

EXPERIMENTATION SUR L'UTILISATION DES DONNEES LANDSAT
POUR L'ETUDE ECOLOGIQUE DES ZONES ARIDES
DE TUNISIE (EXPERIENCE ARZOTU)

EXPERIMENTING WITH LANDSAT DATA TO CARRY OUT
ECOLOGICAL STUDIES OF THE ARID
ZONES OF TUNISIA (ARZOTU EXPERIMENT)

G. Long, B. Lacaze, Mme G. Debussche et E. Le Floch
Centre d'Etudes Phytosociologiques et Ecologiques L. Emberger

M. Sta-M'Rad
Institut National de la Recherche Agronomiques de Tunisie

R. Pontanier et A. Le Cocq
Office de la Recherche Scientifique et Technique Outre-Mer

RESUME

Une expérience (menée en collaboration avec le Centre National d'Etudes Spatiales de France) portant sur la valorisation thématique de données Landsat acquises en 1975-76 a été entreprise en Tunisie du Sud; elle s'appuie sur des données-terrain, relevées par une équipe interdisciplinaire, et sur des travaux de cartographie phyto-écologique, édaphique et de l'environnement.

Les auteurs présentent les résultats issus de l'analyse des images traitées en couleurs additives. Ils discutent les modalités de réalisation d'un zonage à deux niveaux de perception du territoire étudié, à partir de données diachroniques.

Ils étudient ensuite dans quelle mesure les zones délimitées par photo-interprétation correspondent à des secteurs écologiques et/ou à des paysages pédologiques. Ces zones sont également proposées comme zones d'apprentissage pour la validation et la généralisation des résultats de l'analyse numérique.

Enfin, il est envisagé d'utiliser ce zonage, qui est l'expression de diverses caractéristiques spectrales, comme support de la stratification de l'échantillonnage en vue d'un diagnostic écologique.

L'évolution temporelle des réponses spectrales d'agrégats d'éléments de résolution convenablement repérés et validés à partir de données-terrain fait l'objet de commentaires appropriés à la fois au niveau des techniques de traitement informatique et des caractères écologiques des unités considérées. Les possibilités de généralisation sont alors esquissées.

L'accent est mis sur la capacité des systèmes d'analyse et de traitement des données à fournir des réponses pertinentes aux questions que se posent les responsables des pays en cours de développement dans cette partie du monde soumise à des contraintes écologiques particulières.

ABSTRACT

An experiment (supported by the Centre National d'Etudes Spatiales de France) with the thematic development of Landsat data gathered in 1975-76 has been undertaken in Southern Tunisia. It is based on ground data collected by an interdisciplinary team and on phytoecological, edaphic (soil) and environmental cartography.

The authors present the results of the analysis of colour-treated imagery. They discuss the possibilities of creating a zoning system based on two perception levels with regard to the territory under study, using diachronic data.

"Presented to the 4th Canadian Symposium on Remote Sensing, Québec City, May 1977". - 8 AOUT 1979

Ottawa, Institut géométrique et spatial du Canada - O. R. S. T. O. M.

They then discuss to what extent the zones demarcated by photointerpretation correspond to ecological units and/or to pedologic areas. These zones have also been suggested as experimental areas for the validation and generalization of data analysis results.

Finally, it is planned to use this zoning system, which is an expression of diverse spectral characteristics, to assist in stratification and sampling with a view to ecological diagnosis.

The temporal evolution of the resolution of spectral responses from aggregates suitably marked and validated on the basis of ground data is appropriately treated both as regards data processing techniques and the ecological characteristics of the units under study. Possibilities of generalization are then outlined.

The accent is placed on systems analysis and data processing capacities to provide appropriate answers to questions asked by those responsible in developing countries in this part of the world which is subject to particular ecological constraints.

1. PREAMBULE

L'expérience ARZOTU, lancée en 1974, est réalisée dans le cadre d'accords de coopération scientifique et technique conclus entre le CNRS et l'ORSTOM, et plusieurs organismes tunisiens participant au Projet *Parcours du Sud* de l'Institut National de la Recherche Agonomique de Tunisie (INRAT). L'expérience bénéficie de l'aide du Centre National d'Etudes Spatiales (CNES).

C'est l'une des rares expériences de ce genre dans la partie aride de la zone écologique méditerranéenne. Elle constitue une étude de *pré-faisabilité de systèmes d'inventaire, d'évaluation, de prévision et de surveillance* de la nature et de l'état des ressources végétales et en terres.

2. LES OBJECTIFS DE L'EXPERIENCE ARZOTU

Les *objectifs* assignés à l'expérience ARZOTU sont les suivants :

- 1) inventaire et évaluation des phénomènes majeurs de la surface
- 2) étude diachronique des cultures et de la végétation spontanée
- 3) étude diachronique de l'état de la surface des sols
- 4) surveillance des conditions écologiques de l'environnement
- 5) étude de la capacité de généralisation pour la cartographie thématique.

3. PRESENTATION GENERALE DU TERRITOIRE ETUDIE

Le territoire concerné par l'expérience ARZOTU est un ensemble de l'ordre de 50 000 km² situé entre les isohyètes moyens annuels de 100 mm et 350 mm caractérisant la Tunisie centrale et présaharienne. C'est, plus exactement, la presque totalité des terres rattachées à l'étage *bioclimatique méditerranéen aride* de la classification d'Emberger. Par ailleurs, c'est la seule partie située à proximité du Sahara où les *potentialités biologiques* sont encore d'un niveau jugé suffisant.

Ce territoire est bien connu sur le plan général : géologie, hydrologie, géomorphologie, pédologie, climatologie, végétation, agriculture... Il est couvert généralement par de bonnes cartes topographiques de base, par des "missions" photographiques aériennes ; il a fait l'objet de nombreuses publications scientifiques et techniques.

Caractères écographiques essentiels

- précipitations moyennes annuelles variant de 100 à 350 mm, à régimes saisonniers contrastés (*1er max. : automne*) ;
- régimes photo-thermopériodiques contrastés (*saisonnement spécifique de la végétation*) ;
- régimes pluvio-thermiques favorisant 2 pics de végétation ;

- grande diversité des formes de terrain : ensemble de *plaines* et de *plateaux* qui se raccordent aux montagnes (*djebels*) par des *glacis* d'érosion et d'accumulation (*seguis*) ;
- réseau hydrographique souvent de type endoréique ou semi-endoréique ;
- grande diversité des types de substrats ;
- grande hétérogénéité locale des "*conditions de la surface des sols*" ;
- grande diversité des systèmes écologiques spontanés et cultivés associés dans l'espace et dans le temps en un grand nombre de combinaisons :
 - plus de 500 phytocénoses, avec des recouvrements allant de 1% à 50% ;
 - cultures herbacées (céréaliculture pluviale épisodique) ; cultures pérennes (arboriculture pluviale à base d'oliviers, d'amandiers, etc) ;
 - longue histoire agricole et pastorale entraînant des modifications fondamentales du paysage rural hérité.

4. PRINCIPES METHODOLOGIQUES GENERAUX

Prenant en considération :

- la documentation de base existante,
- la qualification des experts de l'équipe interdisciplinaire,
- la nature même des données LANDSAT disponibles en 1975-1976,
- les moyens d'analyse des images, de pré-traitement et de traitement des données numériques disponibles,

les principes méthodologiques généraux sont les suivants :

1er principe : Etablissement de divers zonages à partir des images en compositions colorées, en vue de la préparation de l'analyse des données numériques, du repérage de zones écographiques homogènes et stables et de l'identification de thèmes simples susceptibles d'être exprimés à moyenne et petite échelles.

A partir de l'analyse visuelle (photo-interprétation) réalisée sur des images en compositions colorées, on produit une *minute cartographique des zones isophènes*.

Le critère de relative stabilité temporelle des zones isophènes et les critères d'identification des variables discriminantes, après analyse sur le terrain, permettent de caractériser et de délimiter des zones écographiques qui peuvent conduire à l'identification de secteurs écologiques dans certains cas. Zones écographiques et secteurs écologiques constituent les *strates d'échantillonnage* pour la conduite de l'analyse des données numériques. L'analyse des images, complétée par les observations de terrain, permet, en outre, d'identifier les ressources et leurs usages au niveau des zones écographiques en vue de dresser des cartes thématiques générales du 1/100 000 au 1/500 000.

2ème principe : Décodage du message spectral à partir d'une analyse statistique des niveaux de luminance par écotopes de référence et étude des variations spatio-temporelles des réponses spectrales par strate d'échantillonnage écographique. Identification thématique et généralisation par analyse semi-supervisée.

En considérant d'une part, des agrégats d'éléments de résolution correspondant aux écotopes de référence et, d'autre part, des combinaisons des canaux 4 à 7 du MSS et des dates d'acquisition les plus aptes à discriminer les unités des thèmes considérés, on procède à l'analyse statistique des niveaux de luminance enregistrés dans les portions d'image se rapprochant le plus possible des strates définies précédemment.

Puis on recherche, pour un thème donné, le système séparateur capable de satisfaire à la détection fiable des indicateurs thématiques retenus.

L'analyse est semi-supervisée parce qu'elle repose sur le principe de séparabilité statistique des données spectrales aussi bien que sur le principe de séparabilité des classes pertinentes des unités thématiques.

3ème principe : Constat d'obsolescence des strates d'échantillonnage écographique donc, nécessairement, des unités thématiques issues de l'analyse visuelle des images ou de l'analyse semi-supervisée des données numériques.

L'hypothèse d'une démarche aveugle, du type "automatisation totale à partir des données numériques, en vue de proposer des classifications non supervisées" est un mythe, en raison même de l'inadéquation qui existe d'une part, entre la nature exacte des cibles réelles à détecter, leur hétérogénéité spatio-temporelle et, d'autre part, la signification physique du signal enregistré interprétable seulement comme un niveau relatif de luminance.

5. ANALYSE DES DONNÉES-IMAGES

5.1. Exemple d'une analyse visuelle de l'image en compositions colorées (Figure 1)

5.1.1. Cas des zones A : ensemble des steppes de Zougrata

Zone A1. Zougrata s.str.

- . image homogène, fond jaune et taches rouge-brun à noir chiné ;
- . zone plate ; réseau hydrographique peu net.

Il s'agit d'une plaine, constituée de sols sableux, sur substrats limoneux et gypseux (en profondeur). Steppes de ligneux bas (assoc. à *Rhantherium suaveolens* et *Artemisia campestris*) de couverts variables, 5 à 35%, utilisées pour le parcours (80% de la superficie de A1), ou pour la céréaliculture

pluviale (20% de A1).

Zone A2. Hamilet el Babouch

. sur l'image de novembre 1975, A2 est homogène : taches noires en damier très net qui s'atténue en allant du SE au NW. Il s'agit d'un "plateau" à sols limoneux, sur substrat gypseux, dont la différence avec les sols de la zone A1 résulte du fait que l'horizon sableux a été éliminé par l'érosion anthropique et éolienne. La végétation spontanée pérenne est assez rare (rec. inf. à 5%) ; elle est représentée par le faciès à *Artemisia campestris* du stade à *Arthrophytum scoparium* de l'assoc. à *Artemisia herba-alba* et *Arthrophytum scoparium*.

La céréaliculture épisodique est le mode d'utilisation le plus répandu (60% de A2 en système céréales-jachères pâturées ; 40% en parcours très maigres) ; elle est surtout localisée dans la partie sud de A2.

Il faut attirer l'attention sur le fait que deux groupes ethniques se partagent l'utilisation collective de A2. Dans la zone considérée la tribu des Oulad Sidi Medheb est plutôt pastorale alors que la tribu des Beni Zid est plutôt tournée vers la céréaliculture. Ces différences de comportement des 2 groupes sociaux sont discernables sur les images LANDSAT, mais seulement interprétables si l'on dispose de l'information pertinente à ce sujet.

Zone A3. Garaet el Fedjej

- . image hétérogène, à taches brun-rouge clair à noir, irrégulièrement distribuées ; à l'ouest, ces taches sont organisées en un dessin digité convergeant vers une tache gris-rouge sombre qui laisse supposer un réseau de drainage organisé.

Il s'agit du bassin versant d'une grande dépression endoréique présentant une hétérogénéité des sols (sols profonds sableux, limoneux ; sols squelettiques calcaires et gypseux). Les bas-fonds (40%) sont soit plantés en oliviers soit régulièrement cultivés en céréales. La population sédentaire est élevée.

Zone A4. image hétérogène : taches noires en damier peu net alternant avec des taches brun-rouge ; présence d'une grande tache blanc-jaune ;

- . le réseau de drainage est peu net.

Il s'agit aussi d'une zone hétérogène sur le terrain ; elle est caractérisée par l'alternance de sols sableux et de sols gypseux, ces derniers étant surtout localisés en bordure des réseaux de drainage.

Les couverts végétaux pérennes sont très variables surtout sur les sols sableux (couverts de 5 à 30% : assoc. à *Rhantherium suaveolens* et *Artemisia campestris*). La végétation des zones gypseuses est toujours rare ; elle est représentée par l'assoc. à *Anarrhinum brevifolium* et *Zygophyllum album*.

La céréaliculture et l'arboriculture pluviales occupent environ 50% de A4.

Analyse critique de l'ensemble

Les zones A1, A2, A3 et A4 se maintiennent globalement dans leur définition à toutes les dates étudiées, bien que leurs limites soient peu stables dans le détail. Chacune des zones correspond à un *secteur écologique*. On notera que l'on observe une très forte variation saisonnière de A2. La distinction d'une zone A5 est nécessaire au mois de juillet. En effet, à cette date, l'extrémité NW de A2 apparaît alors d'un blanc uniforme. Cette particularité s'explique, à cette date, par la mise à nu totale des limons, après la fin du cycle des espèces annuelles et la récolte des céréales (celles-ci étant peu importantes par rapport aux parcours). Les modalités d'évolution de la zone A2 mettent en évidence les caractéristiques de comportement de deux groupes ethniques distincts qui exploitent les ressources du plateau de Hamilet el Babouch d'une manière différente. Perçue à une seule date sur les images, cette zone écographique correspond à un secteur écologique. Il en est de même pour la zone A6 où en avril et en mai l'abondance de la végétation verte (20% à 60% ; céréales ou annuelles) est prépondérante.

5.1.2. Cas des zones B : ensemble des zones gypseuses de la Sebket en Noual

L'ensemble des zones B correspond à un *secteur écologique* identifié sur le terrain. B1 correspond à des substrats gypseux où dominent les terrains de parcours (80% de B1) et où la végétation peu couvrante (10%) est représentée par l'assoc. à *Anarrhinum brevifolium* et *Zygophyllum album* et sa sous-assoc. à *Lygeum spartium*. A2 diffère de B1 seulement par le recouvrement des espèces pérennes (15 à 20%). B3 correspond à la hauteterrasse de la sebkha favorable à la mise en culture et à la croissance des espèces annuelles. Ce sont les images d'avril et de mai qui coïncident réellement avec les zones vérifiées sur le terrain, car à cette date la confusion entre des sols gypseux et des sols isohumiques profonds est levée, les sols isohumiques étant alors couverts d'une steppe claire à thérophytes (*Stipa retorta*, rec. 15 à 20%).

5.2. Conclusion : validité du zonage proposé et approche thématique

Il apparaît bien que pour les zones A et B on constate une assez bonne compatibilité entre les zones isophènes et les zones écographiques. Regroupées (zones B), ou non (zones A), les zones isophènes peuvent correspondre à des secteurs écologiques.

On constate par ailleurs que la plupart des limites des zones fluctuent dans le temps ; ceci permet de suggérer des subdivisions qui contribuent à *ajouter une information diachro-*

nique à la définition des zones écographiques et des secteurs écologiques.

Enfin, on relève que certaines zones isophènes, après une première analyse sur le terrain, ne sont pas cohérentes avec le processus d'identification. Cela tient aussi bien aux performances du système d'analyse qu'à des réalités analysées sur le terrain (par ex. : hétérogénéité élevée). Ce constat d'échec montre bien les limites du système proposé dans le cas des zones arides au nord du Sahara.

On constate également l'importance de la perception à une seule date d'une zone. Toutes les zones isophènes délimitées à partir de l'imagerie peuvent servir de *zones d'apprentissage*, en qualité de *strates d'échantillonnage*, pour l'analyse semi-supervisée des données numériques MSS-LANDSAT. Il faut cependant avoir présent à l'esprit qu'il sera toujours nécessaire, à cause des phénomènes évolutifs (saisonniers) qui affectent la surface du sol et la couverture végétale, de veiller à la *qualité de durabilité ou de permanence des zones proposées, aussi bien qu'à leurs niveaux de cohérence et de signification écologique*. Au niveau de perception considéré, le contenu thématique des zones ne peut avoir qu'un caractère très général. En l'absence de données phyto-écologiques récoltées sur le terrain il n'est pas concevable de proposer un système d'analyse de l'imagerie qui ait un sens sur le plan écologique. Toutefois, certains facteurs du milieu physique, généralement bien traduits par les images en compositions colorées, et suffisamment importants aux plans géomorphologique, pédologique et hydrographique, constituent des *supports de l'information biologique qu'une analyse diachronique adéquate permet d'identifier* (évolution de la végétation spontanée et cultivée ; effets des décisions des groupes sociaux sur l'utilisation des ressources...), sous réserve que des observations relativement détaillées soient réalisées sur le terrain.

6. ANALYSE DES DONNEES NUMERIQUES

6.1. Echantillonnage et contrôle des écotopes

Les échantillons utilisés sont des portions de l'espace caractérisées par une combinaison relativement uniforme du sol et de la végétation ; ces écotopes se situent au niveau de perception de la station écologique ou de la parcelle cultivée.

La localisation des écotopes est déterminée à partir des strates d'échantillonnage constituées par les zones isophènes de l'imagerie (chap.5), que l'on considère donc ici comme des zones d'apprentissage ; en fait, plusieurs problèmes techniques interviennent dans le processus d'échantillonnage :

- nature des images LANDSAT disponibles et qualité de leur photo-interprétation ;

- contrainte de repérage sur le terrain qui implique la disponibilité d'agrandissements d'images LANDSAT et de photographies aériennes à moyenne et grande échelles à cause de la faible résolution spatiale du système LANDSAT ;
- contrainte de repérage des écotopes sur les documents de visualisation issus des données numériques ; dans le cas présent nous disposons de :
 - listages à l'imprimante d'ordinateur (diverses échelles approximatives),
 - sorties à l'imprimante électrostatique (échelle approximative 1/80 000),
 - tracés automatiques en couleur, en nombre limité (échelles : 1/200 000 et 1/50 000),
 - possibilité d'utilisation d'une console de visualisation TEKTRONIX (logiciel PRESIM du CNES) ;
- nécessité de disposer d'écotopes d'une superficie minimum de 10 à 15 hectares, soit l'équivalent de 20 à 30 éléments de résolution, pour pouvoir faire une analyse statistique des réponses spectrales de ces éléments ;
- contrainte de l'accessibilité au sol des écotopes pour les observations répétitives.

Le contrôle au sol des écotopes concerne d'une part, la description des *caractères permanents* du substrat et de la végétation et, d'autre part, les observations des *caractères temporaires* qui sont faites aux mêmes dates que les enregistrements du satellite LANDSAT. Les fiches de description établies par les thématiciens doivent être adaptées au fur et à mesure de la mise en évidence de l'influence sur les réponses spectrales des paramètres relevés sur le terrain. La disponibilité de photographies aériennes à moyenne échelle (1/100 000) paraît souhaitable à certaines périodes critiques pour permettre une extrapolation efficace des contrôles ponctuels effectués.

A partir des données LANDSAT, l'analyse de l'ensemble des éléments de résolution composant un écotope, permet de vérifier le postulat d'homogénéité, qui se traduit par une faible dispersion des réponses spectrales.

6.2. Analyse de l'influence de certains facteurs sur la réponse spectrale

6.2.1. Influence de la nature et de l'état de la surface du sol

Dans la plupart des milieux étudiés, le recouvrement de la végétation, par rapport au sol nu, reste faible ; aussi les réponses spectrales observées sont-elles conditionnées par la nature et, surtout, par l'état de surface du sol.

Ainsi, pour les données de juillet 1975, l'on observe de fortes différences de luminance entre certains glacis alluviaux très peu

couverts de végétation ; ces différences sont imputables essentiellement à la couleur et à la répartition des éléments de la surface (cailloux, pellicule de battance), facteurs qui varient en fonction de l'origine des matériaux constituant ces glacis.

En revanche, il faut signaler la similitude des réponses spectrales obtenues à la même date, pour des substrats différents, mais tous très réfléchissants en juillet.

Un exemple de l'influence de l'état de la surface du sol est fourni par l'analyse comparée des réponses spectrales de parcelles labourées, sur un même substrat limoneux ; une forte différence de luminance est observée en novembre, le labour ayant entraîné des modifications de la couleur, de l'humidité et de la rugosité de la surface du sol.

6.2.2. Influence du recouvrement de la végétation pérenne

Lorsque le recouvrement de la végétation pérenne augmente, on constate une diminution de la luminance due à l'occultation du sol par la végétation ; ainsi, les steppes à *Rhantherium suaveolens* en bonne condition pastorale s'individualisent au mois de juillet.

La différence de luminance est encore plus nette si l'on compare une zone pâturée à une zone en défens (Figure 2a) de la même unité de végétation et de milieu.

6.2.3. Influence du recouvrement de la végétation photosynthétiquement active

Elle peut être étudiée à partir des réponses spectrales des parcelles de céréales, à la date du 22 avril ; compte tenu de la pluviosité favorable pour l'année de végétation 1975-76, le développement des céréales a conduit à des recouvrements de végétation verte, à la date considérée, de 10 à 35% suivant la région naturelle considérée.

Les réponses obtenues (Figure 2d) montrent que la diminution de luminance dans le canal 5 n'est sensible que dans certains cas de zones homogènes de céréaliculture sur sol profond à texture limoneuse, avec un recouvrement de végétation verte supérieur à 20%.

6.3. Exemples d'analyses synchroniques

6.3.1. Cas des steppes *Stipa tenacissima* de la région des Hautes Steppes (novembre 1975)

L'étude d'écotopes représentatifs a permis de mettre en évidence des différences de luminance (Figure 2c) que l'on peut interpréter comme dues à l'influence conjuguée du recouvrement de la végétation herbacée pérenne et de la nature du sol.

6.3.2. Cas des steppes à *Rhantherium suaveolens* de Zougrata (novembre 1975)

Les études écologiques déjà réalisées ont mis en évidence 3 états (RK3, RK2, RK1) du couvert

végétal et du sol. Les réponses spectrales observées montrent une différence d'intensité de luminance significative (Figure 2b).

6.3.3. Conclusion des analyses synchroniques

Ces analyses montrent la possibilité de détecter, à une date favorable, certains éléments à réponses spectrales contrastées :

- . zones labourées vs zones non labourées sur un plateau limoneux (novembre) ;
- . zones à végétation très claire ou nulle sur substrats fortement réfléchissants vs zones à végétation pérenne dense (juillet) ;
- . zones à végétation verte dense (avril).

Les distinctions s'opèrent davantage par l'intensité de la réponse spectrale que par sa forme, et confirment ou précisent des différences visibles sur les compositions colorées.

Cependant, la comparaison de l'ensemble des résultats relatifs à une région naturelle, ou même à une zone d'apprentissage, montre souvent l'impossibilité d'envisager encore une cartographie automatique de l'occupation des terres ou des unités de milieu basée sur les seules réponses spectrales synchroniques, en raison des confusions qui demeurent possibles.

6.4. Exemples d'analyses diachroniques

Nous nous intéressons aux évolutions des réponses spectrales entre les trois dates analysées : juillet 1975, novembre 1975 et avril 1976.

Différents types d'évolution peuvent être alors mis en évidence, par exemple, d'après les variations du rapport canal 5 sur canal 7.

6.4.1. Cas des milieux à très faibles variations

Il s'agit par exemple d'une part, des steppes à *Stipa tenacissima* qui ne présentent que très peu de variations saisonnières et, d'autre part, d'un milieu artificialisé, les vergers d'oliviers régulièrement entretenus (Figure 2e).

6.4.2. Cas des milieux à faibles variations

Ce cas se produit pour des milieux à faible recouvrement de végétation pérenne et où l'importance de la végétation herbacée annuelle est également peu perceptible en avril. On peut distinguer cependant deux degrés d'intensité dans la variation novembre/avril, ce qui permet de différencier les steppes claires à *Anarrhinum brevifolium* et *Lygeum spartum* sur substrat gypseux d'une part, et les steppes dégradées à *Rhantherium suaveolens* sur limon à nodules calcaires, d'autre part.

6.4.3. Cas des milieux à variations moyennes

Il s'agit du cas le plus fréquemment observé ; nous constatons ici une convergence de comportement de certaines classes d'occupation des terres (Figure 2f), qui montre une fois de plus la difficulté d'établir une typologie basée sur un seul critère, fût-il diachronique.

6.4.4. Cas des milieux à fortes variations

On observe une forte variation entre les rapports spectraux d'automne et de printemps pour les zones de céréaliculture en bonnes conditions.

6.4.5. Cas des milieux à variations très fortes

Les variations les plus fortes sont enregistrées dans le cas de zones d'épandage des oueds qui sont les plus aptes à une céréaliculture pluviale à couvert végétal très dense.

6.4.6. Conclusion des études diachroniques

Ces études laissent entrevoir certaines possibilités de discriminations intéressantes :

- . steppes claires sur substrat gypseux vs steppes claires sur substrats limoneux ;
- . steppes à *Stipa tenacissima* vs zones de céréaliculture ;
- . arboriculture vs céréaliculture.

C'est la comparaison des réponses obtenues en novembre et en avril qui s'avère la plus significative ; ceci pose le problème du choix des dates d'enregistrement, qui doit être ajusté, dans les milieux étudiés, en fonction de la phénologie des espèces végétales annuelles (spontanées et cultivées), elle-même conditionnée par le régime saisonnier des précipitations et des températures.

7. APPLICATIONS POSSIBLES DU SYSTEME LANDSAT

7.1. Premier thème : inventaire annuel des zones de céréaliculture pluviale

Nous signalerons d'emblée que les conclusions qui suivent sont provisoires ; elles sont en effet liées aux résultats obtenus à partir des données de l'année 1975-76, exceptionnelle sur le plan climatique dans le Sud tunisien.

Nous avons vu que les données (images et numériques) d'automne permettent, mais pour certaines zones écographiques seulement (plateaux limoneux avec mise en culture de grandes parcelles), la détection des zones labourées. Dans les autres cas, la détection labour vs non labour ne semble pas facile, même avec les données numériques, en raison du manque de contraste entre zones labourées et steppes avoisinantes, qui se conjugue souvent à une dimension restreinte des parcelles.

Avec les données de printemps, dans le cas de l'année 1976, nous obtenons souvent une convergence de réponse entre zones à végétation spontanée annuelle dense et zones de céréaliculture. Ceci limite d'avance les résultats obtenus avec les seules données de printemps à des estimations de probabilités de mise en culture.

L'inventaire des surfaces consacrées à l'agriculture pluviale dans les zones marginales nous semble donc nécessiter une comparaison diachronique des réponses de fin d'automne

et de printemps. Cependant, la mise en oeuvre de tests basés sur cette comparaison doit être adaptée à chaque zone écographique considérée. Ainsi, le diagramme de la Figure 3a qui présente une analyse diachronique pour la région des Hautes Steppes, indique qu'une bonne discrimination peut être établie entre plusieurs types d'occupation des terres.

Cependant, une distinction plus fine entre les classes ainsi définies doit être faite pour des zones écographiques plus restreintes, en tenant compte surtout des différences de substrat.

Si nous considérons maintenant le diagramme diachronique de la Figure 3b, relatif au secteur de Zougrata, nous constatons que les discriminations sont beaucoup plus difficiles à établir, même pour le seul thème : "détection des cultures par rapport à zones incultes". Ce secteur présente une variété de sous-secteurs. On aura donc intérêt à effectuer des classifications par sous-secteurs présentant un moins grand nombre de combinaisons "occupation des terres/substrat". Il faut reconnaître malgré tout que la céréaliculture, dans des conditions limites comme celles de la région écologique des Basses Plaines méridionales, restera difficile à détecter.

7.2. Deuxième thème : surveillance de l'état de la végétation des zones pastorales

Il s'agit de mettre en évidence la nature des zones pastorales. Le problème de la discrimination "terrain de parcours" vs "culture" a déjà été évoqué.

La caractérisation des zones en bonnes conditions pastorales, peut être réalisée à partir des données obtenues en été, ou bien à partir de celles de fin d'automne et a fortiori, par un constat de faibles variations entre ces deux dates, associé à de faibles valeurs relatives de luminance.

Pour les zones de steppes dégradées, le problème de leur détection est lié davantage aux caractères du substrat, qu'à celui du couvert végétal. Ainsi, les relations entre niveaux de luminance et états de la végétation pérenne ne peuvent en général être établies que si l'on considère des classes de recouvrement assez larges (1-10%, 10-20%, 20-30%) et si l'on y associe les caractéristiques externes du substrat.

7.3. Troisième thème : Eléments pour un plan de surveillance de la désertisation

Les résultats obtenus constituent une contribution importante à l'étude de faisabilité d'un système opérationnel de surveillance des zones soumises ou menacées par la

désertisation au Nord du Sahara.

Si les phénomènes de désertisation qui affectent de vastes territoires déjà typiquement désertiques sont faciles à détecter, il n'en reste pas moins que ce n'est pas ce genre de phénomène qui préoccupe les gouvernements des pays de la zone écologique considérée. En effet, pour eux, il s'agit de détecter précocement les causes diffuses et les phénomènes précurseurs de la désertisation dans des zones actuellement occupées par l'homme et soumises à une utilisation diversifiée des ressources. La preuve semble avoir été faite que l'analyse spatio-temporelle de tels phénomènes ne peut pas être mise en oeuvre avec les seules données LANDSAT, telles qu'elles sont disponibles actuellement. En effet, les qualifications techniques des données et les connaissances scientifiques disponibles, sont des freins réels à tout processus d'automatisation d'un système d'évaluation de l'état de l'environnement.

Dans l'état actuel des moyens technologiques disponibles et de l'information écographique mobilisable, la seule procédure à caractère opérationnel pourrait être la suivante :

1ère phase : après délimitation d'images isophènes sur des combinaisons ad hoc de couleurs composites, analyse du contenu thématique et des limites de telles images en vue de définir des unités écographiques dont les critères permanents de définition sont issus d'une analyse polycritérienne sur le terrain (variables abiotiques et variables biotiques).

Une approche méthodologique appropriée est nécessaire pour atteindre cet objectif ;

2ème phase : sur la base des unités écographiques stables, ainsi délimitées, description des critères et évaluation des paramètres qui déterminent une information thématique sur le sujet de la désertisation.

Pour les zones arides au Nord du Sahara, cette information thématique concerne :

- les conditions de la céréaliculture pluviale sur les divers substrats et notamment à la limite de l'aire climatique normale de l'aridoculture ;
- les conditions de recouvrement de la végétation et, si possible, le rythme de production de la phytomasse saisonnière ;
- les conditions de la surface du sol ;
- les effets des systèmes urbanisés ;
- les effets des événements catastrophiques.

Il faut souligner, qu'au moins dans un premier temps, cette information thématique ne peut pas provenir d'une analyse aveugle des données LANDSAT ; elle implique la mise en oeuvre de projets spécifiques de récolte de données sur le terrain

3ème phase : traitement semi-supervisé des données numériques LANDSAT et cartographie thématique assistée par ordinateur.

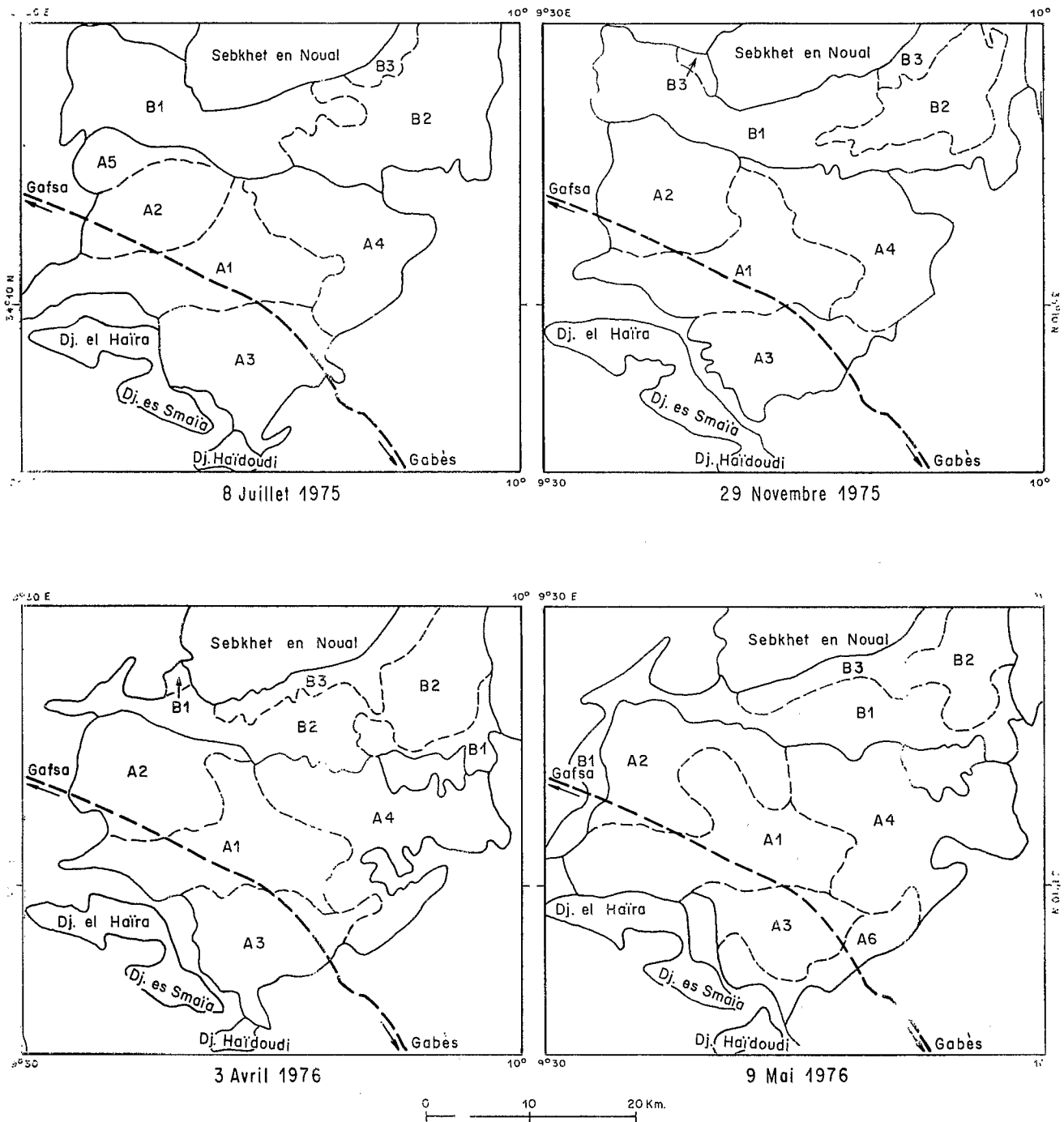


Figure 1

Carte des zones isophènes aux différentes dates d'enregistrement des données MSS_LANDSAT (Scène 205/36).
 Compositions colorées des canaux 4 et 5 (100% d'ill.) et 7 (70% d'ill.), respectivement avec les filtres bleu, vert, rouge.
 La signification des sigles est dans le texte

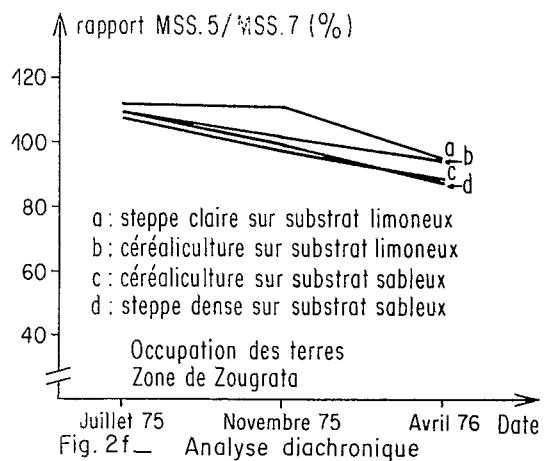
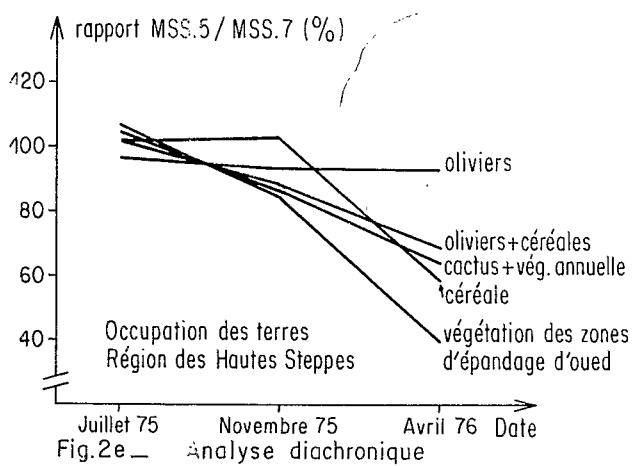
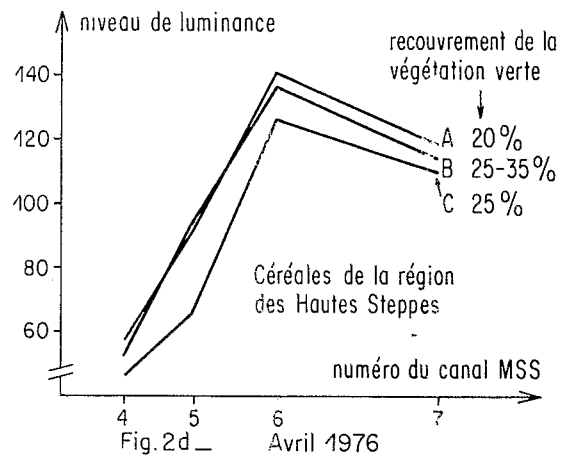
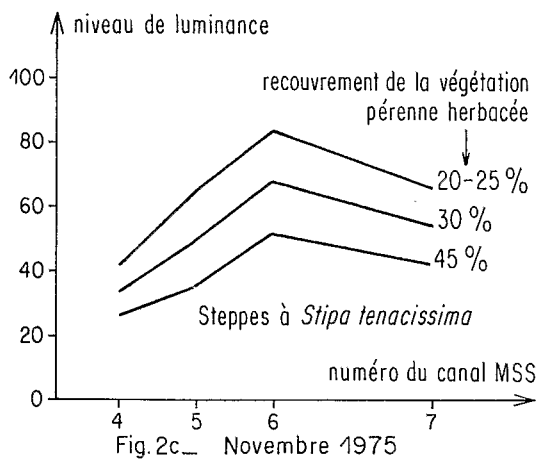
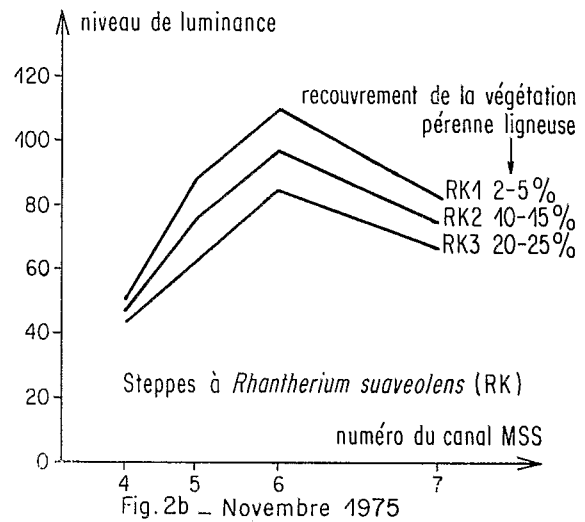
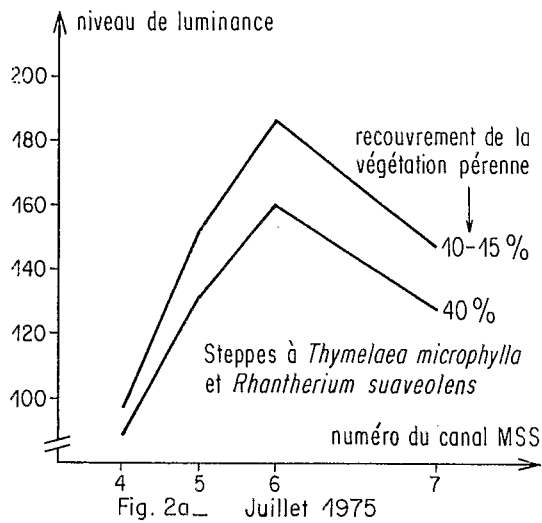


Figure 2

Exemples de réponses spectrales instantanées et de variations saisonnières des rapports spectraux pour diverses unités écopaysagées

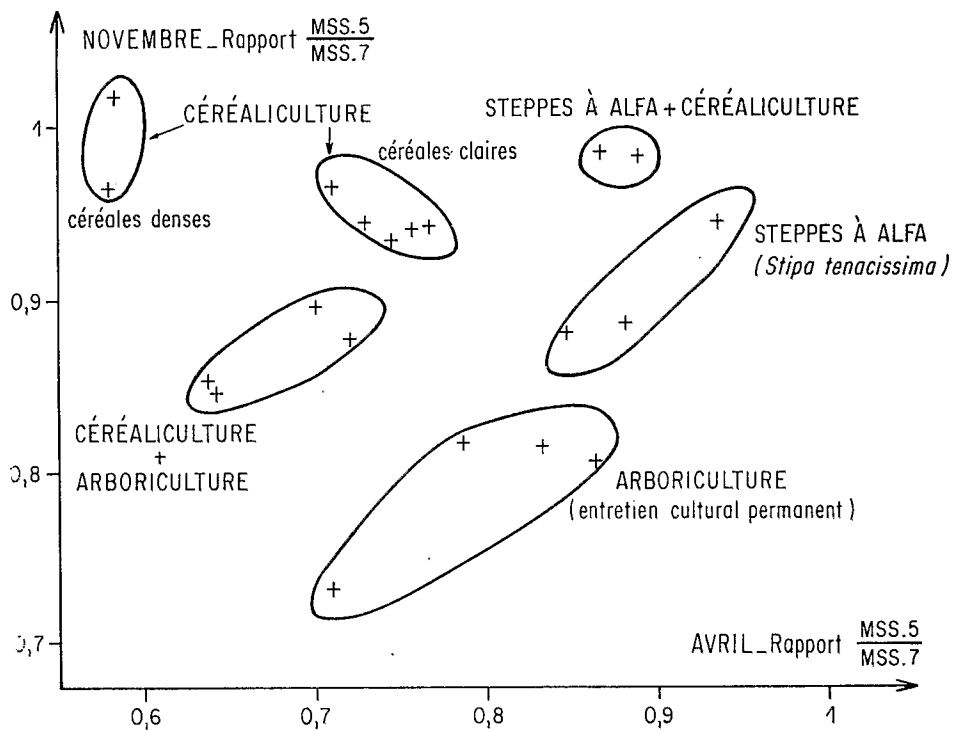


Fig. 3a - Région naturelle des Hautes Steppes

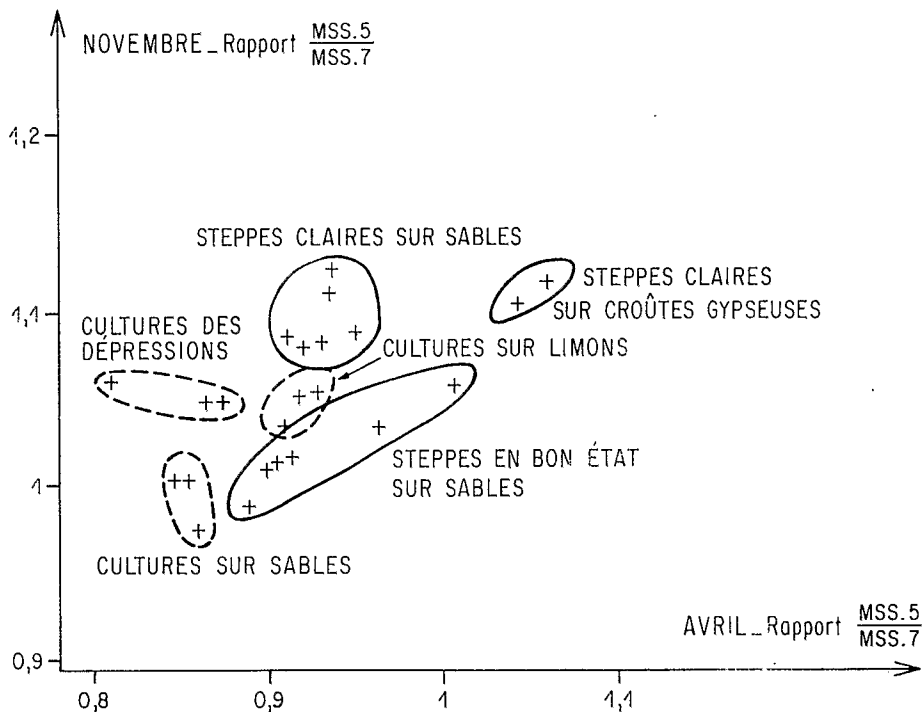


Fig. 3b - Zone de Zougata

Figure 3

Analyse en mode diachronique de deux stades saisonniers des principales unités écologiques