

Cartographie Physiologique de la Végétation Forestière par Télédétection Satellitaire Optique de Moyenne Résolution Spatiale en Zones Semi-arides (Ouest Algérien)

K. BENCHERIF*, N. LETREUCH BELAROUCI**

*BP119, Département de foresterie, Université de Tlemcen, 13000 Tlemcen. Algérie.

Email : Bencherifk@yahoo.fr

**BP 112, Imama, Tlemcen 13000. Algérie.

ملخص:

إن التحليل الآلي للصور الفضائية يعتمد أساساً على طرق التصنيف الموجه و الغير الموجه. عند وضع الخرائط الغابية عادة ما يفضل النوع الأول لدقته لكن في الأوساط الغابية المتوسطة الشبه جافة لشمال غرب الجزائر يمكن للتصنيف الغير الموجه أن يكون حلاً إذا ما استطعنا أن نجد علاقة بين بعض ميزات المجموعات الحراجية و الأقسام الطيفية هذه الدراسة بينت أنه في المناطق الحراجية الغير متجانسة و التي تحتوي على عدة مجموعات نباتية كالغابة الكثيفة، الغابة الخفيفة، الأبراج، إن التصنيف الغير موجه للصور الفضائية يقسم الفضاء الطيفي إلى طبقات مرتبة ترتيباً تنازلياً مع تنازل طول المجموعات النباتية التي يحتويها القسم من جهة أخرى يقسم الطبقة إلى أقسام مرتبة هي الأخرى ترتيباً تنازلياً مع تنازل كثافة المجموعة الحراجية. هذه النتائج مكنت من وضع خريطة النبات على أساس الفيزيونيوميا، هذه الخريطة الأولية ستؤدي إلى وضع خريطة أنواع المجموعات الحراجية، طريقتين يمكن الاعتماد عليهما في هذه الحالة الأولى تعتمد على المعلومات الميدانية التي يملكها المحلل أما الثانية فتتجز تصنيف موجه على أساس الخريطة الأولى

Résumé: L'interprétation automatique d'images satellitaires s'appuie essentiellement sur les algorithmes de classification. Ces classifications peuvent être dirigées ou non dirigées. Pour la cartographie forestière, la première catégorie est souvent préférée à la seconde pour sa précision. Cependant, en milieu forestier méditerranéen tel que celui des zones semi-arides de l'ouest Algérien, l'hétérogénéité des formations végétales rend difficile la sélection de zones d'entraînement précises même en possession de données terrain. Dans ce cas, les classifications non dirigées peuvent être une solution à condition de trouver une relation fiable entre certains paramètres dendrométriques des peuplements forestiers et les classes spectrales pour en faciliter l'interprétation. Cette étude sur une zone forestière semi-aride de l'ouest algérien a montré que dans un espace forestier hétérogène, comportant plusieurs formations végétales de type forêt, matorral arborescent, matorral, herbacées et des vides, la classification non dirigée par nuées dynamiques a découpé l'espace spectral en strates spectrales se différenciant

principalement par la hauteur et ordonnées par ordre décroissant de la hauteur des formations végétales qu'elles représentent. Il s'agit des strates thématiques suivantes : forêts, matorral arboré, matorral, herbacées et les vides. A l'intérieur de chaque strate comportant deux ou plusieurs formations végétales, l'algorithme de classification partage la strate spectrale en classes spectrales ordonnées par ordre décroissant de leur densité. Ces premiers résultats ont permis d'établir la carte des grands types physiologiques de la végétation de la zone d'étude. Cette carte servira de base pour établir la carte des types de peuplements forestiers. Deux solutions peuvent être envisagées dans ce cas : la première consiste en l'exploitation des connaissances terrain de l'interprète pour affiner les résultats. La seconde réalise une classification dirigée de l'image. Dans les deux cas, la réalité terrain doit être toujours disponible.

Mots-clés : Types physiologiques ; Télédétection ; Classification non dirigée; semi-aride ; Forêt ; Matorral.

Abstract : The automatic interpretation of satellite imagery essentially leans on the algorithms of classification. The classification can be supervised or unsupervised. For forest mapping, the first category is often preferred to the first for its precision. However, in Mediterranean forest environment as the semi-arid forest zones in north-west of Algeria, the heterogeneity of the plant formations is such that it is difficult to select training zones even in possession of ground data. In this case, the unsupervised classification that cluster the forest space in spectral classes on a solely statistical basis, can be a solution provided that the interpretation of the classes becomes easy and less complicated through a reliable relation between some stand parameters and the spectral classes. This survey on a semi-arid forest zone in north west of Algeria showed that in a heterogeneous forest space, including several plant formations as forest, arborescent shrublands, shrublands, herbaceous and emptiness, the unsupervised classification (isodata) cut the spectral space in spectral strata differentiating themselves mainly by the height and ordered by decreasing order of the plant formations height. The thematic strata are: forest, arborescent shrubland, shrubland, herbaceous and the emptiness. Inside every stratum including two or several plant formations, the classification shares the spectral stratum in spectral classes ordered by decreasing order of their density. These first results permitted to establish the vegetation physiognomic types map of the survey zone. This map will act as basis to establish the map of the forest stands. Two solutions can be considered in this case: the first consists in the exploitation of the interpreter's knowledge land to refine the results. The second achieves a supervised classification of the image. In the two cases, the ground truth must be always available.

Key-words: Physiognomic types; Remote sensing; Unsupervised classification; Semi-arid; Forest; shrubland

1. Introduction

En aménagement forestier, les besoins en information sont permanents et sont satisfaits en grande partie par des inventaires périodiques. Cependant, les inventaires forestiers traditionnels contenaient plus de tableaux que de cartes, mais les cartes et les informations géoréférencées devraient être à l'avenir le principal produit standard des inventaires forestiers (Kleinn.C., 2002).

En effet, les documents cartographiques tiennent une grande place à chacune des étapes d'un projet d'aménagement forestier. De l'étude de faisabilité au suivi des impacts des actions entreprises, en passant par la spatialisation des données de l'inventaire, les cartes s'avèrent des outils indispensables pour l'aménagiste. (Pain Orcet.M et al.1998). Les recherches devront donc s'orienter vers des méthodes souples et plus adaptées d'élaboration de ces documents. Les documents forestiers lorsqu'ils sont disponibles répondent largement aux besoins des gestionnaires forestiers. Ils s'appuient sur des bases naturelles qui sont des documents précieux facilitant le suivi et la planification de l'exploitation forestière: il s'agit en particulier des cartes géologiques, de la carte des stations (phytosociologie) et de la carte des peuplements forestiers (essence, volume, état,...) et de l'inventaire du réseau hydrographique (Blumer.C et Golay. F., 1997). L'aménagement forestier est le cadre de toute la gestion forestière et son fondement est le peuplement forestier (Grim.S., 1986). Par conséquent, le document cartographique le plus important pour les services des forêts est la carte des types de peuplement.

Les cartes forestières, notamment les cartes des types de peuplements, sont établies à partir de photographies aériennes. L'imprécision des cartes forestières peut être attribuée à la variabilité continue de la forêt d'une part et le procédé de catégorisation, c'est à dire, de la photo-interprétation (Groeven et al. 1998). Dans ce cas, les classifications dirigées d'images satellitaires qui utilisent les cartes des types de peuplements pour déterminer leurs zones d'entraînement seront-elles aussi imprécises..

Les classifications non dirigées qui ne dépendent pas de la subjectivité du thématique-interprète catégorise la forêt et partage cet espace en polygones homogènes spectralement. Hélas, cette homogénéité spectrale ne traduit pas toujours une homogénéité thématique. Une classification précise d'images satellitaires exige donc du thématique la possession de la réalité terrain. Cette réalité terrain peut être définie comme étant "l'ensemble des zones d'une région qui sont homogènes pour un certain nombre de paramètres" (Groeven et al.1998). Pour les zones forestières du semi-aride ouest-algérien, il est clair que ces paramètres leur sont spécifiques et doivent être pris en considération. Dans ce contexte, cette étude vise à étudier la relation entre certains de ces paramètres et les classes spectrales issues des classifications non dirigées pour développer une méthodologie d'utilisation de cet algorithme pour la cartographie des types de peuplements forestiers.

2. Cartographie physiologique de la végétation forestière

La couverture végétale du sol est l'aspect physique du terrain. Elle se définit par les formes et la nature de la surface et peut-être observé directement sur le terrain et à partir des documents de télédétection (Bonn.F et al.1996). Par conséquent, la première perception, et la plus intuitive, qu'une personne a d'un paysage végétal concerne son allure générale et sa physiologie (Maire.A., 1989).

La physiologie d'une formation forestière est très liée à sa structure spatiale. L'analyse de la structure selon certains auteurs peut être effectuée avec peu de moyens et sans connaître particulièrement le nom de la plupart des espèces végétales. Elle peut de plus s'appliquer à plusieurs échelles de perception, de la parcelle à l'ensemble d'une formation végétale. Enfin, elle se prête fort bien à une synthèse et à une application cartographiques (Maire.A., 1989). La structure spatiale dans un peuplement des forêts naturelles méditerranéennes du semi-aride peut être décrite comme une mosaïque de taches correspondant à des formations végétales qui diffèrent, du point de vue de leur physiologie, par deux principaux paramètres : la hauteur et la densité.

Dans ce contexte, Yanqiu.X, Lihai.W et Westinga. E,(2004) dans une étude sur l'évaluation de la dégradation des espaces boisés au sud de l'Espagne, ont adopté une classification basée sur la physiologie du couvert végétal et sa densité. On trouve par exemple les forêts denses et les forêts claires, les matorrals arborés denses ou clairs ainsi que les matorrals bas denses ou clairs, la végétation herbacée dense ou claire et les vides. Shoshany.M (2000) emploie l'expression "formes de vies" comme synonyme de classes physiologiques et parle de forêts, espaces boisés, broussailles, Matorral bas, les plantes herbacées. En Algérie, le bureau national des études forestières (BNEF) adopte souvent une cartographie basée sur la physiologie des formations végétales complétée parfois par la nature du substrat affleurant et/ou de l'espèce ligneuse dominante. On rencontre dans une telle classification par exemple, les peuplements de pin d'Alep, le matorral, le matorral avec sujets uniques, le matorral arboré, le matorral arboré sur terrain rocheux etc. (Bencherif. K.,2002).

Le but d'une cartographie des types physiologiques de peuplements forestiers est de localiser puis de mesurer les proportions de chaque type pour un suivi efficace des actions humaines sur le milieu écologique d'où cette grande attention qu'elle a attiré dans les régions méditerranéennes.

Les méthodologies développées à cette fin sont basées sur l'information spectrale, temporelle et spatiale (texturale) fournie par les données satellitaires (Shoshany. M., 2000).

La plupart des cartes existantes sur le couvert forestier à l'échelle régionale sont basées sur la classification d'images satellitaires (Ohmmann.J.L et Gregory.M.J., 2002). Dans ce domaine, les systèmes avec des capacités spatiale, spectrale et temporelles comme Landsat ETM + et Spot, sont valables pour la discrimination de classes avec différentes densités du couvert à l'échelle régionale (Claudin.j et al.1995). Bien que ces données sont spatialement complètes et correctes, leur contenu en information est limité aux caractéristiques générales de la canopée (Cohen et al.2001).

Cependant, Les bandes TM3(rouge), TM4(proche infrarouge), et TM5(moyen infrarouge) de Landsat ou leur équivalents XS2(rouge) et XS3(proche infrarouge) de spot sont les plus utiles pour une discrimination générale de types de couverts forestiers (Horler & Ahern., 1986 ; Durrieus.S.,1994). La distinction entre feuillus et conifères est possible à cause d'une différence fondamentale dans le proche infrarouge PRI : les houppiers des feuillus peuvent réfléchir 50% de plus dans le PIR que les houppiers des pins, dû aux structures différentes des deux canopées. Autrement dit, les feuillus ont un couvert dense de leur cimes avec une expansion horizontale à l'inverse des pins qui ont un couvert faible de la cime avec une distribution conique verticale (Zheng.D et al.2004).

D'autre part, les images satellitaires telles Landsat et spot sont intéressantes à la fois à l'amont et à l'aval d'une étude d'aménagement forestier et dans ce cas l'approche à différentes échelles est nécessaire, en particulier à petite et grande échelle. Pour la première, l'imagerie satellitaire peut être utilisée efficacement en s'appuyant sur des observations sur le terrain.

Généralement, le projet d'aménagement réalise ses propres cartes pour actualiser les cartes existantes et puis pour visualiser les données récoltées pendant l'inventaire.

Ces cartes dites de "traitement" ou "d'analyse" permettent de répondre aux questions relatives aux types de peuplements composant la forêt à aménager, aux contraintes à l'exploitation et à la pression humaine.

La représentation cartographique peut se concevoir de deux manières liées dans une certaine mesure à la récolte des données (Lecomte.H et Rondeux.J., 2002.) : la cartographie "réelle" et la cartographie "a posteriori".

La cartographie réelle est une représentation cartographique, sur fond topographique ou non, à petite ou à grande échelle, de la réalité physique des peuplements avec leurs contours, identifiés par un code symbolisant les caractéristiques des massifs (essence principale, volume à l'hectare, ...). La cartographie "a posteriori", très bien adaptée aux inventaires systématiques n'est réalisable que si les résultats de l'inventaire sont connus. La carte des types physionomiques de la végétation par télédétection reflète l'image réelle d'un espace forestier à l'instant T, correspondant à la date de prise de vue. L'importance de ce document cartographique pour l'aménagement forestier est très grande : les aménagements forestiers durables exigent des données fiables, objectives et régulièrement mises à jour, et dans ce cadre, les proportions respectives des différents types physionomiques permettent d'identifier et de localiser les cibles de restauration des conditions paysagères et de les incorporer à la stratégie d'aménagement. Elles jouent le rôle d'indicateurs qui aident les décideurs à concentrer leurs actions dans l'espace et le temps.

3. Classification des images satellitaires

Les principales phases dans l'analyse de données de télédétection sont les mêmes que, celles suivies lors de l'observation et l'interprétation des paysages depuis des points d'observation et se résument dans la définition des besoins en information, la collecte des données et l'analyse des données.

Parmi toutes les méthodes de la télédétection, celles les plus en vue et les plus usitées sont les classifications ; cependant et en dépit des progrès récents constatés dans ces méthodes, la vérité terrain est toujours demandée pour vérifier la précision de la classification par n'importe quelle méthode (Estiva.S et Puech.C., 1998).

Le but de la classification est d'affecter une classe d'appartenance à chaque pixel. La méthode consiste en une partition de l'espace radiométrique, associant chaque portion d'espace à une classe d'appartenance (selon des critères statistiques ou de distance en fonction du type d'algorithme) et une affectation de chaque pixel à la classe dans laquelle sa radiométrie le positionne (Estiva.S et Puech.C. 1998).

La faiblesse de la résolution des images est paradoxalement un avantage et est une condition nécessaire pour la réussite de l'analyse spectrale puisque une meilleure résolution augmente la variance du signal et par suite rend très aléatoire une telle analyse (Blumer.C et Golay.F. 1997).

Cette remarque est partagée par d'autres auteurs dont les études ont porté sur les zones méditerranéennes (Chirici et al.2001). En effet, il a été démontré que la résolution spatiale optimale pour la majorité des classes forestières se situe entre 5 et 20 mètres et intègre dans des proportions variables des couronnes d'arbres, de l'ombrage et du sous-bois (Louy et al. 2000).

Qu'elle soit visuelle ou automatique, l'interprétation doit être assurée par l'organisme responsable de l'aménagement forestier dont la connaissance intime des conditions de terrain garantirait, de toute évidence, la pertinence de l'analyse des données fournies par la télédétection (Malingreau.J.P., 1993). Plusieurs suggèrent maintenant qu'une combinaison quelconque de connaissances locales et d'autres reliées à la discipline (foresterie, agriculture, etc.) combinées avec des aptitudes de photo-interprétation seront plus importantes que de la formation sur les algorithmes et systèmes d'analyse d'images (Batterham.R.J., 2000).

La reconnaissance de la couverture du sol à partir des classifications automatiques est l'une des recherches méthodologiques importantes en télédétection : la classification automatique a l'avantage de réduire la subjectivité inhérente à chaque tentative de représentation simplifiée de la réalité. En plus elle est rapide et les coûts opérationnels sont réduits (Griguolo.S et al.1996).

L'interprétation automatique s'appuie essentiellement sur les algorithmes de classification (Leckie.D. G, 2002). Deux grands types de classification d'images satellitaires par pixel se distinguent par leurs avantages et leurs inconvénients : la classification non dirigée et la classification dirigée.

- La classification non dirigée :

Le degré de succès de cette classification est déterminé par la séparation spectrale des différents groupes. La classification non-dirigée est un processus automatique qui fondamentalement reconnaît les classes spectrales définies sur une base purement statistique. Il existe plusieurs algorithmes, parmi lesquels celui des nuées dynamiques ou ISODATA (Iterative Self Organizing Data Analysis) est le plus utilisé. La première itération détermine les moyennes du nombre maximum de classes arbitrairement définies.

La distance spectrale entre tous les pixels et les classes moyennes est calculée et le pixel candidat est assigné à la classe spectrale la plus proche. Quand tous les pixels sont assignés à une classe, les moyennes sont recalculées et utilisées pour définir des classes dans la nouvelle itération.

Le processus continue jusqu'à ce que une partie des pixels ne change pas d'une classe à une autre entre deux itérations. Ce nombre est défini par le seuil de convergence. L'utilisateur définit aussi le nombre maximum d'itérations et les classes à obtenir (Andesen.G.L., 1998).

- La classification dirigée

La classification du reste de l'image (après avoir déterminé les zones d'entraînements) sera basée sur les valeurs trouvées dans les zones d'entraînements. Les méthodes de classification généralement utilisées pour assigner des pixels aux classes établies sont : Minimum distance Classification par parallélépipède et par maximum de vraisemblance (classification gaussienne). Ces classifications conventionnelles appelées communément "classifications par pixels" ignorent souvent une information utile de réflectance dans les pixels voisins d'où l'utilisation des classificateurs contextuels qui sont des méthodes de classification captant l'information des pixels voisins. C'est ainsi que Steven.M et al. (2001) ont proposé pour la classification précise des espaces boisés méditerranéens, une méthode basée sur l'information spatiale et spectrale; elle combine les avantages des deux méthodes précédentes. Elle est basée sur le fait (hypothèse) que de meilleurs résultats peuvent être obtenus quand les algorithmes de classifications spectrales sont appliquées à des sections d'images spectralement homogènes et quand un algorithme combiné spatial/spectral est utilisé pour les parties hétérogènes de l'image. La méthode passe par trois étapes :

- La stratification : c'est l'extraction des régions homogènes sur la base de l'information spatiale et spectrale.
- Classification des régions homogènes.
- Classification des autres parties (hétérogènes) de l'image.

Généralement, les classifications résultant des deux méthodes dirigée et non dirigée ne sont pas toujours précises à 100%, puisque les pixels individuels peuvent ne pas avoir les mêmes propriétés de réflectance que la majorité des pixels autour d'eux. Ceci est une caractéristique intéressante et représentative de l'hétérogénéité des propriétés de réflectance mais souvent un filtre est utilisé après les classifications pour atténuer cet effet. Cependant, et afin d'atteindre une précision satisfaisante, un regroupement de classes est souvent nécessaire. D'autre part, et quelque soit la classification utilisée, les résultats de la classification doivent être confrontés aux données ramenées du terrain.

4. Présentation de la zone d'étude

4.1 Situation générale

De forme anticlinale allongée, la forêt domaniale de "Moulay Smaïl de Mascara" sépare deux synclinaux qui forment à l'ouest la plaine de Oued Tlélat et à l'ouest la plaine de l'habra. Elle s'étend de la route nationale n°4 au sud jusqu'aux salines d'Arzew et la zone humide de la Macta au nord-est. Elle est située à environ 63 Km de la ville de Mascara et à 40 Km de la ville d'Ora. C'est une forêt de plaine qui constitue avec la zone humide de la "Macta" un ensemble écologique de très grande valeur environnementale. A cette grande valeur naturelle, vient s'ajouter une autre grande valeur, cette fois historique, puisque la zone a abrité la célèbre bataille de la "Macta" entre les troupes de l'Emir AbdelKader et l'armée coloniale française.

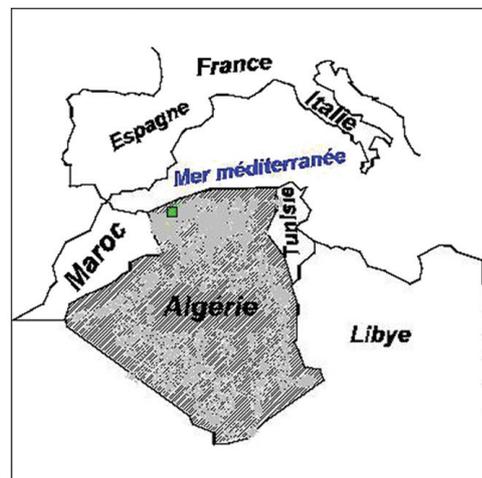


Fig.1 Localisation de la région d'étude.

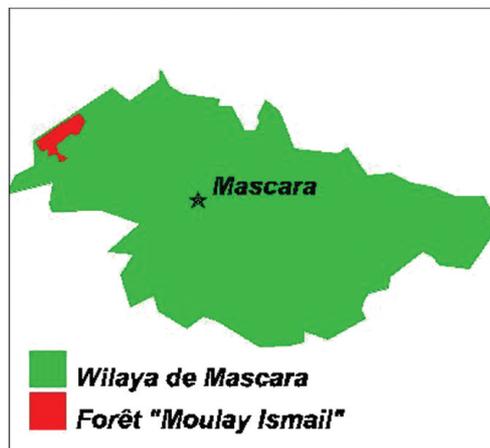


Fig. 2 Localisation de la zone d'étude.

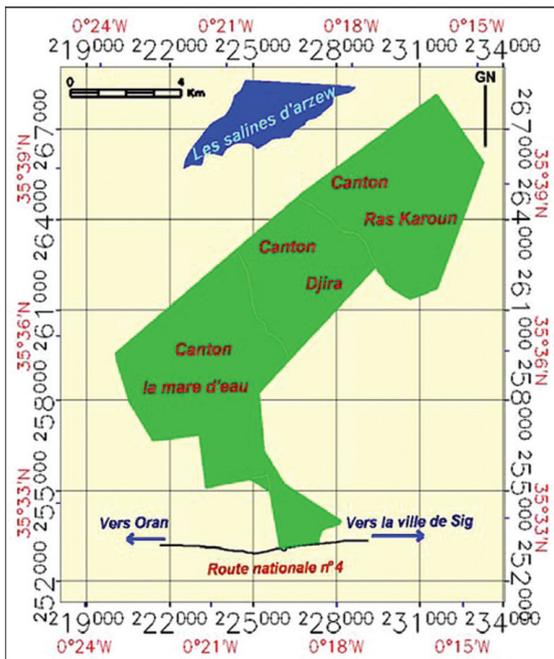


Fig.3 Carte de situation de la zone d'étude.

Au début de l'époque coloniale, sa superficie était de 12000 hectares, mais suite aux distractions effectuées par l'administration coloniale au profit des colons et les riverains parfois, elle a régressé pour se stabiliser en 1846 sur 6530 hectares. Cette superficie est répartie en trois cantons: Canton "la mare d'eau" ; Canton "Djira" ; Canton "Ras Karoun".

Le premier canton est occupé essentiellement par deux formations végétales:

- Peuplement artificiel de pin D'Alep (*Pinus halepensis*).
- Groupement végétal à base d'olivier sauvage (*Olea europaea* sp *sylvestris*) et de lentisque (*Pistacia lentiscum*).

Le second renferme principalement trois formations végétales:

- Peuplement d'Eucalyptus très dégradé, en état de fragmentation en bosquets.
- Matorral à base de lentisque.
- Matorral à base d'armoise.

Alors que le troisième est constitué de quatre types de peuplements:

- Peuplement naturel de Thuya.
- Peuplement artificiel de pin d'Alep.
- Peuplement artificiel d'eucalyptus
- Matorral dégradé à base de lentisque et d'armoise.

Généralement, les formations rencontrées dans notre zone d'étude font parties des formations d'arbustes thermo et méso-méditerranéen.

Nous croyons qu'il est utile d'en donner certaines définitions :

1. Les fruticées à Oliviers et Lentisques: Habituellement fruticées pluri-spécifiques dans lesquelles *olea europaea* subsp accompagnés de *Pistacia lentiscus* joue un rôle physiognomique déterminant. Quand les espèces caractéristiques s'accroissent en hauteur, elles s'intègrent au matorral arborescent.

2. Fruticée à lentisques : Formations riches ou dominées par *Pistacia lentiscus*, répandues et abondantes dans les zones thermo-méditerranéennes et côtières méso-méditerranéennes du bassin méditerranéen entier. Souvent basse et parfois très ouverte, la fruticée à lentisque peut en situations favorables, atteindre une hauteur de plusieurs mètres, s'intégrant ainsi au matorral arborescent.

3. Fruticée à calicotome Formations thermo-méditerranéennes physiognomiquement dominées par la brillante floraison de *Calicotome villosa* ou *C. spinosa*.

4. Matorral arborescent : Formations pré-ou post forestières avec un couvert arboré plus ou moins dense avec une strate buissonnante généralement dense hautement sempervirente.

4.1. Matorral à oliviers et lentisques : Matorral arborescent thermo-méditerranéen avec *Olea europaea* subsp. *sylvestris*, *ceratonia siliqua*, *pistacia lentiscus*

4.2. Matorral arborescent à lentisques : formations dominées par les grands *pistacia lentiscus*.

5. Matorral à pin : Fruticées et buissons sclérophylles méditerranéens et sub-méditerranéen dotés de pins.

5.1. Matorral arborescent à *Pinus halepensis* : formations dominées par *Pinus halepensis*.

4.2. Approche méthodologique

4.2.1 Les données satellitaires

Une image SPOT-xs couvrant la région d'étude et acquise en mai 2001 a été utilisée pour la réalisation des classifications. L'image a été corrigée géométriquement par rapport au système de projection Lambert Nord Algérie et l'erreur résiduelle est de l'ordre de 0,12 pixel.

La notion de correction topographique ou normalisation topographique se rapporte à la compensation des différences d'illuminations solaires dues à la forme irrégulière du terrain (Riaño.D. et al.,2003). Cet effet cause de grandes variations dans la réponse spectrale de types similaires de végétation. Les zones d'ombre reflètent moins que les zones ensoleillées.

Cependant ces corrections ne sont pas toujours nécessaires en présence de forêts de plaines. Les corrections radiométriques n'ont pas été faites en raison de la faible superficie traitée d'une part, et de la méthode de traitement adoptée. C'est ce qu'ont vérifié et confirmé certains auteurs :

Les corrections atmosphériques et radiométriques ne sont pas nécessaires quand la zone d'étude est assez petite, ne contenant pas de variations visibles dans les conditions atmosphériques et aussi quand les méthodes appliquées telles les classifications n'exigent pas des mesures de réflectance absolues. [Wallerman.J.2003 ; Louy et al.2002 ; Chartier et al, 2000].

4.2.2 Les classifications d'images

La classification non dirigée par nuées dynamiques partage l'espace forestier sur la base de la réflectance de chacune d'elle et cette dernière est fonction des caractéristiques du peuplement forestier notamment, sa densité, sa hauteur et son sous-bois. Si on considère notre espace forestier (la zone d'étude), celui-ci est une mosaïque de taches correspondant à plusieurs types de peuplements qui diffèrent par l'espèce dominante, par la hauteur et par la densité du couvert.

La méthodologie que nous avons adoptée consiste en une série de classifications non dirigées par parcelles appliquées à notre espace forestier. Ces parcelles ne sont pas des parcelles forestières mais des masquages (habillage) de différentes dimensions correspondant respectivement à la forêt toute entière, au premier canton, au deuxième puis au troisième canton. A l'intérieur de chaque parcelle (masque), une classification non dirigée par pixel a été réalisée puis un filtre passe bas a été appliqué sur une fenêtre de 3*3. Tous les traitements d'images ont été réalisés grâce au logiciel ENVI3.5.

La première classification concernait la totalité de la zone d'étude : disposant d'une couche vecteur sur les limites de la forêt, un habillage de la zone d'étude a été réalisé puis une classification avec un nombre prédéterminé de classes a été lancée. Dans notre cas, ce nombre de classes est égal au nombre de classes thématiques existantes.

Les résultats de cette classification sont une série de classes spectrales arrangées de 1 à 7. L'interprétation des résultats devrait permettre de définir ces classes spectrales.

L'exploitation des données terrains, et les documents cartographiques existants ont permis de dégager les premières observations suivantes (voir tableau n°1) :

Le tableau des correspondances entre classes spectrales et classes thématiques réelles met en évidence une relation très intéressante entre l'arrangement des classes spectrales et celui des classes thématiques correspondantes.

Il est connu que sur une image satellitaire, les forêts occupent un intervalle de faibles radiométries (Durrieu.S., 1994). Cependant, si on considère plusieurs types de peuplements forestiers, ces derniers occuperont dans cet intervalle, des radiométries qui augmenteront avec la diminution du taux de recouvrement du sol par la végétation.

La classification non dirigée de canaux simples, de compositions colorées ou du ratio R/IR arrange les classes spectrales par ordre croissant de la radiométrie et par conséquent, les classes thématiques correspondantes vont s'arranger de la même manière: Les formations végétales les plus denses occuperont la première classe alors que les vides occuperont la dernière classe. Les formations végétales de densité moyenne occuperont les classes intermédiaires. Cette hypothèse serait parfaitement vérifiée si les peuplements denses avaient occupé la même classe, or on constate les faits suivants :

- les taillis de thuya et le matorral arborescent à lentisque bien qu'ils soient denses, occupent la classe 2. L'élément hauteur paraît être la cause puisque la hauteur de ces formations (2 à 3m) est très petite par rapport à celle des formations de la première classe (7 à 16 m en moyenne). D'autre part, les taillis de thuya, les matorrals arborescents à lentisque, à lentisque et oléastre, ou à pin d'Alep lorsqu'ils sont clairs occupent la classe 3 bien qu'ils aient la même hauteur moyenne que ceux de la classe deux. Leur densité inférieure par rapport à celle de la classe deux fait la différence.

- Les garrigues à genets ou les fruticées à lentisques occupent deux classes différentes soit 4 et 5 bien qu'ils aient la même hauteur (0.5 à 1m) : la densité vient séparer les mêmes types de peuplements.

- Enfin, toutes les formations herbacées (à armoise le plus souvent) occupent l'avant dernière classe (classe 6) bien que leur densité est variable : leur hauteur très basse (moins de 0,5 m) en est encore une fois la cause. Pour cette première étape, les analyses qui viennent d'être faites peuvent être synthétisées et résumées de la manière suivante :

Tableau1. Correspondances entre classes spectrales et classes thématiques.

Classe spectrale	Types d peuplements (classe thématique)	Hauteur	Densité
1	Perchis de pin d'Alep	5 à 10 m	Dense
	Reboisements d'Eucalyptus	12 à 20 m	Dense
2	Taillis de Thuya	2 à 3 m	Dense
	Matorral arborescent à base de lentisque	2 à 3 m	Dense
3	Taillis de Thuya	2 à 3 m	Clair
	Matorral arborescent à base de lentisque	-----	Clair
	Matorral arborescent à base de lentisque et d'oléastre	-----	Clair
	Matorral arborescent à base de pin d'Alep	-----	Clair
	Matorral arborescent à base d'eucalyptus	-----	Clair
4	Garrigues à genets	0.5 à 1 m	Dense
	Fruticées à lentisques	0.5 à 1 m	Dense
	Garrigues mixtes à lentisques et genets	0.5 à 1 m	Dense
5	Fruticées à lentisques	0.5 à 1m	Claire
	Garrigues à genets	0.5 à 1 m	Clair
6	Herbacées	Très basse	Densité variable mais toujours supérieure à 10%
7	Vides		Recouvrement <10%

Dans un espace forestier hétérogène, comportant plusieurs formations végétales de type forêt, matorral arborescent, matorral, herbacées et des vides, la classification non dirigée par nuées dynamiques a découpé l'espace spectral en strates spectrales se différenciant principalement par la hauteur et ordonnées par ordre décroissant de la hauteur des strates thématiques correspondantes et qui sont : forêts, matorral arboré, matorral, herbacées et les vides. A l'intérieur de chaque strate comportant deux ou plusieurs formations végétales, la classification partage la strate spectrale en classes spectrales ordonnées par ordre décroissant de la densité des classes thématiques correspondantes.

La première strate aurait due elle aussi être partagée en classes spectrales si elle avait comporté plusieurs peuplements se différenciant par leur densité.

C'est ce qui a été vérifié dans une autre étude similaire sur une zone forestière semi-aride de l'atlas saharien et dont les résultats sont résumés dans le tableau n° 2. Bien que ce procédé de classification a réussi à séparer de façon globale plusieurs types physiologiques de la végétation, le problème de l'hétérogénéité thématique des classes spectrales persiste toujours.

Ce sont les zones de transition qui généralement posent des problèmes d'interprétation.

Tableau 2. Relations entre strates spectrales, classes spectrales et classes thématiques.

Classe spectrale	Strate spectrale	Type de formation végétale (strate thématique)	Hauteur	Densité
1	I	Forêt	Haute	Dense
2	II	Matorral arborescent	Moins haute	Dense
3				Clair
4	III	Matorral	Basse	Dense
5				Clair
6	IV	Herbacées	Très basse	Densité variable
7	V	Vides		

En premier lieu, il s'agit des pistes forestières qui normalement devraient appartenir à la classe des vides ou le matorral clair au cas où elles sont envahies par une végétation herbacée ou arbustive. Or, lorsqu'elles traversent des peuplements denses et hauts, elles tombent dans la même classe que les futaies claires ou très claires. L'influence des pixels de l'environnement immédiat en est certainement la principale cause. Mais on peut expliquer autrement ce fait : les pistes forestières de largeur de 3 ou 4 mètres peuvent être assimilées à des couloirs séparant deux rangées d'arbres dont les cimes sont rapprochées ou éloignées les unes des autres.

Dans le premier cas, elles se confondent avec le peuplement qu'elles traversent ; dans le second, elles occuperont les mêmes classes que les peuplements clairs ou très clairs.

Le fait d'admettre que la densité des arbres en est la cause serait justifiée puisque la densité moyenne des arbres le long et aux abords des pistes est réduite par rapport à celle des arbres avoisinants. La même remarque est faite pour les coupes forestières : ces dernières lorsqu'elles sont progressives font diminuer le degré de couvert et par la suite, le nombre d'arbres dans la parcelle ; le peuplement devient clair ou très clair. Généralement, la classification des pistes forestières et des coupes forestières ne poserait pas de problèmes pour le personnel forestier qui est appelé à connaître l'espace qu'il gère : les pistes ayant un caractère longiligne, il est aisé de les distinguer des autres couvertures du sol. Les coupes étant un type d'utilisation forestière, la télédétection ne peut les reconnaître comme telles quand elles ne sont pas rases.

Mais on pourrait les classer avec les peuplements clairs ou très clairs en fonction de leur physionomie au moment de la prise de vue. L'autre grand problème qu'on rencontre à l'issue des classifications non dirigées est ce passage de la carte des grands types physiologiques de la végétation à la carte des types de peuplements, le document le plus important pour l'aménagiste forestier.

L'une des solutions est de réaliser des classifications non dirigées sur les différents cantons (éventuellement les séries forestières). De cette manière, l'aménagiste forestier (supposé connaître le territoire qu'il gère), en s'appuyant sur les résultats cités auparavant, saura attribuer beaucoup plus facilement, l'espèce ou le groupe d'espèces qui composent le type physiologique.

Tableau 3. Correspondances entre classes spectrales et classes thématiques (Forêt Senalba - Djelfa, Atlas saharien).

Classes Spectrales	Classes thématiques	Paramètres dendrométriques				
		Age (années)	Hauteur (m)	Diètre (cm)	Degré de couvert (%)	Densité (n/ha)
1	Futaie de pin d'Alep	70 à 150	8 à 13	30 à 40	0.2 à 0.5	150
2	Futaie de Pin d'Alep	120 à 150	11 à 13	30 à 40	0.2 à 0.5	60
3	Futaie de Pin d'Alep	120 à 150	10 à 13	30 à 40	0.1 à 0.15	30
	Matorral arboré				< 0.1	
4 et 5	Matorral				< 0.1	
6 et 7	Vides				< 0.1	

Les figures n°4 et n° 5 traduisent les résultats des classifications en cartes des types physiologiques de la végétation de la zone d'étude.

Plusieurs reproches peuvent être faites aux classifications non-dirigées, et en premier lieu l'hétérogénéité thématique des classes. Néanmoins, cette étude vient de démontrer l'existence de relations étroites entre classes spectrales et les paramètres hauteur et densité des formations végétales d'un milieu semi-aride méditerranéen.

Ceci permettra en première étape de passer rapidement des classes spectrales indéterminées aux

classes physiologiques (thématiques) de la végétation telles que forêt, matorral arboré, matorral, herbacées et les vides. Ces résultats vont permettre, en deuxième étape, de préciser davantage le contenu des classes physiologiques obtenues. Deux solutions peuvent être envisagées dans ce cas : la première consiste en l'exploitation des connaissances terrain de l'interprète pour affiner les résultats.

La seconde réalise une classification dirigée de l'image. Remarquons que dans les deux cas, la réalité terrain doit être disponible.

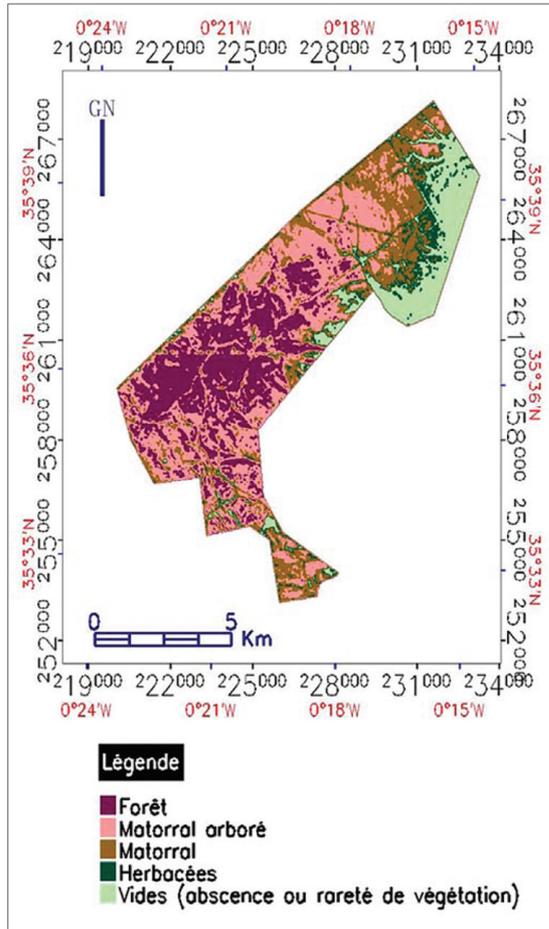


Fig. 4 Carte des grands types physiognomiques de la végétation.

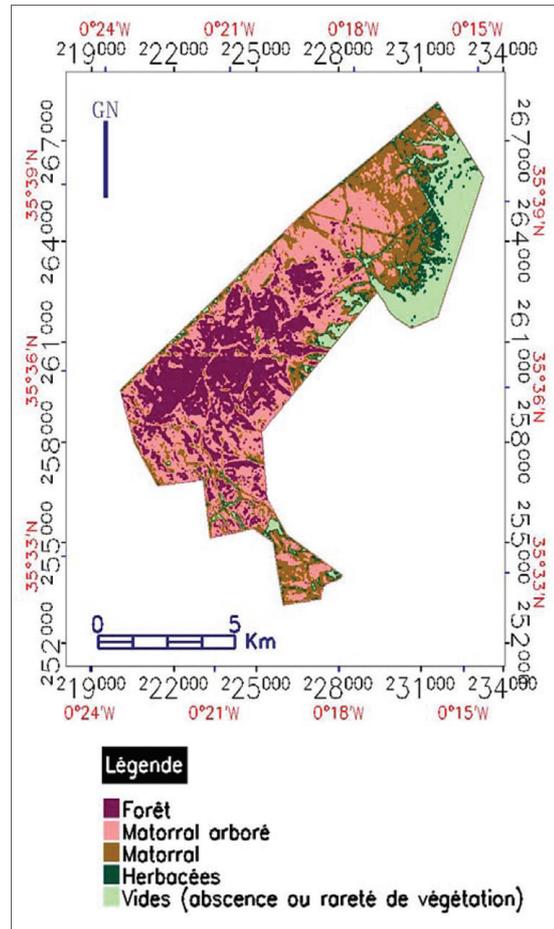


Fig. 5 Carte des types physiognomiques de la végétation, définie par l'essence dominante.

5. Conclusion

Les classifications non dirigées d'images satellitaires multispectrales de moyenne résolution couvrant les espaces boisés des zones semi-arides peuvent avoir un grand intérêt pour la distinction entre différents types physiognomiques de peuplements forestiers.

En effet, les résultats de cette étude sont hautement révélateurs de la corrélation qui existe entre classes spectrales et la hauteur des formations végétales d'une part et leur densité d'autres part dans un milieu forestier semi-aride.

Cette relation est très importante dans la mesure où elle permet de prédire une cartographie précise des peuplements forestiers sur une base physiognomique. Le volume ligneux et la biomasse qui en découle peuvent être ainsi cartographiés étant donné que ces deux paramètres sont hautement corrélés avec la densité du peuplement.

D'autre part, avec cette méthode on a l'avantage de disposer d'une couche classifiée, à mettre en correspondance avec des informations d'autres sources dans un SIG, ou bien à utiliser comme donnée de base dans la construction d'un modèle dynamique de l'environnement.

Néanmoins, une classification complètement automatique paraît encore un objectif impossible à atteindre puisqu'il subsiste encore quelques contraintes, la plus importante étant l'hétérogénéité thématique des classes spectrales.

Une des solutions possibles est que l'interprétation soit faite par un personnel forestier connaissant bien leur territoire d'étude et ayant un minimum de connaissances sur les techniques de la télédétection.

Références

- Aplin.P. Atkinson.P.M and Curran.P.J1999. Fine spatial resolution simulated satellite sensor imagery for land cover mapping in the United Kingdom. *Remote sensing of environment*, 68, pp.206-216.
- Andersen.G.L., 1998. Classification and estimation of forest and vegetation variables in optical high resolution satellites: A review of methodologies. Interim report IR-98-085/october 1998. Ed. IIASA- Laxenburg-Austria. 20p.
- Bencherif.k., 2002, Etude diachronique par télédétection satellitaire des forêts des monts de Ouled Naïl - Djelfa- Algérie. Thèse de Magistère en sciences forestières. Dép. de foresterie. Université de Tlemcen, Algérie. 119p.
- Chartier.M., et Servain.S., 2000, Apports de la télédétection satellitaire à l'étude de l'environnement de sites archéologiques en milieu tempéré, le cas de la vallée de l'Aisne. *cybergeo* N°. 176. avril 2000. www.cybergeo.fr. 7p.
- Claudin.J et Lignon.G.1995. Essai de définition et de caractérisation d'unités spatiales fonctionnelles pour la gestion d'un espace parc : cas du parc national du Mercantour in "la cartographie pour la gestion des espaces naturels, actes des rencontres internationales, Saint-Etienne, du 13 au 17 Novembre 1995. Ed. Cemagref-DISCOVA, ATEN, CRENAM, pp.315-319
- CHIRICI ET AL.2001 Testing Ikonos and Landsat 7 ETM+ images for stand-level forest type mapping: a case study under Mediterranean conditions In proceedings "Collecting and analyzing information for sustainable forest management and biodiversity monitoring with special reference to mediterranean ecosystems". Palermo, Sicily (Italy) 4-7 December 2001. 19 pages.
- Cihlar.X , Chen.J, Fung.B and Latifovic.1998 Classification by progressive generalization: a new automated methodology for remote sensing multichannel data. *int. j. remote sensing*, 1998, vol. 19, no. 14, 2685-2704.
- Durrieu.S.1994, Utilisation de la télédétection satellitaire pour la mise à jour de la carte de types de peuplements de l'inventaire forestier national. Application à une région forestière diversifiée de moyenne montagne. Thèse de doctorat-CEMAGREF-INGREF.Montpellier, France. 201.p
- Estiva.S et Puech.C. 1998: Régénération forestière après incendies. Travaux pratiques. Espaces et environnement méditerranéen. Université d'été international. Tunis du 12 au 25 Juillet 1998. Ed. CNES - France et ministère de l'éducation de Tunisie. 22 p.
- GRIM.S, 1989. Le préaménagement forestier. Volume 1. Ed. CEE et ministère d l'hydraulique d'Algérie. 369 p.
- Groove.T (de), Lowell.K et Thierry.B,1998., La super réalité de terrain : une nouvelle approche pour étudier l'incertitude spatiale sur des cartes forestières. In la réalité de terrain en télédétection: pratiques et méthodes. Ed. AUPELF-UREF. pp. 233-240.
- Hillion.A, Boucher.J.M et Roux.C., 1989, Le traitement des images de télédétection : aperçus et perspectives. Télédétection en francophonie. Éd. AUPELF-UREF. John Libbey Eurotext. Paris 0 1989. pp. 97-110
- Horler, D.N.H. & Ahern, F.J. 1986. Forestry information content of Thematic Mapper data. *International Journal of Remote Sensing* 7, 405-428.
- IFREMER PMSE.2002. Projet "Littoral de Provence occidentale". Apport des données du satellite SPOT-5 aux études environnementales de la zone du Delta du Rhône et de l'étang de Bere. Ed.PMSE (pôle méditerranéen des sciences de l'environnement). Aix en Provence. 37 p.
- Kleinn.C.2002 Nouvelles technologies et méthodologies pour les inventaires forestiers nationaux Unasyva - No. 210 - Evaluation et surveillance des forêts Vol. 53 2002/3 FAO - www.fao.com
- Lecompte.H et Rondeux.J., 2002, Les inventaires forestiers nationaux en Europe : Tentative de synthèse. Cahier n°5. Collection, les cahiers forestiers de Gembloux.. Ed. faculté de Gembloux . 29p
- KAYITAKIRE.F, FARCY.C and DEFOURNY.P, 2002. IKONOS-2 imagery potential for forest stands mapping. Presented at ForestSAT Symposium Heriot Watt University, Edinburgh, August 5th-9th, 2002. 11p.
- LECKIE.D.J, WALSWORTH.N, DECHKA.J ET WULDER.M.2002, An Investigation of Two Date Unsupervised Classification in the Context of a National Program for Landsat Based Forest Change Lapping. Remote Sensing Symposium. Toronto, Juin du 24-28 Geoscience and Remote Sensing Society's International Geoscience (IGARSS). 15p.

- Louy.O., Borne.F. et Marceau.D. J. (2000). "Etude de la variabilité spatiale de couverts forestiers en fonction de l'échelle d'observation". *Géomatique Expert*, n° 9, pp. 20-30.
- Maire.A 1989, Analyse et classification de la végétation, document technique n°15. Bulletin de l'entomofaune . NUMÉRO 5 JUIN 1989; pp3-
- Malingreau.J.M, 1993 Le point sur la surveillance par satellite des forêts mondiales. *Unasylva* n°174 Ed. FAO Revue internationale des forêts et des industries forestières - Vol. 44 - 1993/3. www.fao.com
- Ohmann.J.L and Gregory.M.J., 2002, Predictive mapping of forests composition and structure with direct gradient analysis and nearest-neighbor imputation in coastal Oregon.USA. *Canadian Journal for natural resources*.Vol 32, pp725-741.
- Pain-Orce.T.M, Lo.Seen.D, Fauvet.N, Trebuchon.J-F et Dipapoundji.B 1998. Les cartes, la télédétection et les SIG, des outils pour la gestion et l'aménagement des forêts tropicales d'Afrique Centrale . rapport.CIRAD-Forêt.31p
- PNUE/PAM/PAP.2000 : Directives pour la gestion de programmes de contrôle d'érosion et de désertification plus particulièrement destinées aux zones côtières méditerranéennes. Split, Croatie. Programme d'actions prioritaires, 2000. 116 pages.
- Riaño.D, Chuvieco.E, Salas.J, and Aguado.I, 2003 Assessment of Different Topographic Corrections in Landsat-TM Data for Mapping-Vegetation Types. *IEEE transactions on geoscience and remote sensing*, vol. 41, n°. 5, May 2003. pp1056-1060.
- Shoshany M, 2000, Satellite remote sensing of natural Mediterranean vegetation: a review within an ecological context. *Progress in Physical Geography*, June 2000, vol. 24, no. 2,).Ed. Hodder Arnold Journals. pp. 153-178.
- Smith.G.M and Fuller.R.M.2001, An integrated approach to land cover classification: An exemple in the island of Jersey. *International Journal Of Remote Sensing*, 22, pp3123-3142.
- Steven. M. (de Jong), Hornstra.T and Maas.H.G., 2001, An integrated spatial and spectral approach to the classification of Mediterranean land cover types:the SSC method. *JAG • Volume 3 - Issue 2 - 2001*, pp176-183.
- Totté.M 1998 : La géomatique : intérêt et conditions d'appropriation pour les projets de développement. Un outil d'aide à la capitalisation et au suivi-évaluation des microréalisations. Exemples au Yatenga (Burkina Faso). Point de vue. *Cahiers Sécheresse, volume 9, Numéro 4, pages 299-307*.
- Wallerman, J. 2003. Remote Sensing Aided Spatial Prediction of Forest Stem Volume. Doctoral dissertation. ISSN 1401-6230, ISBN. Swedish University of Agricultural Sciences . Umeå 2003 .. Printed by: SLU Grafiska Enheten, Umeå, Sweden, 2003. 91-576-6505-2 . 42p
- Yanqiu.X.X, Lihai.W, Westinga.E.,2004, Assessment of degraded matorralland using remote sensing imagery in Guadalteba Area, Spain *Journal of Forestry Research*,2004,15(2):145-149 www.jfr.nefu.edu.cn/ylist.asp?id=92.
- Zhenga.D, Rademacherb.J, Chena.J, Crowc.T, Breseea.M, Moined.J(1e) and Ryu.S.R.2004, Estimating aboveground biomass using Landsat 7 ETM+ data across a managed landscape in northern Wisconsin, USA. *Remote Sensing of Environment* 93 (2004). 402– 411.