique des sols, mesurée au laboratoire sur de petits échantillons. On peut considérer que c'est une caractérisation des *propriétés spectrales intrinsèques* des matériaux pédologiques. La réflectance des sols sur le terrain dépend en plus des aspects géométriques de la surface et des conditions de visée.

II.1. La réflectance bidirectionnelle des sols

II.1.1. Définition

Les mesures de réflectance faites sur le terrain sont faites sous des conditions d'illumination naturelles, qui varient avec la position du soleil et la composition de l'atmosphère. L'orientation du capteur est également variable. La mesure de la réflectance est donc caractérisée par deux directions, celle de la visée et celle de l'éclairement, c'est la *réflectance bidirectionnelle* (fig.8).

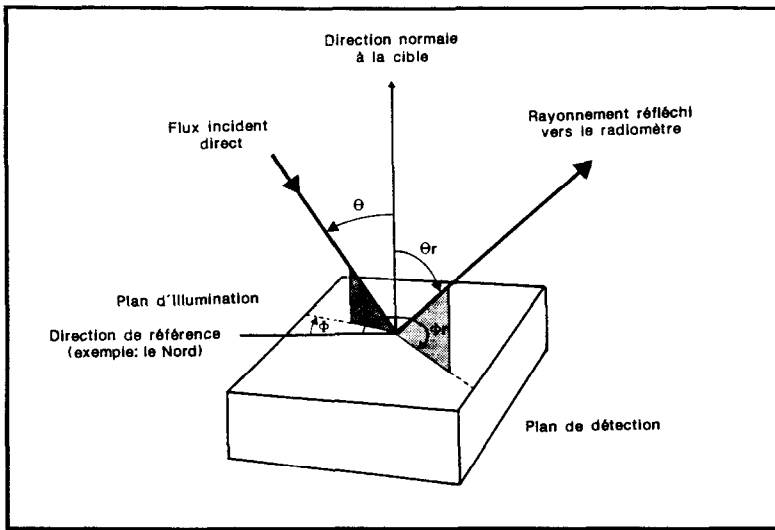


Figure 8. Les conditions géométriques de la mesure de la réflectance bidirectionnelle.

II.1.2. Technique

L'instrument de mesure de réflectance sur le terrain le plus répandu jusqu'à présent est le **radiomètre**. Ce terme regroupe les appareils mesurant le rayonnement réfléchi par la cible étudiée, dans des bandes spectrales sélectionnées.

La réflectance est obtenue par comparaison avec la mesure faite sur un cible de référence, généralement constituée d'un panneau recouvert de sulfate de baryum. Ce type de panneau est réputé avoir une réflectance très proche de 100 % et être à peu près "lambertien" (voir ci-dessous). Il doit être maintenu parfaitement propre (couvert entre les utilisations) et peut être étalonné par rapport à des références standard de l'industrie (poudre de halon compactée, JACKSON et al., 1987).

Certains appareils tels le CIMEL mesurent simultanément le rayonnement incident par un capteur situé sur le haut du boîtier et produisent une mesure directe de la réflectance (GUYOT et al., 1984).

La mesure de la réflectance sur le terrain s'est répandue grâce à ces appareils maniables et de coût modéré, en particulier pour l'étude des propriétés spectrales des sols (CELIS-CEUSTERS, 1980 ; KING, 1985 ; GIRARD, 1985 ; COURAULT, 1986 ; MOUGENOT et ZANTE, 1986).

Cette mesure n'est cependant pas triviale et pour obtenir des données fiables il faut s'entourer de nombreuses précautions, basées en particulier sur la prise en compte des aspects géométriques (JACKSON et al., 1980).

Les **spectroradiomètres** permettent un enregistrement pratiquement continu du rayonnement réfléchi, du visible au proche infrarouge. Mais cela prend du temps, et ces appareils sont plus chers et plus encombrants que les radiomètres. (MILTON, 1987).

Leur utilisation sur les sols qui remonte aux années 1970 (CIPRA et al., 1971 ; LONGSHAW, 1974 ; GAUSMAN et al. 1977), se développe néanmoins (KAHLE, 1984). L'emploi de détecteurs en barrettes devrait permettre une plus grande diffusion de cette technique (VERMANDE, 1987).

II.1.3. Résultats

En visée verticale et avec des conditions d'éclairement idéales (par ciel clair et à mi-journée) les mesures faites sur le terrain sont semblables à celles obtenues en laboratoire (STONER et al.; 1980b).

De fait, les études sur les relations entre données de radiométriques de terrain et composition des sols nus a donné des résultats concordants avec ceux obtenus à partir de mesures de laboratoire (SALMON-DREXLER, 1977 ; SCHREIER, 1977 ; COMBE, 1984 ; KING et LEFEBVRE D'HELLENCOURT, 1982).

Il semble donc que la réflectance bidirectionnelle puisse être assimilée à la réflectance hémisphérique. Mais ceci n'est vrai que dans le cas de surfaces régulières et réfléchissant le rayonnement incident de façon égale dans toutes les directions (surfaces idéalement rugueuses ou "lambertiennes").

En fait, dans la très grande majorité des situations naturelles, la surface du sol présente de nombreuses irrégularités de toute tailles qui modifient la distribution spatiale du rayonnement réfléchi (*rugosité*).

La surface des sols n'est donc généralement pas lambertienne, comme l'ont montré les mesures de COULSON et REYNOLDS dès 1971. Comme on pouvait s'y attendre c'est particulièrement flagrant dans le cas des sols travaillés (MILTON et WEBB, 1987).

Ceci signifie que les conditions géométriques des mesures de réflectance sur le terrain doivent être très bien contrôlées, et se rapprocher le mieux possible de celles de l'enregistrement des images par le satellite, pour faciliter les comparaisons entre ces deux types de données.

II.2. Apport des modèles

Différents types de modèles tentent de rendre compte des effets de la rugosité. D'une façon générale, tous les accidents du relief qui sont de taille inférieure au champ de visée instantanée du capteur, doivent être considérés comme des éléments intervenant dans la rugosité de la surface (les tailles supérieures sont du domaine de la morphologie).

Suivant les dimensions de ces aspérités ou irrégularités de la surface, on peut distinguer :

- la **microrugosité**, caractérisée par des tailles d'aspérités exprimées en millimètres ; elle dépend de la structure superficielle du sol en place.
- la **mésorugosité**, due au éléments grossiers, aux végétaux et au travail du sol ; elle s'exprime en centimètres ou décimètres.
- la **macrorugosité**, formée par les accidents de taille métrique, tels les rochers, les ravines, les dunes,....

La *mésorugosité* est le facteur principal de variation de la réflectance bidirectionnelle (GIRARD et GIRARD, 1975 ; SPIRIDINOV (et al., 1981). L'effet général observé est une diminution de la réflectance dans toutes les longueurs d'onde. Différents modèles permettent de simuler ces effets géométriques sur la réflectance.

II.2.1. Modèle de surface à cubes

Un modèle très simple, où les éléments grossiers présents à la surface du sol sont représentés par des cubes équidistants, est une approximation

suffisante pour comprendre comment varie la réflectance en fonction de la macrorugosité et de l'angle d'éclairement (fig.9).

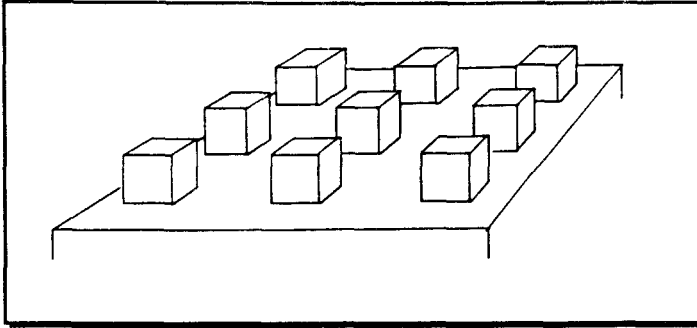


Figure 9. Modèle de surface rugueuse à cubes équidistants.

Pour simplifier, on suppose la surface éclairée selon une des deux directions d'alignement des cubes. Soit a , l'arête d'un cube et l , la distance entre cubes. La partie ombrée entre les cubes, m , est liée à l'angle zénithal du soleil, Θ , par la relation : $m = a \cdot \text{tg } \Theta$. A partir de cette observation, on peut déduire la réflectance mesurée au nadir de la réflectance intrinsèque des matériaux composant cette surface à cubes (ESCADAFAL, 1989).

Ce modèle de surface à cubes permet également d'illustrer l'effet d'angles de visées différents. Sur la fig.10 on voit que si l'angle de visée s'approche de l'angle d'éclairement, la portion de zone ombrée vue diminue et la réflectance mesurée augmente, et inversement dans le cas contraire. Une étude détaillée de ces effets angulaires et de l'influence du rayonnement diffus sur un modèle de ce type (surface composée de blocs rectangulaires équidistants) a été présentée par NORMAN et al. en 1985.

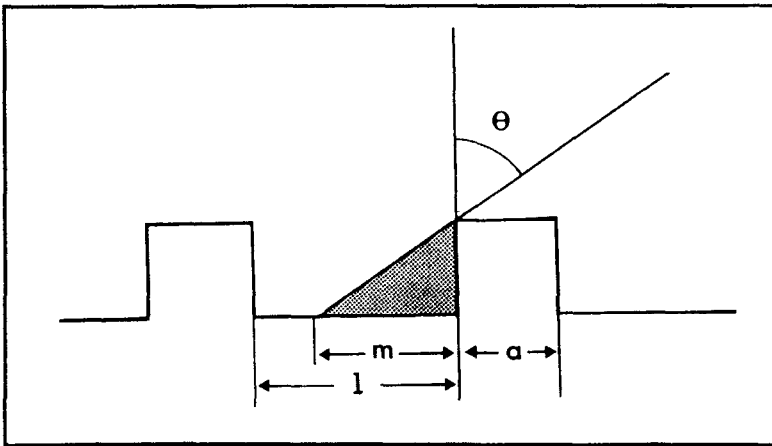


Figure 10. Les paramètres du modèle de surface à cubes.

11.2.2. Autres modèles de surface

D'autres modèles plus ou moins réalistes ont été proposés. Pour les sols cultivés, CIERNIEWSKI (1987) a proposé un modèle de surface composé de sphères équidistantes pour reproduire l'effet des agrégats. Ce modèle prend

en compte les différentes situations en fonction de la pente et de l'élévation solaire, et, le cas des ombres portées sur les sphères adjacentes.

FERENCZ et al. (1987) ont proposé un modèle déterministe calculant toutes les interactions dans le cas de sillons parfaits de section triangulaire. Ces auteurs concluent que les effets de ce type de rugosité ne sont très importants que dans les cas de visées nettement obliques et de relief ondulant (collines, par exemple).

II.2.3. Limitations des modèles

Ces modèles sont utiles pour comprendre l'origine et le sens des variations de la réflectance bidirectionnelle des surfaces rugueuses. Celle-ci varie donc essentiellement en fonction de la réflectance des différents composants, de leur organisation (rugosité) et de la configuration visée-éclairage.

Nous avons supposé jusqu'ici que la surface était horizontale, en situation de pente cette configuration est fortement modifiée. Une même surface aura donc le plus souvent un réflectance nadirale différente suivant son inclinaison.

Les modèles sont cependant assez éloignés des cas réels, et les résultats des simulations doivent être utilisés avec circonspection dans les situations limites. A titre d'exemple, le modèle à cubes sous-estime le pourcentage d'ombre des surfaces à forte densité d'éléments grossiers.

CONCLUSION

Remarquons tout d'abord que l'étude de ***l'interaction du rayonnement solaire avec les sols et leurs surfaces*** n'a été ici qu'abordée.

Ce qui se passe au niveau **microscopique**, au niveau des particules constituant les sols, est encore assez mal connu. Si on sait que la nature minéralogique ou organique de ces particules a une influence sur les propriétés spectrales des sols, les relations mises en évidence sont assez conjoncturelles et purement statistiques.

La grande variabilité des formes de la matière organique ou de la nature et du degré de cristallisation des oxy-hydroxydes de fer, par exemple, ne permettent pas de prévoir des lois facilement généralisables à tous les sols.

Seul l'effet de l'humectation du sol paraît actuellement quantifiable. En effet, si dans le domaine visible et proche infrarouge on ne constate qu'une diminution générale de la réflectance, par contre, les bandes spectrales du moyen infrarouge semblent permettre une détection de la teneur en eau, de façon relativement indépendante des autres variables, d'après les travaux récents de MUSICK et PELLETIER (1988).

Dans l'étude des relations entre composition et comportement spectral (ou couleur, si on se limite au domaine visible), les sols ont jusqu'à présent été implicitement assimilés à des mélanges homogènes de particules de tailles identiques (VAN DEN BERG et BOUMAN, 1986).

Cependant, il est prévisible que l'effet colorant des différents "pigments" soit fortement modifié par la **taille des éléments** du sol qu'ils colorent (effet de la *texture*) et leur **organisation** (effet de la structure).

L'interprétation des propriétés spectrales des sols en termes pédologiques devrait donc à l'avenir prendre en compte la taille, la forme et l'arrangement des particules.

Cependant l'étude complète de la réflexion du rayonnement sur un milieu particulaire hétérogène fait intervenir des lois physiques complexes (HAPKE, 1981 ; LECKNER, 1987).

A titre d'exemple, on peut citer le calcul de la réflectance spectrale de matériaux particuliers de type météorite par un modèle de Monte Carlo à six flux, prenant en compte l'effet des aspérités et de la différence de taille et de composition des particules (EGAN et HILGEMAN, 1978).

Ce type de modèle ne peut être développé qu'en collaboration avec des physiciens. Mais des modèles pragmatiques plus simples peuvent être envisagés. Des relations statistiques peuvent être recherchées en utilisant des hypothèses plus réalistes (influence de la surface spécifique du squelette par rapport à celle des particules "colorantes" qui l'entourent, par exemple).

Au niveau **macroscopique**, nous avons vu que l'influence de la rugosité et des effets géométriques de la mesure est paramétrée par différents modèles simplistes (surfaces composées de cubes, de sphères ou de sillons rectilignes de section triangulaire ou rectangulaire).

Un modèle déterministe prenant en compte tous les facteurs rencontrés dans la réalité du terrain est par contre beaucoup plus difficile à élaborer, même si ici aussi l'apport des méthodes probabilistes paraît prometteur (COOPER et SMITH, 1985).

Des mesures de terrain seront donc nécessaires pour déterminer l'influence des rugosités réelles et préciser le domaine d'applicabilité des modèles existants.

La modélisation de la réflectance au niveau du pixel est considérée comme une étape essentielle au développement de la télédétection (TUELLER, 1987). Elle est nécessairement basée sur l'étude des propriétés spectrales des différents composants des surfaces observées par satellites. Dans le cas des régions arides, le découpage en "états de surface élémentaires" que nous avons proposé (ESCADAFAL, 1981) répond parfaitement à cette exigence, comme le montrent les modèles pragmatiques au nous avons mis au point à partir de cette approche (ESCADAFAL, 1988 et 1989).

Pour conclure, il est clair que l'on ne peut espérer mettre en évidence les "signatures spectrales" qui permettrait d'identifier chaque type de sol sans équivoque. Nous avons vu par contre, que l'on peut mesurer au laboratoire, dans des conditions standardisées, des *propriétés spectrales*. Plusieurs modèles permettent de tenir compte des effets de la rugosité, des angles d'éclairement et de mesure, et ainsi de prévoir le *comportement spectral* d'un sol suivant différentes configurations. L'avantage de cette approche par modélisation est de permettre d'extrapoler à d'autres conditions (date, milieux, capteurs...) des relations mises en évidence dans une situation donnée.

Enfin, soulignons que l'aspect spectral de la télédétection suscite un nombre croissant de recherches liées au développement de spectromètres imageurs, actuellement aéroportés, et prochainement embarqués sur plateformes spatiales (VANE et GOETZ, 1988).

BIBLIOGRAPHIE

- BARRON (V.), TORRENT (J.), 1986. Use of the Kubelka-Munk theory to study the influence of iron oxides on soil colour. *J. Soil Sc.*, 37 : 449-510.
- BAUER (M.E.), VANDERBILT (V.C.), ROBINSON (B.F.), DAUGHTRY (C.S.T.), 1980. Spectral properties of agricultural crops and soils measured from space, aerial, field and laboratory sensors (review), Proc. 14th ISPRS Congress, Hamburg (F.R.G.), 23(B-7), pp. 56-73.
- BAUMGARNER (M.F.), SILVA (L.F.), BIÉL (L.L.), STONER, 1985. Reflectance properties of soils. *Adv. in Agronomy*, 38 : 1-44.
- BOWERS (S.A.), HANKS (R.J.), 1965. Reflectance of radiant energy from soils. *Soil Sci.*, 100: 130-138.
- CELIS-CEUSTERS (A.M.), 1980. Ground truth radiometry (Exotech) on bare and overgrown belgian soils. *Pédologie*, 30(1): 43-66.
- CERVELLE (B.), 1989. Reflexion de la lumière solaire par les matériaux minéraux : quelques éléments page 3 à 18 "Compte rendu des Journées de Télédétection"
- CIERNIEWSKI (J.), 1985. Relation between soil moisture tension and spectral reflectance of different soils in visible and near-infrared range. 3ème coll. int. "Signatures spectrales d'objets en télédétection", Les Arcs, 16-20/12/85, pp. 429-432.
- CIERNIEWSKI (J.), 1987. A model of soil surface roughness influence on the spectral response of bare soils in the visible and near infrared range. *Remote Sens. Environ.*, 23: 97-115.
- CIPRA (J.E.), BAUMGARDNER (M.F.), STONER (E.R.), MAC DONALD (R.B.), 1971. Measuring radiance characteristics of soil with a field spectroradiometer. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, 35: 1014-1017.
- COMBE (P.), 1984. Caractérisation radiométrique de volumes pédologiques de référence. Mémoire D.A.A., INA-PG, 83 p. multigr.
- CONDIT (H.R.), 1970. The spectral reflectance of American soils. *Photogramm. Eng.*, 36: 955-966.
- COOPER (K.D.), SMITH (J.A.), 1985. A Montecarlo reflectance model for soil surfaces with three dimensional structure. *IEEE Trans. Geosc. Rem. Sens.*, GE-23, 5: 668-673.
- COULSON (K.L.), REYNOLDS (D.W.), 1971. The spectral reflectances of natural surfaces. *J. Appl. Meteorol.*, 10: 1285-1295.
- COURAULT (D.), 1986. Modélisation du comportement spectral de la surface du sol. Etude intraparcellaire. D.E.A de Sci. des sols, I.N.A.-P.G., 102 p.
- COURAULT (D.), GIRARD (M.C.), ESCADAFAL (R.), 1988. Modélisation de la couleur des sols par télédétection. Actes du 4e Coll. int. "Signatures spectrales d'objets en télédétection", Aussois, janvier 1988, pp. 357-362.
- DA COSTA (L.M.), 1979. Surface soil color and reflectance as related to physico-chemical and mineralogical soil properties. Diss. Abstr. int., Sect. B: Sci. Eng., U.S.A., 41 (5), 1597.B - 1598.B. Th. Ph. D., Univ. Miss. Columbia, 1979.
- DESCHAMPS (P.Y.), HERMAN (M.), TANRE (D.), 1985. Modélisation du rayonnement solaire réfléchi par l'atmosphère et la Terre entre 0,35 et 4 m. Rapport ESA, L.O.A./U.S.T.L., Lille, 156 p. + annexes.
- EGAN (W.G.), HILGEMAN (T.), 1978. Spectral reflectance of particulate materials: a Monte Carlo model including asperity scattering. *Applied optics*, 17(2): 245-252.
- ESCADAFAL (R.), 1981. Une méthode nouvelle de description de la surface des sols dans les régions arides. Actes du colloque "Informatique et traitement des données de sols", Paris, 1981, in: *Sols*, n°5, p. 21-27.
- ESCADAFAL (R.), 1988. Remote sensing of arid soil surface color with Landsat Thematic Mapper. Communication présentée au XXVIIe COSPAR, 14-30 juillet 1988, Helsinki, Finlande. 14-30 juillet 1988, Helsinki, Finlande. (paru dans *Adv. Space Res.*, 9(1): (1)159-(1)163, 1989).
- ESCADAFAL (R.), GIRARD (M.C.), COURAULT (D.), 1988a. La couleur des sols: appréciation, mesure et relations avec les propriétés spectrales. *Agronomie*, 8(2): 147-154.
- ESCADAFAL (R.), GIRARD (M.C.), COURAULT (D.), 1988b. Modeling the relationships between Munsell soil color and soil spectral properties. *International Agrophysics*, 4(3): 249-261.
- ESCADAFAL (R.), GIRARD (M.C.), COURAULT (D.), 1989. MUNSELL Soil Color and Soil reflectance in the visible spectral bands of Landsat MSS and TM data. *Rem. Sens. Env.*, 27: 37-46.

- ESCADAFAL (R.), POUGET (M.), 1986. Luminance spectrale et caractères de la surface des sols en région aride méditerranéenne (Sud tunisien). *I.T.C. Journal*, 86-1: 19-23.
- ESCADAFAL, (R.), 1989. Caractérisation de la surface des sols arides par observations de terrain et par télédétection. Thèse de Doctorat, Université Pierre et Marie Curie, Etudes et thèses, ORSTOM, Paris, 317 p.
- FERENCZ (Cs.), FERENCZ ARKOS (I.), HAMAR (D.), LICHTENBERGER (J.), TARCSAI (Gy), 1987. Surface models including direct cross-radiation. A simple model of furrowed surfaces. *Int. J. Rem. Sens.*, 8(3): 449-465
- FERNANDEZ (R.N.), SCHULZE (D.G.), 1987. Calculation of soil color from reflectance spectra. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 51: 1277-1282.
- FLAIG (W.), BEUTELSPACHER (H.), RIETZ (E.), 1975. Chemical composition and physical properties of humic substances in soil components. Vol. 1, Organic components (ed. Gieseking, J.E.), Springer Verlag, New York, 213 p.
- GAUSMAN (H.W.), LEAMER (R.W.), NORIEGA (J.R.), RODRIGUEZ (R.R.), WIEGAND (C.L.), 1977. Field-measures spectroradiometric reflectances of disked and nondisked soil with and without wheat straw. *Soil Sc. Soc. Am. J.*, 41: 733-796.
- GERBERMANN (A.H.), NEHER (D.D.), 1979. Reflectance of varying mixtures of clay soil and sand. *Photogramm. Eng. Rem. Sens.*, 45 (8): 1145-1151.
- GIRARD (C.M.), GIRARD (M.C.), 1975. Applications de la télédétection à l'étude de la biosphère. Masson, Paris, 186 p.
- GIRARD (M.C.), 1977. Apport de la télédétection à la cartographie des sols: possibilités, limites. Actes du 1er colloque "Pédologie et Télédétection", Rome, pp. 221-231.
- GIRARD (M.C.), 1985. Télédétection de la surface du sol. In: "Application de la télédétection à l'agriculture", Colloques I.N.R.A., n°32, pp. 177-193.
- GUYOT (G.), 1989. Signatures spectrales des surfaces naturelles. Télédétection satellitaire, n°5, Paradigme, Caen, 178 p.
- GUYOT (G.), HANOCQ (J.F.), BUIS (J.P.), SAINT (G.), 1984. Mise au point d'un radiomètre de simulation de SPOT. Ile coll. int. "signatures spectrales d'object en télédétection", les colloques de l'I.N.R.A., 23, pp. 233-242.
- HAPKE (B.), 1981. Bidirectional reflectance spectroscopy. 1. Theory. *J. Geophys. Res.* 86:3039-3054.
- HORVATH (E.H.), POST (D.F.), KELSEY (J.B.), 1985. The relationships of Landsat digital data to the properties of Arizona Rangelands. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 48: 1331-1334.
- HUNT (G.R.), 1980. Electromagnetic radiation: the communication link in remote sensing. In: Remote sensing in geology, SIEGAL (B.S.), GILLESPIE (A.R.), Eds., Wiley, chap.2, 45 p.
- JACKSON (R.D.), MORAN (M.S.), SLATER (P.N.), BIGGAR (S.F.), 1987. Field calibration of reference reflectance panels. *Rem. Sens. Environ.*, 22: 145-158.
- JACKSON (R.D.), PINTER (P.J.), REGINATO (R.J.), SHERWOOD (B.I.), 1980. Hand held radiometry. U.S.D.A. Agricultural review and manuals, ARM-W-19, 66 p.
- JAMAGNE (M.), 1967. Bases et techniques d'une cartographie des sols. *Ann. Agron.*, hors-série n°18, 148 p.
- KAHLE (A.B.), 1984. Measuring spectra of arid lands. In: Desert and arid lands, pp. 195-217.
- KARMANOV (I.I.), 1970. Study of soil from the spectral composition of reflected radiation. *Soviet Soil Science*, 4: 226-238.
- KARMANOVA (L.A.), 1981. Effect of various iron compounds on the spectral reflectance and color of soils. *Soviet Soil Science*, 5: 53-60.
- KING (C.), 1985. Etude des sols et des formations superficielles par télédétection. Thèse I.N.A.-P.G., 211 p.
- KING (C.), LEFEBVRE D'HELLEN COURT (T.), 1982. La réflectance des sols en place, étude de l'influence de certaines caractéristiques propres à la surface du sol nu. In: Symp. Intern. ISPRS, comm.7, G.D.T.A., p.305
- KOWALISKY (P.), 1978. Vision et mesure de la couleur. Masson, Paris, 197 p.
- KRISHNAN (P.), ALEXANDER (J.D.), BUTLER (B.J.), HUMMEL (J.W.), 1980. Reflectance technique for predicting soil organic matter. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 44 (6): 1282-1285.
- KUBELKA (P.), MUNK (F.), 1931. Ein Beitrag zur Optik der Farbenanstriche. *Zeitschrift für technische Physik*, 12: 563-620.
- LEGER (R.G.), MILLETTE (G.J.F.), CHOMCHAN (S.), 1979. The effect of organic matter, iron oxides and moisture on the colour of two agricultural soils of Quebec. *Can. J. Soil Sci.*, 59: 191-202.
- LEKNER (J.), 1987. Theory of reflection. Martinus Nijhoff, Dordrecht, 279 p.
- LEU (D.T.), 1977. Visible and near infrared reflectance of beach sands. A study on the spectral reflectance grain size relationship. *Remote Sens. Environ.*, 6: 169-182.
- LONGSHAW (T.C.), 1974. Field spectroscopy for multispectral remote sensing: an analytical approach. *Appl. Opt.*, 6: 1487-1493.

- MELVILLE (M.D.), ATKINSON (G.), 1985. Soil colour: its measurement and its designation in models of uniform colour space. *J. Soil Sci.*, 36: 495-512.
- MILTON, 1987. Principles of field spectroscopy. *Int. J. Rem. Sens.*, 8(12): 1807-1827.
- MOUGENOT (B.), ZANTE (P.), 1986. Study of factors acting on reflectance of salt affected and acid soils surfaces in Casamance (Senegal). First results. *Symp. Int. Rem. Sens.*, Enschede, August 1986.
- MULDERS (M.A.), 1987. Remote sensing in soil science. *Developments in soil science*, vol. 15, Elsevier, Amsterdam, 379 p.
- MUSICK (H.B.), PELLETIER (R.E.), 1988. Response to soil moisture of spectral indices derived from bidirectional reflectance in Thematic Mapper wavebands. *Rem. Sens. Env.*, 25: 167-184.
- NORMAN (J.M.), WELLES (J.M.), WALTER (E.A.), 1985. Contrast among bidirectional reflectance of leaves, canopies, and soils. *IEEE trans. Geosc. Rem. Sens.*, GE-23, 659-667.
- OHTA (N.), WYSZECKI (G.), 1977. Location of the nodes of metameric color stimuli. *Color Res. Appl.*, 2: 183-186.
- PENDLETON (R.L.), NICKERSON (D.), 1951. Soils colors and special soil color charts. *Soil Science*, 71, 35-43.
- PROST (R.), KING (C.), LEFEBVRE D'HELLEN COURT (T.), 1983. Propriétés de réflexion diffuse de pâtes de kaolinite en fonction de leur teneur en eau. *Clay Minerals*, 18: 193-204.
- ROBERT (M.), VENEAU (G.), HERVIO (M.), 1983. Influence des polycations du fer et de l'aluminium sur les propriétés des argiles. *Sci. du Sol*, 3-4: 235-251.
- SALMON-DREXLER (B.C.), 1977. Reducing Landsat data to parameters with physical significance and signature extension. A review of Landsat capabilities. *Proc. 11th Symp. Remote Sens. Environ.*, Ann. Arbor, pp. 1289-1299.
- SCHREIER (H.), 1977. Quantitative predictions of chemical soil conditions from multispectral airborne, ground and laboratory measurements. *Proceed. 4th Canadian Symp. Rem. Sens.*, Quebec, pp. 106-112.
- SCHWERTMANN (V.), TAYLOR (R.M.), 1977. Iron oxides. In: *Minerals in soil environment*, Dixon and Weed, ed., Soil Sci. Soc. Am., Madison (USA), pp. 145-180.
- SEGALEN (P.), 1969. Contribution à la connaissance de la couleur des sols à sesquioxides de la zone intertropicale, sols jaunes et sols rouges. *Cahiers ORSTOM, Sér. Pédol.*, 7: 113-236.
- SEGALEN (P.), 1977. Les classifications des sols. *Revue critique. ORSTOM*, Bondy, 175 p.
- SHIELDS (J.A.), PAUL (E.A.), ST ARNAUD (R.J.), HEAD (W.K.), 1968. Spectrophotometric measurement of soil color and its relation to moisture and organic matter. *Can. J. Soil Sci.*, 48(3): 271-280.
- SHIELDS (J.A.), ST ARNAUD (R.J.), PAUL (E.A.), CLAYTON (J.S.), 1966. Measurements of soil color. *Can. J. Soil Sci.*, 46: 83-90.
- SPIRIDINOV (H.), KUNCHEVA (R.), MISHEVA (E.), 1971. Results and conclusions from soil and vegetation reflection coefficient measurements. *Adv. Space Res.*, 1(10): 111-114.
- STONER (E.R.), BAUMGARDNER (M.F.), 1981. Characteristic variations in reflectance of surface soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 45(6): 1161-1165.
- STONER (E.R.), BAUMGARDNER (M.F.), WEISMILLER (R.A.), BIEHL (L.L.), ROBINSON (B.F.), 1980a. Extension of laboratory-measured soil spectra to field conditions. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 44(3): 572-574.
- TAYLOR (R.M.), 1982. Color in soils and sediments. Review. In: *Proc. Int. Clay Conf.*, Bologna 1981, Olphen H. and Vienale F. eds., Elsevier, Amsterdam, pp. 705-761.
- TORRENT (J.), SCHWERTMANN (U.), FECHTER (H.), ALFEREZ (F.), 1983. Quantitative relationships between soil color and hematite content. *Soil Sci.*, 136: 354-358.
- TORRENT (J.), SCHWERTMANN (U.), SCHULZE (D.G.), 1980. Iron oxide mineralogy of some soils of two river terrace sequences in Spain. *Geoderma*, 23: 191-208.
- TUELLER (P.T.), 1987. Remote sensing science applications in arid environments. *Rem. Sens. Environ.*, 23: 143-154.
- VAN DER BERG (B.P.J.), BOUMAN (B.A.M.), 1986. Theoretic reflection modelling of soil surface properties. *Symp. Rem. Sens.*, Enschede, August 1986, p. 331-334.
- VANE (G.), GOETZ (A.F.), 1988. Terrestrial imaging spectroscopy. *Rem. Sens. Environ.*, 24: 1-29.
- VERMANDE (P.), 1985. High spectral resolution remote sensing instrument developed and under development at CNES. 3ème coll. int. "Signatures spectrales d'objets en télédétection", Les Arcs, 16-20/12/85.
- WYSZECKI (G.), STILES (W.S.), 1982. *Color science: concept and methods, quantitative data and formulae*. Wiley, New York, 2nd edition, 950 p.

PROPRIETES SPECTRALES DE LA VEGETATION

Jean Louis DEVINEAU

Dans un bref exposé introductif à la présentation des résultats des divers programmes, les propriétés optiques fondamentales des végétaux sont présentées, ainsi que les principales causes de variabilité des réponses spectrales de la végétation.

I. PROPRIETES OPTIQUES FONDAMENTALES DES ORGANES VEGETAUX

L'absorption des ondes électromagnétiques par les organes végétaux chlorophylliens est importante dans le domaine du visible, mais deux bandes d'absorption existent aussi dans le moyen infra-rouge. La réflectance est en revanche élevée dans les longueurs d'ondes correspondant au proche infra-rouge (fig.1).

Dans le moyen infra-rouge se retrouvent les bandes d'absorption correspondant à l'eau de constitution des tissus végétaux (fig.2).

Dans le proche infra-rouge les ondes électromagnétiques sont pour l'essentiel transmises ou réfléchies. La partie réfléchie, de l'ordre de 50%, dépend de la structure des tissus végétaux, en particulier de celle du parenchyme lacuneux (fig.3).

Les propriétés optiques des feuilles dans le visible sont liées à celles des pigments végétaux, en particulier à celles des chlorophylles qui présentent deux bandes d'absorption principales, l'une à 450 nm dans le bleu, l'autre à 650 nm dans le rouge (fig.4). Les pigments chlorophylliens sont contenus dans les chloroplastes localisés en majorité dans le parenchyme palissadique des limbes (fig. 3).

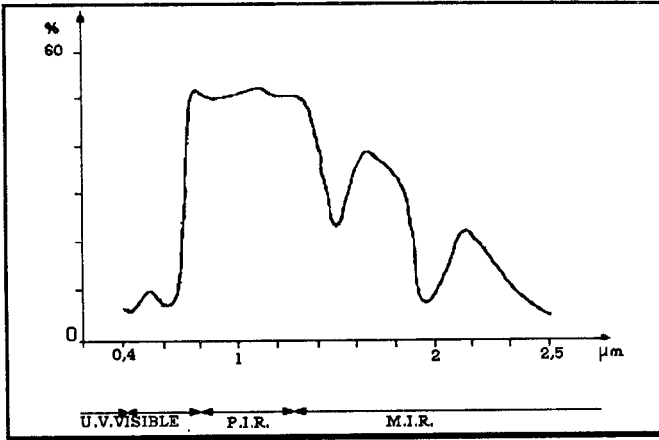


Figure 1. Spectre de réflectance d'une feuille verte

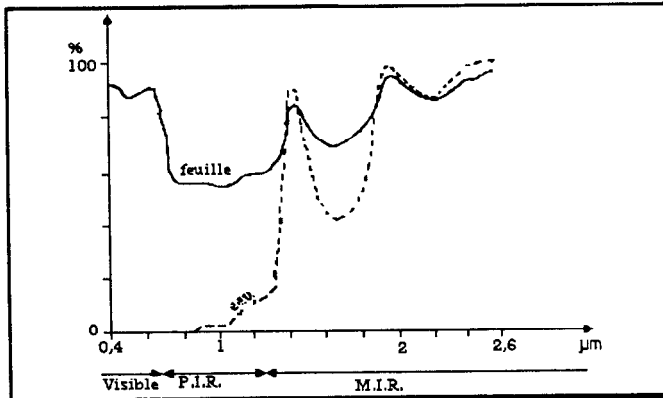
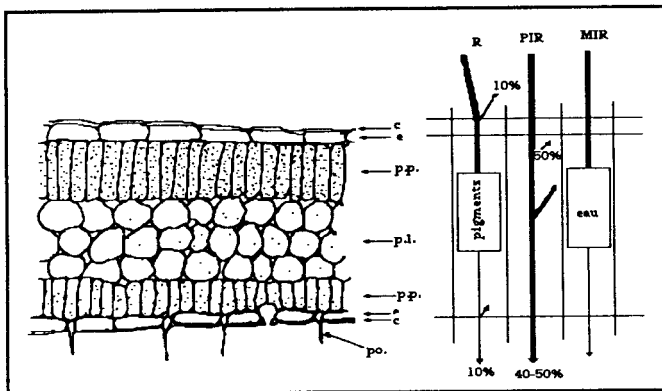


Figure 2. Spectre d'absorption de l'eau comparé aux rayonnements absorbés ou transmis par une feuille

Figure 3. Propriétés optiques d'une limbe dans le rouge, le proche et moyen infra-rouge
c. = cuticule; l. = épiderme; p.p. = parenchyme palissadique; p.l. = parenchyme lacuneux; po. = poil ou trichome

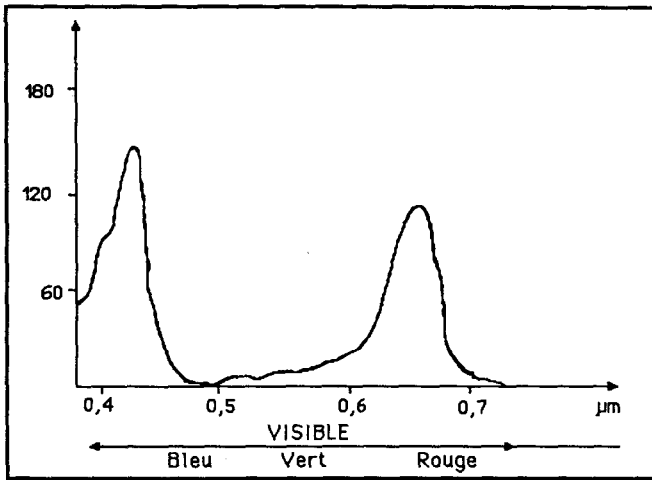


Figure 4. Spectre d'absorption de la chlorophylle A

Deux conséquences, aux retombées pratiques importantes, découlent de ces propriétés: la réflectance dans le proche infra-rouge est liée de façon positive à la biomasse végétale, la réflectance dans le rouge l'est de façon négative. C'est le fondement du principe de détermination radiométrique des phytomasses, du recouvrement de la végétation ou du LAI ¹

Le rapport PIR/R ou la différence normalisée ($(PIR-R)/(PIR+R)$) sont souvent utilisés à cet effet (TUCKER, 1977, ROUSE et al, 1979).

II. VARIABILITE DES REPONSES SPECTRALES

De nombreux facteurs sont cependant susceptibles d'influer sur la réponse spectrale des couverts végétaux. Ils interviennent à différentes échelles, celle des organes végétaux, celle des plantes et celle des peuplements.

II.1. A l'échelle de la feuille

Les principaux facteurs de variabilité sont les suivants.

- Structure anatomique des limbes: nombre des assises cellulaires, épaisseur de la cuticule, présence de poils,...
- Teneur en eau: sensibilité surtout du moyen infra-rouge.
- Etat physiologique et phytosanitaire: déficience minérale, attaque parasitaire.
- Coloration
- Age: les propriétés optiques des feuilles sont assez stables pendant toute leur vie sauf à l'état juvénile et à la sénescence.

Pendant la sénescence l'accroissement de la réflectance et de la transmittance dans le rouge est marquée à cause de la disparition rapide des pigments chlorophylliens.

¹ LAI = surface foliaire par unité de surface de terrain

Dans le proche infra-rouge la réflectance évolue seulement lorsque la structure foliaire est désorganisé par le dessèchement.

II.2. A l'échelle de la plante et du peuplement

II.2.1. Facteurs internes au couvert

II.2.1.1 Structure du couvert

Architecture des plantes, inclinaison des feuilles (fonction de distribution de l'inclinaison des feuilles).

Organisation spatiale du couvert

L'effet de l'orientation des rangs d'une culture par rapport à l'orientation du soleil est, par exemple, plus marqué dans le visible que dans le proche infra-rouge.

Distribution en classes d'âge des feuilles

Pour un couvert composé d'un mélange de matériel sec et de matériel vert, le PIR est le meilleur indicateur du LAI total (COLWELL, 1974). Cela est dû à la sensibilité différente du rouge et du PIR à la sénescence.

Effet de productivité

L'abondance de la chlorophylle dans une feuille dépend de l'équilibre qui s'établit entre sa vitesse de formation et sa vitesse de disparition. Pendant la période de croissance la vitesse de formation l'emporte largement. Pendant les phases d'active croissance (forte productivité) la teneur en chlorophylle est augmentée et, par conséquent, l'absorption dans le visible l'est aussi.

Ombres

Leur composition spectrale résulte de la transmission des radiations au travers des feuilles. Les ombres des végétaux sont ainsi très sombres dans le visible, mais plus "claires" dans le PIR.

Densité du couvert

La réflectance dans le rouge est sensible aux variations du couvert végétal pour les faibles LAI (<3-4). Un plateau est cependant assez rapidement atteint car les effets d'ombre sont importants à cette longueur d'onde pour laquelle la transmittance du feuillage est faible (COLWELL, 1974).

La réflectance dans le proche infra-rouge, où la transmittance du feuillage est plus grande, est sensible aux variations d'une gamme plus étendue de LAI (effets d'ombre atténués).

II.2.1.2. Interférences sol - végétation

Lorsque la végétation est peu couvrante la réponse spectrale des peuplements est affectée par la réflectance de la surface des sols.

Dans le cas de sols sombres la réflectance dans le rouge est en effet très peu sensible aux variations des faibles valeurs du LAI. Dans le proche infra-rouge, lorsque le LAI ou le recouvrement sont faibles, l'effet du sol est cependant nettement perceptible, surtout lorsque le substrat est clair (fig. 5a).

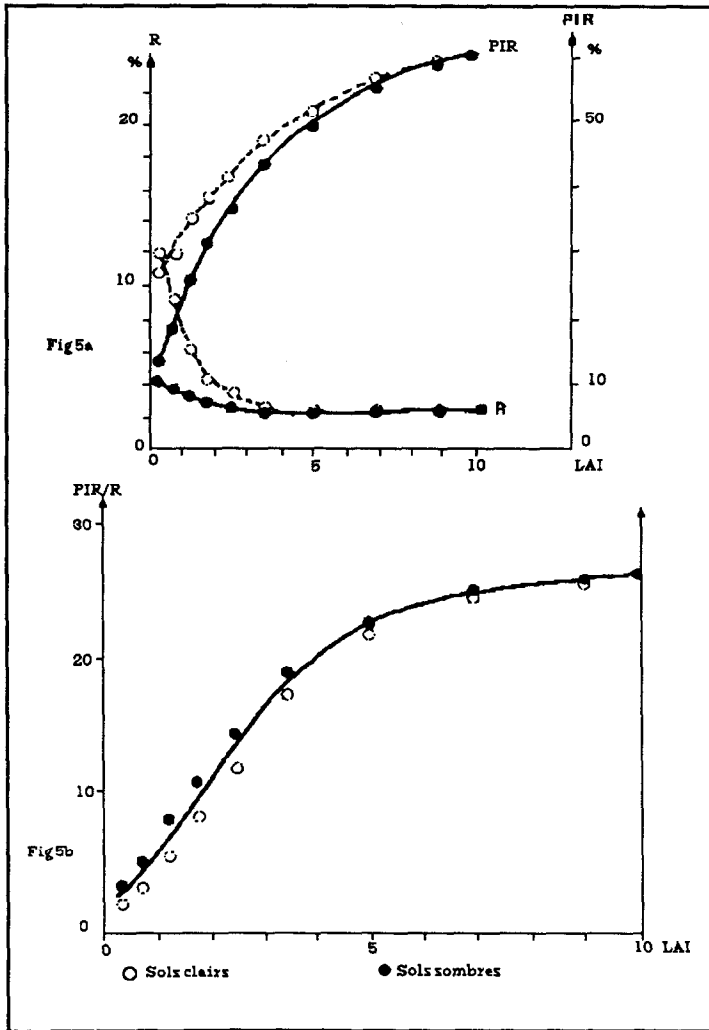


Figure 5. Evolution de la réflectance d'un couvert simulé en fonction de LAI pour un sol clair et un sol sombre (adapté d'après COLWELL, 1974)

Des relations particulières à chaque type de sol, doivent donc être établies entre LAI et réflectances.

Le ratio PIR/R (ou la différence normalisée $\frac{PIR-R}{PIR+R}$ peuvent cependant permettre d'atténuer l'effet de la couleur du substrat sur les relations réflectance-LAI (fig.5b).

II.2.1.3. Phénologie

Une conséquence de la variabilité des réponses spectrales en fonction de la structure du couvert est la variation de la réflectance d'un même peuplement végétal au cours du temps, notamment avec les saisons, suivant les différents stades phénologiques (fig.6).

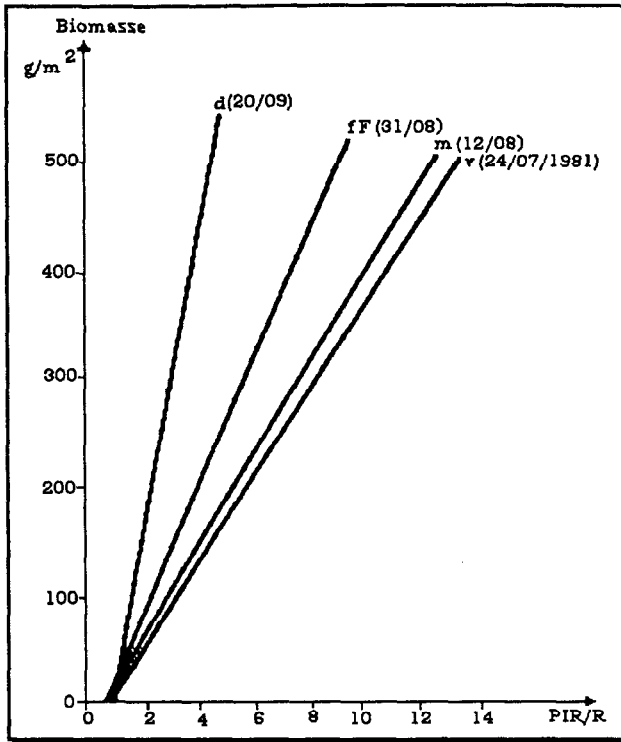


Figure 6. Evolution des droites de régression entre l'indice de végétation (PIR/R) et la biomasse en fonction du stade phénologique du tapis herbacé (station OURLI) OURLI Sahel Burkinabé adapté de GROUZIS et METHY, 1983 et GROUZIS, 1987
 PIR = 802nm; R = 676nm V: stade végétatif;
 m montaison; fF: fin de floraison - fructification; d: désèchement

II.2.2. Facteurs externes au couvert

-Angle solaire

Variation de l'importance des phénomènes d'ombre au cours de la journée

-Angle de visée

La variation dépend de la longueur d'onde considérée (variation de la proportion de sol nu, d'ombre,...)

-Taille de la surface visée

-Composition de l'atmosphère (mesure par satellite)

Teneur en eau de l'atmosphère (absorption de l'infra-rouge), aérosols, ...

BIBLIOGRAPHIE

- COLWELL J.E.;1974- *Proceedings of the 9th Int. Symposium on Remote sensing of environment*: 1061-1085.
- CURRAN P.J.;1983-*Phil. Trans. R. Soc. Lond, A*,309 : 257-270
- GROUZIS M.; 1987- *Thèse d'Etat Paris XI (Orsay)*; 336P..
- GROUZIS M., METHY M.; 1983- *Acta Oecol., Oecol. Plant*, 4 (18), n°3: 241-257.
- GUYOT G.;1984- *Bull. S.F.P.T.*, 95: 5-22.
- TUCKER C.J.; 1977- *Appl Opt.*, 16: 1151-1157.
- ROUSE J.W., HASS R.H., SCHELL J.A., DEERING D.W.; 1973- 3d ERTS Symposium. NASA SP 351 Déc., I: 309-317.

CORRECTIONS D'ECLAIREMENT ET CALIBRATION ABSOLUE DES IMAGES SPOT; EFFETS DE STEREOADIOMETRIE

Hervé LE MEN

I. INTRODUCTION

La comparaison des radiométries de 2 images saisies à 2 dates différentes, ou de 2 pixels situés dans des positions topographiques différentes sur une même image, doit se faire non pas en terme d'énergie mesurée par le capteur mais en terme de réflectance du sol. En effet, les énergies mesurées dépendent des conditions d'éclairément au sol et ne sont donc pas caractéristiques.

L'éclairément en un point du sol dépend des conditions atmosphériques et de la position du soleil d'une part et de la position topographique du point (pente, exposition...) d'autre part.

La position du soleil et la position topographique du point sont connues, les conditions atmosphériques sont en général inconnues et inaccessibles. La méthode proposée ici essaie d'utiliser la connaissance en tout point du relief pour estimer interactivement l'inconnue atmosphérique

II. MODELE ATMOSPHERIQUE

II.1. Modélisation physique

Le modèle atmosphérique présenté ici est volontairement simple, voire simpliste. L'objectif étant une estimation interactive, il doit se limiter à un seul paramètre, car l'estimation de plusieurs paramètres serait illusoire.

On modélise l'atmosphère comme un milieu homogène (localement isotrope) et non absorbant. Toute énergie non transmise est donc diffusée. L'indicatrice de diffusion est décomposée de manière simplifiée en 2 hémisphères représentant la diffusion avant et la diffusion arrière. Le rapport entre la diffusion avant et la diffusion arrière dépend de la profondeur optique.

Le sol est considéré comme un diffuseur lambertien (une partie de énergie recue est absorbée, le reste est diffusé de manière isotrope), ce qui est notoirement faux, mais constitue la seule approximation utilisable en l'absence d'autre information.

Notations:

E_0 éclairement extra-atmosphérique (constante connue)

E_i éclairement incident au point du sol considéré

ρ réflectance du point

ρ_m réflectance de l'environnement (=réflectance moyenne)

θ angle zénithal du soleil

E_p éclairement de parcours

η coefficient de diffusion avant

τ profondeur optique de l'atmosphère

v angle de visée

II.2. Terrain plat

$$\text{Soit } \beta = \exp\left(\frac{\tau}{\cos \theta}\right), \quad \alpha = \int_0^1 x \exp\left(\frac{-\tau}{x}\right) dx$$

$$E_i = \frac{E_0 \cos \theta (\beta + (1-\beta)\eta)}{1 - \rho_m(1-\eta)(1-\alpha)}$$

$$E_p = E_0 \cos \theta ((1-\beta)(1-\eta) + \eta(1-\alpha)\rho_m(\beta + (1-\beta)\eta) / (1 - \rho_m(1-\eta)(1-\alpha)))$$

$$E_p = \frac{E_0 \cos \theta (1-\beta)(1-\eta) + \eta(1-\alpha)\rho_m(\beta + (1-\beta)\eta)}{(1 - \rho_m(1-\eta)(1-\alpha))}$$

$$E = E_p + \rho E_i \exp\left(\frac{-\tau}{\cos v}\right)$$

$$\rho = \frac{(E - E_p) \exp\left(\frac{\tau}{\cos v}\right)}{E_i}$$

II.3. Influence du relief

Lorsque le terrain n'est pas plat, une partie de éclairement diffus provient non plus de l'atmosphère mais du sol environnant. L'éclairement direct est modifié seulement d'un facteur $\cos(\theta)$ (soleil, normale). On approxime la partie diffuse, en considérant que tout point voit une demi-sphère (4π stéradians);

cette demi sphère a la luminance atmosphérique pour sa partie au dessus de l'horizontale, et la luminance du sol pour la partie située en dessous.

Si l'on écrit éclairement reçu par le point sous la forme éclairement direct+éclairement diffus), on obtient :

$$\rho = \frac{(E-E_p) \exp \frac{\tau}{\cos V}}{E_i [(1-D) \cos M / \cos \theta + D (1+\cos N) / 2 + \rho_m (1-\cos N) / 2]}$$

avec N : angle entre la normale et la verticale

M : angle entre la normale et la direction du soleil.

D : coefficient de lumière diffuse calculé sur terrain plat

$$= 1 - E_0 \beta \cos \theta / E_i$$

Dans cette expression, tout est maintenant calculé en fonction de τ .

III. MISE EN OEUVRE

Après avoir corrigé géométriquement l'image au niveau 3 (effets géométriques du relief), on dispose d'une image multispectrale (3 canaux) et d'un modèle numérique de terrain au même pas. Ces 2 données sont exactement superposables. Successivement pour chacun des canaux, on va effectuer la correction pour diverses valeurs de τ , jusqu'à effacer visuellement l'effet d'ombre. La valeur de τ est directement lié à la visibilité au sol (la visibilité diminue quand τ augmente), nous utiliserons donc la visibilité qui est un paramètre plus "parlant" que la profondeur optique, ce qui ne change en rien le raisonnement ni le résultat.

Si on sur-estime la visibilité, alors on calculera un éclairement incident sous-évalué sur les parties à l'ombre, et par conséquent on fera une sur-correction qui amènera une image où les parties à l'ombre apparaîtront en plus clair que les parties au soleil. (A la limite, si on prend une atmosphère parfaitement transparente, donc non diffusante, un point à l'ombre ne reçoit aucune lumière ; par conséquent il faut diviser la valeur mesurée en ce point par 0 pour obtenir la réflectance qui sera donc infinie).

Inversement, si on a une atmosphère complètement diffusante, la lumière recue est pratiquement constante en tout point, et la correction effectuée pratiquement nulle: les parties à l'ombre restent sombres comme sur l'image originale.

Entre ces 2 extrêmes, il existe nécessairement une valeur de la visibilité pour laquelle l'effet d'ombre disparaît. En fait, le modèle étant imparfait, la valeur qui efface cet effet d'ombre n'est pas la même partout. On en retire donc seulement un intervalle $[V_1, V_2]$ de valeurs admissibles.

Cette opération est effectuée pour les 3 canaux.; mais le modèle atmosphérique donne une dépendance entre les longueurs d'onde.

Autrement dit, les seules valeurs de visibilité admissibles sont celles qui sont dans l'intersection de ces 3 intervalles.

En pratique, ceci conduit couramment à une précision de l'ordre du km pour la détermination de la visibilité.

IV. CALIBRATION ABSOLUE - VÉRIFICATION AVEC DES MESURES AU SOL

Cette méthode permet une calibration relative pour un canal donné. Le lien entre les 3 canaux nécessite l'utilisation des paramètres de calibration absolue qui permettent de transformer le compte numérique sur les images en énergie et de la comparer à l'énergie solaire extra-atmosphérique. (Ce faisant on effectue une calibration absolue et on obtient une image de réflectance). Ces paramètres sont fournis régulièrement par le CNES.

La comparaison avec des mesures de réflectance au sol, est actuellement réalisée, en collaboration avec l'INA Grignon sur des images de Lorraine (4 images Spot, sur la même zone, prises à des dates et sous des angles différents).

Les causes possibles d'erreur devront être examinées une à une:

- décalages géométriques
- insuffisance du modèle atmosphérique (pas d'absorption ...)
- incertitude dans la détermination de la visibilité
- incertitude dans la détermination des angles de pente du sol.
- insuffisance du modèle d'influence du relief (influence de l'environnement local)
- incertitude des mesures de terrain
- erreur de manipulation pendant la mise en oeuvre du test
- effet de stéréoradiométrie
- incertitude sur les valeurs des coefficients de calibration fournis par le CNES

V. STEREOADIOMETRIE

Nous avons fait l'hypothèse, pour la calibration, que le sol est lambertien. En fait, la réflectance dépend des conditions d'éclairement et de visée et cette dépendance est elle-même variable selon la nature des objets. On peut écrire cette dépendance sous la forme : $\rho(S,V) = \rho_0 F(S,V)$. (La fonction de dépendance F dépendant elle-même du corps observé).

Une fois les images calibrées par la méthode précédente, la différence entre deux vues sous des angles différents va mettre en évidence cet effet. Un test a été conduit dans le cadre du programme PEPS en collaboration avec le CNRS (CEPE-Montpellier), sur 2 images saisies respectivement le 2 et le 8 août 1986 avec des angles de visée de 19°2' vers l'Est (oblique) et de 3°6' vers l'Ouest ("verticale") .

Afin d'analyser cet effet, nous avons calculé le rapport des réflectances 100 x "verticale"/"oblique", qui vaudrait 100 pour un corps lambertien. Globalement ce rapport vaut en moyenne 103 dans le vert, 125 dans le rouge et 104 dans l'Infra-rouge, ce qui confirme notre attente, à savoir que la visée "oblique" doit avoir une réflectance plus faible que la visée "verticale", et ce surtout dans le rouge.

Afin d'examiner l'effet de stéréoradiométrie selon la nature des objets, nous avons conduit une classification supervisée sommaire. En résumé les résultats sont les suivants:

- l'eau est un diffuseur plutôt spéculaire; c'est même le seul, aux incertitudes de mesures près.
- pour les autres corps, l'effet de stéréoradiométrie croît en raison inverse de la densité de végétation, pour le vert et le rouge; dans l'infra-rouge, cet effet est très faible mais plus élevé pour les sols nus et la végétation dense que pour la végétation peu dense.

Tout ceci est conforme à note attendue: l'eau se comporte partiellement comme un réflecteur, les autres corps sont en général plutôt des rétro-diffuseurs.

Etant donné la configuration particulière de notre test, l'effet principal peut s'expliquer par un raisonnement simple: si on considère que le sol est composé de 2 types de réflectances lambertiennes (r_1 et r_2), la variation du rapport de réflectance devra être proportionnelle à $r_1 - r_2$. Deux facteurs macroscopiques interviennent: pour un sol homogène, un effet d'ombre locale de taille faible devant celle du pixel, et pour un sol hétérogène s'ajoute l'effet du aux deux composantes de réflectance. Dans la configuration géométrique de notre essai, ces 2 aspects vont dans le même sens pour le vert et le rouge (réflectance de la végétation inférieure à celle du sol) et dans le sens contraire dans l'infra-rouge. Cette décomposition simpliste permet d'expliquer qualitativement le phénomène observé dans notre cas, mais demande à être confirmé par examen d'images prises sous un plus grand nombre d'angles de visée.

VI. CONCLUSION

La calibration absolue approchée d'images Spot est réalisable à l'aide d'un modèle numérique de terrain sans mesure particulière de paramètres atmosphériques. Elle doit permettre une amélioration des qualités des raccords de mosaïques d'images, des résultats de classification, et des études multitemporelles.

L'effet de stéréoradiométrie est sensible dans les 3 canaux de Spot, mais surtout dans le rouge où il ne peut pas être négligé lors d'études multitemporelles impliquant des angles de visées différents. Le problème inverse, qui est d'essayer de corriger cet effet pour la comparaison d'images prises sous des angles différents ne semble pas aisément soluble actuellement, ce qui, malheureusement, limite l'intérêt du dépointage pour le suivi temporel précis d'objets peu connus a priori (réflectance bidirectionnelle non modélisable), lorsque les variations de réflectance entre dates ou entre objets sont inférieures à 30%.

Par contre, cet effet qui semble lié principalement à la densité du couvert végétal, pourrait s'expliquer par un effet de "parties vues-parties cachées" et permettrait de donner des informations supplémentaires pour la caractérisation des objets naturels au sol.

STRATIFICATION DE L'ESPACE URBAIN QUITENIEN DANS UNE PROBLEMATIQUE DEMOGRAPHIQUE. APPLICATION A QUITO (EQUATEUR)

Alain MICHEL, Bernard LORTIC, Françoise DUREAU, Olivier BARBARY

Avertissement : dans cette communication, qui reprend de larges extraits des communications présentées aux colloques ISTED et PIXIM 88 (voir bibliographie), nous exposerons plus particulièrement les méthodes et résultats obtenus en matière de télédétection, après avoir re-situé cette étude dans le contexte plus général du programme de recherche.

Les caractéristiques de l'urbanisation dans les pays en développement, les modes particuliers de résidence des habitants et la rareté des éléments de connaissance classiques (cartes, plans cadastraux, fichiers administratifs) rendent les populations des villes de ces pays particulièrement difficiles à observer. Pourtant, les rythmes de croissance démographique très élevés et les modifications rapides du tissu urbain nécessitent des observations répétées. Les méthodes classiques de collecte de données démographiques se révèlent difficiles à mettre en œuvre. Le coût de la collecte et les durées d'exploitation limitent la périodicité des recensements à un rythme d'environ 10 ans, insuffisant pour un suivi des populations citadines ; quant aux enquêtes par sondage, l'absence de base de sondage complète et à jour hypothèque généralement leur réalisation et leur fiabilité.

Face au manque de données démographiques récentes auquel sont confrontées les autorités de ces villes, il paraît nécessaire de développer de nouvelles méthodes adaptées à leur spécificité démographique. A cet effet, la télédétection spatiale, assurant une observation continue et relativement précise (THEMATIC MAPPER et SPOT) de l'occupation du sol, constitue une source de données particulièrement intéressante : comme l'ont montré les travaux réalisés sur photographies aériennes depuis les années cinquante, **on peut utiliser avec profit l'information exhaustive sur la morphologie urbaine pour recueillir rapidement, par sondage, des données relatives aux populations urbaines.**

L'objectif central du programme de recherche que nous menons à l'Orstom depuis 1985 est donc de mettre au point un système d'observation permanent des populations urbaines, en intégrant l'information apportée par les satellites à haute résolution sur la morphologie urbaine. A l'issue de deux années de développement méthodologique mené sur les villes de

Marseille et Quito, nous avons effectué en décembre 1987 une enquête démographique par sondage, sur un échantillon d'ilots tiré de l'image satellite SPOT.

I. LA METHODE DE SONDAGE PRATIQUEE A QUITO : FONDEMENT ET DEFINITION

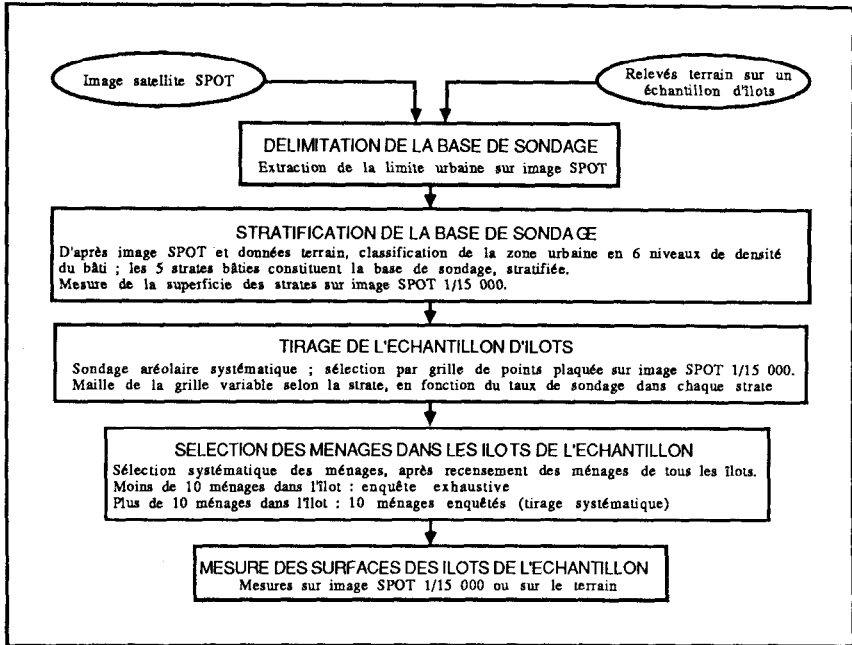
La définition du plan de sondage de l'enquête Démographie-migrations réalisée en décembre 1987 à Quito repose sur deux types de travaux réalisés depuis 1985 :

- l'expérience menée sur la ville de Marseille : cette ville disposant dès 1985 des informations de référence nécessaires à une première phase de développement méthodologique (image satellite Thematic Mapper, photographies aériennes à grande échelle, et recensement de la population exploitable au niveau de l'ilot), nous avons pu, non seulement développer, mais encore tester la validité de méthodes d'interprétation d'image satellite à haute résolution et de sondages spatiaux;
- les recherches effectuées sur le site de Quito : l'exploitation de deux enquêtes préliminaires a permis de préciser et compléter les résultats méthodologiques obtenus sur la ville de Marseille. L'enquête Morphologie urbaine (octobre-décembre 1986) a consisté à relever de manière précise l'occupation du sol de 199 ilots de Quito, afin d'initialiser et tester la fiabilité des traitements des images satellite ; l'exploitation des données démographiques recueillies sur un sous-échantillon de 55 ilots choisis parmi les 199 enquêtés sur le plan morphologique (enquête Bâti/population, avril 1987) est à l'origine de résultats complémentaires à ceux obtenus sur la ville de Marseille, en matière de sondages.

Ces deux phases de la recherche ont donné lieu à un grand nombre de résultats méthodologiques ; rappelons-en trois d'entre eux, fondamentaux, qui soulignent l'intérêt de pratiquer un sondage par grille sur une image satellite classée selon la densité du bâti:

- 1) Parmi les stratifications actuellement réalisables sur image satellite, la plus efficace est une stratification en six niveaux de densité du bâti dont le premier niveau permet d'isoler les espaces non construits, exclus de la base. Pour l'estimation des effectifs, le gain que permet la stratification en cinq niveaux de densité du bâti se situe autour de 50 % du coefficient de variation.
- 2) Le caractère systématique du sondage aréolaire (réalisé à l'aide d'une grille), en assurant une bonne répartition géographique de l'échantillon, améliore la précision des estimations. On évalue ce gain à 20 ou 30 % de la variance du sondage strictement aléatoire au même taux.
- 3) Les tests effectués mettent en évidence l'intérêt de pratiquer un sondage à deux degrés avec comme unités primaires les **pâtés de maisons** et comme unités secondaires les **ménages**.

Les différentes conclusions issues des expériences de Marseille et Quito trouvent leur première application pratique dans la définition de la méthode de sondage retenue pour l'enquête Démographie-migrations de Quito ; la figure ci-dessous résume le plan de sondage adopté, en présentant les différentes étapes correspondant à sa mise en oeuvre.



II. DELIMITATION DE LA BASE DE SONDRAGE : UNE AIDE A LA DETERMINATION DE LA LIMITE URBAINE

L'objectif est ici de mettre au point une méthode simple **d'aide à la décision** pour définir la limite urbaine, à partir d'une **analyse numérique** de l'image SPOT.

Choix des néo-canaux.

La lecture de la littérature ainsi que l'analyse visuelle des différents canaux et néo-canaux de SPOT conduite lors de la délimitation visuelle nous a incités à choisir l'indice de végétation et l'écart-type local calculé sur le canal panchromatique à l'intérieur d'une fenêtre 5*5. La prise en compte simultanée de ces 2 facteurs permet de discriminer la zone urbaine caractérisée par une **activité chlorophyllienne détectable par satellite quasi-nulle** (sauf espaces verts, parcs et stades) et une **hétérogénéité locale forte** (peu de plages homogènes).

Choix des seuils.

L'établissement des seuils dans chaque néo-canal a été effectué visuellement l'un après l'autre, en prenant comme **principal critère la compacité** des zones ainsi obtenues. La délimitation visuelle n'a évidemment pas été consultée pendant cette phase de spécification. Nous avons ainsi défini 4 classes dans l'espace des 2 néo-canaux.

Indice de végétation		
	de 0 à 176	de 177 à 255
de 0 à 3 Ecart-type local de 4 à 255	minéral homogène	végétal homogène
	minéral hétérogène	végétal hétérogène

La limite urbaine est donc théoriquement confondue, ou du moins incluse, dans la classe minéral hétérogène. Nous avons ensuite lissé l'image résultante par convolution majoritaire dans une fenêtre 5*5 pixels, afin de supprimer les zones de faible taille et de ne conserver que les grandes frontières entre classes .

Résultats - Validation du traitement par comparaison avec la limite observée visuellement et vérifiée sur photographies aériennes.

La limite de la classe minéral hétérogène est dans toute la partie Nord, très proche de la délimitation déterminée visuellement. Lorsque l'on érige des règles de délimitation plus complexes s'éloignant de la réalité physique et intégrant l'urbanisation future ou la répartition de la densité, des écarts importants comme ceux rencontrés dans le Sud peuvent apparaître. Cependant, **ce traitement simple permet de définir aisément une limite urbaine pertinente sur des critères physiques constants**, alors que le principal écueil d'une délimitation totalement visuelle sur tirages photographiques consiste à dériver progressivement des règles initialement fixées, en particulier lorsque plusieurs documents différents sont utilisés.

Ce traitement a donné des résultats positifs à partir d'une image de Quito. Si la méthode paraît facilement transportable, il demeure cependant que la fiabilité d'un tel traitement est très dépendante de l'environnement immédiat de la ville étudiée. Dans notre cas, l'environnement est favorable sur les flancs Est et Ouest (végétation dense arborée ou herbacée), plus délicat à traiter dans le Nord (tissu industriel peu dense et agriculture) et pose des difficultés inhérentes aux règles de décision fixées dans le Sud (urbanisation discontinue et éparse).

III. SEGMENTATION DE L'IMAGE SPOT : EXTRACTION DU RESEAU DE VOIRIE

Pour faire apparaître les phénomènes urbains qui nous intéressent, ici la densité du bâti, nous avons pu constater l'avantage, en site urbain, du traitement d'image satellite (densité du bâti par exemple) dans des **zones pré-définies** par rapport à un traitement classique par pixel. Cet avantage nous est apparu lorsque nous avons travaillé sur les images Thematic

Mapper de la ville de Marseille¹. Dans ce cas précis, ces zones pré-définies résultaient de zonages visuels pour la morphologie du tissu urbain établis sur photographies aériennes et d'un zonage administratif imposé en ce qui concerne les îlots INSEE. Ces différents zonages ont été numérisés puis superposés à l'image satellite après redressement de cette dernière. Une telle superposition a permis de générer des statistiques radiométriques par zone, le traitement de ces statistiques permettant la différenciation des différents tissus urbains.

Tel n'est pas le cas à Quito, où nous nous plaçons dans une situation d'application pratique de la méthode de sondage spatial sur image satellite : nous n'utilisons aucune information autre que les documents satellitaires, et n'utiliserons donc pas la numérisation des différents pâtés de maisons. Or, c'est justement cette entité, le pâté de maisons, qui doit servir de base pour la définition des unités spatiales d'enquête.

Il s'agit donc dans un premier temps de tester la fiabilité d'une extraction automatique de la voirie devant permettre la création de zones, une zone étant l'unité spatiale incluse à l'intérieur des contours de la voirie adjacente. Cet objectif est atteint en trois étapes :

- l'extraction de la voirie,
- la reconstruction des contours (réseaux de voirie), chaque zone devant impérativement être fermée;
- la classification de l'ensemble des zones préalablement labellisées en fonction de la densité du bâti établie sur échantillon afin d'obtenir une stratification de l'espace urbain.

L'objectif de ce chapitre est d'exposer ces différents traitements à mettre au point, les choix qui devront être effectués à chaque étape, les problèmes qui en découlent et enfin les résultats obtenus.

La **morphologie mathématique**, en teinte de gris sur image en trame carrée, d'un développement récent [SERENDERO M.A., 1987],[DESTIVAL I.,1987], offre des chaînes de traitements séduisantes, rapides en temps calcul et d'une mise en oeuvre aisée, ce qui n'est pas toujours le cas en ce qui concerne les méthodes plus classiques. Nous avons donc décidé de tester ces "nouvelles" méthodes sur l'image satellite SPOT de Quito.

Définition de la chaîne de traitement choisie pour extraire la voirie

Les réseaux routiers principaux se singularisent sur une image satellite par 3 facteurs essentiels :

- leur réponse radiométrique (sur image panchromatique) très faible
- leur finesse spatiale
- leur configuration linéaire

Une opération de morphologie mathématique en teinte de gris est particulièrement adaptée pour prendre en compte la **combinaison** des 2 premières caractéristiques; il s'agit de la transformation "**chapeau haut de forme**".

Nous avons travaillé sur une image résultant de la somme du canal panchromatique et du proche infra-rouge (canal XS3) afin de bénéficier de la résolution spatiale optimum (panchromatique) et du pouvoir discriminant de la radiométrie infra-rouge (canal XS3).

¹Voir Bibliographie équipe ORSTOM

Extraction des vallées

Si l'on considère un transect dans l'image sous la forme d'un histogramme des valeurs de gris, les réseaux apparaissent comme des vallées profondes (ils possèdent une très faible valeur) de faible amplitude (les réseaux ne sont pas larges d'un point de vue spatial). Il s'agit donc d'isoler ce phénomène afin de mieux pouvoir extraire la voirie. Cette mise en évidence est obtenue après les convolutions décrites ci-dessous :

- "**fermeture**" de l'image à l'aide d'un masque 3*3 connexité 8. Cette transformation se décompose en 2 opérations de base effectuées l'une après l'autre :
- une "**dilatation**", cela revient de façon intuitive à **combler les vallées et à épaissir les pics**.
- une "**érosion**", qui revient à l'inverse à **réduire les pics et à élargir les vallées**.
- **soustraction** de l'image "fermée" à l'image origine et seuillage.

Nous obtenons donc une image binaire où n'apparaissent que les vallées, c'est à dire principalement les éléments de voirie qui nous intéressent.

Amincissement du réseau par itérations successives

Nous considérons l'image obtenue à l'issue de ces traitements comme bruitée, par exemple par des pixels doublés, informatifs de la largeur de la voirie, alors que seule l'information contour nous intéresse. Nous allons donc procéder à un amincissement des éléments de voirie extraits afin de conserver que la présence des éléments linéaires. Ces éléments de voirie sont codés 1 (élément de contour). L'avantage de ce traitement (succession de 8 érosions de l'image binaire, chacune de ces érosions étant effectuée dans l'une des 8 directions possibles 0°, 45°, 90°, 135°, 180°, 225°, 270° et 315°) réside dans le fait qu'il n'interrompt pas les éléments linéaires; **il préserve la connexité des éléments de voirie**. Cette succession de 8 érosions (chacune avec un élément structurant différent) est menée jusqu'à idempotence, c'est à dire jusqu'à ce qu'aucun changement n'intervienne. C'est la réalisation classique d'un squelette par amincissements successifs.

Amélioration de l'extraction de la voirie

Fermeture des contours.

Il est souhaitable de prolonger la méthode que nous avons développée en soumettant notre image à des algorithmes de suivi de contour. La littérature est très abondante sur ce sujet. La méthode préconisée par [MILGRAM et Al], testée sur photographie aérienne numérisée, paraît adaptée à notre cas.

Cette méthode se fonde sur l'idée principale qu'un point selle, présente la particularité d'être un point où la fonction "distance au point contour le plus proche" passe à la fois par un maximum dans une direction et par un minimum dans une autre direction.

Suppression des zones de 1 pixel

Afin de limiter le nombre de zones, et de ne tenir compte que des zones de taille raisonnable, nous avons décidé de supprimer les zones ne s'étendant que sur 1 pixel. Suivi d'un amincissement 8 directions, cette convolution à pour effet de supprimer les zones de surface inférieures ou égale à 1.

Ebarbulage

La majorité des segments étant à présent reconnectés, nous effectuons un ébarbulage réitéré jusqu'à idempotence afin de supprimer les segments de faible longueur.

Suppression des pixels isolés

Pour nettoyer l'imagette des pixels déconnectés d'un élément de réseau nous avons balayé l'imagette à l'aide d'une fenêtre 3*3. Lorsque l'on rencontre la configuration correspondant à un pixel déconnecté d'un segment, le pixel central prend la valeur 0 (intérieur de zone).

Evaluation de la fiabilité de l'extraction automatique de la voirie par comparaison avec une cartographie 1/2 000.

Parvenu à cette étape de notre travail, il nous a semblé indispensable d'évaluer la fiabilité du traitement d'extraction de voirie présenté plus haut. La méthode la plus appropriée consisterait à comparer les éléments de réseau obtenus automatiquement à partir de l'image SPOT (Pa+XS) avec le réseau tel qu'il existe réellement. Compte tenu d'impératifs de temps, une telle opération n'est pas envisageable sur la totalité de la ville; néanmoins, il est concevable de sélectionner une petite zone incluant la plupart des configurations (en terme d'association des différents éléments urbains d'une part et de réseau de voirie d'autre part). C'est dans cet objectif, que nous avons réalisé une numérisation de la voirie quiténienne à partir d'une cartographie 1/2 000, afin de pouvoir superposer sous forme numérique l'image du réseau de voirie issue de cartographie à grande échelle avec l'image de l'extraction. Une telle superposition n'est en effet réalisable que sous cette forme compte tenu de la déformation de l'image SPOT par rapport à la cartographie existante, et donc de la nécessité de corriger géométriquement cette image.

Recalage des deux images

Une rapide confrontation des 2 images (satellite et cartes numérisées) nous a convaincu de la nécessité de recalibrer l'image satellite en fonction de la carte numérisée. La méthode choisie est classique, elle consiste à déformer l'image originale en fonction d'un polynôme de déformation. Les coefficients de ce polynôme de degré 3 sont calculés à partir des coordonnées des amers dans chacune des deux images. L'angle de visée important du satellite (22° R) allié avec le relief chaotique de la ville génèrent une déformation locale de l'image satellite qu'il n'est pas possible de corriger entièrement à l'aide de ce seul type d'algorithme.

Evaluation de la méthode d'extraction automatique de la voirie

Après avoir recalibré les deux images, nous avons appliqué à l'image satellite la chaîne de traitement décrite plus haut. Une combinaison colorée trois couleurs (bleu : réseau de voirie numérisé; vert : extraction automatique de la voirie; gris : panchromatique SPOT) montre clairement que ce principe d'extraction de vallée sous-jacent à l'extraction de la voirie est inapproprié dans les parties de l'image où la voirie apparaît comme plus claire que le fond plus foncé constitué de végétation. L'image résultant de tous ces traitements simples n'est pas satisfaisante dans un strict objectif d'extraction de la voirie :

- tous les éléments de voirie ne sont pas extraits
- des pixels qui ne sont pas de éléments de voirie ont été pris en compte.

Certaines rues, et en particulier celles de moindre importance, peuvent être revêtues d'un matériau autre que le bitume. C'est le cas à Quito où la voirie des quartiers sub-urbains est constituée de terre de couleur claire. Le traitement "chapeau haut de forme" tel qu'il a été ici décrit n'est bien sûr pas approprié pour les extraire

En ce qui concerne le second point, il semblerait que nombre de ces erreurs soient dues à l'ombre de certains bâtiments. D'une part, la réflectance très faible des surfaces à l'ombre s'apparente à celle du bitume qui constitue la nature principale de la voirie et d'autre part, les pixels d'ombre se regroupent par petits amas de faible effectif. On notera qu'une multitude de petits segments sont représentés à l'intérieur des pâtés de maisons et que ce ne sont pas les réseaux les plus importants qui ressortent le plus fidèlement.

Extraction automatique	Référence	Ilot	Réseau
	Ilot	67 %	11 %
	Réseau	17 %	5 %

Matrice de confusion extraction automatique de la voirie / numérisation du réseau

Fiabilité globale : 72 %

La matrice de confusion ci-dessus illustre les résultats d'un croisement entre l'image du réseau générée par numérisation des cartes et l'image résultant de l'extraction automatique de la voirie.

IV. STRATIFICATION DE LA BASE DE SONDAGE :

CLASSIFICATION DE L'IMAGE SATELLITE SUIVANT LA DENSITE DU BATI

L'extraction de voirie précédemment décrite n'a que pour objet de délimiter des zones sans faire appel à un critère proprement radiométrique qui aurait permis de segmenter automatiquement l'image. En effet, notre but est de classer l'image en fonction d'une densité d'espace bâti mesurée sur échantillon. Les entités à classer sont les zones ainsi délimitées.

La classification que nous présentons ici est issue du seuillage d'une régression polynomiale.

L'échantillon de travail des 173 ilots a été scindé en deux en respectant la proportionnalité de chacune des 6 modalités de densité du bâti :

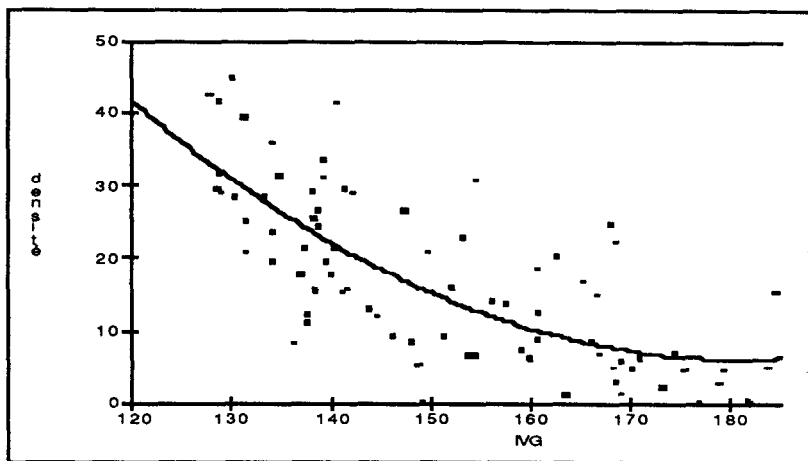
- un sous-échantillon d'initialisation (87 ilots),
- un sous-échantillon de vérification (86 ilots)

Régression polynomiale

A l'instar des classifications effectuées sur l'image Thematic Mapper de Marseille, nous avons cherché quel est le canal, néo-canal ou indice le plus corrélé avec la densité du bâti estimé sur notre échantillon d'initialisation. De même que sur l'image Thematic Mapper de Marseille, l'indice de végétation verte (noté IVV) s'est avéré comme le plus pertinent pour évaluer la densité du bâti. Pour un seuil de signification à 99 % nous obtenons les résultats suivants :

CANAUX	CORRELATION	ECART-TYPE résiduel	S.C.E résiduelle	F FISHER
IVG	-.751	7.8	4928	52.39

$$BATI = 0.01*IVV^2 - 3.47*IVV + 320$$



Ces coefficients ont été appliqués à chaque moyenne (une par zone) calculée à partir de l'indice de végétation. Nous avons donc obtenu une valeur (une "densité du bâti") pour chacune des zones de notre image. En fonction des seuils calculés à partir des manzanas de l'échantillon pour chacune des 6 modalités de densité du bâti, nous avons affecté chaque zone à une des 6 classes. La classe "voirie" est codée 0.

Validation

Avant de valider cette classification, nous avons opéré un lissage majoritaire conditionnel (pour les pixels contour uniquement). Les pixels délimitant la voirie n'offrant plus aucun intérêt de notre point de vue, la valeur majoritaire à l'intérieur d'une fenêtre 3*3 leur a été affectée. Les valeurs qui suivent représentent la fréquence croisée (en pourcentage) des îlots de l'échantillon de validation référencés dans la modalité "Référence" et classés dans la modalité "Classe".

Confusion	Classe 1	Classe 2	Classe 3	Classe 4	Classe 5	Classe 6
Référence 1	2 %	0	0	0	0	0
Référence 2	14	18 %	2	2	0	0
Référence 3	1	6	6 %	12	4	0
Référence 4	0	1	4	5 %	4	0
Référence 5	0	2	1	4	7 %	2
Référence 6	0	0	0	0	2	0 %

Matrice de confusion entre les classes de référence (Référence) et les classes d'affectation (Classe). Les valeurs sont exprimées en pourcentage

Deux principales confusions apparaissent, d'une part entre la classe non bâti (1) et la référence très faible (2), d'autre part entre la classe moyenne (4) et la référence faible (3).

La fiabilité de cette classification est donc :

38 % en 6 classes

72 % en 3 classes obtenues en regroupant les classes 1 et 2, 3 et 4, et 5 et 6.

CONCLUSIONS

Compte tenu des résultats obtenus, l'extraction automatique de la voirie ne doit être considéré que comme un **résultat intermédiaire** indispensable pour segmenter l'image en zones dans lesquelles il est alors possible de calculer une densité. La multiplicité, et donc la complexité résultante, des associations des divers matériaux constituant l'espace urbain incite à la prudence quant aux possibilités d'une amélioration sensible de la chaîne d'extraction. Des prétraitements de type filtrage peuvent tout de même être envisagés .

En terme de fiabilité, les résultats des classifications sont comparables à ceux enregistrés lors de l'expérimentation marseillaise avec une image **Thematic Mapper**. Une information concernant l'infra-rouge moyen aurait certainement permis une amélioration sensible des résultats de la classification.

Cependant, l'objectif final est atteint, puisqu'une stratification de l'espace bâti issue de la classification de l'image SPOT amène un gain très sensible quant à la précision des indicateurs démographiques (entre 40 et 50 %).

Le logiciel **PLANETES**, de l'Unité de Télédétection de l'ORSTOM, développé par M. RAKOTO-RAVALONTSALAMA a été utilisé pour tous les traitements d'image satellite.

BIBLIOGRAPHIE SUCCINCTE

- BASSEVILLE M., 1979 - Détection de contours: méthodes et études comparatives, *Annales des télécommunication*, Tome 34, n°11,12, pp 559-579.
- COSTER M., CHERMANT J.L., 1985 - Précis d'analyse d'image, pp 335-380, éd CNRS.
- DESTIVAL I., 1987 - Recherche automatique des réseaux linéaires sur les images SPOT, *Société Française de Photogrammétrie et de Télédétection*, Bull. 108.
- JEANSOULIN R., 1982 - Reconnaissance automatique du parcellaire, *Compte rendu du colloque Le système SPOT d'observation de la terre*, pp 259-274, éd G Rochon, A Chabreuil.
- MILGRAM M., COQUEREZ J.P., 1986 - Fermeture des contours par un opérateur local, *traitement du signal*, Vol 3, N° 6, pp 302-311.
- NAGAO M., MATSUYAMA T., 1980 - A structure analysis of complexe aerial photographs, 199 P, Plenum Press, New-York and London.
- SERENDERO M.A., BERTHOD M., 1987 - Extraction des réseaux fins par un suivi directionnel de lignes de crêtes et de vallées, *Colloque SPOT 1*, 23-27 Novembre 1987, 8pp.
- SERRA J., 1986 - Image analysis and mathematical morphologie, Academic Press.
- BARBARY O., 1988. - Sondages aréolaires pour l'estimation de données démographiques en milieu urbain. Essai de définition d'une méthode de collecte intégrant l'information satellitaire, application aux villes des pays en développement. Thèse de doctorat, Ecole des Hautes Etudes en Sciences Sociales, 641 p.

PRINCIPALES PUBLICATIONS DE L'ÉQUIPE ORSTOM

- BARBARY O., 1988. - Sondages aréolaires pour l'estimation de données démographiques en milieu urbain. Essai de définition d'une méthode de collecte intégrant l'information satellitaire, application aux villes des pays en développement. Thèse de doctorat, Ecole des Hautes Etudes en Sciences Sociales, 641 p.
- DUREAU F. et GUILLAUME A., 1984. - La démographie depuis l'espace : un nouveau système d'observation? Paris, STATECO n° 38, pp. 5-46.
- DUREAU F. et GUILLAUME A., 1985. - La population dans l'espace. Télédétection et observation démographique des villes des pays en développement. Communication au XXe congrès général de l'Union Internationale pour l'étude scientifique de la population, Florence (Ital.), Juin 1985.
- DUREAU F., 1986. - A propos du traitement informatique de données localisées. Une expérience en cours : télédétection et observation des populations urbaines. Paris, ORSTOM, collection Colloques et séminaires, Numéro sur le traitement des données localisées, pp.263-286.
- MICHEL A., DUREAU F., LORTIC B., SOURIS M., 1987. - Mise au point des méthodes d'analyse des images satellite à haute résolution et évaluation de informations fournies par ces images. 1 : Etude statistique du descripteur "densité du bâti". Présentation des classifications 2. Mise en évidence des réseaux routiers sur une image SPOT panchromatique. Etude de faisabilité sur QUITO (Equateur). Paris, Service Technique de l'Urbanisme, Bilan sur la télédétection urbaine en France, Octobre 1987.
- DUREAU F., LORTIC B., MICHEL A., SOURIS M., 1987. - Informatique, télédétection et observation des populations urbaines. Une recherche en cours à QUITO (EQUATEUR). Communication à la Primera Conferencia Latinoamericana sobre informatica en geografia, San José, Costa Rica, 5-9 Octobre 1987.
- DUREAU F., BARBARY O., LORTIC B., MICHEL A., 1988. - Utiliser la télédétection spatiale pour produire rapidement des données démographiques en ville. L'exemple de Quito (EQUATEUR). Communication au colloque Gestion urbaine et développement, ISTEED, Lyon (FRANCE), 20-22 septembre 1988, 6p.
- DUREAU F., LORTIC B., MICHEL A., SOURIS M., 1987. - Télédétection et système d'information géographique. Communication au Forum International de l'Instrumentation et de l'Information géographiques, Lyon (France), 10-13 Juin 1987, 15 p.

- MICHEL A., EBERHARD J.M., LORTIC B., DUREAU F., 1987. - L'utilisation de la télédétection pour l'observation des populations urbaines. Une recherche en cours à Quito (EQUATEUR). Communication au colloque SPOT, Paris, 23-27 Novembre 1987, 9p.
- MICHEL A., LORTIC B., BARBARY O., DUREAU F., SOURIS M., 1988. - Segmentation et classification d'une image satellite SPOT en milieu urbain. Application à la ville de Quito (Equateur). Communication au colloque PIXIM 88, Paris, 24-28 Octobre 1988, 17 p.
- MICHEL A., 1988. - Stratification de l'espace urbain à partir d'images satellite pour réaliser un sondage à objectif démographique. Mise au point et évaluation des méthodes d'analyse des images SPOT et THEMATIC MAPPER en milieu urbain. Thèse de Doctorat, Ecole des Hautes Etudes en Sciences Sociales, 2 Vol.

CONTRIBUTION A LA CARTOGRAPHIE DES ETATS DE SURFACE D'UN BASSIN VERSANT SAHELIEU ET AU SUIVI DE LEUR EVOLUTION : RECOUVREMENT DE LA VEGETATION ET PHYTOMASSE HERBACEE

Jean Louis DEVINEAU

Ce travail a été réalisé dans le cadre d'un contrat ORSTOM/PEPS (N°149, responsable J.M. LAMACHERE). Les résultats présentés ici concernent la végétation, ils font cependant partie d'un programme pluridisciplinaire plus vaste de cartographie des états de surface d'un bassin versant sahélien mis en oeuvre par une équipe de cinq chercheurs: J.M. LAMACHERE (hydrologue), J.L. DEVINEAU et A. FOURNIER (phytoécologues), C. MALEK (géomorphologue) ainsi que B. LORTIC de l'unité de télédétection de Bondy.

Ce programme s'inscrit dans les travaux de l' ORSTOM sur la modélisation de l'écoulement des eaux sur des bassins versants sahéliens grâce à des simulations de pluie sur le terrain et à la cartographie des états de surface par classification multispectrale d'une image satellitaire (CHEVALLIER *et al*, 1985, ALBERGEL *et al*, 1987).

Les mesures de ruissellement montrent l'influence du couvert végétal sur l'infiltration superficielle de l'eau, c'est pourquoi l'étude de la végétation, en particulier l'estimation du recouvrement et de la phytomasse herbacée, était un des principaux objectifs du programme PEPS-OURS. Grâce au satellite SPOT, des images spatiales ont été obtenues en saison pluvieuse. Sur les quatre images acquises par le programme, deux (9 août et 4 septembre 1986) se situent ainsi au cours de la période de végétation, la seconde correspondant au maximum de phytomasse pour la plupart des milieux.

I. COLLECTE DES DONNEES DE TERRAIN

I.1. Plan d'échantillonnage

La distribution des sites sondés est fondée sur un échantillonnage stratifié faisant intervenir des critères radiométriques ainsi que les critères physiographiques habituellement retenus (géomorphologie, position topographique, physionomie de la végétation, etc.),.

Une simulation SPOT de 1981 a en effet permis de "stratifier" la zone étudiée à partir de l'examen d'une composition colorée et d'une classification automatique de l'image réalisée par B. LORTIC et C. MALEK.

Le nombre de sites sondés a été limité par la nécessité d'effectuer les mesures au sol de façon synchrone avec le passage du satellite. Les campagnes de terrain se sont ainsi déroulées sur une période d'une dizaine de jours, centrée sur la date de passage du satellite.

La prise en compte de l'aspect "coût en temps" de l'échantillonnage est intervenue dans le choix des techniques d'estimation des différentes variables du couvert. C'est pourquoi, par exemple, des techniques d'échantillonnage systématique en ligne ont souvent été utilisées.

I.2. Echelle d'estimation des descripteurs

Deux impératifs gouvernent le choix de la taille des parcelles inventoriées.

Le premier est lié au pouvoir de résolution du satellite et à la précision des repérages.

Il est généralement admis que les dimensions minimales (A) des parcelles échantillons s'estiment par la formule:

$$A = P(1+2L)$$

où P = dimension du pixel et

L = précision du repérage en nombre de pixels. (JUSTICE *et al.*, 1981).

Pour une précision de localisation de +/- 1 pixel, en mode multispectral SPOT, l'aire minimale serait de 60x60m, mais cette taille a semblé trop faible pour tenir compte du second impératif qui est lié à la représentativité thématique des parcelles inventoriées et à leur variabilité intrinsèque.

A Oursi les études au sol, l'analyse de la simulation SPOT de 1981 ainsi que les conclusions des travaux de LEVANG (1978) et LEVANG *et al* (1980) ont conduit à définir des sites de plus grande taille sur lesquels les mesures ont été réalisées le long de lignes de 500 à 1000 mètres qui permettent de prendre en compte la "macrohétérogénéité" des milieux (fig.1).

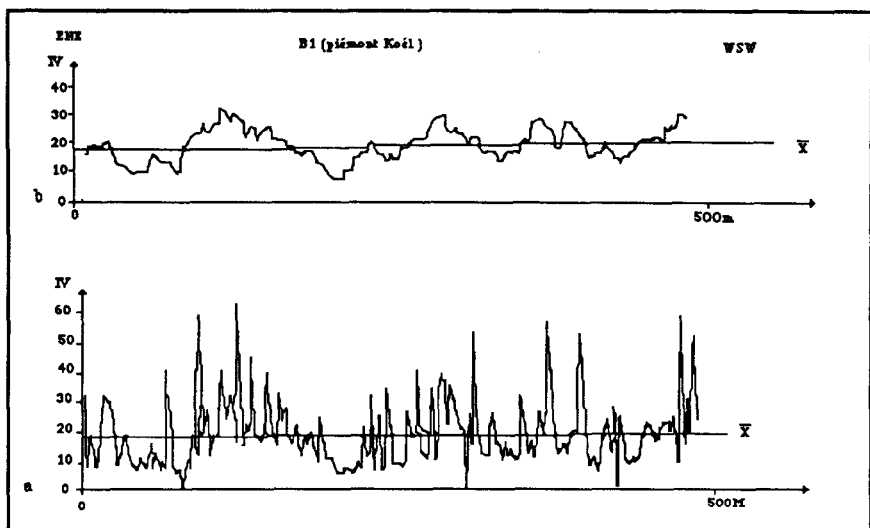


Figure 1. Exemple d'une série de mesures radiométriques réalisées à deux mètres au dessus du sol sur un glacis de piedmont

- a) variation de l'indice de végétation dans la série d'origine (une mesure tous les 2,5m)
 b) lissage avec un pas de 8 par la méthode des moyennes mobiles
 (une structure en plaque à l'échelle hectométrique apparait nettement)

I.3. Mesures et observations réalisées au sol

Mesures faites à chaque passage du satellite

-Estimation par "point-contacts" (200 points le long de lignes de 500m) du recouvrement, du phytovolume et de la part relative des parties vivantes et mortes au sein de la strate herbacée. A chaque date une trentaine de sites ont ainsi été sondés.

L'ensemble des sites sondés regroupe une large gamme de couvert herbacé. Fin juillet, sur dune le recouvrement varie de 39 à 86% avec une moyenne de 66%, la part relative du matériel vert étant de 92%. Fin août, la gamme des recouvrements observés va de 33 à 78% avec une valeur moyenne de 49%, ce qui représente une baisse sensible par rapport au mois précédent. Sur glacis les valeurs moyennes sont plus faibles, n'atteignant à leur maximum fin août, que 23% avec un taux relatif de matériel vert de l'ordre de 88% (fig.2).

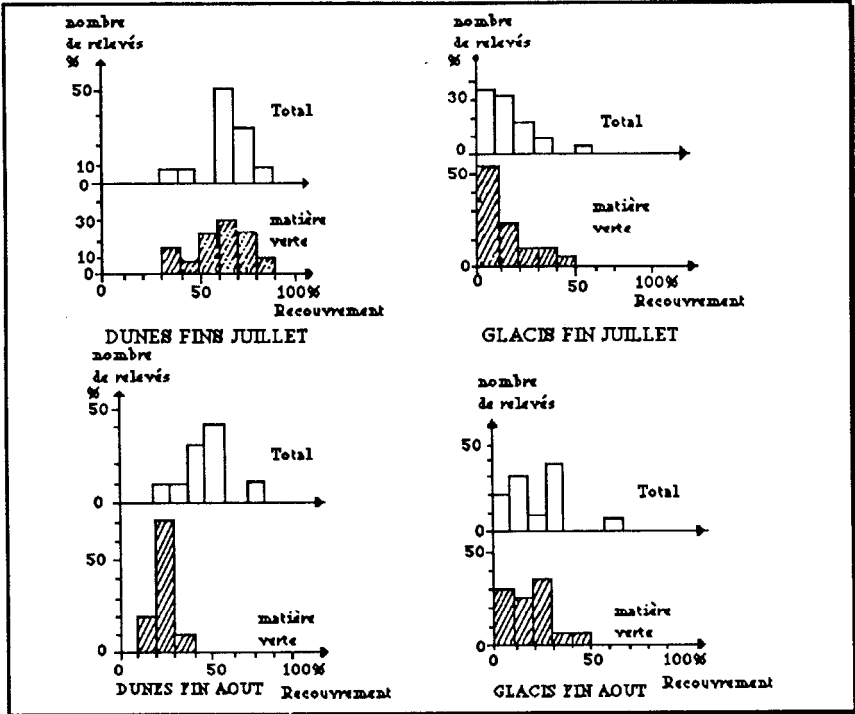


Figure 2. Répartition en classes de recouvrement herbacé des relevés effectués sur dunes N sur glaciais

-Sur un nombre plus restreint de sites (une dizaine à chaque date) ont aussi été réalisées:

- l'estimation des phytomasses par la méthode de la récolte (30 carrés de 1m^2 par site);
- des mesures radiométriques en série à 2m au dessus du sol, couplées, pour certaines, avec les mesures de phytomasse (radiomètre CIMEL).

Mesures faites une fois à la période la plus favorable

-Estimation du recouvrement ligneux, par la méthode de la ligne.

Les recouvrements linéaires ainsi obtenus sont faibles sur l'ensemble des sites observés. Les plus fortes valeurs rencontrées sur dune atteignent 11%, mais la valeur moyenne du recouvrement ligneux dans ces milieux n'est que de l'ordre de 2,5%. Sur glaciais le recouvrement ligneux moyen est sensiblement plus faible (1,6%), bien que des valeurs de l'ordre de 8% aient été localement rencontrées (fig.3).

-De plus l'inventaire floristique de tous les sites sondés a été réalisé en août et en septembre.

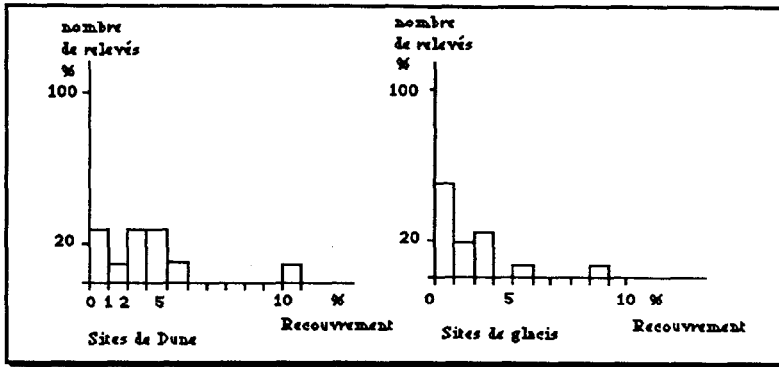


Figure 3. Répartition en classe de recouvrement arboré et arbustif des relevés effectués sur dune et sur glacis

II. RESULTATS

Aucune corrélation n'existe entre les différentes variables du couvert et les valeurs radiométriques des canaux S1 et S2 des images SPOT, ni sur la scène d'août ni sur celle de septembre (tab. I).

	GLAI	LAI	RV	RT	RTT
S1	0,113	0,115	0,120	0,139	0,148
S2	-0,034	-0,029	-0,045	-0,026	-0,016
S3	0,770	0,554	0,491	0,679	0,684
IVN	0,906	0,924	0,910	0,925	0,923

Tableau I. Valeurs du coefficient de corrélation entre les différentes variables du couvert et les valeurs radiométriques des canaux SPOT

a) scène du 9 août (ddl=25) (seuil 0,95= 0,380; 0,99= 0,490)

	GLAI	LAI	RV	RT	RTT
S1	0,009	0,052	-0,017	0,122	0,134
S2	-0,009	0,079	-0,038	0,181	0,195
S3	0,381	0,554	0,491	0,679	0,684
IVN	0,757	0,857	0,901	0,869	0,863

b) scène du 4 septembre (ddl=25)

GLAI, LAI: indice foliaire matière verte et matière totale;
 RV, RT, RTT: recouvrements, matière herbacée verte, totale, herbes + arbres;
 IVN: indice de végétation normalisé

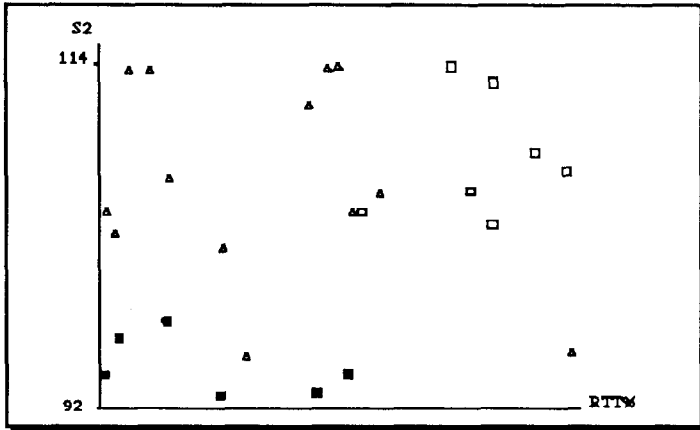


Figure 4. Corrélation entre le recouvrement total de la végétation et
a) le canal S2, (légende, voir figure 4c)

L'absence de corrélation entre le couvert végétal et la réflectance dans le canal S1 n'est pas surprenante. Elle l'est en revanche pour le canal S2, ordinairement sensible à l'absorption chlorophyllienne, où l'interférence de la couleur des sols est déterminante (fig.4a).

Des corrélations positives significatives existent en revanche avec le canal S3, néanmoins l'influence de la réflectance du substrat est encore perceptible (tab. 1a et b et fig.4b).

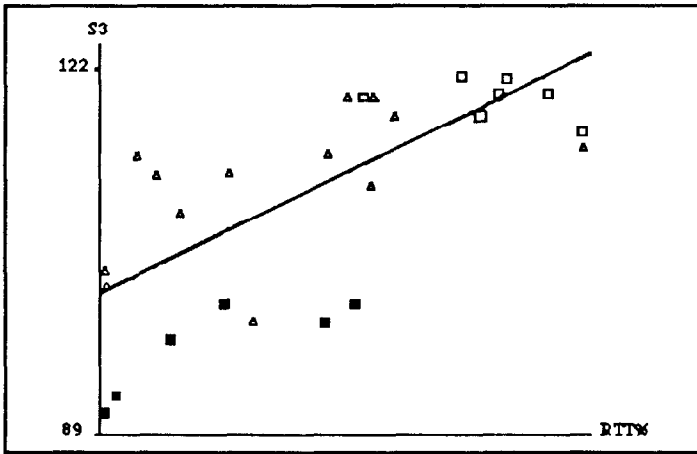


Figure 4. Corrélation entre le recouvrement total de la végétation et
b) le canal S3 (légendes, voir figure 4c)

Les meilleures corrélations sont obtenues avec l'indice de végétation normalisé: $IVN = \frac{S3 - S2}{S3 + S2}$ ¹ (tab. 1a et b et fig.4c).

¹L'indice de végétation normalisé a été calculé par la formule: $IVN = \frac{256 \cdot S3}{S3 + S2}$, pour être compatible avec la gamme des valeurs numériques des images SPOT (0-256).

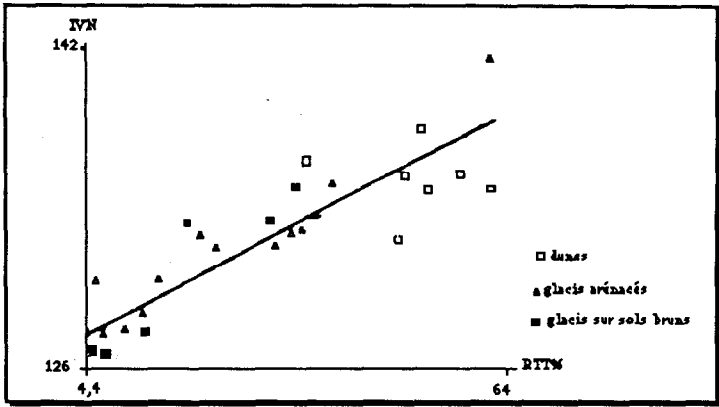


Figure 4. Corrélation entre le recouvrement total de la végétation et c) l'indice de végétation (vue du 4 septembre)

Une même loi de régression a pu être utilisée pour les images du 9 août et du 4 septembre (fig.5).

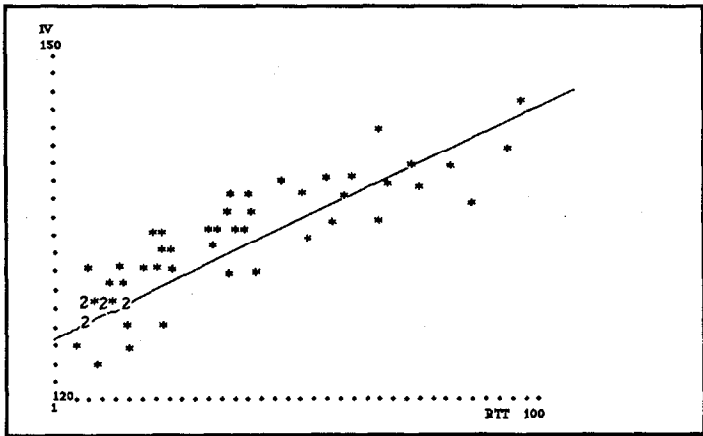


Figure 5. Régression entre l'indice de végétation (IV) et le recouvrement total de la végétation (RTT) (valeur d'août et de septembre réunies)

Les lois de régression linéaire sont les plus satisfaisantes pour les estimations par points-contacts, limitées aux zones de dunes et de glacis à recouvrement faible (maximum 86%). Les données relatives à la phytomasse, comprenant de fortes valeurs (5t/ha) en bord de mare sont en revanche mieux corrélées à l'indice de végétation après transformations logarithmiques (tab. II et III et fig.6).

	GLAI	LAI	RV	RT	RTT	LGLAI	LLAI	LRV	LRT	LRTT
IVN	.815	.896	.838	.896	.899	.857	.888	.868	.872	.876
LIVN	.806	.887	.831	.891	.893	.855	.887	.867	.871	.876

Tableau II. Valeurs du coefficient de corrélation entre l'indice de végétation et diverses variables du couvert végétal (valeurs d'août et de septembre réunies; ddl=51)

GLAI, LAI: indice foliaire matière verte et matière totale; LGLAI, LLAI: logarithmes;
RV, RT, RTT: recouvrements, matière herbacée verte, totale, herbes + arbres; LRV, LRT, LRTT: logarithmes;
IVN: indice de végétation normalisé; LIVN: logarithme.

	P	LP
IVN	.869	.888
LIVN	.862	.892

Tableau III: Valeurs du coefficient de corrélation entre l'indice de végétation et la phytomasse herbacée (valeurs d'août et de septembre réunies)

P: phytomasse herbacée (poids de matière sèche);
LP: logarithme;
IVN: indice de végétation normalisé;
LIVN: logarithme.

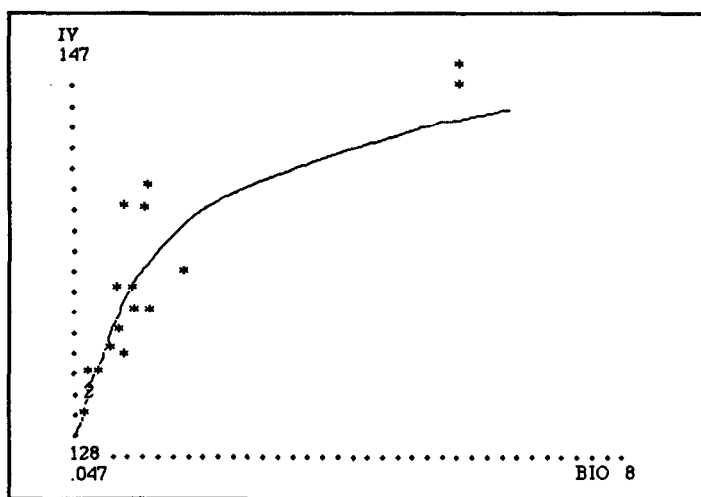


Figure 6. Régression entre la phytomasse herbacée (BIO) et l'indice de végétation (IV) (valeurs d'août et de septembre réunies)

Finalement les fonctions de régression retenues sont:

$$IVN = 0,188RTT + 125,27$$

et

$$IVN = 137,12P^{0,0279}$$

où

IVN = indice de végétation normalisé; RTT = recouvrement total de la végétation (herbes + arbres); P = phytomasse herbacée.

L'étude statistique des images spatiales permet d'estimer la phytomasse herbacée sur l'ensemble du bassin versant (à l'exclusion de la végétation de mare, des formations arborées de bas fonds et des massifs rocheux). La phytomasse moyenne calculée à partir de la scène du 9 août est ainsi de

0,540 t/ha, celle calculée à partir de la scène du 4 septembre de 0,708 t/ha. Ces valeurs correspondent respectivement à 34570 t et 45309 t sur les 64000 ha du bassin versant.

Il faut cependant remarquer qu'une large part de cette phytomasse est localisée dans les milieux les plus productifs: bords de mare, bas fonds et dépressions. C'est ainsi que les sites à forte phytomasse (4-5 t/ha), qui occupent en septembre moins de 5% du territoire étudié, contribuent pour plus de 30% au stock fourrager du bassin versant. A l'inverse, sur plus de 80% de la zone étudiée la phytomasse moyenne ne dépasse pas 0,250 t/ha, ce qui représente seulement 35% de la phytomasse du bassin versant (fig.7).

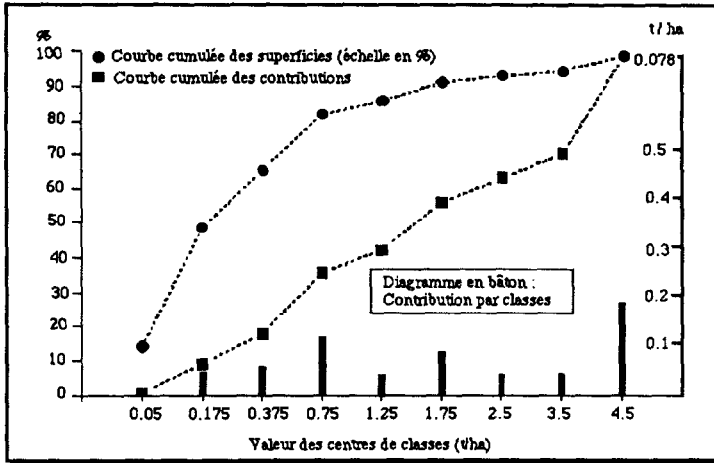


Figure 7. Contribution des différentes classes de phytomasse moyenne estimée sur le bassin versant à partir de la scène du 4 septembre

La valeur moyenne de 0,708 t/ha obtenue en septembre 1986 correspond à la phytomasse maximale présente en fin de saison des pluies. Elle est comparable à celles obtenues à Oursi par divers auteurs, à l'aide de méthodes ne faisant pas appel à la télédétection. L'utilisation du modèle de GROUZIS (1987) rapporté aux précipitations annuelles de 1986 (356mm)¹ donne ainsi une valeur moyenne de 0,748 t/ha sur l'ensemble du bassin versant. Par ailleurs SICOT estime en octobre 1976 à 0,90-0,98 t/ha la phytomasse moyenne sur l'ensemble du bassin versant pour une pluviométrie de 400mm, alors que LEVANG en octobre 1977 obtient 1,11 t/ha avec une pluviométrie de 424 mm. La valeur établie par télédétection tient cependant compte de l'importante variabilité des pluies observée sur le bassin versant en 1986. Dans certains milieux potentiellement productifs les biomasses observées sont en effet faibles, c'est le cas du cordon duinaire à l'ouest d'Oursi où la pluviométrie annuelle a été inférieure à 200mm en 1986, soit moitié moindre que celle de la station principale de Jalafanka

¹Pour être cohérent avec les résultats de GROUZIS la pluviométrie utilisée est celle du poste de JALAFANKA (450mm) à laquelle est appliqué le coefficient d'abattement moyen de 0,88 qui rend compte, selon cet auteur, de la variabilité spatiale des pluies sur l'ensemble du bassin versant.

BIBLIOGRAPHIE

- ALBERGEL J., CHEVALLIER P., LORTIC B.; 1987- Hydrol. continent, 2 (2): 77-86.
- CHEVALLIER P., LOINTIER M., LORTIC B.; 1986- Hydrologic Applications of Space Technology (Proceedings of the Cocoa Beach Workshop, Florida, August 1985) IAHS Publications, 160: 99-107.
- DEVINEAU J.L., FOURNIER A., LAMACHERE J.M.; 1986- Programme d'évaluation préliminaire SPOT, PEPS N°149 SPOT -OURSIS; Rapport intermédiaire 52p. .
- DEVINEAU J.L., FOURNIER A., LAMACHERE J.M., LORTIC B. MALEK C.; 1988 - Programme d'évaluation préliminaire SPOT, PEPS N°149 SPOT OURSIS; Rapport final (à paraître).
- GROUZIS M.; 1987- Thèse d'Etat Paris XI (Orsay); 336P..
- JUSTICE C.O., TOWNSHEND J.R.G.; 1981 - in : Terrain analysis and remote sensing, J.R.G. TOWNSHEND Ed.; ALLEN & UNWIN, London: 38-58.
- LAMACHERE J.M.; 1987- Conf. Int. SPOT I Utilisation des images, bilan, résultats, Paris; CNES: 41-51.
- LEVANG P.; 1978- ACC Lutte contre l'aridité dans l'Oudalan (Haute Volta). Rapport ronéoté; DGRST-ORSTOM 34p. 1 carte H.T. .
- LEVANG P., GROUZIS M.; 1980-Acta Oecol., Oecol. Plant., 15(3):231-244.

GEOARCHEOLOGIE AU NORD CAMEROUN

Christine TRIBOULET, Yveline PONCET, Alain BEAUDOU, Alain MARLIAC

I. PRESENTATION DU PROGRAMME

L'opération "Géoarchéologie au Nord-Cameroun" est une opération pluridisciplinaire menée par l'ORSTOM, impliquant des archéologues, des géographes et des pédologues, en tant que membres permanents ou collaborateurs épisodiques.

Le programme implique le Laboratoire d'Informatique Appliqué pour les aspects informatiques et traitements des données, les départements "Milieux et Activités Agricoles" (MAA) et "Société, Développement et Urbanisation" (SDU), pour les aspects thématiques.

Cette opération qui, pour des raisons liées à l'informatique, est menée à partir des laboratoires de l'ORSTOM à Bondy, s'effectue en collaboration avec plusieurs organismes français et camerounais: antenne ORSTOM de Yaoundé; station IRA de Maroua; Institut des Sciences Humaines et Centre Géographique National, tous deux appartenant au Ministère de la Recherche et de l'Enseignement Supérieur camerounais (MESRES); et plus récemment, CIRAD, programme Garoua .

Le financement du programme provient d'un programme PEPS, d'une ATP-Téledétection CNRS, et du CIRAD. L'ORSTOM assure les moyens logistiques et informatiques .

Cette opération d'interprétation de données SPOT sur le Nord du Cameroun est issue d'idées communes à des archéologues, géographes et pédologues qui se sont associées pour mettre en rapport l'environnement naturel et l'occupation humaine avec les recherches archéologiques et historiques.

La zone de travail est la circonscription de Maroua, dans la province de l'Extrême Nord, qui est une région rurale, à très forte croissance démographique, dans un milieu fragile et un contexte climatique difficile ces dernières années .

Les travaux archéologiques menés dans cette région ont révélé de nombreuses traces d'occupation humaine, et il semblerait qu'une corrélation puisse être établie entre ces traces d'occupation ancienne (buttes anthropiques, tessons, fours, lieux de taille, etc...) et certains états de surface dégradés que l'on appelle "hardés" en langue fulfuldé .

En même temps, les géographes s'intéressent aux marques laissées sur le paysage par ces occupants anciens, notamment aux parcs arborés, et aux transformations agricoles très dynamiques, qui résultent de l'occupation actuelle : défrichement, brulis, construction de diguettes...

Nos objectifs scientifiques sont doubles :

- identifier des "objets" constituants du paysage, qui soient des indicateurs d'occupation humaine ancienne, et qui soient identifiables sur le terrain et sur l'image.
- mettre en rapport les descriptions de paysage et les données radiométriques, pour aboutir à des cartographies précises d'états de surface et d'occupation du sol, dans une région où les cartes topographiques et les photographies aériennes sont anciennes, non rééditées, et de toute façon ne sont plus mises en vente .

II. DEROULEMENT DU PROGRAMME

II.1. Les images

Après avoir tenté d'exploiter des images SPOT d'Avril 1986, fournies par le programme PEPS de SPOT-Image, fort décevantes à tous points de vue (date d'enregistrement, qualité de l'image, effet de barette, dérive de couleurs...) nous les avons délaissées au profit d'une image du 15 Janvier 1987, de bien meilleure qualité, centrée sur la ville de Maroua. C'est cette image multispectrale, qui a servi de support, aussi bien pour la réflexion méthodologique que pour l'échantillonnage et le repérage sur le terrain.

Nous attendons actuellement, pour développer notre démarche et exploiter les données de terrain, une image d'octobre dont cette fois nous avons pu choisir la période d'enregistrement, en fonction des calendriers agricoles et phénologiques comparés des principales cultures de la région: sorgho de saison des pluies, sorgho de décrue dit "muskwari" et coton .

II.2. L'échantillonnage

En raison du court laps de temps réservé aux missions, 3 semaines en saison sèche, et 3 autres en fin de saison des pluies, il n'a pas été possible de réaliser un échantillonnage systématique non aligné, couvrant la totalité de l'image SPOT . Le milieu nord camerounais est très hétérogène et cela obligerait à réaliser le sondage à partir d'une grille à très petite maille, et à relever au minimum quelques 900 points de sondage. De plus ces points localisés aléatoirement à l'intérieur de chaque maille ne seraient pas repérables avec exactitude sur le terrain .

Nous avons donc choisi un sondage supervisé, qui était rendu possible par une connaissance préalable du terrain. Nous avons relevé 52 zones échantillons, choisies en fonction de plusieurs critères:

- repérage fiable sur le terrain et sur l' image,
 - couverture maximale de la scène SPOT;
 - appartenance à l' un des thèmes à cartographier;
 - taille minimum de la zone échantillon;
- tout en essayant d' équilibrer le nombre de sites pour chacun des thèmes à cartographier.

II.3. Méthode de description et saisie de données

Pour pallier le manque de systématique de notre échantillonnage, nous avons consacré toute notre attention à développer une méthode, pour la définition et la description des unités de paysage, qui soit rigoureuse, objective, répétitive, ...

Une description détaillée du paysage et, à plus petite échelle, de l'ensemble du territoire étudié, doit permettre la mise en évidence de nuances, de différences, dans l'existence et la répartition spatio-temporelle de certains phénomènes:

- dynamique spatiale, par comparaison entre les différents sites à la même date, sur la même image;
- dynamique temporelle, intersaisonnière ou interannuelle, sur un même site .

La méthode que nous avons utilisée pour la description des sites est intitulée: "Description Morphologique des Paysages". Elle est d' origine pédologique et issue des travaux de Y.Chatelin, J-F.Richard et A.Beaudou; elle a été mise au point pour la cartographie pédologique en Côte d' Ivoire, puis en Nouvelle Calédonie .

La description s'effectue selon un schéma arborescent, au fur et à mesure du déroulement du logiciel de saisie. Celui-ci garantit des réponses systématiques, ordonnées, et évite tout oubli dans l' information à relever.

La saisie des données s'est faite sur micro-ordinateur portable, Toshiba 1200, directement sur le terrain. Prévu pour des descriptions pédologiques, le logiciel est en cours d' aménagement pour développer son volet végétation, et l' adapter à un milieu de type sahélo-soudanien .

La description morphologique du paysage consiste :

- à indiquer tout d' abord ses caractères généraux, qui font intervenir les données exogènes disponibles: localisation, topographie, géologie, géomorphologie,
- puis à découper le paysage, l'espace décrit, en volumes horizontaux, d' épaisseur variable.

Paysage = horizon 1 + horizon 2 +.....+horizon n-1 + horizon n

La description se fait verticalement, horizon par horizon,

- pour les différentes strates de la végétation;
- pour les états de surface du sol;
- puis pour le sol lui-même; (il ne s' agit pas d' une véritable description de profil pédologique; seuls les premiers horizons, qui peuvent influencer la valeur des données numériques, sont décrits, c' est à dire environ 50 à 100 cm).

Pour chaque horizon, on identifie les corps naturels (CN) qui le composent, et on pondère selon la place occupée par chacun d' eux dans le volume total de l' horizon décrit .

$$\text{Paysage} = \underbrace{(x_{CN1} + y_{CN2} + z_{CN3} + \dots)}_{\text{horizon 1}} + \underbrace{(x_{CN1} + y_{CN2} + \dots + 5_{CNn})}_{\text{horizon 2}} + \dots$$

l' aérophysse (l'air) étant considéré comme un corps naturel .

La description morphologique et quantifiée peut être transcrite sous forme de graphes, dont la comparaison met en évidence les différences entre les échantillons, et tout particulièrement les différences dans l' organisation verticale . (cf. figures 1,2 et 3)

C' est l' ensemble des corps naturels, ainsi recueillis, volume par volume, qui composent ce que nous appelons l' "EQUATION DU PAYSAGE".

Cette équation du paysage sera à mettre en rapport avec l' "EQUATION IMAGE", constituée elle-même des informations recueillies à partir de l' image: signature radiométrique, indices de végétation et de brillance, texture, etc...

C' est là que réside tout le problème de la relation terrain-image: en théorie, si les relevés de terrain sont bien effectués, deux équations du paysage identiques, relevées sur le terrain, devraient avoir la même équation-image.

Si cette hypothèse se vérifie, il reste à "retourner" l' équivalence, pour savoir si, à une même Equation Image, correspond toujours une même Equation du Paysage.

II.4. Définitions

Quelques définitions simplifiées, se rapportant aux graphes ci-après

Phytotypes, corps naturels spécifiques du monde végétal:

- Gramophytion: ensemble des végétations herbacées à feuilles effilées plus longues que larges;
- Kortophytion: ensemble des végétations à feuilles étalées, parfois aussi larges que longues;
- Paliphytion: structures végétales d'expansion et d'exploitation de l'espace aérien; c'est l'étape de développement maximal des arbres, qui correspond à l'expression morphologique du modèle de croissance;
- Prophytion: forme de croissance des arbres, structure privilégiant la dimension verticale au détriment de la dimension latérale;
- Phorophytion: désigne les premières formes de végétation colonisant les milieux les moins favorables ou les milieux ayant subi de fortes perturbations.; les formes sont étalées à la surface du sol.

Pédotypes, corps naturels présents dans le sol ou sur le sol:

- Bioféron: traduit le résultat de l'activité de la faune à l' intérieur du sol, laquelle se traduit par la présence d'organisations particulières, de nature variée. C' est l' expression de la biopédoturbation ;
- Ecluton: matériau pédologique très meuble, possédant une organisation particulière, caractérisée par la présence d'agrégats de nature variée, indépendants les uns des autres. Son existence est souvent transitoire.

- Nécrophytion: caractérise la matière végétale morte, sans trace de transformation;
- Lapidon: matériau discontinu, formé d'éléments "gros" (de diamètre supérieur à 2 mm) par rapport à la fraction "fine" d' un sol;
- Dermilite: structure pelliculaire de la surface du sol; nature, couleur, texture sont variables et seront décrits.

II.5. Les étapes ultérieures

Après classification sur image des différents types de paysages et validation par une nouvelle mission de terrain pour connaître le pourcentage d'erreur, on pourrait alors extrapoler:

- à l' ensemble de l' image SPOT;
- puis aux images voisines, et passer à l' aspect thématique .

Mais cela ne pourra se faire qu' à la réception de l' image d'Octobre 1988, qui est synchrone avec nos relevés de terrain .

L' aspect thématique sera développé au moyen d' analyses multidates des images, et en mettant l'accent sur l' identification des signatures radiométriques des espaces, cultivés ou non, que l' on souhaite cartographier: surfaces en coton, sorgho pluvial, muskwari, jachères, sols nus hardé, parcs arborés etc ...

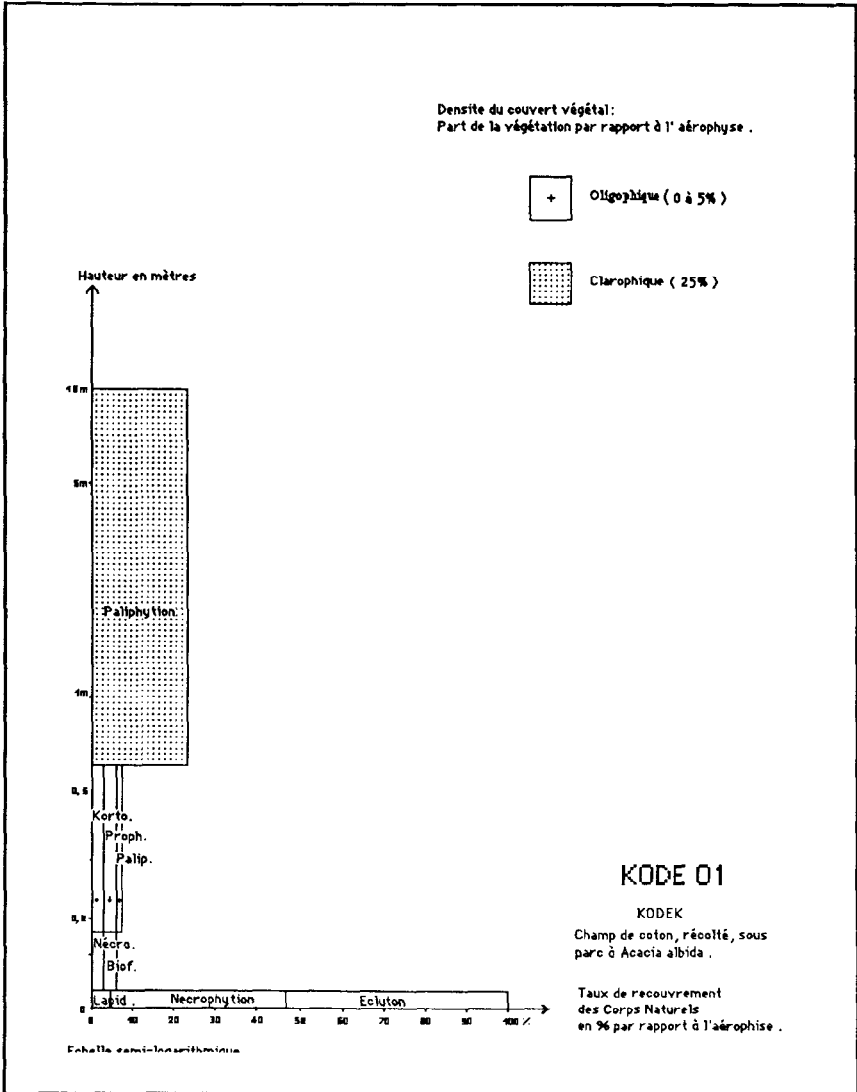
III. CONCLUSION

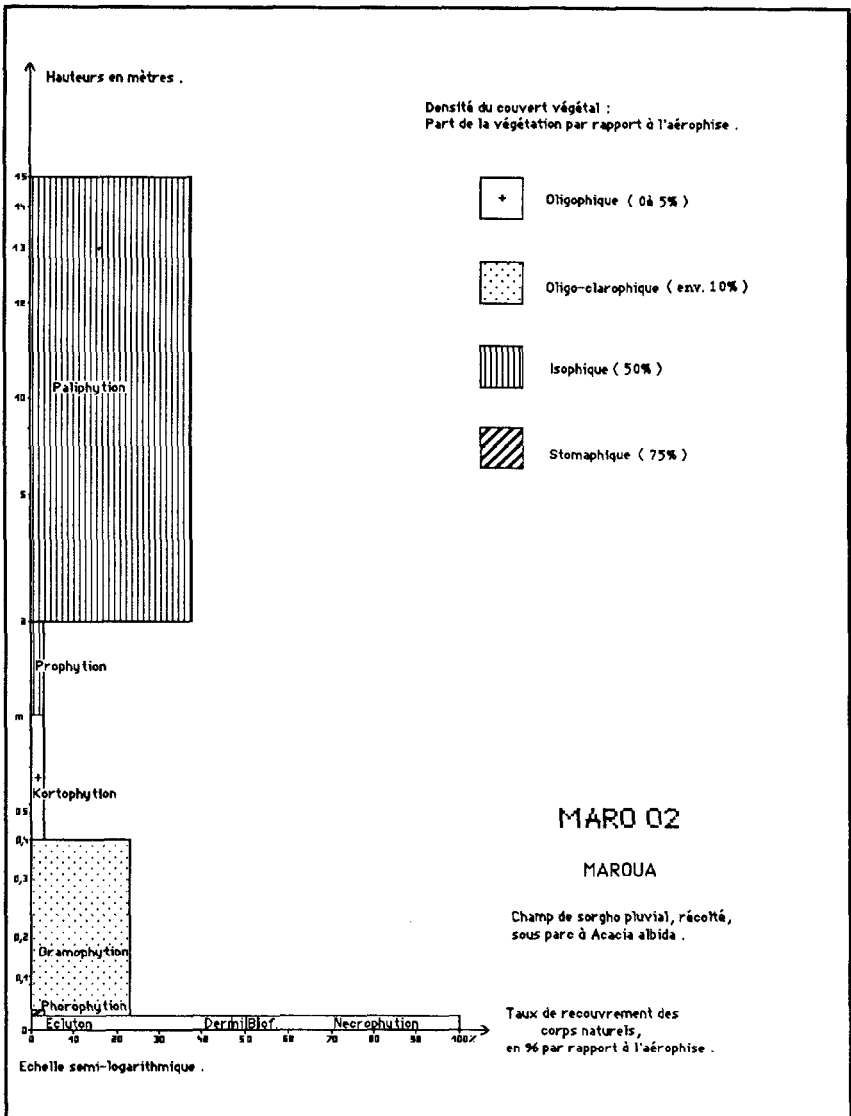
L'opération Géoarchéologie au Nord-Cameroun est donc l'occasion d'une réflexion méthodologique sur le terrain et sur le paysage; sur le rapport morphologique entre le terrain et l'image nadirale et sur la gestion de l'hétérogénéité de l' information contenue dans le paysage et dans l'image. Cette réflexion, qui apparaît peu dans les documents courants de la télédétection, semble nécessaire aux thématiciens, pour des extrapolations et pour la validation des résultats. Nécessaire également à ceux qui sont conduits à utiliser les données satellitaires pour les intégrer à des systèmes d' information ou pour les exploiter dans le cadre de systèmes experts . L'opération met en évidence la difficulté qu'il y a à placer dans la même logique les informations descriptives du milieu, les informations descriptives de l'image et les informations explicatives ou génétiques des nomenclatures agraires, botaniques, pédologiques... Elle aborde quelques éléments de réponse qui restent à expérimenter plus avant et à développer.

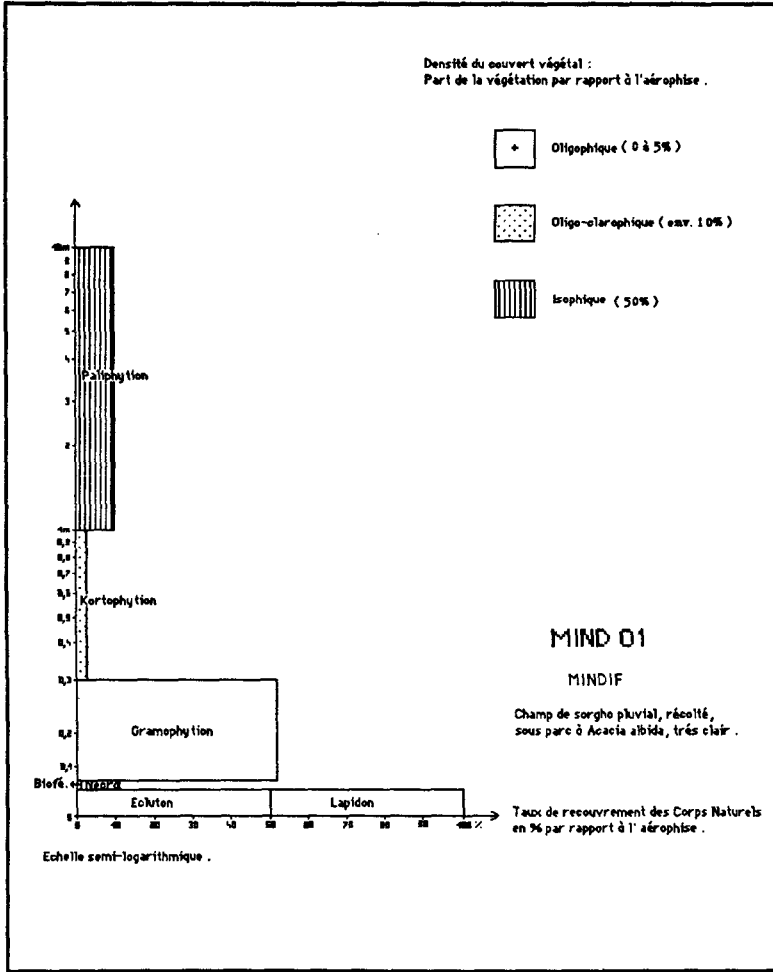
ILLUSTRATIONS:

Les trois graphes qui suivent sont la figuration qualitative et quantitative de trois descriptions de paysages, trois échantillons qui, dans le langage courant de la géographie rurale pourraient être identiquement identifiés comme "aires agricoles sous parc à Acacia albida". La description morphologique des placettes (100 m x 100 m) et surtout leur transcription graphique mettent en évidence leurs différences.

ANNEXE: GRAPHES DE DESCRIPTION MORPHOLOGIQUE







BIBLIOGRAPHIE

- BEAUDOU A., BLIC P. de, CHATELIN Y., COLLINET J., FILLERON J.C., GUILLAUMET J.L., KAHN J.F., ZUELI K.B., RICHARD J.F. 1977: Recherche d' un langage transdisciplinaire pour l' étude du milieu naturel (tropiques humides) Travaux et Documents ORSTOM n°91, 143p.
- BEAUDOU A., 1988: Recherche d' un système d'information pour le milieu physique, une méthode de saisie et de traitement des données géopédologiques appliquées aux régions tropicales, Thèse de Géographie sous la direction de G. BEAUDET, Université de Paris 1, à paraître aux éditions de l' ORSTOM.
- MARLIAC A. et PONCET Y., 1986: Une expérience d'application de la télédétection spatiale à l' anthropologie: l'étude des peuplements anciens du Diamaré (Cameroun septentrional) ORSTOM, Cahiers des Sciences Humaines, 22 (2), p.159-183.
- TRIBOULET C., 1987: Evolution des milieux en liaison avec les peuplements; mémoire de DEA; EHESS, Paris; 210 p. multigraphiées et ill.
- PONCET Y., TRIBOULET C., MARLIAC A., et BEAUDOU A, 1989: Recherche d'une méthode de prospection archéologique à partir de la signature radiométrique et structurale des aspects de surface au Cameroun septentrional, Programme d'Evaluation Préliminaire Spot, Rapport Final, ORSTOM-CNES, 240 p. multigraphiées, ill. biblio.

CARACTERISTIQUES SPECTRALES D'UNE PEDOSEQUENCE EN REGION TROPICALE (PLATEAU CENTRAL BRESILIEN)

José DA SILVA MADEIRA NETTO

INTRODUCTION

Dans les Cerrados, sur le plateau central brésilien, les couvertures pédologiques, à dominance de latosols, présentent d'importantes variations latérales. Les changements de couleur, visibles aussi bien pour les horizons diagnostiques que pour la surface, sont de bons indicateurs des variations pédologiques (MACEDO, 1987).

ESCADAFAL (1989) a montré que les couleurs du sol, mesurées dans le système RGB, sont bien corrélées avec les données des canaux du domaine du visible pour une image LANDSAT TM. Ce même auteur a mis en évidence, pour un ensemble considérable d'échantillons de sols, l'absence du phénomène de métamérisme. Ces résultats permettent de formuler une hypothèse selon laquelle les variations de couleur des séquences à latosols peuvent être détectées à partir des images TM, et par conséquent, que celles-ci peuvent devenir un instrument très utile à la cartographie pédologique.

Dans la région centre-ouest du Brésil, de grandes étendues de terres sont cultivées en céréales et, après la récolte, les jachères permettent la visualisation de la surface du sol, et par conséquent de la couleur. Cependant, d'autres facteurs, inhérents aux terres en jachères peuvent affecter les réponses radiométriques. Par exemple, après la récolte des céréales, une quantité importante de résidus végétaux reste à la surface jusqu'au moment des labours. Les opérations successives de préparation du sol enfouissent la paille et introduisent une rugosité, propre au type de machine utilisée. La rugosité produit des ombres qui affectent la réflectance des sols. A l'approche du semis les champs présentent une certaine régularité à la surface, mais cela correspond aussi au début de la saison des pluies. Plusieurs études ont montré que la réflectance de la surface des sols est sensible à ces facteurs agroclimatiques (CELIS-CEUSTERS, 1980, BOWERS et HANKS, 1964, KING, 1983, CIPRA, et al 1971, CONDIT, 1970). Les effets de l'humidité et de la rugosité sur la réflectance varient selon les types de sols et peuvent jouer dans le sens d'une réduction de la

sols. KING (1983), devant l'absence d'un modèle permettant de prévoir ces effets, recommande que pour chaque situation, il est important d'étudier l'importance de la variabilité des réponses due à cette conjoncture par rapport à l'information pertinente pour le pédologue.

Ce travail a pour objectif d'étudier les réponses spectrales des sols d'une pédoséquence située à proximité de Brasilia, sur le plateau central brésilien, et de préciser les effets de la rugosité, produite par la préparation du sol, et de l'humidité sur la réflectance bidirectionnelle des sols .

MATERIELS ET METHODES

L'étude a été menée dans le Centro de Pesquisas Agropecuarias dos Cerrados (CPAC/EMBRAPA) situé dans le District Fédéral du Brésil sur une pédoséquence de sols ferrallitiques et hydromorphes: Latosol Vermelho Escuro (LVE), Latosol Vermelho Amarelo (LVA), Laterita Hidromorfica (HL) et sol à gley peu humique (GPH). L'étude pédologique de cette séquence a mis en évidence que les variations latérales observées sont surtout fonction de la profondeur de la nappe phréatique qui varie de quelques centimètres pour les sols à gley peu humique à plus de 10 mètres pour le Latosol Vermelho Escuro.

Les données de radiance ont été mesurées avec un radiomètre portatif ABBE SEKEI 120 développé par l'Institute of Color Technology- Chiba University, Japan. Cet instrument permet les mesures de radiance entre 400 et 800 nm (pas de 25 nm) et entre 800 et 1050 nm (pas de 50 nm). Pour ce travail, nous avons considéré les longueurs d'onde de 400, 450, 500, 550, 600, 650, 700, 750, 850, 950, et 1050 nm. L'angle d'ouverture de l'appareil est de 10° et les angles azimutal et de visée sont de 0°. L'appareil était placé à une hauteur de 3,3 metres, et la surface de la cible était de 0,25m². Les mesures ont été réalisées entre 9h30 et 12h30 durant la période du 22/04/87 au 12/08/87, uniquement les jours où le ciel était bien dégagé. La procédure de mesure utilisée consistait à lire, alternativement et pour chaque longueur d'onde, la radiance des cibles et de l'étalon constitué par une plaque peinte au sulfate de baryum (BaSO₄). Les facteurs de réflectance bidirectionnelle (auparavant dénommé réflectance) étaient calculés en utilisant la formule suivante:

$$R_{\lambda} = 10^{(ls-le)}$$

où,

R_{λ} = réflectance pour la longueur d'onde λ ,

ls = luminance de la cible,

le = luminance de l'étalon.

Dans la séquence étudiée, quatorze points ont été choisis comme représentatifs de la variabilité de la couverture pédologique. La couleur des sols est déterminée pour la totalité des sites en utilisant un code Munsell. Le fer total, le carbone organique, et la granulométrie ont été déterminés pour sept des quatorze sites en utilisant les méthodes décrites dans le manuel EMBRAPA (1979). Les réflectances sont mesurées, pour la totalité des sites, après une uniformisation de la surface, qui a consisté à éliminer les mottes de la surface des sols sans la compacter.

Dans la séquence, quatre sites ont été choisis pour étudier:

- l'effet de la rugosité, déterminée par deux formes de préparation du sol (labour et lit de semence).
- et l'effet de l'humidité, à deux niveaux, sol humide et sol sec.

La combinaison des deux niveaux d'humidité avec les deux niveaux de rugosité conduit à définir quatre états de surface:

- T1: sec et lit de semence.
- T2: sec et labouré.
- T3: humide et lit de semence.
- T4: humide et labouré.

Pour pallier les irrégularités de la surface, provoquées par les travaux de préparation du sol, les mesures ont été réalisées sur trois petites parcelles (1 m²) pour chaque état de surface. Sur chaque parcelle, quatre mesures ont été faites, de façon à couvrir toute la surface.

Pour étudier l'effet de l'humidité, ces parcelles ont été mouillées, puis leur humidité suivie journalièrement en faisant un échantillonnage sur les 0,5 cm supérieurs du sol. Simultanément aux mesures radiométriques un autre échantillonnage était fait toujours dans le même but. Les mesures radiométriques ont été réalisées lorsque les sols étaient humides (22% à 28%) et secs (4% à 12% d'humidité). Pour les sols étudiés les humidités correspondant aux point de flétrissement varient de 16,7% à 19,4% et à la capacité au champ de 28,9% à 32%

RESULTATS ET DISCUSSION

La figure 1 schématise la pédoséquence étudiée et montre la localisation des 14 sites. Le tableau 1 précise quelques caractéristiques de la surface des sols. Cette séquence est très représentative des couvertures pédologiques dans le District Fédéral et, d'une façon plus générale, des Cerrados. La couleur et les teneurs en fer sont les propriétés les plus variables à la surface, aussi bien que dans les horizons diagnostiques. MACEDO et al (1987) analysant une séquence semblable à celle-ci, ont trouvé une forte corrélation entre la variation de couleur, la profondeur de la nappe phréatique, les teneurs en fer et la forme minéralogique (hématite ou goéthite) dominante de ce constituant. Les teneurs en fer sont en rapport direct avec la profondeur de la nappe et, dans le cas présent, avec la position topographique. Vers le bas de la toposéquence (nappe progressivement moins profonde) les conditions de réduction sont plus intenses, et les teneurs en fer plus faibles (tableau 1). Cette diminution de teneur en fer s'accompagne d'un enrichissement en goéthite par rapport à l'hématite. En effet, l'hématite, de couleur rouge, est une forme minéralogique du fer plus facilement réduite que la goéthite, de couleur jaune. A l'extrémité aval de la séquence la nappe est très proche de la surface, les conditions de réduction sont encore plus sévères et la goéthite est aussi éliminée du système. Les variations de couleurs, perceptibles à la surface ainsi bien qu'en profondeur, sont révélatrices de processus pédogénétiques importants pour la compréhension de l'organisation pédologique en régions tropicales.

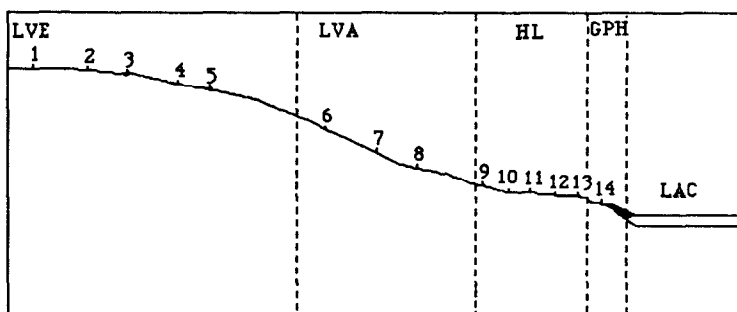


Figure 1. Schéma de la pédosequence étudiée

Site	Coul. Munsell sec	Fer total %	C-organic %	Texture (% argile)	Classe de sol*
1	2,5YR4/6	13,2	2,09	arg.(84)	LVE
2	3,5YR5/8			arg.	LVE
3	3,5YR4/6	11,7	1,84	arg.(83)	LVE
4	5YR4/7			arg.	LVE
5	5YR5/6	10,1	2,58	arg.	LVE
6	6,5YR5/4	8,2	1,99	arg.(86)	LVA
7	10YR5/4	8,6	1,86	arg.(82)	LVA
8	10YR5/3			arg.	LVA
9	10YR6,5/3	2,9	1,98	arg.(80)	HL
10	10YR7/1,5			arg.	HL
11	10YR8/1			arg.	HL
12	2,5Y7/0			arg.	HL
13	2,5Y6/1			arg.	HL
14	10YR5/1	1,8	1,65	arg.(54)	GPH

Tableau 1. Quelques caractéristiques de la surface des sols des sites étudiés (* -LVE= Latosol Vermelho Escuro; LVA= Latosol Vermelho Amarelo; HL= Laterita Hidromorfica; GPH = Gley Peu Humique).

Les courbes de réflectance obtenues pour les 14 sites sont représentées sur la figure 2. Construites à partir de dix points du spectre, les courbes ne permettent pas la perception des bandes étroites d'absorption. Pourtant, elles sont suffisantes pour caractériser l'allure générale des réponses spectrales des sols. Analysant les données de réflectance de 160 échantillons d'une large variété de sols, CONDIT (1970) a réussi à modéliser la réflectance spectrale entre 320 nm et 1000 nm à partir des mesures à 440, 540, 640, 740 et 860 nm. Les conditions adoptées dans notre travail (pas de 50 nm avec 10 mesures entre 400 et 1050 nm) et celles que CONDIT a trouvées idéales pour la modélisation des réponses spectrales des sols doivent permettre de bien caractériser les types de courbes de réflectance pour chacun de ces sites.

En effet, les courbes de réflectance des 14 sites représentatifs ont pu être regroupées selon les trois courbes types de CONDIT. La courbe correspondant au site 14 (sol à gley peu humique) se rattache au type I et se caractérise par des intensités faibles de réflectance et une forme générale concave avec les pentes croissantes avec les longueurs d'onde.

Les lateritas hidromorficas (sites 9 à 13) présentent des réponses spectrales proches du type II décrit par CONDIT. Les principales caractéristiques de ces courbes sont une forme presque convexe et des intensités relativement élevées.

Le troisième type de courbe, correspondant au type III de CONDIR caractérise les latossols (LVE, LVA). Riches en oxydes de fer, les latossols présentent des réponses spectrales fortement influencées par des absorptions électroniques de ces minéraux (HUNT et SALISBURY, 1970; SHERMAN et al 1982). Ces courbes se caractérisent par de faibles pentes entre 400 et 550 nm devenant plus importantes entre 550 et 650nm. Cette forme caractéristique peut être attribuée à des absorptions de goethite (400 et 470) et d'hématite (400 à 560nm). Une autre absorption à 640 nm mieux définie pour la goethite que pour l'hématite, est perceptible par le changement de direction de la courbe à 660 nm et détermine une décroissance de la pente entre 600 et 750nm. De plus, l'absorption à 860nm est responsable du changement de direction de la courbe à partir de 850nm.

En analysant des spectres de 481 échantillons (parmi lesquels 3 oxisols) de 246 séries de sols, STONER (1981) a ajouté 2 types de courbes aux trois définies par CONDIR. Le plus grand mérite de STONER a été pourtant de relier les courbes types aux propriétés physico-chimiques des sols, comme la teneur en matière organique et en oxydes de fer, la minéralogie et le drainage naturel. STONER a appelé, par exemple, la courbe III de "affectée par le fer" (iron affected) et a déterminé les teneurs en oxydes de fer (1 à 4%) et de matière organique (0 à 2%) pour les sols présentant ce type de courbe. Ces valeurs sont en forte discordance avec les sols étudiés ici: sites 1, 2, 5, 6, 7 (cf. Tableau 1). Ces résultats mettent en évidence certaines particularités des réponses spectrales des latossols, et la nécessité d'études plus approfondies pour mieux comprendre ces propriétés spectrales.

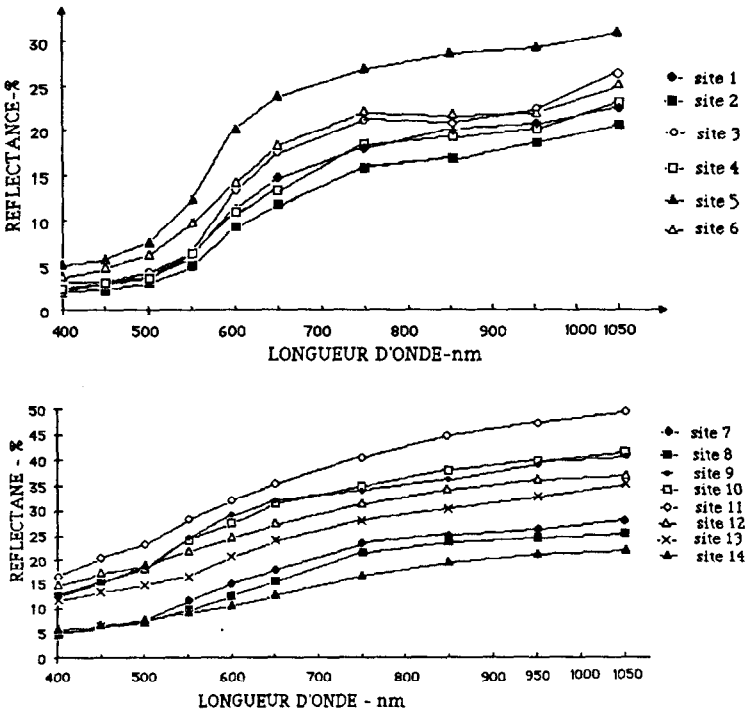


Figure 2: Courbe de réflectance pour les 14 sites a- sites 1 à 6 b- sites 7 à 14

Les coefficients trichromatiques X, Y, Z, ont été déterminés à partir de la couleur Munsell, en utilisant les tableaux contenus dans l'ouvrage de WYSZECKI et STILES (1982). La matrice de corrélation dérivée à partir de

ces données (tableau 2) montre une forte corrélation entre les valeurs tristimuli et les données de réflectance du visible. Cette correspondance entre la couleur des sols mesurée par des méthodes radiométriques et par des notations Munsell a été soulignée par de nombreux auteurs. (SHIELDS et al, 1968, FERNANDEZ et SCHULZE, 1987 ESCADAFAL et al 1988a, ESCADAFAL et al ,1988b).

	X	Y	Z
R450	0,966	0,968	0,951
R500	0,974	0,971	0,946
R550	0,983	0,965	0,918
R600	0,935	0,908	0,836
R650	0,951	0,927	0,863
R750	0,955	0,951	0,899

Tableau 2. Matrice de corrélation entre les coefficients chromatiques X, Y, Z, dérivés de la couleur Munsell et les réflectances du visible pour les 14 sites

La nécessité de trois variables pour la caractérisation de la couleur dans le système CIE rend difficile son utilisation pratique par la plupart des pédologues. TORRENT et al (1983), ont déterminé un indice de rougeur des sols, calculé à partir des valeurs de la notation Munsell et qui présente une bonne corrélation avec les teneurs en hématite pour un nombre élevé d'échantillons de sols. Cet indice est calculé comme indiqué ci dessous:

$$RR=(10-H)*C/V,$$

où V et C sont les valeurs de "value" et "chroma" de la notation Munsell et H les valeurs de "hue" transformé selon une échelle de 0 à 10 attribuée respectivement aux notations 10YR et 10R.

On a utilisé la formule de TORRENT pour le calcul du RR avec une transformation de l'échelle des teintes. La valeurs 0 a été attribuée à H pour les notations 2,5Y compte tenu que les teintes 10YR ne sont pas complètement dépourvues de la couleur rouge. Les valeurs ainsi obtenues ont été comparées aux valeurs de réflectance mesurées. On trouve une bonne corrélation entre l'indice de rougeur et le rapport réflectance à 650nm /réflectance à 450nm (figure 3). Comme ces longueurs d'onde sont proches des canaux TM1 (450-520nm) et TM3 (620-690nm) de Thematic Mapper ce rapport peut être utile pour la cartographie pédologique dans la zone étudiée. La vérification de cette possibilité sera faite dans la suite de ce travail

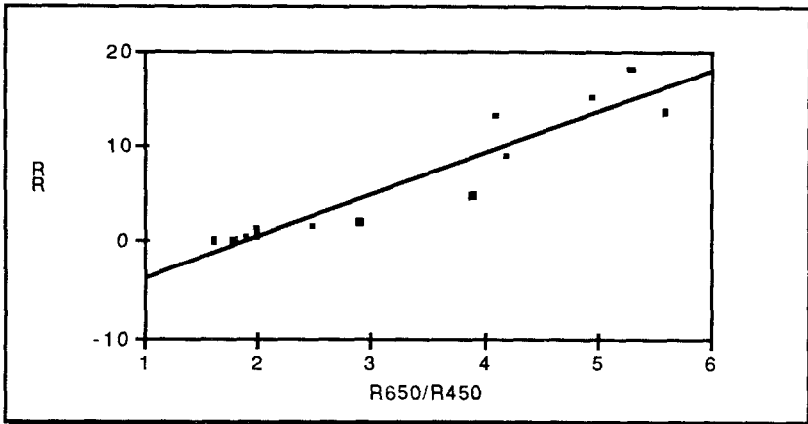


Fig.3 Corrélation entre l'indice de roujeur RR et le rapport R650/R450.
($y = -8,175 + 4,342x$, $r = 0,95$)

Les effets des différents états de surface sur la réflectance des sols (sites 2, 4, 8, et 14) ont été étudiés selon à la procédure décrite précédemment.

La figure 4 montre les courbes de réflectance des quatre types de sols pour chacun des états de surface. Ces courbes permettent de préciser les effets de la rugosité (labour ou lit de semence), dans les conditions d'humidités faibles (4% à 12%) et élevées (22% à 28%), et inversement, les effets de l'humidité lorsque les surfaces sont rugueuses ou unies. On vérifie que, pour des conditions croissantes de rugosité et d'humidité, les valeurs de réflectance diminuent dans tout le spectre. Pour les latossols (sites 2, 4 et 8) cette diminution, due aux variations d'humidité, est sensiblement plus importante que la diminution due au labour. Pour le sol à gley peu humique (site 14) cette tendance est la même entre 400 nm et 650nm. A partir de cette longueur d'onde le labour produit un effet comparable à celui de la variation de l'humidité de 8% à 24%. Les faibles différences de réflectances entre les états de surface T1 et T2 pour le latosol vermelho escuro (LVE) du site 2 ont deux types d'explicaton: d'une part les variations produites par les différents états de surface sont moins importants que pour les autres sites comme le montre l'ensemble des courbes, et d'autre part l'humidité pour l'état T2 (4%) est significativement plus basse que pour l'état de surface T1 (10%). Par conséquent, il est fort possible que la diminution des valeurs de réflectance due au labour soit compensée, en partie, par une humidité plus faible de l'état de surface T2.

Les courbes pour l'état de surface T4 semblent cumuler les effets du labour et de l'humidité sur la réflectance. Les données montrent que l'addition de l'effet humidité (T3) et de l'effet rugosité (T2) s'approchent des effets conjoints des deux facteurs.

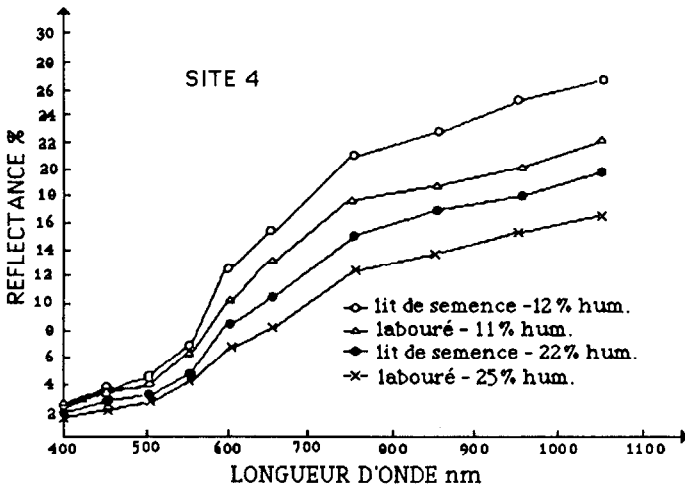
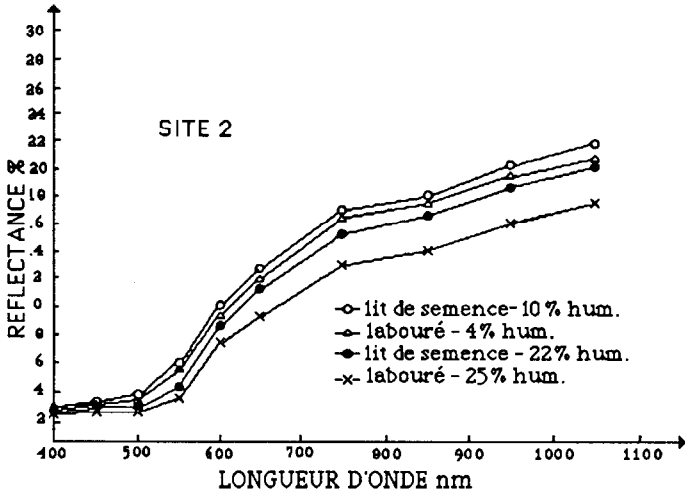


Figure 4 a. Courbes de réflectance des sites 2, 4 dans quatre états de surface. Les valeurs sont la moyenne de mesures sur trois parcelles.

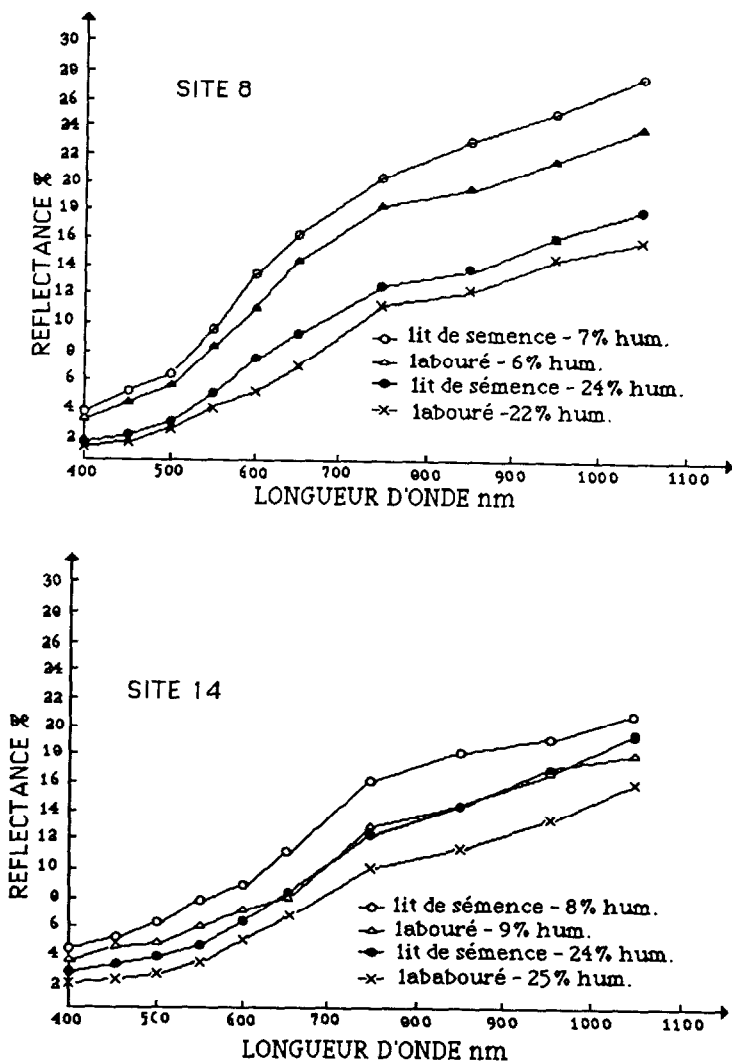


Figure 4 b. Courbes de réflectance des sites 8 et 14 dans quatre états de surface. Les valeurs sont la moyenne de mesures sur trois parcelles.

Les effets de la rugosité induite par les travaux du sol, et de l'humidité sur la réflectance sont de natures différentes. Le labour produit des mottes qui créent de l'ombre. Ces effets d'auto-ombrage ont été bien étudiés par CIERNIEWSKI (1984, 1987) qui est arrivé à modéliser les altérations produites sur la réflectance par l'ombre due à la présence de structures motteuses à la surface des sols. L'humidité influence la réflectance des sols, car l'indice de réfraction de l'eau est supérieur à l'indice de réfraction de l'air. Les rapports entre réflectance état humide et état sec ont été décrits par ANGSTRON (1925) comme inversement proportionnels au carré de l'indice de diffraction du milieu diffuseur. PLANET (1970), a suggéré que les constituants du sol dissous dans l'eau peuvent aussi affecter la réflectance à cause des changements de la transmissivité et de l'indice de réfraction du liquide.

Cette différence, en nature, des effets de la rugosité et de l'humidité rend logique l'hypothèse d'additivité des effets de ces deux facteurs.

La figure 5 montre les courbes de réflectance des quatre sites pour les états de surface sec et uni T1 (a) et humide et labouré T4 (b). On constate que, pour l'état sec et uni, les réponses spectrales sont très distinctes entre les différents sites. Pour l'état humide et labouré il y existe une convergence des valeurs de réflectance des quatre sols, particulièrement perceptible pour les longueurs d'onde supérieures à 600nm. Une conséquence immédiate de ce phénomène est l'importance de la sélection de la date d'acquisition des images pour le travail de cartographie des sols. La stabilité du régime pluviométrique, typique des cerrados, avec un période de 5-6 mois sans pluies importantes (ADAMOLI et al, 1987), et la pratique d'une préparation du sol pour les semis au moment des premières pluies en octobre/novembre déterminent un période avec des états de surface semblables à T1, donc optimun pour la discrimination des types de sol.

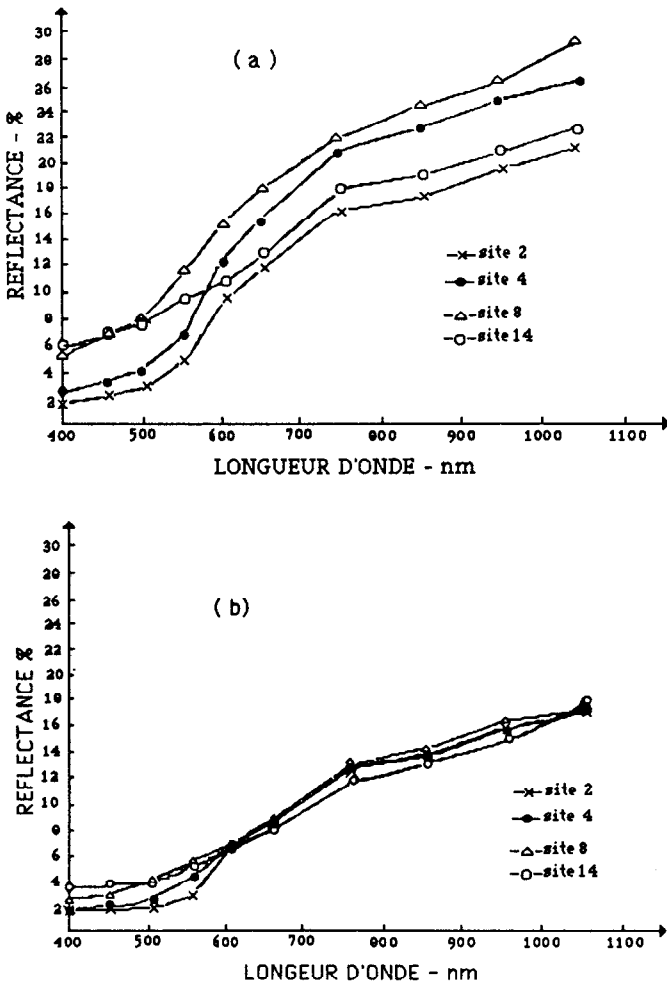


Fig. 5. Réponses spectrales des quatres sites aux états de surface T1 (a) et T4 (b)

La matrice de corrélation entre les réflectances des 10 points du spectre est présentée dans le tableau 3. La totalité des 48 mesures (4 sites x 4 états de

surface x 3 parcelles) pour chaque longueur d'onde a été considérée pour le calcul des coefficients de corrélation. On vérifie une mauvaise corrélation entre réflectances bleu (400 à 500 nm)/rouge et proche infra-rouge ($r=0,43$ à $0,63$). Les parties du spectre correspondantes au rouge et proche infra-rouge sont fortement corrélées ($r=0,93$ à $0,97$). La réflectance dans le vert (550nm) est assez fortement corrélée ($r=0,85$ à $0,95$) avec le bleu, beaucoup moins avec le rouge et proche infra-rouge ($r= 0,75$ à $0,83$)

	R400	R450	R500	R550	R600	R650	R750	R850	R950	R1050
R400	1,000									
R450	0,967	1,000								
R500	0,956	0,974	1,000							
R550	0,856	0,910	0,953	1,000						
R600	0,521	0,608	0,674	0,829	1,000					
R650	0,435	0,540	0,597	0,768	0,961	1,000				
R750	0,430	0,524	0,592	0,752	0,959	0,958	1,000			
R850	0,461	0,545	0,621	0,771	0,956	0,942	0,975	1,000		
R950	0,446	0,536	0,602	0,753	0,948	0,928	0,975	0,966	1,000	
R1050	0,532	0,622	0,674	0,804	0,947	0,937	0,949	0,936	0,945	1,000

Tableau 3. Matrice de corrélation entre les réflectances à 10 longueurs d'onde pour les quatre types de sols sous les quatre états de surface T1, T2, T3, T4.(48 mesures pour chaque longueur d'onde)

La figure 5 illustre la dispersion des données de réflectance a 450nm, 650nm, et 850nm. L'alignement des points dans le plan R850/R650 correspond à la "droite des sols". Indépendamment des états de surface et des types des sols les réflectances conservent une bonne corrélation. Par contre, sur le plan R650/R450 on constate une dispersion apparemment désordonnée.

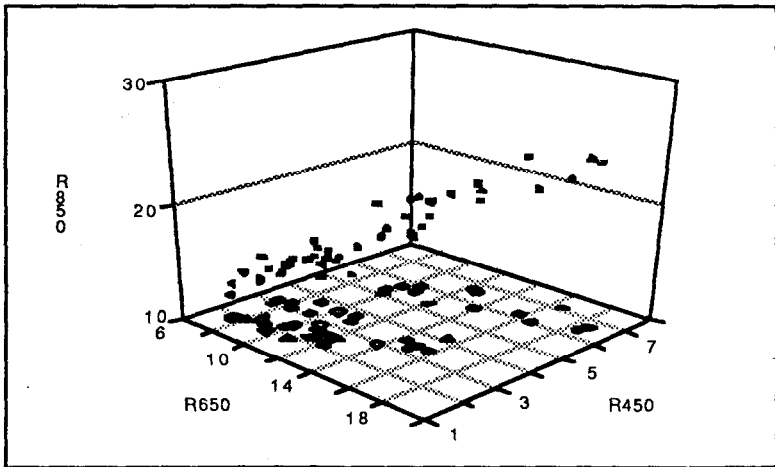


Figure 5. Diagramme tridimensionnel montrant la dispersion des réflectances à 450nm, 650nm, et 850nm pour les différents états de surface des sols (sites 2, 4, 8, et 14).

Une visualisation plus détaillée du nuage de points sur le plan défini par les axes R650nm et R450nm (figure 6) permet de constater qu'en fait ce plan est défini par des secteurs, et que chacun de ces secteurs représente un sol avec ses différents états de surface. Comme nous l'avons noté précédemment le rapport R650nm/R450nm est en relation avec la couleur des sols. ESCADAFAL (1989) a montré aussi que les canaux TM1 et TM3 du Thematic

Mapper pour une zone désertique sont relativement peu corrélés et il a relié ce fait à des différences de couleur des sols. Le changement de couleur des sols avec l'humidité est bien connu, et certains auteurs ont même quantifié les taux de variation de la couleur par rapport aux variations d'humidité. (SHIELDS et al 1968, SOUZA et al 1964). La clarté et la saturation sont les plus affectées par l'humidité, et le taux de changement est variable pour les différents sols. L'ombre due à la rugosité change aussi la couleur des surfaces.

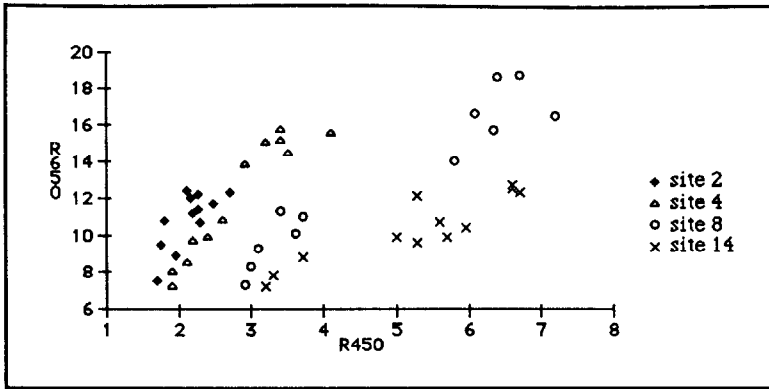


Figure 6. Histogramme bidimensionnel des réflectance 650 nm / 450 nm pour les différents états de surface des sols (sites 2, 4, 8, et 14.)

CONCLUSION

Les variations latérales observées dans une couverture pédologique à dominance de latosols sont mises en évidence au travers des réponses spectrales de 14 sites obtenues avec un radiomètre portatif. Latosolos, lateritas hidromorficas, et sols à gley peu humique ont des courbes spectrales de formes différentes. Les variations de couleur du rouge au gris en passant par le jaune brunâtre, indiquant des processus pédogénétiques importants, sont bien corrélées avec le rapport réflectance à 650nm/réflectance à 450nm. Par conséquent, on postule l'hypothèse de l'utilité des bandes TM1 et TM3 pour la cartographie de ces variations.

Les états de surface caractérisés par une rugosité élevée (labour) et une forte humidité tendent à atténuer ces différences par rapport à des états de surface plus unis (lit de semence) et secs. Les données obtenues suggèrent que les effets du labour et de l'humidité, dans le limites de l'expérience réalisée, sont "additifs": l'effet provoqué sur la réflectance par le labour et par l'humidité est égal à l'addition des effets isolés de chacun de ces facteurs.

C'est dans l'état de surface sec et uni que les sols de la séquence étudiée présentent les meilleures possibilités d'être discriminés par leurs réponses spectrales. L'humidité et la rugosité provoquent une convergence des valeurs de réflectance parmi les sols.

Indépendamment du type de sol et de l'état de surface, les réflectances correspondant au rouge et proche infra-rouge sont très corrélées, tandis que, pour les longueurs d'onde du bleu et du rouge, les corrélations sont faibles pour différents sols mais plus élevées pour un même sol sous différents états de surface.

BIBLIOGRAPHIE

- ADAMOLI (J.), MACEDO (J.), AZEVEDO (L.G.), SILVA MADEIRA NETTO (J.), 1987. Caracterização da região dos Cerrados. In GOEDERT, W.(ed.), Solos dos Cerrados: tecnologias e estratégias de manejo. S. Paulo. Nobel, pp 33-74.
- ANGSTOM (A.), 1925. The albedo of various surfaces of ground. *Geografiska Ann.*, 7, 323.
- BOWERS (S.A.), HANKS (R.J.), 1965. Reflection of radiant energy from soils. *Soil Sci.*, 100(2):130-138.
- CELIS-CEUSTER (A.M.), 1980. Ground truth radiometry (Exotech) on bare and overgrown Belgian soils. *Pédologie*, XXX(1):43-63.
- CIERNIEWSKI (J.), 1984. Influence of surface soil clod structure on spectral response of soil cover. 2ème Coll. International sur Signatures Spectrales d'Objets en Télédétection. Bordeaux, 12-16 sept. Ed. INRA, pp141-147.
- CIERNIEWSKI (J.), 1987. A model for soil surface roughness influence on the spectral response of bare soils in the visible and near-infrared range. *Remote Sensing of Environment*, 23:97-115.
- CIPRA (J.E.), BAUMGARDNER (M.F.), STONER (E.R.), MacDONALD (R.B.), 1971. Measuring radiance characteristics of soils with a field spectroradiometer. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, 35:1014-1017.
- CONDIT (H.R.), 1970. The spectral reflectance of american soils. *Photogrammetric Eng.*, 36: 955-966.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUARIA- SNLCS, 1979. Manual de métodos de análise de solos. Rio de Janeiro. 1 vol.
- ESCADAFAL (R.), GIRARD (M.C.), COURAULT (D.), 1988a. La couleur des sols: appréciation, mesure et relations avec les propriétés spectrales. *Agronomie*, 8(2):147-157.
- ESCADAFAL (R.), GIRARD (M.C.), COURAULT (D.), 1988b. Modeling the relationships between soil color and soil spectral properties. Proc. 5th. ISSS Symposium of the Working Group Remote Sensing. 11-15/04/1988. Budapest, Hungary pp190-201.
- ESCADAFAL (R.), 1989. Caractérisation de la surface des sols arides par observations de terrain et par télédétection. Applications: Exemple de la région de Tataouine (Tunisie). Editions de l'ORSTOM. Collection Etudes et Thèses. Paris. 317 p.
- FERNANDEZ (R.N.), SCHULZE (D.G.), 1987. Calculation of soil color from reflectance spectra. *Soil Sci. Soc. Amer. J.*, 51: 1277-82.
- HUNT (G.R.), SALISBURY (G.W.), JENIHOFF (C.J.), 1971. Visible and infrared spectra of minerals and rocks: III oxides and hydroxides. *Modern Geology*, 2:195-205.
- KING (C.), 1983. Les qualités spectrales des sols nus: analyse de spectres radiométriques acquis sur le terrain dans le Bassin Parisien. 2ème Coll. International sur Signatures Spectrales d'Objets en Télédétection. Bordeaux, 12-16 sept. Ed. INRA.
- MACEDO (J.), BRYANT (R.B.) 1987. Morphology, mineralogy and genesis of a hydrosequence of oxisols in Brazil. *Soil Sci. Soc. Amer. J.*, 51: 690-698.
- PLANET (W.G.), 1970. Some comments on reflectance measurements of wet soils. *Remote Sensing of Environment*, 1:127-129.
- SHERMAN (D.M.), BURNS (R.G.) V.M. BURNS (V.M.), 1982. Spectral characteristics of iron oxides with application to the Martial bright region mineralogy. *J. Geophysical Research*, B12: 10169-80.
- STONER (E.R.), BAUMGARDNER (M.F.), 1981. Characteristic variations in reflectance of surface soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 45(6): 1161-1165.
- SOUZA (A.G.), AUDI (R.), 1964. A cor em relação ao teor de umidade de algumas séries de solos. *Bragantia*, 23(12):117-128.
- SHIELDS (J.A.), PAUL (E.A.), ARNAUD (R.J.), HEAD (W.K.), 1968. Spectrophotometric measurement of soil color and its relationship to moisture and organic matter. *Can. J. Soil Sci.*, 48:271-90.
- TORRENT (J.), SCHWERTMANN (U.), FETCHER (H.), ALFEREZ (F.), 1983. Quantitative relationships between soil color and hematite content. *Soil Science*, 136(6): 354-8.
- WYSZECKI (G.), STILES (W.S.), 1982. Color science: concept and methods, quantitative data and formule. John Wiley and Sons, New York, 2ème édition.

UTILISATION DES DONNEES SPOT POUR LA CARTOGRAPHIE DES RESSOURCES RENOUVELABLES APPLICATION A LA REGION COTIERE NORD-OUEST DE L'EGYPTE

M. POUGET¹ E. LE FLOCH² S. KAMAL³ B. SALEM⁴

RESUME

Les données SPOT sont utilisées dans la région côtière Nord-Ouest de l'Egypte dans le cadre d'une opération mise en oeuvre grâce à une subvention du ministère français de l'Environnement et avec la contribution de chercheurs égyptiens de l'Université d'Alexandrie et de chercheurs français (ORSTOM, CEPE/CNRS).

L'approche "état de surface" caractérise l'ensemble d'une démarche progressive qu'il est possible de décomposer en 4 étapes principales:

- préparation de l'étude, planning d'acquisition des données SPOT.
- inventaire des principales unités physiographiques.
- étude synchrone des relations états de surface/image SPOT au niveau de 50 sites tests.
- cartographie des états de surface .

Une typologie des principaux états de surface perçus par le satellite est établie en détaillant plus particulièrement la troisième étape de la démarche.

¹ Unité de Télédétection, LIA, Centre ORSTOM, Bondy.

² CEPE/CNRS, Montpellier.

³ Botany Department, Faculty of Science, Alexandria University, EGYPT).

⁴ Botany Department, Faculty of Science, Alexandria University, EGYPT).

I. INTRODUCTION

Le travail présenté ici se situe dans le cadre d'une convention avec le Ministère français de l'Environnement dans le prolongement du projet REMDENE (Régional Environmental Management of Mediterranean Desert Ecosystems of Northern Egypt). Il résulte d'une collaboration entre chercheurs égyptiens de l'Université d'Alexandrie et chercheurs français (ORSTOM et CEPE/CNRS) qui, voici quelques années avaient déjà coopéré dans ce même projet de cartographie des ressources renouvelables mais sans l'apport de la télédétection spatiale (AYYAD and LE FLOCH, 1983). La faible résolution spatiale des données Landsat MSS, les seules disponibles alors, restait insuffisante pour ce type de cartographie à moyenne échelle (1/50.000).

Par contre avec SPOT il devenait intéressant de mettre en oeuvre un nouveau projet qui s'appuierait, d'une part sur les résultats déjà obtenus et l'expérience de l'équipe et, d'autre part sur ce type de données beaucoup mieux adaptées.

Deux objectifs majeurs sont alors définis:

- actualisation des méthodes d'inventaire et de cartographie, à moyenne échelle, des ressources renouvelables en utilisant les données satellitaires et en particulier SPOT.
- préparation du suivi et de la surveillance par satellite de cette région fragile soumise à une très forte pression humaine. Cet objectif a été envisagé du fait que nous avons pu disposer de données SPOT acquises à 8 mois d'intervalle.

Dans cette note, nous n'aborderons que certains aspects relatifs à l'utilisation des données SPOT pour la cartographie des ressources renouvelables. Après une présentation très succincte de la zone d'étude nous exposerons dans une première partie les principales étapes de la démarche générale basée sur l'approche "état de surface" (ESCADAFAL, 1981, 1989; POUGET et al, 1984). Dans une seconde partie, nous développerons plus en détail l'une des étapes de cette démarche concernant l'aspect terrain, notamment l'étude des relations états de surface/image SPOT au niveau des sites tests.

II. LA REGION COTIERE NORD-OUEST DE L'EGYPTE

La zone d'étude se situe à l'Ouest d'Alexandrie et s'étend sur une centaine de kilomètres le long de la côte. Elle s'inscrit à l'intérieur de 2 scènes SPOT correspondant à une même orbite: KJ=107-288 et KJ=108-288 (fig. 1 et fig. 2).

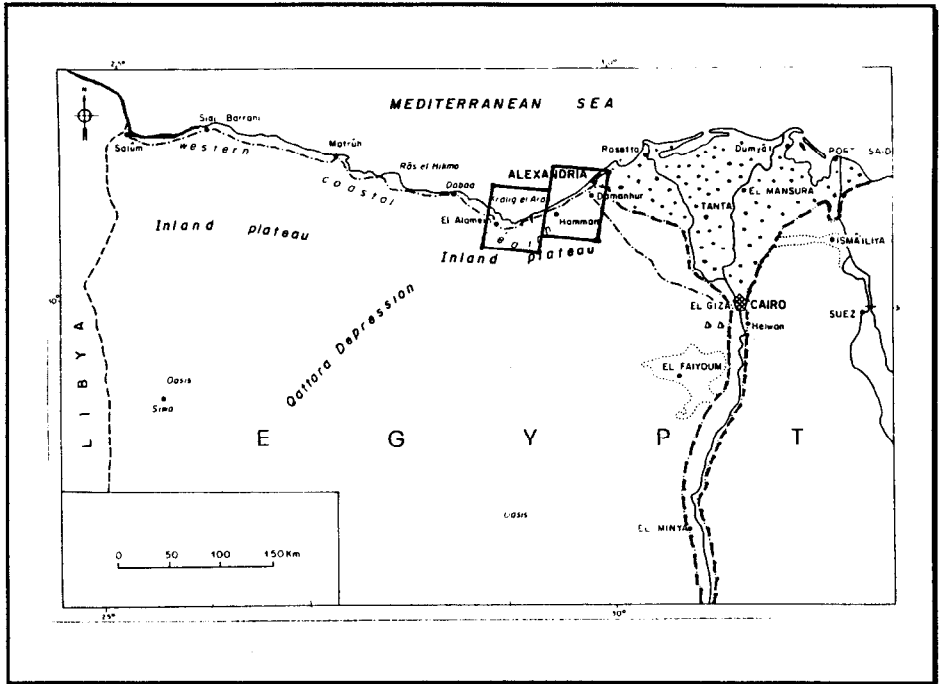


Figure 1. La région côtière Nord-Ouest de l'Égypte.

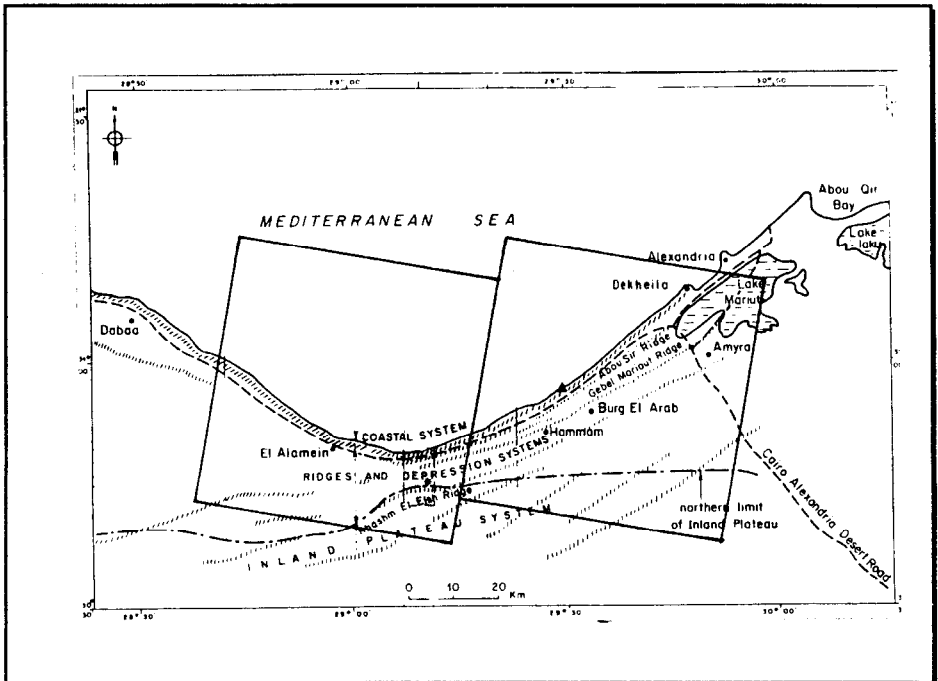


Figure 2. Les grands traits de l'organisation géomorphologique.

Le climat est de type méditerranéen aride avec des précipitations moyennes d'environ 150 mm/an.

L'organisation géomorphologique peut être schématiquement caractérisée par trois ensembles (fig. 2):

- une dune côtière plus ou moins consolidée (coastal system).
- un système de dunes consolidées parallèles à la côte et séparées par des dépressions endoréiques (ridges and depression system).
- un plateau faiblement ondulé qui prend le relais, vers le Sud, du système précédent (inland plateau system).

La distribution des sols est en relation étroite avec cette organisation géomorphologique:

- sols sableux plus ou moins profonds, dominants dans la région Ouest d'El Omayed, c'est-à-dire d'El Alamein à Hammam.
- sols limoneux à limono-sableux à l'Est (Burg el Arab).
- sols salsodiques dans les dépressions.

L'occupation humaine, très longtemps dominée par le pastoralisme (ovins, dromadaires) et l'aridoculture (céréales sur limons, vergers de figuiers sur sables), connaît depuis peu une intensification spectaculaire:

- périmètres irrigués par les eaux du Nil après la réalisation du barrage d'Assouan, matérialisant ainsi vers l'Ouest l'extension du Delta.
- urbanisation et implantation de complexes touristiques le long de la côte (dune côtière).
- extension des vergers de figuiers, donc des labours dans les zones sableuses avec aggravation de l'érosion éolienne (région d' El Omayed).

La végétation naturelle, le plus souvent très dégradée, subsiste dans les zones sableuses (steppe à ligneux bas et à graminées pérennes) et surtout dans les zones salées (steppes à halophytes).

PREMIERE PARTIE : LA DEMARCHE GENERALE

La démarche générale se réfère à l'approche "état de surface", l'état de surface étant la composition et l'organisation de la surface du sol à un moment donné (ESCADAFAL, 1989). Cette approche est basée sur les relations qui existent entre les caractéristiques de la surface du sol (états de surface) et les luminances spectrales mesurées par le satellite, ceci dans des conditions où les effets atmosphériques (brumes, aérosols, etc.) et les effets dus au relief restent faibles. La démarche consiste donc à comparer les états de surface (terrain) et les valeurs radiométriques (image). Cette comparaison s'effectue dans une démarche progressive qu'il est possible de décomposer en 4 étapes principales:

- la préparation de l'étude avec établissement d'un planning d'acquisition des données SPOT et de prospection sur le terrain.
- l'inventaire des principales unités physiographiques sur image SPOT.
- l'étude synchrone des relations états de surface/image SPOT au niveau de sites tests.
- et enfin la cartographie des états de surface qui sert de base à la cartographie thématique.

I. PREPARATION DE L'ETUDE

Le premier point concerne le choix des données satellitaires: nombre de scènes et dates à retenir. Pour prendre en compte la dynamique saisonnière, très importante en zone aride, il était évident au départ que deux images seraient nécessaires, l'une en fin de saison "humide" (Mars-Avril) et l'autre en fin de saison sèche (Octobre- Novembre). Une programmation d'acquisition de données SPOT a été préparée pour 1987 avec ces deux créneaux de dates. Les deux scènes se trouvant sur la même orbite du satellite l'acquisition a pu se faire simultanément par les deux capteurs HRV (Haute Résolution dans le Visible) en mode multispectral. Suite à des aléas nous avons dû nous satisfaire des données un peu tardives d'Avril. Une mission terrain a été programmée et réalisée en Novembre 1987 c'est-à-dire au moment du second créneau d'acquisition (15 Novembre-3 Décembre 87). Finalement nous avons pu disposer des deux scènes ((KJ=107-288 et KJ=108-288) à deux dates différentes: 10 Avril et 30 Novembre 87 (fig. 2).

II. INVENTAIRE DES PRINCIPALES UNITES PHYSIOGRAPHIQUES SUR IMAGES SPOT

Réalisé avant la tournée sur le terrain et basé sur l'analyse de l'image du 10 Avril cet inventaire a été conduit de deux façons différentes mais complémentaires:

- analyse visuelle des compositions colorées (échelle 1/200.000 et 1/50.000) réalisées à partir de films négatifs Noir et Blanc (1/400.000) à l'Atelier photochimique de Bondy.
- analyse numérique des données (bande magnétique CCT) effectuée à Bondy par l'ensemble de l'équipe en Juillet 1987.

Nous avons utilisé une démarche dirigée basée sur les connaissances déjà acquises sur la zone d'étude et sur les caractéristiques de l'image elle-même. Sur la composition colorée, on délimite des zones qui apparaissent homogènes par leur couleur et leur texture. Ces zones sont caractérisées par leurs valeurs radiométriques (moyenne et écart-type dans chacun des canaux SPOT XS₁, XS₂, XS₃) ce qui permet de définir des centres de classes. Chaque pixel de l'image est ensuite affecté à la classe pour laquelle la "distance" calculée est minimale. Dans le cas présent il s'agit de la distance euclidienne pondérée par l'écart-type (distance de SEBESTYEN).

On obtient une image classée et chaque classe correspond à un ou plusieurs types d'états de surface au moment de l'acquisition des données le 10 Avril 1987.

Pratiquement il s'agit donc d'une première stratification de l'image, soit environ une vingtaine de classes. Les connaissances acquises par l'équipe sur cette région et une certaine pratique de l'interprétation des données de télédétection permettent d'identifier 5 grands ensembles:

- **l'eau libre**: mer, lacs salés plus ou moins profonds.
- **la "végétation active"**, en rouge sur les compositions colorées standard: cultures dans les parcelles irriguées, végétation naturelle en bordure des zones inondées.
- **les "salt marsh"** dans les dépressions salines, caractérisés par des luminances faibles dans tous les canaux, apparaissent en gris foncé sur l'image.
- **un ensemble steppe-labours**, comprenant plusieurs classes plus ou moins nettes, s'organise en fonction de la brillance, des luminances faibles à moyennes à des luminances élevées dans tous les canaux, le parcellaire restant toujours visible.
- **enfin les sables blancs** de la dune côtière, caractérisent les zones extrêmement claires sur l'image (luminances très élevées).

Il n'est pas dans notre propos de détailler davantage cette étape de la démarche ni les résultats obtenus. Par contre, il convient de souligner l'importance de l'analyse préliminaire:

- elle permet d'**inventorier les principales unités spatiales ou unités physiographiques** (si) dont la physionomie est définie par des caractères en relation avec le milieu physique (géologie, géomorphologie, sols, hydrologie), la végétation naturelle et d'une façon générale l'occupation du sol.
- elle conduit à **formuler des hypothèses** sur les paramètres, surface du sol, dont l'influence est prépondérante sur les données radiométriques enregistrées par le satellite. Ceci oriente le choix des variables terrain à prendre en compte dans l'étape ultérieure. Par exemple, l'étroite corrélation existant entre les trois canaux SPOT dans l'ensemble steppe-labours souligne l'importance de la brillance. Dans ce type de milieu le facteur rugosité est certainement le plus important en raison de la "discrétion" des autres facteurs susceptibles d'intervenir tels que l'humidité ou la couleur, les sols étant secs généralement clairs et de même teinte (10 YR). La rugosité étant en relation avec plusieurs éléments caractéristiques de la composition et de l'organisation de la surface (pierrosité, travaux du sol, végétation etc.) il conviendra de privilégier la prise en compte de ces paramètres. En définitive l'analyse préliminaire constitue une phase essentielle de la préparation de la mission de terrain en facilitant l'établissement d'un plan d'échantillonnage: choix de la localisation des sites, choix des variables à collecter, etc.

III. L'ETUDE SYNCHRONE DES RELATIONS ETATS DE SURFACE/IMAGE AU NIVEAU DES SITES TESTS

L'objectif de cette étape est d'établir les relations existant entre les états de surface observés sur le terrain (entre le 15 Novembre et le 3 Décembre 1987) et l'image SPOT acquise sensiblement au même moment (30 Novembre 87). Autrement dit, est-il possible d'associer d'une façon biunivoque états de surface/caractéristiques radiométriques mesurées par les capteurs HRV de SPOT. Comment associer d'autre part ces états de surface aux paramètres écologiques (sols, végétation, occupation humaine, hydrologie, etc) qui conditionnent les ressources renouvelables dans leur état présent, leur utilisation et leurs potentialités que l'on a pour objectif de cartographier. Ces relations, indispensables à connaître pour une utilisation effective et efficace des données satellitaires, ne peuvent évidemment être étudiées ici.

L'étude de terrain a été conduite au niveau de sites tests (50) où sont effectuées des observations précises de la surface du sol et des mesures radiométriques. La composition colorée à 1/50.000 sur papier s'avère constituer un document irremplaçable pour un repérage précis sur le terrain. Le choix de l'emplacement des sites tests se réfère à l'étape précédente mais résulte surtout d'une confrontation terrain/image permettant une localisation sans ambiguïté, une appréciation de l'hétérogénéité et de la représentativité du site par rapport à l'objectif thématique.

La description de la surface est facilitée par l'emploi d'un formulaire adapté à ce type d'études utilisant les données satellitaires. Un formulaire simplifié a été construit à partir d'un modèle plus général (POUGET and MULDER, 1988, cf Annexe I). Il comporte deux volets:

- les données sur le site: situation dans le paysage, géomorphologie, pente, exposition, érosion, sols, végétation, occupation du sol, etc.
- les données qui caractérisent qualitativement et quantitativement la composition et l'organisation de la surface du sol au moment de la description, c'est-à-dire **l'état de surface**: microrelief, couverture végétale et couverture minérale.

Pour étudier le comportement radiométrique des états de surface et le comparer aux données SPOT des mesures radiométriques ont été effectuées avec un radiomètre CIMEL (3 canaux analogues à HRV) sur les différents éléments composant la surface.

L'information image est apportée par les données radiométriques acquises le 30 Novembre 87 par les deux capteurs HRV1 et HRV2 de SPOT.

La confrontation terrain/image doit permettre d'établir une typologie des états de surface susceptibles d'être perçus par le satellite.

IV. LA CARTOGRAPHIE DES ETATS DE SURFACE

Elle exprime la synthèse et la généralisation des relations états de surface/image et se traduit par une restitution cartographique à moyenne échelle (1/50.000) qui peut résulter:

- soit de la même démarche dirigée déjà utilisée pour la classification de l'image d'Avril. Les relations établies au niveau des sites tests permettent d'ajuster au mieux ces classifications tout en précisant la signification thématique des classes.
- soit d'une démarche non dirigée, les relations précédentes sont alors utilisées pour valider les classifications et pour donner a posteriori une signification thématique aux classes (RAKOTO, 1988).

Quoiqu'il en soit, on obtient une stratification de l'espace qui va servir de base à la cartographie des ressources renouvelables et d'une façon plus générale à l'élaboration de cartes thématiques: sols, végétation, occupation du sol, sensibilité à l'érosion, etc.

Le cadre de cette publication ne permet pas la présentation des résultats cartographiques qui seront intégrés dans le rapport final du projet. Par contre, nous allons développer la troisième étape de la démarche

DEUXIEME PARTIE: ETUDE SYNCHRONE DES RELATIONS ETATS DE SURFACE/IMAGE AU NIVEAU DES SITES TESTS

L'objectif est d'inventorier et de caractériser les principaux états de surface susceptibles d'être perçus par le satellite et par là même susceptibles de fournir une information utile pour la cartographie des ressources renouvelables.

Les relations états de surface/image seront étudiées à partir de l'analyse de l'information terrain et de l'information image collectées en mode synchrone au niveau des sites tests.

I. DONNEES ET METHODES

L'information terrain est constituée, pour chaque site test, des données concernant la description de la surface et des mesures radiométriques (réflectance).

Parmi les nombreuses données collectées à l'aide du formulaire on retient 34 variables qualitatives et quantitatives (Tableau 1).

Les mesures radiométriques ont été réalisées avec un radiomètre CIMEL sur chacun des éléments composant la surface, par exemple:

- les différents types de structure caractérisant la terre fine: agrégats, croûte de battance, croûte saline, etc.
- les éléments du microrelief: buttes sableuses colonisées par la végétation, espaces entre les buttes, etc.

On effectue ensuite une pondération de la réflectance pour caractériser globalement le comportement radiométrique de l'ensemble du site. A partir de ces valeurs on calcule les indices radiométriques (Annexe II):

indice de brillance (réflectance)

$$IBR = \sqrt{\frac{(XR_1)^2 + (XR_2)^2 + (XR_3)^2}{3}}$$

indice de végétation (réflectance)

$$IVR = \frac{XR_3 - XR_2}{XR_3 + XR_2} \quad *100$$

indice de couleur (réflectance)

$$ICR = \frac{XR_2 - XR_1}{XR_2 + XR_1} \quad *100$$

Tableau 1:
Liste des variables "description de la surface"

1- Données sur le site							
GM Unité géomorphologique (6 classes)							
PE Pente (4 classes)							
EX Exposition (3 classes)							
EO Intensité de l'érosion éolienne (4 classes)							
HY Intensité de l'érosion hydrique (4 classes)							
MA Matériau originel du sol (7 classes)							
OC Occupation du sol (7 classes)							
2- Caractérisation de l'état de surface							
21 Microrelief							
MN Nature (5 classes)							
MR* Importance par rapport à surface totale (en %)							
MH* Hauteur (4 classes)							
ML* Largeur (5 classes)							
MM* Longueur (3 classes)							
MO Orientation (6 classes)							
22 Couverture végétale							
RV Recouvrement total (en %)	Végétation sur pied	RP* recouvrement (en %) VS* structure (4 classes) VH* hauteur moyenne de la classe dominante (5cl)					
	Litière	RL* recouvrement (en %)					
23 Couverture minérale							
RM Recouvrement total (en %)	Affleurement rocheux	RR* recouvrement (en %)					
	Pierrosité (>7,5 cm)	RO* recouvrement (en %)					
	Graviers (7,5 à 0,2 cm)	RG* recouvrement (en %) GN* nature (4 cl)					
	Terre fine (<0,2 cm)	RT recouvrement (en %) TX* texture (3 classes) TH* humidité (3 classes) OC couleur (10 classes)					
Terre fine	Structure particulière	RS* recouvrement (en %) SN* nature (4 classes)					
	Structure en agrégats	RA* recouvrement (en %) AN* nature (4 classes) AD* diamètre (4 classes)					
	Structure continue avec croûte	RC* recouvrement (en %) BN* nature (4 classes)					
Les variables repérées d'une * ont été prises en compte dans l'AFC.							
0----->100 %							
RV		RM					
RP	RL	RR	RO	RG	RT		
					RS	RA	RC
Schéma récapitulatif montrant les différentes composantes de la surface (recouvrement total = 100 %)							

Les données SPOT

Les sites tests se répartissent sur les deux scènes SPOT dont la dynamique est très sensiblement la même comme on peut le vérifier dans la zone de recouvrement. Après localisation sur l'image, on extrait pour chaque site, les valeurs radiométriques moyennes pour les trois canaux SPOT: XS_1, XS_2, XS_3 ainsi que les indices (Annexe III):

indice de brillance

$$IB = \sqrt{\frac{(XS_1)^2 + (XS_2)^2 + (XS_3)^2}{3}}$$

indice de végétation

$$IV = \frac{XS_3 - XS_2}{XS_3 + XS_2}$$

c'est-à-dire:

$$128^* \frac{(1 + (XS_3 - XS_2))}{(XS_3 + XS_2)}$$

indice de couleur

$$IC = \frac{XS_2 - XS_1}{XS_2 + XS_1}$$

c'est-à-dire:

$$128^* \frac{(1 + (XS_2 - XS_1))}{(XS_2 + XS_1)}$$

Les méthodes d'analyse

Pour l'essentiel, l'analyse des données consiste à effectuer une classification des sites en fonction de ces 3 ensembles de données.

L'Analyse Factorielle des Correspondances (AFC) est utilisée pour tenter une typologie des états de surface en se basant sur la description qui en a été faite sur le terrain et comportant à la fois des variables qualitatives et quantitatives (microrelief, couverture végétale et minérale). On cherche à connaître les relations entre variables mais surtout à savoir comment s'effectue le regroupement des individus c'est-à-dire des états de surface et quelles sont les variables les plus déterminantes.

Pour classer les sites en fonction des données radiométriques (CIMEL et SPOT) la Classification Ascendante Hiérarchique (CAH) est mieux adaptée. Le regroupement des sites est basé alors sur la distance (distance euclidienne) qui les sépare dans l'espace radiométrique à 3 dimensions correspondant aux 3 canaux du visible et du proche-infrarouge.

II. LES RESULTATS

II.1. Typologie des états de surface à partir de la description sur le terrain

Le tableau 1 indique les 18 variables actives retenues pour l'analyse. Ce choix résulte à la fois de la capacité limitée du logiciel utilisé (STATITCF) et de la nécessité de prendre en compte, en priorité, les caractéristiques de la

surface (microrelief, couverture végétale et minérale). Les variables quantitatives sont transformées automatiquement en classes.

L'analyse fait apparaître plusieurs ensembles de sites auxquels on peut associer les variables les plus discriminantes permettant de caractériser des types d'états de surface (fig.3):

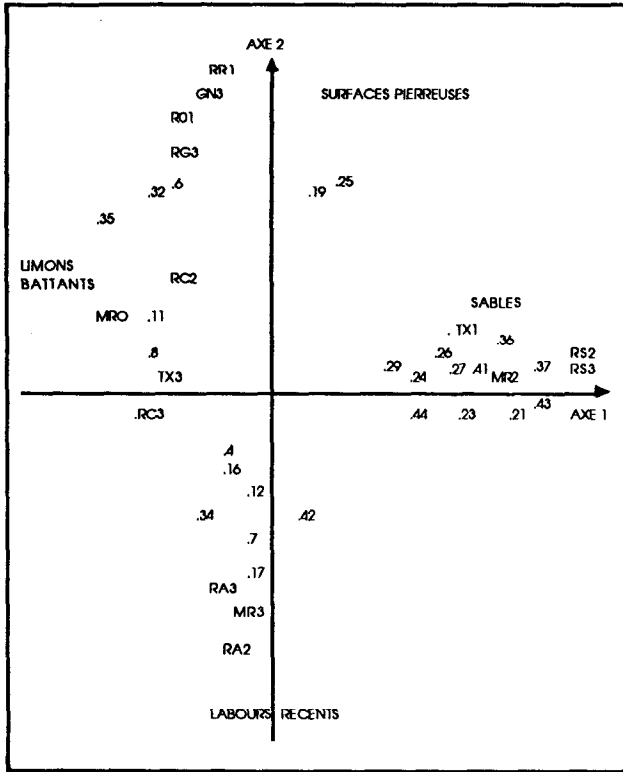


Figure 3. Analyse Factorielle des Correspondances (AFC) sur les données de description de terrain.
Graphique Axe 1/Axe 2

- **les sables** (sites n° 21, 23, 24, 26, 27, 29, 36, 37, 41, 43, 44): texture sableuse (TX1), structure particulière (RS2,RS3) et microrelief relativement important (MR2=20 à 80% de la surface).
- **les limons battants** (sites n°8,11): texture limoneuse à sablo-limoneuse (TX3), structure continue avec croûte (RC2,RC3) et microrelief nul (MRO).
- **les surfaces pierreuses** (sites n°6, 25, 32, 35): affleurements rocheux (RR1), graviers (RG3) constitués de débris de grès calcaires et de croûte calcaire (GN3). Ce sont les sites situés sur les dunes consolidées (ridges) et le plateau avec croûte calcaire affleurante.
- **les labours récents sur sables** (sites n°17, 12) et **limons** (sites n°7, 12) et certains **labours anciens sur limons** (sites n°4, 16, 34): structure en agrégats dominants (RA3) et microrelief important (MR3>80% de la surface).
- **les "salt marsh" à croûte saline**: surfaces caractérisées par une structure continue avec croûte saline (BN3), très humides (TH3).
- **les "salt marsh" à pseudosables**: surfaces caractérisées par une structure en microagrégats type pseudosables (AN3), humides (TH2).

II.2. Typologie des états de surface à partir des données radiométriques de terrain

L'arbre hiérarchique (fig. 4) entre les sites tests calculé par Classification Ascendante Hiérarchique (CAH) sur les données radiométriques de terrain montre une partition en 14 classes matérialisées par le trait vertical (tiret).

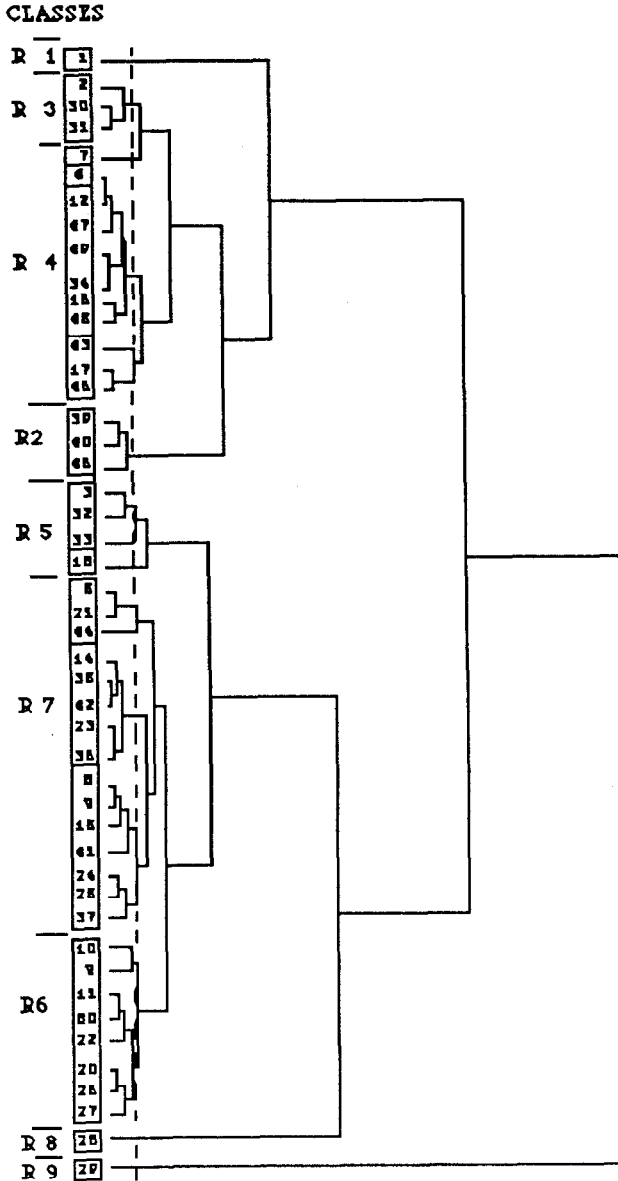


Figure 4. Arbre hiérarchique entre les sites tests (47) calculé par Classification Ascendante Hiérarchique (CAH) sur les données radiométriques de terrain.

Pour chacune de ces classes, comprenant un ou plusieurs sites, on calcule les indices radiométriques moyens afin d'aider à l'interprétation thématique qui s'appuie également sur les descriptions de terrain. Des regroupements s'imposent et l'on distingue 8 classes principales (Tableau 2) qui correspondent soit à un type d'état de surface relativement bien défini (R1,R8,R9), soit à plusieurs types.

Classes	Etats de surface	IBR	IVR	ICR
R1	Végétation active	354	78	>0
R2	"Salt marsh fonçés" steppes à halophytes	258	22	20
R3	"Salt marsh clairs" steppes à halophytes	328	11	10
R4	Labours récents (sables et limons) et Labours anciens (limons), pseudosables.	385	10	18
R5	Steppes-labours anciens (sables,limons)	462	10	17
R6	Steppes-labours anciens (sables, limons)	515	13	14
R7	Steppes-labours anciens (sables)	551	4	13
R8	Croûte saline	641	1	<0
R9	Sables blancs (dune côtière)	1020	8	8

Ainsi la **végétation active** (R1) se distingue nettement de tout l'ensemble avec un indice de végétation très élevé (site n°1, parcelle de Trêfle d'Alexandrie irrigué).

La **croûte saline** (R8), qui recouvre entièrement certaines dépressions asséchées (site n°28), présente des caractéristiques radiométriques spécifiques: réflectance élevée dans tous les canaux avec $XR_1 > XR_2 > XR_3$ et $ICR < 0$). Les **sables blancs** de la dune côtière (R9), avec des surfaces très claires, tranchent sur la totalité des autres sites (cf valeurs excessives de l'indice de brillance IBR).

Les classes R2 et R3 regroupent les états de surface des dépressions salines: "salt marsh" où dominent les steppes à halophytes:

- R2: "**Salt marsh fonçés**" c'est-à-dire soit des steppes denses à halophytes (*Tamarix articulata*, *Suaeda fruticosa*, *Atriplex halimus* pour les sites n°40 et 48), soit des steppes moins denses avec entre les touffes de végétation une surface humide et "rugueuse" constituée de microagrégats (pseudosables).
- R3: "**Salt marsh clairs**", le plus souvent il s'agit de steppes à *Halocnemum strobilaceum* avec croûte saline (site n°31). Le site n°2 correspond par contre à une parcelle récemment labourée à l'intérieur du périmètre irrigué de Burg el Arab.

La classe R4 individualise plusieurs types d'états de surface "**labours**" caractérisés par une rugosité importante:

- = labours récents sur sables (sites n°17,43,45) ou sur limons (sites n°7,12).
- = labours anciens (printemps 87) sur limons (sites n°4,34,49), avec parfois des pseudosables secs (site n°46) à frais (site n°47).

Les classes R5,R6,R7 forment un ensemble complexe **steppes-labours anciens** où les surfaces sont de plus en plus "brillantes" en relation avec la diminution du couvert végétal et de la rugosité. Les données radiométriques ne permettent pas de discriminer les différents états de surface

caractérisant cet ensemble steppées-labours anciens, tout au plus permettent-elles de les situer dans un continuum où d'une façon générale la rugosité diminue.

II.3. Typologie des états de surface à partir des données SPOT (30 Novembre 1987)

L'arbre hiérarchique (fig. 5) entre les 50 sites tests, calculé par la Classification Ascendante Hiérarchique (CAH) sur les données SPOT, montre une partition en 15 classes matérialisée par le trait vertical (tiret).

Après regroupement il subsiste 11 classes principales correspondant à un ou plusieurs états de surface (Tableau 3).

Classes	Etats de surface	IB	IV	IC
S1	Végétation active.	73	208	117
S2	"Salt marsh fonçés", steppes à halophytes.	75	158	135
S3	"Salt marsh clairs", steppes à halophytes.	91	141	133
S4	Labours récents (sables,limons) et labours anciens (limons).	110	138	135
S5	Steppes à végétation dense, lab. anciens	121	133	136
S6	Steppes, labours anciens (limons,sables)	125	136	135
S7	Croûte saline.	128	117	126
S8	Steppes, labours anciens (sables)	135	135	137
S9	Steppes, limons battants.	138	135	139
S10	Limons battants.	141	143	137
S11	Sables blancs (dune côtière).	197	122	127

On retrouve ici les types les plus caractéristiques mis en évidence à partir des données radiométriques de terrain:

- **la végétation active** (S1).
- **les steppes à halophytes** des "salt marsh fonçés et clairs" (S2 et S3).
- **les labours récents** (sables et limons) **et anciens** (limons) avec parfois des pseudosables (S4).
- **la croûte saline** (S7) dont les caractéristiques radiométriques sont atténuées car l'ensemble de la zone où se situe le site n°28 ne représente que quelques pixels (pixels composites) dans un environnement dominé par des états de surface de type "salt marsh" (S2,S3).
- **les sables blancs** de la dune côtière (S11).

Il est intéressant de noter une distribution différente des sites dans le complexe steppes-labours anciens:

- un état de surface limons battants (S10) déjà mis en évidence dans l'analyse des données concernant la description de terrain (sites n°8 et 11), s'individualise assez nettement et se caractérise par un indice de brillance élevé.
- la classe S5 regroupe plusieurs types d'états de surface dont les steppes sableuses à végétation dense (recouvrement végétal entre 8 et 15%).

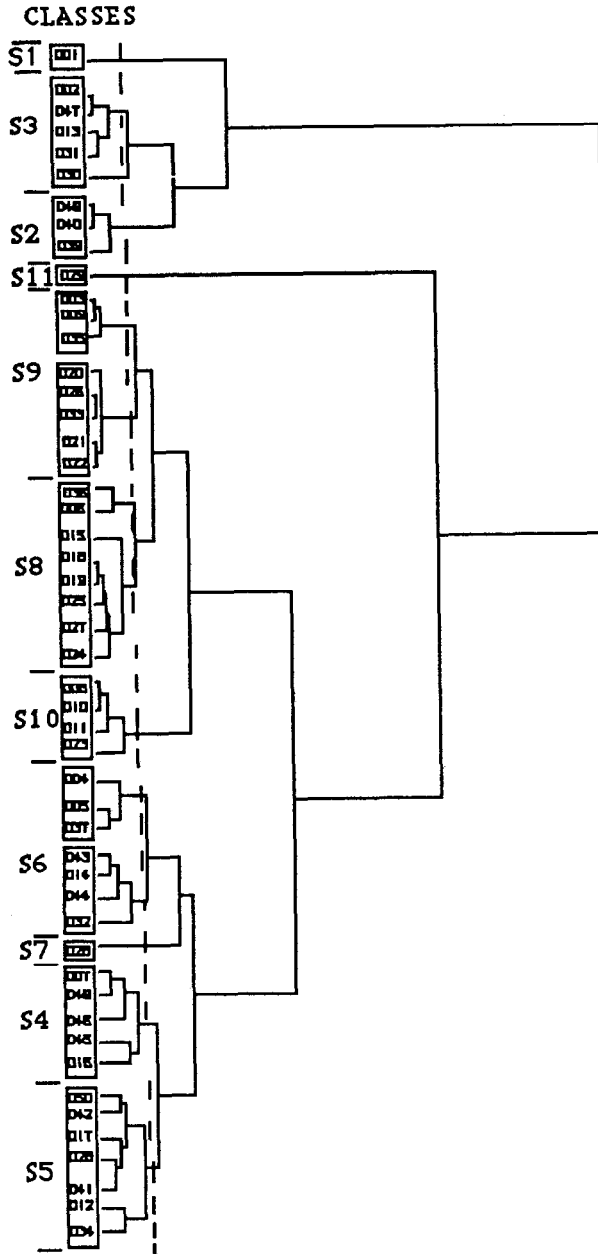


Figure 5. Arbre hiérarchique entre les sites tests (50) calculé par Classification Ascendante Hiérarchique (CAH) sur les données radiométriques SPOT (30 Novembre 1987).

III. SYNTHÈSE: TYPOLOGIE DES ETATS DE SURFACE PERÇUS PAR SPOT

Les analyses précédentes apportent des éléments pour esquisser une typologie des états de surface perçus par SPOT à la date du 30 Novembre 1987. Cette typologie s'organise autour de quatre ensembles principaux:

- Les états de surface associés d'une façon **biunivoque** à des caractéristiques radiométriques spécifiques correspondent le plus souvent à des milieux écologiques bien déterminés:
 - **la végétation active** est représentée ici par une parcelle irriguée de trèfle d'Alexandrie (site n°1). Un échantillonnage plus fourni aurait introduit une diversification du type de végétation (autre culture irriguée ou végétation naturelle à dominante de roseaux en bordure des zones inondées dans les dépressions salines) et une diversification des réponses radiométriques.
 - **la croûte saline** qui se forme à la surface des lacs salés (évacorites) présente une "signature spectrale" caractéristique avec des valeurs radiométriques décroissantes dans le sens des canaux XS₁, XS₂, XS₃.
 - **les sables blancs** de la dune côtière correspondent à des valeurs radiométriques très élevées dans les trois canaux.
- Un autre ensemble concerne les états de surface associés à un milieu écologique, bien individualisé mais très diversifié, **les dépressions salines**, où les radiométries (CIMEL et SPOT) permettent de distinguer nettement deux sous-ensembles, **les "salt marsh fonçés"** et **les "salt marsh clairs"** caractérisés chacun par plusieurs types d'états de surface en fonction de la densité et de la nature du couvert végétal, de la nature (croûte saline, pseudosables) et de l'état (humidité) de la surface du sol.
- **L'état de surface labours**, qui regroupe en fait plusieurs types (labours récents sur sables ou sur limons, labours anciens sur limons), occupe une place assez précise dans l'espace radiométrique entre les "salt marsh", plus sombres, et l'ensemble steppes-labours plus clair. Les labours sur limons conservent pendant plusieurs mois une certaine rugosité en raison de la stabilité des agrégats. Cette surface motteuse est ensuite "fixée" par une croûte de battance qui contribue au maintien de la rugosité. Sur sables, les labours sont très rapidement "détruits" et les surfaces applanies en raison de la fragilité des agrégats et de l'importance de l'érosion éolienne.
- Dans l'ensemble **steppes-labours anciens** les caractéristiques radiométriques, en saison sèche, ne permettent pas de distinguer les états de surface correspondant aux deux principales composantes, à l'exception des limons battants qui assurent la transition avec les sables blancs de la dune côtière. Dans ce complexe, les états de surface "pierreux", pourtant bien définis par la description sur le terrain, ne s'individualisent pas. Il en est de même pour la steppe à *Limonistrum* (site n°14).

En définitive, au travers de cette typologie on perçoit la nature et l'importance, très variable selon les milieux, de l'information susceptible d'être apportée par cette image SPOT. On en perçoit **les limites**, le satellite ne distingue pas les surfaces sableuses des surfaces limoneuses sauf dans le cas où les textures sont associées à une autre caractéristique qui elle est discriminante, telle la luminance très élevée des sables blancs ou des limons battants. La texture peut apparaître aussi indirectement par une **différence de comportement** du sol après un labour: sur limons la rugosité créée par les agrégats subsiste plusieurs mois (labours anciens) alors que

les agrégats très fragiles et l'érosion éolienne toujours intense contribuent à aplanir la surface en quelques semaines sinon quelques jours. Pour mettre en évidence cette différence de comportement et exploiter ainsi une telle possibilité d'information il faut envisager une étude diachronique. A cet égard, la scène du 10 Avril 87 s'est révélée particulièrement intéressante.

CONCLUSION

Les données SPOT apportent une information importante sur les états de surface qu'il est possible de cartographier à moyenne échelle. Ces états de surface sont en relation plus ou moins directe avec les paramètres écologiques (sols, végétation, occupation humaine, hydrologie, etc) qui conditionnent les ressources renouvelables dans leur état présent, leur utilisation et leurs potentialités.

Les principaux milieux écologiques (dune côtière, dépressions salines, périmètres irrigués, zones labourées) se distinguent relativement bien sur l'image mais de nombreuses confusions subsistent. Pour une part, l'analyse diachronique devrait permettre de distinguer sans ambiguïté les zones d'aridoculture (sables ou limons) des zones sous végétation naturelle. De même, les variations saisonnières des états de surface dans les dépressions salines pourraient contribuer à une meilleure discrimination des différentes steppes à halophytes.

Le facteur rugosité joue un rôle primordial dans les milieux où subsiste une végétation steppique. Un seuil important semble correspondre à celui où le couvert végétal est compris entre 8 et 15%. A l'effet ombre créé par la végétation s'ajoute celui du microrelief (buttes sableuses). Pour des recouvrements plus faibles, la rugosité (microrelief, pierrosité) est le seul paramètre qui intervienne.

BIBLIOGRAPHIE

- AYYAD (M.G.), LE FLOCH (E.), 1983.- An Ecological Assessment of Renewable Resources for Rural Agricultural Development in the Western Mediterranean Coastal Region of Egypt . Case study : El Omayed test- area. REMDENE. project, Alexandria, Montpellier, Paris. 103 p.
- ESCADAFAL (R.), 1981.- Une méthode nouvelle de description de la surface des sols dans les régions arides. Actes du Colloque "Informatique et traitement des données de sols" , Paris, 1981, in : Sols, n°5 ,p. 21-27.
- ESCADAFAL (R.), 1989.- Caractérisation de la surface des sols arides par observation de terrain et par télédétection. Applications: Exemple de la région de Tataouine (Tunisie). Paris, Thèse de Doctorat Université Paris 6, 317 p.
- POUGET (M.), LORTIC (B.), SOUISSI (A.), ESCADAFAL (R.), and MTIMET (A.), 1984.- Contribution of Landsat data to mapping of land resources in arid regions. ("Tataouine" and "Zarzis" sheets of 1/200.000 soil map of Tunisia). 18th Internat. Symp. on Remote Sensing of Env., Paris, 1-5 October 1984, 9 p.
- POUGET (M), MULDER (M.A.), 1988. Report of the ISSS working group "Remote sensing of the soil surface". Description of the landsurface for correlation with remote sensing data. 5th ISSS Symposium of the Working group Remote Sensing, Budapest, 11-15/04/88.
- RAKOTO-RAVALONTSALAMA (M.) and al, 1988.- Guide de l'utilisateur de PLANETES. Unité de Télédétection / L.I.A., Centre O.R.S.T.O.M., Bondy, 130p.

ANNEXE I
FORMULAIRE DE DESCRIPTION DE LA SURFACE DU SOL

(POUGET and MULDER, 1988)

I.3. Situation dans le paysage

I.3.1. Contexte géomorphologique général: | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

I.3.2. Substratum géologique	Nature:	
	Est-il apparent?	oui / non
	Pendage	%
	Orientation en surface	-
	Couverture sédimentaire Type	
	Epaisseur mètres	

I.3.3. Unité géomorphologique	Type	
	Dimension	hectares
	Emplacement du site sur l'unité:	
	Distance du site par rapport à l'amont:	mètres

I.3.4. Pente de l'unité géomorph.	Pente moyenne	%
	Exposition:(N-NE-E-SE-S-SW-W-NW)	
	Longueur:	mètres
	Forme:	

I.3.5. Ondulations de la surface (> 1m)	Sans ondulation		
	Nature		
	Forme		
	Amplitude	Verticale	
	Avec ondulations	moyenne en mètres	Horizon.
	Orientation	-	

I.3.6. Erosion	Pas d'érosion	
	Erosion	Type
	Forme	
	Intensité	
	Pourcentage de surface affectée	%

II.2.3. Sylviculture et agriculture

Observations Types de cultures	Espèces	Date de plantations ou semis	Stade végétatif	Etat général	Estimations Rendements Divers
Reboisement					
Cultures pérennes					
Cultures annuelles					
Pâturages et prairies artific.					

II.2.4. Sols nus

OUI / NON

II.2.5. Eléments d'aménagement du paysage agricole

Superficies moyennes des parcelles en hectares	
Haies	
Talus	
Terrasses	

II.2.6. Techniques agricoles

Drainage (type)	
Irrigation (type)	
Labour	J M A
Hersage	J M A
Ados	J M A
Planches	J M A

II.2.7. Feux

Date	J M A
Extension Hectares	
Végétation brûlée	%
Repousse	%

II.2.7. Zone urbaine

--

II.2.8. Eau libre

--

II.2.9. Faune

Espèces	
Types de construction	

III. IDENTIFICATION DE LA MOSAIQUE SURFACES ELEMENTAIRES ("MOSAIQUE SE") AU MOMENT DE LA DESCRIPTION DU SITE-TEST

III.1. Aire du site test décrit

III.1.1.. Superficie hectares 111

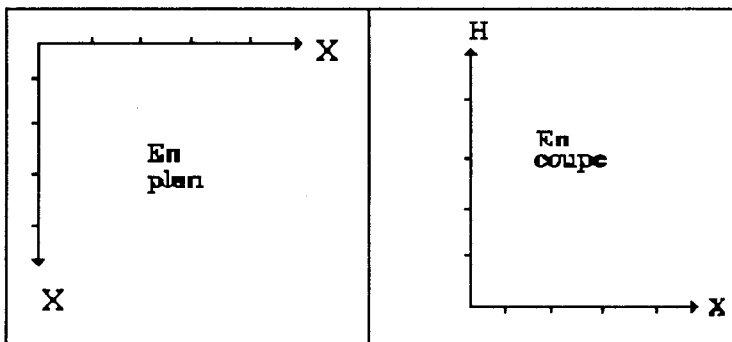
III.1.2. Nombre surfaces élémentaires décrites (SE) 111

III.2. Composition de " la mosaïque SE "

Code des SE	DESCRIPTION - IDENTIFICATION des SE	Pourcentage % superficie site-test		Observations complémentaires
		Estimé	Mesure*	
1				
2				
n				

* Type de méthode utilisé

SCHEMAS DE LOCALISATION DES SE



IV.2.1.2. Caractérisation des strates

STRATES							
Caractérisation							
Identification							
Recouvrement %	Estimé						
	Mesuré						
Recouvrement "Visible" %	Estimé						
	Mesuré						
"Activité"	Couleur domin.						
	Autre couleur						
	sec %						
	vert %						
	Éternité						
Structure	Hauteur moyenne en mètres						
	Distance moyenne						
	Durabilité						
	Taille moy. des courbes						
	Transparence						
Composition	Éléments dominants						

IV.2.2. Litières et débris organiques

Types		Litières	Brindilles	Algues et lichens	Divers
Recouvrement %	Estimé				
	Mesuré				
Recouvrement "visible" %	Estimé				
	Mesuré				
Nature					
Couleur					

IV.3. Couverture minérale (= affleurement rocheux +pierreosité+ terre fine)

Recouvrement en % Couverture minérale	TOTAL		"VISIBLE" par le satellite	
	Estimé	Mesuré	Estimé	Mesuré
A ffleurements rocheux				
Pierreosité				
Terre fine				
Couverture minérale (affl. +pierreosité +terre fine)				

IV.3.1. Affleurements rocheux

Types		I	II	II	
Caractérisation					
Identification					
Recouvrement %	Estimé				
	Mesuré				
Recouvrement "Visible" %	Estimé				
	Mesuré				
Couleur					
Hauteur myenne en mètres					
Nature minéralogique					

IV.3.2. Pierrosité

Classes de pierrosité		Blocs	Pierres	Cailloux	Graviers
Caractérisation		> 25 cm	25-7,5 cm	7,5-2cm	2-0,2cm
Recouvrement %	Estimé				
	Mesuré				
Recouvrement "Visible" %	Estimé				
	Mesuré				
Diamètre moyen					
Couleur					
Nature minéralogique					
Revêtements					

IV.3.3. Terre fine (< 0,2 cm)

Etat structural de la surface		Structure particulière	Structure fragmentaire avec agrégats et/ou mottes	Structure continue avec croûte (surface lisse battante)	Autre état
Caractérisation					
Identification					
Recouvrement %	Estimé				
	Mesuré				
Recouvrement "Visible" %	Estimé				
	Mesuré				
Texture					
Couleur	Sec				
	Humide				
Diamètre moyen en cm des agrégats et/ou mottes bien individualisées ou encroûtées					
Réseau de fente de retrait	Présence d'un réseau	OUI / NON	OUI / NON	OUI / NON	OUI / NON
	Diamètre de la maille en cm				
	Forme				
	Largeur des fentes en cm				
	Profondeur des fentes en cm				
Caractéristiques physico-chimiques					
Humidité	Appréciation de l'état d'humidité				
	Pondérale en %				
	Volumique en g/cm ³				

V. DIVERS

- Photographies
- Mesures radiométriques
- Mesures diverses
- Résultats d'analyses de sol

ANNEXE II

LES DONNEES RADIOMETRIQUES DE TERRAIN (CIMEL)
(15 Novembre - 3 Décembre 1987)

N°	XR ₁	XR ₂	XR ₃	IBR	IVR	ICR
1	99	74	601	354	78	-14
2	233	335	431	343	13	18
3	460	590	599	553	1	12
4	278	393	483	394	11	17
5	373	509	516	471	1	15
6	-	-	-	-	-	-
7	326	335	418	338	11	10
8	341	463	557	465	9	15
9	349	482	561	472	8	16
10	399	477	654	521	16	9
11	374	491	622	506	12	13
12	277	387	477	405	11	17
13	-	-	-	-	-	-
14	324	434	556	448	12	15
15	350	466	577	473	11	14
16	256	368	453	368	11	18
17	281	412	514	413	11	19
18	471	514	604	532	8	4
19	344	470	646	502	16	15
20	441	507	632	532	11	7
21	364	516	535	478	2	17
22	369	523	617	513	8	17
23	295	437	556	442	12	19
24	333	499	616	496	10	20
25	342	498	594	489	9	18
26	348	505	638	510	12	18
27	352	528	659	528	17	20
28	842	667	614	641	1	-12
29	860	1003	1175	1020	8	8
30	237	322	380	319	8	15
31	230	317	401	324	12	14
32	472	605	637	576	3	12
33	406	567	633	544	6	16
34	268	392	442	375	6	19
35	314	438	543	442	11	16
36	288	429	559	439	13	20
37	311	473	593	473	11	21
38	-	-	-	-	-	-
39	148	245	362	266	19	25
40	155	216	364	260	26	16
41	309	483	549	458	6	22
42	308	454	564	454	11	19
43	284	436	442	394	1	21
44	370	432	540	453	11	8
45	256	360	476	375	14	17
46	267	411	507	407	10	21
47	268	408	473	393	8	21
48	143	214	336	249	22	20
49	274	388	448	371	7	17
50	364	506	630	512	11	16

ANNEXE III

LES DONNEES SPOT: 30 NOVEMBRE 1987

N°	XS ₁	XS ₂	XS ₃	IB	IV	IC
1	41	34	64	73	208	117
2	53	59	56	85	156	135
3	81	96	83	132	149	139
4	69	83	73	113	150	140
5	72	87	75	118	150	140
6	75	88	77	121	150	137
7	65	77	67	106	149	139
8	86	103	89	141	148	140
9	80	97	84	132	149	141
10	86	102	88	140	150	139
11	84	101	87	138	149	140
12	65	79	69	107	150	140
13	56	62	54	87	149	135
14	76	81	78	136	126	132
15	79	83	79	139	125	132
16	65	69	66	116	124	132
17	68	75	73	125	126	133
18	77	86	83	142	126	135
19	78	86	83	114	126	135
20	79	89	87	148	127	136
21	77	88	85	144	126	137
22	77	88	86	145	126	137
23	69	76	74	127	126	135
24	74	85	83	141	126	136
25	77	85	82	141	126	134
26	80	87	86	146	127	134
27	78	85	84	142	127	134
28	80	77	65	128	117	126
29	117	117	106	197	122	128
30	57	55	49	93	121	127
31	59	62	57	103	123	131
32	76	78	72	130	123	129
33	79	87	86	146	125	134
34	66	80	71	110	151	140
35	78	96	84	131	150	141
36	73	91	82	124	152	142
37	70	86	77	118	152	141
38	70	76	72	126	125	143
39	44	49	51	73	164	135
40	47	54	50	76	155	137
41	70	75	73	126	126	133
42	68	78	74	126	126	135
43	74	81	78	134	126	134
44	72	80	78	133	126	135
45	65	72	71	120	128	134
46	62	74	66	102	151	139
47	54	60	56	85	155	135
48	48	52	48	75	155	133
49	66	77	66	105	148	139
50	85	96	90	157	124	136

**ETUDE DES LATERITES PAR TELEDETECTION.
CARTOGRAPHIE THEMATIQUE DE BANANKORO ET DAGADAMOU
CORRELATION DES DONNEES GEOCHIMIQUES
COMPARAISON MULTITEMPORELLE
ET CLASSIFICATION DES IMAGES SPOT AU SUD-MALI**

Jean Claude PION, Claude ROQUIN, Toundé DANDJINOU, Hervé YESOU

ABSTRACT

A detailed geochemical mapping of lateritic superficial formations in South Mali is compared with SPOT satellite multispectral images. The two main landscape features concern the distribution of vegetation cover and the distinction between silty clay soils in the valleys and ferricrete exposed on the plateaus. The density of vegetation on ferricrete is related to their kaolinite content. Plateaus are surrounded by a halo of high reflectance corresponding to the bottom slope detrital accumulation of quartz and heavy minerals.

Some results of thematic mapping based on SPOT images over the lateritic area of BANANKORO in South Mali are described. Several methods of supervised classification have been used. The best results are given after class definition on bidimensional histograms corresponding to SPOT XS channels or first factors of PCA. Preliminary structural mapping is achieved with the help of KIRSCH operator for edge and line enhancements.

I. INTRODUCTION

Le programme de recherches "Etude des latérites par télédétection", vient s'intégrer dans un contexte de cartographie générale thématique des formations tropicales. Les études de Télédétection ont été entreprises dans le secteur aurifère de KANGABA, qui est une région fortement recouverte de latérites. L'objectif du programme est de fournir une aide et un support à la prospection des ressources minérales. Nous présentons les essais effectués sur les zones test de BANANKORO et DAGADAMOU pour les corrélations de données géochimiques, les comparaisons de dates, la cartographie structurale et la cartographie par classification des images SPOT.

Il existe de grandes différences sur les images SPOT, entre les prises de vues du mois d'avril 1986 et les prises de vues du mois de novembre 1986 (Tableau I). La possibilité de combiner les deux dates permet cependant une cartographie de synthèse qui est riche d'enseignements.

Dates	K - J	Captureurs Produits	Origine	Angles de prise de vue	Angles d'incidence	Orientaton de l'orbite	Heures locales	Coordonnées du Centre des scènes
Avril 1986	39 - 326	HRV 2 XS1, XS2, XS3 CCT - 1B	TOULOUSE	22.0° Ouest	25.1° Right	8.6°	10h 59' 45"	N. 012° 01' 11" W. 008° 44' 50"
	39 - 327	HRV 2 XS1, XS2, XS3 CCT - 1B	TOULOUSE	22.0° Ouest	25.1° Right	8.6°	10h 59' 54"	N. 011° 31' 10" W. 008° 51' 24"
29 Novembre 1986	39 - 326	HRV 1 XS1, XS2, XS3 CCT - 1B	KIRUNA	18.4° Est	20.9° Left	9.3°	11h 23' 03"	N. 012° 01' 11" W. 008° 50' 15"
	39 - 327	HRV 1 XS1, XS2, XS3 CCT - 1B	KIRUNA	18.4° Est	20.9° Left	9.3°	11h 23' 12"	N. 011° 31' 10" W. 008° 57' 27"

Tableau I. caractéristiques des images SPOT

La zone test de DAGADAMOU et le plateau de BANANKORO se situent dans la région de KANGABA (11° 42 Nord, 8° 43 Ouest), en bordure du Niger, à la frontière avec la Guinée. Ces zones sont recouvertes d'une végétation de savane boisée qui correspond à une zonation climatique tropicale, type Sud-Soudanien. La région se définit comme étant très couverte par les formations latéritiques.

Le choix des secteurs de DAGADAMOU et BANANKORO se justifie surtout par l'existence d'une minéralisation aurifère, en placer et sous cuirasse, qui a déjà fait l'objet de nombreux travaux de reconnaissance en prospection minière. Un des premiers objectifs de l'étude était de mettre en évidence les relations existant entre la composition chimique et minéralogique des latérites et leur réponse radiométrique enregistrée sur les images SPOT. Plusieurs unités morphologiques ont été identifiées : les plateaux cuirassés, les talus, les glacis et les thalwegs [1,2,3].

Pour la zone de DAGADAMOU, sur un secteur de 25 km², les images SPOT ont été comparées avec les cartes géochimiques et minéralogiques établies en prospection multi-éléments, à partir de 1000 échantillons de surface, prélevés à la maille de 100 x 200 m. Les images SPOT ont été acquises sous forme de couple stéréoscopique en mode multispectral, avec une première visée oblique Ouest, le 5 Avril 1986, en fin de saison sèche et une seconde visée Est, le 29 Novembre 1986, environ deux mois après la saison humide.

Pour la zone de BANANKORO, une analyse en composantes principales (ACP), permet d'obtenir de nouveaux axes, décorrélés entre eux, qui sont des combinaisons linéaires des canaux XS1, XS2 et XS3 [4, 5]. **Le premier facteur** de l'analyse en composantes principales représente plus des trois quarts des variations globales de luminance. Les images des facteurs F1 correspondent beaucoup à ce que l'on peut observer sur les images normales XS1 et XS2. Comme il s'agit d'une somme de canaux, les contrastes entre les différents thèmes sont accentués par un lissage des petites hétérogénéités. On voit mieux les contours des plateaux cuirassés en novembre et il y a plus d'informations sur les zones basses des thalwegs en avril. **Le facteur F2** représente moins du quart de la variance globale des luminances. Il traduit assez fidèlement les contrastes entre le canal infrarouge XS3 et les canaux visibles XS1 et XS2. Il est très influencé par la végétation et ressemble aux néocanaux des indices de végétation (figures 1 et 2). L'image de novembre est beaucoup plus homogène que l'image d'avril, ce qui indique une végétation mieux répartie et mieux couvrante en novembre. **Le troisième facteur F3** ne représente que 1% de la variance globale des luminances. Il est sans commune mesure avec les deux premiers facteurs. Il s'agit en fait de beaucoup de bruit de fond et du faible lignage vertical propre aux capteurs SPOT.

II. RESULTATS POUR LA ZONE DE DAGADAMOU

En avril, le contraste d'albedo et de couleur entre les cuirasses ferrugineuses affleurantes des plateaux et les couvertures silto-argileuses déposées dans les dépressions topographiques, est bien marqué par un indice de cuirasse, $Ic = 3XS1 - XS2 - 100$. En Avril et Novembre, les indices de végétation $Iv = \frac{(XS3 - XS2)}{(XS3 + XS2)}$ montrent que sur certains plateaux, la végétation se distribue suivant plusieurs bandes parallèles d'orientation NW-SE [6, 7]. Cela semble traduire l'empreinte des structures lithologiques primaires peu visibles sur le terrain, mais préservées dans le profil d'altération (figure 3).

Par ailleurs, la différenciation pédologique correspondant à une zone d'accumulation détritique au pied des buttes cuirassées, mise en évidence par un halo géochimique en quartz et en zirconium, se marque aussi très nettement sur les images SPOT par une auréole claire dépourvue de végétation.

Après un recalage des images SPOT sur les cartes géochimiques, les pixels correspondant aux points de prélèvement ont été sélectionnés et les données radiométriques ont été intégrées au fichier géochimique. L'indice de végétation maximum qui est pris en compte le plus souvent, correspond à une synthèse des indices d'avril et de novembre, destinée à diminuer l'influence des feux de brousse récents dont l'emplacement varie d'une date à l'autre.

Les éléments géochimiques se répartissent en trois groupes, suivant leurs affinités avec les deux indices radiométriques [8]. Ces groupes correspondent aux trois pôles principaux de différenciation du fond géochimique :

- Le quartz, la silice et les éléments traces (Y, Zr, Ce, Ti) associés au cortège des minéraux lourds qui s'accumulent dans les sols des vallées où la végétation est plus abondante sont positivement corrélés avec les deux indices;
- Le pôle opposé regroupe les éléments qui s'enrichissent avec les oxyhydroxydes de fer dans les cuirasses (V, P, Nb, As, Mo, Cr);
- En position intermédiaire se situent les éléments accompagnateurs de la phase alumineuse à kaolinite dominante (Cu, Ni, Ba, Sr, Zn, K, Mg).

En revanche, lorsque l'on considère séparément chacun des quatre faciès de prélèvement on observe deux types de réponses différentes liées essentiellement à l'indice de végétation :

- Sur les trois faciès des cuirasses ferrugineuses (alumineuses, siliceuses et gravillonnaires), les zones les plus alumineuses et les plus riches en kaolinite sont celles où la végétation est la plus abondante (figure 4);
- Pour les sols de flat, l'indice de végétation est lié aux éléments Mn, Ba, Ce, Sr, Co; ce qui traduit les effets de coprécipitations le long des axes de drainage où la végétation est plus développée.



Figure 1. Indice de végétation du mois de Novembre, BANANKORO

BANANKORO NOV. ACP2

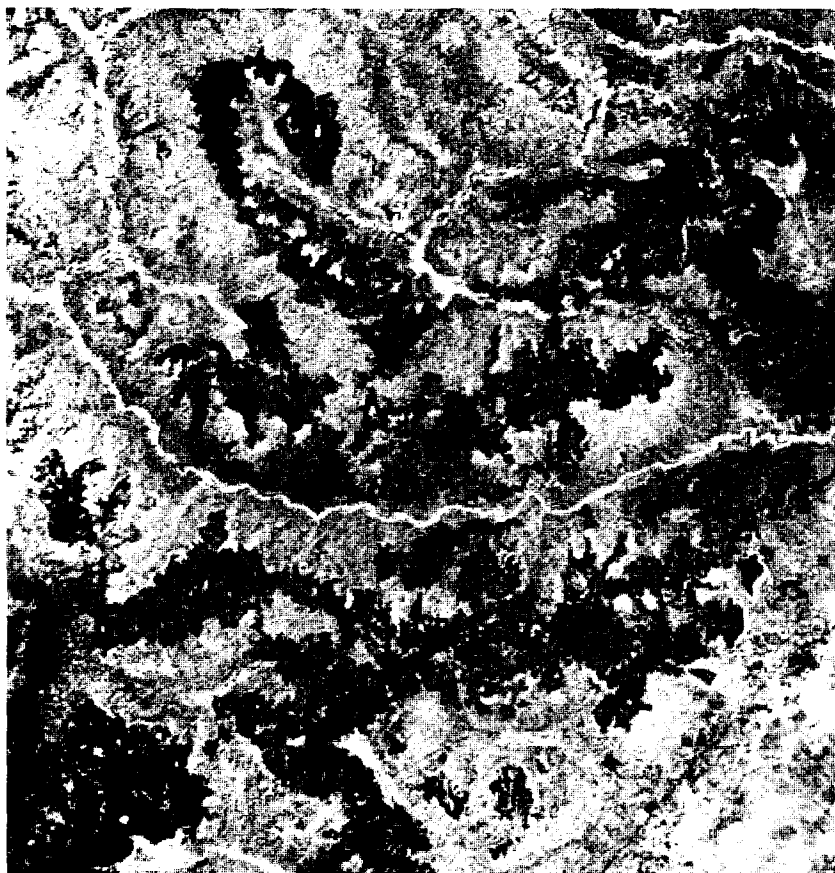


Figure 2. Analyse en composantes principales du mois de Novembre ACP facteur 2, BANANKORO

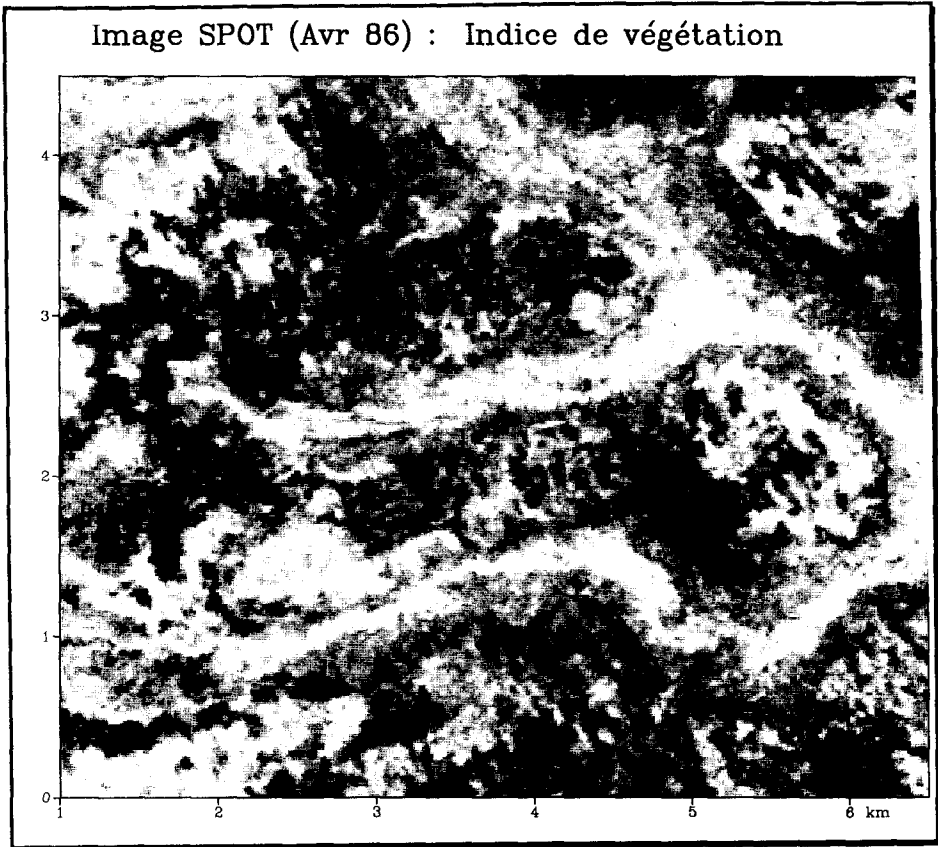


Figure 3. Indice de végétation du mois d'Avril, DAGADAMOU

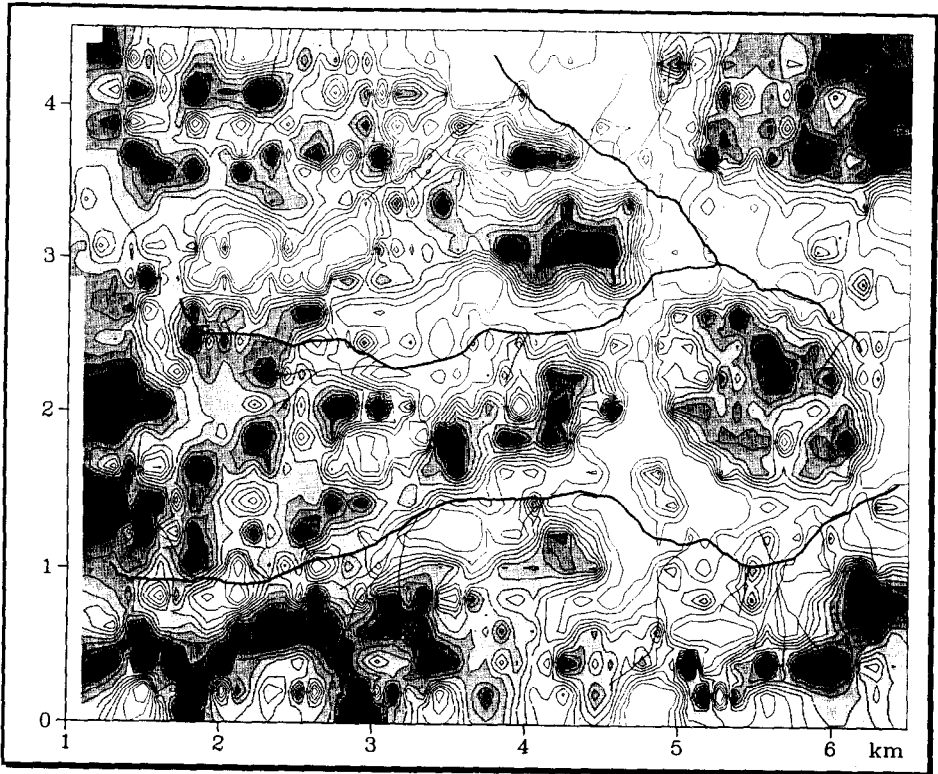


Figure 4. Carte des teneurs estimées en kaolinite, DAGADAMOU

III. RESULTAT POUR LA ZONE DE BANANKORO

III.1. Cartographie par classification

Le but de la classification est de distinguer les différentes unités du paysage latéritique, puis de les cartographier sous forme de cartes thématiques [2].

Classification dirigée par échantillonnage

Il s'agit d'identifier les six ou sept différents thèmes principaux du paysage. La deuxième étape consiste à sélectionner et à échantillonner des zones représentatives de chaque thème, appelées "zones d'entraînement". L'étude statistique de la répartition des valeurs radiométriques dans ces zones d'entraînement permet d'établir les limites de leur intervalle de variation sur chaque canal. On remarque, sur le résultat de ces classifications, de nombreux individus non-classés. D'autre part l'extension des glacis est surestimée par rapport à celle des plateaux cuirassés. Ceux-ci apparaissent très morcelés.

Classification selon les histogrammes des canaux bruts

On a essayé d'améliorer la classification précédente en redéfinissant chaque classe à partir de l'examen du nuage de points sur les histogrammes bidimensionnels XS1-XS3 et XS2-XS3. Cette classification laisse encore des pixels non classés. Il y a cependant une amélioration sensible des résultats de la première classification basée uniquement sur l'étude d'un petit nombre d'échantillons. L'ajustement réalisé sur les histogrammes bidimensionnels apporte une définition plus juste des différents thèmes du paysage latéritique.

Classification avec l'analyse en composantes principales

99 % de l'information radiométrique est représentée dans le plan des deux premières composantes principales F1-F2. Il est donc plus simple de partir de la représentation de l'histogramme bidimensionnel des facteurs F1-F2 pour définir les limites de classes. On obtient un étalement plus important du nuage de points, que sur les histogrammes bidimensionnels des canaux bruts. Les limites des plateaux cuirassés sont bien définies. La répartition des glaciers, entre les plaines et les plateaux cuirassés, semble très correcte. La classification ACP semble correcte, car il n'y a pas de non classé et la répartition des effectifs est plus homogène.

III.2. Cartographie structurale

Il s'agit plus précisément d'établir une carte linéamentaire de la zone de KANGABA. A l'aide du logiciel SUBTIL du GSTS de Strasbourg [4], nous avons commencé avec un module de détection des lignes et contours. Ce module utilise un opérateur de KIRSCH. Dans cette phase de traitement, on applique successivement huit masques directionnels du type 3 X 3. Deux types d'images sont produits. La première image marque les intensités des contours, car elle correspond aux valeurs maximales obtenues après application des huit masques directionnels. Cette image souligne l'organisation des éléments texturaux; cette organisation texturale sera appelée "contours" (figure 5). La seconde correspond au numéro du masque, pour lequel la valeur maximale de l'intensité du contour a été trouvée. Cette image montre préférentiellement des alignements d'éléments structuraux; ces alignements structuraux seront nommés "directions". Les images résultats ont été interprétées et confrontées aux sorties photographiques SPOT et aux couvertures aériennes [3].

Le trait fondamental de la zone de BANANKORO est l'importance des linéaments NE-SW et des linéaments conjugués NW-SE qui leur sont associés. Ils forment un réseau dense sur l'ensemble de la zone. Les linéaments N-S sont localisés dans la partie médiane de la zone. Ils correspondent localement à un réseau très important de fractures injectées de quartz. Ces linéaments subméridiens sont localisés sur deux verticales marquant très vraisemblablement des accidents profonds du socle. Le réseau hydrographique, calqué sur certaines directions linéamentaires, délimite les axes et les pendages des grands plateaux cuirassés. Il s'agit surtout des directions NW-SE et EW qui sont très visibles sur les couples stéréoscopiques.

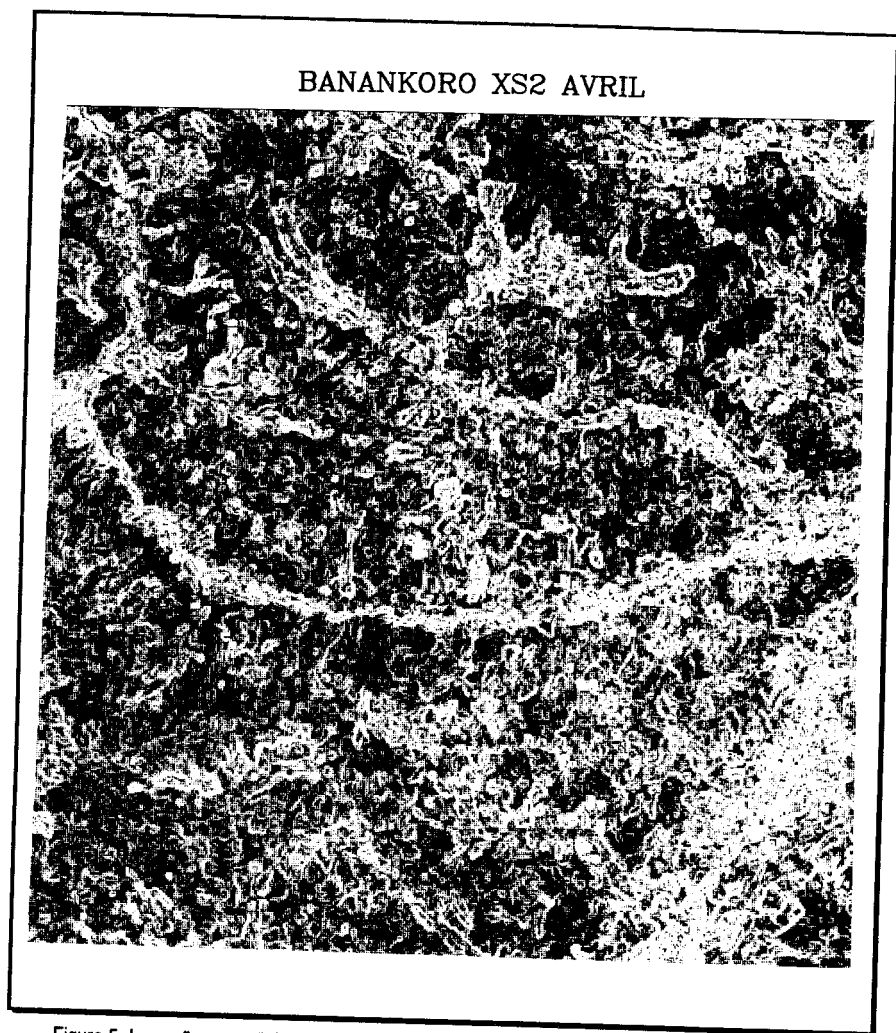


Figure 5. Image "contours" de l'opérateur de traitement directionnel sur la zone de BANANKORO

IV. CONCLUSIONS

Les données contenues dans les deux images servent à fabriquer des néocanaux, en sélectionnant la réflectance maxima sur les pixels. Cela permet d'éliminer des zones ponctuelles de feux de brousse visibles sur une des deux images. On peut également éliminer les brûlis à l'aide des indices thématiques synthétiques.

Une auréole claire dépourvue de végétation se marque sur les images SPOT au pied des buttes cuirassées. Cette zone circulaire d'accumulation détritique correspond à un halo riche en quartz et en zirconium.

Un indice de cuirasse exprime bien le contraste d'albédo entre les cuirasses affleurantes des plateaux et les dépôts silteux et argileux accumulés dans les dépressions. L'indice de végétation, Iv, montre que sur les plateaux cuirassés, la végétation se distribue suivant des bandes parallèles d'orientation NW-SE.

L'ACP est une technique intéressante, car elle permet de condenser l'information sur deux variables synthétiques qui reflètent deux grandes tendances de variations radiométriques. Une première tendance correspond aux variations d'albedo ou de réflectance moyenne dans toutes les bandes spectrales; il s'agit du facteur 1 (F1). Une deuxième tendance marque au contraire le contraste de réflectance de la végétation dans les domaines infrarouge et visible; il s'agit du facteur 2 (F2). Cette représentation presque parfaite de l'information dans un espace à deux dimensions facilite beaucoup l'étape de classification.

L'étude structurale préliminaire révèle la complexité tectonique du sillon birrimien de SIGUIRI-KANKAN, malgré la couverture latéritique importante qui masque le substratum. Les directions principales mises en évidence, sont les linéaments N-S et les linéaments NW-SE, ainsi que les directions complémentaires. Ces directions correspondent à nos connaissances sur les grands accidents anomaux et minéralisés de la région.

LISTE DES PUBLICATIONS

- DNGM, ORSTOM, CNRS (1986) - Minéralisations aurifères et cartographie des cuirasses latéritiques de la région de KANGABA au MALI : pétrographie, minéralogie, géochimie et télédétection. Rapport de première phase. Strasbourg-Bamako, Décembre 1986, 124 p.[1]
- PION J.C., ROQUIN C., FREYSSINET Ph., DANDJINO T.M., LE GALL M., KAYSER N. (1987) - Etudes des latérites par télédétection. Corrélation des données géochimiques et radiométriques. Rapport final juin 1987, ATP Télédétection Spatiale n°1085, CSGS de Strasbourg, 106 p.[2]
- PION J.C., ROQUIN C., DANDJINO T.M. (1988) - Utilisation de la télédétection pour l'étude des latérites en zone soudanaïenne, dans une optique géochimique. Rapport final, avril 1988, Convention CNES-PEPS n°175, ORSTOM et CNRS édit., 106 p.[3]
- DANDJINO T.M. (1987) - SUBTIL. Logiciel de traitement d'images numérisées basé sur SPIDER et UNIRAS. Centre de Calcul CNRS, Strasbourg, 47 p.[4]
- DANDJINO T.M. (1988) - Télédétection des paysages latéritiques. Traitement d'images, intégration et synthèse de données multi-sources. Th. doct. de l'ULP, Strasbourg, 121 p.[5]
- ROQUIN C., DANDJINO T., FREYSSINET Ph., PION J.C., TARDY Y. (1987) Premiers résultats de cartographie des couvertures latéritiques par images SPOT, région de DAGADAMOÛ (Sud-MALI). C.R.Acad.Sc. Paris, t. 304, Série II, n°8, p.321-326.[6]
- ROQUIN C., PION J.C., DANDJINO T.M. (1988) - Spot images and geochemical mapping of lateritic covers in southern Mali. In : SPOT 1 Utilisation des images, bilan, résultats. Cepadues-édition, p. 871-879 [7]
- ROQUIN C., DANDJINO T.M., FREYSSINET Ph., PION J.C. (1987) - The correlation between geochemical data and SPOT satellite imagery of lateritic terrain in South Mali. Jour. Geochem. Explor. (à paraître) [8]

THEME :

**IMAGES SATELLITE : ANALYSE QUANTITATIVE DES FORMES
(SATFORM)**

LA FORME: UN POINT DE VUE DE "THEMATICIEN"

Yveline PONCET

I. LE SENS DES MOTS...

FORME (d'après les dictionnaires Hachette et Robert):

- a) *Configuration extérieure, contour, moule.*
- b) *Constitution, mode d'organisation*

Dans l'analyse de la surface de la Terre que nous pratiquons au moyen de ses images, les formes (géométrie, textures, structures) apportent des informations particulières, différentes des informations issues des traitements spectraux. En particulier, elles traduisent directement des dynamiques, et elles sont quantifiables dans l'absolu et comparables entre elles.

Ces qualités sont abordées dans les exposés qui suivent. Mon intention est de traiter du rapport entre le terrain et l'image pour une exploitation morphologique des informations contenues dans chacun d' eux.

Les travaux que nous menons dans le cadre des opérations scientifiques du programme SATFORM sont fondés sur la modélisation du rapport morphologique entre les objets et phénomènes de la surface de la Terre et leurs formes sur les plans de l'image, afin de mesurer des objets morphologiques, de les comparer légitimement, de valider les résultats et de reproduire les procédures. Pour le thématicien, il s'agit aussi, en étudiant la forme (parmi d'autres indicateurs) à la fois sur l'image et sur le terrain, d'identifier le jeu des interactions complexes et souvent mal connues qui lui donnent naissance. Pour résumer, de mettre en relation une topologie-image et une topologie-terrain dans le cadre d'une approche de type systémique.

THEME (d'après les dictionnaires Hachette et Robert):

- a) *Sujet, matière, idée, proposition, que l'on entreprend de traiter dans un ouvrage.*
- b) *Motif mélodique sur lequel on compose des variations.*

A la suite de quelle déformation de sens le mot thème en est-il venu à désigner, dans notre vocabulaire scientifique, les sujets et les concepts qui ne sont pas dits "méthodologiques", c'est à dire qui ne sont pas liés au fonctionnement d'un outil ? Dans le vocabulaire des sciences d'observation de la Terre, le thème est cependant bien - comme en astrologie ! - une sorte de désignation symbolique, une terminologie abstraite qui résume ou synthétise. Il ne privilégie pas toujours les aspects visibles de la surface de la Terre; il intègre au contraire des interprétations et des conclusions de type génétique ou taxonomique. Les disciplines d'observation de la Terre (géologie, géographie, pédologie, botanique...) sont abondamment consommatrices et productrices d'informations spatialisées: les légendes des cartes "thématiques" justement, deviennent des nomenclatures de référence, des thèmes au sens où nous l'entendons ici, c'est à dire des symboles généralement compris et admis par une communauté scientifique, et pour cela largement diffusées, réaménagées, précisées et utilisées.

II L'IMAGE AU QUOTIDIEN

L'analyse morphologique est à la base de nos activités quotidiennes. Mais dans la plupart des cas, l'analyse des formes et l'interprétation que nous faisons des résultats ne suivent pas des enchaînements perceptibles et décomposés. Cueillir une information contenue dans un texte ou traverser une rue résultent de l'exploitation morphologique de l'image des lettres ou du paysage, complétée par un corpus d'informations exogènes, exprimables en termes spatialisés et temporels. Nous pratiquons en permanence la reconnaissance, la mesure, l'intégration des formes dans un corpus sémiologique. L'image est ainsi le témoin instantané d'un "récit". Dans bien des cas, c'est une image (ou une succession d'images) qui est la principale source d'information, celle autour de laquelle s'organisent les informations exogènes. Dans la vie quotidienne, le contenu morphologique de l'image et les informations exogènes s'intègrent dans un corpus logique fondé sur des signatures morphologiques, des concepts et des nomenclatures que chacun de nous - thématicien du quotidien - maîtrise complètement: les lettres d'un texte, les traits d'un visage, la présence d'un véhicule sont immédiatement analysables pour exploitation par le lecteur de ces lignes, parce qu'il détient depuis l'enfance non seulement des années d'images et d'expériences sur chacun de ces types de sujet, mais encore tout le corpus des nomenclatures descriptives et analytiques hiérarchisées qui leur correspondent. La relation est directe entre la forme et le récit. Il n'en est pas du tout de même chez un enfant de quatre ans... Or, dans le cadre de nos travaux, ne sommes-nous pas des "enfants de quatre ans", dépourvus d'expérience et de références pour l'exploitation d'images inhabituelles ? Et les disciplines scientifiques qui utilisent des images sont-elles toutes dans le même cas ?

III. L'IMAGE D'UN MÉDECIN...

En anatomie pathologique, les images grossies au microscope des cellules artificiellement colorées d'un tissu humain, sont utilisées pour faire des diagnostics. L'image est décrite sous forme rédigée, avec le maximum de détails: structure, texture, géométrie, dimensions. L'analyste compare l'ensemble et les détails à un corpus de références mémorisées qui est l'une des bases de son apprentissage professionnel, et qui s'enrichit ensuite de

son expérience. De ces comparaisons, il tire des informations sur la place de l'échantillon dans un choix préétabli de taxons identifiés. Cette procédure conduit à la formulation d'un diagnostic, c'est à dire à proposer la classification de l'échantillon étudié sous le nom précis d'un taxon, un type de cancer, par exemple. Dans cet ensemble d'enchaînements, la description soigneuse de la totalité de l'image est explicitement rédigée pour servir de support au diagnostic, éventuellement à une discussion par d'autres analystes, voire à un contre-diagnostic... Le but recherché et la nature de l'opération conduisent ici à une procédure qui laisse le minimum de place à l'erreur; le sujet (la pathologie cellulaire humaine) est (théoriquement) entièrement couvert par des taxonomies morphologiques systématiques, universelles et reconnues. Le taxon lui-même est formellement identifiable dans une nomenclature connue. Il y a relation univoque explicite entre forme et diagnostic, c'est à dire entre forme et récit par l'intermédiaire des nomenclatures adéquates.

IV. L'IMAGE D'UN GÉOGRAPHE...

Les thématiciens de la surface de la Terre ont l'habitude de traiter des formes sur les images de la planète: réseaux des communications et des cours d'eau, géométrie des habitats et des clôtures, organisation des ombres et des reliefs... La pratique des photographies aériennes nous a habitués à identifier des thèmes par leur forme (à différentes échelles) et par l'identification des objets contribuant à composer cette forme. Exemple: sur telle photographie aérienne d'un terroir du Comtat Venaissin (France), le quadrillage (géométrie) d'un parcellaire agricole (thème) est mis en évidence sur l'image par les clôtures de cyprès vif (objet présent à la surface de la Terre). Ici, le géographe ne juge pas absolument nécessaire de justifier l'enchaînement qui conduit du coup d'oeil à l'interprétation, c'est à dire de le décomposer et de le formuler. Il fait appel, pour "raconter l'histoire", à un corpus d'informations exogènes non hiérarchisées, qui contient des corrélations complexes et spécifiques telles que: "vallée du Rhône / vent / protection / cyprès"; et: "propriété foncière / clôture / haie vive"; les deux chaînes de corrélation sont associées mais on remarquera:

- a) qu'elles n'appartiennent pas à la même logique, ni à la même échelle du contexte spatialisé;
- b) que les relations ne sont pas univoques du tout: tout quadrillage n'est pas de parcellaire agricole, toute ligne de cyprès n'est pas de clôture, toute propriété foncière n'est pas marquée par une clôture, etc.
- c) que j'ai pu donner cet exemple parce que je dispose d'informations exogènes abondantes sur la région et le sujet, et du récit raconté par l'ensemble du paysage et par l'image du paysage.

La relation forme/thème peut aussi être beaucoup plus simple: le triangle d'un cône de déjection sur une image de haute montagne, par exemple, qui ne sera explicité que dans ses anomalies, ses "déformations", précisément. Et s'il n'est pas utile d'expliciter - c'est à dire de décrire la forme ou l'image, puis de justifier la classe taxonomique choisie - c'est que le corpus implicite de nomenclatures et de relations forme/thème est supposé connu, et lisible directement sur l'image.

V. L'IMAGE SATELLITAIRE: UNE IMAGE "ÉTRANGÈRE"

Or, devant les images satellitaires de la surface de la Terre que nous avons à traiter, ne sommes-nous pas comme des enfants de quatre ans dépourvus d'expérience ? Parce qu'elles présentent le point de vue nadiral sur des ensembles qui échappent à notre vision au sol; parce que les éléments d'image sont des résultantes physiques et non pas des objets référencés.

Le point de vue nadiral sur la terre, même s'il est devenu superficiellement familier, ne fait pas appel - sauf cas particulier - à l'exercice quotidien et spontané (quoique appris) des limites et du contenu, du choix des nomenclatures et de la communication d'un récit. Nous ne décrivons pas aisément en termes morphologiques ce que nous ne voyons pas couramment: bien que nous disposions d'abondantes nomenclatures taxonomiques, descriptives, génétiques... sur les objets et les ensembles perçus depuis la surface du sol, peu de ces nomenclatures se rapportent d'une part à une identification morphologique, d'autre part à un point de vue nadiral. Nous n'avons même pas de références topologiques intuitives claires à son endroit.

Les objets présents à la surface de la terre, que nous étudions sur le terrain et dont nous analysons les interactions, nous sont perceptibles "en vue horizontale", depuis le sol. Leur extension spatiale et leur organisation en "sur-ensembles" spatialisés nous échappe en partie. Il nous faut alors faire un effort d'imagination, pratiquer une fabrication mentale pour transcrire l'image verticale que nous avons du terrain en son homologue horizontale vue du capteur. Nous "créons" bien alors une image mentale, mais sans la décrire: le "transfert" de l'image verticale (terrain) à l'image horizontale (capteur) reste intuitif.

Nous disposons certes de vocabulaires descriptifs de l'image (en termes de géométrie, texture, structure), systématisés et utilisés par les analystes des photographies aériennes, mais ils ne sont pas directement raccordables aux vocabulaires taxonomiques, descriptifs et génétiques au sol que nous avons pris l'habitude d'appeler des "thèmes". On peut même citer des cas où la corrélation existait, mais où le sens du terme morphologique a curieusement dévié. Celui de la "brousse tigrée", par exemple. Cette nomenclature à évocation morphologique évidente a été proposée dans les années cinquante par les interprètes des photographies aériennes pour transcrire une organisation végétale particulière (aux sens édaphique, botanique, pédologique, topographique), bien visible sur les photographies aériennes des plateaux du Continental terminal sahélien. Le terme fut ensuite couramment utilisé pour désigner l'ensemble eau-sol-végétation sur le terrain, puis il a inclus la désignation de ce type d'ensemble, même quand on y observe sur les photographies aériennes des organisations végétales spatialisées sous des formes différentes (réseaux vésiculaires, taches sub-circulaires...).

Les images satellitaires d'observation de la Terre ne nous présentent de la Terre que sa surface visible: l'interface sol - atmosphère, l'étage supérieur de la végétation (les canaux infrarouge n'y changent rien). Ces sujets - ces thèmes - du terrain ne sauraient être directement interprétables sur l'image que dans les termes et dans la logique qu'ils ont en commun: la transcription en termes physiques (couleur, rugosité, transparence) et en termes spatialisés (dimensions et disposition relative), facteurs qui influencent le signal radiométrique.

Les images satellitaires ne restituent pas des objets qui soient continûment reconnaissables par leur forme élémentaire et dotés de noms spécifiques: elles fournissent directement des valeurs, mais dans des unités d'image qui ont toutes la même forme. Les identifiants morphologiques (géométrie, textures, structures) ne sont donc mis en évidence que par des différences de valeurs entre une unité élémentaire d'image et ses voisines, sans que l'on puisse décomposer aucune d'entre elles par leurs constituants éclairants. Le type de raisonnement sémiologique qui va du particulier au général, et donne un nom au signal dans chacune des classes où il est identifié, n'existe plus: nous pouvons décrire l'image avec le vocabulaire morphologique cité plus haut à propos des photographies aériennes, mais nous n'avons pas les références correspondantes à la plus grande échelle d'observation, c'est à dire celle du terrain.

Enfin, l'unité d'image satellitaire ne peut m'informer que sur les thèmes appartenant à la même catégorie d'échelle; et plus précisément, je ne puis valablement désigner les objets de l'image qu'au moyen des nomenclatures adéquates à ces échelles.

Or, le référentiel thématique dont je dispose pour leur donner un nom en correspondance avec le terrain est très hétérogène et parfois imprécis: il peut ne contenir aucune indication d'inventaire, de dimensions ni d'organisation des objets de surface, ni de la nature des limites, comme dans "plateau cuirassé" ou "bâti dense"; il est aussi parfois trop précis, dans le cas des vocabulaires spécialisés de chaque discipline: très peu de ces termes font allusion aux caractéristiques du rapport entre état de surface et image dans la liste citée plus haut des facteurs influençant le signal.

VI PARALLÉLISME ET TRANSPARENCE

Le souci de ce que l'on appelle la modélisation nous oblige cependant à ajuster au plus près la description - verbalisée ou non - de l'image avec la description du terrain, dans des termes qui appartiennent à une même logique, à un même référentiel. Parmi les chaînes opératoires de la modélisation, il en est une qui constitue une part essentielle de la réflexion et de la pratique: c'est la validation des résultats. Comment justifier de l'adéquation des résultats du traitement de l'image à la réalité si les sujets ne peuvent être légitimement formulés de façon parallèle sur l'image et sur le terrain ? Parmi les approches de la validation des résultats, l'une des solutions possibles paraît bien être des référentiels de même ordre afin de juxtaposer, aux mêmes niveaux et dans les mêmes logiques (descriptives, analytiques, hypothétiques...) les termes de départ et les termes d'arrivée, la réalité "physique" (de l'image et du paysage) et les résultats. On remarque que nous abordons là une catégorie de problèmes qui sont communs à toutes les familles d'interprétation et de traitement d'images satellitaires, et qu'il ne s'agit plus uniquement des familles de la morphologie.

D'après ce qui précède des "étrangetés" de l'image satellitaire, on voit que nous avons deux problèmes à résoudre pour rapprocher le terrain de l'image.

- D'une part celui de l'identification des objets afin de les classer dans les diverses catégories utiles à notre propos scientifique; il s'agit là de sélectionner les ensembles utiles et pertinents, sur l'image et sur le terrain, et de les intégrer à tout le corpus des informations exogènes sur l'image, sur le terrain, et sur les objets de ces ensembles, afin de les constituer en thèmes proprement dits, en sujets d'étude spatialisables, qualifiables, classables, quantifiables... voire

critiquables.

- D'autre part celui de la désignation de ces objets, sur le terrain, sur l'image et dans tout le corpus des informations exogènes, afin que l'enchaînement des raisonnements sur le terrain et des opérations sur l'image soient parfaitement transparents.

VII. LA TENTATION DES INTERMÉDIAIRES

Le premier terme implique une recherche sur les ensembles spatialisés tels qu'ils se présentent à la vue nadirale et sur leurs correspondances et leurs dynamiques au sol. Ces travaux sont déjà effectués dans des orientations telles que l'étude des ensembles paysagiques ou celle des linéaments, par les travaux sur l'organisation en textures et structures, sur les directions... Il s'agit d'approches ensemblistes qui incluent l'étude attentive des limites (leur nature, leurs dynamiques), notamment dans les travaux sur les paysages.

En nous présentant une foule de détails sur les états de surface, les photographies aériennes (qui ont une résolution spatiale théorique de l'ordre du millimètre) permettent de relier les éléments constitutifs de l'image à tout le corpus des informations exogènes. Elles permettent de faire la relation entre tel objet visible et tel phénomène invisible, entre la forme de tel objet visible et le classement de l'unité correspondante dans un thème abstrait, sous une nomenclature chronologique ou physico-chimique, par exemple.

La nomenclature thématique est le lien entre l'image, le terrain et les informations exogènes. Ce lien est rompu quand on veut traiter des images satellitaires sans l'intermédiaire des photographies aériennes: l'on connaît le malaise des utilisateurs d'images satellitaires auxquels les photographies aériennes "classiques" font défaut: les tentatives sont nombreuses pour obtenir des informations-relais au moyen de survols aériens et de photographies depuis des modèles réduits, des ballons et des cerfs-volants...

Mais l'un de nos objectifs n'est-il pas de chercher les moyens de nous passer, si nécessaire, de cette "information intermédiaire", de nous affranchir de la photographie aérienne comme source indispensable d'analyse, ne serait-ce que par pur pragmatisme ?

VIII. UNE DESCRIPTION MORPHOLOGIQUE ?

La description des objets et de leurs arrangements sur le terrain, dans des termes relatifs aux thèmes "états de surface" et aux phénomènes influençant le signal serait-elle une autre solution ? Description morphologique, dans ce cas, qui ne fait pas référence aux interprétations issues de l'intuition et des informations exogènes, afin que cette description puisse être mise en face de l'image et d'une transcription en même logique des données exogènes, pour leur intégration: on peut alors pratiquer la mise en rapport rigoureuse des éléments de l'image nadirale des éléments du terrain, voire des informations exogènes. Nous ne disposons plus alors d'a priori d'interprétation, ni de "légendes thématiques" de documents spatialisés déjà interprétés. Mais nous construisons un outil dont l'avantage est d'appartenir à la même logique que celle de l'image de la surface de la Terre, logique partageable au niveau de

toutes les disciplines et toutes les approches concernées. Cette "intégration logique" permet de passer d'une échelle à l'autre, et d'un type d'exploitation à un autre: analyses, classifications, déclarations, etc...

Les tentatives effectuées depuis plusieurs années pour dresser des description du terrain qui permettent d'exploiter les images satellitaires ne se révèlent pas entièrement satisfaisantes, notamment pour l'exploitation morphologique des images. Les documents résultants paraissent à la fois complexes et incomplets, les informations contenues sont difficiles à traiter pour la quantification et la modélisation, leur formulation ne paraît pas assez rigoureuse pour servir de point d'appui à un large éventail de validations. Des équipes ont déjà travaillé à des référentiels de description morphologique du terrain. Les langages ne devraient évidemment faire référence à aucun "thème", c'est précisément la règle du jeu, et ceux qui sont proposés utilisent un vocabulaire peu familier et donc un peu rébarbatif. Néanmoins, le principe de la description strictement morphologique du terrain paraît être l'une des approches les plus intégratrices et les plus logiques qui permettent d'effectuer l'enchaînement rigoureux des procédures de traitement de l'information, des hypothèses, des interprétations et des mesures qui relient l'un à l'autre l'image et le terrain, le terrain et son image.

TEXTURE:UN ETAT DE L'ART

Paul POUADIOUO

INTRODUCTION

La notion de texture est l'une des moins bien définies ou tout au moins, l'une de celles dont les définitions font le moins l'unanimité des groupes de Recherche. Plus précisément, il semble permis de dire qu'il y a autant de centres d'intérêt dans l'analyse d'images que de concepts de texture, donc de tentatives de définition. Cependant cette notion reste incontournable dans toute analyse d'images, témoin l'abondance de littérature en la matière, et surtout parce que toute analyse d'images appelle un présupposé conceptuel sur la notion de texture, c'est-à-dire sous-entend ou produit un modèle de texture.

- * Est-ce en fait une notion indéfinissable?
- * Y a-t-il quelque part un paradoxe?
- * Les "modeleurs" et les thématiciens peuvent-ils parler le même langage?

Nous tenterons une réponse en présentant un aspect de l'art, en matière de texture. Nous nous intéresserons en effet, plus particulièrement à l'approche statistique.

* Pour le Dictionnaire la texture est la répétition spatiale d'un motif de base dans différentes directions de l'espace. Cette définition très insuffisante indique la nature structurée de la surface considérée; par exemple la texture d'un tissu, d'un mur de briques etc.... Les partisans d'une telle définition s'orientent généralement vers une approche spectrale, structurelle ou syntaxique de la texture.

* Plusieurs considèrent cependant qu'une texture ne possède pas de contours francs, mais plutôt un certain désordre, c'est-à-dire une disposition aléatoire que l'on pourrait considérer (avec une certaine approximation) comme visuellement homogène. On aurait alors une surface fermée, sans motifs isolables ou fréquences de répétition discernables: c'est le cas d'une photographie à distance d'herbes, de sable, de graviers etc.... Les partisans d'une telle définition s'orientent généralement vers une approche probabiliste.

* On peut donc schématiquement distinguer deux approches texturales, chacune ayant ses propres outils. Nous verrons cependant que la frontière n'est pas toujours nette entre ces deux grandes classes: statistique et structurale.

I. LES DEUX APPROCHES TEXTURALES

I.1. L'Approche statistique

Elle modélise les notions qualitatives usuelles de texture: granularité, contraste, homogénéité, répétitivité, fragmentation, orientation, etc

- a-La granularité est un trait dominant de la texture et même parfois par abus de langage synonyme de texture. Le grain qui donne la granularité est lui-même constitué de pixels voisins possédant le même niveau de gris. La taille et la densité des grains déterminent le niveau de finesse de la texture.
- b-Le contraste est basé sur le nombre de niveaux de gris et leur taux de variation. Changer le contraste c'est modifier ces paramètres, ce qui modifie la qualité de l'image mais pas sa structure.
- c-L'orientation est une propriété globale pour une région et traduit la direction générale prise par les motifs ou grains d'une texture.

* IL y a en fait plusieurs types d'approches statistiques. Certaines utilisent des transformations orthogonales locales sur l'image (Fourrier, Haar, Hadamard, Slant, Karhunen-Loeve). D'autres utilisent dans les statistiques locales de l'intensité lumineuse, principalement les lois du premier ordre (histogrammes) ou les moments du second ordre et surtout la fonction d'autocorrélation, qui peut être modélisée directement (Faugeras et Pratt [1, 2]) ou à partir du spectre de puissance (Bajcsy et Liebermann [3]) ou encore à l'aide d'un processus auto-régressif (Gagallowicz [4], Kormick [5], Tou & al [6]). A.Gagallowicz a également utilisé des moments d'ordres supérieurs et les lois jointes du second ordre. L'utilité de ces dernières a été justifiée par des études psycho-visuelles de Julesz et Gagallowicz [7]. Ces lois jointes ont un appréciable pouvoir de séparation pour la reconnaissance de texture.

* Dans l'article "Statistical and Structural Approaches to texture" [8], R. M. Haralick présente six approches statistiques différentes pour caractériser l'information texturale : la fonction d'autocorrélation, les transformations optiques, les transformations digitales (mesurant les fréquences spatiales), les probabilités de cooccurrence des niveaux de gris, des modèles autorégressifs.

* Dans un tout autre registre des outils de la morphologie Mathématique ont été développés par Mathéron et Serra [9]. Ils ont été appliqués par plusieurs, dont Flouzat (1984). Ces outils s'avèrent assez utiles dans la caractérisation morphologique des textures, et font leur chemin, un peu timidement mais néanmoins avec de plus en plus d'utilisateurs.

* Pour terminer avec les techniques statistiques, citons le travail de Laws [11] qui définit toute une gamme d'opérateurs de convolution à partir d'opérateurs de dérivation et de moyennes très simples, correspondant à des noyaux de convolution de taille 2x1 ou 1x2. La combinaison de ces opérateurs fournit probablement l'une des meilleures et des plus rapides techniques de caractérisation de textures naturelles.

REMARQUE:

* La plupart des techniques utilisant les paramètres statistiques du premier ou du second ordre sont souvent limitées quant à leur utilisation:

- soit parce que certains paramètres sont difficiles à contrôler, par exemple les modèles autorégressifs ne peuvent contrôler que les moments d'ordre deux,
- soit parce que les modèles correspondants ne suffisent pas pour décrire entièrement la texture,
- soit à cause du problème de stabilité du filtre bidimensionnel utilisé,
- soit enfin à cause des dimensions des calculs et des espaces-mémoire nécessaires.

* Enfin la conjecture de Julesz reste valable dans la pratique (approximativement selon M. SONDGE [12]), à savoir : "les couples de textures différant par leurs statistiques du premier et du second ordre sont discriminables, mais des différences dans les statistiques du troisième ordre (et on le suppose aussi pour les ordres supérieurs) ne peuvent être perçues si les statistiques d'ordre un et deux sont identiques".

1.2. L'Approche structurale:

Elle modélise les relations spatiales entre éléments primitifs constituant l'image. Les règles de placement ou d'agencement spatial déterminent l'existence et la nature de la texture.

Il y a toujours deux phases dans cette approche:

1ère: définition des primitives

2ème: caractérisation des relations spatiales entre ces primitives. C'est-à-dire que dans un premier temps on effectue une croissance de région sur un ou plusieurs attributs (intensité lumineuse, gradient, etc) de façon à identifier les primitives qu'on caractérise par leur forme et la valeur moyenne de l'attribut utilisé. Dans un deuxième temps on calcule les histogrammes du premier ordre ou du second ordre de ces paramètres afin de caractériser leur répartition dans l'image. Branconne (1975) et Fourcade (1979) utilisent l'aspect topologique, tandis que Li et Fu (1976) développent des méthodes syntaxiques utilisant les grammaires d'arbre. Jeansoulin et al. (1981) et Cals (1984) utilisent quant à eux les méthodes ensemblistes faisant appel à la théorie des ensembles flous.

1.3. Quelques définitions proposées dans la littérature

* Pour R. M. Haralick et Gagallowicz la texture est un phénomène à deux niveaux, le premier concerne la description des primitives dont est composée l'image et qui sont ses propriétés caractéristiques; le deuxième implique la dépendance spatiale entre ces primitives.

* Pour Serra, la texture est l'ensemble des propriétés spatiales, périodiques ou non, d'un phénomène se déployant dans le plan de l'image. L'étendue de ce phénomène et la géométrie de ses limites ne participent pas à la texture; seul importe le contenu spatial, exprimé en termes statistiques ou morphologiques, et non pas son contenu.

REMARQUE:

* La perception des textures est un phénomène de groupement: l'invariance par translation est une caractéristique essentielle de cette perception. Si on déplace une fenêtre d'observation sur le plan d'une textures, les mesures texturales (qui restent à définir) restent invariantes. La taille minimale de la fenêtre d'observation laissant ces mesures invariantes s'appelle résolution de la texture.

* Aucun Chercheur à notre connaissance n'a pour l' instant donné une définition précise, satisfaisante pour tous, de la texture. Chacun essaie d'appréhender cette notion en fonction de son centre d'intérêt.

Le paradoxe et la difficulté nous semble provenir au moins en partie , de la complexité du système visuel de l'oeil humain:oeil/cerveau, qui comporte à la fois une réalité objective et une réalité subjective, le subjectif influençant l'interprétation de l'information objective par le sujet.

D'autre part le caractère partiel, donc approximatif des définitions actuelles semble aussi lié au fait qu'elles ne tiennent pas assez compte de l'origine physique de la texture. En particulier, en Télédétection, compte-tenu de la résolution spatiale, on rencontre rarement des pixels purs. De telle sorte que la valeur radiométrique du pixel est généralement une synthèse d'informations et non une information élémentaire. Par suite les définitions et techniques considérant l'information "pixélaire" comme information élémentaire peuvent être qualifiées d'approximatives. En effet , sous réserve de l'hypothèse que les grains photographiques sont invisibles(ce qui constitue bien sûr une approximation discutable, dans la pratique!), alors la taille minimale dm d'un objet identifiable est donnée par la formule

$$dm = \frac{10^{-4}}{e} \text{ où } e \text{ est l'échelle de l'image}$$

En outre, les conclusions d'une équipe de photo-interprètes publiée dans la Revue "Photo-interprétation" N°5, 1985, Fasc. 4, le niveau spatial de perception d'un objet est fonction de la résolution spatiale du capteur, du contraste avec le voisinage et de la dimension au sol.

Plus exactement, si:

- V_e =valeur de la tâche élémentaire,
- S_o =surface de l'objet dans la tâche élémentaire,
- M_o =valeur moyenne de l'objet,
- D_o =écart-type de l'objet,
- S_e =surface de la tâche élémentaire,
- M_v =valeur moyenne du voisinage,
- D_v =écart-type du voisinage

$$V_e = \frac{S_o M_o + (S_e - S_o)}{S_e} M_v = \frac{S_o}{S_e} (M_o - M_v) + M_v$$

$$\Rightarrow V_e - M_v = \frac{S_o}{S_e} (M_o - M_v)$$

critère de confusion : $\|V_e - M_v\| < D_v$.

$$\text{Si } \frac{S_e}{S_o} > \frac{\|M_o - m_v\|}{D_v},$$

alors l'objet se confond avec son voisinage. Donc le niveau de perception

d'un objet est directement proportionnel à son contraste $\|M_O - M_V\|$ et inversement proportionnel à l'homogénéité D_V du voisinage et au rapport de surface $\frac{S_e}{S_O}$.

* La texture semble être en fait une manifestation d'un phénomène d'organisation des valeurs radiométriques liées à plusieurs paramètres (justement non encore étudiés jusque là) . Lorsque ce phénomène est décomposable, il comporte en gros deux niveaux: un premier niveau microscopique local qui permet de dégager la notion de primitives de texture et un deuxième niveau macroscopique qui permet de dégager la notion d'agencement , d'organisation de ces primitives les unes par rapport aux autres .

* Il nous semble qu'une meilleure modélisation de la texture doit faire une synthèse des deux approches structurale et statistique parce qu'aucune des deux ne se suffit à elle-même pour donner l'information texturale précise et complète. Cette synthèse doit être complétée par une prise en compte de l'origine physique de la texture, en particulier le fait que l'information "pixélaire" n'est pas élémentaire en général et que l'échelle aussi influence la perception spatiale.

II. PROBLEME DE LA DISCRIMINATION DE LA TEXTURE

-SON EXTRACTION ET SA SYNTHESE

II.1. Discrimination

Nous présentons ici les conclusions des travaux de ZULESZ, généralisées par O. FAUGERAS [1] :

- a-Un observateur est sensible aux différences de densités de probabilité du premier ordre et du second ordre ;
- b-Un observateur est très sensible aux différences de densités de probabilité du troisième ordre pour des textures possédant les mêmes densités du second ordre;
- c-Un observateur est sensible aux différences dans la fonction d'auto-corrélation;
- d-Il est facile d'exhiber des couples de textures facilement discriminables visuellement et qui possèdent les mêmes moyenne, variance, et fonction d'auto-corrélation.

Ces conclusions donnent des bornes utiles pour le développement de signatures de textures aléatoires.

II.2. Extraction -Production

Nous nous intéresserons ici tout particulièrement aux textures basées sur un modèle aléatoire. Pour avoir une texture aléatoire, on applique un opérateur spatial, linéaire ou non à une variable aléatoire réelle indépendante et équidistribuée.

La description des statistiques du second ordre d'une texture la plus générale est la donnée de toutes les densités jointes $p(X_{kl}, X_{mn})$ où X_{kl} et

X_{mn} sont les valeurs radiométriques aux points de coordonnées (k, l) et (m, n) respectivement. Ces densités peuvent être approximées par des histogrammes. Et l'un des inconvénients majeurs dans ce cas est la dimension élevée des signatures car pour un voisinage $N \times N$ d'éléments d'images, on est conduit à générer N^2 histogrammes bidimensionnels, chacun d'eux étant un tableau $N_g \times N_g$ où N_g est le nombre de niveaux de gris de l'image..

Plusieurs auteurs ont proposé des signatures de texture basées sur des mesures de "spread" des histogrammes par rapport à la première diagonale. Si une région texturée est fortement corrélée alors les fortes valeurs des histogrammes seront concentrées au voisinage de la première diagonale, et dans le cas contraire on obtient une répartition plus uniforme des valeurs de l'histogramme.

REMARQUE

* Outre l'inconvénient sus-cité, il s'avère que la caractérisation, donc l'extraction des textures de faible contraste est très difficile. Cependant pour des textures fort contrastées on obtient une bonne précision dans la classification et dans l'analyse de l'image.

* Il y a donc eu des tentatives pour déterminer les primitives de textures de manière plus simple et plus efficace que les méthodes basées sur les histogrammes bidimensionnels ou les matrices de cooccurrence, par exemple certaines techniques de décorrelation que nous présentons ici. Elles se font par application, sur des histogrammes du premier ordre ou sur la fonction d'autocorrélation, des opérateurs blanchissants, du masque statistique, du Laplacien ou du Sobel.

TECHNIQUES DE DECORRELATION

FONCTION D'AUTO-CORRELATION : K_F

Si $F(j, k)$ est un champ aléatoire texturé obtenu par application d'un opérateur spatial sur un tableau de variables aléatoires réelles indépendantes et équidistribuées $W(j, k)$, et si on a: $-N < m, n < N$, alors la fonction d'autocorrélation K_F se définit par :

$$K_F(m, n) = E \{ F(j, k) F(j+m, k+n) \}$$

où $F(j, k)$ = champ aléatoire, $-N < m, n < N$,

K_F peut être approximée par:

$$EK_F(m, n) = \frac{1}{(2w+1)^2} \sum_{u=j-w}^{j+w} \sum_{v=k-w}^{k+w} F(u, v) F(u+m, v+n)$$

On blanchit la texture originale pour obtenir un champ aléatoire décorrélé

$DW(j, k) = F(j, k) \otimes H_w(j, k)$ où H est la réponse impulsionnelle du filtre blanchissant et

$$K_{DW}(m, n) = \begin{cases} 1 & \text{si } m = n = 0 \\ 0 & \text{si non} \end{cases}$$

REMARQUE :

La fonction d'autocorrélation d'une texture et l'histogramme du premier ordre de la texture blanchie contiennent suffisamment d'informations pour

la discrimination.

INCONVÉNIENT : trop de calculs

ALTERNATIVE : opérateur de pseudo-gradient qui est une approximation de l'opérateur blanchissant.

Par exemple si la fonction d'autocorrelation est séparable et Makovienne d'ordre 1 avec des coefficients de corrélation P_L et P_C le long des lignes et des colonnes alors l'opérateur blanchissant serait :

$$H_G = \frac{1}{(1-P_C)^2(1-P_L^2)} \begin{bmatrix} P_C P_L & -P_C(1+P_L^2) & P_C P_L \\ -P_L(1+P_C^2) & (1+P_C^2)(1+P_L^2) & -P_L(1+P_C^2) \\ P_C P_L & -P_C(1+P_L^2) & P_C P_L \end{bmatrix}$$

qui est le masque statistique

REMARQUE

A la limite

$P_C = P_L = 1 \Rightarrow H_G$ est un opérateur de Laplacien

$$H_G = \begin{bmatrix} 1 & -2 & 1 \\ -2 & 4 & -2 \\ 1 & -2 & 1 \end{bmatrix}$$

Si on utilise H_G comme approximation de l'opérateur blanchissant, l'estimation de la fonction d'autocorrélation se réduit à celle de P_L et P_C .

Autre opérateur possible = Le Sobel S

$$F(j, k) \xrightarrow{S} G(j, k) = [H_L(j, k) \otimes F(j, k)]^2 + [H_C(j, k) \otimes F(j, k)]^2$$

$$\text{où } H_L = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ 2 & 0 & -2 \\ 1 & 0 & -1 \end{bmatrix} \quad \text{et } H_C = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -2 & -1 \end{bmatrix}$$

L'utilisation du masque statistique, du Laplacien, de l'opérateur de Sobel ou d'un opérateur quelconque de pseudo-gradient à la place de l'opérateur blanchissant, conduit à une procédure généralisant la méthode d'extraction de primitives développée par Weska, Dyer et Rosenfeld, qui consistait à former la différence entre un bloc de texture et un bloc translaté.

SIGNATURES A EXTRAIRE:

a) :Histogrammes du 1er ordre $P(b)$ à L niveaux de gris :

$$\text{- moyenne : } b_M = \sum_{b=0}^{L-1} P(b)$$

$$\text{- déviation : } b_D = \left[\sum_{b=0}^{L-1} (b-b_M)^2 P(b) \right]^{1/2}$$

- le "Skewness" - mesure de l'asymétrie de l'histogramme:

$$b_S = \frac{1}{(b_D)^3} \sum_{b=0}^{L-1} (b-b_M)^3 P(b)$$

- Mesure de la différence de forme avec un histogramme gaussien :
"Kurtois"

$$b_K = \frac{1}{(b_D)^4} \sum_{b=0}^{L-1} (b-b_M)^4 P(b)$$

b) Pour la fonction d'autocorrélation on peut faire une projection sur des bases de fonctions simples pour ne conserver qu'un nombre restreint de projections.

III. SYNTHÈSE DE LA TEXTURE

La synthèse peut se faire de plusieurs manières: a partir de l'histogramme, des coefficients d'autocovariance, la moyenne d'espace (du premier ordre ou du second ou même éventuellement des ordres supérieurs).

Certains utilisent des modèles autorégressifs bidimensionnels.

a - Synthèse à partir des moyennes d'espace d'ordre deux

La plupart des méthodes pour la synthèse des textures ont pour but de déterminer et de contrôler des paramètres de discrimination de la texture.

Nous présentons ici entre autres quelques éléments des travaux de M. SONDGE sur la synthèse de texture.

L'image étant considérée comme la réalisation d'un processus stochastique homogène de $N \times N$ dans $G = \{0, 1, \dots, N_g - 1\}$, où N_g est le nombre de niveaux de gris de l'image.

On note X_m la valeur de X au point m de coordonnées (x_m, y_m) . $d = (dx, dy)$ étant un déplacement dans l'image de la position (x_m, y_m) à la position $(x_n = x_m + dx, y_n = y_m + dy)$, on note $X_n = X_m + d$ la valeur de X au point n de coordonnées (x_n, y_n) .

On appelle moyennes d'espace du premier ordre, les probabilités $p'(g_1) = p(X_m = g_1) = p(X_n = g_1)$, pour g_1 quelconque dans G (cette double égalité est due au fait de l'homogénéité de X).

On appelle moyennes d'espace du second ordre les probabilités : $p'(g_1, g_2) = p(X_m = g_1, X_m + d = g_2) = p(X_n = g_1, X_n + d = g_2)$, pour g_1, g_2 éléments de G .

Ces probabilités p' sont des estimées sur une réalisation du processus , donc :

$$P'(g1) = \frac{1}{N} \sum_{m=1}^N \delta(x_m - g1)$$

$$P'(g1, g2) = \frac{1}{N} \sum_{m=1}^N \delta(x_m - g1) \delta(x_{m+d} - g2)$$

où N est le nombre de points du plan et δ le symbole de Kronecker.

A chaque déplacement correspond ainsi la matrice de cooccurrence M_d . Pour faire la synthèse à partir des moyennes d'espace d'ordre 2 on calcule ces matrices correspondant aux probabilités estimées du second ordre et ce, pour chaque déplacement considéré d . On obtient ainsi un vecteur attribut B contenant tous les éléments de toutes les matrices M_d calculées en concaténant les éléments de ces dernières ligne par ligne.

* Le but est de générer une texture dont le vecteur attribut B a une valeur donnée à l'avance. Dans la pratique on peut partir d'une image naturelle dont on calcule toutes les matrices M_d pour un ensemble déterminé de déplacements du plan. On estime ainsi le vecteur B puis l'histogramme désiré. On crée alors une texture TX sous forme d'un bruit blanc homogène dont l'histogramme correspond à celui désiré. Cette image de bruit blanc constituera l'image initiale du processus de synthèse et son vecteur attribut B^{TX} est le vecteur attribut initial.

On calcule alors l'erreur quadratique $ERR = ||B - B^{TX}||^2$ que l'on compare à un seuil fixé ϵ , puis en cas de non satisfaction on met à jour B^{TX} , en modifiant point par point l'image et on réitère l'opération.

M. SONDGE propose un traitement séquentiel-parallèle et aussi entièrement parallèle pour cette mise à jour, ce qui n'est pas sans intérêt en interactif.

REMARQUE:

Tous les points d'un bruit blanc sont indépendants ce qui permet la génération de chaque point indépendamment des autres points de l'image. Pour générer un point m on génère un nombre aléatoire a_m compris entre 0 et 1 suivant une distribution uniforme, à l'aide de la fonction de répartition.

D'autre part en vertu de l'indépendance, les moyennes d'espace d'ordre 2 peuvent être calculées à l'aide des moyennes d'espace du premier ordre .

Notons que la qualité et l'efficacité d'une technique de synthèse utilisant les matrices de cooccurrence réside d'abord dans l'estimation de l'erreur ERR ensuite dans la technique de mise-à-jour. Cette technique permet en outre de contrôler les paramètres quelconques en modifiant le contenu de B .

Selon les conclusions de A. Gagalowicz et M. Sondge [12] la convergence de cet algorithme est assurée dans le cas des textures naturelles mais aucune hypothèse ne peut être formulée en l'état autrement car à notre connaissance il n'existe pas pour l'instant de condition nécessaire et suffisante assurant l'existence d'un processus stochastique X dont les moyennes d'espace du second ordre sont données a priori.

Enfin notons que dans cette méthode la taille de la fenêtre de contrôle joue un rôle, et que la taille de B est proportionnelle à N^2g .

b-Synthèse à partir de l'histogramme et des coefficients d'autocovariance

La méthode est analogue à la précédente à la différence près que d'une part le vecteur B est ici formé par les paramètres d'autocovariance au lieu des moyennes d'espace; d'autre part l'erreur ERR qui se minimisait sans contrainte précédemment se minimise ici sous la contrainte de l'histogramme de la texture.

Selon le critère de minimisation utilisé par M. Sondge , en collaboration avec A. Gagalowicz le nombre d'opérations est proportionnel au nombre de points dans le plan de l'image générée, donc Ng fois moins élevé.

c-Synthèse à partir d'un modèle autorégressif

La technique d'estimation linéaire est beaucoup utilisée dans le traitement du signal monodimensionnel, par contre les signaux bidimensionnels posent plus de difficultés, surtout dans les tests de stabilité.

Plusieurs auteurs utilisent des modèles autorégressifs par exemples[4,12,13,14] et[12] proposent un modèle autorégressif demi-plan asymétrique pour effectuer la synthèse de texture. Ce modèle se déduit de la suite des corrélations du processus bidimensionnel correspondant à un ensemble de déplacements (cf. ci-dessus). La stabilité du filtre est ici résolue (approximativement) à partir de la technique du PLSI (Plannar Least Square Inverse) ,fondée sur une conjecture de Shanks[15], simplifiée par Huang[16] (contredite toutefois par Genin et Kamps[17]). Deux PLSI ont été nécessaires pour stabiliser le filtre.

Les paramètres contrôlés ici sont les moments d'espace d'ordre deux des textures. Pour les exemples considérés par l'auteur ces paramètres suffisaient pour obtenir un bon résultat dans le cas gaussien, tandis que dans les cas non gaussiens les résultats étaient bien moins satisfaisants.

IV. CONCLUSION

Le domaine de l'étude de la texture est encore loin d'être bien exploré. En effet toutes les méthodes de synthèse de texture considèrent la texture comme un vecteur de paramètres statistiques . Il ressort de la présentation sus faite que de tels vecteurs ne suffisent pas pour rendre compte de manière précise de la texture d'une image. Nous réaffirmons qu'il faudrait tenir compte de l'origine physique de la texture, des paramètres statistiques, de l'approche structurale et enfin des concepts morphologiques. Thématiciens et "modeleurs" ne peuvent s'entendre , parler le même langage que dans la mesure où la définition de la texture devient moins approximative et où dans l'analyse de l'image l'aspect objectif l'emporte sur le subjectif.

Il nous semble que l'avenir de la maîtrise de l'image réside dans la compréhension plus approfondie de sa texture, donc dans sa définition plus complète et cohérente. Nous espérons pour notre part contribuer à cette définition dans nos communications ultérieures.

BIBLIOGRAPHIE

- FAUGERAS O. D. and PRATTW. K. , "Decorrelation Methods of Texture Feature Extraction", IEEE Transaction on PAMI, vol. PAMI2 N°4 P. 323-332, 1980. [1]
- PRATT W. W., FAUGERASO., and GAGALOWICZ A. , "Visual Discrimination of Statistic Texture Fields", IEEE Trans. On Systems, Man and Sybernetics. Vol. 8, N°11, pp 796-804, Nov. 1978. [2]
- BAJCSY R. and LIEBERMANN L. , "Texture Gradient as a depth cue "Computer Graphics and Image Processing, Vol. 5, N°1, p52-67, 1976. [3]
- GAGALOWICZ A. , "Vers un modèle de texture" Thèse d'état, Mai 1983, Paris VI. [4]
- Mc. KORMICK B. and JARAMAMURTHY Y. , "Time Sseries Model For Texture Synthesis", Compt. Inform. Sci. 3, 1974, pp329-343. [5]
- TOU J. T. , KAO AND D. B. CHANG Y. S. , "Pictorial Texture Analysis an Synthesis" 3rd International Conference on Pattern Recognition, Nov. 8-11, 1976. [6]
- GAGALOWICZ A. "A new method for Texture Fields Synthesis, Some Applications to the Study of Human vision", IEEE Trans. On Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. PAMI-3, N°5, Sep. 1981. [7]
- HARALICK R. M. : "Statistical and Structural Approches to Texture", Proc. IEEE, Vol. 67, N°5, May 1979. [8]
- MATHERON G. , "Elément pour une théorie des milieux poreux", Paris, Masson, 1967. [9]
- SERRA J. "Mathematical morphology and Image Analysis", Academic Press, 1982. [10]
- LAWS K. I., "Textured Image segmentation", University of Southern California, U.S.C.I.P.I., Report 940, 1980. [11]
- SONDGE M. Thèse Paris VI, Mai 1983 "Synthèse de texture". [12]
- FAUGERAS O. Thèse d'Etat Paris VI, Juin 1979, "Application des Modèles de Vision au Traitement Numérique des Images". [13]
- JULESZ B. , "Visual Pattern Discrimination", IRE Trans. Inform. Theory, Vol. 1, T. 8 , N°1. 84-92, Fèv. 1962. [14]
- SHANKS J. L. , JUSTICE J. H. , "Stability and Synthesis of Two-Dimensional Recursive Filters", IEEE Trans. Audio , Electroacoustic AU-20(2), pp 115-128, 1972. [15]
- HUANG T. S. , SHREIBER W. F. , TRETIK O. J. , "Image Processing" Proc of IEEE, Vol;59, N°11, Nov. 1971. [16]
- GENIN, Y. , and KAMP Y. , "Conter-Example in the least-Square Inverse Stabilisation of 2-D Recursive Filter", Electronics Letter 11 p 330-331, 1975. [17]

AUTES LECTURES UTILISEES (NON CITEES)

- STEVEN W. ZUCKER, "On the Fondations of Texture. A Transformation Approach", U. of Maryland Rep. TR. 331, 1974.
- JOURLIN M. and PINOLI J-C, "A Model for Logarithmic Image Processing", dép Maths, U. ST-Etienne, N°3, 1985, dans 'Microscopy'.
- PINOLI J-C, "Contribution à la Modélisation, au Traitement et à l'Analyse d'Images", Thèse Univ. St-Etienne, Fèv. 1987.

CARACTERISATION DES QUARTIERS PERIPHERIQUES DE MEXICO SUR IMAGE SPOT: ANALYSE COMPAREE DE LA TEXTURE SUR LES DONNEES MULTIBANDES

Jean-Michel EBERHARD

La présente étude s'inscrit dans un programme de géographie urbaine sur l'agglomération de Mexico: description et caractérisation des quartiers périphériques d'après les types d'occupation du sol analysables sur images de télédétection, et suivi de la croissance urbaine, dans un but de gestion de l'espace urbain.

Conditions du développement de la recherche:

Plusieurs structures sont impliquées dans ce programme:

- l'ORSTOM: - le S.D.U.,
 - le L.I.A. à Bondy (télédétection, équipe Satform),
 - le Centre ORSTOM de Mexico;
- l'Université de Xochimilco (Mexique);
- le CREDAL.

L'image SPOT multibande de Mars 1986 et l'image panchromatique de Mai 1986 constituent les premières données utilisées, auxquelles devrait s'ajouter une image Thematic Mapper de la même période.

Une image SPOT acquise en 1988 ou 1989 permettra l'étude diachronique.

I. UNE ETUDE DE TEXTURE

Le projet comporte deux axes principaux de recherche: une exploitation des données d'origine radiométrique, et une analyse numérique de l'information. Cette dernière regroupe un ensemble de méthodes qui, d'une part, apportent une information sur la constitution de l'image elle-même (structures de l'image...), et d'autre part, permettent d'isoler et de caractériser des objets thématiques décelables sur cette image (forme, nombre, taille, voisinage...).

La structure d'une image peut être caractérisée par une analyse de sa texture.

Par *texture*, nous entendrons l'agencement des niveaux de gris entre pixels voisins. L'analyse développée ici est donc une comparaison de pixel à pixel, avec la description d'un certain nombre de caractères liés à cette comparaison.

L'étude de la texture présente l'avantage de rendre compte de la continuité, ou de la discontinuité, de l'intensité du signal radiométrique en incluant la notion de voisinage, continuité du signal dont la mesure permet sur le plan thématique une quantification de la régularité du tissu urbain décelable par la télédétection. En conséquence, il est raisonnable d'espérer ainsi appréhender certains types d'occupation du sol...

Les reproductions ci-contre démontrent intérêt d'une telle démarche. La figure 1 présente un quartier de la banlieue Est (Chimalhuacan) qui se caractérise par un rassemblement de petites constructions individuelles, marquées sur l'image par un assemblage discontinu de points clairs sur un fond plus foncé.

La figure 2 montre au Nord-Ouest un assemblage identique, à la figure 1, quoique plus dense, mitoyen à une zone non construite, caractérisée sur l'image par de vastes plages uniformes en niveau de gris. Toutefois, on remarque par endroit un mitage de l'espace rural (agglomérations de points localisées).

II. METHODES D'ANALYSE ET DOMAINE GEOGRAPHIQUE D'APPLICATION

La méthode dite par *matrice de cooccurrence en niveaux de gris*, correspond à cette approche de la texture; elle offre en outre l'avantage de produire une représentation graphique sous forme d'un histogramme bidimensionnel, et des paramètres qui rendent possible la comparaison des milieux étudiés.

Les paramètres ont été calculés par le logiciel *Planètes* sur chacun des trois canaux, pour 45 zones de forme carrée, de 20 pixels de côté en mode multibande, soit 400 m. sur le terrain. Le mode de répartition de ces zones est raisonné: un découpage visuel sur composition colorée a préalablement permis d'isoler les quartiers de banlieues qui apparaissent sur l'image sous l'aspect de surfaces homogènes. On a réparti les zones d'entraînement de façon à assurer la représentativité du type de chacun de ces quartiers.



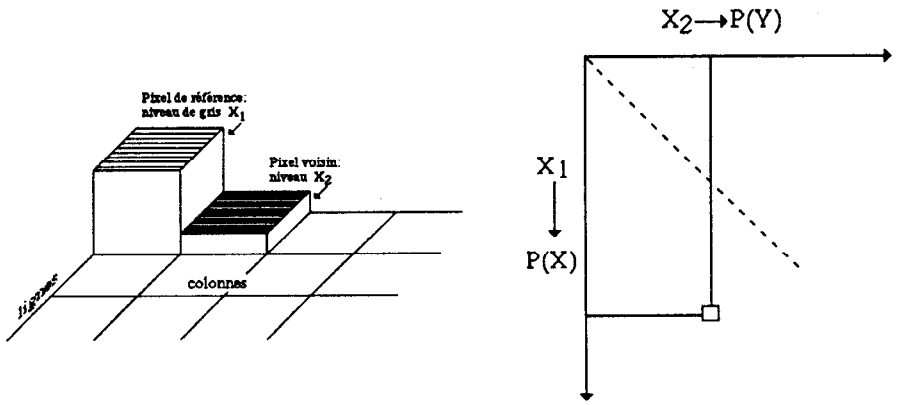
Figure 1 : Chimalhuacan (image panchromatique)



Figure 2 : Banlieue Est (SPOT)

III. PRINCIPES DE LA METHODE

La méthode est basée sur la comparaison du niveau de gris d'un pixel donné avec celui de son voisin. Soit un pixel de référence, de niveau de gris x_1 et son voisin de niveau x_2 , le couple (x_1, x_2) détermine la position d'un point dans le plan:



Figures 3a + 3b : Cooccurrence en niveau de gris : principes

Le pixel 2 est à son tour comparé avec le pixel 3, produisant un nouveau couple de valeurs; puis, le 3 avec le 4, etc... La matrice est élaborée à partir de valeurs normées par calcul des possibilités d'apparition de chaque couple.

Plusieurs types de relation spatiale peuvent être établies, selon la distance (comparaison entre pixels mitoyens ou distants...), selon l'angle (comparaison en ligne, en colonne, ou en diagonale...):

L'ensemble des points dans le plan forme un nuage, dit *nuage de cooccurrence*, qui est l'histogramme bidimensionnel de l'image sur elle-même, décalée du nombre de pixels considéré. La forme du nuage caractérise la distribution des valeurs de gris, selon l'amplitude et la fréquence des variations.

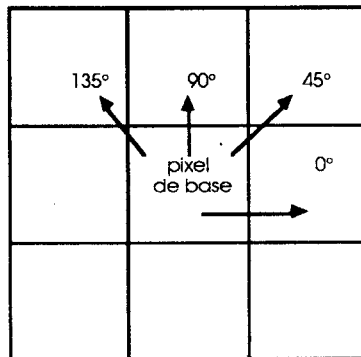


Figure 3c Types de relation spatiale

L'une des caractéristiques essentielles est l'étalement du nuage de part et d'autre de la diagonale, représentation de la disparité des valeurs qui composent l'image, méthode basée sur la *mesure du spread*, selon la nomenclature proposée par P. Poudiougou (dans l'article intitulé: *Texture: un état de l'art* voir page).

La figure 5 (page ci-contre) montre deux nuages de cooccurrence selon le tissu urbain et les canaux. L'aspect général du nuage est étalé pour la zone n°1 (quartier Pedregal-San Jeronimo) dont l'image présente sur l'image une surface irrégulière et contrastée; au contraire, la zone n°2 (Santiago-Acahualtepec), surface plus homogène, montre moins de variations locales et par conséquent un nuage plus ramassé, resserré sur la diagonale.

Pour une même zone, on remarque d'ores et déjà des nuances dans la forme des nuages entre le canal 1 et le canal 3; pour ce dernier en effet, la forme de l'histogramme est globalement moins étalée.

Les caractéristiques du nuage sont mesurées par six paramètres:

- 1 et 2) les coordonnées x et y du *centre de gravité* du nuage, qui indiquent la valeur moyenne des niveaux de gris de la zone étudiée;
- 3) l'*homogénéité locale*, ou le resserrement du nuage autour de la diagonale; une H.L. élevée caractérise les plages uniformes;
- 4) l'*inertie*, paramètre d'étalement du nuage, inverse du précédent, de forte valeur pour les zones à variations de gris contrastées et rapides;
- 5) l'*entropie*, ou degré d'organisation, quantifie les distributions; l'entropie est nulle pour les images à un seul niveau de gris;
- 6) le *second moment angulaire* qui mesure les fortes probabilités de distribution; le S.M.A. caractérise les pics de hautes fréquences.

On trouvera des informations complémentaires concernant cette méthode, en particulier le mode de calcul des paramètres, dans la thèse de Jean-Michel Laporte, et deux applications de la méthode: sur Marseille dans la thèse de Alain Michel (image TM) et sur l'image SPOT panchromatique SPOT de Quito (J-M Eberhard; DEA).

IV. ANALYSE DES PARAMETRES CALCULES

Afin d'établir les corrélations entre les variables et de déterminer les premiers regroupements et oppositions entre les individus, les paramètres calculés ont été soumis à une Analyse en Composantes Principales. Rappelons que ces paramètres ont été calculés séparément dans chacun des trois canaux pour les 45 zones d'entraînement.

On obtient les contributions à la variation totale suivantes:

axe 1 : 62,1% ; axe 2 : 19,9%

Examinons plus en détail les corrélations entre paramètres:

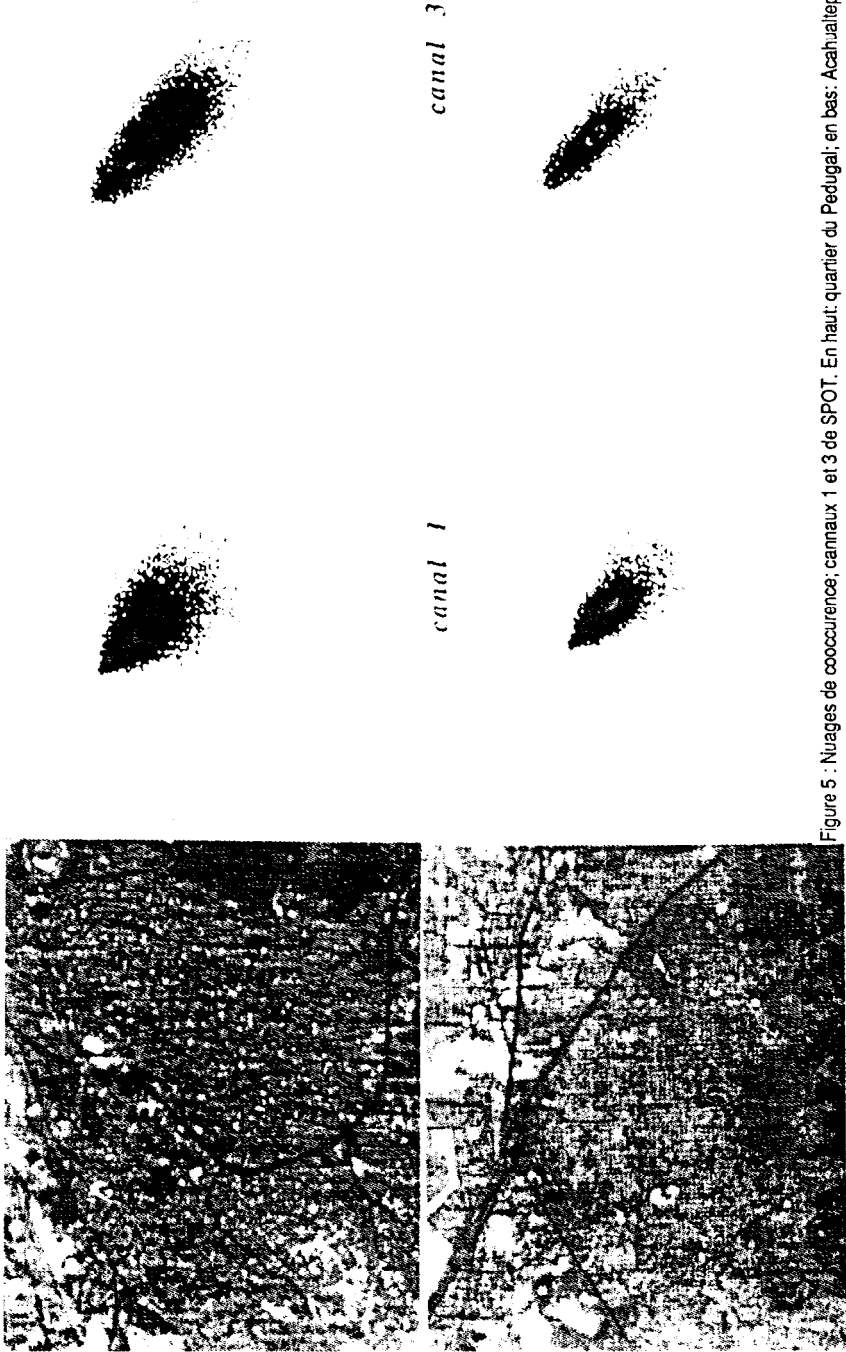


Figure 5 : Nuages de cooccurrence; canaux 1 et 3 de SPOT. En haut: quartier du Pedugal; en bas: Acahualtepec

IV.1. Corrélations entre variables d'un même canal

Le tableau ci-dessous des corrélations entre paramètres des canaux 1 et 3 permet quelques remarques:

	XY1	SM1	EN1	HL1	IN1
XY1	1				
SM1	-0,034	1			
EN1	0,013	-0,987	1		
HL1	-0,016	0,861	-0,852	1	
IN1	0,211	-0,553	0,625	-0,491	1

Tableaux des corrélations dans un même canal paramètre canal 1

	XY3	SM3	EN3	HL3	IN3
XY3	1				
SM3	-0,139	1			
EN3	0,120	-0,978	1		
HL3	-0,102	0,912	-0,928	1	
IN3	0,169	-0,676	0,786	-0,743	1

Tableau de corrélations paramètres canal 3

- *de fortes corrélations*: l'entropie s'oppose fortement au second moment angulaire; en effet, par définition une entropie de valeur forte traduit une grande désorganisation du nuage, en particulier une dispersion des fréquences d'apparition des couples (dans le nuage: disparition des pics). De faibles fréquences se traduisent par des valeurs de second moment angulaire faibles.

On remarque également des corrélations, quoique plus faibles dans le canal 1:

- entre l'homogénéité locale et le second moment angulaire (la présence de plages uniformes sur l'image induit l'apparition de pics de hautes fréquences dans le nuage);
- entre l'homogénéité locale et l'entropie qui s'opposent (les plages uniformes sont un facteur d'organisation du nuage, donc de baisse d'entropie).
- *des corrélations moyennes*: le paramètre inertie se distingue des trois autres variables de texture; c'est le paramètre le moins corrélé aux autres et vraisemblablement le plus discriminant. On notera une décorrélation particulière avec l'homogénéité locale, dans le canal 1, avec le second moment angulaire dans le canal 3.

Dans le premier cas, il semble que les paramètres de resserrement et d'étalement du nuage ne constituent pas une information redondante, mais restent relativement indépendants, caractérisant ainsi des nuages de forme spécifique.

Dans le second cas, la décorrélation relative entre l'inertie et le second moment angulaire semblerait révéler l'existence de cas où l'étalement du nuage marque une certaine indépendance vis à vis des hautes fréquences.

- *des corrélations nulles*: elles apparaissent entre le centre de gravité du nuage et les paramètres de texture, ce qui signifie une indépendance totale entre l'agencement spatial des pixels et leur niveau de gris.

On remarquera cependant une corrélation plus forte entre le centre de gravité et l'inertie, dans le canal 1, originalité supplémentaire pour cette variable.

Ces remarques sont valables pour l'ensemble des trois canaux. Le canal 1 apparaît néanmoins comme le plus discriminant du point de vue de la méthode, les corrélations de paramètres de la cooccurrence y étant globalement moins fortes.

IV.2. Corrélations des paramètres de cooccurrence entre canaux

Globalement, on observe de fortes corrélations entre les paramètres des canaux 1 et 2. En revanche, les corrélations apparaissent plus nuancées entre les canaux 2 et 3, mais surtout entre le 1 et le 3. L'indépendance respective des canaux entre eux s'ordonne par conséquent selon leur numérotation:

$$XS1 \leftrightarrow XS2 \leftarrow \text{-----} \rightarrow XS3$$

Le tableau ci-dessous reproduit la valeur des corrélations des variables entre les canaux 1 et 3:

	XY1	SM1	EN1	HL1	IN1
XY3	0,788	-0,315	0,326	-0,243	0,284
SM3	0,251	0,740	-0,781	0,580	-0,505
EN3	-0,273	-0,744	0,801	-0,579	0,603
HL3	0,261	0,766	-0,804	0,684	-0,548
IN3	0,011	-0,616	0,692	-0,501	0,923

Tableau corrélations paramètres canaux 1 et 3

Ces résultats suggèrent quelques remarques:

- les inerties sont les variables de même nature les mieux corrélées entre deux canaux (IN1 et IN3). Ce n'est pas tant l'amplitude des écarts de pixel à pixel qui détermine cette corrélation, que leur nombre constant entre les canaux.
- les centres de gravité des nuages (XY1 et XY3) sont davantage corrélés avec les variables de texture de l'autre canal, qu'ils ne l'étaient avec les variables de leur propre canal (cf. ci-dessus).
- les corrélations sont globalement plus fortes entre le centre de gravité du canal 3 et les variables de texture du canal 1, que l'inverse.
- les corrélations des centres de gravité avec les variables de l'autre canal changent de signe dans la relation inverse.

Ces propriétés remarquables de *corrélations croisées* ne sont pas expliqués pour l'instant.

IV.3. Représentation des individus dans le plan factoriel

On trouvera ci-dessous le plan décrit par les axes 1 et 2; le premier étant défini essentiellement par les variables entropie-second moment angulaire; le second par les centres de gravité.

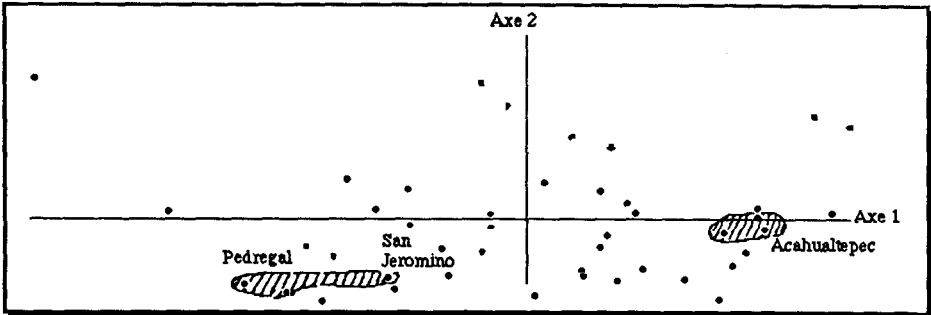


Figure 6 : ACP 3 canaux; Plan factoriel 1-2

La dispersion des individus dans le plan ne permet d'isoler aucun regroupement; on remarque au contraire une distribution continue sur l'axe 1 qui montre une succession d'états intermédiaires, sans rupture nette dans la constitution texturale de l'image selon les types d'occupation du sol.

On remarque cependant de grandes oppositions des extrêmes texturaux; tel que ceux évoqués ci-dessus:

- à gauche sur l'axe 1, Pedregal-San Jeronimo, nuage étalé, forte entropie, peu de hautes fréquences,
- à l'opposé, Acahualtepec, nuage plus resserré, présence de hautes fréquences, donc faible entropie.

La caractérisation des zones apparaîtra non pas dans la corrélation de leurs variables descriptives, mais davantage, semble-t-il, dans les *hiatus* qui existent dans leur interdépendance.

Pour cela, une analyse plus élémentaire des distributions permettra de mieux saisir la signification des variables et les mécanismes de leurs dépendances.

V. CROISEMENTS SIMPLES DE VARIABLES

Le croisement graphique des variables nous apporte des précisions sur le type de relations entre celles-ci.

Par la figure 7, nous vérifions la corrélation négative, entre l'entropie et l'homogénéité locale dans le canal 3: lorsque les plages uniformes augmentent l'entropie décroît.

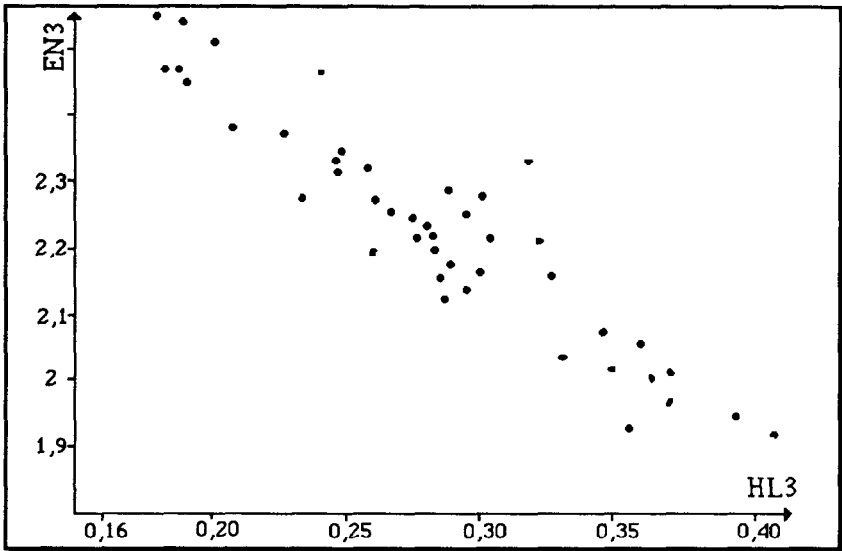


Figure 7 : Homogénéité Locale - Entropie; canal 3

On remarquera cependant certains écarts dans cette relation. Exemple:

- pour une valeur sensiblement égale de l'entropie, il peut exister une assez grande différence des valeurs d'homogénéité locale (zones 5 et 40);
- inversement, pour une même valeur d'homogénéité locale, l'individu 34 se différencie de la zone 31 par une entropie supérieure.

Ces variations des valeurs d'une même variable pour des individus associables par ailleurs pour d'autres paramètres, traduisent des combinaisons nuancées dans l'agencement des pixels, combinaisons qui correspondent sur le terrain à des types d'occupation du sol eux-mêmes nuancés. Exemple: variations dans la taille et dans le nombre des objets; surface uniforme d'un seul tenant ou émiétée...

La relation homogénéité locale-entropie peut s'assimiler à une relation linéaire; tel n'est pas le cas de la relation entre l'homogénéité locale et l'inertie...

La figure 8 montre en effet une relation plus complexe entre les deux variables. D'un point de vue pratique, on remarque l'indépendance des valeurs basses de l'homogénéité locale ($HL < 0,25$) avec l'inertie, phénomène que traduisait la faiblesse particulière des corrélations calculées dans l'ACP.

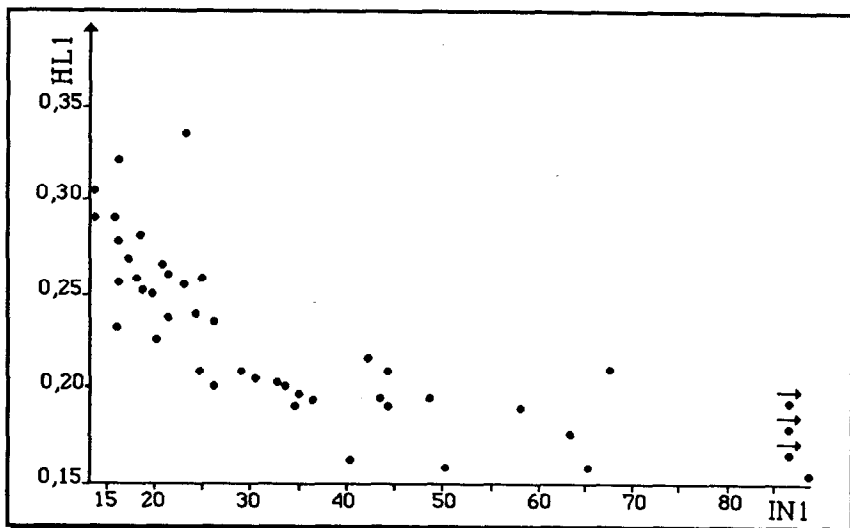


Figure 8: Homogénéité Locale - Inertie canal 1

Comparons maintenant les valeurs d'une même variable entre différents canaux.

La figure 9, croisement de l'homogénéité locale des canaux 1 et 3, montre que les valeurs du paramètre se trouvent pour la plupart sous-évaluées dans le canal 1 par rapport à celles du canal 3 (déviation du groupe de points à la bissectrice); l'écart s'accroît avec l'augmentation des valeurs.

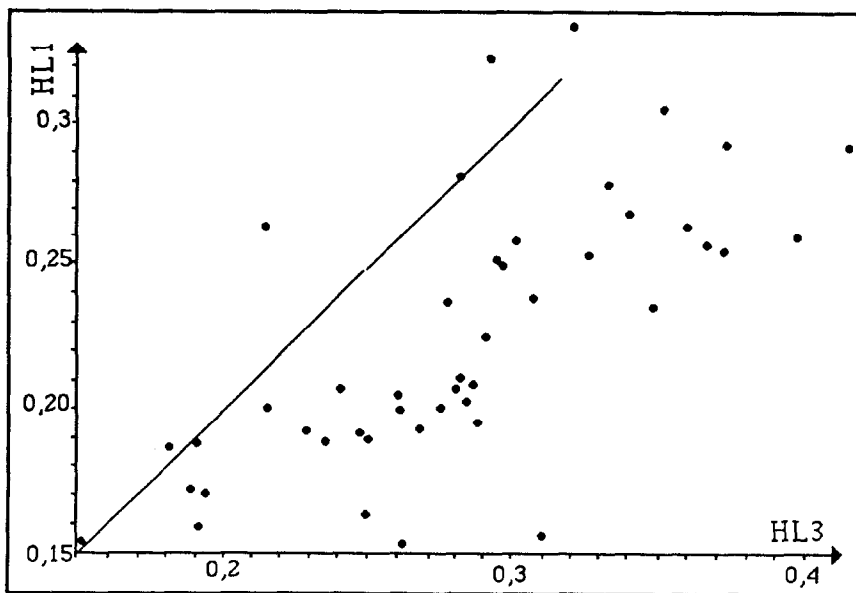


Figure 9: Homogénéité Locale canaux 1 et 3

Cette sous-estimation de l'homogénéité locale dans le canal 1 peut avoir deux origines:

- un artefact lié par exemple aux capteurs SPOT ou à leur calibration;
- la thématique elle-même, restreinte à un type d'objet ou de paysage précis, dont l'une des caractéristiques globales serait justement une plus grande hétérogénéité dans le visible...

Un *lissage* des réponses spectrales par diffusion ou filtrage en atmosphère urbaine polluée semble peu probable.; en effet, ce lissage affecterait surtout les canaux 1 et 2, or l'homogénéité mesurée par la méthode est plus forte dans le canal 3...

La seconde explication paraît la plus plausible.

VI. VERS UNE APPLICATION THEMATIQUE

L'association des indices texturaux avec les valeurs radiométriques respectives par canal donne une idée de l'application thématique que peut permettre la méthode.

L'étude radiométrique des zones n'est pas avancée; cependant, le simple apport des valeurs des centres de gravité des nuages fournit un nouveau type d'information qui intègre à la fois les caractères radiométriques des objets et certains aspects de leur structure (émiement des surfaces, notamment).

Nous avons vu la décorrélation qui existe à l'intérieur d'un canal entre les caractères du nuage et son centre de gravité... Au contraire, si on caractérise les zones en ordonnant les valeurs des centres de gravité dans les trois canaux, on s'aperçoit que la répartition de cette caractéristique n'est pas aléatoire dans les distributions étudiées ci-dessus.

Les figures suivantes montrent les rapports qui peuvent exister entre l'information radiométrique et l'information texturale pour une application thématique:

On voit sur la figure 10 que les zones dont le centre de gravité est le plus fort dans le canal 3, occupent la partie supérieure dans la relation homogénéité locale-entropie, avec des valeurs plutôt faibles pour la première variable, et plutôt forte pour la seconde. D'un point de vue thématique, on peut en déduire que ces zones regroupent des objets de faible surface ou dispersés, à forte réponse dans le canal 3. Il s'agit surtout de quartiers à taux d'urbanisation relativement faible, ou de bâtiments individuels entourés de jardins; on retrouve là le Pedregal et San Jeronimo.

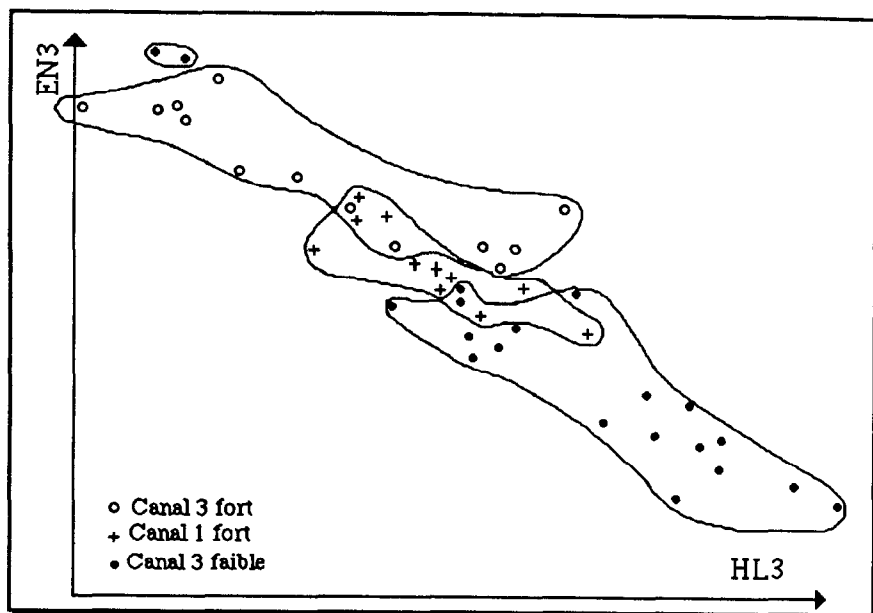


Figure : 10 Homogénéité Locale - Entropie canal 3 HI et EN canal 3 par groupe de centre de gravité

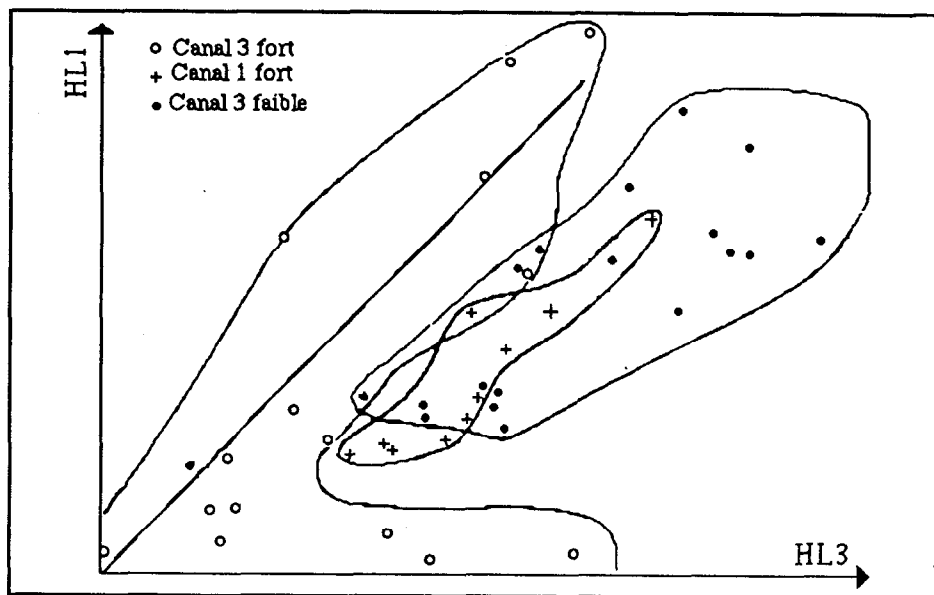


Figure : 11 Homogénéité Locale - Entropie canal 3 HI et EN canal 3 par groupe de centre de gravité

A ces quartiers, s'opposent les zones constituées d'objets à faible réflectance relative dans le canal 3, dont les images présentent davantage d'homogénéité: ce sont des zones à urbanisation plus dense, ou du bâti sur des surfaces partiellement dénudées (épandages de poussière...): zone du quartier d'Acahualtepec.

Entre les deux, des individus à texture moyenne se caractérisent par une réflectance comparablement plus forte dans le canal 1.

On notera la présence de deux zones isolées qui appartiennent au groupe des individus à faible réponse moyenne dans le canal 3, mais dont la texture est proche de celle calculée pour le groupe des fortes réponses spectrales dans le canal 3. Il s'agit d'une urbanisation à structure comparable au *canal-3-fort* (habitat dispersé) mais développée dans les conditions du *canal-3-faible*, vraisemblablement sur des épandages de poussière.

La figure 11 reprend le croisement des homogénéités locales pour les canaux 1 et 3. En ajoutant l'information sur la comparaison des valeurs de centre de gravité, comme précédemment, on remarque que la distribution se décompose en plusieurs secteurs, et que cette partition confirme la déviation constatée entre les canaux 1 et 3.

On voit en effet que le corps de la déviation est constitué par les quartiers à faible moyenne dans le canal 3, associé aux zones à forte réponse dans le canal 1 (essentiellement objets urbains). Au contraire, les *canal-3-fort* se répartissent de part et d'autre de la séquence principale, et se divisent en deux catégories:

- les zones les plus proches de la diagonale, c'est à dire dont la texture est comparable entre les deux canaux (on a ici les seuls individus caractérisés par une homogénéité locale plus forte dans XS1 que dans XS3);
- les zones dont l'homogénéité locale est notablement plus forte dans le canal 3, pour des homogénéités locales basses et constantes dans XS1.

Ces observations confirmeraient l'explication selon laquelle le choix thématique influence la distribution et en particulier, sous-estime globalement les valeurs d'homogénéité dans le canal 1.

Cette rapide application à l'aide d'un outil aussi rudimentaire que la moyenne des valeurs de gris illustre déjà les possibilités offertes dans l'exploitation des images par l'association des données d'origine radiométrique à l'information obtenue par traitement numérique. Une étude plus approfondie par classification radiométrique et analyse quantitative des objets classés, confrontée aux caractéristiques texturales de l'image doit permettre de retrouver les grands thèmes urbains.

PRESENTATION DE QUELQUES METHODES DE LA MORPHOLOGIE MATHEMATIQUE PERMETTANT DE CARACTERISER UNE STRUCTURE SUR UNE IMAGE BINAIRE

Catherine MERING

RESUME

Certains types d'objets au sol peuvent être identifiés sur les images satellitaires en fonction de leur mode d'organisation spatiale et non de leur radiométrie. Certaines études thématiques effectuées à l'aide des images de télédétection posent notamment le problème de la caractérisation quantitative de cette organisation. Nous exposerons ici quelques méthodes déjà classiques en analyse quantitative d'image permettant d'envisager une telle caractérisation, en utilisant les outils de la Morphologie Mathématique. Dans cette approche, nous supposons que l'image à analyser est déjà classée: le problème revient donc à analyser l'organisation spatiale des entités connexes sur une image binaire. Un premier objectif consiste à étudier la *distribution de taille* des éléments de la structure analysée. Dans ce cas, nous faisons appel aux principes et aux méthodes de l'*analyse granulométrique* bidimensionnelle. L'autre objectif envisagé est la caractérisation de la *dispersion spatiale* des éléments composant une structure. L'approche morphologique (érosion par le bi-point) est dans le cas général bien adapté à l'étude des états de dispersion.

I. TEXTURE ET STRUCTURE : PHOTO-ANALYSE ET ANALYSE QUANTITATIVE D'IMAGE

Depuis l'avènement et le perfectionnement des techniques de prise de vue aériennes puis satellitaires, les thématiciens appartenant aux disciplines directement concernées par l'observation à grande échelle de la surface terrestre, telles que la géographie, la géologie, l'archéologie, ont mis au point des démarches et des procédés d'analyse et d'interprétation de ces

documents, qu'ils soient aériens ou spatiaux. Nous nous référerons principalement ici à la phase analytique de la démarche qu'ils proposent pour exploiter les photographies aériennes puis les images satellitaires. Cette phase, désignée dans de nombreux ouvrages sous le terme de *photo-identification* [CHEVALLIER 71], correspond à l'analyse visuelle du document visant obtenir une première identification des objets. Notre but étant de fournir des outils d'analyse quantitative des images, nous n'essayons pas a priori de simuler la vision. Néanmoins, notre objectif final étant le même que celui de la photo-identification, nous nous sommes demandés dans quelle mesure on pouvait trouver une formulation quantitative des critères utilisés par les spécialistes de la photo-identification pour identifier les objets sur l'image. Parmi ces critères, nous en avons retenu deux: la *texture*¹ et la *structure*². A ce stade, nous nous sommes demandés quelles étaient les informations accessibles sur une image numérique permettant de caractériser la *texture* et la *structure*.

D'une façon générale, l'image numérique est constituée d'unités élémentaires dénommées *pixels*. On conviendra d'appeler *région* un groupement de pixels formant une entité connexe et *objet*, un ensemble quelconque composé de régions.

La définition que donnent les photo-interprètes de la texture met en jeu plusieurs descripteurs à la fois: la *taille*, la *forme*, la *densité*, la *tonalité* des *éléments texturaux*. (cf note 1). Il faut d'abord savoir quels sont les éléments de l'image numérique pouvant être assimilés aux éléments texturaux de la photo-identification. On remarquera tout d'abord que les informations concernant la *densité* et la *tonalité* ne peuvent être appréhendées directement sur l'image numérique, où seul est donné un *niveau de gris* pour chaque pixel. Le *niveau de gris* est effectivement un attribut relatif aux *pixels* mais il ne peut décrire ni les *régions* ni les *objets*, ces entités possédant chacune plusieurs niveaux de gris différents. Seule une approche statistique permet de caractériser *régions* et *objets* à l'aide de l'ensemble de leurs niveaux de gris. Dans ce cas, les descripteurs définis sur la base de statistiques effectuées sur les niveaux de gris ne rendent pas trivialement compte de la *densité* ni de la *tonalité*. D'autre part, s'il est envisageable d'évaluer la *taille*, voire la *forme* des entités, il ne peut s'agir de descripteurs des pixels, ceux-ci ayant tous la même taille et la même forme (ie le point). Nous ne savons donc pas définir sans ambiguïté à partir de l'image numérique un ensemble formé d'entités et descripteurs correspondant directement aux éléments texturaux et à leurs quatre attributs qui sont à la base de la définition que donnent les photo-interprètes de la *texture*.

Nous avons par contre signalé qu'il était possible de décrire l'organisation des niveaux de gris au sein de *régions* à l'aide de statistiques ponctuelles [HARRALICK 78] ou spatiales [SERRA 88]. C'est cette caractérisation de la texture qui a été généralement adoptée en traitement d'image [DESACHY 80], et sur laquelle nous ne reviendrons pas ici.

La définition de la *structure* (2) est également basée sur la notion d'*éléments texturaux*. La notion de *principe d'organisation* utilisée dans cette définition laisse cependant une plus grande liberté d'interprétation et de transposition en termes quantitatifs. Nous considérons que les *éléments texturaux*, qui correspondent, dans notre terminologie à des *régions* ont été délimités lors

¹ La texture: "toute image est composée d'unités élémentaires que l'on nomme éléments texturaux. Les éléments texturaux peuvent être dénombrés et décrits: ils ont une forme, une taille, une densité, une tonalité. Un ensemble d'éléments texturaux identiques, continus et répétés forment une texture" ("Télédétection Techniques et applications cartographiques" de Jean-Léonard Dizier et Olivier Léo)

² La structure: "La structure est un principe d'organisation de la texture ou d'éléments texturaux" ("Télédétection Techniques et applications cartographiques" de Jean-Léonard Dizier et Olivier Léo)

d' une analyse antérieure. On s'attachera alors uniquement à caractériser leur organisation spatiale. Pratiquement, l'image numérique analysée n'est donc pas une image en niveaux de gris mais une image *binaire*¹ résultant par exemple du seuillage d'une image à niveaux de gris ou d'une classification préalable à partir de plusieurs images en niveaux de gris (par exemple une classification multispectrale). L'ensemble ainsi défini sur l'image correspond à une valeur unique du seuil ou à une classe unique, généralement associée à un thème ou à une catégorie d'objets (eau, végétation,...) .

Nous avons donc vu que les définitions de la photo-interprétation n'étaient pas immédiatement utilisables dans le cadre de l'analyse quantitative. Nous avons également montré que l'on pouvait trouver une formulation de la *texture* et de la *structure* définies à l'aide de primitives de l'image numérique, tout en restant fidèles aux objectifs de la photo-identification.

II. ANALYSE DE L'ORGANISATION SPATIALE D'UN THEME

Comme nous venons de le voir plus haut, nous analysons une image binaire. On appelle X l'ensemble des points de l'image ayant la valeur 1. L'ensemble X correspond à l'ensemble des *éléments texturaux*, ou au *thème* dont on cherche à caractériser l'organisation spatiale. Pour atteindre cet objectif, nous utiliserons les méthodes de la Morphologie Mathématique ([M.M] en notation abrégée)[SERRA 82].

II.1. Analyse morphologique et quantification de l'information structurale par la Morphologie Mathématique

En [M.M] , l'analyse quantitative de l'image , et plus particulièrement, l'analyse de la structure spatiale d'un ensemble X appartenant à l'espace \mathbf{R}^2 se fait en deux étapes :

- l'analyse morphologique proprement dite de l'ensemble X qui permet d'accéder à l'information structurale
- la quantification de l'information structurale

L'analyse morphologique de X s'effectue par l'intermédiaire de transformations ensemblistes *Ψ en tout ou rien* à l'aide d'un *élément structurant* de géométrie simple tels que : le cercle, le segment, l'hexagone. Pour effectuer ces transformations, on déplace l'élément structurant B de façon à ce que son centre X occupe toutes les positions de l'espace. Pour chaque position, on vérifie si B et X vérifient un certain type de relation ensembliste, cette relation étant exprimée en terme d'*union*, d'*intersection* ou d'*inclusion*. Le résultat de cette vérification s'exprime par une réponse positive ou négative, d'où le nom de *transformations en tout ou rien* . Par exemple, pour effectuer une *érosion*, on vérifiera pour chaque point X de l'espace , si B , centré en X , est inclus dans X . De la même façon pour effectuer une *dilatation*, on vérifiera si B , centré en X rencontre X (ie si l'intersection entre B et X est différent de l'ensemble vide). L'ensemble des points X de l'espace pour lesquels la relation est vérifiée forme un nouvel ensemble, $\Psi(X)$. L'ensemble *érodé* de X , noté $E^B X$ aura une surface plus petite que

¹Image binaire : image dont les pixels n'ont que deux valeurs possibles: 0 ou 1.

celle de X , tout en conservant la même structure. L'ensemble *dilaté* de X , noté $D^B X$ aura une surface plus grande que celle de X , tout en conservant la même structure. On observera sur les figures 2 et 3 les effets respectifs de l'*érosion* puis de la *dilatation* par un élément structurant hexagonal d'un ensemble A_1 initial représenté sur la figure 1.

A partir de l'*érosion* et de la *dilatation*, on définit deux autres transformations *en tout ou rien* qui sont l'*ouverture* X_B et la *fermeture* X^B , de la façon suivante ¹:

$$X_B = D^{\overset{v}{B}}(E^B X)$$

$$X^B = E^B(D^{\overset{v}{B}} X)$$

où:

$\overset{v}{B}$ est l'élément transposé de B , c'est à dire symétrique de B par rapport à son origine ²

L'ensemble X_B est plus régulier, moins riche en détail, et moins étendu que l'ensemble initial X ³. L'*ouverture* a adouci les contours, coupé les isthmes étroits, supprimé les petites îles et les caps étroits. Les figures 4, 5 et 6, qui représentent respectivement l'ensemble initial A_2 l'ensemble ouvert par un hexagone de taille 1 et l'ensemble ouvert par un hexagone de taille 4, illustrent les effets de cette transformation.

L'ensemble X^B est également plus régulier et moins riche en détail que l'ensemble initial, tout en étant plus étendu que celui-ci ⁴. La *fermeture* bouche les canaux étroits, supprime les petits lacs et les golfs étroits.

Si les *transformations en tout ou rien* permettent d'accéder à une information structurale, la mesure constitue la quantification de cette information. On utilise successivement deux types d'applications ensemblistes: une application Ψ de \mathbf{R}^2 dans lui-même, telle qu'une *transformation en tout ou rien*, suivie d'une application de \mathbf{R}^2 dans \mathbf{R} , qui correspondra à une mesure de l'ensemble $\Psi(X)$ (telle que sa surface) conformément au schéma suivant:

$$\mathbf{R}^2 \text{ -----} > \mathbf{R}^2 \text{ -----} > \mathbf{R}$$

$$X \text{ -----} > \Psi(X) \text{ -----} > p = \mu(\Psi(X))$$

C'est à l'aide d'une ou de plusieurs mesures p , que l'on va analyser quantitativement la structure de l'ensemble X . Cette analyse peut avoir plusieurs volets: il peut s'agir de caractériser la taille de l'ensemble, son orientation, ou encore son état de dispersion.

¹Pour plus de détails concernant les définitions et les propriétés de ces transformations, on se reportera à l'ouvrage de J. SERRA: "Image Analysis and Mathematical Morphology" (Academic Press, London, 1982).

²Si l'élément structurant possède un centre de symétrie qui est pris comme origine (ex : le cercle), $\overset{v}{B}$ est identique à B .

³On démontre que X_B est inclus dans X

⁴On démontre que X est inclus dans X^B



Figure 1 : ensemble A_1 ¹



Figure 4 : ensemble A_2



Figure 2 : Erodé de A_1 par un hexagone taille 1

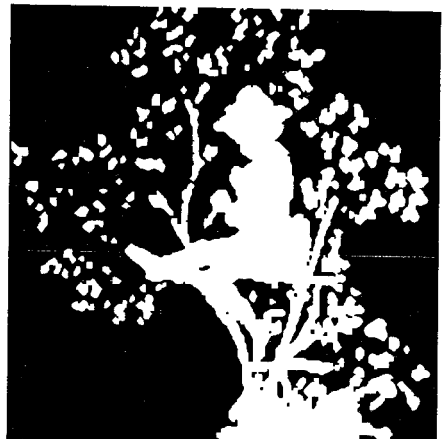


Figure 5 : Ouvert de A_2 par un hexagone de taille 1



Figure 3 : Dilaté de A_1 par un hexagone de taille 1

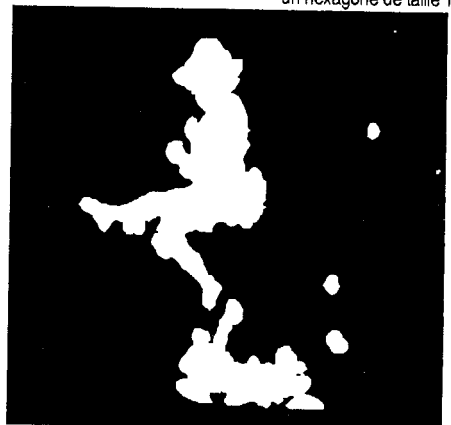


Figure 6 : Ouvert de A_2 par un hexagone de taille 4

¹ Les clichés de cette page nous ont été communiqués par Messieurs Ch. Lantuejoul et B. Lay du Centre de Morphologie Mathématique de l'Ecole des Mines de Paris.

II.2. Les différents types d'analyse

Pour décrire un ensemble X qui n'est pas connexe, on peut décider d'analyser séparément les ensembles connexes qui le composent. Chaque ensemble connexe, encore appelé composante connexe, sera mesuré séparément. C'est ce que l'on appelle en [M.M], l'*analyse individuelle*.

Si au contraire, tous les points de l'ensemble sont analysés simultanément, on dit que l'on effectue l'*analyse texturale* de l'ensemble ¹.

Pour caractériser l'organisation spatiale de l'ensemble X , nous choisissons d'effectuer une *analyse texturale*.

En analyse d'image, un autre problème surgit, conduisant à d'autres choix : toute image, en effet, est analysée à l'intérieur d'un cadre Z de dimension finie (par exemple l'écran de visualisation). Ce cadre est appelé le *masque de mesure*. Si l'on suppose que l'ensemble X tout entier est accessible à la mesure, on dit que l'on effectue une *analyse globale*. Si l'on suppose, au contraire, que l'ensemble à analyser s'étend au delà du *masque de mesure*, on dit que l'on effectue une *analyse locale* sur une partie Y de X telle que :

$$Y = X \cap Z$$

Le problème consiste alors donc à évaluer le biais introduit par le *masque de mesure* Z . Une manière de s'affranchir de ce biais est d'appliquer, lorsque c'est possible, le théorème du masque de mesure qui dit que, "Pour toute transformation *en tout ou rien* faisant intervenir un élément structurant B , le résultat de la transformation n'est connu sans biais que dans le masque Z' , qui est l'érode de Z par B ".

III. L' ANALYSE GRANULOMETRIQUE D'UNE IMAGE BINAIRE

III.1. Critère de taille

L'un des moyens de caractériser une structure spatiale est de décrire la taille de cet ensemble à l'aide d'un critère qui soit sensible, non seulement à la surface totale de cet ensemble, mais à la surface de ses composantes connexes. Dans ce cas la taille sera décrite non par une somme ou une moyenne mais par une distribution. Pour définir un critère de taille, les théoriciens de la [M.M] [MATHERON 75] se sont inspirés de l'analyse des matériaux pulvérulents. Une des techniques classiques utilisée dans ce cas consiste à effectuer un tamisage de taille variable du matériau puis à peser le contenu de chaque tamis. Pour étudier la distribution de taille d'un ensemble de \mathbf{R}^2 , ils ont appliqué le même principe, et ils ont utilisé le terme de *granulométrie* pour qualifier la distribution de taille en analyse d'image.

G. Matheron a ainsi défini une granulométrie sur un ensemble X en définissant une famille de transformations ensemblistes $\psi_\lambda(X)$, où λ est un paramètre positif, par analogie avec une famille de tamis de taille variable.

¹Cette terminologie n'est évidemment pas à rapprocher de celle de la photo interprétation.

Ces transformations ensemblistes doivent satisfaire un certain nombre de règles pour constituer une bonne granulométrie au sens de Matheron. ¹ Parmi les granulométries possibles, on démontre qu'une famille de transformations générée par les *ouvertures* d'un ensemble X à l'aide d'éléments structurants *convexes* ² de taille croissante λ satisfait les axiomes de Matheron. C'est à l'aide des granulométries par ouverture bidimensionnelle que nous avons envisagé l'étude de la taille d'un ensemble quelconque de \mathbf{R}^2 .

III.2. Granulométrie par ouverture bidimensionnelle

Le principe de l'analyse granulométrique de X par ouverture bidimensionnelle consiste à mesurer, après chaque ouverture par un élément structurant convexe bidimensionnel de taille λ , la surface de l'ensemble transformé $X_{\lambda B}$, par analogie avec un tamisage à l'aide d'un tamis circulaire. On obtient ainsi une distribution que l'on appelle *distribution en mesure* car elle est basée sur la mesure (ie la surface, ou plus précisément le nombre de pixels dans le cas d'une image digitale) de l'ensemble transformé. La fonction de distribution en mesure $G(\lambda)$, dans le cas d'une analyse globale, est définie de la façon suivante:

$$G(\lambda) = \frac{1 - A(X_{\lambda B})}{A(X)} \quad \lambda \geq 0$$

où :

$A(X)$ représente la surface de X

$X_{\lambda B}$ représente l'ouverture de X par un élément B de taille λ

La loi de distribution de taille $G(\lambda)$ correspond donc à la proportion des pixels de X qui ont été éliminés après l'ouverture par l'élément structurant λB . Par définition cette distribution croît en fonction de λ , et prend des valeurs allant de 0 (pour $\lambda=0$, aucun pixel n'est encore éliminé) à 1 (pour une certaine valeur positive de λ , tous les pixels sont éliminés).

A titre d'exemple, on a calculé les distributions en mesure à l'aide d'un élément structurant hexagonal, de deux ensembles nommés respectivement C_1 (fig 7) et C_2 (fig 8), en nous plaçant dans le cas d'une analyse globale. En portant sur le même graphique ces deux distributions (fig 9), on peut aisément les comparer : la distribution G_1 calculée à partir de C_1 , qui est composé d'entités connexes de taille différente, est sensiblement plus étalée que la distribution G_2 , calculée à partir de C_2 , composé d'entités de taille presque similaire. La pente à l'origine de G_1 est également plus faible que celle de G_2 .

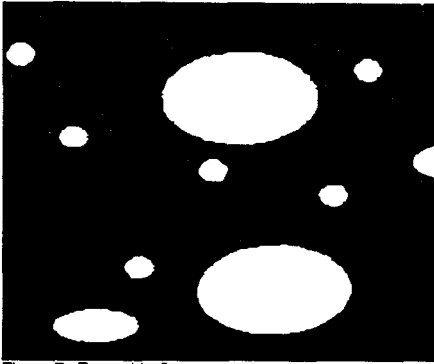
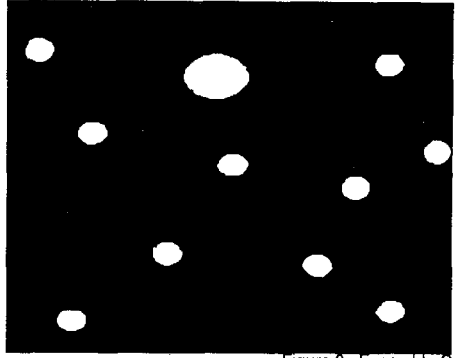
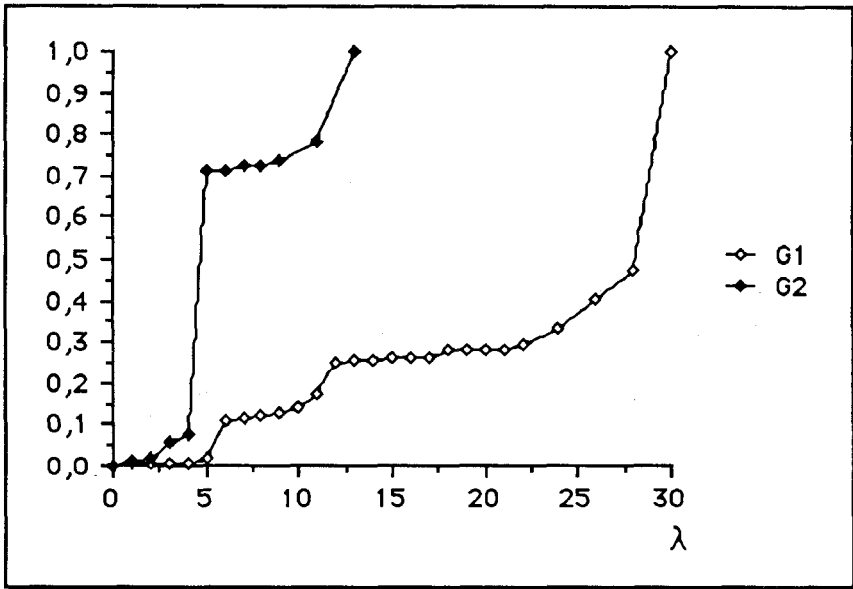
¹Un critère de taille y_l au sens de Matheron doit satisfaire les axiomes suivants:

$$1) \psi_\lambda(X) \leq X \quad \forall \lambda \geq 0$$

$$2) X \subset Y \Rightarrow \psi_\lambda(X) \leq \psi_\lambda(Y) \quad \forall \lambda \geq 0$$

$$3) \psi_\lambda(\psi_\mu(X)) = \psi_\mu(\psi_\lambda(X)) = \psi_{\sup(\lambda, \mu)}(X) \quad \forall \lambda, \mu \geq 0$$

²Un ensemble convexe X de \mathbf{R}^2 est un ensemble tel que tout segment joignant deux points quelconques de X est entièrement inclus dans X .

Figure 7 : Ensemble C_1 Figure 8 : Ensemble C_2 Figure 9 : Distribution en mesure de C_1 (courbe G_1) et de C_2 (courbe G_2)

On peut également définir une *distribution en nombre* basée sur le comptage des entités connexes éliminées après une ouverture λB . La fonction de distribution en nombre $F(\lambda)$, dans le cas d'une analyse globale, est définie de la façon suivante:

$$F(\lambda) = \frac{1 - N_2(X_{\lambda B})}{N_2(X)}$$

où:

$N_2(X)$ représente le nombre de connexité de X dans \mathbf{R}^2 ¹

$X_{\lambda B}$ représente l'ouverture de X par un élément B de taille λ

Il faut noter cependant que si les entités connexes de X ne sont pas

¹Le nombre de connexité dans \mathbf{R}^2 est égal au nombre d'entités connexes disjointes diminué du nombre de trous.

convexes, $N_2(X)$ ne décroît pas sûrement lorsque λ augmente. L'analogie avec l'analyse granulométrique par tamisage n'existe plus, puisque la distribution en nombre peut ne pas suivre une décroissance monotone. On a représenté à titre d'exemple sur la figure 10 les distributions en nombre F_1 et F_2 calculées respectivement à partir des deux ensembles C_1 et C_2 à l'aide d'un élément structurant hexagonal.

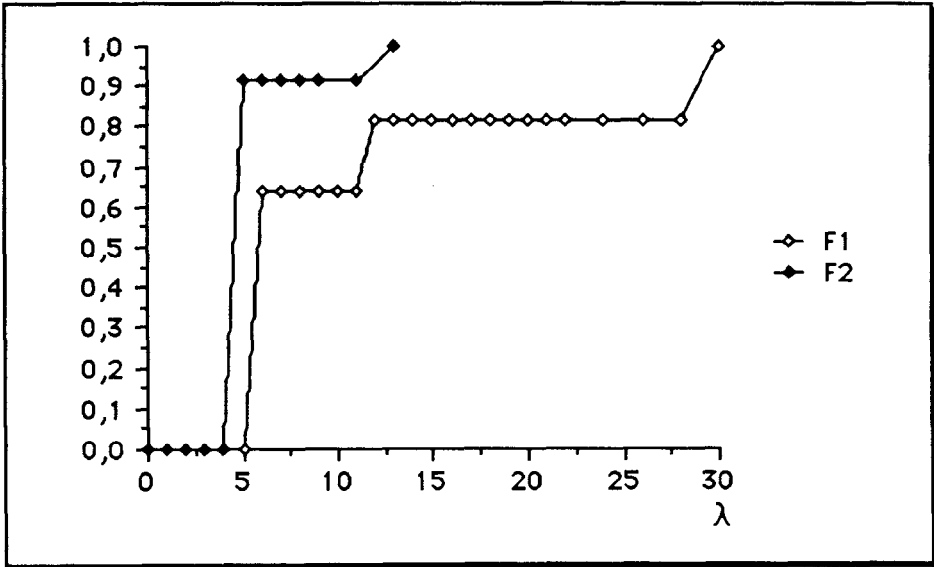


Figure 10: Distribution en nombre de C_1 (courbe F_1) et de C_2 (courbe F_2)

Une autre façon d'effectuer l'analyse de la taille consiste à évaluer non pas la distribution de taille proprement dite mais les variations entre deux tamisages successifs. La fonction $g(\lambda)$ permettant d'évaluer ces variations, appelée fonction de *densité granulométrique en mesure*¹, est définie de la façon suivante:

$$g(\lambda) = A(X_{(\lambda-1)B}) - \frac{A(X_{\lambda B})}{A(X)} \quad \lambda \in \mathbb{N}^+$$

La fonction densité en mesure $g(\lambda)$ correspond à la proportion de pixels éliminés entre deux ouvertures successives effectuées à l'aide d'éléments structurants de taille croissante, valant respectivement $(\lambda-1)$ et λ .

On a représenté sur le même graphique (fig. 11) les deux courbes de densité granulométrique g_1 et g_2 calculées à l'aide d'un hexagone de taille croissante, sur les ensembles C_1 et C_2 . Sur la courbe relative à g_1 , on distingue trois modes correspondant respectivement aux intervalles suivants:

$$3 < \lambda < 6$$

$$9 < \lambda < 12$$

¹ On peut de la même façon définir une fonction de *densité granulométrique en nombre* $f(\lambda)$ de la façon suivante:

$$f(\lambda) = \frac{N_2(X_{(\lambda-1)B}) - N_2(X_{\lambda B})}{N_2(X)} \quad \lambda > 1$$

$$25 < \lambda < 30$$

Ces trois intervalles permettent de décrire statistiquement la taille de C_1 qui est formé de trois groupes d'entités de dimensions différentes.

Sur la courbe relative à g_2 on distingue deux modes correspondant aux deux intervalles suivants:

$$3 < \lambda < 5$$

$$9 < \lambda < 12$$

C_2 est composé de deux groupes d'entités de dimensions différentes.

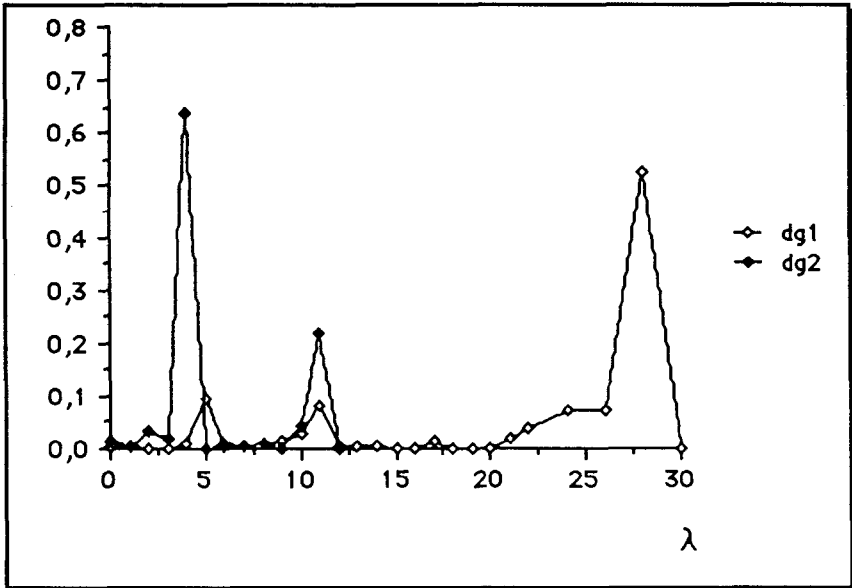


Figure 11 : Densité granulométrique en mesure de C_1 (courbe dg1) et de C_2 (courbe dg2)

III.3. Applications de l'analyse granulométrique par ouverture

L'une des applications possibles de l'analyse granulométrique par ouverture est la caractérisation des structures en "grains", c'est à dire composée d'entités connexes convexes assimilables à des grains. Cette caractérisation peut se faire directement à l'aide des *distributions en mesure et en nombre*, et des *densités granulométriques* calculées à partir des ensembles considérés. C'est précisément cette approche qui nous a servi à caractériser l'organisation spatiale du couvert ligneux en zone sahélienne à partir des images du satellite SPOT [MERING 88]. Si l'on veut utiliser l'information obtenue à la suite de l'analyse granulométrique sous une forme plus synthétique, il est possible de déterminer différents paramètres statistiques à partir des fonctions de distribution et des fonctions de densité. On peut par exemple caractériser une structure à l'aide de la *médiane* ou des *quantiles* calculés à partir des distributions $G(\lambda)$ ou $F(\lambda)$ ou encore des *modes* calculés à partir des fonctions de densité $g(\lambda)$ ou $f(\lambda)$.

Enfin, on peut imaginer de décrire l'organisation spatiale d'un ensemble X quelconque en calculant la proportion de pixels éliminés entre deux

ouvertures ainsi que la proportion de pixels ajoutés entre deux fermetures, à l'aide d'éléments structurants de taille croissante, suivant une technique dite *d'ouverture-fermeture à deux dimensions*. On peut itérer l'opération jusqu'à élimination complète de la structure (en effectuant des ouvertures de taille croissante) ou jusqu'à envahissement complet de l'espace (ou du masque de mesure) par la structure (en effectuant des fermetures de taille croissante). C'est ainsi que J.Serra a procédé pour décrire quantitativement par l'analyse d'image, différents échantillons de matériaux poreux ¹.

IV. ETUDE DE LA DISPERSION PAR LA FONCTION COVARIANCE

IV.1. Définition de la fonction covariance

On peut souhaiter décrire l'état de dispersion d'une structure indépendamment de la distribution de taille de celle-ci. C'est ainsi qu'on distingue des structures anisotropes, périodiques ou pseudo-périodiques, emboîtées, etc... Pour analyser un état de dispersion, il faut disposer d'une méthode d'analyse qui permette de caractériser quantitativement une relation entre deux points quelconques de la structure, séparés par une distance h , indépendamment de ce qui se passe entre ces deux points. Les théoriciens de la [M.M.] ont proposé un outil simple à mettre en oeuvre, la *Covariance*, destiné à effectuer l'analyse quantitative des états de dispersion.

La Covariance globale $K(X,h)$ d'un ensemble quelconque X est égale à la mesure de l'érodé de X par un bipoint de longueur h , c'est à dire un élément structurant constitué par les extrémités d'un vecteur de module h et de direction quelconque α :

$$K(X,h) = \text{Mes}(E^h(X))$$

où:

h est un bipoint de longueur h et de direction α

L'érodé $E^h(X)$ d'un ensemble X par un bipoint h s'obtient en effectuant l'intersection entre l'ensemble X et le translaté de X selon h :

$$E^h(X) = X \cap \Xi_{-h}$$

En *analyse locale*, on ne peut mesurer l'état de dispersion qu'à travers un masque de mesure Z . On utilise donc une version probabiliste de la covariance, la *fonction covariance* notée $C(X,h)$ pour étudier les états de dispersion, en supposant que X est un ensemble aléatoire stationnaire. La fonction covariance est alors définie comme la probabilité pour qu'un point X et un point $X+h$ appartiennent à X , soit:

$$C(X,h) = P\{x \in X, X+h \in X\} \quad (I)$$

Pour X défini dans \mathbf{R}^2 , à travers un masque de mesure Z , on aura:

¹On trouvera une description approfondie de cette méthode appliquée à l'analyse des dolérites caucasiennes dans "Image Analysis and Mathematical Morphology" de J.Serra, pages 339-344.

$$C(X,h) = A_A E^h(X \cap Z)$$

où :

$A_A (X \cap Z)$ est fraction surfacique de $X \cap Z$ ¹

En appliquant le théorème du masque de mesure (cf § II.2), on obtient :

$$C(X,h) = \frac{A(E^h(X) \cap E^h(Z))}{A(E^h(Z))} \quad (II)$$

IV.2. Principales propriétés de la fonction covariance

La fonction covariance possède un ensemble de propriétés mathématiques qui permettront d'effectuer l'interprétation des covariogrammes. Parmi celles-ci nous rappellerons les propriétés suivantes:

$$C(X,0) = A_A (X) \quad (III)$$

A l'origine (ie lorsque h vaut 0), la fonction covariance est égale à la mesure de X . Pour toute valeur finie de h , elle sera inférieure ou égale à la mesure de X , comme l'indique l'inégalité suivante (facile à vérifier en utilisant la relation II):

$$C(X,h) = C(X,-h) \leq C(X,0) \quad (IV)$$

D'autre part, lorsque h tend vers l'infini, on considère que les deux événements (au sens probabiliste du terme) $X \in X$ et $(x+h) \in X$ sont indépendants. En appliquant la relation (I), on en déduit la relation suivante:

$$\lim_{h \rightarrow \infty} C(X,h) = (A_A (X))^2 \quad (V)$$

La fonction covariance admet donc une valeur asymptotique théorique égale au carré de la fraction surfacique de X . Si cette limite peut être pratiquement atteinte pour une valeur $h=p$, les points de la structure distants d'au moins p seront très peu ou pas corrélés. Cette distance est appelée *portée de la covariance*, et peut être estimée par calcul ².

La fonction covariance renseigne également sur l'anisotropie de X . En particulier la dérivée de la fonction à l'origine et dans une direction α donnée est directement liée au nombre de connexité spécifique $N_L(X, \alpha)$ ³ dans cette direction:

$$N_L(X, \alpha) = -C'(X,0, \alpha) \quad (VI)$$

où

$N_L(X, \alpha)$ est le nombre de connexité spécifique dans la direction α

¹La fraction surfacique d'un ensemble aléatoire borné est égale à la proportion d'espace occupé par cet ensemble

²On trouvera des algorithmes permettant d'estimer la *portée* dans l'ouvrage "Précis d'Analyse d'Images" de M. Coster et J.L.Chermant (Paris, CNRS, 1985), p231.

³On trouvera le détail de la méthode de calcul du nombre spécifique $N_L(X, \alpha)$ dans l'espace R^1 suivant une direction α , dans "Image Analysis and Mathematical Morphology" de J Serra, aux pages 133-135.

$C'(X,0, \alpha)$ est la dérivée à l'origine de la fonction covariance calculée suivant la direction α

On peut donc établir une relation entre la pente à l'origine de la fonction covariance et la finesse de la structure: en effet, le nombre de connectivité permet de caractériser la finesse d'une structure dans une direction donnée.

IV.3. Interprétation des covariogrammes

Les propriétés que nous venons d'évoquer nous fournissent des aides précieuses pour interpréter les covariogrammes:

Notons d'abord que la valeur de la fonction à l'origine est d'autant plus élevée que la fraction surfacique est importante (cf relation III) et qu'à fraction surfacique égale, la pente à l'origine est d'autant plus élevée que la structure est fine (cf relation VI).

Les variations entre l'origine et la valeur asymptotique (cf relation V) de la fonction dépendent uniquement de l'état de dispersion. En particulier si la structure présente des périodicités, le covariogramme présentera des oscillations. Ces oscillations sont d'autant plus accentuées que la périodicité est plus marquée. Des paliers intermédiaires apparaissent pour des superpositions de structures d'échelles différentes.

D'autre part, la portée, si elle existe, nous renseigne sur la taille de la structure. Lorsque la fonction covariance n'atteint pas sa valeur asymptotique, cela signifie qu'il existe une macro-structure à plus grande échelle.

Enfin, le caractère directionnel de la fonction covariance permet d'analyser l'anisotropie de la structure, en comparant les covariogrammes correspondant à différentes directions du plan.

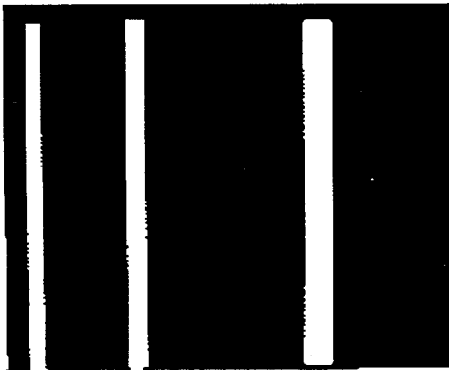
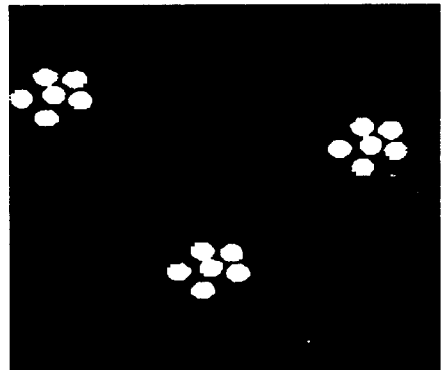
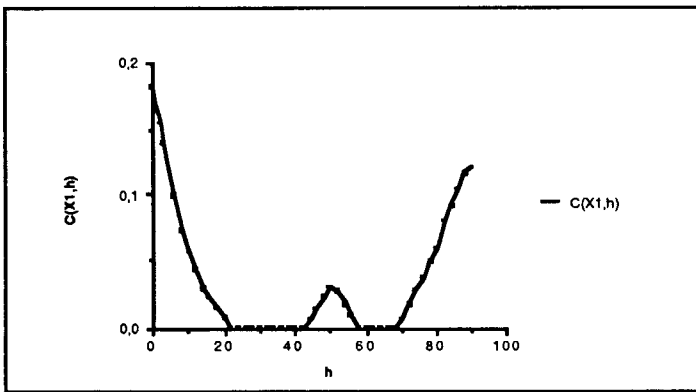
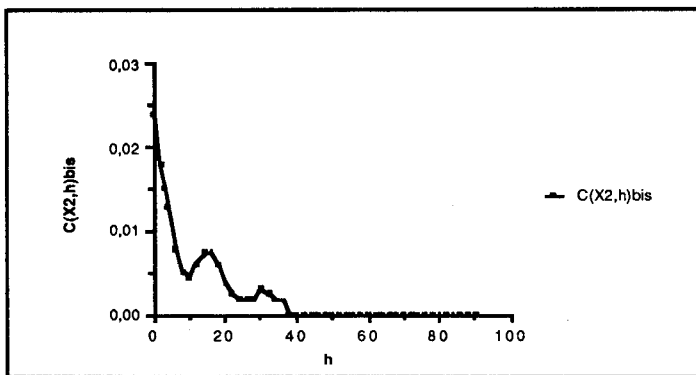
A titre d'exemple on a représenté sur les figures 14 et 15 deux portions de covariogrammes ¹ obtenus respectivement par calcul de la fonction covariance dans la direction horizontale du plan, de deux ensembles nommés D_1 et D_2 (représentés sur les figures 12 et 13).

On fait les constatations suivantes:

La valeur à l'origine du covariogramme de D_1 est sensiblement plus élevée que celle du covariogramme de D_2 : l'ensemble D_1 est sensiblement plus étendu que D_2 .

D'autre part les deux structures sont pseudo-périodiques, ce que révèle bien les courbes. On note cependant que le covariogramme de D_2 révèle une structure emboîtée (entre les valeurs 30 et 40 de h) que ne révèle pas le covariogramme de D_1 .

¹La fonction covariance a été calculée pour les premières valeurs de h entre 0 et 100.

Figure 12 : Ensemble D_1 Figure 13 : Ensemble D_2 Figure 14 : Covariogramme de D_1 Figure 15 : Covariogramme de D_2

IV.4. Modèles et analyse descriptive de la dispersion

L'une des possibilités d'utilisation et d'interprétation de la covariance consiste à avoir recours, lorsque c'est possible, à des modèles. Ces modèles permettent d'obtenir les valeurs théoriques de grandeurs que l'on pourra comparer aux valeurs expérimentales correspondantes.

Un des modèles simples consiste à décrire la structure comme une structure périodique amortie. P. Camart, J.L. Chermant et M.Coster [CAMART et al 78] ont proposé un paramètre b caractérisant l'amortissement. On utilise ce paramètre pour modéliser une structure périodique amortie à l'aide de l'équation théorique suivante:

$$C(X,h) = C^2(X,0) + f(h)e^{-bh}$$

où

$f(h)$ représente une fonction périodique
 b est le paramètre d'amortissement

On estime b en effectuant un ajustement exponentiel sur les maxima de la fonction de covariance.

On peut également essayer de décrire la structure à l'aide d'un modèle probabiliste de la dispersion. Parmi ces modèles, le plus connu est le modèle booléen. [SERRA 82] Celui-ci s'avère bien adapté à la description de structures de morphologies diverses où n'apparaissent pas de regroupement en amas. Le modèle booléen se construit de la façon suivante:

- on implante des points suivant un processus de Poisson de densité θ ¹
- En chaque point on implante un grain A_i' primaire dont on connaît la forme. La taille de ce grain peut être fixe ou aléatoire. Il peut y avoir interpénétration des grains entre eux

Si l'on appelle $X = \cup_i A_i'$, l'union de tous les grains primaires, X constitue un ensemble booléen.

On démontre que les propriétés morphologiques de l'ensemble complémentaire X^C obtenues à partir d'un ensemble structurant quelconque B sont liées aux caractéristiques du grain primaire par la relation suivante:

$$Q(X,B) = \exp - \theta(\text{Mes}(D^B(A')))$$

où

$Q(X,B)$ est la probabilité pour qu'un élément B appartienne à l'ensemble complémentaire X^C

On démontre alors ² que la fonction covariance de l'ensemble complémentaire de X obéit à la relation suivante:

$$C(X^C,h) = A_A(X^C)^2 \exp(\theta K(A',h)) \quad (\text{VII})$$

où:

X^C est l'ensemble complémentaire de X

θ est la densité du processus de Poisson

$K(A',h)$ la covariance globale du grain primaire A'

Si l'on fait l'hypothèse que le grain primaire est convexe, on peut tester

¹Pour cela on tire au sort des coordonnées suivant une loi uniforme.

²On trouvera la démonstration complète dans "Précis d'Analyse d'Images" de M. Coster et J.L. Chermant, P253-254.

l'hypothèse du modèle booléen $1.C(X^C, h)$ étant accessible expérimentalement, on pourra alors évaluer la covariance globale du grain primaire convexe $K(A', h)$ à l'aide de la relation VII. Pour décrire le modèle, on recherchera parmi les grains convexes celui qui a la même covariance globale.

Comme nous venons de le voir le recours à des modèles nécessite un grand nombre d'hypothèses initiales. Jusqu'ici, dans le cas de l'analyse des images de télédétection, nous avons rencontré peu de cas nous donnant l'occasion d'émettre de telles hypothèses.

Au cours de l'analyse de la structure du couvert végétal en zone sahélienne à partir des images SPOT [MERING 88] [JACQUEMINET 89], que nous avons effectuée à l'aide des outils décrits plus haut, nous n'avons pas envisagé de recourir à un modèle mais plutôt d'utiliser directement les éléments résultant du calcul de la covariance tels que:

- la pente à l'origine
- la portée (si elle existe)
- la distance entre les maxima (dans le cas d'une fonction pseudo-périodique)
- la hauteur des pics (dans le cas d'une fonction pseudo-périodique)

Nous pensons néanmoins que dans le cadre du suivi systématique d'un phénomène bien circonscrit et reconnaissable sur les images de télédétection (ex : évolution du couvert végétal, de l'occupation du sol, de l'habitat) l'utilisation de modèles d'organisation d'une structure pourrait fournir à l'avenir des éléments complétant les observations in situ, de façon plus satisfaisante que la simple étude descriptive de l'image.

V. FONCTION DE VOISINAGE ENTRE DEUX ENSEMBLES X_1 ET X_2

Lorsqu'une image de télédétection est classée, il peut être intéressant d'évaluer quantitativement l'organisation relative d'une classe particulière relativement à une autre classe (il peut s'agir par exemple d'étudier la répartition de la végétation relativement à un réseau hydrographique). L'une des solutions consiste à calculer la fonction *covariance rectangle* entre l'ensemble X_1 correspondant à l'une des classes et l'ensemble X_2 correspondant à l'autre classe. Elle correspond à la probabilité pour qu'un point X appartienne à X_1 et que le point $X+h$ appartienne à X_2 . Les propriétés de la *covariance rectangle* sont analogues à celles de la *covariance* (cf § IV.2). Une autre manière d'étudier les relations spatiales entre deux classes consiste à étudier le pourcentage des points d'un ensemble X_1 situé à une distance λ d'un ensemble X_2 . Ce pourcentage peut être accessible en effectuant des *dilatations conditionnelles* de X_1 par rapport à X_2 ². On définit alors la fonction de voisinage de X_1 par rapport à X_2 de la façon suivante:

¹ Dans le cas du grain primaire on démontre que la fonction: $P(X^C, l) = \frac{A\{E^l(X^C) \cap E^l(Z)\}}{E^l(Z)}$ où l est un élément structurant linéaire, obéit à une loi exponentielle.

² Effectuer la dilatation conditionnelle d'un ensemble X par rapport à un ensemble Y revient à réaliser l'intersection entre $D^B(X)$, le dilaté de X , et Y .

$$G(X_i: X_j, \lambda) = \frac{\text{Mes}(D^{\lambda B}(X_i) \cap X_j)}{\text{Mes}(X_j)}$$

On a représenté sur les figures 18 et 19 les courbes correspondant aux fonctions de voisinages calculées à partir des configurations représentées respectivement sur les figures 16 et 17. Dans les deux cas on a calculé la fonction de voisinage de l'ensemble linéaire Y (en blanc sur l'image) par rapport à l'ensemble formé d'ellipses (en gris sur l'image) nommés respectivement E_1 et E_2 .

VI. CONCLUSIONS

Nous avons présenté ici quelques méthodes quantitatives permettant d'analyser à partir d'une image satellitaire numérique ce que les photo-interprètes nomment la structure.

Dans ce but, nous avons examiné différents outils qu'offre la Morphologie Mathématique binaire pour analyser quantitativement une organisation spatiale délimitée à partir d'une image quelconque, et donc en particulier d'une image satellitaire préalablement classée. De tels outils permettent l'accès à une paramétrisation de la taille et de l'état de dispersion d'une structure spatiale. Ils permettent également d'effectuer l'analyse complète et systématique des structures discontinues telles que les structures en *grains* ou en *bandes*. D'autre part, la relation spatiale entre deux structures peuvent également être étudiées quantitativement. Enfin l'approche quantitative et ensembliste de l'analyse d'image qui est celle de la Morphologie Mathématique a permis de proposer des modèles probabilistes permettant de décrire certains types d'organisations spatiales.

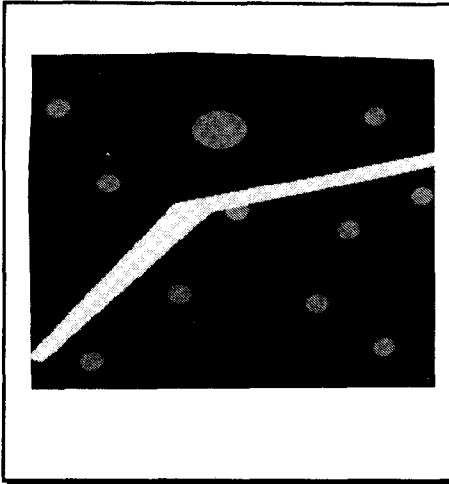


Figure 16 : Ensemble Y (ligne blanche)
et E_1 (ellipse grises)

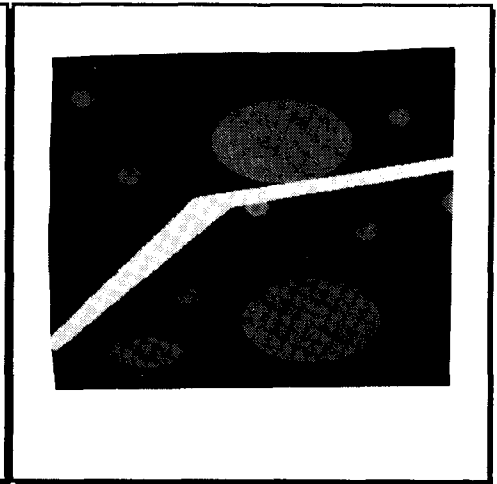


Figure 17 : Ensemble Y (ligne blanche)
et E_2 (ellipses grises)

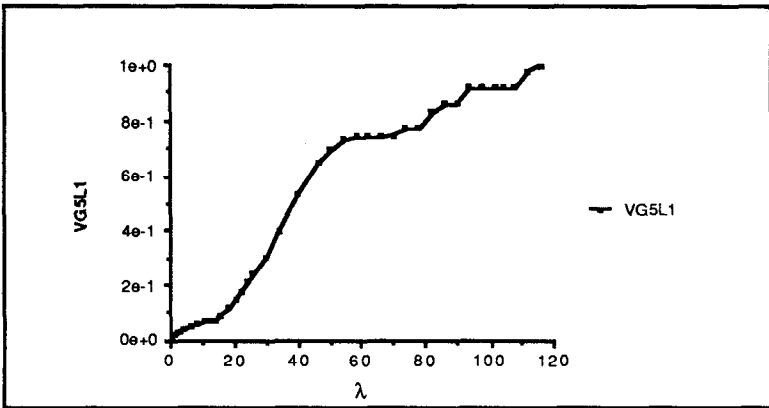


Figure 18 : Fonction de voisinage de Y (ligne blanche) par rapport à E_1 (ellipses grises)

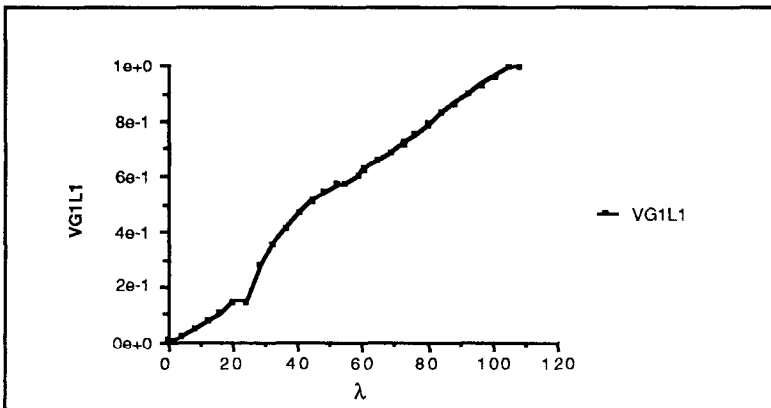


Figure 19 : Fonction de voisinage de Y (ligne blanche) par rapport à E_2 (ellipses grises)

BIBLIOGRAPHIE

- Camart, J.L. Chermant, M. Coster. *Pract. Met.*, 1978, S8, 126. [CAMART et al 78 P].
- Chevallier, R. : "La photographie aérienne". Armand Colin, Paris 1971. [CHEVALLIER 71]
- Coster, M. et Chermant, J.L.: "Précis d'Analyse d'Images", CNRS, Paris, 1985. [COSTER 85]
- Desachy, J. : "Contribution à l'étude de la texture en télédétection". Thèse d'Etat. Univ. Paul Sabatier, Toulouse 1980. [DESACHY 80] J
- Haralick, R.M : "Statistical and structural approaches to texture." Dept of computer science. University of Kansas. *Proceedings IEEE*, 67, 1978. pp786-804. [HARALICK 78]
- Jacqueminet, Ch., Mering C. "Caractérisation de l'organisation spatiale du couvert ligneux sur images SPOT à l'aide de paramètres quantitatifs. In "Apports de la télédétection spatiale à l'étude des paysages et des systèmes agraires tropicaux", Table ronde CNRS-CEGET, 25-27 octobre 1989, Talence (à paraître) [JACQUEMINET 89].
- Leo, O. et Dizier, J.L. "Télédétection. Techniques et applications cartographiques". Forhom, Paris, 1987 [LEO 87]
- Matheron, G. : "Random sets and integral geometry", J.Wiley, 1975. [MATHERON 75]
- Mering, C., Jacqueminet, Ch.: "Use of SPOT satellite images for the inventory and follow-up of ligneous resources in the Sahel". *Acts of 22nd International Symposium of Remote Sensing for Environment*, Abidjan, 1988. [MERING 88]
- Serra, J.: "Image analysis and mathematical morphology." Academic Press, London, 1982. [SERRA 82]
- Serra, J.: "Image analysis and mathematical morphology. Vol2. Theoretical Advances" Academic Press, London, 1988. [SERRA 88]

CARACTERISATION QUANTITATIVE DE L'ORGANISATION SPATIALE DES AIRES DE LIGNEUX EN MILIEU SAHELIEU A PARTIR DES IMAGES SATELLITAIRES SPOT

Christine JACQUEMINET

INTRODUCTION

Cette étude a pour objet d'analyser la dynamique du couvert végétal en milieu Sahélien par le biais d'un indicateur perceptible sur images satellitaires et quantifiable: l'organisation spatiale des ligneux. L'idée de base de cette recherche, avant tout d'ordre méthodologique, s'appuie sur des observations faites sur l'évolution du couvert végétal en milieu dunaire Sahélien au cours des trois dernières décennies. Suite aux déficits pluviométriques récurrents, on a observé le passage d'un mode diffus de la répartition des ligneux à un mode contracté, qui s'est concrétisé par une dénudation du sommet des ondulations dunaires et une concentration des ligneux dans les dépressions. Cette contraction résulte de l'inégale résistance de certaines espèces ligneuses vis à vis d'une sécheresse accentuée et d'une pression humaine croissante, elle s'opère différemment selon les conditions topo-édaphiques des milieux considérés (Courel, 1984). Ces modifications de l'organisation spatiale du couvert ligneux ont été largement décrites, sans avoir été mesurées.

Notre objectif consiste à mettre au point à partir des images satellitaires à forte résolution, des descripteurs quantitatifs de la répartition spatiale des ligneux. Ces descripteurs pouvant être utilisés par la suite pour des mesures systématiques et permettre ainsi des comparaisons spatiales et temporelles de la dynamique du couvert ligneux en milieu Sahélien. Nous ne considérons que la végétation ligneuse car la couverture herbacée variant d'une année sur l'autre en fonction de l'importance des pluies et de leur distribution dans le temps, ne peut être un bon indicateur à moyen terme de la dynamique du milieu.

I. AIRE D'ETUDE

I.1. La région d'Oursi

L'étude a pour terrain d'expérimentation le secteur dunaire situé au nord de la mare d'Oursi dans le nord du Burkina Faso. Cette région appartient au domaine semi-aride, le total des pluies est inférieur à 350 mm/an. Le paysage d'Oursi se compose d'une vaste pénéplaine, recouverte de cordons dunaires orientés E-W, séparés par des plaines interdunaires nappées de dépôts sableux éoliens où localement des formations cuirassées affleurent. Cet ensemble est colonisé par une steppe arbustive et arborée, comprenant une strate arbustive lâche (*Balanites aegyptiaca*, *Combretum glutinosum*, *Pterocarpus lucens*, *Guiera senegalensis*...) et une strate herbacée composée principalement d'espèces annuelles à cycle court (*Cenchrus biflorus*, *Schoenfeldia gracilis*, *Aristida mutabilis*...). La densité des herbes, arbres et arbustes est très variable, d'une façon générale elle est plus forte dans les secteurs éloignés des mares et des villages. La région d'Oursi est avant tout une région à vocation pastorale. Elle est occupée par des sédentaires et des nomades, pratiquant la culture du petit mil sur les sols dunaires ou sur les sols hydromorphes de la mare d'Oursi (Courel, 1984). Suite aux grandes sécheresses qui se sont succéder depuis 1973, les populations nomades ont tendance à se sédentariser, contribuant ainsi à accroître les surfaces cultivées et à augmenter le pâturage des terrains proches de la mare d'Oursi (Barral, 1977). Cette forte pression anthropique, surtout à proximité des villages, conjuguée à des conditions climatiques défavorables se traduit sur un petit espace, par une forte différenciation des modes d'organisation spatiale du couvert ligneux entre et au sein des mêmes unités topographiques (fig 1).

I.2. Description du couvert ligneux au sol et sur l'image

Sur l'aire étudiée, nous avons distingué quatre types d'organisation spatiale ou de texture du couvert ligneux perceptibles sur l'image satellitaire:

- sur les cordons dunaires, les ligneux s'organisent en bosquets dans les creux intradunaires ou sur les flancs des dunes,
- sur les accumulations éoliennes des espaces interdunaires, ils s'organisent en gros agrégats de forme plus ou moins allongée et largement espacés, ou au contraire, en petits fourrés peu espacés ayant vu du dessus une texture mouchetée, dans la suite de l'exposé, cette texture est appelée brousse mouchetée,
- sur les affleurements cuirassés des espaces interdunaires, la formation végétale rencontrée est une brousse tigrée (alternance régulière de petites bandes boisées et de petites bandes nues).

Sur l'image satellitaire SPOT du 17/12/86, les aires couvertes en ligneux apparaissent par le biais de taches sombres de forme, de taille et d'espacement variables. Leur réponse spectrale est influencée par les ligneux d'une part, mais aussi par la litière, les herbacées sèches, un sol plus humifère, plus argileux et rugueux et parfois humide... Les changements qui affectent le couvert ligneux sont perceptibles et mesurables sur l'image satellitaire, par le biais des variations de ces formes.

Pour analyser la répartition des ligneux sur images SPOT, nous avons choisi d'utiliser une image de saison sèche où les ligneux encore chlorophylliens se discriminent bien spectralement des herbacées sèches.

L'étude comporte deux étapes:

- dans une première étape, on délimite les aires couvertes en ligneux à l'aide d'une classification multispectrale,
- puis, sur des échantillons extraits de l'image classée, on caractérise quantitativement la répartition spatiale des ligneux à l'aide de descripteurs morphologiques.

II. DELIMITATION DES AIRES DE LIGNEUX

Pour délimiter les aires couvertes en ligneux, nous effectuons une classification supervisée à partir des critères spectraux à l'aide de la *méthode de discrimination non paramétrique* (Celeux, 82). Il s'agit d'une méthode probabiliste permettant de partitionner l'ensemble des pixels de la scène en les affectant à l'une des classes déterminées a priori. Cette méthode opère la segmentation des variables quantitatives qui discriminent au mieux les classes déterminées a priori. La méthode de base repose sur une discrimination en deux classes d'une variable quantitative, généralisée à plusieurs classes et plusieurs variables (Mering, 1988). Les variables utilisées sont les canaux bruts, l'indice de végétation ($IVGV = \frac{XS3 - XS2}{XS3 + XS2}$) et la première composante de l'analyse en composantes principales de Karhunen-Loeve des trois bandes spectrales. L'image est partitionnée en quatre classes correspondant aux différents composants du paysage ayant une réponse spectrale propre: la végétation ligneuse, les sols sombres, les sols clairs, l'eau. Cette classification est validée à l'aide de parcelles de contrôle déterminées d'après des photographies aériennes et la vérité-terrain. Puis l'image classée est binarisée, nous ne conservons que la classe "végétation ligneuse". Cette image binaire est assimilée à un ensemble unique que l'on appelle X (fig 2).

Il convient de souligner, qu'en raison de l'extrême fractionnement du couvert ligneux et de ses limites plus ou moins diffuses, la discrimination spectrale des aires ligneuses s'est révélée difficile. En comparant le résultat de la classification avec la composition colorée calculée à partir des trois bandes spectrales, on constate que localement, la végétation ligneuse est ou surestimée, ou sous-estimée en fonction de son taux de recouvrement et des caractéristiques radiométriques de son environnement, néanmoins la texture du couvert est conservée.

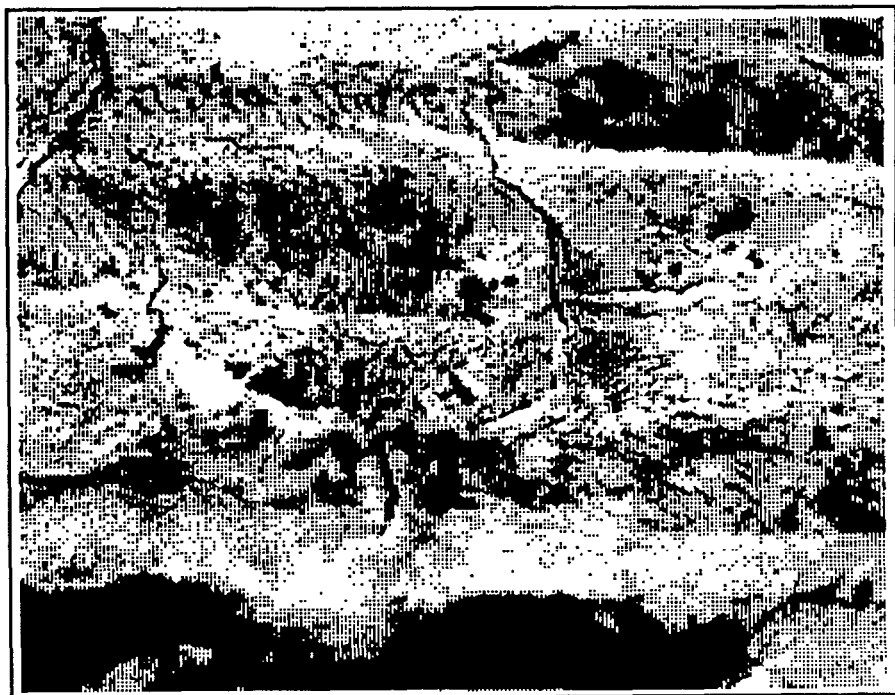


Figure 1: composition colorée extraite de l'image SPOT du 17/12/86



Figure 2: la classe "végétation"

III. CARACTERISATION QUANTITATIVE DES FORMES D'ORGANISATION SPATIALE DU COUVERT LIGNEUX

L'image binaire obtenue à l'étape précédente est subdivisée en quadrats-test de 85/85 pixels sur lesquels on calcule des indices texturaux mis au point à l'aide des outils de la *morphologie mathématique*. La *granulométrie par ouverture* permet de mesurer la distribution de la taille des unités de ligneux et la *covariance* d'évaluer la répartition relative des unités de ligneux par rapport aux espaces non couverts en ligneux.

La méthode est illustrée sur des échantillons représentatifs des quatre types d'organisation spatiale du couvert ligneux distingués auparavant:

- les tigrures des espaces interdunaires (fig. 3),
- les bosquets subcirculaires des cordons dunaires (fig. 7),
- la brousse mouchetée des espaces interdunaires (fig. 11),
- les gros agrégats des espaces interdunaires (fig. 15).

Ces échantillons ont été grossis trois fois, pour conserver une certaine homogénéité de la texture du couvert ligneux au sein de chaque échantillon, la taille des fenêtres étant fixée à 256/256 pixels.

III.1. Distribution de la taille des unités de ligneux

La *granulométrie par ouverture* consiste à transformer l'image par ouvertures successives à l'aide d'un élément structurant convexe de taille croissante. A chaque opération, les éléments connexes de taille inférieure à celle de l'élément structurant sont éliminés, à la manière d'un tamisage dont la taille des pores croît. Le calcul de la surface et du nombre d'éléments éliminés à chaque ouverture permet d'évaluer la distribution de la taille des unités de ligneux de chaque échantillon. On calcule $G(n)$ la distribution de taille en surface et $F(n)$ la distribution de taille en nombre à l'aide des formules suivantes:

$$G(n) = \frac{\{A(X) - A(X_{B(n)})\}}{A(X)} \quad n \geq 0$$

$$F(n) = \frac{\{N(X) - N(X_{B(n)})\}}{N(X)} \quad n \geq 0$$

où:

$A(X)$ est la surface de X ,

$N(X)$ est le nombre d'entités connexes de X ,

$X_{B(n)}$ est l'ouvert de X par l'élément structurant hexagonal B de taille n

Les courbes de la distribution de taille représentent le nombre de pixels et de particules connexes de pixels éliminés à chaque accroissement du rayon de l'ouverture. Plus la pente des courbes est forte et plus la proportion de petites particules au sein de l'échantillon est importante.

On peut également évaluer la densité granulométrique en surface $g(n)$ et en nombre $f(n)$ à l'aide des formules suivantes:

$$G(n) = \frac{\{A(X_B(n)) - A(X_B(n+1))\}}{A(X)} \quad n \geq 0$$

$$F(n) = \frac{\{N(X_B(n)) - N(X_B(n+1))\}}{N(X)} \quad n \geq 0$$

Le calcul de la densité granulométrique permet d'évaluer la proportion en surface ou en nombre de pixels et particules connexes éliminés entre deux ouvertures successives de rayon respectif n et $n+1$. Les pics des courbes mettent en évidence une ou plusieurs classes de taille de particules au sein de chaque échantillon.

Ces deux indices nous permettent de distinguer trois types de granulométrie des unités du couvert ligneux sur le site d'Oursi:

- une granulométrie très fine, les courbes granulométriques G et F ont une pente très raide et leur tracé est presque confondu. Le pic des courbes de densité granulométrique g et f indique une classe de taille de grains. C'est l'exemple de la brousse tigrée (fig. 4 et 5).
- une granulométrie fine mais plus hétérogène, la pente des courbes granulométriques G et F est plus douce et l'espace entre les deux courbes croît, mettant ainsi en évidence un nombre important de petites particules et une distribution de la surface des grains plus hétérogène. Le tracé parallèle des deux courbes granulométriques G et F met en évidence une relative équirépartition du nombre de particules par taille de grains. Les pics des courbes de densité granulométrique g et f indiquent deux à trois classes de taille de grains. C'est le cas des bosquets dunaires (fig. 8 et 9) et de la brousse mouchetée (fig. 12 et 13).
- et enfin, une granulométrie à distribution de taille hétérogène, dans le cas des gros agrégats (fig. 16 et 17). Elle se caractérise par une pente des courbes granulométriques G et F plus faible et un espacement entre ces deux courbes plus grand. Les pics des courbes de densité granulométrique G et F mettent en évidence plusieurs classes de tailles de grains. Leurs tracés se différencient davantage, soulignant ainsi l'existence d'un grand nombre de petites particules et celle de particules à grande surface.

III.2. Mesure de l'état de dispersion des unités de ligneux

La *covariance* consiste à transformer l'image par érosions successives à l'aide d'un bipoint d'espacement croissant et d'orientation donnée. A chaque opération, on évalue la surface de l'ensemble ainsi transformé. On définit la covariance $C(X, h, \alpha)$ de la manière suivante:

$$C(X, h, \alpha) = \frac{A(E^{h\alpha}(X) \cap (E^{h\alpha}(Z)))}{A(E^{h\alpha}(Z))}$$

où:

Z est le masque de mesure,

$A(X)$ est la surface de X ,

$E^{h\alpha}(X)$ est l'érosion de X par un bipoint de longueur h et d'orientation α .

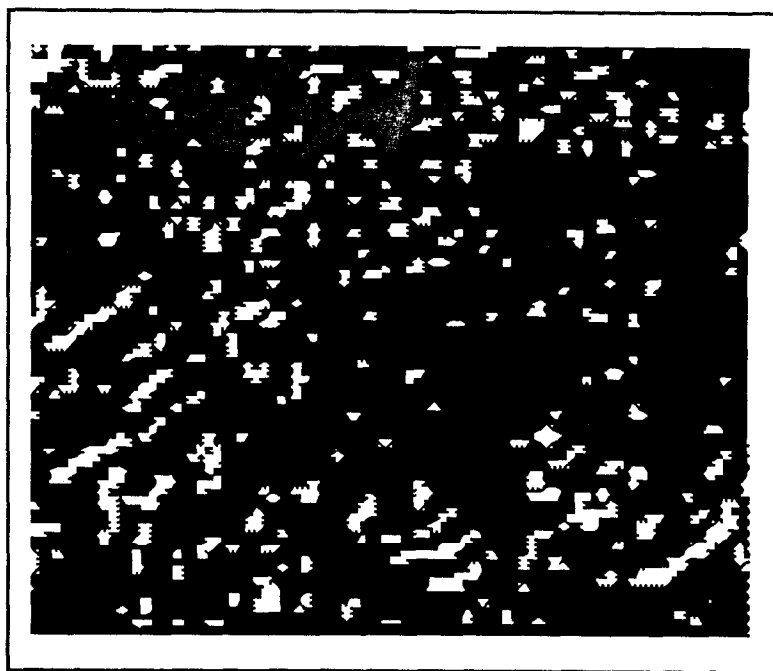


Figure 3: brousse tigrée des espaces interdunaires

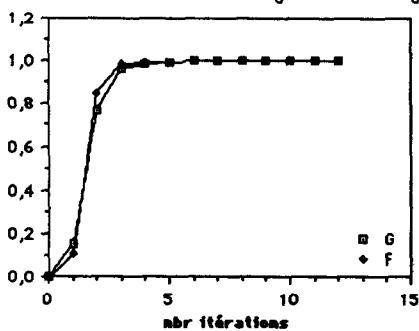


Figure 4: distribution de la taille en surface(G) et en nombre(F)

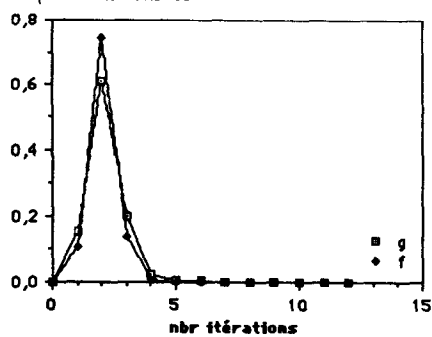


Figure 5: densité granulométrique en surface(g) et en nombre(f)

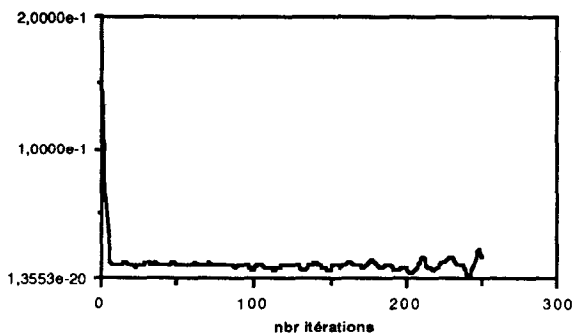


Figure 6: covariogramme

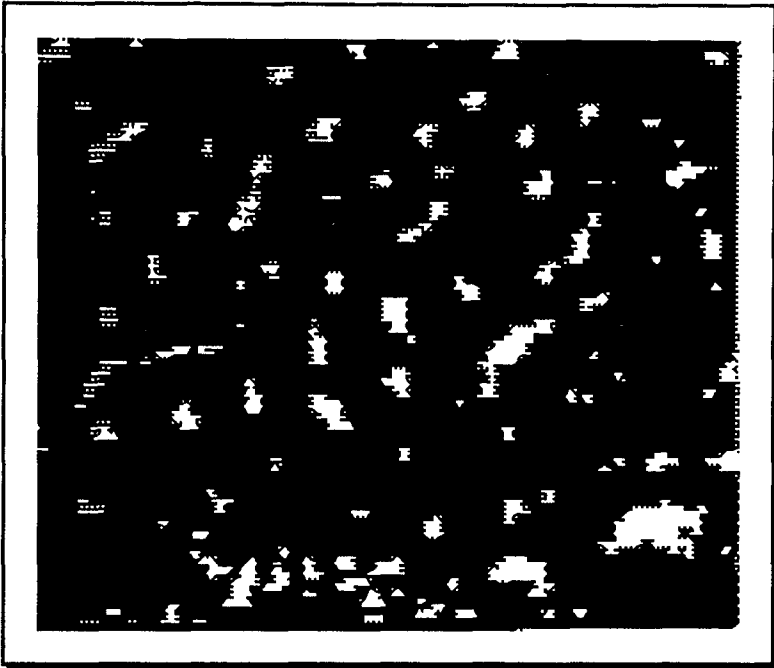


Figure 7: bosquets des cordons dunaires

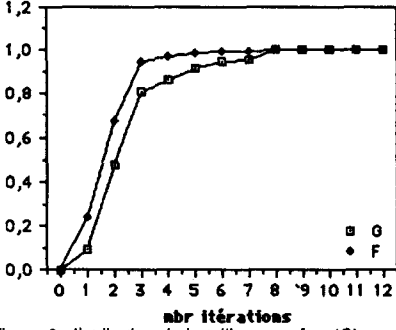


Figure 8: distribution de la taille en surface(G) et en nombre(F)

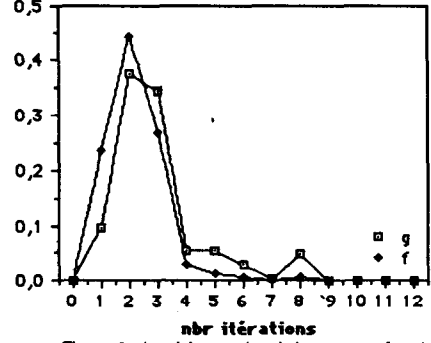


Figure 9: densité granulométrique en surface(g) et en nombre(f)

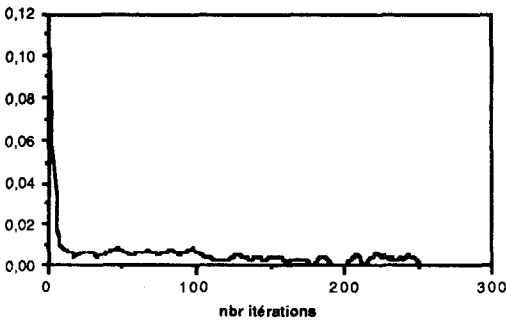


Figure 10: covariogramme

La courbe du covariogramme traduit l'état de dispersion des éléments de l'échantillon dans la direction étudiée:

- La valeur à l'origine du covariogramme est d'autant plus élevée que la surface de l'échantillon est importante. Cette valeur nous permet de mesurer le taux de recouvrement du couvert ligneux de chaque échantillon. Sur les échantillons observés ici, celui-ci est minimal pour les bosquets dunaires (fig. 10) et maximal pour la brousse mouchetée (fig. 14).
- La pente du covariogramme est d'autant plus forte que la structure est fine. C'est le cas de la brousse tigrée constituée de petites particules (fig. 6), à l'inverse la pente du covariogramme des gros agrégats est plus douce (fig. 18).
- Des oscillations régulières du covariogramme traduisent l'existence d'une périodicité dans la structure étudiée. La hauteur et l'amplitude des oscillations indiquent respectivement le diamètre horizontal moyen des éléments connexes et la distance moyenne qui les sépare dans la direction étudiée. Les covariogrammes mettent en évidence plusieurs types de texture du couvert ligneux dans la direction horizontale:

La courbe presque plate du covariogramme mesuré sur l'échantillon de la brousse tigrée met en évidence le fractionnement de la texture du couvert ligneux, caractérisée par de petites unités peu espacées (fig.6).

Le covariogramme calculé sur l'échantillon des bosquets dunaires indique une taille de particules supérieure à celles de la brousse tigrée, la régularité des oscillations met en évidence la périodicité de la répartition des bosquets en liaison avec la morphologie dunaire (fig. 10).

Les oscillations du covariogramme mesuré sur l'échantillon de la brousse mouchetée ont des oscillations d'une amplitude et d'une hauteur plus irrégulière, indiquant ainsi, la plus grande hétérogénéité de taille des particules et leur répartition moins périodique (fig. 14).

Enfin les ondulations du covariogramme mesuré sur l'échantillon des gros agrégats, plus hautes et plus longues soulignent le diamètre et l'espacement plus important des particules (fig. 18).

Ces descripteurs quantitatifs de la texture nous permettent de caractériser quantitativement différents types de couvert ligneux discontinu. Ultérieurement, nous envisageons d'étudier le caractère discriminant de ces indices texturaux sur l'ensemble de l'image par l'intermédiaire d'échantillons jointifs et d'effectuer une typologie des différents types de couvert ligneux discontinu, en liaison avec les unités topo-édaphiques.

CONCLUSION

Cette étude propose une méthode d'analyse d'images pour caractériser quantitativement les différentes formes d'organisation spatiale du couvert ligneux discontinu et suivre sa dynamique en liaison avec les unités topo-édaphiques et les conditions climatiques et anthropiques qui affectent le milieu. Cette méthode utilise à la fois, les données spectrales et les informations morphologiques contenues dans l'image satellitaire.

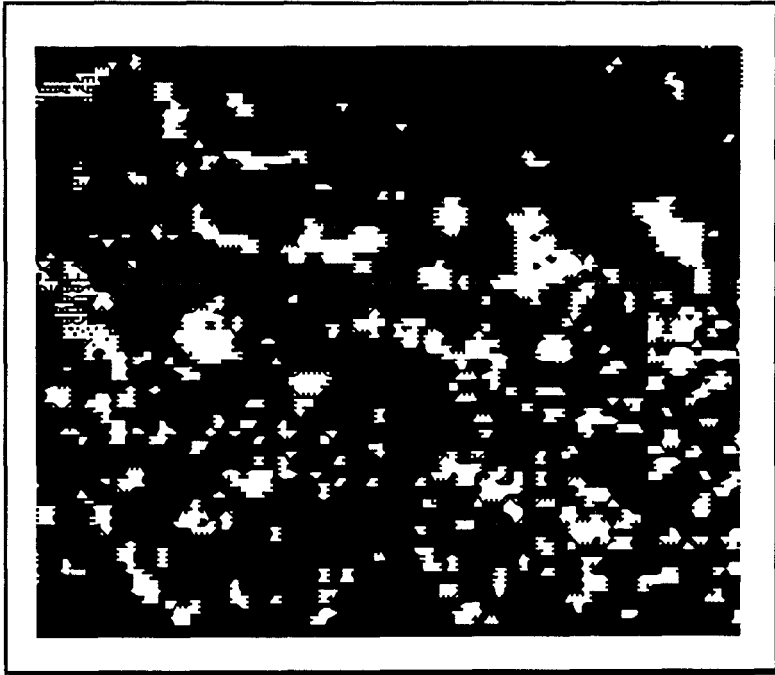


Figure 11: brousse mouchetée et des espaces interdunaires

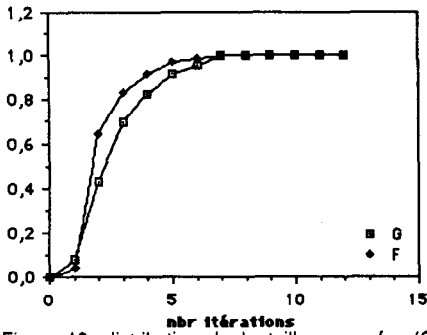


Figure 12: distribution de la taille en surface(G) et en nombre(F)

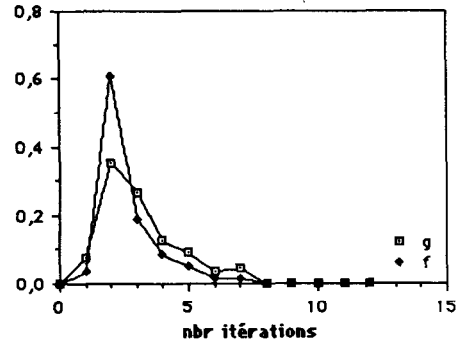


Figure 13: densité granulométrique en surface(g) et en nombre(f)

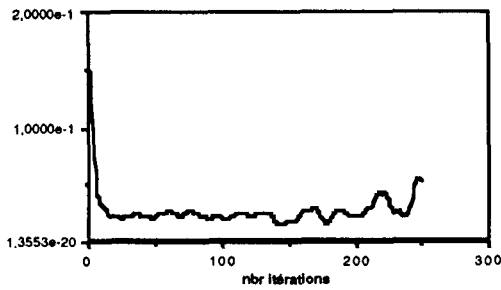


Figure 14: covariogramme

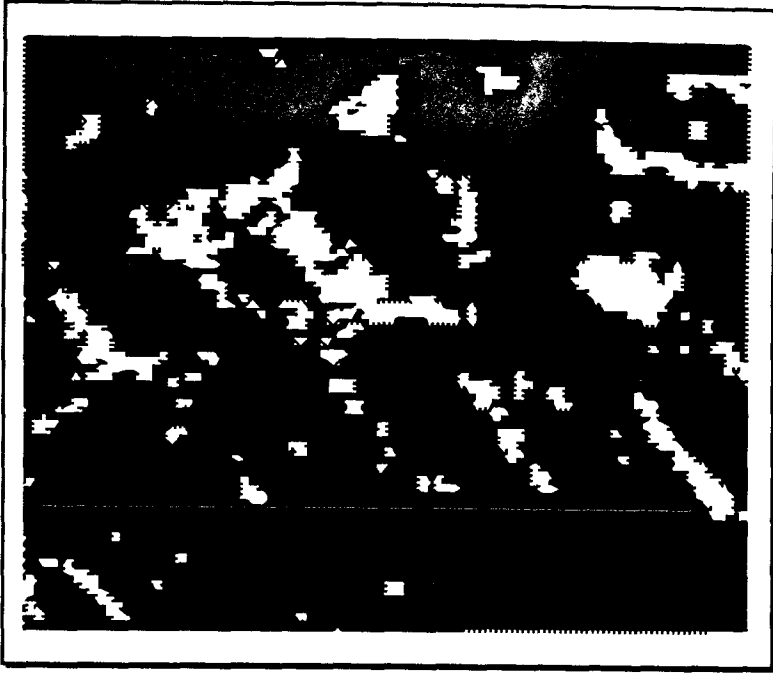


Figure 15: gros agrégats des espaces interdunaires

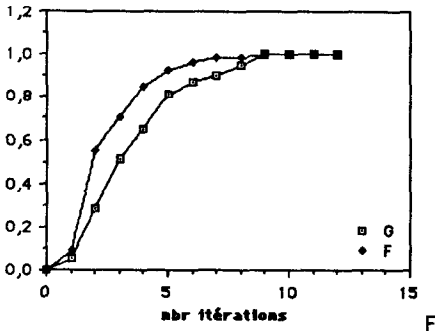


Figure 16: distribution de la taille en surface(G) et en nombre(F)

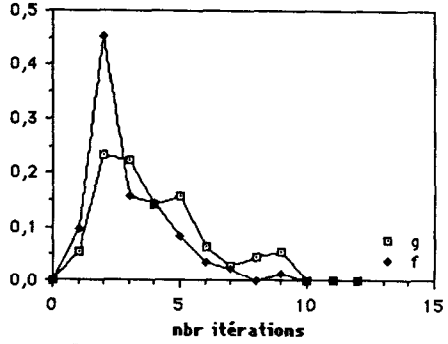


Figure 17: densité granulométrique en surface(g) et en nombre(f)

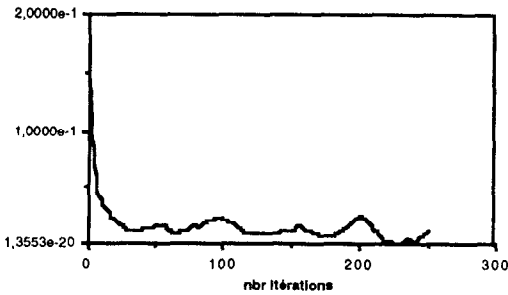


Figure 18: covariogramme

BIBLIOGRAPHIE

- BARRAL H., 1977_ Les populations nomades de l'Oudalan et leur espace pastoral. Travaux et documents de l'ORSTOM n°77, 119 p.
- CELEUX G., LECHEVALLIER Y., 1982_ Méthodes de segmentation non paramétrique. Revue de statistique appliquée, vol. XXX, n°4, pp39-53
- COSTER M., CHERMANT J.L., 1985_ Précis d'analyse d'images. Editions du C.N.R.S., Paris, 521 p.
- COUREL M.F., 1984_ Etude de l'évolution récente des milieux Sahéliens à partir des mesures fournies par les satellites. Thèse de doctorat d'Etat, Paris I, 407 p.
- MERING C., PONCET Y., JACQUEMINET C., RAKOTO-RAVALONTSALAMA M., 1987_ Quantitative description of dénudation forms in the western African Sahel. Advances space research, 7(3), Pergamon Press, London, pp31-39
- MERING C., JACQUEMINET C., 1988_ Use of SPOT satellite images for inventory and follow-up of ligneous resources in the Sahel. Proceedings of the 22th E.R.I.M. symposium for remote sensing, october 20-26, 1988, Abidjan, 15 p. (à paraître)
- SERRA J., 1982_ Image analysis and mathematical morphology. Academic Press, London, 610 p.

**EXTRACTION DE RESEAUX LINEAIRES
A PARTIR DES IMAGES SPOT. EXEMPLE PRIS
DANS UNE REGION SEMI-ARIDE :
LE NORD-OUEST DE L'INDE**

Françoise DEBAINE

I. PROBLEMATIQUE GEO-ARCHEOLOGIQUE

Cette étude a été conduite dans le cadre d'une prospection géo-archéologique menée depuis 1983 dans la zone sub-aride du nord-ouest de l'Inde, dans l'Etat d'Haryana (fig. 1), par l'UPR n°315 du CNRS ("Archéologie de l'Asie centrale") et par l'Archaeological Survey of India. Cette prospection, à laquelle coopèrent des chercheurs appartenant à plusieurs disciplines, l'archéologie, la géographie, la géologie, a pour objectif général la reconstitution de l'histoire du peuplement, de son implantation agricole et en particulier, de ses rapports avec les ressources en eau (Francfort, 1985).

Une démarche méthodologique fondée sur l'exploitation des données satellitaires est développée depuis 1985, en collaboration avec l'Unité de Télédétection et l'UR 3J du Département MAA de l'ORSTOM. Commencée avec des images Landsat MSS (Debaine, Mering, Poncet, 1988), l'étude se poursuit depuis novembre 1987 sur des données multispectrales Spot. L'analyse de ces images doit permettre de préciser les liens existant entre les traces de paléo-écoulements naturels, les vestiges d'irrigations anciennes et l'occupation humaine marquée par la présence d'une forte concentration de sites archéologiques protohistoriques et historiques.

La période protohistorique (3ème - 2ème millénaire) est celle de la civilisation de l'Indus (ou harappéenne) qui a connu un développement considérable, comparable à celui de la Mésopotamie ancienne. Cette période est suivie de siècles mal connus qui précèdent la phase de l'histoire ancienne (5ème siècle avant J.-C. - 8ème siècle après J.-C.), marquée principalement par quelques dynasties célèbres, celle des Mauryas et celle des Kouchans, puis des Guptas. L'avènement des dynasties musulmanes marque le début du moyen-âge que l'on étire jusqu'au dernier Moghol, au 18ème siècle.

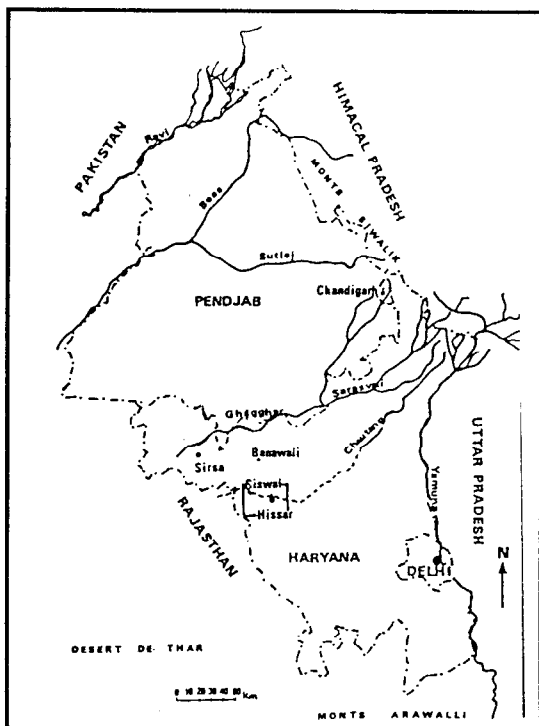


Figure 1 Situation de la région étudiée dans le N. - O. de l'Inde

Le problème de la mise en valeur de la région se pose depuis les années 1940-1950. Les variations du peuplement dans le temps et dans l'espace ont jusqu'à présent été mises en relation avec les perturbations du réseau hydrographique, les variations de régime et les divagations de grands cours d'eau issus de l'Himalaya, cours d'eau aujourd'hui asséchés et dont les traces apparaissent très distinctement sur les images satellitaires Landsat et Spot.

De nouvelles données apportées par trois campagnes de terrain effectuées au Rajasthan et en Haryana par la Mission Archéologique Française en Inde (collaboration entre l'UPR n°315 et l'Arch. Surv. of India) ont conduit à la remise en question de ces théories. Les résultats de l'étude sédimentologique permettent en effet d'affirmer que ces puissantes rivières s'écoulaient à la fin de la période glaciaire, mais se sont asséchées progressivement alors que les conditions climatiques devenaient semi-arides. Ces cours d'eau ne pouvaient donc en aucun cas assurer à l'époque protohistorique, époque des premiers établissements humains importants, un approvisionnement en eau permanent de la région (Francfort éd., pp. 11-31). Les sites archéologiques que l'on trouve dans la plaine, sites dont la taille révèle l'existence de moyens économiques relativement importants devaient cependant bénéficier d'un apport d'eau régulier et abondant. L'étude des graines retrouvées dans les échantillons de sols prélevés sur les sites protohistoriques montre par ailleurs une abondance de céréales d'hiver qu'il n'est possible d'expliquer que par un apport d'eau artificiel après la mousson, les conditions climatiques étant, nous l'avons dit, à peu près identiques à ce qu'elles sont actuellement, aucun indice ne validant l'hypothèse d'une augmentation significative des précipitations à l'époque protohistorique, comme cela a été souvent suggéré.

Dans ces conditions, la question qui se pose est de savoir si des réseaux d'irrigation n'auraient pas existé dans cette région du nord-ouest de l'Inde dès le 3ème millénaire.

Certains indices permettent déjà d'étayer cette hypothèse. Comment expliquer en effet, compte tenu du milieu, la dispersion d'un grand nombre de sites archéologiques loin des bords des rivières asséchées et hors des limites des zones inondables par ces mêmes rivières (Francfort, 1985, pp.55-65), sinon par l'existence d'une autre source d'approvisionnement en eau ? Les caractères pédologiques des sols enterrés sous les sites protohistoriques attestent dans plusieurs cas la mise en valeur de ces sols par l'irrigation. Mais de quel type d'irrigation s'agissait-il : d'inondations dirigées avec une accumulation saisonnière des eaux de pluie visant à les préserver tout au long de la saison sèche ? ou bien d'un système plus évolué comparable au système actuel et à ceux qui existaient en Mésopotamie ou en Asie Centrale à la même époque ?

C'est à cette étape de la recherche que les données satellitaires sont apparues comme susceptibles d'apporter de nouvelles données.

II. L'APPORT DES IMAGES SATELLITAIRES

Nous ne possédons pas, pour le moment, de preuves de l'existence de systèmes d'irrigation à l'époque protohistorique. Ces preuves seraient bien sûr apportées par la découverte de canaux datables de façon fiable, mais les prospections de terrain se sont sur ce point révélées infructueuses. Trop partielles, à des échelles inadéquates, les données fournies par les moyens d'investigation classiques tels que les cartes, les documents d'archives ou le terrain sont très souvent inutilisables. En l'absence des photographies aériennes (non diffusées aux étrangers), les images satellitaires fournissent des informations que nous ne pourrions donc obtenir autrement.

Notre objectif est, par des traitements numériques, de mettre en évidence des linéaments interprétables comme étant des chenaux d'écoulement artificiels, de connaître leur forme, leur tracé, leur extension à l'échelle locale et régionale, et de rechercher si ces traces constituent un réseau identifiable.

Des vestiges de canaux d'irrigation datant du moyen-âge et du 19ème siècle, souvent connus par ailleurs grâce aux cartes anciennes et aux textes persans ou britanniques, ont été découverts en surface. Ils sont révélés par la présence de levées sableuses, vestiges des sédiments évacués d'année en année lors des curages (Francfort éd, 1985, pp. 39-41). Ces levées sont plus ou moins arasées selon l'ampleur des bouleversements qui ont affecté le milieu depuis l'abandon du canal (mise en culture intensive, nouvelles irrigations, nivellements) ou selon le type de construction de celui-ci (présence ou absence de terrassement). Un canal de ce type a pu être mis en évidence à la suite du traitement d'une image Landsat MSS (Debaine, Mering, Poncet, 1988). Il était intéressant d'essayer de mettre ces tracés en évidence, même s'il s'agit de vestiges d'époques plus récentes car ils peuvent être les indicateurs d'états antérieurs de l'occupation du sol. Il existe en effet une certaine permanence des tracés, les plus anciens ayant été fréquemment réutilisés, après des périodes d'abandon plus ou moins longues. Des coupes profondes ont permis de mettre en évidence la superposition de vestiges de chenaux d'écoulements entre des buttes de déblais (Francfort éd., 1985, pp. 37-41).

Pour la période historique ancienne, des canaux (datables par la thermoluminescence, grâce à des tessons de poteries, ont été observés sur des coupes de sédiments, enfouis dans une dépression à fort alluvionnement. Mais, dans la plupart des cas, tant pour la protohistoire que pour l'histoire, les niveaux des sols des sites d'implantation anciens montrent une faible sédimentation et par conséquent un enfouissement peu important (50 cm à 1 mètre). Cette faible épaisseur des sédiments post-dépositionnels rend pertinente la quête de canaux d'irrigation anciens, même protohistoriques, en particulier lorsque la région n'a pas été trop remaniée par des mises en cultures récentes. Les paléo-chenaux naturels ne doivent pas non plus être ignorés : tracés privilégiés des écoulements, ils ont été parfois réaménagés à des fins d'irrigation.

Notre objectif est ainsi de mettre en évidence sur les images satellitaires les canaux d'irrigation anciens, quel que soit leur âge, aucun critère ne permettant d'ailleurs de les dater d'après les images, et les chenaux d'écoulement naturels, quelle que soit leur taille (largeur, longueur).

Le manque d'informations concernant la signature spectrale spécifique de ces différents objets nous a conduit à adopter dans un premier temps des méthodes de traitement d'image exploitant les informations relatives à leur forme. En effet, si nous admettons aisément que les canaux d'irrigation ont toujours la même forme, il n'en va pas de même de leur signature spectrale qui peut être totalement différente selon l'époque considérée, ou varier à l'intérieur d'une même époque. Le seul critère de reconnaissance fiable et robuste que nous ayons est donc d'ordre morphologique : les canaux d'irrigation anciens sont linéaires, parfois discontinus, la rectilinéarité caractérisant plutôt les canaux actuels ou récents, les sinuosités des canaux anciens ou des chenaux naturels.

Cette démarche implique la prise en considération, au départ, de l'ensemble des linéaments, c'est-à-dire des canaux anciens, mais aussi des canaux actuels et des voies de communication (routes, chemins, et voies ferrées), ainsi que les linéaments naturels, les accumulations sableuses de forme linéaire notamment. Ces réseaux n'ayant pas de signature spectrale spécifique et stable, ils ne peuvent être éliminés *a priori*. Comment différencier en effet, si l'on ne tient compte que de l'information spectrale, un canal du 19^{ème} siècle abandonné, révélé par des levées sableuses, d'un canal actuel à sec, comme cela arrive à certaines période de l'année, ou encore d'un chemin ? Comment différencier un canal très ancien, d'accumulations sableuses naturelles ? Nous avons préféré ne pas réduire l'information *a priori* et extraire l'ensemble des linéaments, indépendamment de leur orientation, de leur taille (largeur, longueur), de leur signature spectrale, de leur voisinage et de leur âge, indépendamment de tout élément suggérant une interprétation fonctionnelle. Celle-ci n'intervient qu'une fois mis en évidence les linéaments présents sur l'ensemble de l'image. Les voies de communication, les canaux d'irrigation actuels sont rapidement identifiés par une comparaison de l'image traitée aux cartes topographiques au 1/50000^{ème} datant des années 1950 - 1960. Des cartes topographiques anglaises plus anciennes, dites au quarter inch (1/253 000^{ème} environ) et au one inch (1/63 000^{ème} environ), sont parfois utilisées, pour identifier des réseaux d'irrigation aujourd'hui abandonnés, datant du début du 20^{ème} siècle, voire de la fin du 19^{ème} siècle. Nous espérons ainsi faire apparaître les traces de vestiges plus anciens de l'occupation du sol et les mettre ultérieurement en relation avec les observations de terrain. Dans une première phase d'identification de ces traces linéaires non reconnues, l'étude des formes fournit des informations particulièrement intéressantes et permet, avant le parcours sur le terrain et avant de pouvoir interpréter de façon parfaitement fiable la réponse spectrale des objets, d'établir une

typologie.

Par l'étude de la forme, nous entendons non seulement la caractérisation de la géométrie des objets étudiés, par exemple leur longueur, leur largeur, leur surface, mais aussi celle des structures, leur répétitivité, la distribution de la taille des éléments qui les composent ou leur plus ou moins grande dispersion. Cette étude comprend aussi l'analyse de l'environnement des objets et de leur voisinage, qui peut être défini par la présence ou l'absence d'autres objets, et par la mesure des distances les séparant.

Ainsi, l'étude de chacun des linéaments mis en évidence et celle de leur positionnement les uns par rapport aux autres ou par rapport à d'autres éléments constitutifs du paysage et de l'image, les canaux et les réservoirs d'eau actuels, les villages, les sites archéologiques, les lits - reliques, les dunes, par rapport à la topographie ou aux sols, conduisent à une première discrimination et parfois même à une interprétation fiable de ces objets. C'est en suivant cette approche, en étudiant les linéaments individuellement, mais aussi et surtout en tant qu'éléments constitutifs d'un système ayant une logique propre, et dont les composantes sont à envisager dans leur rapport de localisation et de fonctions réciproques, qu'il est possible de tirer des enseignements intégrables dans une explication générale du peuplement de la région.

Les données qui auront été extraites et vérifiées sur le terrain seront ensuite intégrées au corpus des connaissances géo-archéologiques. Il faudra en particulier ajouter une dimension temporelle précise aux informations obtenues à partir des images satellitaires, chaque élément du système ayant une chronologie et une dynamique propre. Cela reviendra à mettre en relation les sites ou groupes de sites datés et décrits avec les réseaux qui leur sont associés et à dater ces réseaux afin d'obtenir une restitution diachronique des aménagements régionaux successifs.

III. LE TRAITEMENT DES IMAGES

Nous avons envisagé la mise en évidence et une première discrimination de l'ensemble des linéaments présents sur l'image à partir de critères tels que la forme, la structure et le voisinage. Nous exploitons l'ensemble de ces informations en utilisant les outils et les concepts de l'analyse quantitative d'image, en particulier ceux de la Morphologie Mathématique (Serra, 1982). Cette méthode n'est pas fondée sur les valeurs prises par un pixel donné de l'image. Elle prend en compte les notions de structures spatiales de l'image : les objets sont considérés comme des ensembles de pixels et l'on peut ainsi étudier leur forme et les relations qui existent entre eux.

Les transformations morphologiques binaires et en teintes de gris permettent de rendre compte de la forme des objets par référence à un modèle géométrique simple, de forme parfaitement définie, appelé "élément structurant" et qui peut être, par exemple, selon le type d'information recherché, un segment, un hexagone, etc. Il est possible grâce à ces outils de mesurer les objets étudiés : mesure de longueur, de surface, évaluation du nombre de connexités ou de trous. Il est possible également d'en étudier la structure, de mesurer les distances qui les séparent et d'approcher ainsi, de façon quantifiée, leur voisinage. Il s'agit d'adapter l'ensemble de ces outils à la recherche des linéaments et de produire des séquences de traitement d'images en fonction de l'objectif thématique tel qu'il a été défini.

Les procédures de transformation de l'image que nous présentons ici ont pour but la mise en évidence des linéaments, leur rehaussement et leur extraction. Cette opération consiste à les isoler du reste de l'image de façon à ce qu'ils apparaissent sur un fond rendu homogène. Une analyse quantitative des paramètres caractérisant les linéaments (taille, connexité, structure, voisinage), ne peut être envisagée en effet que lorsque tous les autres composants de l'image ont été éliminés. La perte d'information qui en résulte est largement compensée par la possibilité de quantifier l'information.

Les procédures mises au point ont été testées sur des parties de l'image de 256×256 pixels¹, choisies pour leur richesse en linéaments artificiels (routes, chemins, canaux d'irrigation) et naturels (traces de paléo-écoulements) (fig.9). La validation des résultats a été effectuée à l'aide des cartes au 1/50 000° et des relevés de terrain.

III.1. Les transformations morphologiques de base

Nous présentons rapidement et de façon très schématique les effets des transformations de base que nous avons utilisées ; on trouvera dans les ouvrages concernant l'analyse d'image leurs définitions et leurs propriétés mathématiques (Serra, 1982).

Lorsque ces transformations morphologiques sont appliquées à des images binaires (images dont les pixels prennent la valeur 0 ou 1), les objets sont considérés comme des ensembles sur un fond.

La dilatation a pour effet d'augmenter la surface des ensembles, de connecter les parties disjointes et de lisser les contours (fig.2). L'érosion binaire, au contraire, entraîne la réduction de la surface des ensembles ; elle en lisse également les contours (fig.3).

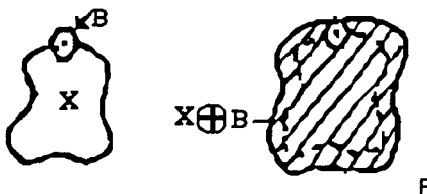


Figure 2- Dilatation binaire



Figure 3- Erosion binaire

Les transformations morphologiques sont aussi appliquées à la fonction en teintes de gris (FTG). Cette dernière peut être assimilée à un relief, chaque pixel étant caractérisé non par une altitude, mais par une teinte de gris.

On peut alors considérer que les valeurs maximales sont des "pics", et les valeurs minimales des "vallées". Ainsi, la dilatation de la fonction en teintes de gris a pour effet d'élargir les "pics" et de combler les "vallées" (les zones de valeurs maximales s'étendent et les zones de valeurs minimales diminuent) (fig.4).

¹ La trame originale (carrée) a été convertie en une trame hexagonale afin de pouvoir utiliser un élément structurant symétrique tel que l'hexagone.

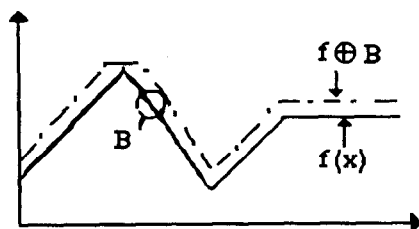


Figure 4 Dilatation de la FTG

L'érosion en revanche, élargit les "vallées" et abaisse les "pics" (les zones de valeurs minimales s'étendent et les zones de valeurs maximales diminuent) (fig.5).

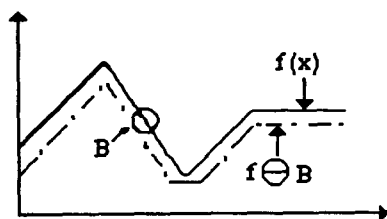


Figure 5 Érosion de la FTG

La fermeture est la combinaison de ces deux transformations : c'est une dilatation suivie d'une érosion. Elle n'a pas d'effet sur les "pics", mais comble les "vallées". Ainsi, les petites zones sombres disparaissent (fig.6).

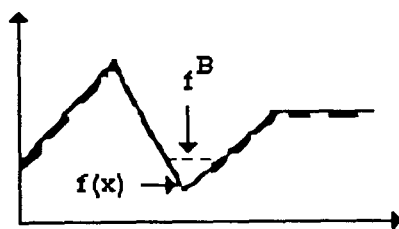


Figure 6 Fermeture de la FTG

Le chapeau-haut-de-forme enfin, est un filtre morphologique qui extrait les "vallées" de la fonction par soustraction de l'image originale à l'image fermée (fig.7).

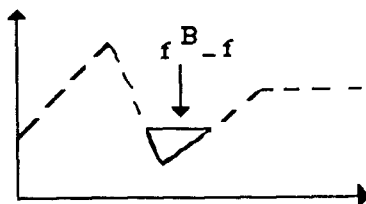


Figure 7 Chapeau-haut-de-forme

III.2. Séquence de mise en évidence de linéaments

Les transformations morphologiques sont ici appliquées à la première composante principale obtenue après transformation de Karhunen Loeve. Nous recherchons en effet une image qui maximise les contrastes radiométriques dans les trois bandes spectrales. Les deuxième et la troisième composante sont intéressantes car elles apportent une information supplémentaire en discriminant certains linéaments entre eux, routes et canaux d'irrigation par exemple (la deuxième composante) ou réseaux naturels et réseaux artificiels (la troisième composante). Mais l'information est cependant toujours partielle et certains linéaments disparaissent. Sur la première composante, l'ensemble des linéaments est plus nettement perceptible que sur les canaux bruts et puisque en un premier temps, nous ne voulons en ignorer aucun, nous l'avons choisie comme image de base des transformations morphologiques.

Sur cette image, (fig.8) l'ensemble des linéaments est caractérisé par les valeurs basses de la fonction en teintes de gris. Il était donc souhaitable d'effectuer une série de fermetures par des segments de droites, dont les orientations varient, puisque nous n'avons pas d'*a priori* sur l'orientation des linéaments que nous voulons mettre en évidence.



Figure. 8 Première composante principale

Nous avons donc pratiqué six fermetures avec un segment de taille 2 dans les trois directions dites de la trame (0° , 60° , 120°) et dans les trois directions dites conjuguées (30° , 90° , 150°). Ces fermetures ont pour effet d'éliminer les ensembles de forme linéaire ou sub-linéaire et de teinte sombre, dans chacune des orientations.

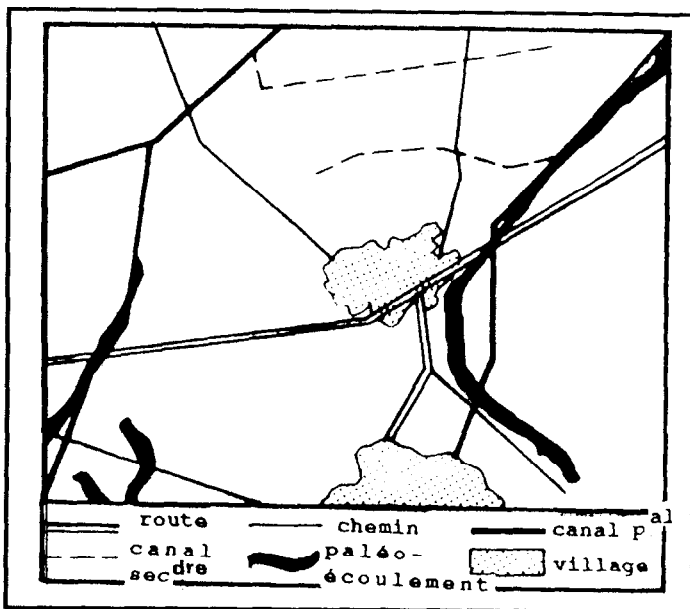


Figure 9 Différents types de linéaments

Ces ensembles ont ensuite été filtrés par soustraction de l'image originale aux six images fermées : nous effectuons une série de six chapeau-haut-de-forme. Selon l'orientation de l'élément structurant, seuls certains linéaments ou certaines parties de linéaments sont restitués (fig.10,11). Les plus épais ont été mis en évidence, mais le filtrage n'a pas permis d'éliminer les ensembles non linéaires.

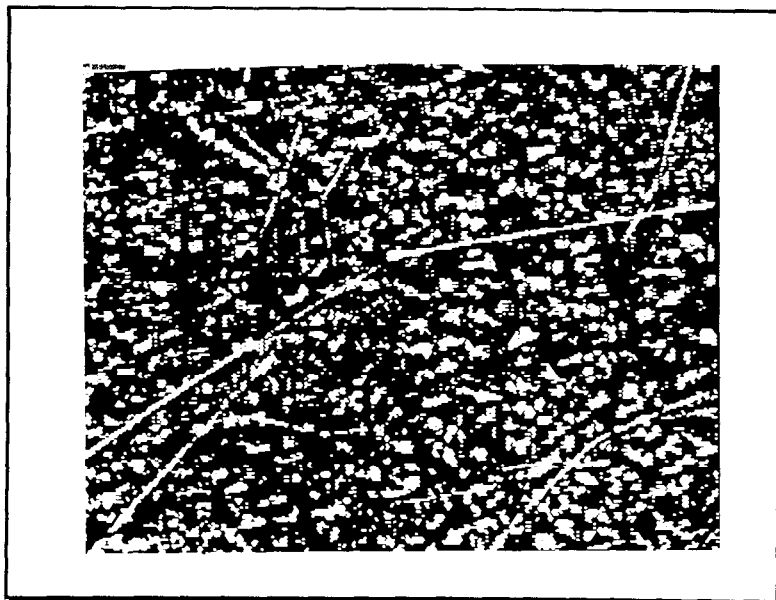


Figure 10 Chapeau -haut -de -forme (90°) sur Fig 8

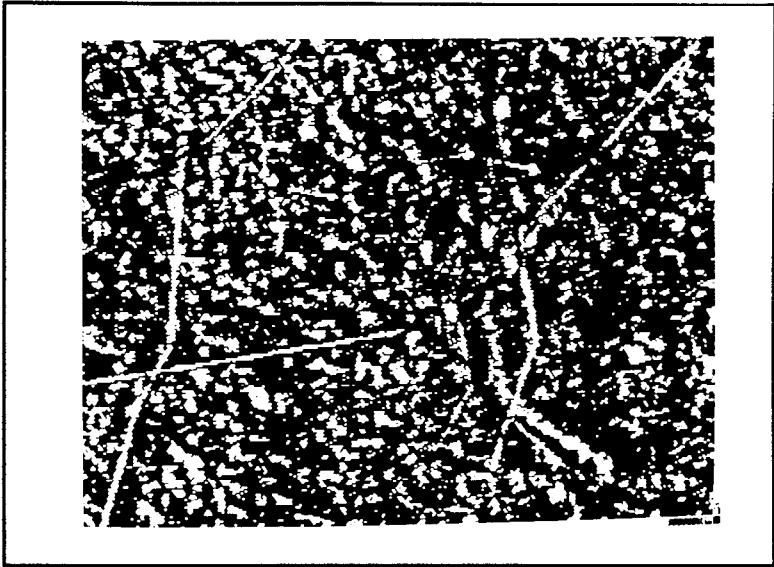


Figure 11 *Chapeau -haut -de-forme (30°) sur fig 8*

III.3. Séquence d'extraction des linéaments

Avec la méthode de reconstruction des composantes connexes, nous avons essayé d'obtenir une image contenant uniquement les linéaments sur un fond uniforme.

III.3.1. Seuillage

Les images transformées par le filtre chapeau-haut-de-forme sont d'abord binarisées. Nous avons tenté de résoudre le problème du seuillage de la manière suivante : nous recherchons le seuil qui délimite le plus grand nombre de linéaments proportionnellement à la surface totale de l'image binaire correspondante.

$$R_L(g) = \frac{N_L(g)}{A(g)}$$

$N_L(g)$: nombre de configurations linéaires pour le niveau de gris g

$A(g)$: surface de l'ensemble obtenu pour le niveau de gris g

Pour chaque seuil possible, c'est-à-dire pour tous les niveaux de gris g , nous avons évalué le ratio R_L entre le nombre de configurations linéaires sur l'image et la surface totale. L'idée est de sélectionner le seuil qui maximise ce ratio. Les configurations linéaires sont estimées par des configurations numériques particulières à l'intérieur de l'hexagone pour chacune des douze directions. Nous assimilons, par exemple, une configuration linéaire horizontale (0°) aux configurations numériques suivantes :

$$\begin{array}{cccccc} 0 & 0 & & 0 & 0 & \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & & 1 & 1 & \end{array}$$

La figure 14 montre la variation du ratio sur une image en teintes de gris, le chapeau-haut-de-forme (90°). On voit qu'il y a un très petit nombre de seuils possibles, quatre dans ce cas.

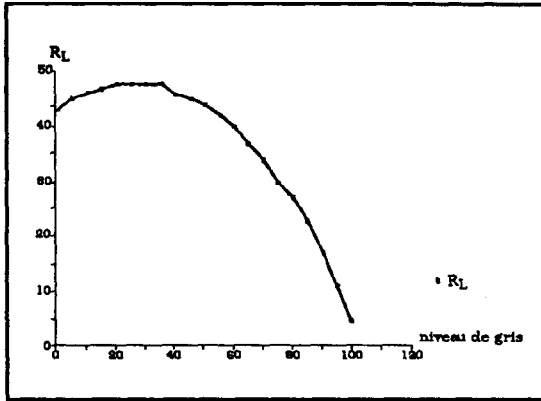


Figure 12 Variation du Ratio R_L

III.3.2. Extraction

L'extraction des linéaments sur les images ainsi binarisées s'effectue en plusieurs étapes. Il s'agit d'appliquer aux images l'algorithme de reconstitution qui se traduit par la séquence de transformations morphologiques suivantes:

$$X_1 = X_0 \ominus B$$

$$X_2 = (X_1 \oplus B) \cap X_0$$

$$X_n = (X_{n-1} \oplus B) \cap X_0$$

Les images binaires sont assimilées à un ensemble X_0 , B est un élément structurant hexagonal.

La première transformation X_1 est une érosion. Elle permet d'éliminer les ensembles isolés dont la taille est inférieure à celle de l'élément structurant, ici, un hexagone de taille 2 (Fig. 13).



Figure 13 Erosion sur Chapeau - haut - de - forme (150°)

Les composantes connexes qui n'ont pas été éliminées par l'érosion sont reconstruites par une séquence de dilations ayant pour effet d'augmenter la surface des ensembles et d'en connecter les parties disjointes. Les linéaments ne sont pas dilatés au-delà de leur taille initiale puisque l'on effectue l'intersection de l'ensemble dilaté $X_1 \oplus B$ et de l'ensemble initial X_0 . L'opération est itérée n fois jusqu'à ce que l'image ne soit plus modifiée.

Cette méthode permet de ne reconstruire que les composantes connexes de taille supérieure à celle de l'élément structurant.

L'algorithme est appliqué aux six images chapeau-haut-de-forme. Les linéaments sont ainsi extraits dans chacune des six directions.

Nous faisons ensuite la réunion des trois images reconstruites pour les trois directions de la trame et pour les trois directions conjuguées, le meilleur résultat étant obtenu avec ces dernières.

L'image obtenue restitue l'ensemble des linéaments, mais contient encore, en petit nombre, des ensembles isolés. On calcule alors le diamètre géodésique de chaque composante.

Soit deux points x_1 , x_2 d'un ensemble X , une ligne géodésique x_1, x_2 correspond au plus petit parcours entre x_1 et x_2 , complètement inclus dans X . Le diamètre géodésique correspond à la valeur maximale des distances géodésiques entre deux points quelconques de X .

On élimine, par seuillage les ensembles ayant des petits diamètres géodésiques. Sur l'image, ne demeurent que les ensembles ayant une longueur suffisante, pouvant être assimilés à des linéaments (fig. 14).

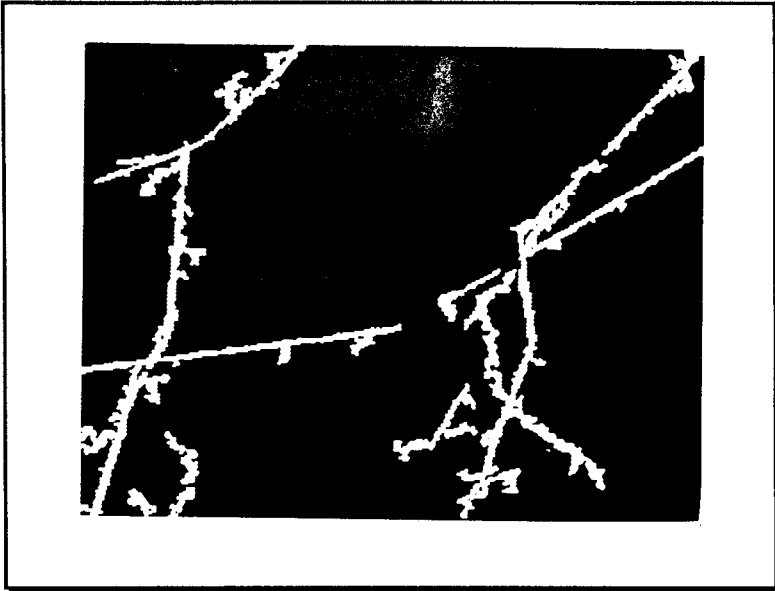


Figure 14 Reconstruction

IV. RESULTATS ET CONCLUSION

Les cinq linéaments principaux, c'est-à-dire les plus épais : des routes bitumées, et des canaux d'irrigation actuels, portés sur la carte topographique au 1/50 000°, ont été correctement extraits (fig.9,14). Lorsque les linéaments ne sont pas distincts de l'environnement (c'est généralement le cas lorsqu'ils traversent des villages), des trous apparaissent dans leur tracé.

Les réseaux linéaires très fins, correspondant sur le terrain à des routes ou à des canaux très étroits, de largeur inférieure à cinq mètres, ont été éliminés par l'érosion. Ils étaient perceptibles sur l'image de base, l'oeil parvenant à reconstituer la continuité de ces linéaments. Trois d'entre eux sur cinq ont pu être mis en évidence à la suite de la transformation chapeau-haut-de-forme, mais ils sont trop fins, trop discontinus ou trop peu contrastés par rapport à leur voisinage pour être extraits par la méthode de reconstruction des composantes connexes.

Ces séquences de transformations morphologiques ont permis en revanche la mise en évidence et l'extraction de linéaments peu perceptibles sur l'image de base et très difficilement repérables sur le terrain. Il s'agit de dépressions de faible profondeur (inférieure à 3 m), de 200 à 300 m de large, parfois révélées par des différences de couleurs du sol entre le fond, sombre (sols limono-sableux) et les bords, plus clairs (fortes proportions de carbonates, kankars). Les observations, coupes transversales et prélèvements d'échantillons, faites *in situ* permettent de penser qu'il s'agit de chenaux d'écoulement naturels aménagés par l'homme à des fins d'irrigation. Ils pourront être datés grâce à une étude pédologique et micromorphologique complémentaire. Une étude approfondie de ces chenaux est en cours ; ils seront notamment mis en relation avec la distribution des sites archéologiques de différentes époques.

La méthode que nous avons utilisée et testée sur plusieurs sous-zones de l'image Spot se révèle donc efficace compte tenu des objectifs que nous nous sommes fixés, à savoir, la mise en évidence et l'extraction, en vue d'une analyse quantitative, de linéaments artificiels et naturels.

Cette méthode sera appliquée à d'autres images, les données panchromatiques de Spot, qui avec une résolution spatiale de 10 x 10 mètres seront encore plus adaptées à la recherche de linéaments fins et à d'autres scènes. Nous étudierons en particulier une région plus aride (le nord-est pakistanais) qui n'a pas été bouleversée par des mises en culture récentes, ce qui rend la recherche de traces d'irrigation anciennes plus aisée. L'effort méthodologique enfin, portera notamment sur le traitement des linéaments fins.

BIBLIOGRAPHIE

- COSTER (M.), CHERMANT (J.-L.), 1985, Précis d'analyse d'images , Editions du CNRS, Paris.
- DEBAINE (F.), MERING (C.), PONCET (Y.), 1988, "La morphologie mathématique en teintes de gris appliquée à la mise en évidence de réseaux", Photo-interprétation, Images Aériennes et Spatiales, 5/2, Technip.
- DEBAINE (F.), MERING (C.), PONCET (Y.), 1988, "Traitements d'image spatiale appliqués à la recherche archéologique : mise en évidence de réseaux en Inde du Nord", Cahiers de l'ORSTOM, Sciences Humaines , 24 (3).
- MERING (C.), DEBAINE (F.), 1988, "Analysis of satellite image applied to archaeological research in north-west India : delimitation of linear networks", Proceedings of the Ninth Asian Conference on Remote Sensing , 23-29 Nov., ACRS, Bangkok, pp. B-2-1 - B-2-8.
- FRANCFORT (H.-P.) éd., 1985, Prospections archéologiques au nord-ouest de l'Inde. Rapport préliminaire 1983-1984 (travaux de la Mission Archéologique Française en Inde n°1), Editions Recherche sur les Civilisations, Paris, "Mémoire" n°62.
- FRANCFORT (H.-P.), 1988, "Le développement protohistorique du Bassin de la Ghagghar (Nord-Ouest de l'Inde), L'Asie centrale et ses rapports avec les civilisations orientales des origines à l'Age du Fer , Actes du colloque franco-soviétique, Paris, 16-17 novembre 1985, Mémoires de la mission archéologique française en Asie centrale, tome 1, Diffusion de Boccard, pp.109-117.
- SERRA (J.), 1982, Image Analysis and mathematical morphology, Academic Press, New-York.

DECOMPOSITION DE COURBES DIGITALISEES EN SEGMENTS DE DROITES (POUR LE SUIVI DES RESEAUX LINEAIRES SUR LES IMAGES SPOT)

Isabelle DESTIVAL - Hervé Le MEN

RESUME

Reconnaître si un arc digital est ou non la représentation exacte d'une droite de l'espace continu ou effectuer la décomposition d'un arc en segments de droites sont des problèmes quotidiens pour les habitués de l'analyse d'image.

Après avoir rappelé l'intérêt de ce problème dans diverses applications, et plus spécifiquement pour l'étude des réseaux linéaires sur des images SPOT, nous ferons un petit historique bibliographique des recherches sur le sujet. Nous indiquerons les procédés habituellement utilisés en production (basés sur la propriété de la corde), avec leurs limitations.

Puis, nous présenterons les propriétés permettant de caractériser une droite à partir du codage de la chaîne et de l'explicitation des critères de Freeman et nous indiquerons un algorithme correspondant.

En conclusion, nous donnerons les raisons pour lesquelles nous avons choisi cette procédure et les perspectives d'application de cette méthode.

I. INTRODUCTION

Les méthodes d'analyse des images de télédétection se rapprochent aujourd'hui des méthodes utilisées dans d'autres domaines comme la robotique ou l'analyse de scène. En effet, avec les hautes résolutions, nous n'étudions plus seulement des pixels (en analysant leur radiométrie); nous sommes amenés à définir des ensembles de pixels qui ont une signification thématique. Ces ensembles peuvent être identifiés par la caractérisation de leur structure ou de leur forme et l'on procède alors à une élévation

symbolique de l'information.

En télédétection comme dans d'autres applications, il y a deux types d'objets qui nécessitent des méthodes d'analyse différentes : les objets surfaciques et les objets linéaires.

Dans le second cas, il est clair que l'on manipule rapidement des chaînes (listes de points). Pour effectuer un suivi de réseau routier ou ferroviaire à partir d'une image SPOT, on utilise les données provenant de la chaîne de traitement suivante: image originale → image des lignes de crête de la fonction de gris → image seuillée → squelette → suivi d'arcs (passage en mode vecteur) \mathcal{A} décomposition des arcs en "segments" de droites →

définition des objets "arcs" portant les attributs :

longueur
direction moyenne
nombre de segments
liste des longueurs des segments
liste des directions

On a donc besoin d'effectuer la décomposition d'un arc en segments de droites.

En ce qui concerne l'analyse des surfaces après une segmentation d'image, on caractérise souvent un objet par son contour et l'analyse de la forme peut passer par la représentation du contour en mode vecteur puis en liste de segments de droites.

II. HISTORIQUE

En 1970, Freeman formula trois propriétés devant être vérifiées par une droite digitale [FREEMAN 70] , [PAVLIDIS 77] :

- **C1**: Il existe au plus deux directions de base (directions de la trame) et elles sont **consécutives** (leurs codes, au sens défini en 4.1 , différent seulement de 1 modulo 8).
- **C2**: L'une de ces deux valeurs apparaît toujours seule.
- **C3**: Les apparitions successives de cette valeur **isolée** sont réparties de la façon la plus uniforme possible.

Ce troisième critère est quelque peu flou, et toutes ces propriétés nécessitent une preuve mathématique.

En 1974, Rosenfeld démontre qu'un arc digital est un segment de droite si et seulement si il possède la propriété de la corde [ROSENFELD 74]. Il prouve alors les deux premiers critères de Freeman et des propriétés de régularité sur la chaîne codée donnant une description du troisième critère de Freeman. Ces propriétés avaient aussi la forme d'un modèle "consécutif-isolé" (en Anglais: "consecutive-singly pattern").

Brons, en 1974, puis Arcelli et Massarotti, en 1975 et 1978, se limitèrent au cas d'une droite de pente rationnelle. Brons montra que les droites digitales ont une structure hiérarchique.

En 1980, Wu donna une expression exacte au troisième critère en étendant le modèle "consécutif-isolé" à tous les niveaux de la hiérarchie, ceci pour des pentes même irrationnelles [WU 80]. En 1982, il prouva que les trois critères

constituent aussi une condition suffisante pour la présence d'une droite et donna un algorithme simple pour reconnaître une droite par le code de sa chaîne [WU 82].

En 1985, Hung donna une nouvelle condition nécessaire et suffisante que nous appellerons en Français "absence d'irrégularités" ("absence of unevenness") et donna un algorithme pour la détection de "segments irréguliers" ("uneven segments"), ceci nécessitant seulement l'examen du premier niveau de la hiérarchie [HUNG 85].

En 1986, Wu a démontré que l'ensemble des codes de chaînes représentant des droites digitales (langage sur $\{0,1,2,3,4,5,6,7\}$) est un langage dépendant du contexte ("context-sensitive language") [WU 86].

III. ALGORITHMES COURAMMENT UTILISES (PROPRIETE DE LA CORDE)

III.1. Quelques définitions

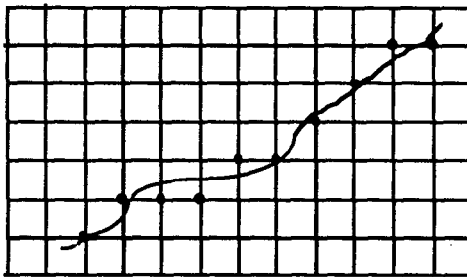


Fig. 1.a

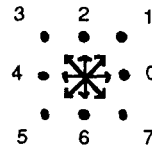


Fig. 1.b

- Digitalisation (ou numérisation) d'une courbe (fig.1.a): si l'on superpose à la courbe continue la grille de la trame, lorsque la courbe intersecte soit une ligne soit une colonne, on conserve alors le point de la grille le plus proche. s'il y a deux points à égale distance, on conserve celui de plus faible valeur.

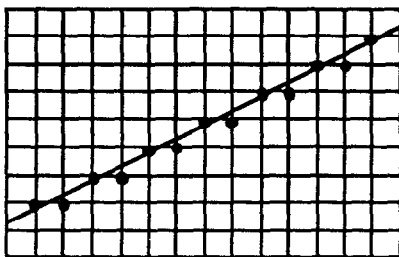
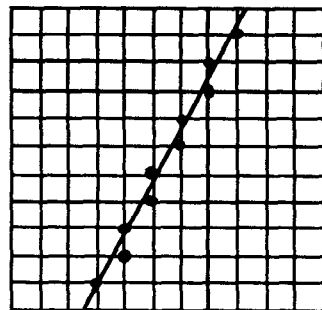


Fig. 2

pente < 1 ↑



pente > 1 →

- Cas particulier: digitalisation d'une droite: on distingue deux cas selon que la pente est inférieure ou supérieure à 1 (fig.2): on définit la suite de points (x_i, y_i) de $i=1$ à L par:

$$\text{si } |a| \leq 1 : \begin{cases} X_i = i \\ Y_i = \text{Nint}(a \cdot x_i + b) \end{cases}$$

$$\text{et si } |a| > 1 : \begin{cases} X_i = \text{Nint}\left(\frac{Y_i - b}{a}\right) \\ Y_i = i \end{cases}$$

- Un arc (*digital*) est donc une suite $(M_i)_{i \in I}$ de couples de N^2 , avec I intervalle de N , tels que $d(M_i, M_{i+1}) = 1$ (d : distance du sup.).
- Un segment est une sous-suite $(M_k)_{k \in K}$ avec K intervalle de N inclus dans I .
- Un arc (*resp. un segment*) sera dit *rectiligne* s'il correspond à la numérisation d'une droite.
- Un segment unitaire est constitué par deux points successifs d'un arc digital.
- longueur d'un arc: c'est le nombre de segments unitaires.

III.2. Propriété de la corde

La propriété de la corde s'exprime comme suit : Un arc digital A possède la propriété de la corde si

$\forall c, d \in A, \forall p=(x, y) \in \overline{cd}, \exists e=(h, k) \in A : \max\{|x-h|, |y-k|\} < 1$, où \overline{cd} est le segment de droite compris entre les points c et d .

- ♦ La propriété rigoureuse de la corde ne permet pas une implémentation pratique raisonnable. On en applique en général des approximations heuristiques qui visent à vérifier que tous les points de l'arc digital ne s'éloignent pas trop de la corde qui joint les pixels extrémités de l'arc.

Soit L la longueur de l'arc A ; A sera considéré comme un segment de droite si les points M_2 à M_{L-1} sont "proches" de la droite réelle joignant les points M_1 et M_L .

Si on entend par "proche" une distance inférieure ou égale à 0.5, alors la condition est suffisante mais non nécessaire. Pour une distance plus grande, la condition n'est plus suffisante.

- ♦ Le problème de la décomposition consiste à trouver la plus grande valeur d telle que les points M_1 à M_d soient alignés; puis recommencer à partir du point M_d jusqu'à épuisement des deux points. Ceci peut s'envisager de deux manières:

- la recherche en avant:

Si le segment $[1, n]$ correspond à une droite, alors tester si le point $n+1$ appartient à cette droite. Avec cette méthode, il est nécessaire d'utiliser une distance au moins égale à 1, sinon, on ne trouve comme droites que les axes et les diagonales principaux. Mais une distance de 1 n'est pas assez sélective.

- la recherche en arrière:

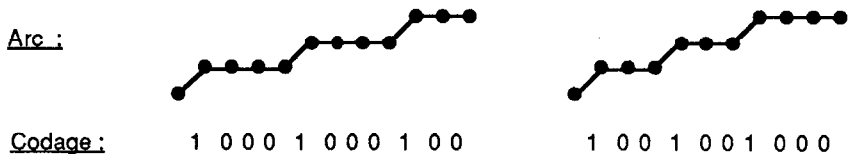
On trace la droite entre les points 1 et L (si L est la longueur de l'arc); s'il existe un point s'en écartant de plus de 1 pixel, on essaie la droite $[1, (L-1)]$, etc... jusqu'à ce que l'on tombe sur une droite et on a alors le premier segment. On recommence alors à partir du point suivant ce segment pour trouver le deuxième, etc... Lorsque le premier segment est court, ou lorsque les segments sont nombreux, cette méthode est très longue car on aura balayé presque tous les points de l'arc pour trouver le premier segment et ainsi de suite. On a donc recours à un moyen classique pour accélérer l'algorithme: *La recherche en arrière par dichotomies successives*: comme précédemment, on part de $[1, L]$, mais s'il y a échec sur une droite, au lieu de prendre $[1, L-1]$, on prend $[1, L/2]$. S'il y a à nouveau échec (dans ce cas, on a gagné du temps à ne pas examiner tous les points intermédiaires : $L-1, L-2, \dots, (L/2)+1$), on passe à $L/4$. Si au contraire on trouve une droite, c'est qu'on a dépassé l'extrémité du premier segment et on retourne en $3L/4$ (d'où le compromis du choix de $L/2$).

IV. CODAGE DE CHAINES ET CRITERES DE FREEMAN

IV.1. Définition

- *Codage de chaîne (ou codage de Freeman)*: c'est la liste des directions (codées selon fig. 1.b) des segments unitaires.

Exemples:



On a supposé que les arcs étaient orientés de la gauche vers la droite; dans le cas contraire, on a : 4 4 5 4 4 4 5 4 4 5 et 4 4 4 5 4 4 5 4 4 5 .

IV.2. Critère de Wu

On doit d'abord définir l'opération de dérivation de chaînes qui, appliquée de façon itérative, va constituer la hiérarchie que nous avons déjà mentionnée (§ 2.).

Pour pouvoir définir cette dérivée, il faut que la chaîne vérifie les deux premiers critères de Freeman C1 et C2 (modèle consécutif-isolé). On dérive alors la chaîne en laissant tomber le motif isolé et en remplaçant les suites de l'autre motif par leur longueur. On obtient alors une nouvelle chaîne constituée de nouveaux motifs. Si cette chaîne vérifie le modèle consécutif-isolé, on pourra elle aussi la dériver, etc...

nota: dans le calcul, on pourra toujours ramener une chaîne vérifiant le modèle consécutif-isolé à une chaîne de 0 et de 1 en remplaçant par convention le motif isolé par 1 et l'autre par 0 (ce qui revient à une rotation et/ou symétrisation de l'arc).

Exemple:

chaîne codée 1 00 10 10 10 10 00 1 01 01 01 00 10 10 10 0

1^{er} niveau 2 1 1 1 2 1 1 1 2 1 1 2

2^{ème} niveau 3 3 2

3^{ème} niveau 2

Critère de Wu: Si le modèle consécutif-isolé est vérifié à tous les niveaux de la hiérarchie, alors l'arc est rectiligne. (c'est le cas dans l'exemple précédent).

On peut aussi le formuler ainsi:

Si la chaîne est infiniment dérivable, alors l'arc est rectiligne.

Cette condition est suffisante mais pas encore nécessaire : la chaîne suivante ne la vérifie pas, et pourtant, il s'agit bien d'une droite (on pourra le vérifier par le critère de Hung, Cf. 4.3):

1 0 1 0 0 1 0 0 1 0 1 0

2 2 1 1 : pas de motif isolé.

Ce problème ne se pose que lorsque, à un certain niveau de la hiérarchie, l'un des deux bouts correspond au minimum strict des deux longueurs présentes sur le motif non isolé; ici, ceci se produit dès la chaîne de départ:

1 0 1 0 0 1 0 0 1 0 1 0

Pour régler ce cas, Wu a modifié légèrement le calcul de la dérivée: il suffit de traiter les bords en supprimant ceux qui sont dans ce cas avant dérivation.

Le critère de Wu devient alors une condition nécessaire et suffisante. On présente l'algorithme correspondant en 4.4.

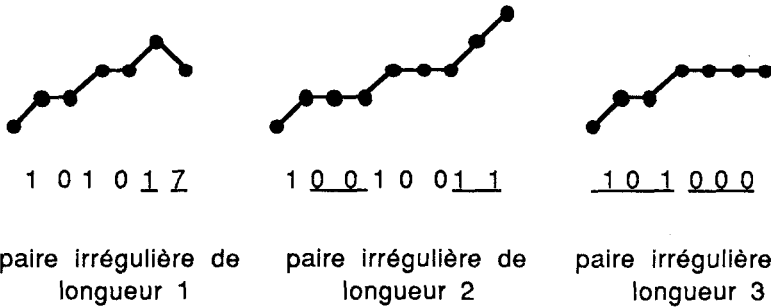
IV.3. Critère de Hung

C'est la propriété d' "absence d'irrégularités". On doit ici définir les segments irréguliers.

On appelle somme d'un segment la somme des valeurs de ses symboles (les symboles étant les codes de Freeman). Par exemple, le segment 2 3 2 a pour somme 7.

On dit alors que deux segments de longueurs égales sont irréguliers si leurs sommes diffèrent d'au moins 2; on parle alors aussi de paire irrégulière : "uneven pair".

Exemple:



On voit aisément que la présence de paires irrégulières minimales de longueur 1 correspond à la violation du premier critère de Freeman ("consécutif"); pour la longueur 2, c'est le non respect du deuxième critère ("isolé"), les longueurs 3 et 4 correspondent respectivement aux deux critères sur la première dérivée, puis ce seront les deux critères dans les dérivées suivantes...

Critère de Hung: un arc digital est rectiligne si et seulement si le code de la chaîne ne comporte aucune paire irrégulière.

L'examen des paires irrégulières à toutes les longueurs remplace ici la construction d'une hiérarchie. Si nous nous reportons à la figure 3, nous constatons qu'il est impossible de construire une paire irrégulière sur la chaîne d'origine. Il s'agit donc d'une droite.

IV.4. Algorithme

Donnons d'abord les raisons pour lesquelles nous avons choisi le critère de Wu:

- il est plus performant que celui de Hung qui est proche de $O(n^2)$, alors que celui de Wu est en $O(n)$.
- il est plus rigoureux que les approximations de la corde : il y a séparation entre la généralisation et la projection.
- pour la décomposition d'un arc en segments de droites: en cas d'ambiguïté sur l'appartenance des points pivots à un segment ou à l'autre, le Critère de Wu permet une gestion heuristique plus aisée.
- Au paragraphe 3, on a formulé une condition parfois suffisante pour qu'un arc soit la représentation exacte de la droite joignant le centre de ses deux pixels extrémités, M_1 et M_L . Cependant, il existe des cas où un arc est la digitalisation d'une droite qui ne passe pas par les centres de ses extrémités. Ces propriétés rejettent un tel arc rectiligne alors que le critère de Wu le reconnaît.

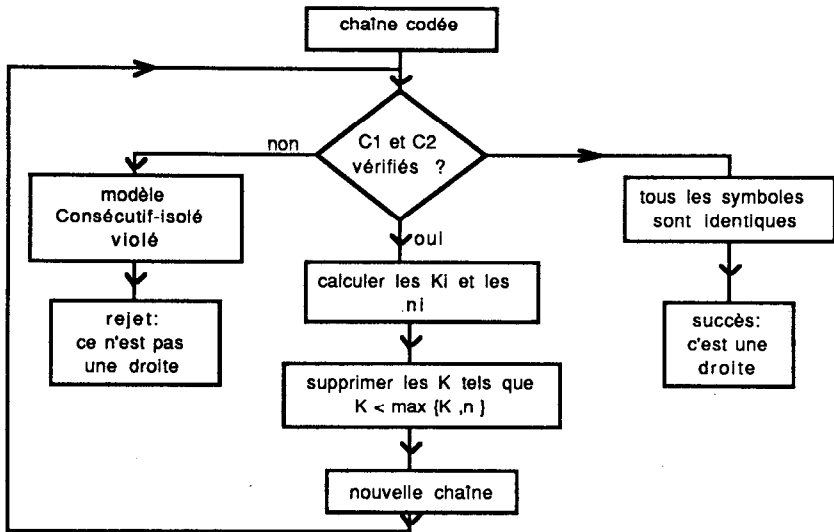
l'algorithme:

Définissons d'abord les symboles K_i et n_i qui vont servir à la dérivation. Ce sont les résultats de comptage des paquets du symbole non isolé.

Une chaîne dérivable peut donc s'écrire de la façon suivante:

$$0 \dots 0, 1, 0 \dots 0, 1, 0 \dots 0, 1, \dots, 1, 0 \dots 0, 1, 0 \dots 0$$

$$K_1, n_1, n_2, \dots, n_p, K_2$$



V. CONCLUSION, PERSPECTIVES

Les éléments linéaires sont les éléments de base pour l'interprétation automatique d'un réseau (routier par exemple), i.e. ce sont eux qui portent les premiers éléments d'*information topologique*.

La décomposition en segments de droites est indispensable pour le chaînage d'arcs détectés : pour le suivi des routes, on a besoin de connaître les dernières portions rectilignes d'un arc afin d'établir des critères de *prolongation* "intelligents" (dépendant du contexte); pour les frontières de zones, on en a besoin lors des opérations de *fermeture* de zones. Cette décomposition permet également de reconnaître les *ormes* usuelles du parcellaire agricole (les parcelles sont des unions de convexes à côtés parallèles).

On voit donc que cette phase est le prélude à une élévation du niveau de complexité des objets manipulés: ceci est utile à trois niveaux:

- pour l'interprétation automatique
- pour la reconnaissance automatique
- pour la généralisation automatique.

(En cartographie, on appelle généralisation tout problème obéissant à des règles pré-définies et faisant intervenir des décisions, comme: des déplacements d'objets pour une meilleure lisibilité, des sélections à opérer lors de changement d'échelle, etc...).

La décomposition en segments de droites est donc un préalable indispensable pour l'introduction dans un système expert.

VI. BIBLIOGRAPHIE

- FREEMAN H., "Boundary encoding and processing". Picture Processing and Psychopictorics, B.S. Lipkin and A. Rosenfeld, Eds. New York: Academic, 1970, pp. 241-266.[FREEMAN 70]
- ROSENFELD A., "Digital straight line segments". IEEE Trans. Computer, vol. C-23, pp.1264-1269, 1974.[ROSENFELD 74]
- PAVLIDIS T., "Structural Pattern Recognition". New York: Springer-Verlag, 1977.[PAVLIDIS 77]
- WU L., "On the Freeman's conjecture about the chain code of a line". Proc. 6th Int. Conf. Pattern Recognition, Miami 1980, pp.32-34.[WU 80]
- WU L., "On the chain code of a line". IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell., vol. PAMI-4, pp. 347-353.[WU 82]
- HUNG S., "On the straightness of digital arcs". IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell., vol. PAMI-7, pp. 203-215.[HUNG 85]
- WU L., WENG F., "Chain code for a line segment and formal language". Proc. 8th Int. Conf. Pattern Recognition, Paris 1986, p.1124.[WU 86]

METHODES DE SEGMENTATION AUTOMATIQUE D'IMAGE

Mamy RAKOTO-RAVALONTSALAMA

INTRODUCTION

La segmentation automatique d'image est une discipline déjà ancienne, qui date des premiers temps de la robotique. Il ne s'agissait alors que d'extraire et, éventuellement, de reconnaître des formes géométriques simples sur un fond uni.

En télédétection, les premiers efforts ont été axés surtout sur l'automatisation des classifications radiométriques. Avec l'avènement des capteurs à haute résolution (HRV, Thematic Mapper), des petits objets deviennent discernables et mettent en échec les classifications traditionnelles.

Il est donc préférable de regrouper les pixels en régions homogènes ou vérifiant un certain critère (que ce soit radiométrique ou textural), et ensuite de classer les régions obtenues.

I. DEFINITIONS

Soit X une image discrétisée :

Nous appellerons région connexe de X un sous-ensemble de X , noté Y tel que quels que soient x et y appartenant à Y , il existe une suite de pixels connexes conduisant de x à y .

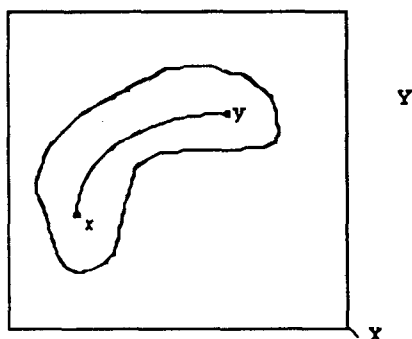


Figure 1 Définition d'une région connexe

Nous appellerons régions connexes adjacentes deux régions Y_1 et Y_2 si et seulement si $Y = Y_1 \cup Y_2$ est connexe.

La connexité choisie ici est la connexité-4.

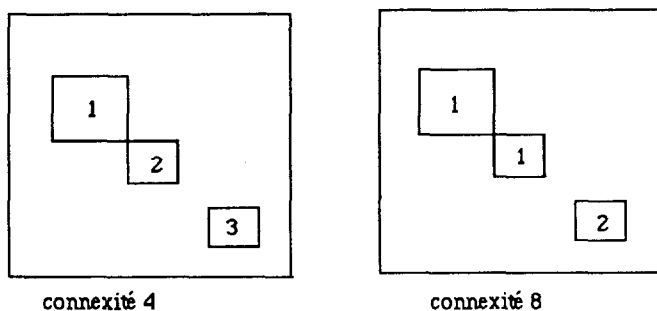


Figure 2 Connexité 4 et Connexité 8

II. PRETRAITEMENT

Il est impensable d'appliquer un algorithme de segmentation automatique sur une image brute (canal original, indice, etc..) sans un traitement préalable. En effet, suivant la complexité de l'image, on arriverait facilement à plusieurs milliers de régions qu'on pourrait difficilement caractériser et on reviendrait au cas des classifications radiométriques comprenant des semis de pixels.

Il convient donc de lisser l'image, mais pas n'importe comment.

Un lissage par la moyenne est simple à réaliser, mais a l'inconvénient de lisser aussi les transitions.

Une alternative est l'utilisation des filtres morphologiques (succession et combinaison d'ouvertures, de fermetures et de filtres médians de différentes tailles). Malheureusement, à un type d' image donné correspond une procédure donnée et la généralisation est difficile.

Il existe d'autres lissages, mais dans la littérature, celui qui est le plus souvent cité est le filtre de NAGAO.

A partir d'un voisinage 5 x 5, on calcule 9 moyennes et 9 variances correspondant au découpage en 8 secteurs et un carré central de 3 x 3.

Le pixel résultant est égal à la moyenne correspondant à la plus faible variance.

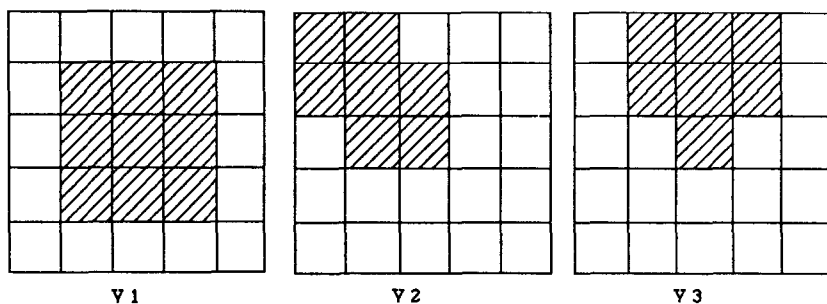


Figure 3 Voisinages pour NAGAO

Le lissage se fait donc dans la direction où la modification est moins visible. C'est pour cela que le filtre de NAGAO est qualifié de lissage avec conservation des contours. (Images 1 et 2 page 257, 258)

On s'aperçoit que le filtre de NAGAO est presque idempotent, c'est-à-dire qu'au bout de quelques itérations, l'image ne se modifie presque plus. (Image 3 page 259)

III. METHODE TOPOLOGIQUE

Elle est basée sur le postulat suivant : tous les pixels de la même zone sont entourés par la même boucle du gradient. Il s'agit donc d'une propriété topologique, qualitative.

Le gradient peut se calculer par l'un des innombrables opérateurs différentiels existants (Sobel, Robinson, etc...).

L'étape suivante est la squelettisation en teintes de gris. Il s'agit d'extraire les lignes de crête en appliquant des amincissements successifs (figure 4) jusqu'à convergence.

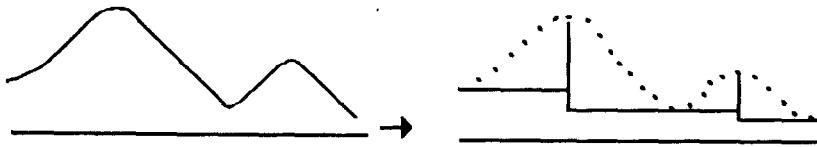


Figure 4 Squelettisation en teinte de gris (vue de profil)

La ligne de crête peut alors être extraite par un chapeau haut-de-forme (figure 5).



Figure 5 Extraction ligne de crête (vue de profil)

Un ébarbulage (figure 6) élimine les lignes qui ne forment pas de boucle.

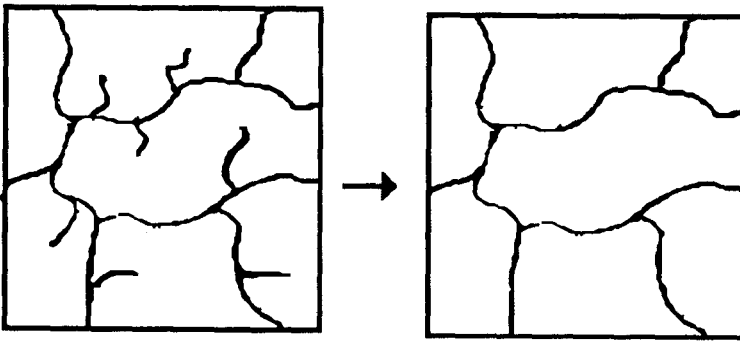


Figure 6 Ebarbulage

Il reste alors à étiqueter le complémentaire du gradient (figure 7).

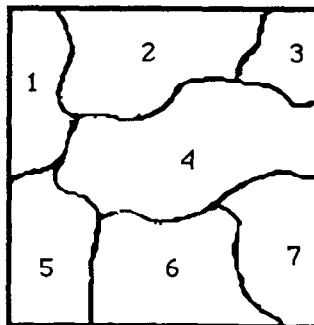


Figure 7 Etiquetage

L'inconvénient de cette méthode est son instabilité. En effet, il suffit qu'il y ait un "trou" dans le gradient pour que deux régions se rejoignent. Il faut donc vérifier avant l'ébarbulage si de telles lacunes existent et les combler.

IV. MÉTHODE FORMELLE

Dans son ouvrage "Structural Pattern Recognition", PAVLIDIS propose une définition formelle de la segmentation et des algorithmes correspondants. La segmentation est basée sur la notion de prédicat, qui est une propriété que doit vérifier chaque région. Soit une région Y, Il existe plusieurs prédicats possibles:

$$P1(Y) : x \in Y, y \in Y, f(x) = f(y)$$

On décompose donc l'image en régions correspondant à des pixels de même valeur. Ce ne peut être qu'une étape avant un regroupement.

$$P2(Y) : x \in Y, y \in Y, |f(x)-f(y)| < s, \text{ où } s \text{ est un seuil donné}$$

Le choix du seuil est évidemment primordial: trop grand, on obtient des régions grossières, trop petit, on obtient trop de régions.

Il existe d'autres prédicats (Ex : variance < s) mais le prédicat P2 est le plus simple à mettre en oeuvre.

Le prédicat étant choisi, la segmentation est définie comme suit:

Soit un ensemble X, une partition $\{X_1, \dots, X_n\}$ est une segmentation pour le prédicat P si:

- a) $\cup X_i = X$
- b) Chaque X_i est connexe
- c) Le prédicat P est vrai pour chaque X_i
- d) Le prédicat P est faux pour la réunion de deux régions adjacentes

Dans un but de classification, la quatrième propriété n'est pas importante.

La segmentation comprend deux étapes

SPLIT : On part de l'image initiale, que l'on subdivise en carrés élémentaires vérifiant chacun le prédicat P.

L'image doit être carrée et de dimension N, où N est une puissance de 2.

On construit une image des régions de même taille, qu'on initialise à 1.

Tant qu'il existe une région qui ne vérifie pas le prédicat, on la subdivise en 4, et ainsi de suite.

A cette étape, on vérifie donc les propriétés 1, 2 et 3

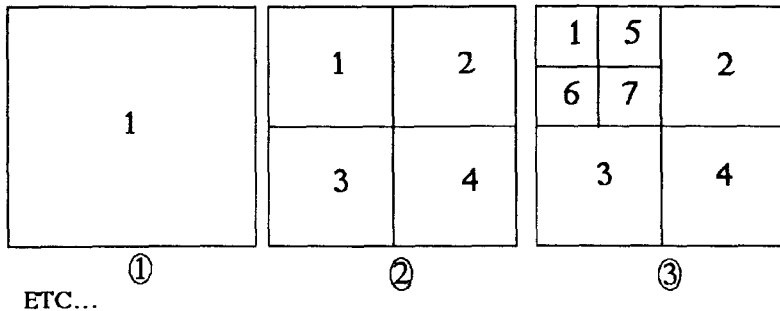


Figure 8 Etapes de SPLIT

MERGE : On part des régions ainsi construites et on vérifie si deux régions adjacentes peuvent être fusionnées ou pas.

Si une segmentation vérifie les quatre propriétés, cela ne veut pas dire qu'elle est unique. En effet, l'ordre dans lequel les régions sont fusionnées détermine la segmentation finale.

V. IMPLEMENTATION DE LA MÉTHODE FORMELLE

L'application à la lettre de l'algorithme ne donne pas des résultats satisfaisants, les régions obtenues étant trop géométriques. Ceci vient du fait que la règle de fusion est trop restrictive. Il convient donc de modifier légèrement cette règle :

"On fusionne deux régions adjacentes si la différence entre leurs moyennes est inférieure à un autre seuil donné".

Cette fusion se fait itérativement : soit SF le seuil de fusion,

- on fusionne les régions adjacentes / différence des moyennes < 1
- on fusionne les régions adjacentes / différence des moyennes < 2
- etc ...
- on fusionne les régions adjacentes / différence des moyennes $< SF$.

On peut aussi passer outre la condition de taille. Il suffit de choisir des nombres de lignes et de colonnes multiples de 8 par exemple, et d'initialiser la segmentation en petits carrés de 8 x 8 au lieu de partir de l'image entière. La dernière étape consiste à remplacer chaque région par sa moyenne. (Image 4 page 260)

CONCLUSION

On peut concevoir une autre méthode qui combinerait les deux méthodes précédentes, c'est-à-dire introduire une condition sur le gradient dans le prédicat.

La méthode formelle peut être utilisée pour une segmentation par la texture, uniquement en utilisant pour prédicat une condition sur un indice de texture, si cet indice peut être calculé sur une région de forme quelconque.

BIBLIOGRAPHIE

T. PAVLIDIS : "Structural Pattern Recognition" Springer-Verlag . Berlin Heidelberg New York 1977

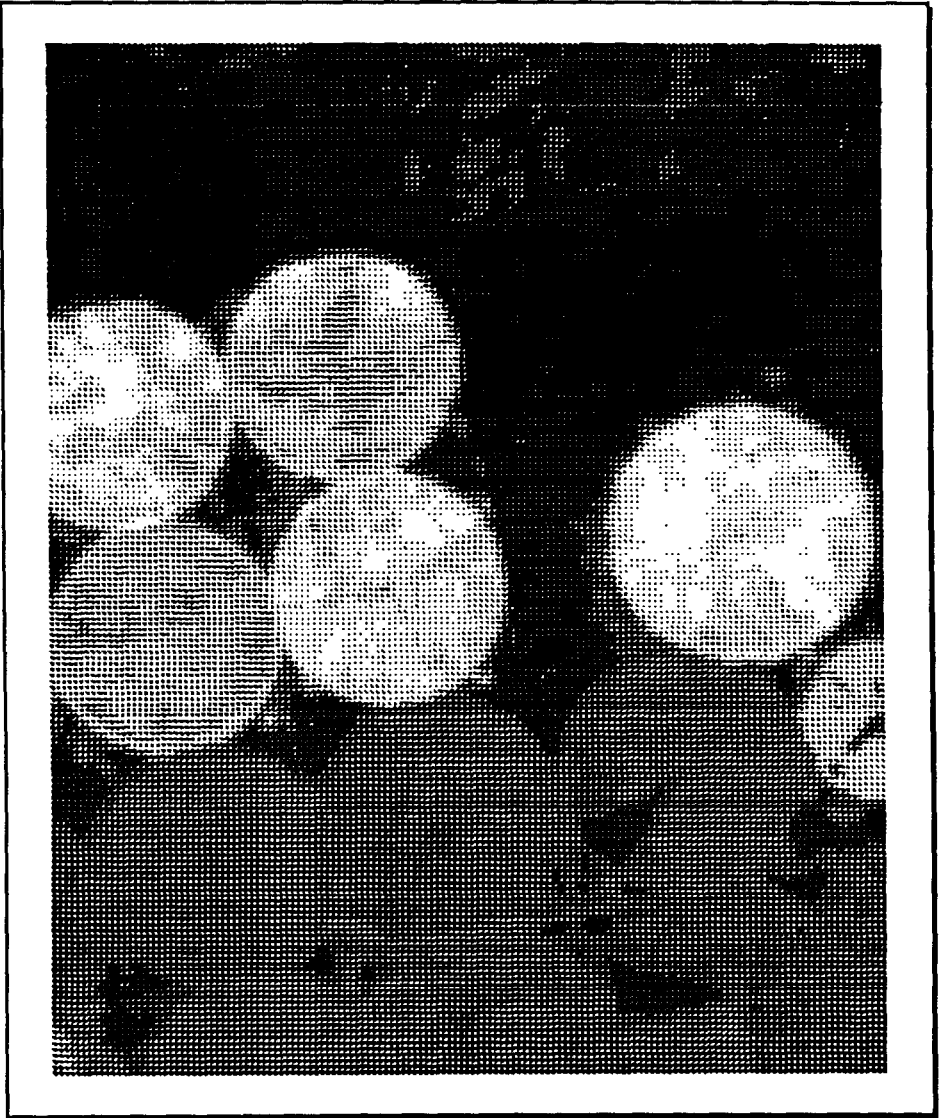


Image 1: Image originale

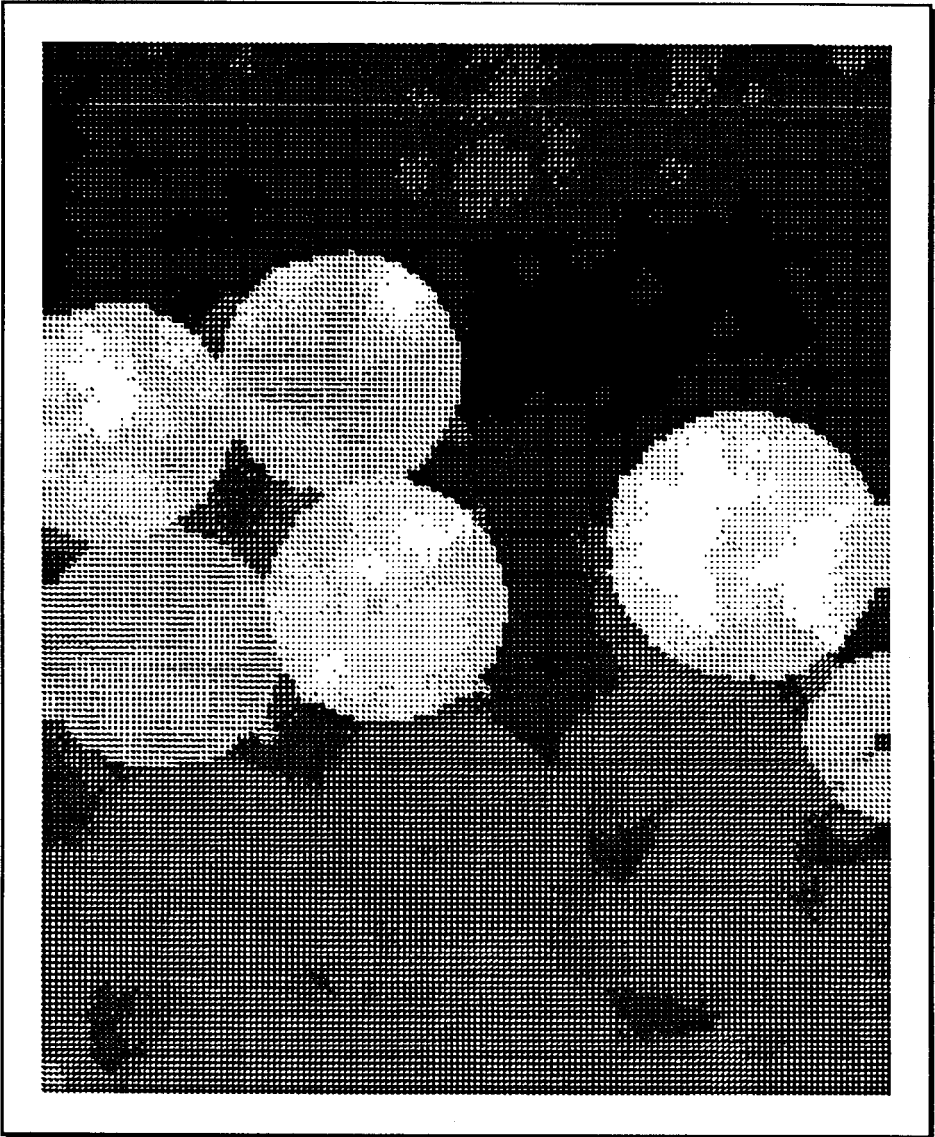


Image 2: Premier passage nagao

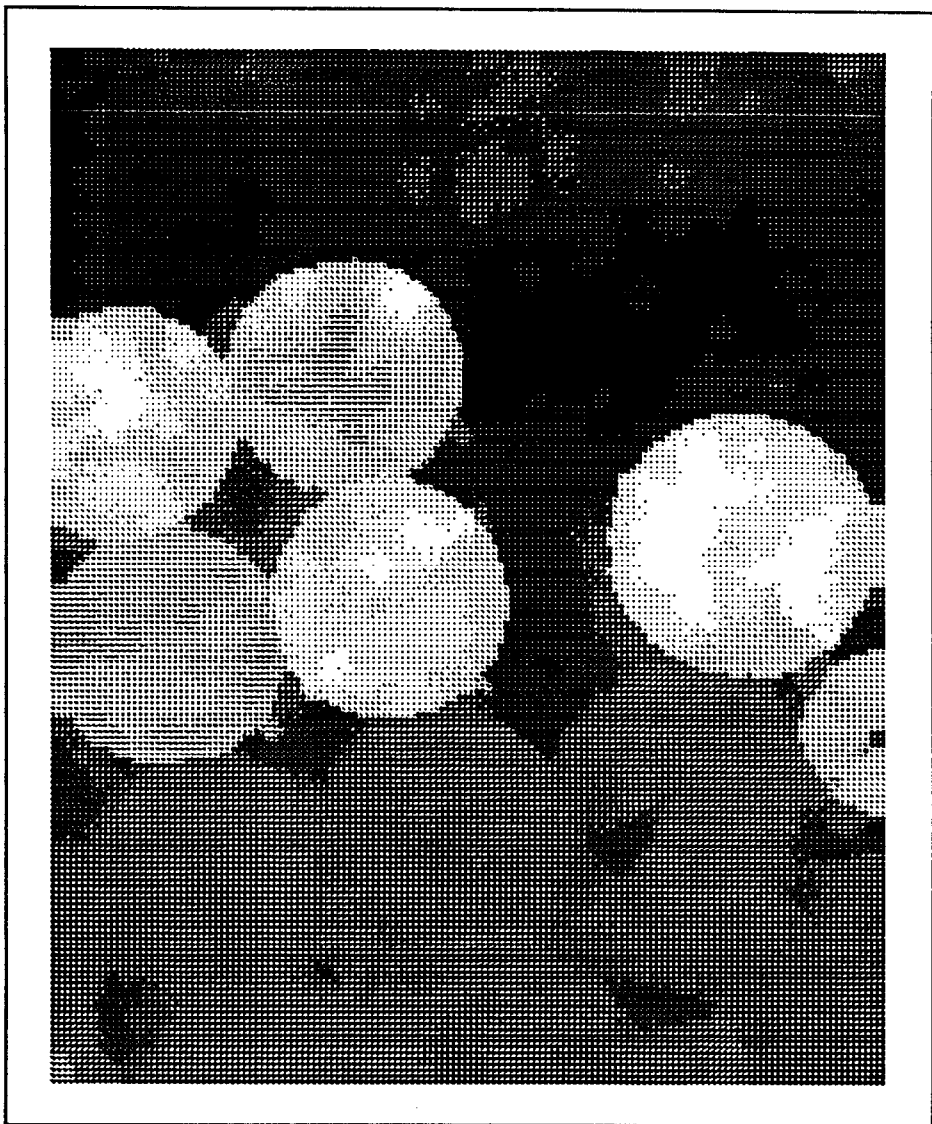


Image 3: Deuxième passage nagao

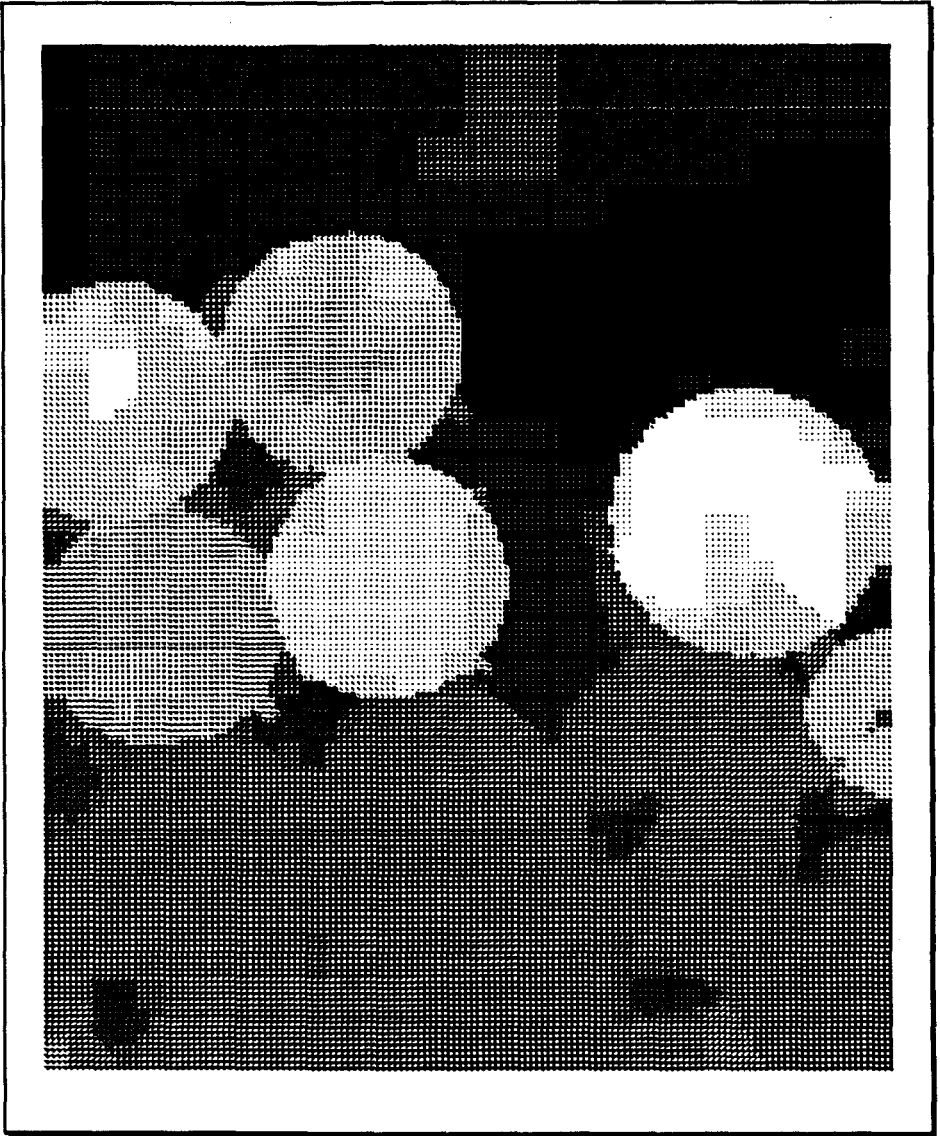


Image 4: Résultat après segmentation et moyennage

THEME :

**IMAGES SATELLITE : MODELISATION ET AUTOMATISATION
DE LA PRODUCTION D'INFORMATION
(SATMOD)**

SECURITE ALIMENTAIRE : L'INSUFFISANCE DES SYSTEMES ACTUELS D'INFORMATION ET LA TELEDETECTION.

Georges COURADE

La recherche de la sécurité alimentaire suppose la connaissance de quatre phénomènes

- les disponibilités alimentaires "physiques" là où se trouve la demande (les consommateurs);
- le pouvoir d'achat des dépendants alimentaires (ceux qui ne produisent que peu ou pas leur alimentation) dans les systèmes alimentaires gouvernés par le marché;
- la situation nutritionnelle (satisfaction des besoins minimaux pour ne pas passer à un état pathologique) des différentes couches de la population, notamment les couches physiologiquement et socialement les plus vulnérables;
- l'évolution des préférences alimentaires qui commandent le type de demande qui va s'exprimer sur le marché.

L'insécurité alimentaire présente elle, deux volets qu'il importe d'avoir en mémoire pour comprendre l'usage qui peut être fait de l'outil télédétection dans la perspective affichée:

- l'insécurité alimentaire conjoncturelle qui peut être régulière ou inattendue (selon le cas, les parades sont différentes);
- l'insécurité alimentaire structurelle qui est localisée géographiquement et/ou socialement et qui résulte d'un ensemble complexe d'éléments.

Ceci oblige à prévoir deux systèmes d'information différents:

- a) l'alerte précoce (*early warning*) destinée à prévoir les crises et à déclencher les mécanismes de déstockage nationaux (redistribution des excédents) ou internationaux (aide alimentaire);
- b) des observations répétitives sur l'ensemble du système alimentaire pour planifier les différentes politiques, agricoles (visant à augmenter la production et les ressources des producteurs), alimentaires (objectif: satisfaire la demande au meilleur coût) ou nutritionnelles (cherchant à atténuer pour les populations vulnérables les effets des crises ou de l'insécurité permanente).

Dans le premier cas, le système d'information ne concerne que le repérage des indices révélateurs de l'annonce d'une perturbation grave dans le système alimentaire. Dans le deuxième, il s'agit d'une observation en profondeur des sous-systèmes composant le système alimentaire pour établir un tableau de bord permettant une aide éclairée à la décision.

I. DIFFERENTES PROBLEMATIQUES DE LA SECURITE ALIMENTAIRE

Aucun système d'information ou outil d'information n'est neutre et il faut tenir compte de la hiérarchie des priorités pour établir un système fiable en minimisant les coûts de mise en oeuvre. Deux exemples permettent d'illustrer ceci, celui du Sahel et celui de l'Inde.

Au Sahel, la majeure partie de la production vivrière est autoconsommée (Burkina Faso: 93%). Aussi, se penche-t-on principalement, mais pas exclusivement sur les aléas de la production et sur les réserves disponibles. On essaie ici d'évaluer avec une avance de quelques mois quels seraient le niveau de la récolte, les disponibilités alimentaires existantes dans les greniers villageois et les stocks contrôlés par la puissance publique en vue de répartir les surplus des régions excédentaires et déclencher, le plus souvent, l'aide alimentaire extérieure.

En Inde, le marché intérieur a une grande importance, même dans les campagnes où un tiers des actifs sont sans terres. Par ailleurs, le pays, grâce à la "révolution verte" (diffusion de variétés de céréales donnant de forts rendements en "milieu contrôlé") a atteint l'autosuffisance alimentaire (satisfaction des populations solvables). Des stocks importants de grains (plus de 20 M de tonnes certaines années) existent pour parer aux risques de pénuries. Enfin, la "révolution verte" ne permet de dégager des excédents que dans trois Etats du Nord-Est du pays qui approvisionnent la *Food Corporation of India* qui redistribue via des centaines de milliers de boutiques à prix réduits les surplus collectés pour toucher la population qui a un faible pouvoir d'achat. Ici, le système d'information, particulièrement perfectionné, recherche une utilisation optimale des ressources internes. Il s'agit de prévoir les déficits vivriers de certaines régions et de repérer les couches de population nécessiteuses pour éviter des pénuries caractérisées et tenter d'assurer un minimum nutritionnel aux populations non solvables.

Le perfectionnement des outils de prévision et d'évaluation est à l'ordre du jour dans la mesure où l'assainissement financier qui se réalise dans près des 3/4 des pays en développement met à bas les formes de régulation des systèmes alimentaires et démantèle la bien mince protection sociale existante.

II. LE SYSTEME ALIMENTAIRE ET "L'AJUSTEMENT STRUCTUREL"

Le système alimentaire (figure 1) se compose de l'ensemble des éléments qui participent de près ou de loin à l'alimentation humaine. Nous avons distingué un dedans et un dehors du système puisque celui-ci se trouve presque toujours inséré dans le système alimentaire mondial.

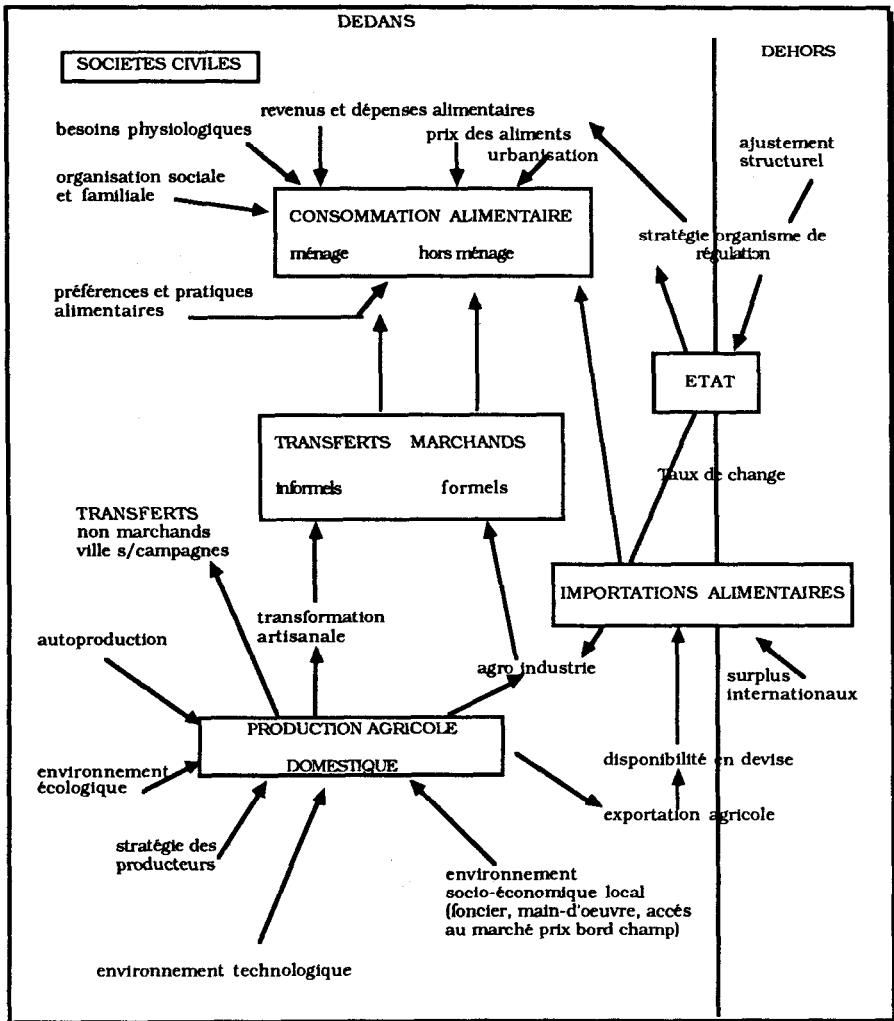


Figure 1 Schéma du système alimentaire

Le *dehors*, c'est l'environnement international ou les modèles internationaux de consommation sur lesquels les organes régulateurs du système (l'Etat ou les groupes de pression) n'ont que peu de prise, mais qui, utilisés judicieusement, changent les conditions de fonctionnement du système alimentaire. Le *dedans*, c'est l'espace où s'inscrivent en relation directe ou indirecte les activités de consommation, de production et de transfert

(transformation, échanges, stockage). Les relations entre ces sous-systèmes se font dans le cadre de *filiales* particulières par le jeu des acteurs concernés selon des procédures spécifiques et sur des lieux d'arbitrages que sont les marchés physiques (différents des marchés à terme) commandés par les règles classiques de l'échange et les interventions des organes régulateurs (stockage, déstockage, manipulation des prix, etc.).

Entre le dedans et le dehors se situe l'Etat. Par ses différentes interventions ou son retrait de la sphère économique, il lui est possible de jouer à l'intérieur du système un rôle *régulateur* essentiel ou négligeable en permettant d'ajuster les quantités disponibles sur le plan géographique (des régions excédentaires vers les régions déficitaires), temporel (d'une année faste à une année qui l'est moins), des prix (qu'il peut garantir, abaisser ou hausser par rapport au prix du marché par différentes techniques). Il assure vaillamment que vaillamment la liaison avec l'extérieur non seulement par les échanges de denrées alimentaires, mais aussi indirectement, par sa politique monétaire, tarifaire et non tarifaire (politique des normes de qualité ou du taux d'intégration de produits locaux dans le bien alimentaire final, par exemple). Il pourra ainsi plus ou moins exposer sa production vivrière à la *contrainte extérieure*, protéger ses producteurs ou favoriser ses consommateurs .

Le niveau d'endettement atteint et les politiques de rétablissement des balances des paiements désignées sous le vocable d'*ajustement structurel* conduites par les institutions de Bretton Woods (Fonds Monétaire International et Banque Mondiale) agissant au nom des créanciers privés ou publics internationaux, mettent à mal tous les modes de régulation existants si bien que producteurs et consommateurs de la plupart des pays en développement se trouvent plus que jamais confrontés aux aléas de la production et aux mouvements erratiques des prix *réels* (inflation et change inclus).

III. LES INDICATEURS UTILISES

Cinq batteries d'indicateurs ont été utilisées jusqu'ici pour apprécier l'*insécurité alimentaire* et tenter de la prévoir.

- a) Estimation des disponibilités alimentaires nationales par rapport aux besoins à partir de la production (méthode FAO): - la production et la population sont estimées à partir de recensements agricoles ou de population et de sondages, voire d'autres méthodes moins fiables pour les pays dépourvus de ce type de statistiques;
- Le chiffrage des pertes, du stockage non étatique et de la consommation par tête repose sur l'application de "normes" et de quelques rares enquêtes difficiles à généraliser;

Les résultats qui servent de base à bien des interventions sont entachés d'erreurs importantes qui peuvent dépasser pour certains pays du Sahel + ou - 20% pour le bilan céréalier.

- b) Suivi de campagne agricole et appréhension du sens des fluctuations de la production agricole.

On se limite ici à des observations de variables "externes" au système alimentaire mais qui sont des déterminants importants de ces fluctuations: agro-météorologie, indice de végétation, surveillance de l'efficacité des systèmes d'irrigation qui artificialisent la production, mesure de l'extension des surfaces cultivées quand on est en secteur de culture pure et continue.

c) Indications des marchés physiques (approche économique):

Les prix amplifient les variations de l'offre sur les marchés (loi de King): il y a là matière à observation dans le cas où le marché joue un rôle crucial dans la régulation du système alimentaire. On peut ainsi repérer rapidement une pénurie ou un excédent de l'offre alimentaire qui se fait jour mais qui ne correspond pas nécessairement à une production insuffisante ou importante. Cette méthode complète la précédente en ce qu'elle permet de saisir le comportement des producteurs, des intermédiaires et des consommateurs, comportement qui anticipe souvent les évolutions du système alimentaire.

d) Etude des effets de la consommation sur l'état nutritionnel (approche médico-nutritionnelle)

Cette méthode est utilisée par le Nutritional Survey of India d'Hyderabad: chaque année, un échantillon de 12.000 personnes est étudié. On a ainsi des estimations des déficits énergétiques et protéiques, bref, une idée du nombre de sous-alimentés et de mal nutris sans compter le nombre de maladies directement lié à cet état. On n'a pas, par contre, une idée des effets indirects de cette situation qui touchait près de 40% des Indiens dans les années quatre-vingt: vulnérabilité plus grande aux autres maladies, effets sur la croissance, etc. Ce style d'étude permet de circonscrire les groupes à risques (physiologiques) et les secteurs touchés par l'insécurité structurelle.

e) Enquêtes budget-consommation (approche socio-économique)

Ces enquêtes statistiques lourdes mettent directement en rapport le pouvoir d'achat, les préférences alimentaires et les achats alimentaires. On peut saisir ici les comportements des différentes strates sociales et géographiques. Ce type d'enquête peu fréquent car coûteux, ne saisit pas les dynamiques.

Tous ces moyens d'information donnent, soit des images générales instantanées permettant une sectorisation et une caractérisation des problèmes alimentaires, soit des appréciations approximatives de la conjoncture au niveau des systèmes de production ou des marchés physiques. Il reste des zones d'ombre totale pour les pertes, le stockage non contrôlé ou les importations clandestines.

IV. LES ATTENTES VIS-A-VIS DE LA TELEDETECTION

Il ne s'agit pas de la panacée permettant de résoudre tous les problèmes posés par la recherche d'une meilleure sécurité alimentaire, compte-tenu du développement actuel de cette technologie. S'en passer serait également absurde dans des régions où l'on ne dispose pas de données fiables. Elle vient en complément de l'existant, lui donne un cadre spatial homogène et permet de recouper des observations de terrain dans les deux perspectives ici proposées.

Dans les régions à fort taux d'autosubsistance et à très forte contrainte météorologique, elle peut aider à définir le sens des fluctuations de la production, les conditions de pousse des plantes lors de la campagne agricole permettant ainsi de savoir s'il convient de mobiliser les stocks de sécurité.

Dans les régions où la sécurité alimentaire dépend du marché et où l'agriculture a été transformée par la "révolution verte", on peut espérer avoir une évaluation assez précise des surfaces cultivées, du fonctionnement des systèmes d'irrigation, une surveillance temporelle des effets des prédateurs et des possibilités de prévision de récoltes.

Beaucoup reste à faire pour rendre plus pertinentes les observations possibles par rapport aux problèmes posés, pour combiner dans des modèles prospectifs à court et à moyen terme différents types de données.

Les *difficultés* sont liées à l'agriculture pratiquée (mélange de plantes difficilement identifiables dans l'agriculture africaine, importance des racines et tubercules dans cette même agriculture). Elles résultent aussi des conditions d'exploitation: le problème du calcul du rendement est aussi lié à la manière dont s'effectue la récolte au fur et à mesure des besoins dans nombre de lieux et aux fluctuations brutales de l'environnement écologique (climat), biologique (parasites et ravageurs) et socio-économiques (étroitesse des marchés, hétérogénéité des filières agro-alimentaires extrêmement sensibles aux modifications intervenant à un bout de la chaîne agro-alimentaire).

APPLICATION DE LA TELEDETECTION AUX STATISTIQUES AGRICOLES POUR L'EUROPE

Martin SHARMAN

La mise en oeuvre de la Politique Agricole Commune est l'un des objectifs les plus importants de la Commission des Communautés Européennes. Pour s'acquitter de ses taches, elle a besoin d'un système efficace de surveillance et de contrôle qui soit en mesure de lui fournir les données nécessaires pour orienter sa politique agricole - par exemple, en quelle proportion une région donnée produit cette année du blé d'hiver, quelles sont les prévisions de production d'orge dans une autre région, ou dans quelle mesure les vignobles ont été endommagés par le gel tardif?

La nécessité de disposer de statistiques agricoles n'est certes pas nouvelle. Toutefois la nature des questions auxquelles il faut répondre a radicalement changé au cours des siècles. Ce n'est qu'à la fin du 18^{ème} siècle que les techniques statistiques furent suffisamment avancées pour être appliquées aux recensements agricoles. Après la première Guerre Mondiale seulement la technique de l'échantillonnage fut appliquée aux statistiques agricoles. Simultanément fut associée une nouvelle méthodologie: des agents furent envoyés dans les campagnes pour interroger les agriculteurs, enregistrer l'état des récoltes et évaluer la production de cultures.

Aujourd'hui le monde n'évolue plus au rythme de la période d'entre-deux-guerres. Comme d'autres grandes entreprises, la Communauté Européenne a besoin d'informations rapides afin de rester compétitive sur le marché international.

Le Conseil des Ministres, pour être en mesure de remplir son mandat conformément au Traité qui fondait la Communauté Economique, a besoin d'un système capable:

- d'identifier et de mesurer, le plus rapidement possible et avec le maximum de précision, les surfaces des différentes cultures. Ceci s'applique particulièrement aux cultures jouissant de subventions calculées par surface;
- d'évaluer les productions régionales en temps presque réel;
- d'évaluer la production de ses concurrents.

Ce projet pilote devrait illustrer une méthode où les données fournies par les techniques classiques pourraient être complétées, interprétées et standardisées grâce à la Télédétection. Dans le système actuel, l'information

parvenant à la Commission provient des services agricoles des différents Etats Membres de la Communauté Européenne. Elle est rassemblée, analysée et transmise en utilisant plusieurs méthodes différentes. C'est pourquoi les services de la Commission trouvent parfois difficile d'interpréter et de comparer des données provenant des différents pays membres.

Les principaux arguments en faveur de l'application de la télédétection sont les suivants:

- la technique, de par sa nature, est insensible aux frontières nationales, elle peut ainsi fournir des informations fondées sur le terrain plutôt que sur des considérations territoriales
- un satellite est capable de fournir des informations, à la fois sur une échelle continentale et pour des régions beaucoup plus petites selon des méthodes exactement identiques
- en principe, les données peuvent être recueillies et analysées suffisamment vite pour permettre de soumettre des résultats à la Commission dans des délais appropriés à ses besoins. La priorité de ce projet pilote est la mise en œuvre de techniques bien identifiées pour aboutir à terme à un système opérationnel de surveillance agricole. Toutes les actions de recherche réalisées dans ce programme sont donc fortement finalisées pour une application définie.

Le projet devrait couvrir une période de dix ans; la Décision du Conseil courant a approuvé son exécution jusqu'à la fin de 1993, avec en 1991 une révision qui conduira à une décision de contrôle. Le budget total pour la période 1989-1993 est fixé à 35.5 Mio ECU et une part substantielle de cette somme sera allouée par le CCR (qui a la responsabilité du projet) à des entrepreneurs du secteur privé ou public dans les Etats Membres.

La décision de lancer le projet pilote d'application de la télédétection aux statistiques agricoles a été officiellement adoptée par le Conseil des Ministres le 26 Septembre 1988. Déjà l'année précédente, le CCR avait reçu de la Commission les instructions de fixer des phases préliminaires au projet. Le Centre Commun de Recherche d'Ispra a été choisi comme site approprié pour le projet, notamment parce que le CCR encourage depuis longtemps l'emploi de la télédétection pour la mise en œuvre de la politique de la Communauté Européenne. Le projet pilote est l'un des sept projets réalisés par l'Institut des Applications de la Télédétection¹ et pourrait ainsi bénéficier de l'expérience des six autres projets de télédétection, dont certains sont actifs depuis les premières années de fonctionnement des satellites d'observation des ressources terrestres.

Le travail du projet pilote a commencé en Avril 1987 avec un personnel limité. Depuis lors, l'équipe du projet a rapidement augmenté, et comporte à présent 9 membres du personnel scientifique CCR, deux visiteurs scientifiques, et deux boursiers préparant un doctorat. Un ou deux postes sont encore vacants, et le projet recrutera également des candidats au doctorat accueillis au CCR avec une bourse de la CE.

¹ Les sept projets du CCR sont les suivants:

1. Pollution dans l'Adriatique
2. Remontée des eaux froides de la côte Occidentale en Afrique
3. Suivi continu des ressources naturelles renouvelables dans le Tiers Monde

4. Utilisation des terres dans les Zones défavorisées de l'Europe

5. Surveillance Agricole en Europe
6. Applications des micro-ondes
7. Signature des étendues des dégazages par fluorescence laser

Au cours de l'année 1988, avec l'accroissement de l'équipe, les principaux thèmes du projet ont été mis en oeuvre et se sont rapidement développés.

Le travail relatif au projet a été divisé en 7 Actions, dont 4 constituent les thèmes les plus importants, les 3 autres soutenant ces actions principales.

Les 7 actions sont les suivantes:

Action 1: l'établissement d'inventaires régionaux des surfaces de cultures, utilisant une combinaison d'observations au sol et de données satellite de haute résolution.

Action 2: la surveillance de l'état et du développement de la végétation sur une échelle continentale utilisant des données satellite de basse résolution.

Action 3: les prévisions de rendement utilisant des modèles agrométéorologiques sur une échelle régionale.

Action 4: l'évaluation rapide de variations de surface et de rendement potentiel, à l'aide des données satellite de haute résolution sur des sites échantillons dispersés en Europe.

Action 5: l'intégration des données provenant de la télédétection, de la création de modèles et des relevés conventionnels afin d'établir un système d'information agricole avancé.

Action 6: le développement et la mise en oeuvre opérationnelle d'un système standard pour le recueil de données de terrain, utiles à la classification et - l'interprétation des données satellite.

Action 7: recherches technologiques et méthodologiques dont l'insertion dans la surveillance agricole opérationnelle sera faite à long terme.

ACTION 1: INVENTAIRES REGIONAUX

Les premières activités du projet ont débuté avec l'Action 1. Dès la fin de 1987, une étude de faisabilité a porté sur les probabilités de rassembler suffisamment de données satellitaires sur les régions agricoles de l'Europe, ce premier point étant nécessaire à la viabilité de l'ensemble du projet. Ces études sur la couverture nuageuse confirment - chose surprenante - que la probabilité qu'une zone déterminée se trouve sous une atmosphère limpide varie beaucoup d'une partie de l'Europe à une autre, et que le Nord souffre davantage de la couverture nuageuse que le Sud. Cependant, le resserrement polaires des orbites successives des satellites d'observation terrestre peut compenser cet handicap nuageux car la fréquence théorique des chances d'obtenir des images utilisables augmente. Il serait donc possible, en utilisant une combinaison d'images Landsat et SPOT, d'obtenir chaque année une couverture complète des zones agricoles dans toute l'Europe.

En utilisant comme guide cette étude de faisabilité cinq régions d'Europe ont été choisies pour le projet, d'après les critères suivants:

- terrain raisonnablement plat
- pourcentage élevé d'utilisation des terres pour l'agriculture
- grandes différences des pratiques agricoles entre les régions
- dispersion géographique

- chaque région doit être une surface continue de 20.000 km² correspondant, a une échelle régionale, a Nuts 2 ¹

Ces régions sont situées en France (couvrant le Loir et Cher, l'Eure et Loir et le Loiret), en Allemagne (Niederbayern et Oberpfalz), en Grèce (Kentriki et Ditiki, Macédoine), en Italie (Emilia Romagna) et en Espagne (Valladolid et Zamora).

Les Inventaires régionaux utilise des données satellite de haute résolution, superposées aux données classiques relevées au sol, afin d'améliorer les estimations des zones dans lesquelles sont produites des cultures économiquement importantes.

Pour chacune de ces régions, une couverture satellite complète est acquise chaque année en utilisant des images SPOT (ou si nécessaire Landsat TM). A l'intérieur de chaque région le territoire est stratifié selon des critères définis par l'entrepreneur (sols, pentes, utilisation des terres principales). Dans chaque strate, des segments sont choisis par échantillonnage stratifié pris au hasard et servent pour le recueil de données relevées au sol. Ces segments de 700 x 700 (50 ha) couvrent l'équivalent de 1,5% des surfaces de terre agricole de la région. Les données relevées au sol qui en dérivent sont comparées numériquement aux résultats de la classification des données satellite. La technique de l'estimateur de régression permet à l'utilisateur de fournir des estimations de surface d'une culture donnée avec indication sur la précision du résultat.

A la fin de 1987 un appel d'offres a été publié pour cette action. Parmi les offres reçues, quatre ont été choisies, dont l'une couvre deux des régions. Les résultats des relevés de terrain de la première année (1988) ont été reçus récemment. Ces résultats sont comparés aux statistiques officielles (là où elles sont disponibles). Afin de déterminer si la méthode est indépendante et impartiale, une analyse porte également sur la précision des résultats pour les différentes cultures et l'efficacité des techniques utilisées par les différents entrepreneurs dans la stratification des zones étudiées.

Il est possible que, pour des raisons d'efficacité et de continuité, les contrats des quatre entrepreneurs actuels soient renouvelés pour deux autres années, jusqu'en 1990. Pendant ses contrats prorogés, les équipes auront à évaluer non seulement des surfaces mais aussi des rendements. Elles seraient maintenues pour des durées plus courtes à l'approche de la phase opérationnelle.

A long terme, les bureaux statistiques régionaux seront invités à participer à l'action. Ils pourraient par exemple ajouter de nouvelles régions aux zones étudiées, ou reprendre les observations au sol en utilisant la méthodologie existante. Des concertations en ce sens évoluent favorablement, spécialement pour la région de l'Italie (Emilia Romagna).

¹NUTS: (Nomenclature des Unites Territoriales)

Le niveau 1 sont les 64 régions qui divisent la Communauté Européenne. Le niveau 2 consiste en 167 unités administratives de base, chacune d'elles appartenant à une région donnée du niveau 1.

Le niveau 3 est constitué des 823 subdivisions des unités administratives de base.

ACTION 2: CONDITIONS DE LA VEGETATION ET INDICATEURS DE RENDEMENT

En complément des données détaillées provenant des satellites de haute résolution, le projet va tirer parti des informations plus grossières provenant de satellites de basse résolution, conçus à l'origine pour des applications météorologiques.

Il y a deux avantages principaux à utiliser des données satellite de basse résolution. Le premier est lié à sa basse résolution spatiale, qui donne la possibilité d'observer simultanément de très grandes surfaces. Le second est la haute fréquence de réception de ces données pour n'importe quel site déterminé. Pour les satellites utilisés dans le projet (l'Administration Nationale Océanographique et Aéronautique des Etats-Unis, dite série NOAA), le radiomètre à bord couvre une fauchée de 3000 km de large, et peut fournir des données sur n'importe quelle cible déterminée une ou deux fois par jour, si la couverture nuageuse le permet.

Publié en 1988, un premier appel d'offres demandait des études se servant de données satellite de basse résolution pour surveiller l'état de la végétation et pour fournir des indicateurs de rendement des cultures. L'appel d'offre prévoit notamment des études sur:

- l'emploi de données satellite de basse résolution pour surveiller le développement des cultures et donner rapidement l'alarme en cas de conditions inhabituelles de croissance;
- l'application à la surveillance agricole d'estimations faites de la température de surface issue des données provenant des satellites météorologiques;
- l'emploi de ces données de satellite de basse résolution en conjonction avec des données de satellite de haute résolution ou avec des données provenant d'autres sources extérieures (agronomie et météorologie);
- la possibilité d'utiliser des données de basse résolution pour la classification de l'occupation du sol.

Dix offres, provenant de sept entrepreneurs, ont été choisies parmi les 60 qui ont été reçues. Quelques travaux portent sur l'évolution de la température de surface (en France et Grèce) où la classification de l'utilisation des terres (au Portugal), mais la majorité des travaux portent sur l'emploi des canaux visibles et proche-infrarouge et leur combinaison en indices de végétation.

Ces études sur la corrélation des données satellite avec les données de terrain, et sur le potentiel des données en vue d'une alarme rapide et de prévisions de rendement sont actuellement en cours aux Pays-Bas, en Italie, en France et au Royaume-Uni.

Les zones d'étude varient entre quelques pixels (quelques kilomètres carrés) et l'ensemble d'un pays (l'Angleterre et du Pays de Galles). Les sites sont dispersés de la Grèce au Portugal, de l'Espagne aux Pays-Bas.

Les résultats de ces études théoriques devraient être appliqués à la surveillance à l'échelle nationale ou Européenne dans la phase opérationnelle du projet.

Parallèlement à ces études relatives aux applications, il faut résoudre des problèmes généraux de traitement des données pour élaborer à terme une archive homogène de ces données à faible résolution. En effet, les données reçues au sol après transmission du satellite apparaissent à l'état brut,

impropres à une analyse immédiate. Elles doivent notamment être corrigées pour tenir compte de l'altitude, de la position et de l'attitude du satellite. Elles doivent être également corrigées de l'effet de l'atmosphère, du degré d'illumination du sol, enfin la présence de nuages, de brouillard, d'aérosols, etc...doit être contrôlé. L'équipe du projet a collaboré avec l'Agence Spatiale Européenne, pour développer un logiciel approprié pour ces corrections. En octobre 1988, un appel d'offres a été publié pour le développement de sous-programmes destinés à obtenir des données corrigées utilisables. A l'heure actuelle les offres ont été reçues et la sélection des entrepreneurs est en cours.

ACTION 3: MODELES DE PREVISIONS DE RENDEMENT

Bien que le projet ne contienne pas dans sa désignation le mots "modèle" ou "modélisation", les prévisions de rendement agricole utilisant des modèles s'insèrent parfaitement au sein du projet. Ces modèles seront modifiés de sorte que la télédétection puisse être utilisée pour valider les résultats.

Les modèles purement statistiques se basent sur les corrélations établies entre le rendement et une variété de données d'entrée. Ces dernières comprennent des informations importantes du point de vue agricole telles que la pluviosité et la température, mais la relation fonctionnelle reliant le rendement à ces variables n'est pas nécessairement mise en cause. Ils fonctionnent mieux si l'on considère des zones étendues et de longues séries chronologiques.

Dans les modèles purement déterministes, le fonctionnement détaillé de la plante est représenté par un schéma modulaire ou figurent tous les composants de la croissance et du développement de la culture: photosynthèse, évapotranspiration, production de biomasse, redistribution de substances nutritives dans la plante et développement des racines. Ces modèles très détaillés fonctionnent mieux à l'échelle d'un seul champ homogène d'une culture unique. Ces modèles nécessitent un grand nombre de paramètres. Pour certains de ces paramètres, la variabilité spatiale est très grande. De ce fait, les modèles déterministes conviennent mal pour la prévision des rendements à l'échelle de régions ou nations, ou il est impossible de recueillir toutes les paramètres d'entrée nécessaires.

Les modèles à développer sous l'égide du projet ne sont ni purement statistiques ni purement déterministes, mais constituent un troisième groupe contenant certains éléments appartenant aux deux types. Ils sont désignés sous le terme de "semi-déterministes".

Le modèle semi-déterministe utilise une troisième approche, plus pragmatique, qui tire partie des avantages des deux autres approches. Comme entrée, il prend des informations largement disponibles sur le plan agricole, et applique dans un premier temps les règles causales générales expliquant les rapports entre le développement de la culture et les conditions d'environnement. Dans un second temps, le modèle établit un rapport statistique entre le résultat et le rendement - Le type de données d'entrée généralement requises pour ces modèles comprend le bilan hydrique général, le "stress-degree-day", la somme des températures, la radiation cumulée, le rapport entre la durée du jour et la floraison, etc.

Suivant leur conception les modèles semi-déterministes sont parfaitement adaptés au niveau régional ou national.

Le projet vise aussi l'amélioration de modèles existants ainsi que leur adaptation pour une exploitation plus précise à l'échelle régionale en utilisant la télédétection. Il s'ensuivra des modèles qui ne sont pas spécifiques de la culture dans leur analyse de la saison de développement. Néanmoins, ils sont spécifiques de la culture dans leurs prévisions quantitatives de rendement. Ils tiennent compte du sol et des données météorologiques, et ils utilisent comme entrée des variables importantes du point de vue agronomique. Ces modèles semi-déterministes peuvent utiliser des techniques statistiques pour valider les résultats. Finalement ils conduisent à des estimations de rendement sur une échelle régionale.

Ces modèles devraient être assez souples pour répondre aux conditions anormales de croissance, permettant à l'équipe du projet de donner l'alarme quand cela est nécessaire. Ils doivent être robustes, ayant la capacité de fonctionner avec une grande variété de conditions climatiques, de types de sol et de pratiques d'exploitation agricole. Ils doivent également être souples, capable d'accepter des ajustements des paramètres d'entrée pendant la saison, reflétant ainsi des changements possibles dans les conditions d'environnement. Le but ultime de l'action 3 est d'automatiser les modèles agrométéorologiques.

En Aout 1988, un appel d'offres a été lancé, destiné à procurer au projet une base de données fiable contenant une information historique sur les cultures, le climat et l'agrométéorologie. Ces informations serviront d'appui à la création de modèles semi-déterministes.

Onze équipes ont été choisies pour étudier les conditions agrométéorologiques des principales cultures européennes, la possibilité d'améliorer les estimations d'évapotranspiration à l'échelle Européenne, une méthode de surveillance de la production Méditerranéenne de raisin et d'olives par l'analyse des charges atmosphériques de pollen, et les prévisions statistiques du rendement du raisin, des olives et des fruits pour l'ensemble de l'Europe. Les premiers résultats de cette étude sont attendus pour la fin de l'année 1989.

ACTION 4: INVENTAIRES RAPIDES DES SURFACES ET DES RENDEMENTS A L'ECHELLE EUROPEENNE

Il n'est pas question de surveiller l'ensemble de l'Europe en utilisant le support systématique d'images de haute résolution. Le coût serait astronomique et le volume des données tellement énorme qu'il ne serait jamais concevable de pouvoir un jour traiter et analyser ces images. Le projet a conçu une stratégie d'échantillonnage qui débute avec 10 sites dispersés dans toute l'Europe; en 1993 ce nombre de 50 sera atteint. Pour chacun, 5 scènes satellites par an seront en moyenne traitées pour suivre l'évolution des surfaces des cultures et estimer leurs rendements potentiels.

C'est une des actions les plus ambitieuses du projet: elle nécessite l'installation d'un système centralisé. Des données satellite de haute résolution y seront reçues, traitées et analysées rapidement grâce à la conjonction optimale de l'ordinateur et des connaissances techniques et humaines.

Les résultats, publiés sous forme d'un bulletin, contiendront non seulement les variations de surface et de rendement potentiel des cultures (informations quantitatives) par comparaison avec la situation enregistrée à la même époque l'année précédente, mais aussi une indication qualitative

concernant l'état de la végétation et ses conditions de développement. L'accent est mis sur la rapidité de l'estimation - elle doit être remise à Bruxelles dans les quelques jours suivant le passage du satellite.

Durant la mise en place de ce système, l'augmentation graduelle du nombre de sites va permettre de procéder en 3 phases: une phase de définition de la méthodologie utilisant 10 sites, une phase intermédiaire (sur 20 sites), permettant d'affiner les aspects pratiques de l'opération, suivie d'une phase opérationnelle (comportant 30 sites échantillons) des 1991. Une fois atteint le nombre de 50 sites, cet échantillonnage sur l'Europe permettra d'avoir une information globale sur la conjoncture agricole à l'échelle européenne.

Le choix des sites échantillons (40 x40 km) a été fait sur la base de critères définis lors d'une pré-étude. Ces critères sont les suivants: une répartition permettant de doter chaque Etat Membre de sites échantillons; et une localisation optimale par rapport aux orbites de Landsat et SPOT, pour avoir le maximum de chances d'obtenir des images sans nuages. Il faut des sites accessibles à la fois sous deux orbites séparées de Landsat, et sous les meilleures conditions d'orbites SPOT, compte tenu du fait que SPOT peut viser une cible en oblique.

Les dix premiers sites traités ont été choisis au Royaume Uni, en Espagne et au Danemark. Les 10 suivants se trouvent en Espagne, au Portugal et en Irlande. Les autres sites sont tous localisés, mais leur ordre d'introduction dans le programme n'est pas définitif.

Pour chacun de ces sites il faut annuellement initier, puis compléter une base de données de terrain nécessaires pour contrôler les résultats de l'analyse d'images. Les travaux ont déjà commencé au Royaume Uni, au Danemark et en Espagne, 16 "segments", ou sous-échantillons au sein de chaque site échantillon. Ces travaux consistent à identifier les cultures, mesurer, enquêter sur les rendements, dans 25 champs par segment.

Ces données de terrain seront utilisées en tant que contrôle "à posteriori" de la précision de la méthode d'analyse. Elles permettront également à l'entrepreneur d'améliorer sa technique au fur et à mesure qu'il acquiert de l'expérience.

L'analyse des données de satellite haute résolution pour une estimation rapide a fait l'objet d'un appel d'offres publié à la fin de Septembre 1988. La procédure de sélection d'un seul entrepreneur est en cours.

ACTION 5

L'objectif de l'action 5 est de tester le degré auquel les diverses méthodes se complètent l'une l'autre: il peut par exemple se faire que la télédétection utilisée au début du printemps aide à déterminer les surfaces consacrées au blé de printemps, alors que l'application de modèles créés permet une estimation plus précise du rendement de cette culture, et l'une et l'autre sont rendues plus précises par une visite judicieuse à un ou deux sites au sol à un moment particulier du cycle de croissance.

De par leur nature, les résultats de l'action 5 ne peuvent pas être escomptés avant que nous ayons acquis une expérience dans toutes les autres actions. Toutefois, le projet devra s'orienter vers une action 5 opérationnelle s'il veut s'acquitter de son mandat. Ce mécanisme opérationnel et intégré s'appelle "Système d'Information Agricole Avance", et il représente l'objectif principal

vers lequel tendent toutes les actions du Projet.

ACTION 6

Chacune des autres actions dépend en partie de l'acquisition de données obtenues sur le terrain, soit parce que l'action a besoin des données comme partie de son entrée (1 et 5) ou pour vérifier les estimations données par la technique (2, 3 et 4). La plupart des travaux au sol sont pris en charge par l'action 6 dans le but de standardiser les méthodologies. L'action comprend la mise en oeuvre de logiciel permettant de comparer les données de terrain de chaque segment aux données satellite correspondantes et d'en tirer rapidement, et sans passage par un système de traitement des images, des statistiques sur les surfaces.

ACTION 7

La recherche à long terme est nécessaire pour assurer que le Projet Agricole, qui doit parvenir rapidement à la capacité opérationnelle, ne soit pas devancé par le progrès des sciences et techniques s'y rapportant. Un exemple évident est le problème posé par les nuages, que les caractéristiques de pénétration des ondes radars permettent d'éviter. Malheureusement l'interprétation du signal rétrodiffusé des cibles agricoles est encore une question de compétence et de perspicacité. Il est dans l'intérêt du Projet Agricole de rendre cette interprétation plus objective, et il contribue à la recherche de l'emploi du radar et des techniques à micro-ondes passives pour la télédétection agricole. De la même façon, de nombreuses techniques utilisées par le Projet sont dans une large mesure basées sur les décisions d'experts, et devraient donc être susceptibles d'automatisation dans un système spécialisé. Un troisième exemple de techniques dont le Projet pourra rapidement bénéficier sont les Systèmes d'Informations Géographiques, nécessaires dans les actions 3 et 5. Le GIS sélectionné sera adapté pour recevoir des données issues de satellites et les transformer pour les besoins agricoles.

CONCLUSION

Le Projet est actif dans l'ouverture de discussions avec d'autres projets au sein du CCR dans le but de coopérer pour le développement de l'application de la télédétection aux statistiques agricoles.

Les principaux avantages de la télédétection pour la surveillance agricole sont la précocité, la précision et l'objectivité de l'information. En même temps, l'amélioration de la qualité de l'information est accompagnée par des avantages financiers de l'utilisation de la télédétection, par rapport au coût de méthodes plus traditionnelles. L'économie dépend évidemment de la méthode traditionnelle - les enquêtes par poste (notamment celles qui s'appuient sur la crainte de sanctions légales) peuvent être à la fois complètes et peu coûteuses, tandis que les chiffres officiels fournis par les recenseurs peuvent être coûteux et demander du temps.

Les couts les plus importants de la télédétection correspondent aux images, au travail de terrain, au traitement des données et leur interprétation. La proportion dans laquelle ces activités contribuent au cout de l'opération dépend de l'action. Par exemple, pour l'action 1, le travail de terrain coutera a peu près autant que les deux autres mises ensemble, tandis que pour l'action 4, les couts de l'interprétation et du traitement des données sont prédominants.

La télédétection porte une contribution autre que financière. Il est déjà apparu que l'observation de la terre par satellite peut fournir une information rapide, impartiale et précise sur l'utilisation des terres agricoles et le développement des cultures, ce qui peut aider a établir la politique agricole de la Communauté. Les développements technologiques à venir accroîtront encore la contribution de la télédétection pour permettre a la Commission de prendre le plus tôt possible des décisions pertinentes et rapides.

L'UTILISATION DES SATELLITES METEOROLOGIQUES POUR L'ESTIMATION DE LA PLUIE EN ZONE SAHELO-SOUDANIEENNE AU CENTRE DE METEOROLOGIE SPATIALE DE LANNION

Bernard GUILLOT

L'estimation des pluies par télédétection a fait l'objet de recherches déjà anciennes. Au niveau national un réseau a été institué en 1984, dont la coordination m'a été confiée. Ce réseau regroupe sous le sigle EPSAT : Estimation des Pluies par SATEllite en zone sahélo-soudanienne, des chercheurs de divers organismes : ORSTOM, CNRS, universités, autour d'un projet et d'expériences menées en commun. Depuis peu une équipe anglaise de l'université de Reading est associée à nos travaux.

L'objectif des recherches conduites à Lannion, par l'antenne ORSTOM et des météorologues du centre, est d'explorer les possibilités d'estimation des précipitations, à tous les niveaux de l'échelle spatiotemporelle et en temps quasi réel. Nous utilisons pour cela l'imagerie du satellite météo-sat et les données de terrain : pluviométrie, humidité et température de l'air, issues des stations d'observation. La zone d'étude comprend les pays du Sahel (du Sénégal au Tchad) regroupés au sein du Comité Inter états de Lutte contre la Sécheresse au Sahel (CILSS).

I. PRINCIPES GENERAUX DE LA TELEDETECTION PAR SATELLITES. ADAPTATION AU PROBLEME DE L'ESTIMATION DES PRECIPITATIONS

La télédétection par satellite utilise les propriétés du rayonnement électromagnétique, et de son comportement dans l'atmosphère aux différentes longueurs d'onde ; les parties adéquates du spectre qui est "l'ensemble continu des ondes électromagnétiques classées dans l'ordre de leurs fréquences... ou de leurs longueurs d'ondes dans le vide" (Mathieu et al, 1983) déterminent le choix des capteurs embarqués à bord des satellites météorologiques. Ce sont pour l'instant des capteurs "passifs", des radiomètres, qui mesurent le rayonnement émis par la surface, ou par les différentes couches de l'atmosphère.

Pour la détection des pluies les microondes apportent une information sur les précipitations par l'effet d'absorption, par les gouttes d'eau, du

rayonnement émis par la surface. Cette mesure "physique" serait aussi possible par un capteur "actif" (radar) qui recueillerait le renvoi (réflectance) par les gouttes d'un rayonnement émis par une source artificielle. Ces méthodes ne sont actuellement pas applicables en routine, du fait de la faible résolution spatiale (109 km au sous-point) des mesures faites par les capteurs passifs placés actuellement à bord des satellites ; il n'existe par ailleurs pas de radar embarqué. Nous verrons cependant qu'il est possible d'utiliser, à titre de complément, ou de validation, les données des radars météorologiques au sol, installés dans les grands aérodromes en Afrique.

Les capteurs que l'on utilise actuellement sont ceux qui reçoivent les rayonnements visible et infrarouge. Le maximum d'énergie rayonné par le soleil, qui est une source chaude à environ 6000°C, se situe dans les longueurs d'onde du "visible", entre 0,4 et 0,7 μm , (celles que l'oeil intercepte) ; cette bande spectrale, et le proche infrarouge (de 0,7 à 1,1 μm), correspondent à une "fenêtre" atmosphérique, où l'atmosphère est presque transparente au rayonnement, qui constitue le canal visible de Météosat, qui enregistre ainsi une part de l'énergie solaire réfléchi par la terre. La terre est une source moins chaude, qui rayonne dans des longueurs d'onde plus grandes, dans l'infrarouge moyen et l'infrarouge thermique. Le canal "vapeur d'eau", centré autour de 6,3 μm , reçoit une énergie émise par la haute atmosphère et le canal infrarouge thermique le rayonnement issu du sol ou des nuages, dans une fenêtre (10,5 - 12,5 μm) où la transparence atmosphérique, quoique bonne, n'est pas totale.

L'estimation des pluies que nous faisons à Lannion à partir de ces données est indirecte et relève de méthodes statistiques. La précipitation est en principe liée à la présence de nuages particuliers, repérables sur les images, et dont on peut par exemple établir des fréquences d'apparition ; par son impact thermique la pluie a également un effet sur la température de la surface du sol. Ces paramètres : fréquences de nuages et température du sol se sont révélés au fil du temps assez bien corrélés avec les données des stations . On y ajoute un effet correcteur lié à l'environnement physique des nuages ; ceux-ci sont en effet plus ou moins efficaces suivant la température ou la sécheresse de l'air, par une plus ou moins grande évaporation des gouttes. Pour tenir compte de cette influence nous avons choisi, en première approche, d'introduire comme élément correcteur la latitude, le climat se dégradant de façon assez régulière du sud au nord dans la zone sahélo-soudanienne.

II. CALCUL DE FREQUENCES DES NUAGES PLUVIOGENES

L'utilisation simultanée des canaux visible et infrarouge thermique permet aux spécialistes de distinguer des types de nuages, par une comparaison des réponses radiométriques. Ainsi un nuage d'orage à grand développement vertical (cumulonimbus) se distingue, par son sommet très froid et par sa forte brillance "visible", d'un stratus bas, très dense, donc brillant, mais chaud. L'utilisation de ce type d'analyse permet une cartographie des genres nuageux.

Il est donc possible par ce moyen d'isoler les nuages précipitants, notamment les cumulonimbus, responsables de la plus grande partie des pluies au Sahel et d'en établir une statistique. Divers obstacles empêchent cependant de procéder de la sorte, les principaux étant la variabilité diurne extrêmement rapide de ces nuages et leur grande abondance en soirée et de

nuit, à un moment où la donnée visible fait défaut. Après diverses tentatives et de nombreux tests nous avons constaté que nous pouvions discriminer de façon satisfaisante, dans l'infrarouge, les nuages pluvioigènes (cumulonimbus), à sommet froid, des autres nuages (cirrus) en utilisant des seuils de température, dans une fourchette comprise entre -35 et -45°C. Nous avons opté pour une valeur intermédiaire, à -40°C et nous établissons à partir de ce seuil un comptage des nuages, sous la forme 0-1 (absence-présence), sur chaque point des images successivement analysées. Les valeurs obtenues sont rangées dans un fichier dit d'occurrences de nuages à sommet froid (Oc). Celui-ci est une matrice constituée de 1024 lignes Météosat (entre 25° nord et 17° sud) et de 2048 points (entre 50° est et 50° ouest).

Les résultats sont théoriquement disponibles à tout moment, au gré de l'opérateur. Nous avons traité six images par jour en 1986 et 1987 et 24 images par jour depuis mars 1988. Nous créons par ce moyen une statistique de nuages à l'échelle du pixel infrarouge Météosat (4,4 x 4,4 km au point sous satellite), pour des périodes de temps qui vont de 5 à 10 jours ("pentades" et "décades") au mois et à la saison des pluies (mai-octobre) (fig. 1).

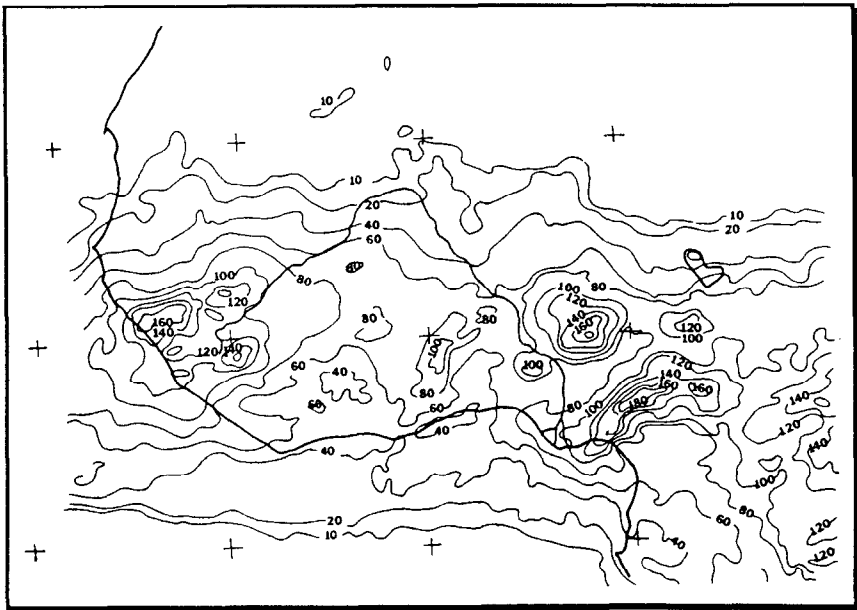


Figure 1 - Champ d'occurrences de nuages à sommet froid, 01 mai- 31 octobre 1986

III. TEMPERATURE DU SOL

Le canal infrarouge thermique permet d'obtenir une température, par la conversion du signal d'énergie reçu par le radiomètre. Cette mesure intègre l'émission infrarouge de la surface (sol ou nuages) et le solde absorption-émission des constituants de l'atmosphère : CO₂, vapeur d'eau, aérosols. Nous l'utilisons pour l'instant telle quelle, sans les corrections appropriées qui permettraient de restituer la température de la surface et d'éliminer les effets atmosphériques.

Les nuages, opaques au rayonnement infrarouge, font écran entre le sol et le satellite et doivent être écartés. Ceci est réalisé par une sélection dans les valeurs enregistrées par le radiomètre, sur les images successives et sur une période de temps assez longue pour que les portions de ciel clair, ajoutées bout bout, aboutissent à une décontamination aussi complète que possible. La procédure utilisée, dite "température maximale" (Tmax), s'appuie sur le fait que les nuages sont généralement plus froids que la surface du sol et elle revient à créer une synthèse des températures les plus élevées enregistrées en chaque point.

Nous élaborons ainsi un fichier composé de 2048 lignes et 2048 colonnes, soit entre 55° nord et 50° sud et 50° est et 50° ouest, sur une base pentadaire (périodes de cinq jours). Des moyennes sont ensuite calculées par décade, par mois et pour la saison (fig.2).

L'idée d'utiliser la température du sol mesurée par Météosat pour l'estimation de la pluie a été lancée par des agronomes, qui ont montré (Assad, 1987, Imbernon et al, 1986) que celle-ci était en relation étroite avec la pluviométrie, avec des coefficients de corrélation variables mais toujours élevés.

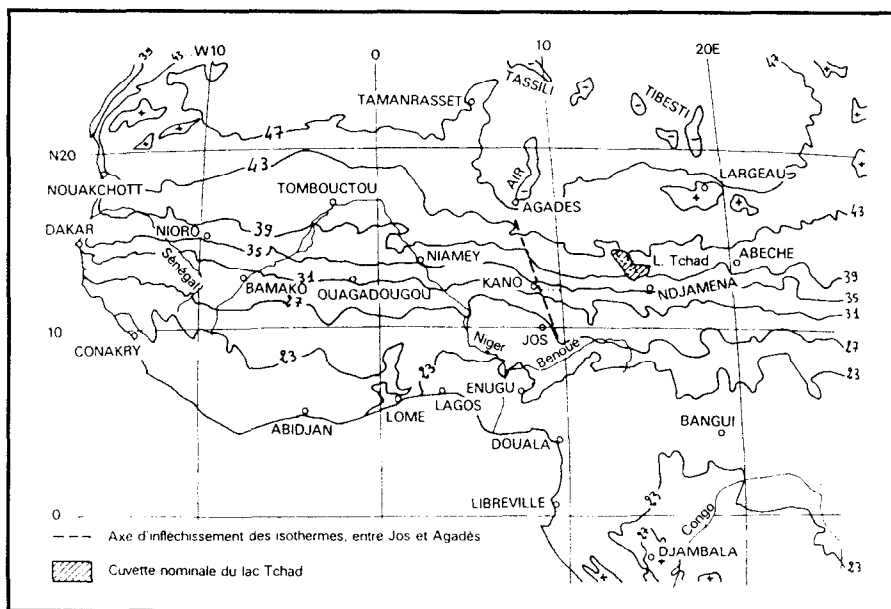


Figure 2 - Moyenne des températures maximales Meteostat, de mai à septembre 1987. Isothermes de 4° en 4°C.

IV. CALCUL DE L'ESTIMATION DES PRECIPITATIONS : PRISE EN COMPTE DE L'ENVIRONNEMENT PHYSIQUE DES NUAGES

Les paramètres ainsi extraits de l'information satellitaire : Occurrences de nuages (Oc) et Température maximale de brillance (Tmax) ne sont pas utilisés directement. Ils sont d'abord confrontés aux données pluviométriques du moment issues des stations synoptiques du réseau météorologique et on en tire une relation qui fournit les coefficients de l'estimation. Les premiers essais ont été satisfaisants mais ils ont révélé

rapidement un biais systématique dans les résultats, qui nous conduisait à sous-estimer les précipitations au sud et à les surestimer au nord. Ce biais est à mettre au compte de l'environnement physique des nuages, qui conditionne leur efficacité. Celle-ci peut être mesurée par une méthode simple, qui consiste à rapporter les hauteurs d'eau reçues dans les stations du réseau météorologique aux occurrences de nuages observées. On obtient ainsi des isocontours, en millimètres de pluie par nuage (fig.3), qui montrent une forte variation, du sud au nord, en liaison avec une dégradation concomitante des principaux facteurs atmosphériques de l'environnement climatique.

Des recherches ont par exemple montré qu'une part importante de l'eau précipitée est évaporée lors de son parcours atmosphérique vers le sol et ce d'autant plus que l'air est plus chaud et plus sec.

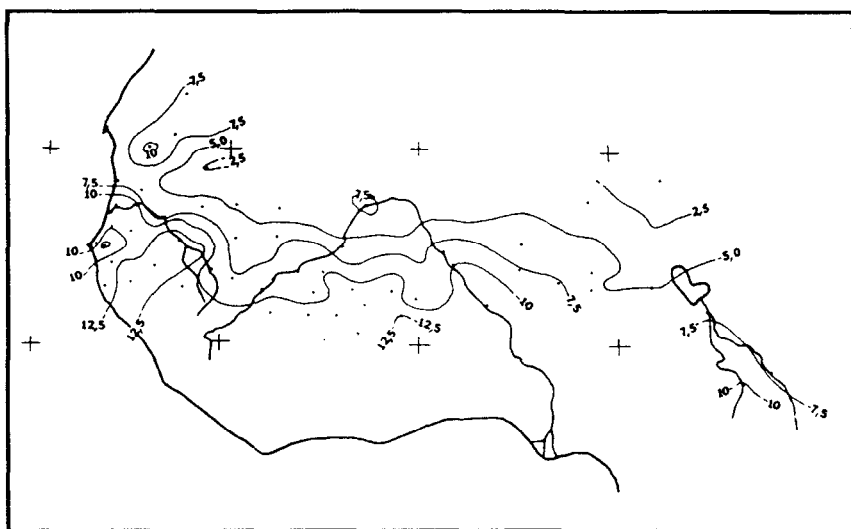


Figure 3- Rapport pluviométrie-occurrences de nuages à sommet froid (Pcb), 01 mai-31 octobre 1986.

Faute de posséder de bonnes mesures de la température et de l'humidité de l'air et comme l'orientation principale du champ d'efficacité des nuages est principalement zonale nous avons décidé, en première approximation, d'apporter à nos estimations un élément correcteur aisément quantifiable, la latitude.

Une formule pour l'estimation de la pluie a ainsi été établie, sous la forme d'une régression multiple à quatre variables : une variable expliquée, la pluie et trois variables explicatives : les nuages pluvio-gènes (Oc), la température maximale (Tmax) et la latitude (Lat), dont l'équation s'écrit comme suit :

$$Pe \text{ (Pluie estimée)} = a.Oc + b.Tmax + c.Lat + d$$

Les coefficients de corrélation que l'on a obtenus en 1987 ont été respectivement de 0,69, 0,85, 0,84, 0,81 et 0,86 pour les mois de mai septembre. Les résultats cumulés ont été de 0,88 pour la période du premier mai au 30 juin, 0,90 de mai à juillet et 0,93 de mai à septembre.

En utilisant la formule énoncée ci-dessus nous avons construit une image du champ pluviométrique ainsi estimé, pour la période mai-septembre 1987 (fig.4). Les calculs d'erreur montrent que notre estimation est bonne dans toute la partie méridionale de la zone d'étude, avec des écarts voisins de 10%.

Les résultats restent mauvais au nord, ce qui paraît normal étant donné la rareté des épisodes pluvieux.

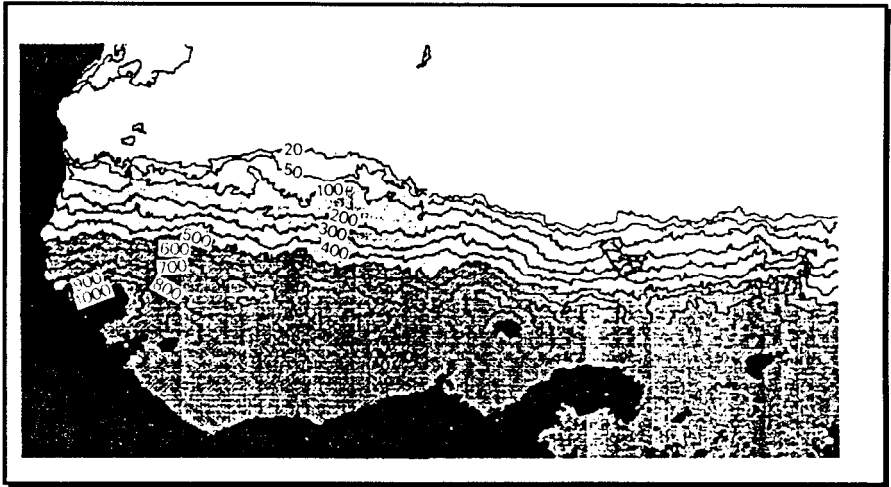


Figure 4- Carte pluviométrique de synthèse établie à partir de la formule : P_e (Pluie estimée) = $3.34 Oc - 4.8 T_{max} - 22.1 Lat + 403$. Isohyètes exprimées en mm.

V. APPLICATIONS ET PERSPECTIVES

Dès les débuts de ce travail nous nous sommes efforcés de nouer les contacts les plus étroits possibles avec les responsables des réseaux d'observation au sol, nationaux et régionaux et avec les agrométéorologues, qui sont à la fois fournisseurs de données de première main et utilisateurs des produits issus de l'observation satellitaire. Nous nous sommes en outre attachés à réunir autour du projet les chercheurs qui disposaient des compétences et des outils propres à nous permettre d'améliorer nos résultats, dans le cadre du réseau EPSAT.

Les relations avec les responsables des réseaux sol et les services agrométéorologiques ont pris la forme d'un échange systématique d'informations. Au centre Agrhymet de Niamey, qui est la cellule opérationnelle régionale du CILSS, nous envoyons depuis 1985 des renseignements d'ordre qualitatif, sous la forme de cartes de température maximale et d'occurrences de nuages à sommet froid, cartes qui sont prises en compte dans la structure opérationnelle de surveillance de l'installation et du déroulement de la saison des pluies. Nous recevons en retour des données de pluviométrie. Le même réseau d'échange fonctionne avec les services météorologiques nationaux, où sont installées des cellules nationales Agrhymet.

Par l'intermédiaire du laboratoire UTIS (Unité de Traitement de l'Information Satellitaire) du Centre de Recherches Océanographiques de Dakar nous obtenons également les données issues du réseau de l'ASECNA, qui regroupe les états d'Afrique de l'ouest et d'Afrique centrale. Nous envoyons également à UTIS des données satellitaires qui sont utilisées sur place, depuis deux ans, pour l'estimation des pluies au Sénégal.

Cette collaboration étroite devrait prendre prochainement un tour nouveau avec la création, par nos soins, d'un outil de traitement des données satellitaires et du réseau sol, qui irait de l'acquisition des données à l'élaboration de cartes de pluie estimée. Ces stations "clés en mains", peu coûteuses, pourraient être installées assez rapidement sur place, dans les centres de collecte de l'information utilisateurs des produits ainsi élaborés. Les procédures utilisées seront dérivées en partie des composantes du logiciel TRISKEL mis en place pour les besoins de nos programmes de recherche (Dagorne, 1988).

Nos travaux pourraient alors être davantage orientés vers l'amélioration de nos méthodes. Celles-ci sont encore bien imparfaites. La figure 1 montre par exemple que les isolignes d'efficacité des nuages ne sont pas tout à fait zonales et que la partie occidentale du champ est d'orientation franchement méridienne. De même la distribution spatiale des erreurs liées à l'estimation révèle une sous-estimation systématique des pluies dans certaines zones (sud du Sénégal) et une surestimation ailleurs (région du lac Tchad). Un effort doit donc être fait pour prendre en compte ces phénomènes, afin d'aboutir à un découpage spatial raisonné, par l'introduction de paramètres reflétant les variations locales de l'environnement des nuages. Cela se traduit autant sur leur fréquence (GUILLOT-CARN, 1988) que sur leur efficacité (MOREL, 1988).

Ces efforts vont s'inscrire dans le cadre du réseau EPSAT. Les principales conclusions de la dernière réunion, qui s'est tenue à Reading en octobre 1988, ont été :

- que les méthodes statistiques d'estimation de la pluie ne peuvent, dans leur état actuel, fournir des résultats exploitables à une échelle spatiale réduite (pixels ou groupes de pixels Météosat), qu'aux niveaux mensuel et saisonnier ;
- que le contrôle des résultats par les mesures au sol devrait être vérifié par d'autres instruments, pour permettre de situer les limites de validité de l'extrapolation d'une mesure de surface (pluviomètres et pluviographes) très limitée (mesurée en centimètres carrés), à l'aire beaucoup plus étendue qui est celle du pixel Météosat (20 km²). Ces instruments existent, sous la forme de radars météorologiques, calibrés par un réseau serré de pluviographes. Au réseau de pluviographes déjà installé dans ce but au Niger, par l'ORSTOM et la Météorologie Nationale du Niger, devrait être adjointe en 1989 une chaîne de numérisation du radar de Niamey ;
- qu'il convient de continuer la recherche d'algorithmes plus performants que ceux que nous utilisons actuellement pour la discrimination des types de nuages, avec une utilisation simultanée, pendant la journée des canaux visible et infrarouge, et de nuit des canaux vapeur d'eau et infrarouge ;
- la nécessité d'obtenir une mesure des paramètres atmosphériques à une échelle proche de celle de Météosat, par l'utilisation de sondes verticales du type de ceux qui sont actuellement embarqués sur les satellites NOAA, dont une version allégée est programmée sur les futurs satellites Météosat.

BIBLIOGRAPHIE

- ADLER R.F., NEGRI A.J., 1981. - A simple physical basis for relating geosynchronous satellite infrared observations to thunderstorm rainfall. 4th Conf. on Hydromet., Oct. 79, Reno, Nevada, 121-128.
- ARKIN P.A., 1983. - A diagnostic precipitation index from infrared satellite imagery. Trop. Oc. Atm. Newsletter, 5-7.
- ASSAD E., 1987. - Utilisation des satellites météorologiques pour le suivi agro-climatique des cultures en zone sahéenne. Cas du Sénégal. Thèse, Univ. du Languedoc, Montpellier, 258 p.
- BARRET E.C., MARTIN D.W., 1981. - The use of satellite data in rainfall monitoring. Academic Press., 340 p.
- BELLE C B., 1986. - Composition colorée d'une sectorisation de l'image plein disque de Météosat II du 21 septembre 1986, 13H00 TU. Veille Climatologique Satellitaire, 15, pp. 34-37.
- CARN M., DAGORNE D., GUILLOT B., LAHUEC J.P., 1988. - Rainfall estimation over the Sahel from infrared satellite imagery, during the rainy season 1986-1987. Proceeding of the seventh Meteosat Scientific Users, Madrid, 4 p.
- CARN M., LAHUEC J.P., 1987. - Estimation des précipitations au Niger au cours de la saison des pluies 1986 à partir de l'infrarouge Météosat. Bilan et critique des méthodes utilisées. Veille Climatologique Satellitaire, 17, pp. 40-48.
- DAGORNE D., 1988. - Traitement des données satellitaires à l'antenne ORSTOM de Lannion. Le logiciel TRISKEL. Veille Climatologique Satellitaire, 23, pp. 17-22, et 24, pp. 38-42.
- GRIFFITH C.G. et al., 1978. - Rain estimation from geosynchronous satellite imagery. Visible and infrared studies. Mon. Wea. Rev., 106, 1153-1171.
- GUILLOT B., BELLE C B., LAHUEC J.P., 1987. - Convection intertropicale et pluviométrie. Essai de mise en relation pour l'Afrique de l'ouest, du 11 mai au 20 août 1985. Adv. Space Res., vol. 7, 3, pp. (3)-59 - (3)66.
- GUILLOT B., CARN M., 1988. - Le rôle des facteurs locaux dans la convection profonde en Afrique occidentale. Une analyse à partir de l'imagerie infrarouge du satellite Météosat. Veille Climatologique Satellitaire, 21, pp. 33-48.
- GUILLOT B., 1981. - Les satellites de l'environnement. Description sommaire de la série TIROS-N/NOAA-A.I. ORSTOM, Initiations Documentations Techniques, 50, Télédetection 5, 58 p.
- IMBERNON J., ASSAD E., GUILLOT B., DAGORNE D., 1987. - Evaluation de la pluviométrie par cumul des images infrarouge thermique de Météosat (Sénégal). Veille Climatologique Satellitaire, 16, pp. 49- 58.
- LEBORGNE P., 1981. - Détermination des zones de précipitations sur l'océan par radiométrie hyperfréquence. La Météorologie, VI, 25, pp. 13-24.
- MATHIEU J.P., KASTLER A., FLÉURY P., 1983. - Dictionnaire de physique. Masson éd., Eyrolles, 568 p.
- MOREL R., 1988. - Remarques à propos de l'effet des facteurs locaux sur la baisse de pluviométrie observée en Afrique de l'ouest sur le Sahel. Veille Climatologique Satellitaire, 23, pp. 23- 28.
- SOLOMON S.I., PIETRONIRO A., WISHART N., PIEYNS S., GUILLOT B., CARN M., 1988. - Application de la télé-détection à l'évaluation des ressources en eau du Sahel. Veille Climatologique Satellitaire, 24, pp. 26-37.

DECOMPOSITION D'UN ESPACE REGIONAL POUR UNE APPROCHE INTEGREE

Haja ANDRIANASOLO

INTRODUCTION

L'hypothèse de base est qu'une aire régionale quelconque constitue un système complexe organisé, à propos duquel aucune information a priori n'est disponible. C'est un système d'incertitude maximale.

L'approche, sujet de nos recherches actuelles, tendrait à obtenir une réduction de cette incertitude, en réalisant une compréhension "structurelle" d'un tel système.

Démarche qui réduit l'incertitude (l'entropie) en décomposant le système en sous-systèmes "élémentaires" dont il serait plus aisé d'en réaliser l'analyse et la compréhension.

Les problèmes posés sont alors ceux recouverts par la découverte des sous-systèmes, leur qualification et l'appréhension de leurs inter-relations. Soit, que sont les sous-systèmes?, comment sont-ils organisés?, comment structurent-ils la région?.

En fait la première difficulté est de disposer d'une représentation adéquate de cette réalité qu'est l'aire régionale. Si la réduction de l'incertitude visée concerne la totalité des phénomènes présents et influents sur cet espace, la représentation recherchée doit rendre compte de façon synthétique de ces phénomènes. Les données satellitaires constituent une telle représentation. Représentation apte à fournir des éléments d'analyse tant du point de vue de l'analyse spectrale que spatiale.

La donnée satellitaire constitue alors le système d'incertitude maximale, duquel doivent être découverts les sous-systèmes servant à l'analyse.

Cet article se limitera à une approche basée sur les propriétés spectrales des images satellitaires d'une part, et d'autre part est illustré par une problématique "Sécurité Alimentaire", qui a plus particulièrement conduit à la définition des contraintes de l'efficacité et de l'adéquation du modèle. Les

données utilisées sont des images "Landsat MSS", et le thème est le riz.

I. CONSTRUCTION DE SOUS-SYSTEMES

Générer des sous-systèmes revient à réaliser des partitions sur la représentation que constitue l'image. Partitions qui sont usuellement réalisées suivant deux grands types de démarche: dirigée et non-dirigée.

De par l'hypothèse de départ: "incertitude maximale sur le système", la démarche dirigée ne peut s'appliquer. Qu'utiliserait-on en guise de connaissance à priori?

La seule approche possible est celle non-dirigée. Mais alors quels critères de partition employer pour assurer une efficacité et une adéquation optimale aux objectifs? et comment assurer une interprétation systematisable des classes?.

La recherche d'une solution dans ce sens se fera à travers une démarche modélisatrice.

II. MODELISATION

II.1. Critères de partitions

Soit:

- une population P
- une variable mesurée x sur les individus de P

On note T la variance totale sur x.

A une partition quelconque de P, correspond une décomposition de T en:

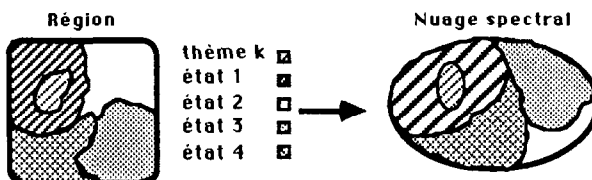
W: variance dans les classes

B: variance entre les classes

$$T=W+B$$

Les images satellitaires rendent en particulier compte et de la nature des phénomènes, et de leurs états. Ainsi par exemple la représentation des phénomènes végétatifs (nature) est en étroite relation avec leur stade phénologique (état).

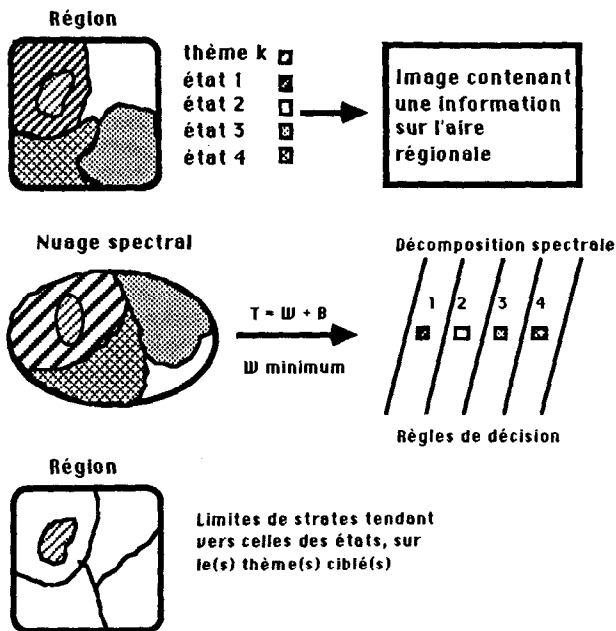
Spectralement les phénomènes se retrouvent plus ou moins regroupés suivant leur état et nature: un thème donné appartient à la partie de l'espace radiométrique de sa classe d'état (voir figure).



Une partition est optimale, si les critères de sa réalisation font effectivement ressortir les différentes composantes du nuage. Ils doivent en découvrir les limites.

La décomposition doit faire ressortir les composantes homogènes du nuage. Un critère apte à découvrir celles-ci est celui de la minimisation de la variance totale à l'intérieur des classes. Plus celle-ci est petite pour une partition en un nombre de classes donné, plus les composantes qui ressortent sont homogènes, et tendent à recouvrir des classes "intrinsèques" de thèmes et d'états.

Le modèle de décomposition de T suivant W et B, est donc tel que W soit minimisée. Modèle dont une réalisation sont les méthodes de classifications par réallocations (Forgy, Jancey...).



Schématisation:

II.2. Variables

Indépendamment du modèle de classification, la minimisation du rapport $\frac{W}{T}$ est aussi fonction des variables utilisées pour la description des individus. Le traitement des images satellitaires repose souvent, de façon empirique, sur les canaux originaux, les indices, les axes factoriels, et les ratios.

Tel que l'approche est réalisée ici, les variables adéquates doivent exacerber les différences entre les diverses structures présentes dans les données: capacité à maximiser la variance entre les classes.

Ce qui équivaut à maximiser dans "l'absolu" le rapport $\frac{B}{T}$. Ainsi modélisées les variables recherchées sont celles d'une fonction discriminante (axes canoniques) sur les classes d'une partition.

La génération de telles variables nécessite donc l'existence d'une partition (dans le cas présent nous nous limiterons à la génération d'une variable).

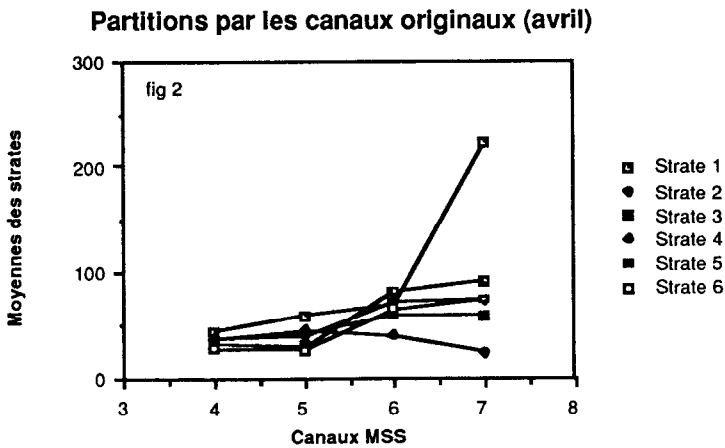
Pour la construction d'une variable ainsi définie, l'existence d'au moins deux classes est nécessaire, tel qu'elles soient les plus différentes possibles au sens du rapport $\frac{B}{T}$. Il suffit donc de construire une partition en deux par le modèle de classification précédemment défini, pour remplir cette condition.

Le modèle général ainsi défini, une autre catégorie de paramètres a une importance capitale quant aux résultats: celui lié aux images elles même. Nous illustrerons cette importance à travers un plan d'expérience mettant en évidence le rôle des dates de prise de vues et des variables utilisées.

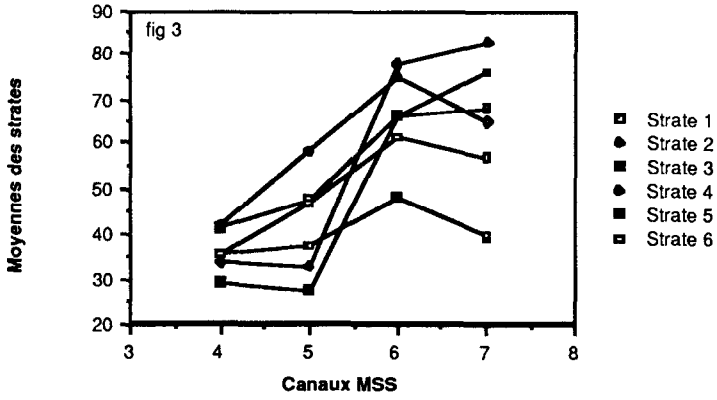
Rappelons que l'adéquation du modèle est vérifiée par les contraintes liées à la stratification pour l'estimation de surfaces rizicoles. L'estimation des W est donc réalisée à partir de la variance de l'extension du riz dans les classes. Une telle vérification sur un thème fixé et unique, n'est pas restrictive de la validité du modèle, puisqu'ainsi que déjà démontré, les partitions sont réalisées par des regroupements de thèmes suivant leur état et nature.

Une partition en six est réalisée, tel que sont comparés les résultats obtenus sur la base des différentes variables et images.

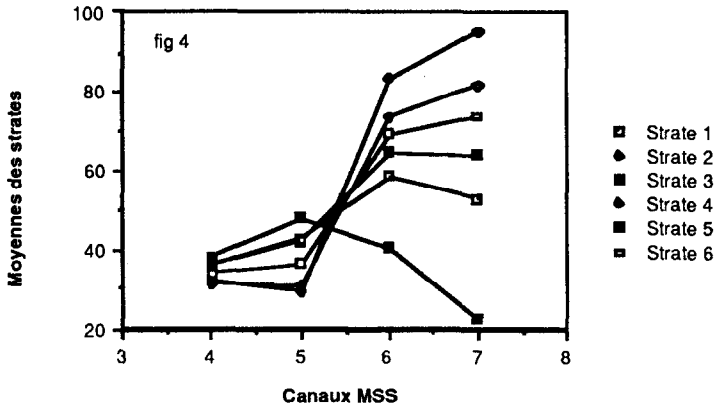
Les figures suivantes illustrent le fait que les partitions obtenues diffèrent suivant les variables utilisées.



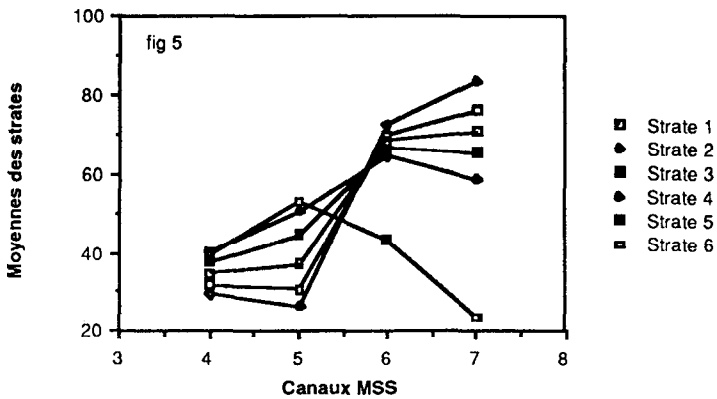
Partition par les axes factoriels (avril)



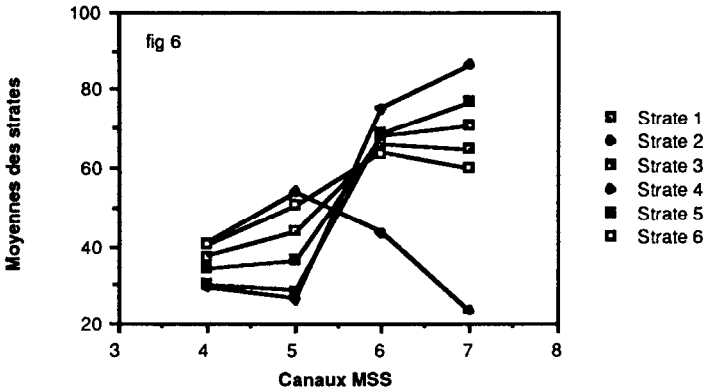
Partition par l'axe unique (avril)



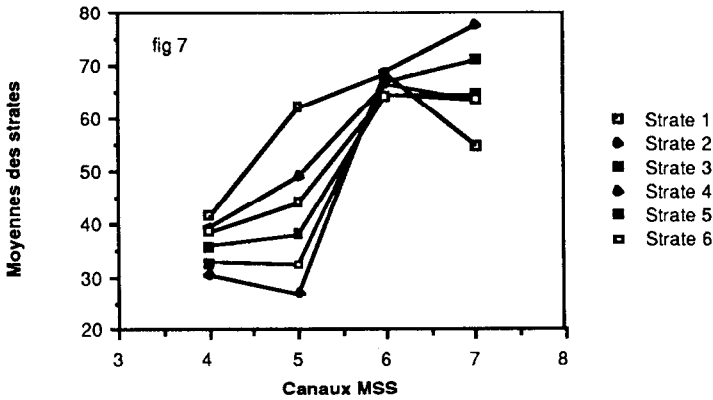
Partitions par indice de végétation verte



Partition par indice végétation jaune

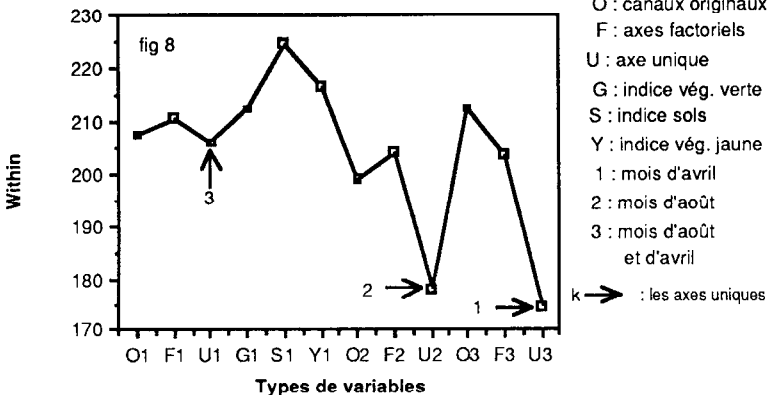


Partition par indice des sols (avril)



Une synthèse des résultats, quant aux aptitudes des différentes combinaisons des données de base est représentée sur la figure suivante.

Variations intra (W) des strates



Il apparaît bien que la variable telle que modélisée minimise dans l'absolu (relativement aux autres données de comparaison) W aussi bien sur la date d'avril que d'août, et que d'avril et d'août. Dans le cas présent il s'avère que l'utilisation des deux dates (U3) simultanément amène peu par rapport à la seule date d'août (U2): saison sèche, période de maturation du riz.

Les critères de partition ainsi acquis, comment aborder la réduction de l'incertitude sur une aire régionale?

III. PRINCIPES DE L'ANALYSE

Résolu le point de la génération de sous-systèmes, restent les problèmes liés à la reconnaissance des classes de sous-systèmes dont ils sont issues, et à l'établissement des inter-relations existant entre eux.

Les hypothèses de base de l'approche sont les suivantes:

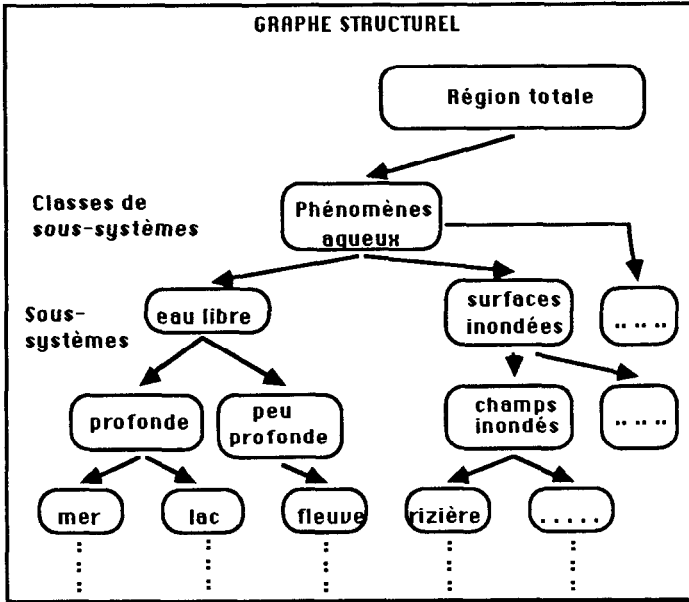
- l'univers est indivise dans son organisation et dans son fonctionnement
- le détail de l'étude que l'on peut en faire est lié à l'échelle et au niveau de nomenclature auquel on se situe
- L'aire régionale peut donc être vue et comprise à différents niveaux. Comme elle est une réalité complexe et organisée, ses différents niveaux, en sus des relations entre leurs sous-systèmes constitutifs propres, ont des relations entre eux. Puisque ceux sont les mêmes réalités que l'on regarde à des niveaux différents.

La compréhension (réduction de l'entropie) de cet univers va donc se faire à travers une démarche, une décomposition hiérarchisée de celle-ci.

III.1. Graphe structurel

(Nous rappelons que les démarches présentées ici sont en cours de recherches et ne sont donc pas figées, en particulier il en est ainsi du vocabulaire).

Le principe de partition tendant à découvrir des classes suivant l'état et la nature des phénomènes posé, la hiérarchisation des niveaux de finesse concernera une vision de plus en plus détaillée des états, jusqu'à arriver idéalement à chaque thème élémentaire (mais qu'est donc un thème élémentaire?) présent dans l'univers. Une représentation de cette hiérarchisation est ce que nous appellerons graphe structurel, dont un exemple est fourni par la figure ci-après.



Sur cette représentation, un niveau constitue un ensemble de sous-systèmes et le niveau qui lui est supérieur un ensemble de classes de sous-systèmes.

Les questions qui se posent sont ceux de la construction d'un tel graphe, et de son interprétation. D'autant qu'un des objectifs de nos recherches est la systématisation et l'automatisation de cette interprétation.

III.2. Hierarchisation

Le modèle de représentation utilisé à travers les données satellitaire est celui recouvert par le domaine spectral. Dans ce cas il ressort de tout ce qui précède, que chaque sous-système appartient de manière récursive à un sous-système de niveau supérieur, jusqu'à l'appartenance à la totalité régionale.

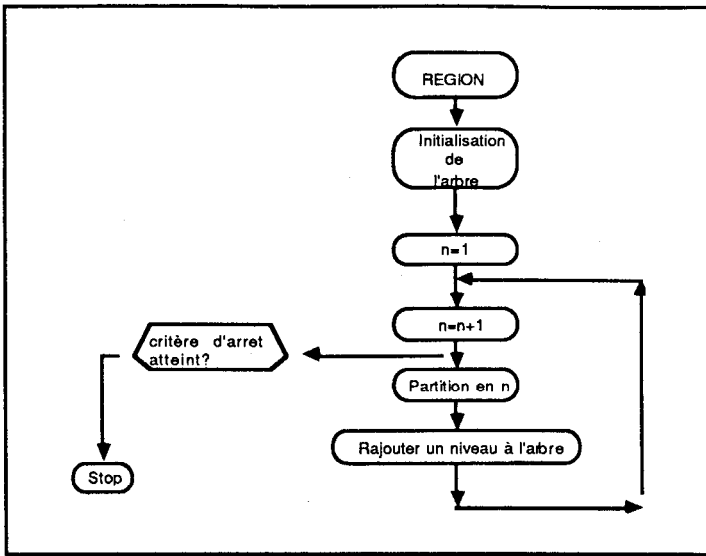
L'arbre structurel doit donc traduire cette structuration, qui pourrait-on dire est la "grammaire naturelle" de cette sorte de représentation.

Il doit montrer une résolution de détail de plus en plus fine, suivant des segmentations dont la règle d'évolution soit l'apparition progressive des structures les plus fortes en sous-systèmes (décomposition de plus en plus fine du nuage spectral).

Chaque niveau de l'arbre sera alors constitué par une partition.

Une partition à un niveau k donné, comporte k classes, et ainsi de suite jusqu'au regroupement de l'ensemble des sous-systèmes pour former la totalité de l'aire régionale.

L'algorithme d'élaboration en serait le suivant:

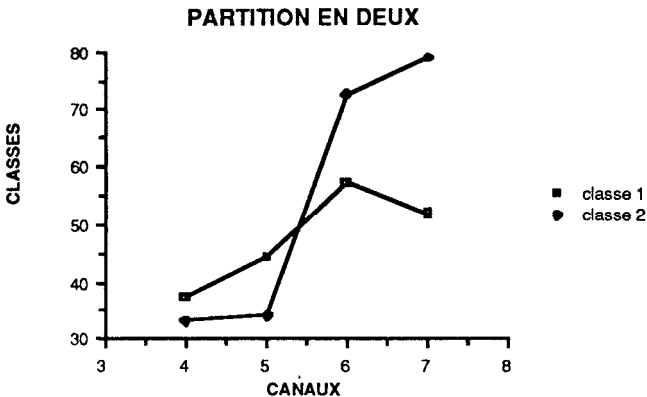


Dans l'application illustrant notre propos, des partitions successives de deux à six classes ont été générées, dont suivent les caractéristiques:

Une étude succincte permet de dégager les comportements suivants: (lecture: (1.2) signifie: la classe 1 de la partition en 2)

Partition en deux:

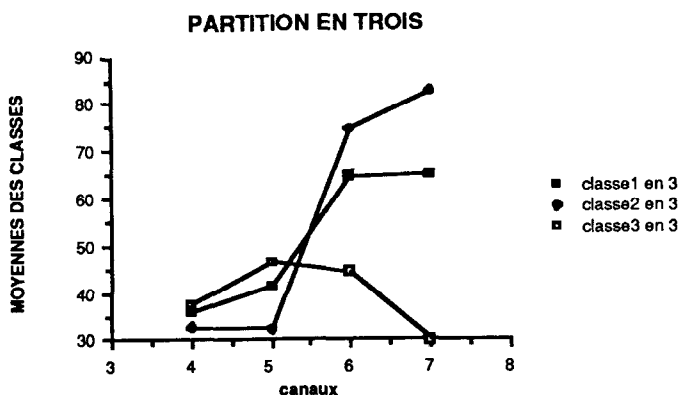
La première classe (1.2) regroupe les phénomènes globalement humides: lacs, fleuves, marais, terres agricoles inondées, savanes et steppes plus ou moins humides....La seconde classe (2.2) regroupe les phénomènes où dominent les thèmes végétatifs (chlorophylle) et secs, tels la forêt, certaines savanes ou steppes....



Partition en trois:

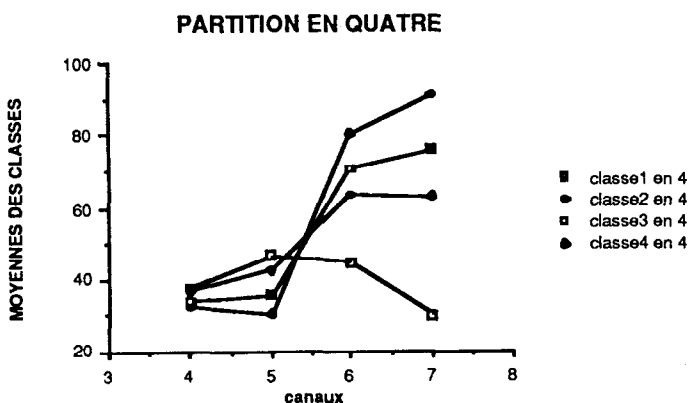
Subdivision du thème global humide (1.2) du niveau précédent en deux sous-thèmes: tout ce qui est vraiment inondé (1.3) d'une part, et le reste (2.3) d'autre part. La classes regroupant les thèmes végétatifs et secs (3.3) de-

meurrant globalement la même.



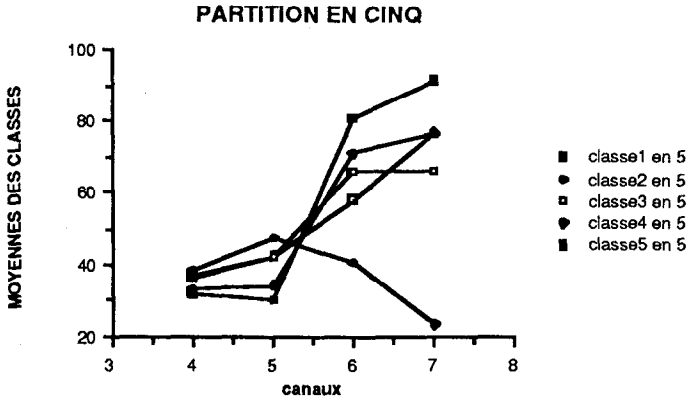
Partition en quatre:

Subdivision de la classe végétative et sèche (3.3) en deux sous-classes: d'un coté la masse forestière (1.4) et de l'autre les savanes et steppes plus ou moins sèche, et plus ou moins arborée (2.4).



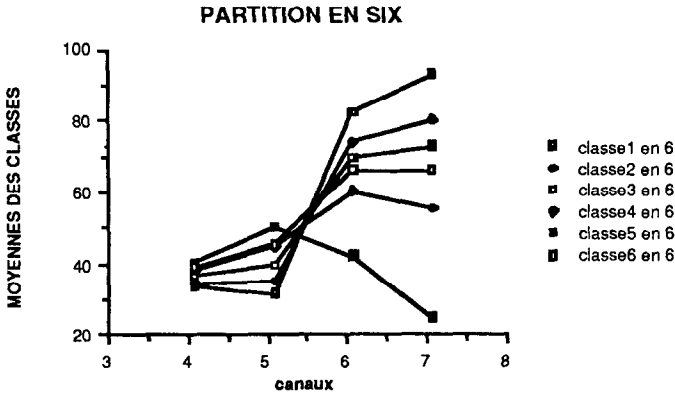
Partition en cinq:

Subdivision de la classe (2.3) en deux sous-classes: d'un coté des phénomènes contenant des traces d'humidité (1.5), et de l'autre des phénomènes où la tendance est vers une domination du végétatif sur l'humide (2.5).



Partition en six:

Subdivision de la masse forestière (1.4) en deux sous-classes (1.6) et (2.6).



Mais une fois constituées ces partitions, comment les relier entre elles pour élaborer l'arbre structural proprement dit? et permettre ainsi une réduction de plus en plus importante de l'incertitude sur la région?.

CONCLUSION

Ces premiers résultats et expérimentations nous confortent dans nos hypothèses et notre approche. En particulier les principes ici exposés ont donné lieu à de premières utilisations pour l'estimation de superficies rizicoles à Madagascar, l'étude de l'écosystème en région aride (Egypte), l'analyse et le diagnostic d'un paysage sahélien (Burkina Faso), dont les résultats par ailleurs exposés ont fait montre d'une efficacité certaine.

Cependant bien des questions sont encore à résoudre, et nous tenons à souligner que cette présentation préliminaire ne constitue qu'une introduction. Ainsi n'ont pas été abordé les problèmes de l'élaboration de l'arbre lui même, ni de celui de sa lecture et de son interprétation.

Tout au plus pouvons nous signaler que la résolution de ces problèmes, dans une optique d'opérationnalité, nous oriente actuellement vers le test de solutions intégrant sur les systèmes experts, utilisés conjointement avec des systèmes de gestion de base de données (SGBD) localisées (SIG).

ELEMENTS BIBLIOGRAPHIQUES

- ANDRIANASOLO H. Analyse statistique des données de télédétection - Statistiques agricoles - Application sur Madagascar. Doctorat en Mathématiques Appliquées aux Sciences Sociales - Paris 1987.
- ANDRIANASOLO H. Agricultural statistics and space images in Madagascar - Estimation of second rice season acreage in a sub-prefecture. Congress of ERIM, Nairobi 1987.
- ANDRIANASOLO H. and MALEK C. Définition et détermination des unités dynamiques d'un paysage sahélien (OURSIL) pour un diagnostic des facteurs de dégradation et de régénération des ressources naturelles et renouvelables. Congress of ISPRS, KYOTO 1988.
- ANDRIANASOLO H. Modélisation de la stratification d'un espace régional par la télédétection, pour l'estimation de surface. Séminaire Informatique de l'ORSTOM (SEMINFOR), Montpellier 1988.

DEVELOPPEMENT DE SYSTEMES EXPERTS POUR LA CARTOGRAPHIE PAR TELEDETECTION

Catherine MERING

RESUME

Une carte thématique réalisée à partir de l'analyse des données satellitaires résulte des choix opérés par le thématicien quant à la taxonomie de référence, à la sélection des données de base (données satellitaires et données géocodées, zones-test matérialisant la réalité terrain), aux traitements numériques à appliquer aux données, et à leur séquençement. Le thématicien préside également à l'évaluation des résultats intermédiaires ou finaux. Ces décisions résultent de ses connaissances thématiques et de son expérience de l'analyse et de l'interprétation des images satellitaires. Aussi, afin de reproduire non seulement une carte mais l'ensemble de la méthode cartographique utilisée dans un cas donné, nous nous sommes fixés pour objectif de décrire le raisonnement du thématicien élaborant une carte "en laboratoire" à l'aide des méthodes numériques de traitement d'image. Il s'agit d'un problème qui ne peut être résolu à l'aide d'un algorithme général. C'est pourquoi nous avons eu recours aux méthodes de l'intelligence artificielle particulièrement adaptées à la description des processus cognitifs.

Afin de permettre la généralisation d'une approche cognitive en télédétection indépendamment de la thématique envisagée et du milieu à décrire, nous nous efforçons de concevoir un mode de représentation et d'exploitation des connaissances adapté à l'expression de l'expertise invoquée. Dans cet article, nous proposons plus précisément une représentation des entités iconiques, des traitements d'image invoqués, et des concepts utilisés pour interpréter l'image.

I. POURQUOI DES SYSTEMES EXPERTS EN TELEDETECTION ?

Lors de l'exploitation des données satellitaires permettant de produire une première carte thématique sous la forme d'une image étiquetée, les phases d'analyse et d'interprétation sont étroitement liées. Toutefois, alors que les premières peuvent être décrites formellement dans la mesure où elles correspondent à des séquences de traitement d'images, les secondes, qui font largement appel aux connaissances thématiques du spécialiste, ne sont jusqu'ici pas formalisées.

Par conséquent, on ne possède pas la trace de l'ensemble du processus qui a permis d'interpréter le contenu de la scène . Il en résulte donc une non reproductibilité relative de la méthode utilisée. On se trouve de ce fait dans l'impossibilité d'évaluer son degré de généralité.

Pour remédier à ce handicap, nous avons choisi d'explicitier au sein d'un même programme informatique l'ensemble de la méthode cartographique. En dehors de l'image satellitaire proprement dite, les données manipulées par ce programme sont constituées par les traitements d'images invoqués lors des phases d'analyse et les connaissances thématiques invoquées lors des phases d'interprétation. L'objectif d'un tel programme est de reproduire la démarche du thématicien qui analyse et interprète les images de télédétection. L'intérêt qu'il y a à réaliser de tels programmes est aussi bien d'ordre ergonomique, dans la mesure où ils permettent de guider l'utilisateur par une expertise existante, que scientifique dans la mesure où ils permettent d'explicitier l'ensemble d'une démarche et rendent de ce fait possible une confrontation avec d'autres démarches.

Pour réaliser ces systèmes à base de connaissances nous avons eu recours aux techniques de l'Intelligence Artificielle et notamment à celles des Systèmes Experts dont l'un des objectifs consiste précisément à formaliser et de programmer les processus cognitifs .

Après avoir exposé les principes que nous avons retenus pour le développement de tels systèmes appliqués à la télédétection, nous les illustrerons en décrivant les éléments et le fonctionnement de CIME, un prototype existant [MERING et al 88], et de CIME2, un système en cours d'élaboration [ETIFIER 88].

II. IMAGES SPATIALES ET CONNAISSANCES

II.1. Entités géographiques et entités iconiques

L'utilisation des images de télédétection dans le cadre d'une recherche thématique suppose une mise en relation de deux types d'objets concrets de nature hétérogène: les objets que l'on peut observer et mesurer sur le terrain, que l'on appellera *entités thématiques* et les objets que l'on peut observer et mesurer sur l'image et que l'on appellera *entités iconiques*.

Ces modes de mise en relation peuvent être très différents. Un mode couramment utilisé consiste à effectuer l'analyse comparative des mesures

physiques effectuées in situ sur une certaine catégorie d'objets, et les données radiométriques prélevées sur les fragments d'images supposées correspondre à ces mêmes objets. Ce type d'approche, basé sur des considérations physiques et statistiques, peut permettre, par extrapolation des résultats de l'analyse, d'interpréter tout ou une partie de la scène [CERVELLE 89].

Pour notre part, nous nous intéresserons ici à l'explicitation d'un mode de relation indirect: il s'agit de l'analyse de l'image de télédétection à la lumière de *connaissances thématiques*. Nous supposons pour cela qu'il existe des règles suffisamment générales permettant l'interprétation d'une scène satellitaire indépendamment de mesures systématiques effectuées sur le terrain correspondant. Dans cette perspective, les seuls objets concrets analysés seront les entités iconiques. La connaissance thématique sera exprimée à l'aide de concepts désignant soit les entités thématiques proprement dites soit les relations entre ces entités. L'interprétation de l'image consistera alors à mettre en correspondance les entités iconiques et les concepts thématiques. C'est ce processus que nous tenterons de formaliser.

II.2. Les différents volets du savoir utilisé dans l'interprétation thématique des images satellitaires

La démarche que nous proposons suppose l'existence d'un savoir portant sur le contenu de l'image et sur les outils permettant l'extraction de ce contenu. Ce savoir précède l'analyse d'image proprement dite.

On peut considérer que l'activité d'analyse et l'interprétation des images satellitaires suppose la coopération de *sources de connaissances* variées. [HATON 87]. Nous en avons, pour notre part dénombré trois qui se rattachent à des domaines ou à des savoir-faire différents :

Nous considérons tout d'abord le savoir du *thématicien*, qui le rend apte à décrire l'espace analysé à l'aide de concepts propres à sa discipline. (nature des sols pour le pédologue, ensembles lithologiques pour le géologue, forme du relief pour le géomorphologue, couverts végétaux pour le botaniste ...). Quelle que soit la thématique envisagée, ce savoir passe toujours par la constitution d'une taxinomie ¹.

D'autre part, il existe un savoir relatif à l'interprétation thématique des images satellitaires. Par exemple, les données satellitaires contiennent une information concernant la radiométrie des objets observés liée aux propriétés de réflectivité de leurs composants (minéral, eau, végétal). La capacité à reconnaître une entité à l'aide de sa *radiométrie*, relève du savoir du *télédécteur*, habitué à interpréter la signature spectrale des objets. Par ailleurs l'image spatiale contient également une information relative à la texture à la géométrie et plus généralement à l'organisation spatiale des objets composant le paysage ². Le savoir faire du *photo-interprète* le rend précisément apte à analyser et à reconnaître ces formes et ces textures en fonction de leur contexte, qu'il s'agisse d'un paysage humanisé (quadrillage des zones urbanisées, parcellaires agricoles..) ou naturel (alignement de dunes, moucheté de la végétation des zones arides, modelé des massifs

¹ " Dans toute étude, le géographe classe les éléments composant l'espace". (Olivier Dollfus dans "l'Analyse géographique", P.U.F., Coll. "Que Sais-je", Paris, 1972).

² "Il existe donc une banalité des formes dont l'analyse offre autant d'intérêt que celle de leur singularité". (Olivier Dollfus dans "l'Analyse géographique", P.U.F., Coll. "Que Sais-je", Paris, 1972).

De façon schématique nous avons considéré qu'à chaque étape de l'analyse une transformation avait pour résultat une partition de l'image, chaque partie pouvant être interprétée de façon plus ou moins précise en termes thématiques, le but final étant de réduire autant que possible l'ambiguïté et l'imprécision de cette interprétation. Pour atteindre ce but on peut utiliser deux sortes de stratégies:

une stratégie dite ascendante où la transformation de l'image, en partant des données iconiques initiales, a pour effet de regrouper de façon dynamique des entités iconiques pouvant être interprétées à l'aide de concepts de plus en plus abstraits [NAGAO 80]

une stratégie dite descendante où la transformation de l'image, en partant des concepts thématiques, a pour effet de décomposer l'image en entités iconiques interprétables d'après ces concepts.

Le plus souvent, le spécialiste alterne les deux stratégies.

Les transformations d'image s'effectuent à l'aide de procédures numériques sélectionnées et activées par le système comme l'indique le schéma du Tableau 2.

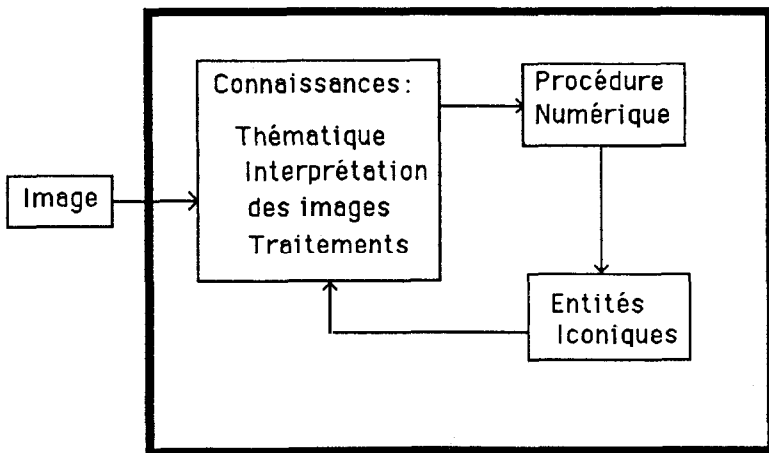


Tableau 2 : Le processus d'interprétation d'image

Il nous faut donc décrire les éléments que manipulera effectivement le système, c'est à dire les données image, les connaissances thématiques et enfin les traitements.

III.2. Image et entités iconiques

Toute opération d'analyse d'image est liée à la définition des éléments d'image sur lesquels va porter l'analyse.

L'élaboration d'un système formel de représentation des images implique le définition de primitives, éléments de base de la représentation .

Une primitive notée *Pi* est une parcelle d'image constituée d'un ensemble de points, la primitive la plus élémentaire étant le point de l'image ou pixel. Un ensemble d'attributs lui sont attachés. Il peut s'agir de la radiométrie, de sa

montagneux)¹.

Enfin, nous supposons qu'il existe un savoir relatif aux *traitements d'image* permettant d'extraire à partir d'une image numérique, des informations nécessaires à son interprétation. Ce savoir est de nature à orienter les choix des traitements en fonction des caractéristiques intrinsèques de l'image analysée et des objectifs définis en amont par les deux autres sources de connaissances. Il permet également de définir les conditions pratiques d'activation des traitements en fonction d'un contexte donné.

Ces différentes sources de connaissances ne sont pas forcément organisées de façon hiérarchique mais peuvent coopérer de façon plus ou moins complexe comme le montre le Tableau 1.

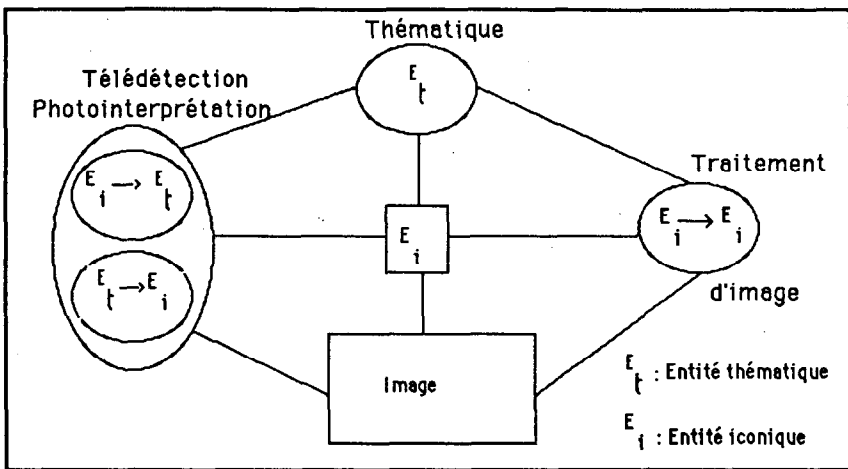


Tableau 1 : Les connaissances utilisées en interprétation d'images satellitaires

III. ELEMENTS D'UN SYSTEME A BASE DE CONNAISSANCES DANS LE DOMAINE DE LA TELEDETECTION

III.1. Le processus d'interprétation

Nous suivons la définition du processus d'interprétation du signal qu'a donnée Jean Paul Haton, à savoir : "l'interprétation d'un signal peut être schématisée comme le processus de transformation progressive de données physiques issues du monde extérieur en une description mettant en oeuvre des traitements, des informations, et des connaissances variées, d'autant plus complexe que le signal traité est plus encodé". [HATON 87]. Pour notre part, nous envisageons le développement de systèmes qui, en partant de concepts thématiques et de la donnée d'une ou plusieurs images, permettront de transformer dynamiquement les données iconiques de départ afin de produire une image étiquetée, c'est à dire composée d'entités interprétées thématiquement.

¹On trouvera un exemple de ce type d'expertise aux pages 45-50 de l'ouvrage de Pierre Gondard "Des cartes Discours pour une méthode", Editions de l'ORSTOM, coll Etudes et Thèses, 1988, 176p.

position exprimée en fonction d'un repère donné, mais aussi de données exogènes provenant d'autres sources que la donnée de télédétection, telles que l'altitude, la pente, etc.¹

Une *entité* est définie comme un fragment d'image regroupant un ensemble de primitives vérifiant certaines contraintes (telle que par exemple la définition de bornes numériques pour un attribut).

Il faut remarquer que dans le cas général, la forme de entités dépend de l'ordre de prise en compte des données initiales (primitives et attributs).

La description d'une entité implique la description de la distribution spatiale des primitives qui la composent.

On appelle descripteurs du premier ordre ceux qui mettent en jeu les caractéristiques intrinsèques de l'image comme c'est le cas de l'*histogramme* et de l'*histogramme bivarié*.

Les descripteurs du deuxième ordre sont ceux qui supposent l'analyse des caractéristiques jointes de paires ou groupes de primitives définis par une relation (par exemple, la proximité) comme c'est le cas des *matrices de cooccurrences*.

Par ailleurs il est nécessaire de disposer de descripteurs de haut niveau tels que les descripteurs topographiques permettant l'évaluation de la *proximité* ou l'*adjacence*. On traitera de façon particulière le cas de l'*inclusion* de deux entités. En effet, comme il a été dit plus haut, à propos du processus d'interprétation (cf §3.1), l'image est transformée de façon dynamique, ce qui suppose l'agrégation ou la séparation des entités iconiques d'une étape à une autre du processus. Pour mémoriser cette transformation, il est nécessaire de pouvoir parcourir la *hiérarchie structurelle* des entités iconiques (passage d'un ensemble à ses composants). L'interprétation thématique doit en particulier impliquer la capacité à déduire le contenu thématique d'une entité du contenu de ses composants. Par exemple, si les pixels d'une région ont déjà été interprétés comme des pixels appartenant exclusivement à la catégorie "végétation", il faut pouvoir déduire que cette même interprétation vaut pour la région. Par ailleurs pour calculer les descripteurs du premier et du deuxième niveau d'une entité quelconque, il faut également pouvoir accéder aux entités d'un niveau inférieur. Compte tenu des différents modes de transformations de l'image (séparation et regroupement), on ne pourra parcourir cette hiérarchie qu'à travers deux niveaux consécutifs.

III.3. Les connaissances thématiques

III.3.1. La taxinomie des entités thématiques

Nous supposons qu'en amont de toute analyse d'image, on dispose de concepts thématiques permettant d'interpréter la scène. Comme nous l'avons vu, ces concepts sont organisés comme une taxinomie:

La représentation symbolique d'une taxinomie monodimensionnelle nécessite seulement la définition symbolique des entités considérées. On énumère alors une liste de noms symboliques sans décrire de relations entre les entités. On définit par exemple la liste suivante: *forêt, zones cultivées,*

¹ Ces données proviennent souvent d'informations géocodées redéfinies à partir des pixels de l'image satellitaire.

prairie.

Lorsqu'il s'agit de mettre en place une taxinomie à plusieurs niveaux, il convient de choisir un mot clé approprié pour exprimer le type de relation hiérarchique implicite dans une taxinomie. Classiquement on utilisera le passage d'un niveau de la taxinomie au niveau supérieur selon l'axe de spécialisation-généralisation.[VOGEL 88]. On dira par exemple qu'une forêt dense est une *sorte de* forêt. Pour illustrer ce propos, nous avons représenté sur le Tableau 3 une taxinomie à trois niveaux :

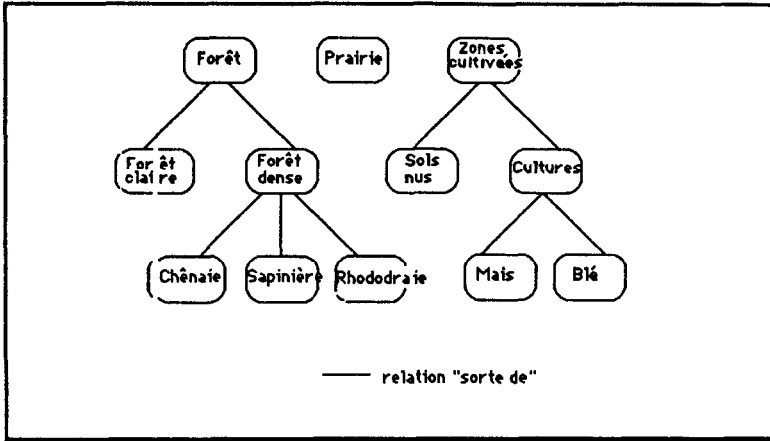


Tableau 3 : taxinomie d'entités thématiques

III.3.2. La description des entités thématiques

Nous venons de voir que le thématicien énumère et classe les entités composant la scène. Il peut également les décrire par leurs caractéristiques intrinsèques. Il peut s'agir des caractéristiques iconiques ou radiométriques. Elles doivent alors être associées aux entités iconiques connues à l'état courant. Dans le cas contraire, elles supposent la recherche de nouvelles entités iconiques satisfaisant aux contraintes impliquées par les caractéristiques iconiques. On peut ainsi décrire l'entité thématique *forêt claire* à l'aide de ses caractéristiques iconiques et radiométriques comme dans l'exemple du Tableau 4.

entité thématique: forêt_claire

entités iconiques : régions			
surface	grande	valleur	>400
texture	hétérogène	variance	>50
bande_rouge	basse	valleur_moyenne	<20

Tableau 4: caractérisation iconique et radiométrique d'une entité thématique

La description des entités thématiques peut également se faire par l'intermédiaire des relations existant entre ces entités, ces relations pouvant être structurelles ou spatiales.

On appelle relations *structurelles* celles qui permettent de passer des parties au tout dans l'organisation structurelle des entités, par composition ou décomposition. Elles s'appliquent à la fois aux entités thématiques et aux entités iconiques. Cependant la décomposition structurelle d'une entité thématique ne permet pas de déduire l'entité iconique correspondante autrement que par la composition d'entités iconiques déjà interprétées, comme dans l'exemple suivant:

entité thématique: habitat	composée de :	maisons voierie jardins
----------------------------	---------------	-------------------------------

Les relations *spatiales* entre deux entités thématiques font, elles, directement référence à l'organisation spatiale des entités iconiques correspondantes. Il peut s'agir de relation de *proximité*, d'*adjacence* ou d'*imbrication*, comme dans l'exemple suivant:

entité thématique : routes forestières	<i>en relation spatiale avec</i> <i>type de relation</i>	forêt imbrication
--	---	----------------------

III.4. Les traitements d'image

La transformation dynamique de l'image s'effectue au moyen d'outils d'analyse que l'on considère comme des données du système.

Il s'agit de procédures numériques de traitement d'image. On considère ici que ces procédures sont connues et vont être utilisées en fonction du but poursuivi, c'est à dire de l'interprétation des fragments d'image en fonction du modèle fourni par le thématicien.

Il existe plusieurs types de traitements possibles d'une image que l'on peut classer suivant différents critères:

Si l'on choisit comme critère la nature de l'action exercée sur l'image, on distinguera les par exemple les opérations suivantes:

- rectification géométrique
- amélioration d'image (modification de la dynamique, lissage et convolution, transformée de Fourier)
- opérations à plusieurs images (classifications multispectrales, combinaisons, linéaires ou non, de plusieurs images)
- détection de lignes et de contours

On peut aussi classer les traitements en se référant au type de résultat obtenu; on pourrait distinguer ainsi les traitements suivants:

- prétraitements (compression, corrections géométriques et radiométriques)
- segmentation
- classification

Comme on le voit, plusieurs principes peuvent être appliqués et aucun d'entre eux n'a pu servir de référence universelle pour les systèmes de traitement d'image. [AMAT 87].

En réalité cette représentation hiérarchique des traitements est guidée par l'application. Dans notre cas, comme le montre le Tableau 5, on utilisera une hiérarchie qui correspond à la fois aux deux critères de classement précités.

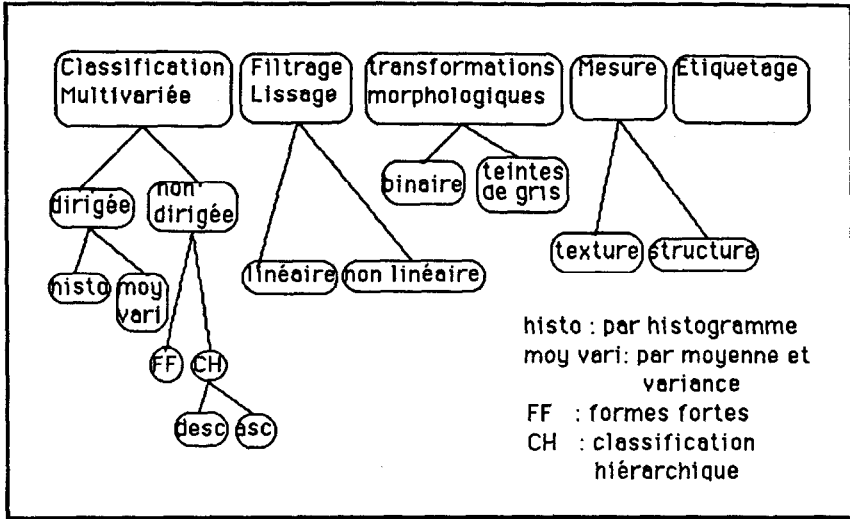


Tableau 5 : classification hiérarchique des traitements d'image

Le spécialiste classe un traitement donné à l'intérieur de cette hiérarchie. L'avantage d'une représentation hiérarchique, dans ce cas, est qu'elle permet d'utiliser les mécanismes d'héritage : une méthode particulière héritera des propriétés (en termes d'attributs) de la classe à laquelle elle appartient .

Par exemple une méthode de classification dirigée implique la donnée de parcelles d'entraînement. C'est ainsi que la méthode particulière appelée DNP (discrimination non paramétrique) héritera de cette caractéristique, ainsi que la méthode SEBEST (méthode de SEBESTYEN). En construisant cette hiérarchie le spécialiste peut guider l'utilisateur vers une ou des méthode particulières tout en l'aidant à formuler ses requêtes. On peut par exemple imaginer le dialogue suivant entre le système et l'utilisateur:

- S : voulez-vous effectuer une classification multivariée?
 U : oui.
 S : Voulez-vous diriger la classification?
 U : oui.
 S : indiquer le nom de votre ensemble d'apprentissage :
 U : P1.
 S : voulez-vous sélectionner le mode de discrimination ?
 U : non.
 S : deux méthodes peuvent être utilisées : DNP et SEBEST.
 .
 .
 etc....

Les méthodes sélectionnées par le système seront prêtes à être mises en oeuvre par des procédures informatiques dès que l'ensemble des paramètres nécessaires à leur exécution aura été spécifié.

Il s'agit par exemple, dans le cas d'une classification multivariée, du nombre des images, de leur nature, du nombre de classes en sortie, du nom du support de sortie. Ces paramètres seront en partie fournis par l'utilisateur et en partie imposés par le système à l'aide du contexte courant. En effet pour atteindre le but fixé, une chaîne (ou séquence) de traitements devra être construite, dans laquelle le traitement à choisir à un instant donné ne constitue qu'une étape du processus de traitement [MERING et al 88]. Or la place relative du traitement dans la chaîne impose des contraintes en particulier celles qui sont dictées par la nature des sorties du résultat précédent. En particulier, on retiendra que la cohérence entre deux traitements successifs est définie par la relation suivante:

$T2$ peut succéder à $T1$ si $E(T2) < S(T1)$, E et S représentant la description de l'ensemble des entrées et sorties de traitement.

Il s'agit là d'une condition nécessaire mais non suffisante

Par exemple, si le traitement de l'étape (n-1), a produit une image classée, il n'est pas cohérent d'effectuer un filtrage ou une transformation morphologique en teintes de gris à l'étape n.

Le contrôle de la validité et de la cohérence doit donc être effectué par le système en fonction du contexte courant (base de faits à l'instant t).

Le déclenchement d'une procédure informatique peut être représenté par le schéma du Tableau 6:

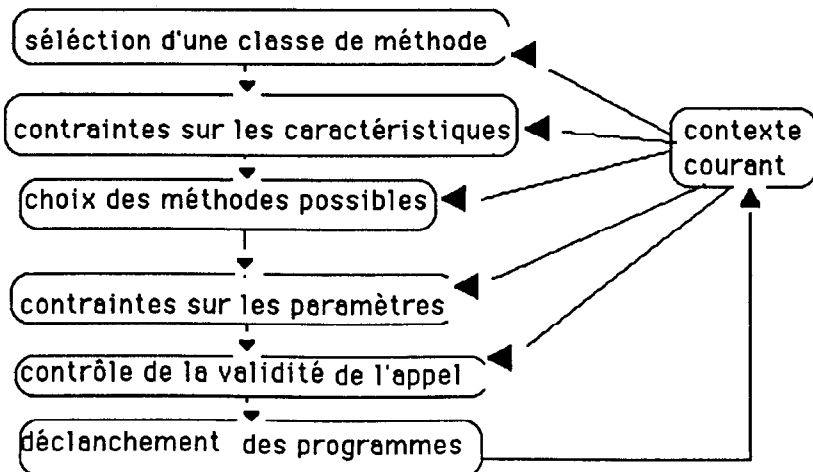


Tableau 6 : Déclenchement d'une procédure de traitement.

L'application d'un tel principe permet à l'utilisateur d'énoncer, s'il le désire des éléments conduisant au choix d'une méthode ou d'une famille de méthodes sans avoir à connaître les programmes qui permettent sa mise en oeuvre. Par contre, plus les contraintes qu'il énonce quant à la méthode seront faibles, plus nombreuses seront les méthodes concurrentes. L'expert doit donc, à travers les règles prédire et contrôler la mise en oeuvre de plusieurs méthodes concurrentes, quelle que soit l'étape.

Pour l'aider à gérer les choix de méthodes, sans avoir à énoncer toutes les combinaisons possibles des méthodes et des paramètres, on a choisi d'utiliser un algorithme de gestion d'hypothèses nommé C.H. (pour "Choix Hypothèses") qui permet d'effectuer automatiquement les choix de méthodes et d'arguments en fonction de données contenues dans une base spécifique, la base de connaissances de contrôle, décrivant les méthodes et les arguments associés, et des règles de contrôle présentes dans la base de règles [ETIFIER 89].

La sélection de la méthode m_1 devant être appliquée aux données à l'étape n de la chaîne sera effectuée conformément au schéma du Tableau 7.

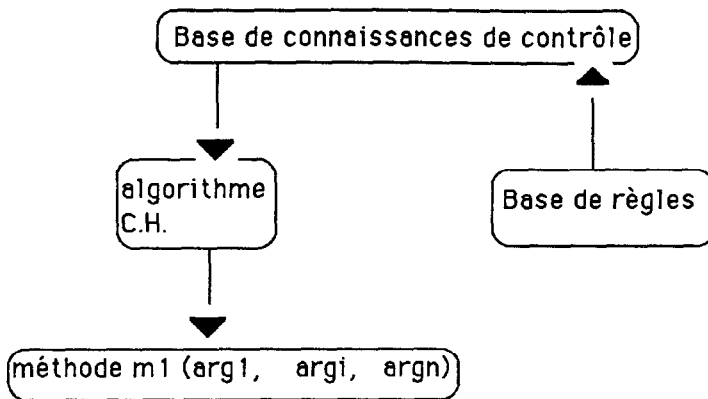


Tableau 7: Choix d'une méthode

Le spécialiste pourra construire autant de *bases de connaissances de contrôle* qu'il devra effectuer de choix de traitement pour résoudre un problème donné (classer les pixels, évaluer la texture d'une région, etc...)

V. CARACTERISTIQUES GENERALES DU FORMALISME ADOPTE

D'après ce que nous venons de voir, des éléments très divers doivent entrer dans la composition des Systèmes tels que nous les envisageons:

Pour représenter ces éléments il faut adopter un formalisme satisfaisant à la fois l'exigence de clarté permettant aux thématiciens de les manipuler directement sans avoir recours à un langage de programmation ¹, et l'exigence de robustesse et d'opérationnalité de tout programme informatique.

Rappelons qu'un système expert est l'association d'un logiciel informatique, le *moteur d'inférences* et d'une expertise, la *base de connaissances*. Le moteur d'inférence est un programme très général, indépendant des connaissances; il est dirigé à la fois par les règles et les faits. Ceux que nous avons utilisés [MONJANEL 87], [ETIFIER 88] ont été conçus pour pouvoir interpréter les bases de connaissances que nous développons. Nous ne nous

¹ "Les Systèmes experts ont pour premier objectif d'éliminer toute forme de programmation" (J.L. Laurière in "Intelligence Artificielle Tome 2, la Représentation des connaissances" Editions Eyrolles, Paris, 1988.)

intéresserons ici qu'à la partie du système relative aux bases de connaissances.

Pour représenter les connaissances nous avons adopté le formalisme maintenant classique mais simple et efficace des systèmes de production. Les connaissances du domaine qu'elles soient factuelles et propres au domaine ou générales et indépendantes du domaine sont représentées par des règles, c'est à dire des clauses composées d'une partie condition en membre gauche et d'une partie action en membre droit.

Les réalités observées, qui correspondent à la partie "données" des programmes classiques, et qui sont relatives à une situation particulière, constituent la mémoire de travail encore appelée Base de Faits.

Base de Règles et Base de faits constituent la Base de Connaissances proprement dite.

On verra que malgré la définition rassurante que l'on donne à chacune des composantes de la base, le choix du statut de fait ou de règle pour représenter une connaissance particulière n'est pas toujours trivial¹. Ainsi un même type d'assertion telle que l'expression "un chien est un mammifère" peut être représenté suivant les systèmes sous forme de fait [LAURIERE 88] ou de règle [KODRATOFF 86]

IV.1.. La syntaxe des faits

Dans CIME [MERING et al 88] les faits étaient représentés par le triplet classique:

$$(\textit{objet} , \textit{attribut} , \textit{valeur}) \quad (\text{I})$$

où:

objet	correspond au nom de l'objet
attribut	correspond au nom de l'un des attributs qui caractérise l'objet
valeur	correspond à la valeur ou à un intervalle de valeurs possibles de l'attribut pour l'objet décrit

Dans CIME2 [ETIFIER 88], on a enrichi la syntaxe en exprimant chaque fait sous la forme d'un quadruplet:

$$(\textit{type} , \textit{objet} , \textit{attribut} , \textit{liste}) \quad (\text{II})$$

où

type	désigne la nature de l'objet décrit
liste	désigne soit les valeurs de l'attribut, soit les autres objets avec lesquels l'objet désigné possède un lien hiérarchique

¹ Il s'agit là d'un problème épistémologique d'envergure que nous nous contenterons d'évoquer en citant W.M.O'Neil : " Bien qu'une distinction entre fait et théorie puisse être établie sur un plan général, les éléments précis de notre savoir sont des mélanges, en proportion variable, de faits et de théories" (in W.M.O'Neil, "Faits et théories", Colin, 1972, pp26-27).

IV.2. La syntaxe des règles

Comme nous l'avons vu, il s'agit de *règles de production* de la forme:

Si
conditions
Alors
conclusions

Dans la partie *conditions*, on pourra exprimer les relations concernant des faits tels qu'ils sont décrits plus haut

Si
 type,attribut,objet,**comparateur**, valeur (III)

où

comparateur est un comparateur logique: "=" et "<"
 ou arithmétique: "<", ">", "<=", ">=",

Il est également prévu de comparer la valeur d'un attribut à celle d'un attribut d'un autre objet (ou du même) en écrivant:

Si
 attribut1(objet1),**comparateur**, attribut 2 (objet 2)

On peut également paramétrer les objets par des *variables* de la façon suivante:

Si
 type ?x = pixel
 altitude ?x < a

Si l'on utilise plusieurs variables la comparaison entre attributs peut s'écrire:

Si
 attribut_x ?x ,**comparateur**, attribut_y ?y

La partie *conclusions* ne peut comporter que des *affectations* (affectation d'une valeur d'attribut pour l'objet correspondant) ou des noms d'**Actions** internes ou externes ¹.

Une règle est déclenchable si sa partie *conditions* est vérifiée. Les affectations ou les actions de la partie *conclusions* peuvent alors être exécutées. La base de faits est modifiée en conséquence.

¹ Les actions internes sont des procédures propres au système tandis que les actions externes sont effectuées à l'extérieur du système. Seul leur nom est connu du système ce qui lui permet de les déclencher.

V. REPRESENTATION DES CONNAISSANCES

Il convient d'examiner plus précisément la façon dont les différentes catégories de connaissances que nous avons évoquées vont pouvoir être représentées à l'aide de la syntaxe choisie. Cette syntaxe est similaire à toutes celles qui sont classiquement utilisées dans l'écriture des systèmes de production [VIGNARD 87]. Nous verrons cependant dans ce paragraphe, qu'il a été nécessaire d'y ajouter des éléments afin d'enrichir l'expression des connaissances mises en oeuvre dans l'interprétation des images de télédétection.

V.1. Représentation des entités iconiques

Pour représenter les entités iconiques comme des données factuelles du système, on utilisera le formalisme tel qu'il est mentionné en (II) comme le montrent les exemples du Tableau 8.

type : pixel

nom : P_i

attributs :

radiométrie: r_1, r_2, r_3, r_4

type : région

nom: R_k

attributs :

texture : hétérogène

moyenne : 50

variance : 20

surface 100

Tableau 8 : représentation des entités iconiques

Les attributs permettent ici de caractériser l'entité de façon intrinsèque par des descripteurs de premier ou de deuxième niveau. Mais d'après ce que nous avons vu au paragraphe 3.2, ce type de caractérisation ne suffit pas. Il faut pouvoir décrire les relations *topographiques* entre les entités iconiques par l'intermédiaire de relations du type : *proximité*, ou *adjacence*.

Ces relations seront évaluées par des fonctions propres au système ¹ introduites par des mots-clés répertoriés dans un lexique. Ces fonctions correspondent la plupart du temps à l'application d'un algorithme de calcul permettant d'évaluer les relations correspondantes². On pourra ainsi utiliser ces mots-clés comme des comparateurs en condition de règle de la façon suivante:

Si

adjacent ?x ?y

La prémisse sera vraie ou fausse suivant le résultat retourné par la fonction.

Les relations *structurelles* entre les entités iconiques sont décrites à l'aide d'une liste attachée à un objet suivant le formalisme décrit en (II). La liste correspond soit à une *liste de propriétés* P_i soit à une *liste de liens hiérarchiques* H_i .

Dans la liste $(P_1, P_2, P_3, \dots, P_n)$, les P_i sont les propriétés que doivent vérifier les éléments *constituant* l'objet décrit. Chaque P_i a alors la structure suivante:

(type, attribut, comparateur, valeur)

Par exemple le fait suivant:

(région, 22, constituants, ((pixel, altitude, <, 3000), (pixel, pente, >, 0.4)))

doit se lire : "La région 22 est constituée de pixels dont l'altitude est inférieure à 3000 mètres et la pente supérieure à 40%".

Dans la liste (H_1, H_2, \dots, H_n) les H_i ont la structure particulière suivante :

(T_p, N_p)

où :

T_p est le type du *père* hiérarchique c'est à dire de l'élément dont l'objet est un constituant

N_p est le nom du *père*

Par exemple le fait suivant :

(pixel, 4, *père*, région, 1)

doit se lire : "le pixel numéro 4 est un constituant de la région numéro 1".

V.2. La représentation des connaissances thématiques.

Contrairement aux entités iconiques, les entités thématiques seront désignées comme les valeurs d'un attribut particulier que nous avons appelé *classes*, dans la mesure où les concepts utilisés servent dans notre système, à classer des entités iconiques. Les entités thématiques sont ainsi représentées sous la forme d'un attribut décrivant les entités iconiques. On a

¹ Il s'agit de fonctions booléennes (ie dont le résultat est vrai ou faux)

² Le statut de ces fonctions au sein du système est différent de celui des traitements d'image puisqu'elles fonctionnent comme des boîtes noires dont la description n'est pas accessible à l'utilisateur.

utilisé le pluriel du mot *classe* car il s'agit d'un attribut *multivalué*¹ dans la mesure où, à une étape quelconque du processus, plusieurs entités thématiques possibles peuvent être retenues pour interpréter une même entité iconique.

Dans le Tableau 9, on a repris l'exemple du Tableau 6, auquel on a adjoint la représentation du contenu thématique d'une entité iconique particulière à l'aide du formalisme décrit en (II).

type : région
 nom: R_k
 attributs :

texture :	hétérogène
	moyenne : 50
	variance : 20
surface	100
classes	forêt, habitat

Tableau 9 : description thématique d'une entité iconique

L'interprétation peut s'effectuer à l'aide de règles. Ainsi, on utilisera le formalisme des règles de production décrit en (III) pour exprimer la caractérisation iconique et radiométrique d'une entité géographique. Ainsi, dans l'exemple du Tableau 10, on représente les connaissances telles qu'elles ont été décrites dans l'exemple du Tableau 4 bis, à l'aide d'une règle de production où l'attribut *classes* apparaît en partie *conclusions*, et où les entités iconiques associées apparaissent en partie *conditions*.

Si

type ?x = région
 taille ?x = grande
 texture ?x = hétérogène
 bande_rouge ?x = basse

Alors

classes ?x = forêt_claire

Tableau 10 : caractérisation iconique et radiométrique d'une entité thématique à l'aide d'une règle

Nous avons vu (§3.3) que l'expression des connaissances thématiques supposait la donnée d'une taxinomie d'entités thématiques qui peut être décrite comme une relation hiérarchique entre entités selon l'axe de spécialisation-généralisation. Elle implique également la description de relations spatiales et structurales. Pour représenter ces relations comme des relations entre objets, nous avons choisi de considérer que l'attribut *classes* est un objet de type *attribut* et que que les valeurs prises par cet attribut sont des objets de type *valeur*. (par exemple *forêt* est un objet de

¹On dira qu'un attribut est multivalué si un même objet peut être décrit par plusieurs valeurs différentes de cet attribut, sans que le fait ainsi défini ne génère de contradiction.

type *valeur*). On peut de cette façon décrire les relations entre ces objets , et en particulier la taxinomie des entités thématiques à l'aide du mot-clé ***sorte_de***. On exprimera par exemple que forêt_claire est une sorte de forêt de la façon suivante:

```
type : valeur
nom: forêt_claire
attributs :      sorte_de : forêt
```

L'intérêt d'une représentation du lien hiérarchique entre entités thématiques pour décrire le processus d'interprétation peut être illustré par l'exemple suivant:

Si

```
type ?x = région
taille ?x = grande
texture ?x = hétérogène
classes ?x = sorte_de forêt
```

Alors

```
classes ?x = forêt_claire
```

Les relations spatiales et structurelles entre entités thématiques seront représentées de la même façon que les relations entre entités iconiques.

V.3. La représentation des traitements

Les différents traitements sont représentés comme des objets de type *traitement*. ils sont décrits par une suite d'attributs permettant de définir les conditions nécessaires à leur application aux données iconiques. Ces attributs peuvent être:

- Les Entrées
- Les Paramètres d' entrée
- Les Sorties
- Les Paramètres de sortie
- Le Contrôle

Les Entrées et les Sorties sont obligatoirement des données iconiques, contrairement aux Paramètres d'entrée qui représentent des informations numériques ou symboliques permettant d'exécuter les traitements, ou aux Paramètres de sortie qui correspondent aux résultats des traitements qui ne sont pas des entités iconiques. Le Contrôle représente les contraintes permettant de valider la cohérence des résultats.

On indiquera également la *catégorie* du traitement décrit. Cet attribut, par analogie à l'attribut *classes* (cf § 5.2) va permettre de décrire la hiérarchie des traitements évoquée au Tableau 5, à l'aide du mot-clé ***sorte_de***. Ainsi, un traitement qui appartient à la catégorie *classification dirigée*, appartiendra de ce fait à la catégorie ***sorte_de classification multivaluée***. Il héritera donc de toutes les propriétés des traitements appartenant à cette dernière

catégorie, et en particulier des valeurs de leurs attributs. Cela permet de spécifier certains descripteurs d'un traitement en fonction de sa catégorie, comme l'indique la règle suivante:

Si

type ?x = traitement

catégorie ?x = *sorte_de* classification_dirigée

Alors

Entrées ?x = pixels_entrainement

Dans l'exemple du Tableau 11, on trouvera la description générale du traitement DNP. Comme tous les autres traitements, il ne pourra être exécuté que lorsque l'ensemble des attributs valables (ie différents de ()) seront valués.

type :	traitement
nom:	dnp
attributs :	
catégorie :	segmentation dirigée
Entrées	pixels_entrainement
Sorties	()
Paramètres_Entrées	()
Paramètres sortie	segments
Contrôle	nombre_de_segments

Tableau 11: Description d'un traitement

VI. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES: DE CIME A CIME2

Le système CIME, qui est destiné à produire une carte de la végétation en zone montagneuse, à l'aide des données de télédétection [MERING et al 88] a constitué notre première expérience de développement d'un système expert. Le développement et l'utilisation de ce système à propos d'une application thématique précise (cartographie de la végétation de la région de Salmé au Népal Central, à l'aide des images du capteur Landsat MSS et d'un modèle numérique de terrain) a permis de démontrer les possibilités de ce type de système pour décrire et reproduire une méthode de cartographie thématique [BLAMONT et al 88]. Cependant, CIME a été conçu à partir de l'assimilation d'une méthode de cartographie à une méthode de classification des éléments d'image à l'aide d'attributs variés. En fait, comme on l'a montré ici, le processus d'interprétation peut être modélisé de façon plus riche et plus complète. Les outils syntaxiques de CIME pour la représentation des connaissances, ainsi que les mécanismes d'exploitation des connaissances mis en place ne permettaient pas d'utiliser ce modèle. En particulier, CIME, ne permet de décrire qu'un seul type d'entités iconiques, les *pixels*. Les autres connaissances factuelles sont décrites à l'aide d'un seul type nommé type *général*. La pauvreté de cette représentation rendait difficile la prise en compte de la transformation dynamique de l'image. De même, les traitements étaient décrits de façon figée comme des procédures

directement exécutables, ce qui rendait impossible la prise en compte des raisonnements consistant à choisir un traitement puis à exécuter un programme. Enfin CIME ne connaissant qu'un seul niveau de description de la taxinomie thématique, ne permettait pas la représentation d'une connaissance approfondie du contenu de la scène.

C'est pourquoi, nous avons envisagé de développer CIME2, qui n'est pas un système expert mais plutôt un ensemble cohérent d'outils logiciels (langage pour la représentation des connaissances et mécanisme d'exploitation) pour le développement de systèmes experts dans le domaine de l'interprétation thématique des images de télédétection.

On a décrit plus particulièrement dans cet article des outils pour la représentation des connaissances dans un domaine considéré. La question des stratégies ou des heuristiques employées en télédétection n'a pas encore pu être abordée sous l'angle général, ni celle de la conception d'une architecture générale pour les systèmes experts en télédétection. Or, pour développer des systèmes flexibles et modulaires dans le domaine de la télédétection, il nous apparaît désormais nécessaire de concevoir des architectures spécialisées reposant sur la modélisation de l'interprétation des images spatiales, c'est à dire des connaissances thématiques, ainsi que des stratégies et des contrôles devant être mis en oeuvre pour résoudre cette famille particulière de problèmes.

BIBLIOGRAPHIE

- AMAT J.L "Automatisation de Traitements d'images". Thèse d'Université, Nice, 1987.[AMAT 87]
- BLAMONT D., MERING C. : "CIME an Expert system for Landuse and Vegetation Mapping by Remote Sensing : The Example of a mountainous area , Proceedings of Ninth Asian Conference on Remote Sensing, Bangkok, 1988, pp A-2-2-1, A-2-2-8 [BLAMONT et al 88]
- CERVELLE B.: "Réflexion de la lumière solaire par les matériaux minéraux: quelques éléments" Actes des Journées de Télédétection de Bondy, collection *Colloques et Séminaires*, Ed. ORSTOM, Paris..[CERVELLE 89]
- ETIFIER A. : Application des systèmes experts à la cartographie par télédétection. Rapport de stage de Dess, Document multigraphié, ORSTOM, 1988.[ETIFIER 88]
- ETIFIER A. : "Les algorithmes particuliers de CIME2". Actes des Journées de Télédétection de Bondy, collection *Colloques et Séminaires*, Ed. ORSTOM, Paris.[ETIFIER 89]
- HATON J.P.: Techniques d'intelligence artificielle pour l'analyse et l'interprétation des signaux. Actes du 11^{ème} Colloque du GRETSI, 1987.[HATON 87]
- KODRATOFF Y. : "Leçons d'Apprentissage Symbolique Automatique", Ed Cepadues, Toulouse, 1986, 189p.[KODRATOFF 86]
- LAURIERE J.L. : "Intelligence Artificielle, Tome 2, représentation des connaissances", Ed Masson, Paris 1988, 196p.[LAURIERE 88]
- MERING C., BLAMONT D., GANASCIA J.G., MONJANEL F.: CIME, une application des systèmes experts à la télédétection. Actes des 8^{èmes} journées intern. sur Les systèmes experts et leurs applications, Vol 3, Avignon, 1988, pp427,448. [MERING et al 88]
- MONJANEL F.: "Système expert appliqué à la télédétection". Rapport de stage de Dess, Document multigraphié, ORSTOM, 1988.[MONJANEL 87]
- NAGAO M. and MATSUYAMA T.: "A structural analysis of complex aerial photographs", Plenum, New York, 1980.[NAGAO 80]
- VIGNARD P.: "Représentation de connaissances, mécanismes d'exploitation et d'apprentissage", Ed INRIA, Rocquencourt, 1987, 206p.[VIGNARD 87]
- C. VOGEL: "Génie Cognitif", Ed Masson, Paris, 1988, 196p. [VOGEL 88]

LES ALGORITHMES PARTICULIERS DE CIME.2

Agnès ETIFIER

INTRODUCTION

Cime (Cartographie Intelligente en Milieu montagnard), est un système expert destiné au traitement d'images satellitaires [MERING 88]. Initialement, les régions étudiées étaient les zones montagneuses du Nepal, le but étant de trouver la meilleure chaîne de traitements pour produire des cartes thématiques de la végétation. CIME.1, la première version de CIME [Monjanel 87], devait faire les preuves de faisabilité de l'implémentation sous forme de système expert d'une démarche en télédétection ayant pour but la cartographie thématique. Ce but a été atteint, et l'expérience a permis de révéler les difficultés inhérentes à une telle implémentation. : un aspect encore très procédural, imposé au système par les règles; une imbrication trop forte entre le contrôle (la partie informatique du système), et la stratégie; un objectif limité (on ne peut aller plus loin que la production d'une chaîne de traitements); et une lourdeur, source d'inefficacité, dans la gestion des données utilisées. L'étude précédant la mise en place de CIME.2, la seconde version de CIME [Etifier 88], a mis en avant la nécessité d'adopter des algorithmes spécialement destinés à la gestion des hypothèses d'une part (ce qui permet à l'expert d'envisager une stratégie particulière, et des objectifs plus ambitieux que la seule production de cartes thématiques), et à la gestion des données utilisées dans le système d'autre part (il s'agit de la gestion de la base de connaissances, et des nécessaires mise à jour qui doivent y être faites). Ce sont donc ces deux algorithmes qui sont présentés ici.

I. CH

I.1. Les hypothèses

Une session de CIME consiste à sélectionner une chaîne de traitements de l'image parmi plusieurs. Ces chaînes étant elles mêmes une succession d'étapes, une étape est l'application d'un traitement à l'image suivie de l'évaluation des résultats obtenus. La meilleure des chaînes est celle pour laquelle **le choix** des traitements et de leurs paramètres est pertinent. Puisque plusieurs combinaisons sont possibles (l'ordre d'introduction de ces paramètres étant important), les choix à effectuer doivent être supervisés. De plus, dans le cas où plusieurs méthodes sont envisageables pour produire les éléments nécessaires au traitement, le nombre de possibilités peut devenir très grand (en fait, ce nombre dépend directement du nombre de paramètres pris en compte par les méthodes). Dans la première version de CIME, la gestion des étapes et des chaînes par les règles, fait qu'en cas d'échec, aucun mécanisme de reprise n'est possible : la chaîne est abandonnée. Il aurait été souhaitable de pouvoir remettre en cause la dernière étape de la chaîne ayant conduit à l'échec. Ce rôle que jouent les règles, impose un déroulement très procédural de la recherche, et fait qu'il n'y a pas toujours une parfaite adéquation entre les données et la stratégie de recherche. Lorsque l'on met en place une chaîne, on **suppose** donc que les choix effectués sont bons, mais s'ils ne l'étaient pas, il faudrait pouvoir revenir sur ces choix, et en effectuer d'autres. Il a donc été décidé de gérer les chaînes et les étapes pour leur mise en place et leur remise en cause, en tant qu'**hypothèses**. Une hypothèse dans CIME.2 concernera donc la *méthode* (de classification par exemple), et les *arguments* de cette méthode. Le problème à résoudre est donc la gestion des hypothèses : leur émission, l'évaluation de leur pertinence, et leur remise en cause.

I.2. Présentation de l'algorithme

ADDB [De Kleer 86], pour Assumption-based Dependency-Directed Backtracking, est en fait un algorithme permettant de procéder à un ensemble de choix qui soit complet, permettant ainsi l'obtention d'une solution valide. Pour cela, ADDB gère une pile (i.e. : une structure dynamique de stockage d'informations) dont les éléments sont appelés **disjonctions de contrôle**, et qui représentent des ensembles d'assertions incompatibles deux à deux. Chacune de ces assertions constituera une **hypothèse du contexte**. L'utilisation de ADDB suppose que toute solution ne peut être valide que si elle se réalise dans un environnement (i.e. ensemble d'hypothèses) où exactement une assertion, issue de chaque disjonction de contrôle, a été prise comme hypothèse (c'est ce qui a été appelé ensemble complet de choix).

I.3. C.H. : Une adaptation de A.D.D.B. à CIME.2

Dans la nouvelle version de CIME, les hypothèses sont faites suivant un principe s'inspirant de ADDB. Rappelons que dans CIME.2 ce sont les

méthodes et leurs arguments qui constituent les hypothèses.

- De ADDB, il a été retenu la gestion des disjonctions de contrôle qui permet :
- => d'effectuer toutes les combinaisons d'éléments pouvant être sélectionnés;
 - => une évolution dynamique de l'espace de recherche, par ajout ou retrait de disjonctions de contrôle;
 - => des retours arrière, sur les choix effectués, qui soient contrôlés;
 - => d'être sûr d'avoir une solution se réalisant pour un ensemble de choix complet.
- exemple : une pile de CIME peut être :

```
méthode(dnp,sebest,hypercube)
variables(radiométrie,altitude..)
parcelle_entrainement(P1,P2)
```

dans ce cas, un ensemble complet de choix peut être :

(dnp,altitude,P2)

ou

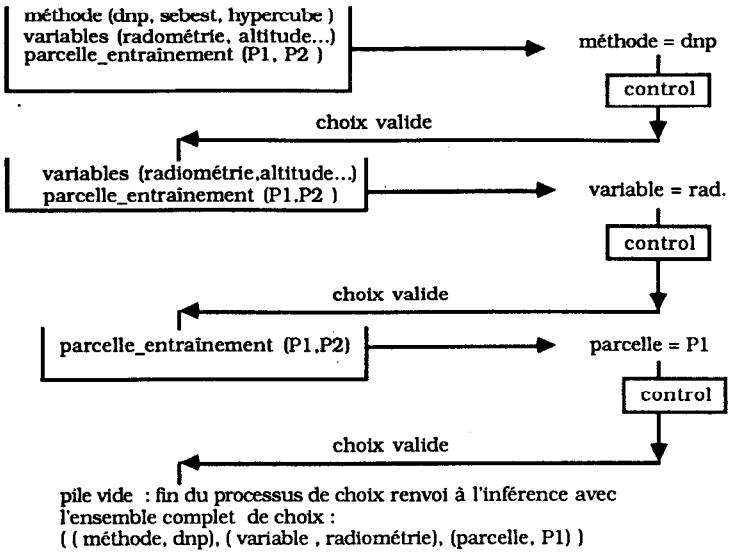
(sebest,radiométrie,P1)

1.4. L'algorithme

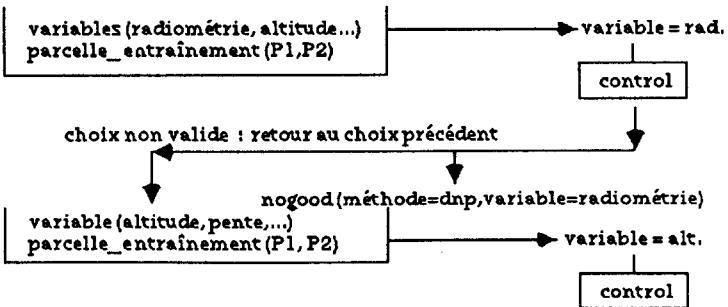
Le principe de l'algorithme est le suivant :

- a) Partir d'un ensemble d'hypothèses initialement vide,
- b) Si la pile est vide, l'environnement est complet =>le tester et éventuellement inférer (c'est à dire utiliser l'ensemble complet de choix obtenu pour l'étape)
- c) Si la pile n'est pas vide, dépiler la disjonction en sommet de pile
- d) Si la disjonction n'a plus d'élément => retourner au dernier choix effectué
- e) Si la disjonction a encore des éléments => prendre le premier de ces éléments, et l'ajouter à l'environnement courant
- f) Si ce nouvel environnement est consistant (i.e. il n'engendre aucune contradiction), recommencer en b)
- g) Sinon, enregistrer l'environnement courant comme étant mauvais ("nogood") afin de l'éviter par la suite, et retourner au dernier choix effectué.

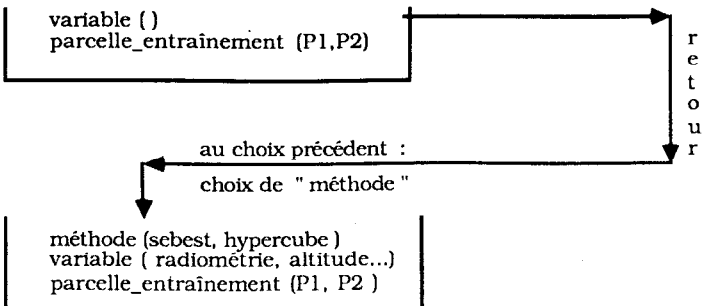
exemple de fonctionnement: en reprenant la pile précédente



S' il se trouvait que l'environnement ne soit pas consistant après le choix de (variable = radiométrie), on aurait :



dans le cas où la disjonction de contrôle "variable" ne contiendrait plus d'élément, il se passe la chose suivante :



Plus aucun choix n'est possible lorsque l'on parvient "en retour" à la première disjonction et que celle-ci est vide : on a alors examiné toutes les possibilités.

Une particularité de cet algorithme, est la gestion dynamique des disjonctions de contrôle : en cours de session, de nouvelles disjonctions peuvent être ajoutées à la pile (on dit alors qu'elles deviennent *actives*), ou enlevées de la pile (on dit alors qu'elles deviennent *passives*). Cette gestion se fait à l'aide de règles d'inférences dites de contrôle, qui sont gérées par le moteur d'inférences comme les autres règles du système.

exemple : avec les mêmes éléments que précédemment, supposons que le choix de dnp implique la nécessité de prendre en compte l'ensoleillement (lumière:présente,rasante,absente). Dans ce cas on écrira la règle suivante :

si méthode = dnp
alors active(lumière(présente,rasante,absente))

Si effectivement dnp est choisie comme méthode, la pile devient :

lumière(présente,rasante,absente) variable(radiométrie,altitude,...) parcelle(P1,P2)
--

La disjonction "méthode" n'apparaît pas ici puisqu'elle a été dépilée pour procéder au choix de (méthode = dnp). Si la méthode choisie n'était pas dnp, cette règle n'aurait pas été appliquée.

Inversement, si la méthode "sebest" ne nécessite pas le choix d'une parcelle d'entraînement, on écrira la règle suivante :

si méthode = sebest
alors passive(parcelle_entrainement)

On remarque qu'ici les valeurs d'assertions P1 et P2 ne sont pas utiles car c'est l'ensemble de la disjonction qui est inhibé. Dans le cas où "sebest" est sélectionnée, et la règle appliquée, la pile devient :

variable(radiométrie,altitude,...)

1.5. Les raisons du choix d'ADDB

Les raisons justifiant le choix de ADDB sont les suivantes :

- Sa *souplesse* qui permet de :

- 1) rechercher une ou plusieurs solutions à un problème, sans qu'il y ait perte d'efficacité, comparativement aux autres méthodes. Dans la cas de CIME, ceci est appréciable car les différents sous-buts peuvent nécessiter des stratégies de recherche très différentes : on cherchera **toutes** les solutions quand il s'agira de classer les pixels de l'image pour produire une carte (on ne retient alors que la meilleure), ou **une** solution quand il s'agira d'en extraire des éléments caractéristiques, ou de focaliser la recherche.
- 2) modifier dynamiquement la forme de l'espace de recherche, par ajouts

ou retraits de disjonctions de contrôle. Ainsi dans CIME.2, pourra-t-on envisager de réduire l'espace de recherche au vu de certains résultats; faire appel à des procédures externes n'ayant pas toutes le même type, ni le même nombre d'arguments, sans avoir de gestion particulière à chaque cas.

- Ses performances

Dûes au retour arrière chronologique qui permet de revenir sur le dernier choix effectué et non sur un choix quelconque. Ceci évite les retraits "aveugles", et des tentatives inutiles.

Il peut donc être intéressant, dans un système tel que CIME où le nombre de données traitées est grand et les traitements coûteux, d'expérimenter ces possibilités d'optimisations, et de mettre à profit les facilités offertes par cet algorithme.

II. T.M.S.

II.1. Les mises à jour dans la base de connaissances

A chaque nouvelle étape, les données utilisées dans le système sont réinitialisées, car leur grand nombre interdit toute duplication. Par ailleurs, au cours de l'étape, l'application des segments nécessite, pour tous les pixels, une nouvelle instanciation de la valeur de l'attribut "classe". Le processus classique de mise à jour consiste à enlever de la base de connaissances les faits correspondant aux anciennes valeurs, et à insérer ceux correspondant aux nouvelles, afin de toujours conserver une base de connaissances cohérente.

Il est important de remarquer que le principe de fonctionnement impose la nécessité de toujours avoir une base de connaissances **cohérente**. Cela signifie qu'aucune contradiction ne doit exister dans les faits contenus dans la base (par exemple l'existence simultanée des faits $X=1$ et $X=2$, constitue une contradiction). La conséquence d'une contradiction dans un système déductif tel que CIME, c'est que des inférences pourraient avoir lieu sur des données erronées (ie. participant à la contradiction), ce qui entraînerait la production d'autres faits eux même erronés.

Dans CIME.1, la procédure chargée de ces mises à jour, procède au retrait de tous les faits de la base de connaissances, et en se basant sur les dates de validation, par la suite, valide de nouveau les faits ne devant pas être remis en cause. Etant donné le nombre important de faits devant à chaque fois être "revalidés" et la fréquence de ces mises à jour, le temps d'exécution de cette procédure est particulièrement important.

II.2. Présentation de la structure utilisée

Afin d'optimiser le processus de mise a jour, des informations précises sont nécessaires pour un fait donné F :

- * Les faits permettant de l'obtenir
- * Les faits qu'il permet de déduire

et parmi ces deux ensembles il faut repérer les éléments nécessaires et ceux

qui ne sont que suffisants.

exemple :

Base de faits initiale (A,B,D,E)

Base de règles = R1 : A,B -> C (si A et B alors C)

R2: D -> C

R3: B,E -> F

R4: C -> G,H

R5: F -> G

R6: B -> E

après application de ces règles la nouvelle base de faits est :

(A,B,C,D,E,F,G,H)

si l'on est amené à enlever le fait B de cette base, cela entraînerait le seul retrait de F puisque C peut toujours être déduit par la règle R2.

T.M.S. [Dougle 79], pour Truth-Maintenance System, utilise une structure de données particulière lui permettant d'avoir accès, pour chaque fait F, à toutes ces sortes d'informations qui mettent en évidence les liens de dépendance entre les données (data dependencies), et qui est la suivante :

(F,Liste des justifications,Liste des justifiés,Liste des supporteurs,Liste des supportés,Statut)

où :

- Liste des justifications** : liste des faits ayant permis par leur présence (IN-justifications), ou par leur absence (OUT-justification), de dériver F.
- Liste des justifiés** : Liste des faits ayant F dans leurs justifications.
- Liste des supporteurs** : Liste des faits issus de la liste des justifications, et choisis comme support principal.
- Liste des supportés** : Liste des faits ayant F dans leur liste des supporteurs.
- Statut** : a pour valeur **IN** ou **OUT**, suivant que le fait est ou non correctement justifié.

Avec cette structure, les faits initiaux (ou prémisses) ont une liste des justifications vide. Pour qu'un fait F ait un statut à IN, il faut qu'il ait au moins une chaîne de justifications non circulaire, partant de F, et aboutissant à un fait initial ou à une hypothèse. D'où la notion de WFS, pour Well Founded Support, dont le supporteur est un représentant. Pour un fait de statut IN, plusieurs chaînes de justifications peuvent exister. Lorsque le statut d'un fait est à OUT, la liste des supporteurs contient un représentant de chaque élément de la liste des justifications.

Les contradictions sont détectées par le module déductif, qui en informe TMS en lui fournissant la liste des faits (justifications) engendrant la contradiction.

exemple : avec les bases initiales précédentes on a:

(A,[],[C],[],[],IN)

(B,[],[C,F],[],[],IN)

II.3. Présentation de l'algorithme

Les mises à jour, gérées par TMS, s'effectuent lorsque le statut d'un fait passe de **IN** à **OUT** par invalidation d'une assertion; ou, inversement, lorsque ce statut passe de **OUT** à **IN** par ajout de nouvelles justifications.

Algorithme de gestion des ajouts et des retraits de faits : D.B.G.C. (Data Base Garbage Collector)

Lors de ces mises à jour, les faits supportés sont examinés, leur liste de supporteurs et leur statut recalculés, et ceci récursivement. Les faits ajoutés sont transmis par le module déductif avec leurs justifications, les faits à enlever sont simplement signalés à TMS, et la mise à jour se fait comme suit :

* Ajout de F et de <Liste de justifications>

Il y a mise à jour des justifiés de F, par introduction de F dans la liste des justifications.

exemple : application de R1 => ajout de C + [(A,B)]

d'où : (C,[(A,B)], [G,H], [A,B], [], IN)

(A, [], [C], [], [C], IN)

(B, [], [C], [], [C], IN)

mise à jour de G et H :

(G, [C], [], [], OUT)

(H, [C], [], [], OUT)

* Suppression de F

exemple : suppression de (B, [], [C,E,F], [], [C,F], IN)

Pour chacun des justifiés F' de F (ici pour C,E et F)

-> Si F n'est pas supporté par F : il y a mise à jour de ses justifications, par suppression de toutes celles contenant F.

exemple : c'est le cas de E qui devient :

(E, [], [F], [], [], IN)

E est un fait initial, et sauf retrait explicite, il demeure valide.

-> Si F est supporté par F (cas de C et F)

-Le statut de F' passe de **OUT** à **0** afin de rechercher un autre supporteur pour F' (Le statut **0** est un statut **OUT** provisoire, qui ne sert que le temps de mise à jour).

-F' est mis provisoirement dans une liste L de faits à étudier.

-Ce même processus est appliqué récursivement aux supportés de F'.

Remarque : L'utilisation du statut provisoire 0 et de la liste d'examen L, sert à éviter les justifications circulaires.

exemple : F -> F'

F' -> G

G -> F'

Ce cycle s'arrête de deux façons :

- 1°) Un élément de la liste L a son statut qui passe de **O** à **IN** : un autre supporteur lui a été trouvé. Dans ce cas, tous les éléments de liste sont réexaminés.
- 2°) On est arrivé à des faits initiaux ou à des hypothèses sans qu'aucun élément de la liste ait eu son statut changé. Alors, F' est affecté d'un statut **OUT**, ainsi que tous ceux de la liste.

fin de l'exemple :

- * Premier pas : les statut de C et F passent provisoirement à 0 et $L = (C,F)$
- * Examen de C : un autre supporteur lui est trouvé : c'est D
- * => Le statut de C passe de 0 a IN
- * Réexamen de la liste $L = (F)$
- * Réitération du processus => $L = (F,G)$ (car G est supporté par F)
- * Un autre supporteur est trouvé pour G : c'est C
- * => Le statut de G passe de 0 a IN
- * Réexamen de la liste $L = (F)$
- => Plus aucune itération n'est possible => F est doté d'un statut **OUT** définitif.

BIBLIOGRAPHIE

- MERING C., BLAMONT D., GANASCIA J.G., MONJANEL F. : CIME : Une application des systèmes experts à la télédétection. Actes des 8ème rencontres internationales d'Avignon "Les systèmes experts et leurs applications"; 1988.[Blamont 88]
- DE KLEER J. and B.C. WILLIAMS : Back to Backtracking : Controlling the ATMS. Actes du colloque AAAI, vol 2, pp 132-139; 1986.[de Kleer86]
- DOYLE J. : A Truth-Maintenance System. Artificial Intelligence, vol 12,3; 1979.[Doyle79]
- ETIFIER A. : rapport de D.E.S.S. : Application des systèmes experts à la cartographie par télédétection, Université d'Orsay L.R.I., 1988.[Etifier88]
- MONJANEL F. : rapport de D.E.S.S : Système expert appliqué à la télédétection, Université d'Orsay L.R.I., 1987.[Monjanel87]