

Faculté des sciences de la nature et de la vie  
et des sciences de la terre et de l'univers

Département des sciences de l'agronomie et des forêts

Thèse de doctorat en sciences forestières



**Développement d'une méthodologie  
d'utilisation de la télédétection satellitaire  
pour l'aménagement forestier en zones  
semi-arides de l'Ouest algérien**

Présentée par **BENCHERIF Kada**

Soutenue le 04 décembre 2010

Devant le jury,

Mr. BOUAZZA Mohamed.....	Professeur, Université de Tlemcen.....	Président
Mr. BENSALAH Mustapha.....	Professeur, Université de Tlemcen.....	Rapporteur
Mr. BENABDELI Khelloufi .....	Professeur, Université de Mascara .....	Examineur
Mme. BELHADJ-AISSA Aichouche..	Professeur, USTHB, Alger.....	Examineur
Mr. DJILI Kaddour.....	Professeur, ENSA, Alger.....	Examineur
Mr. BOUHRAOUA Tarik-Rachid.....	Professeur, Université de Tlemcen.....	Examineur

Année universitaire 2010-2011

*À ma femme*

*À mes enfants Mohamed el Amine, Yasser et Romeissa*

# Remerciements

Tout d'abord, j'exprime ma profonde reconnaissance au professeur **BENSALAH Mustapha** qui a accepté de prendre en charge mon encadrement dans des circonstances particulières et d'assurer la direction scientifique de cette thèse. J'exprime aussi mes vifs remerciements à monsieur **BOUAZZA Mohamed** de l'université de Tlemcen d'avoir accepté de présider mon jury, madame **BELHADJ-AISSA Aichouche** de l'USTHB d'Alger et messieurs, **BENABDELLI Khelloufi** de l'université de Mascara, **DJILI Kaddour** de l'ENSA d'Alger et **BOUHRAOUA Rachid Tarik** de l'université de Tlemcen d'avoir accepté d'examiner ce travail.

Mes remerciements s'adressent encore à tous les responsables des services techniques et administratifs de la réserve de chasse 'Moulay Ismaïl' de Sig-Mascara auxquels j'ai eu recours et plus spécialement Mr. BOUROUIS Kaddour, ex-directeur, pour l'appui logistique concernant les nombreux déplacements en forêt, ainsi qu'à monsieur HAMRI Djilali, chef service technique pour la documentation cartographique.

Je souhaite adresser mes remerciements à l'ensemble du personnel du parc national de Tlemcen qui ont toujours manifesté leur amabilité en mettant à notre disposition les documents cartographiques et le GPS pour le travail terrain dans la forêt domaniale de Tlemcen et particulièrement Mr KAZI et Mr ABDELHAK, sans oublier le personnel technique de la circonscription des forêts de Tlemcen.

Mes remerciements vont également aux services techniques de la conservation des forêts de Djelfa pour avoir mis à notre disposition les données de l'inventaire de la forêt Senalba-cheroui non seulement en 2002 dans le cadre de ma thèse de magistère mais aussi lors de visites de nos étudiants dans le cadre de leur mémoires de fin d'études.

Je tiens à remercier vivement mon frère Ahmed pour avoir mis à ma disposition et ce pendant plusieurs années son matériel informatique ainsi que mes amis et collègues Mohamed BELLIFA et Mohamed BRAHIMI pour leur soutien au moment où je passais un des moments difficiles de cette thèse.

Je tiens enfin à remercier Monsieur Vincent GODARD de l'université Paris VIII pour avoir accepté de m'accueillir dans le laboratoire de géographie et monsieur Mohamed FENNANE de l'institut scientifique - université Mohamed V de Rabat. Enfin, je tiens à remercier tout spécialement mes parents, ma femme, mes frères et sœur pour leur soutien et leurs encouragements.

## Résumé

Cette étude propose une méthodologie qui intègre l'information contenue dans les images satellitaires de moyenne résolution spatiale à la phase d'analyse de l'aménagement forestier en zones semi-arides de l'Ouest algérien. Des classifications basées sur des critères physiognomiques ont caractérisé les formations forestières de ces zones par la hauteur, la densité de couvert et la composition en essences dominantes. Pour une analyse descriptive, des classifications par pixel d'images SPOT et par objet d'images ETM+ de Landsat sont réalisées respectivement sur la forêt Moulay Ismaïl de Sig (Mascara) et la forêt domaniale «Senalba chergui» (Djelfa-Atlas saharien, Algérie). Les premières ont permis de décrire et cartographier des unités homogènes quant à ces critères prédéfinis malgré la grande hétérogénéité floristique et structurale du milieu étudié. Pour une identification sémantique de ces unités, les notions «type physiognomique» et «unité sylvo-paysagère» considérée comme un niveau d'analyse pertinent, sont introduites pour compléter la notion «type de peuplement» devenue insuffisante en zones semi-arides. La classification orientée-objet basée sur un facteur d'échelle compris entre 45 et 50, sur des attributs spatiaux et spectraux et sur la méthode des K plus proches voisins, a permis de caractériser à l'échelle du paysage, un milieu forestier hétérogène en simplifiant le contenu de l'image tout en conservant l'information utile sur les types d'occupation spectralement et spatialement homogènes : peuplements de pin d'Alep (denses et compacts, denses et fragmentés, clairs), les matorrals arborés à genévrier et chêne vert, les matorrals à romarin et ciste et les herbacées. En ce qui concerne l'aspect dendrométrique et les potentialités de production, une approche est proposée pour estimer le volume-tige de la forêt résineuse de Tlemcen à travers l'intégration de données ETM+ de Landsat (stratification par l'algorithme du Max. de vraisemblance) aux placettes-terrain de dimensions comparables à celles du pixel. Une analyse de variance suivie d'une stratification (précision 93%) ont permis avec les 12 placettes échantillons assises sur terrain d'estimer un volume de  $27535,212 \text{ m}^3 \pm 14.66\%$ , une précision considérée comme acceptable pour les inventaires dendrométriques expéditifs.

**Mots-clés :** Télédétection ; Aménagement ; Forêt ; Matorral ; Semi-aride ; Volume-tige; Ouest-algérien.

## Abstract

This study proposes a methodology that integrates contained information within medium spatial resolution satellite imagery to the forest planning's in semiarid zones of western Algeria. Classifications based on physiognomic criteria enabled to characterise forest formations of these zones by height, by cover density and by the dominant species composition. For a descriptive analysis, per pixel classifications of SPOT imagery and per object ones of Landsat ETM+ imagery are achieved respectively on the forest 'Moulay Ismaïl' of Sig (Mascara) and on the state forest "Senalba chergui" (Djelfa-Saharan Atlas, Algeria). First ones permitted describing and mapping homogeneous units concerning these predefined criteria despite the great floristic and structural heterogeneity of the survey zone. For a semantic identification of these units, notions as «physiognomic type» and «forest landscaped unit» admitted as a pertinent analysis level, are introduced to complete the «stand type» one, getting insufficient in semiarid zones. Object oriented classification based on 45-50 values of the scale factor, on spatial and spectral attributes and on the **Knn** method, permitted to characterize at the landscape level, heterogeneous forest environment while simplifying the image content and conserving useful information about spectrally and spatially homogeneous land cover types, such as various Aleppo pine stands (dense and compact, dense and fragmented, opened), high Juniper and oak shrub-lands, rosemary low shrubs-lands and herbaceous. As for the dendrometrical analysis, a methodological approach is proposed for stem volume estimation of the coniferous forest of Tlemcen through Landsat ETM+ data integration (stratification using Max. likelihood algorithm) to field plots with the same size as the pixel. Analysis of variance forwarded by stratification (accuracy 93%) permitted by means of 12 field sample plots, to produce global growing volume estimate of  $27535,212 \text{ m}^3 \pm 14.66\%$  which is an acceptable accuracy for expeditious dendrometrical inventories.

**Key-words:** Remote sensing ; Planning ; Forest ; Shrub-land ; Semiarid ; Stem volume ; Western Algeria.

## ملخص

تستعرض هذه الدراسة طريقة منهجية لإدماج المعلومة المحتواة في الصور الفضائية ذات قدرة التحليل المتوسط في مرحلة التحليل من عملية التهيئة الحراجية بالمناطق الشبه الجافة من الغرب الجزائري. مكن التصنيف المؤسس على معايير ملمحية من تمييز التشكيلات الحرجية بهذه المناطق بالعلو، بكثافة الغطاء، وبالتركيبية من حيث الأصناف الشائعة. من أجل تحليل وصفي، تم تحقيق تصنيفات بكسلية لصور سيوت و موضوعية لصور لندسات في كل من غابة مولاي إسماعيل- سيق- (معسكر) و غابة سنلبية شرقي (الجلفة-الأطلس الصحراوي). سمح التصنيف الأول من وصف و وضع خريطة وحدات متجانسة من حيث المعايير المحددة مسبقا على الرغم من التباين النباتي و البيئي الكبير للبيئة موضوع الدراسة. من أجل التعرف المدلولي على هذه الوحدات تم إدراج مفهوم «النوع الملمحي» و «الوحدة الحرجية المشهدية» كمستوى تحليل موضوعي لتكامل مفهوم «نوع المجموعة الحرجية» الذي أصبح غير كاف في المناطق الشبه جافة. أما فيما يخص التصنيف الموضوعي الموجه و المؤسس على عامل سلم ذات قيمة محصورة ما بين 45 و 50 و على خاصيات مكانية و طيفية و على طريقة **knn**, فقد مكن على المستوى المشهدي، من وصف وسط حرجي غير متجانس و ذلك بنهذيب محتوى الصورة مع الحفاظ على المعلومة المفيدة حول أنواع شغل أراضي متجانسة طيفيا و مكانيا: مجموعات صنوبر حليبي (كثيفة متماسكة، كثيفة و متجزئة، خفيفة) أدغال مشجرة بالعرعار و البلوط الأخضر أدغال الإكليل و أخيرا أعشاب. أما فيما يخص التحليل القياسي للأشجار و إمكانية الإنتاج فهناك اقتراح مقارنة منهجية لحساب الحجم الساقلي الشامل لغابة تلمسان الصنوبرية و ذلك من خلال دمج معطيات صورة لندسات (تنضيد بكسلي) مع عينات ميدانية ذات نفس مقاييس البكسل. و سمح تحليل أنوفا المتبوع بتصنيف (نسبة دقة 93%) بمعية 12 عينة ميدانية من حساب حجم  $27535,212 \pm 14.66\% \text{ م}^3$  وهي نسبة خطأ مقبولة بالنسبة للجرد السريع.

**كلمات-مفتاح:** استكشاف عن بعد ; تهيئة ; غابة ; احراج ; شبه جاف ; حجم ساقلي ; الغرب الجزائري

## **TABLES DES MATIERÈS**

Avant-propos .....	x
Introduction.....	1

### **PREMIÈRE PARTIE L'AMÉNAGEMENT FORESTIER : INSTRUMENT ET ÉLÉMENT DE LA PLANIFICATION DU TERRITOIRE**

#### **Chapitre premier L'aménagement forestier : analyse d'un concept**

<b>1.1. Processus de l'aménagement forestier.....</b>	<b>4</b>
<b>1.2. L'espace forestier algérien et les défis d'avenir.....</b>	<b>7</b>
1.2.1. Une gestion organisée .....	7
1.2.2. Un aménagement durable.....	7
1.2.3. Une gestion écosystémique.....	8
<b>1.3. Importance de l'information pour les aménagements forestiers.....</b>	<b>9</b>
1.3.1. Importance générale de l'information.....	9
1.3.2. Sources de l'information forestière.....	9
1.3.2.1. <i>Les inventaires terrain traditionnels.....</i>	<i>9</i>
1.3.2.2. Les inventaires cartographiques.....	10
1.3.2.3. <i>Les principaux objectifs d'un inventaire forestier.....</i>	<i>10</i>
<b>1.4. Présentation de l'information.....</b>	<b>11</b>
<b>1.5. Relations : télédétection - cartographie – SIG.....</b>	<b>12</b>
1.5.1. Description de l'espace.....	12
1.5.1.1. <i>Mode matriciel.....</i>	<i>12</i>
1.5.1.2. <i>Mode vectoriel.....</i>	<i>12</i>
<b>1.6. Les systèmes d'information géographique.....</b>	<b>12</b>

### **DEUXIÈME PARTIE LA TELEDETECTION SATELLITAIRE, SOURCE D'INFORMATIONS FORESTIERES**

#### **Chapitre premier Présentation de la télédétection satellitaire**

<b>1.1. Définitions.....</b>	<b>14</b>
<b>1.2. Bases physiques de la télédétection satellitaire.....</b>	<b>14</b>
<b>1.3. Les satellites d'observation de la terre.....</b>	<b>15</b>

1.3.1. Télédétection spatiale passive.....	16
1.3.2. Télédétection spatiale active.....	17
<b>1.4. Les fenêtres spectrales utiles et leur signification.....</b>	<b>17</b>
<b>1.5. Correspondances fenêtres spectrales - canaux satellitaires.....</b>	<b>18</b>
<b>1.6. Signatures spectrales et niveaux numériques.....</b>	<b>19</b>
<b>1.7. Relation signature/objet.....</b>	<b>19</b>
<b>1.8. Interactions des rayonnements électromagnétiques - surfaces naturelles.....</b>	<b>21</b>
1.8.1. Effets des facteurs externes.....	21
1.8.2. Effet des facteurs propres aux couverts végétaux.....	22

## Chapitre deuxième Traitement des données de la télédétection satellitaire

<b>2.1. Traitement des données.....</b>	<b>23</b>
2.1.1. Les pré-traitements.....	23
2.1.1.1. <i>Les corrections radiométriques.....</i>	<i>23</i>
2.1.1.2. <i>Les corrections géométriques.....</i>	<i>24</i>
2.1.2. Les traitements proprement dits.....	24
2.1.2.1. <i>Les analyses statistiques.....</i>	<i>25</i>
a) <i>Les classifications.....</i>	<i>25</i>
b) <i>La segmentation.....</i>	<i>28</i>
2.1.3. Précision des classifications.....	29
2.1.4. Le paradigme segmentation – classification.....	30
2.1.5. L'analyse orientée-objet.....	31
2.1.5.1. <i>Problème du contexte.....</i>	<i>32</i>

## Chapitre troisième Bilan de la télédétection forestière

<b>3.1. Analyse descriptive et dendrométrie des peuplements forestiers.....</b>	<b>33</b>
3.1.1. Identification de la végétation forestière.....	33
3.1.1.1. <i>Végétation herbacée et Végétation arbustive.....</i>	<i>33</i>
3.1.1.2. <i>Les peuplements forestiers.....</i>	<i>34</i>
3.1.2. Détection des changements.....	34
3.1.3. Détection des coupes.....	34
3.1.4. Détection des maladies.....	35
3.1.5. Détection des feux et des zones brûlées.....	35
3.1.6. Détection des points d'eau.....	36
3.1.7. Estimation du volume bois.....	36
<b>3.2. Méthodologies d'utilisation de l'information satellitaire pour la conception des plans d'aménagement.....</b>	<b>37</b>
3.2.1. Analyse descriptive.....	37
3.2.2. Analyse dendrométrique.....	38
3.2.3. Les tendances.....	39

**TROISIÈME PARTIE**  
**INTÉGRATION DE LA TÉLÉDÉTECTION SATELLITAIRE**  
**DANS LE PROCESSUS D'AMÉNAGEMENT**  
**DES FORETS SEMI-ARIDES**

**Chapitre premier**  
**Caractéristiques de l'espace forestier semi-aride de**  
**l'Ouest algérien**

<b>1.1. Caractéristiques générales.....</b>	<b>41</b>
<b>1.2. Les écosystèmes forestiers.....</b>	<b>42</b>
1.2.1. Les forêts.....	42
1.2.2. Les matorrals.....	43
1.2.3. Les steppes.....	43
<b>1.3. Importance socio-économique .....</b>	<b>44</b>
<b>1.4. L'espace forestier algérien entre déforestation et reboisement.....</b>	<b>44</b>
<b>1.5. Perspectives d'aménagement.....</b>	<b>45</b>
<b>1.6. Présentation des zones d'étude.....</b>	<b>47</b>
<b>1.6.1. première zone : Djelfa.....</b>	<b>48</b>
1.6.1.1 Situation générale.....	48
1.6.1.2. Relief et hydrographie.....	48
1.6.1.3. Géomorphologie.....	49
1.6.1.4. Les sols .....	49
1.6.1.5. Le climat.....	49
<b>1.6.2. Deuxième zone : Mascara.....</b>	<b>52</b>
1.6.2.1. Situation générale.....	52
1.6.2.2. Aperçu historique.....	53
1.6.2.3. La Végétation.....	53
1.6.2.4. Géomorphologie.....	54
1.6.2.5. Le climat.....	54
<b>1.6.3. Troisième zone : Tlemcen.....</b>	<b>56</b>

**Chapitre deuxième**  
**Approche méthodologique de cartographie et**  
**prédétermination des peuplements forestiers et leurs**  
**potentialités de production**

<b>2.1. Cartographie des peuplements forestiers.....</b>	<b>57</b>
<b>2.2. Problème de cartographie et de délimitation de milieux hétérogènes.....</b>	<b>57</b>
<b>2.3. Classification de la végétation naturelle.....</b>	<b>58</b>
<b>2.4. Classifications des images satellitaires.....</b>	<b>60</b>
<b>2.5. Analyse des données de la télédétection.....</b>	<b>62</b>
2.5.1. Définition des besoins.....	62
2.5.2. Collecte des données.....	62
2.5.3. Analyse des données.....	63
<b>2.6. La dialectique objet/signal et signal/objet comme position de recherche.....</b>	<b>63</b>
2.6.1. De l'objet géographique au signal : donner de la mesure" à l'objet.....	64

2.6.2. Les objets géographiques à détecter.....	65
2.6.2.1. <i>Distinction sémantique entre occupation du sol et état de surface</i> .....	65
2.6.3. Du contenant au contenu : deux démarches complémentaires.....	66
2.6.3.1. <i>Approche par le contenant</i> .....	66
2.6.3.2. <i>Approche par le contenu</i> .....	67
2.6.3.3. <i>Approche contenu-contenant</i> .....	67

## QUATRIÈME PARTIE APPLICATIONS DÉVELOPPEMENT D'UNE MÉTHODOLOGIE

### Chapitre premier Cartographie physionomique de la végétation forestière par classifications d'images SPOT

<b>1.1. Problématique et objectifs</b> .....	68
<b>1.2. Les zones d'étude</b> .....	69
<b>1.3. Les données dendrométriques et satellitaires</b> .....	70
1.3.1. Données satellitaires.....	70
1.3.2. Données dendrométriques.....	71
<b>1.4. Méthodologie</b> .....	72
1.4.1. Les corrections géométriques.....	72
1.4.2. Les corrections radiométriques.....	72
1.4.3. Visualisation des images.....	72
1.4.4. Classifications des images.....	72
1.4.4.1. <i>Les classifications non dirigées</i> .....	72
1.4.4.2. <i>Les classifications dirigées</i> .....	73
a) <i>Digitalisation des parcelles d'entraînement</i> .....	74
b) <i>Séparabilité des parcelles d'entraînement</i> .....	74
c) <i>Construction des classes</i> .....	75
<b>1.5. Résultats</b> .....	75
1.5.1. les classifications non dirigées.....	75
1.5.2. les classifications dirigées.....	79
1.5.3. Estimation des surfaces.....	80
<b>1.6. Discussions</b> .....	82

### Chapitre deuxième Analyse paysagère par classifications d'images ETM+ de LANDSAT

<b>2.1. Problématique et objectifs</b> .....	86
2.1.1. Définition du paysage.....	86
2.1.2. Contexte.....	88
2.2. Données satellitaires.....	89
2.3. Méthodologie.....	89
2.3.1. <i>Description physionomique</i> .....	90
2.3.2. <i>Segmentation de l'image</i> .....	91
2.3.3. <i>Classification de l'image</i> .....	91



<b>2.4. Résultats</b> .....	93
<b>2.5. Discussion</b> .....	95
2.5.1. L'analyse paysagère pour l'aménagement forestier des zones semi-arides.....	99
2.5.2. Apport de la méthode orientée-objet pour l'analyse paysagère.....	101

## Chapitre troisième

### Estimation des potentialités de production par intégration de données ETM+ de Landsat

<b>3.1. Problématique</b> .....	103
<b>3.2. Données satellitaires</b> .....	105
<b>3.3. Classification de l'image</b> .....	105
3.3.1. Echantillonnage.....	106
3.3.2. Construction des classes.....	106
3.3.3. Désignation et inventaire des pixels échantillons.....	106
3.3.3.1. <i>Stratification et analyse de variance</i> .....	107
3.3.3.2. <i>Méthode de l'inventaire terrain</i> .....	109
<b>3.4. Résultats</b> .....	111
<b>3.4. Discussion</b> .....	112

## chapitre quatrième

### Méthodologie pour la conception de plans d'aménagement forestier

<b>4.1. Aménagement forestier et inventaire</b> .....	114
<b>4. 2. Méthodologie d'analyse descriptive</b> .....	114
4.2.1. Approche basée sur les classifications par pixel .....	114
4.2.1.1. <i>La notion de type de peuplement</i> .....	115
4.2.1.2. <i>La notion de type forestier</i> .....	116
4.2.1.3. <i>Méthodologie</i> .....	116
4.2.1.4. <i>Définition de la notion de type physiologique</i> .....	117
4.2.1.5. <i>Analyse de l'image satellitaire</i> .....	117
a). <i>La recherche des types physiologiques</i> .....	118
b). <i>Segmentation spatiale en unités sylvo-Paysagées</i> .....	118
c). <i>Recherche des usps : désagrégation des types physiologiques</i> .....	119
d). <i>Gestion informatique des résultats</i> .....	119
4.2.2. Approche basée sur les classifications par objet.....	120
4.2.2.1. <i>Cartographie des unités physiologiques</i> .....	121
a) <i>Délimitation des unités</i> .....	121
b) <i>Niveaux d'interprétation</i> .....	121
c) <i>Niveaux de complexité</i> .....	121
d) <i>Niveaux de lecture</i> .....	122
<b>4.3. Méthodologie de zonage</b> .....	123
4.3.1. Le parcellaire et l'inventaire forestier.....	123
4.3.2. Approche basée sur un parcellaire flexible.....	124
4.3.3. Approche basée sur un zonage fonctionnel.....	125

4.3.3.1. <i>Contexte</i> .....	125
<b>4.4. Méthodologie d'analyse dendrométrique</b> .....	125
<b>4.5. Développement d'indicateurs sur l'espace forestier semi-aride</b> .....	127
<b>Conclusions</b> .....	128
<b>Références bibliographiques</b> .....	130

## Annexes

<b>Annexe 1.</b> Liste des abréviations.....	1
<b>Annexe 2.</b> Liste des tableaux.....	2
<b>Annexe 3.</b> Liste des figures.....	3
<b>Annexe 4.</b> Données climatiques complémentaires. Forêt Senalba chergui, Djelfa....	4
<b>Annexe 5.</b> Correction géométrique des images SPOT et Landsat. Points d'amers....	6
<b>Annexe 6.</b> Matrices de confusion et statistiques générales. Deuxième zone d'étude..	7
<b>Annexe 7.</b> Tables de séparabilité des zones d'entraînement. Deuxième zone d'étude.	11
<b>Annexe 8.</b> Coordonnées des relevés floristiques des principales unités paysagères...	14

# Avant propos

## Contenu

Ce document est le résultat d'un travail de recherche sur l'analyse de milieux forestiers hétérogènes à partir de la télédétection satellitaire de moyenne résolution spatiale en vue de proposer une approche méthodologique d'utilisation de cet outil pour l'aménagement forestier en zones semi-arides. Nous y décrivons les méthodes de travail qui ont été réalisées sur trois régions géographiquement éloignées mais appartenant à un même contexte bioclimatique semi-aride de l'Ouest algérien (Djelfa, Mascara et Tlemcen). La méthodologie finale est le produit d'un développement progressif de deux approches de classifications (par pixel et par objet) conjuguées aux approches d'aménagement forestier classique et paysager.

Vu le caractère pluridisciplinaire des procédés décrits, nous avons essayé de rendre le contenu utile pour des lecteurs issus de différentes formations par un agencement et un enchaînement logique des différents chapitres. A cause du caractère pluridisciplinaire de l'aménagement forestier, il était impossible de cerner l'impact de l'usage de la télédétection sur les différentes étapes de ce processus et à cause de cette contrainte, l'étude s'est limitée à l'analyse descriptive et dendrométrique des peuplements forestiers.

C'est pourquoi il devient plus difficile de donner un nom à la méthodologie encore plus un intitulé adéquat à cette thèse. Le titre «**Développement d'une méthodologie d'utilisation de la télédétection satellitaire pour l'aménagement forestier en zones semi-arides de l'Ouest algérien**» exprimerait nos intentions et nos ambitions mais un sous-titre «**À la découverte des potentialités des techniques de classification pour l'analyse descriptive et dendrométrique des forêts semi-arides**» rendrait bien compte du contenu mais nous laissons tout de même au lecteur le soin de se forger sa propre opinion.

Il est important aussi de faire une distinction dès le départ entre deux aspects de nos travaux : d'abord les questions posées puis les méthodes spécifiques de classifications d'images choisies pour y répondre. Les premières sont assez facilement justifiables. Par contre, nous sommes plus prudents concernant les méthodes qui bien qu'elles conservent toute leur importance, risquent quand même d'être délaissées au profit de nouvelles méthodes. C'est pourquoi, une méthodologie telle qu'elle est perçue dans ce travail, désigne tout un ensemble de méthodes de télédétection et de concepts forestiers qui, judicieusement choisies et combinées, aboutissent à satisfaire localement les besoins de la gestion forestière.

# Introduction

**L'**aménagement forestier durable exige la disponibilité de données réelles sur la ressource forestière. Pour l'inventaire forestier, cette exigence est prioritaire étant donné qu'il est primordial avant d'envisager des actions, de recueillir et de collecter l'information nécessaire et utile sur l'environnement de l'unité à aménager. Dans ce même ordre d'idées, les hommes ont depuis toujours recherché des points d'observation<sup>1</sup> situés haut au-dessus du paysage pour avoir une vue sur les terrains alentour. Une modalité similaire de collecte d'information est utilisée dans la discipline «télédétection».

**La** télédétection satellitaire contribue certainement à la réalisation des objectifs de l'inventaire forestier. En effet, pour le monde du développement, la télédétection satellitaire constitue et devra constituer la source préférentielle de l'information forestière [IFREMER-PMSE, 2002]. Les possibilités d'utilisation de la télédétection satellitaire pour la conception des plans d'aménagements en termes de cartographie et prédétermination des peuplements forestiers impliquent davantage le développement d'une méthodologie d'utilisation de cet outil pour l'aménagement forestier en zones semi-arides.

**D**ans les zones forestières semi-arides de l'Ouest algérien, un regroupement adéquat des différentes classes thématiques conduit généralement aux grands types de couverts suivants : Forêt, matorral haut, matorral bas, formations herbacées, vides forestiers. La représentation cartographique de ces couverts peut se concevoir de plusieurs manières liées dans une certaine mesure à la source et la nature des données-terrain. L'une des recherches méthodologiques importantes en télédétection est la reconnaissance de la couverture du sol à partir d'interprétations automatiques d'images satellitaires à travers les algorithmes de classifications [Leckie, 2002 ; Ohmmann et Gregory, 2002].

**N**otre approche part du principe qu'une classification d'images satellitaires exige la possession de la réalité terrain qui peut être définie comme étant "l'ensemble des zones d'une région qui sont homogènes pour un certain nombre de paramètres" [Groeve et al. 1998]. Pour les zones forestières semi-arides de l'Ouest algérien, ces paramètres sont en premier lieu la hauteur, la densité de couvert et la composition en essences. Ces critères<sup>2</sup> permettent de décrire ces milieux sous l'aspect physionomique de la végétation alors que la plupart des

---

<sup>1</sup> Ces points panoramiques permettaient d'avoir une "vision d'oiseau" des alentours et les gens pouvaient examiner et interpréter ce qu'ils observaient.

<sup>2</sup> Les critères écologiques tels le climat et le substrat complètent cette description

spécialistes pensent qu'une cartographie physionomique devra reposer sur des classifications<sup>3</sup> d'images satellitaires [Shoshany, 2000 ; Yankiu et al. 2004].

Quand le thème a été défini, Il semblait plus facile de travailler sur la seule forêt domaniale 'Senalba-Chergui' (Djelfa) qui de par sa valeur écologique représente un cas d'étude très intéressant. Mais vu l'importance territoriale des zones forestières semi-arides, le choix s'est porté en plus sur deux autres zones, la réserve de chasse « Moulay Smail » de Mascara et la forêt domaniale de Tlemcen. À vrai dire, cette dernière zone n'appartient pas à l'étage semi-aride mais sa composante principale, le pin d'Alep, est largement répandue dans cet étage. En plus, l'estimation du volume tige qui est la seule application dendrométrique retenue pour ce peuplement est purement technique et n'est nullement influencée par l'ambiance climatique.

La bibliographie montre des points de vue différents sur l'apport de la télédétection satellitaire pour la classification des espaces forestiers hétérogènes. D'une part, les classifications par pixel (dirigées ou non) sont souvent critiquées respectivement à cause de la difficulté de définir avec précision des zones d'entraînement ou à cause de la difficulté d'interpréter les classes spectrales obtenues [Guish, 2004 ; Puech, 200]. Les classifications par objet sont le plus souvent appliquées sur des images de résolution spatiale fine [Flanders et al. 2003].

D'autre part, certains auteurs vantent les mérites de la classification automatique pour son partage de l'espace spectral sur une base purement statistique alors que d'autres rapportent les performances de la classification par objet d'images Landsat [Mallinis et al. 2006]. Partant de ce constat, la présente étude est menée en appliquant les trois approches de classification sur des images de moyenne résolution de type SPOT et ETM+ de Landsat tout en formulant certaines interrogations au départ sur leur apport pour l'inventaire tant descriptif que dendrométrique des peuplements forestiers.

L'étude est une contribution au projet d'élaboration de l'inventaire forestier national, entrepris en 2001 par la direction générale des forêts. Ce projet concerne particulièrement l'actualisation de l'inventaire national des forêts qui date de 1985 [Mezali et Goussanem, 2003]. Conscients que les outils d'aide à la décision sont incontournables pour la réalisation des objectifs, la télédétection satellitaire semble l'outil appropriée pour l'analyse spatiale des

---

<sup>3</sup> La précision de ces classifications dépend de la définition que l'on accorde aux classes et de la relation entre la forme et la fonction pour les classes considérées [Bonn et al. 1996].

territoires forestiers et l'extraction de l'information recherchée. La collecte de données ne devrait pas être considérée pour autant comme une fin en soi mais comme un moyen de concrétiser d'une manière efficiente les projets d'aménagements [PNUE/PAM/PAP, 2000].

**L**es espaces forestiers semi-arides Ouest-algériens constituent un terrain parfaitement adapté à une approche physionomique<sup>4</sup>. Partant du constat que les traits physionomiques majeurs qui distinguent les formations végétales sont la hauteur, la densité et la composition en essences, le travail que nous présentons comporte quatre volets : 1. Cartographie physionomique de la végétation forestière à travers des classifications par pixel ; 2. Analyse paysagère par classification orientée-objet ; 3. Intégration des données Landsat aux données terrain pour l'estimation des potentialités de production ; 4. Proposition d'une approche méthodologique pour l'aménagement des espaces forestiers semi-arides.

**L'**un des aspects critiques de l'étude est l'impact. Les aménagements forestiers classiques en Algérie n'ont jamais atteint les objectifs escomptés. Plusieurs facteurs concourent à cet état et il est peut être temps de penser à intégrer l'approche paysagère d'aménagement forestier sans toutefois négliger l'approche par peuplement dans la hiérarchie écosystémique.

---

<sup>4</sup> La gestion actuelle, les usages liés à l'exploitation ainsi que la dynamique des peuplements sont des facteurs qui inter réagissent entre eux. Cette formalisation du système forêts nous conduit de considérer ces milieux comme une mosaïque d'unités paysagères [Brun, 2004] où la notion paysage, désigne dans tous les cas la physionomie de l'espace [MacGarigal, 2002].

# *Première partie*

L'aménagement forestier : instrument et élément  
de la planification du territoire

# *Chapitre premier*

## *L'aménagement forestier: analyse d'un concept*

### **1.1. Processus de l'aménagement forestier**

Le processus de l'aménagement forestier est universel et s'articule autour de la caractérisation des écosystèmes forestiers, la stratification du paysage, le développement de stratégies de gestion incluant les objectifs, les actions et l'évaluation des résultats comme des indicateurs de performance et d'efficacité [Baskent et al. 2008].

En France, l'office national des forêts distingue les étapes suivantes [ONF, 1989] :  
a) Les analyses ; b) Les synthèses ; c) Programme des travaux ; d) Bilan économique et financier. D'après Bellefontaine et al. [1997], la réalisation théorique de l'aménagement forestier se décline en quatre étapes:

- La connaissance et la description de l'existant.
- La définition des objectifs, des outils et des moyens.
- La négociation et la rédaction d'un plan d'aménagement.
- La mise en œuvre de ce plan, son suivi et son contrôle.

Selon la méthodologie Allemande, seule une conception optimale de l'aménagement forestier permet d'atteindre le résultat escompté, et un aménagement forestier optimal doit intégrer quatre catégories de facteurs [Zôhrer et al. 1987b]:

- Facteurs physiques: sol, climat, relief.
- Facteurs biologiques: végétation, productivité des peuplements forestiers.
- Facteurs humains: personnel disponible, populations locales.
- Facteurs économiques : réseau de pistes, marché du bois, type d'utilisation.

L'organisation d'un programme d'aménagement forestier doit en plus se traduire par la prise en compte des motivations justifiant les choix retenus en matière de gestion (d'où l'importance d'une approche historique et sociale) et les dimensions spatiale et temporelle de la gestion forestière d'où l'importance des nouveaux outils de description de l'espace tels les SIG<sup>1</sup>, de son suivi telle la télédétection et de prédiction telle la modélisation [CEMAGREF-ECOFOR, 2002].

---

<sup>1</sup> Système d'Information Géographique.



Un programme d'aménagement forestier doit donc passer nécessairement par les étapes suivantes :

**Première étape** : la plus importante, le préalable à tout aménagement forestier, doit recueillir et collecter l'information nécessaire et utile sur l'environnement de l'unité à aménager. Les niveaux d'information suivants peuvent être distingués: - Environnement humain, - Environnement économique, - Environnement écologique (analyse du milieu naturel).

Ce dernier niveau est mené classiquement par les forestiers aménagistes. Il s'agit de réaliser des inventaires de type descriptif et de type dendrométrique pour évaluer les ressources ligneuses et autres. Cependant, ces ressources doivent être localisées dans le temps et l'espace d'où la nécessité d'une cartographie appliquée, de travaux de délimitation et aussi l'élaboration d'une base de données contenant les connaissances physiques (climatiques, édaphiques et phyto-géographiques) ainsi que des connaissances dynamiques (productivité) relatives à l'écosystème forestier.

Dans cette analyse du milieu naturel comprenant le milieu physique et le milieu biotique (biologique), une attention particulière doit être prêtée aux analyses des peuplements forestiers<sup>2</sup>. Néanmoins, ces analyses ne seront possibles que si l'espace à aménager est fragmenté en unités homogènes de gestion, les parcelles forestières. Les bases de l'analyse des peuplements forestiers se résument donc à trois conditions : 1. la cartographie des types de peuplements ; 2. la réalisation d'un parcellaire ; 3. l'inventaire dendrométrique des peuplements.

L'établissement de la carte du parcellaire est souvent précédée d'une phase de prédétermination des types de peuplements. Cette opération est réalisée jusqu'à présent par photo-interprétation et enquêtes terrain. Le peuplement doit être mesuré et quantifié. Les méthodes d'inventaires dendrométriques sont toutes basées sur la mesure de la hauteur et du diamètre à hauteur d'homme (1.30 m) pour en déduire le volume sur pied de ce peuplement. Ces mesures au niveau d'une forêt sont faites in situ par échantillonnage (systématique, stratifié, au hasard).

**Deuxième étape** : Tout en s'appuyant sur l'information recueillie au cours des inventaires menés en première étape, elle doit définir les objectifs à assigner à l'espace

---

<sup>2</sup> En effet, le fondement de l'aménagement forestier est le peuplement forestier [Grim, 1989] et l'essentiel des travaux de cartographie et de délimitation concerne cet élément.

étudié et déterminer les outils et les moyens pour la réalisation de ces objectifs (production, protection physique ou paysagère, accueil et loisirs etc.). Mais l'objectif final décidé peut comporter des éléments antagonistes [ONF, 1989 ; Bellefontaine et al. 1997] d'où la nécessité de fragmentation de l'espace boisé appelé communément zonage de la forêt.

Ce zonage concerne essentiellement la division en parcelles et la formation des séries forestières. C'est un zonage spatial qui produit le plan parcellaire et la carte des séries forestières. En plus de ces deux éléments, d'autres tout aussi importants dans le procès d'aménagement apparaissent dans cette étape : ce sont le choix de certaines techniques et paramètres sylvicoles : le choix de la méthode d'aménagement, du mode de traitement, de l'âge d'exploitabilité, des essences et de la nature des coupes de régénération.

**La troisième étape** : résultat immédiat des deux précédentes, elle trace le programme des travaux à réaliser pendant la durée de l'aménagement. Par conséquent, on programme dans l'espace et le temps toutes les interventions sylvicoles et autres. En fait, il s'agit de consigner les résultats dans un document appelé «plan d'aménagement» dont la qualité de rédaction doit être des meilleures.

**La quatrième étape** : est une étape d'exécution du plan d'aménagement, son suivi et son évaluation. L'application de ce plan exige des moyens financiers dont l'utilisation doit être justifiée par un impact économique favorable pour la région concernée par l'étude. Le bilan économique et financier doit faire apparaître les retombées positives du projet sur la société et l'économie de la région et par suite bénéficier de l'aval des autorités centrales pour sa mise en application.

La revue de ces données et principes liés à l'aménagement forestier engendre certaines interrogations concernant la place de la télédétection satellitaire dans ce processus :

1. A quel niveau du processus de l'aménagement intervient la télédétection satellitaire?
2. Cette intervention lorsqu'elle est possible, sera-elle totale ou partielle à un niveau donné?
3. La précision des résultats sera-elle conforme aux exigences des décideurs forestiers?
4. Le coût de l'utilisation de la télédétection satellitaire plaide-t-il pour ce choix?

La télédétection satellitaire trouve toute sa place au niveau des analyses du milieu naturel et au niveau du suivi et de l'évaluation des actions menées sur celui-ci. Elle pourrait profiter ainsi aux inventaires forestiers nationaux, particulièrement pendant les étapes d'établissement des rapports [Kleinn, 2002]. Les images traitées peuvent aussi informer indirectement sur des phénomènes et des processus socio-économiques si la relation entre ces phénomènes et les objets extraits est bien établie.

## **1.2. L'espace forestier algérien et les défis d'avenir**

La nouvelle stratégie forestière qui a été décidée en Algérie est basée sur la planification intégrée des espaces naturels. Celle-ci doit être basée sur certains critères et concepts dont les plus importants sont l'aménagement forestier durable et la gestion écosystémique [Doyon, 2003 ; Shlaepfer, 1997] auxquels on doit associer dans le cas algérien l'organisation de la gestion forestière.

### **1.2.1. Une gestion organisée**

La gestion des forêts doit être organisée à deux niveaux : au niveau national (politique nationale du pays) et au niveau local (massif forestier) auquel correspond le règlement d'aménagement. Cette gestion doit chercher la pérennité et comporter des prévisions à longs termes et doit être prudente. Deux documents qui se complètent doivent permettre d'établir une gestion élargie et organisée du patrimoine forestier. Il s'agit du plan directeur forestier (PDF) et du plan d'aménagement forestier (PAF).

Le PDF doit définir les objectifs de la politique forestière régionale, ainsi que les mesures propres à les atteindre. Le PAF précise, au niveau local, les objectifs de l'aménagement forestier. Il délimite l'affectation des zones forestières compte tenu des fonctions attribuées. Il s'agit donc d'un document délimitant en priorité les différentes fonctions forestières observées (d'exploitation, de protection, sociale,...) [Blumer et Golay, 1997].

### **1.2.2. Un aménagement durable**

Mettre en place une foresterie durable, c'est déjà imaginer la forêt de 2100 [Pointereau, 1994]. Cette forêt de demain devra faire face aux nombreux défis des XXIe et XXIIe siècles : - contribuer activement avec l'agriculture (dans le cadre de systèmes agro-forestiers en particulier) et avec la pêche, à nourrir (produire des aliments mais aussi protéger directement ou indirectement la fertilité des sols, - assurer à moindre coût un

approvisionnement en eau convenable en qualité et en quantité, - affronter les variations climatiques, - satisfaire une population de plus en plus urbaine.

### 1.2.3. Une gestion écosystémique<sup>3</sup>

La gestion écosystémique est basée sur une série de principes scientifiquement fondés comme la réflexion au niveau du paysage et l'intégration des différentes échelles [Schlaepfer, 1997]. Ce processus permet d'intégrer l'information environnementale à travers l'ensemble des types d'occupation du sol et fournit par conséquent un nouvel outil pour évaluer la gestion de l'espace forestier et les changements écologiques dans le temps [Kepner et al. 2007].

L'approche paysagère doit être mise en relation avec la notion d'écosystème. Les forêts semi-arides sont à la fois un paysage mais aussi un milieu particulier se développant dans un contexte steppique aride (Atlas saharien) et un contexte urbain pressant (Atlas tellien). Une atteinte à l'intégrité d'un tel paysage n'est pas sans conséquence sur la protection des espèces animales et végétales qui y vivent.

L'aménagement forestier doit donc être orienté essentiellement vers la conservation de la biodiversité et le développement socio-économique. Au niveau local, l'aménagement forestier peut être défini comme étant l'ensemble des actions volontaires et réfléchies sur un espace forestier. Par conséquent, ceci implique la connaissance et la compréhension de ce milieu par l'acquisition d'une information géographique fiable, régulièrement actualisée. Cette analyse représente un élément clé du processus de la gestion écosystémique dont l'une des bases scientifiques est la télédétection satellitaire.

---

<sup>3</sup> **Justification de la gestion écosystémique :** Nous assistons actuellement à la **détérioration continue des écosystèmes** dont nous sommes tributaires pour notre bien-être [Schlaepfer, 1997].

### 1.3. Importance de l'information pour les aménagements forestiers

#### 1.3.1. Importance générale de l'information

La réussite de l'aménagement forestier repose sur une bonne analyse de l'environnement naturel et socio-économique du territoire forestier. Pour mener à bien cette analyse, l'organisme forestier doit détenir l'information sur cet environnement ou prendre les moyens nécessaires pour la recueillir [Bélanger et Hatin, 2004]. En effet, un organisme forestier qui ne dispose pas de données actualisées et rigoureuses sur ses forêts n'est pas en mesure de prendre des décisions stratégiques efficaces [Dykstra, 1996].

#### 1.3.2. Sources de l'information forestière

##### *1.3.2.1. Les inventaires terrain traditionnels*

On distingue généralement deux sortes d'inventaires : les inventaires de gestion (ou d'aménagement) et les inventaires nationaux ou régionaux. D'après Lecomte et Rondeux, [2002], ils se différencient par le fait des quelques caractéristiques fondamentales suivantes :

**L'étendue à laquelle ils se réfèrent** : l'inventaire de gestion concerne des étendues relativement restreintes, quelques hectares à quelques centaines d'hectares et se limite à la propriété. L'inventaire national ou régional par contre, couvre des milliers, voire des millions d'hectares et s'adresse aussi bien à des propriétés privées qu'à des propriétés appartenant à des collectivités.

**Les objectifs qu'ils cherchent à atteindre** : dans l'inventaire de gestion, seuls les intérêts du propriétaire sont visés, ils impliquent l'estimation du matériel sur pied et l'établissement de plans de gestion. Dans l'inventaire forestier national, c'est l'ensemble des forêts qui est considéré comme un tout constituant les ressources forestières de la nation.

**Les méthodes utilisées pour la réalisation du travail d'inventaire** : si l'inventaire complet peut être suggéré dans le cadre d'un inventaire de gestion, il est irréaliste d'y avoir recours pour l'inventaire national. L'inventaire par échantillonnage, utilisable tant en inventaire de gestion (du moins à partir d'une certaine surface) qu'en inventaire national, se basera sur un taux d'échantillonnage beaucoup plus intensif au niveau des propriétés ou des massifs qu'au niveau régional.

Les inventaires nationaux peuvent être répartis en grandes catégories suivantes [SCF, 2002] :

**Reconnaissance:** Inventaire forestier vaste et exploratoire qui ne donne pas d'estimations détaillées.

**Régional** : Inventaire forestier vaste et détaillé qui sert à la planification à l'échelle régionale ou provinciale.

**Gestion** : Inventaire forestier intensif et détaillé établi à des fins de gestion d'une superficie aménagée spécifique.

**Satellitaire** : Cartographié à partir d'images satellitaires.

### 1.3.2.2. Les inventaires cartographiques

Les inventaires d'origine sont en général fondés sur des cartes créées à partir de l'interprétation de photos aériennes à moyenne échelle, soit environ 1/20000. Dans les zones forestières qui font l'objet d'une gestion active, les inventaires d'origine sont suffisamment détaillés, précis et récents pour la gestion des ressources forestières. La taille minimum d'un peuplement<sup>1</sup> est généralement de 10 ha.

### 1.3.2.3. Les principaux objectifs d'un inventaire forestier

En tant qu'instrument de la planification à moyen terme, les inventaires forestiers incluent trois composantes : - Etude des opérations d'exploitation, - la collecte de l'information sur le volume-bois sur pied, l'accroissement, distribution des essences etc., - programmation des travaux du prochain aménagement [Olivier et al. 2004].

Les inventaires forestiers doivent, en ordre principal, fournir des données sur les surfaces occupées par la forêt, sur la répartition de ces surfaces par types de peuplement, par classes d'âge, par essences, sur les caractéristiques dendrométriques des peuplements (nombres de tiges, surfaces terrières, volumes), sur les niveaux de productivité et la composition des peuplements [Lecomte et Rondeux, 2002].

---

<sup>1</sup> Un peuplement peut également être désigné sous l'appellation de polygone cartographique ou d'ilot de type forestier) [SCF, 2002].

L'intérêt pour un inventaire forestier (national ou régional) est donc justifié et il est d'autant plus marqué que la surface boisée a grandement changé et la superficie des zones de dégradation est étendue. En Algérie où la forêt est propriété de l'état ou des collectivités, la planification d'ensemble et l'homogénéité des aménagements permettent une actualisation régulière des données<sup>1</sup>.

#### 1.4. Présentation de l'information

Deux préoccupations essentielles semblent se faire jour chez les responsables d'inventaires nationaux : la présentation sous forme cartographique des résultats et l'exploitation optimale de toute l'information recueillie en vue de chiffrer la disponibilité future en matière ligneuse [Lecomte et Rondeux, 2002 ; Kleinn, 2002 ; Travaglia et al. 2001].

La représentation cartographique peut se concevoir de deux manières: - La cartographie réelle qui est une représentation cartographique de la réalité physique des peuplements avec leurs contours. - La cartographie "à posteriori" n'est réalisable que si les résultats de l'inventaire sont connus. Ces deux types de cartographie ont le même objectif: localiser dans l'espace les résultats de l'inventaire forestier [Lecomte et Rondeux, 2002].

Les cartes réalisées de manière traditionnelle sont souvent longues à réaliser, compliquées à archiver et à diffuser. En outre, ces documents cartographiques ne répondent plus aux exigences actuelles qui sont, entre autres, la nécessité d'une actualisation permanente de phénomènes en rapide évolution et l'étendue importante des zones d'étude [Kleinn, 2002 ; PNUE/PAM/PAP, 2000 ; FAO, 1999 ; Fontés et al. 1999 ; Pain-Orcet et al. 1998 ; Bellefontaine et al. 1997].

C'est la raison pour laquelle, la plupart des inventaires cartographiques des ressources naturelles se font par télédétection (PNUE/PAM/PAP, 2000). Néanmoins, celle-ci doit être associée au contrôle sur le terrain pour devenir la solution appropriée pour la cartographie et l'analyse à l'échelle du paysage forestier [Kleinn, 2002]. L'usage de la télédétection implique aussi les deux autres outils qui sont la cartographie et les systèmes d'information géographiques.

## 1.5. Relations, télédétection - cartographie - SIG

### 1.5.1. Description de l'espace

L'espace peut être décrit d'une manière formelle à l'aide de deux modes principaux de représentation d'objets géographiques sous forme numérique : le mode matriciel et le mode vectoriel. Ils se distinguent souvent par une procédure d'acquisition : scannérisation pour le mode matriciel et digitalisation pour le mode vectoriel.

#### 1.5.1.1. Mode matriciel

Le format matriciel (ou raster) consiste en un partage de l'espace selon une grille régulière et continue où l'élément de base est appelé pixel dont la résolution correspond à la taille du plus petit objet pouvant être représenté. Chaque pixel possède une valeur caractéristique de sa position géographique. Ce mode a l'avantage de décrire l'espace d'une manière continue mais il nécessite un volume de stockage important directement dépendant de sa résolution. Les données scannées (orthophoto) ou numériques (image satellitaire) se trouvent toujours dans un tel format.

#### 1.5.1.2. Mode vectoriel

Le format vectoriel correspond à une description de l'espace par l'intermédiaire d'éléments géométriques élémentaires : points, lignes, polygones [IFN, 2003a]. Ces objets<sup>2</sup> peuvent être disposés dans l'espace indépendamment les uns des autres (vectoriel simple) ou bien connectés [Blumer et Golay, 1997]. Par conséquent, une donnée spatiale sera définie par l'objet ou le phénomène signalé et sa localisation dans l'espace<sup>3</sup>.

## 1.6. Les systèmes d'information géographique

Les méthodes cartographiques via le développement de l'informatique ont, dans un premier temps, pris en charge le travail du dessin : numérisation du tracé, mise en forme automatique, changements d'échelle instantanés. La gamme des logiciels utilisés pour

---

<sup>2</sup> Les points sont caractérisés par leurs coordonnées géographiques (longitude, latitude) ou, le plus souvent, dans un référentiel cartésien (x, y), celui de la projection Lambert par exemple. Une ligne est constituée d'un ensemble de points reliés par des segments de droite, un polygone est défini comme un ensemble de lignes délimitant une surface fermée [IFN, 2003a].

<sup>3</sup> Une troisième composante est le temps qui dans beaucoup de cas n'est pas signalé d'une manière explicite alors qu'il est souvent crucial (comme par exemple, le changement du couvert végétal au travers des saisons).



toutes ces opérations fait partie des systèmes dits de CAO (Cartographie Assistée par Ordinateur).

Ces outils ne permettent pas néanmoins de gérer les informations associées aux dessins et celles-ci doivent donc être traitées par un logiciel indépendant appelé SGBD (Système de Gestion de Base de Données). Les SIG<sup>4</sup> réunissent toutes ces fonctionnalités et gèrent dans un même système les données cartographiques et les informations qui leur correspondent. **[Bellefontaine et al. 1997]**.

Un des mérites des SIG est de permettre le croisement d'informations. Par conséquent, il convient d'être rigoureux dans leur utilisation et en particulier la localisation géographique de ces données réclame une bonne précision<sup>5</sup>.

Un avantage majeur des données de télédétection est que les traitements peuvent être utilisés, chaque fois que les circonstances s'y prêtent, au processus d'extraction automatique de l'information ainsi qu'à l'introduction directe de cette information dans un Système d'information géographique (SIG) **[PNUE/PAM/PAP, 2000]**.

Il est admis maintenant, qu'il est impossible d'envisager une planification dans le secteur forestier sans information géospatiale **[Batterham, 2000]**. Il faut reconnaître donc que pour l'acquisition de cette information, il n'existe pas encore un outil aussi efficace que la télédétection satellitaire. Néanmoins, il faut admettre aussi que la télédétection ne pourra probablement jamais supplanter toutes les méthodes traditionnelles d'accès à l'information. Elle doit plutôt être perçue comme partie intégrante d'une stratégie d'ensemble d'inventaire dans un contexte d'utilisation rationnelle des ressources forestières **[Brunelle et al. 1998]**.

---

<sup>4</sup> Les deux différences majeures entre un SIG et un logiciel de CAO sont l'articulation du SIG autour d'un SGBD et la possibilité d'un SIG à réaliser des opérations d'analyse spatiale. **[Bellefontaine et al. 1997]**.

<sup>5</sup> Actuellement, la saisie d'objets (carrefour, arbre, pont, etc.) sur le terrain se trouve grandement facilitée par l'emploi des GPS, également appelés "Navstar" (Navigation Satellite Timing and Ranging).

## *Deuxième partie*

La télédétection satellitaire,  
source d'informations forestières

# Chapitre premier

## Présentation de la télédétection satellitaire

### 1.1. Définitions

Etymologiquement, les termes *télédétection*, "*remote sensing*"<sup>1</sup>, "*fernerkundung*"<sup>2</sup> et الاستكشاف عن بعد<sup>3</sup> ou الاستشعار عن بعد<sup>3</sup> désignent l'acquisition de l'information à distance, sans contact direct avec l'objet détecté. Mais cette définition est très insuffisante puisqu'elle peut inclure la microscopie, les sciences géophysiques, l'astronomie, voire même regarder soi même dans un miroir [Legg, 1992]. La définition suivante est proposée à titre d'exemple:

"Toute méthode d'observation de la terre sans être en contact direct avec elle rentre dans la notion télédétection qui permet une vue d'en haut des interactions entre les composants de notre complexe biosphère et est particulièrement utile pour le suivi des changements paysagers" [Strand et al. 2007].

La télédétection comporte deux aspects : l'un purement lié à l'acquisition de l'image et aux bases physiques tant dans la définition des images (physique du rayonnement) que dans le mode d'acquisition satellitaire (capteurs, orbitologie...) ; l'autre lié à la manipulation informatisée des images : l'analyse et le traitement d'image.

Pour le forestier, il est donc nécessaire d'acquérir un certain nombre de connaissances, essentiellement dans les domaines de la physique du rayonnement, afin d'aborder correctement l'analyse des images satellitaires par traitement d'images. Il lui faut surtout savoir ce qu'est une image satellitaire et d'où elle provient avant tout traitement.

### 1.2. Bases physiques de la télédétection satellitaire

La télédétection s'appuie sur des méthodes d'acquisition à distance de l'information basée sur le rayonnement électromagnétique (Fig.1). Le rayonnement ne se manifeste que par des interactions avec la matière : C'est un rayonnement indirect. Les capteurs satellitaires sont des instruments capables d'enregistrer ce rayonnement dans certaines longueurs d'onde bien précises.

<sup>1</sup> Terme anglais.

<sup>2</sup> Terme allemand.

<sup>3</sup> Terme arabe

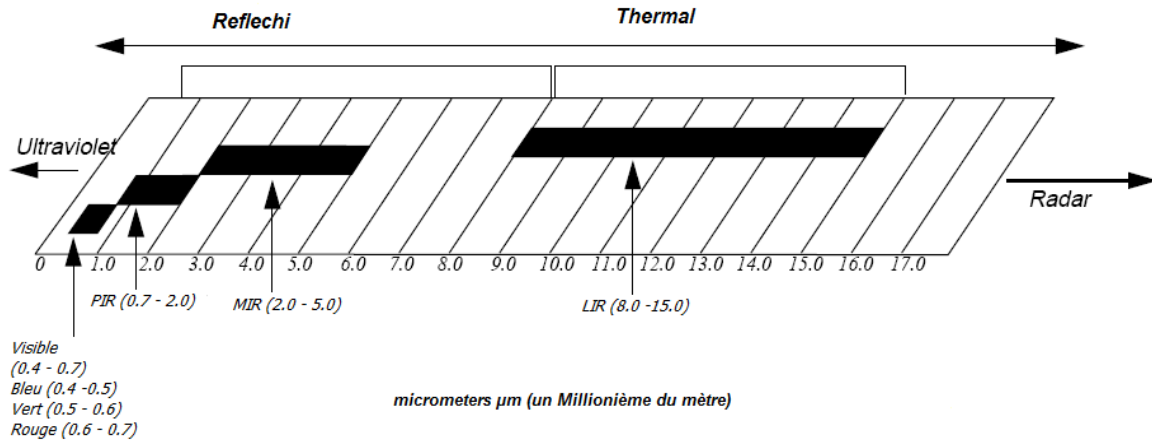


Figure 1. Spectre électromagnétique [Pouncy et al. 1999].

### 1.3. Les satellites d'observation de la terre

Ils constituent les vecteurs privilégiés de la télédétection [Fofana, 2002]. Ces systèmes permettent l'acquisition d'informations<sup>4</sup> numériques et multispectrales sur de grandes surfaces. Deux principaux types de satellites sont distingués en fonction de leur mouvement par rapport à celui de la terre : les satellites héliosynchrones et les satellites géostationnaires.

**Les satellites géostationnaires** : ce sont des satellites équatoriaux. La combinaison de leurs mouvements et celui de la terre les fait apparaître immobiles pour un observateur terrestre. Ceci est obtenu pour une altitude voisine de 36000 Km [Fofana, 2002]. Ils ont des capteurs de faibles résolutions et sont utilisés pour des thématiques de type météorologiques, climatologiques et généralement bioclimatologiques.

**Les satellites héliosynchrones** : survolent les mêmes points de la terre tous les jours à la même heure. Ce sont des satellites d'observation à des altitudes relativement basses (600 à 1000 km). Ce sont les satellites les plus courant en télédétection, avec les hautes résolutions (10, 20, 30m au sol) dans des longueurs d'onde du visible et de l'infrarouge.

Par rapport aux photographies aériennes, les images satellitaires donnent une information à la fois globale et non sélective du paysage et constituent donc un excellent support pour les projets qui s'inscrivent dans une démarche intégrée. Elles offrent un certain nombre d'avantages par rapport à la photographie aérienne [PNUE/PAM/PAP, 2000 ; FAO, 1999b]:

<sup>4</sup> Ces informations sont d'une certaine richesse dans la mesure où l'on n'est pas limité au spectre de la lumière visible et qu'elles sont structurées par bandes spectrales.

- Une scène satellitaire couvre une grande surface (des milliers jusqu'à des dizaines de milliers de km<sup>2</sup>), réduisant considérablement le temps nécessaire à l'interprétation, la confrontation et le raccord avec les autres interprétations.

- une scène satellitaire est enregistrée en une seule prise procurant ainsi une homogénéité à l'intérieur de son cadre, très difficile, voire impossible à obtenir pour un couple de photographies aériennes; Elle peut être acquise régulièrement sur le même territoire et être enregistrée dans différentes longueurs d'ondes et par conséquent localiser la ressource forestière.

- réaliser une couverture aéro-photographique est coûteux et très dépendant des conditions météorologiques.

Du point de vue du mode d'enregistrement de l'information, les systèmes d'observation de la terre peuvent être séparés en deux grandes familles : Les systèmes passifs où le satellite ne fait qu'enregistrer une information sur l'énergie lumineuse réfléchie par la terre, et les systèmes actifs (radar) où le satellite émet lui même un signal dont il enregistre la réponse après un aller-retour avec la Terre.

### 1.3.1. Télédétection spatiale passive

Au sein de la famille des satellites passifs, on distingue les satellites météorologiques (Meteosat), les satellites basse résolution spatiale et haute répétitivité temporelle (NOAA, SPOT4-Végétation), les satellites de moyenne résolution spatiale et faible répétitivité temporelle (Landsat, SPOT)<sup>5</sup>, et les satellites haute résolution spatiale et faible répétitivité temporelle (Quickbird, IKONOS, etc.).

Les données recueillies par les satellites SPOT et Landsat fournissent des informations objectives, cohérentes et facilement mises à jour. [Claudin et Lignon, 1995]. Quant à l'imagerie à haute résolution spatiale, plusieurs interrogations se posent [Batterham, 2000] :

- Son prix sera-t-il concurrentiel par rapport à celui de la photographie aérienne ou d'autres types d'images aériennes. Les premiers estimés de certains fournisseurs paraissent être plus élevés que le coût des images aériennes.

---

<sup>5</sup> Les données satellitaires à moyenne résolution actuellement disponibles sur des bases réellement commerciales dans le monde entier sont Landsat et SPOT dont plusieurs millions d'images sont déjà disponibles en archive [Axes, 1998].

- La livraison sera-t-elle fiable ou sera-t-elle limitée pour des raisons politiques ou techniques ?
- Les outils permettant aux utilisateurs de manipuler l'imagerie sont-ils disponibles ou sera-t-il nécessaire d'avoir des fournisseurs de services spécialisés ? Quelles seront les applications clés – et ont-elles déjà été envisagées ?

### 1.3.2. Télédétection spatiale active

Depuis le début des années 1990, plusieurs pays ont déployé cette technologie comme le Canada, l'Inde, le Japon, la Russie et l'Europe avec respectivement RADARSAT, IRS, J-ERS, RESURS et ERS. Les satellites radar disponibles et à large utilisation sont RADARSAT, ERS, J-ERS [Axes, 1998].

### 1.4. Les fenêtres spectrales utiles et leur signification

Dans une longueur d'onde ou plutôt dans une fenêtre spectrale utilisée, les objets au sol auront un comportement et une « réponse » spécifiques liées à leur état, leur taille, leur physionomie, la période d'observation. Néanmoins, certains faits - a priori - permettront de déduire un certain nombre d'hypothèses sur le rapport longueur d'onde/objet observé :

**Le visible** : Dans les fenêtres dites du visible (0.4/0,8 microns), c'est la « couleur » telle que la détermine l'œil humain qui va être déterminante. Le terme 'couleur' est une convention linguistique de correspondance entre une longueur d'onde et un terme.<sup>6</sup>

**L'infrarouge** : C'est le domaine des longueurs d'onde (0.8/100 microns) qui ne sont plus perceptibles à l'œil humain et il est impératif de dissocier couleur visible de l'objet/réponse dans l'infrarouge/couleur à l'écran.

**Le radar** : Le domaine du radar s'étend de 3 microns à 1 mètre et couvre les fenêtres allant des infrarouges moyens aux hyperfréquences. L'utilisation du radar permet l'observation et la détection d'objets jusqu'ici peu ou pas détectables dans les longueurs d'onde « classiques »<sup>7</sup>.

---

<sup>6</sup>Le terme « vert » ou « marron » correspond à une seule «couleur» pour un capteur déficient dans les longueurs d'onde observée par un œil de daltonien.

<sup>7</sup>C'est entre autre le cas pour la composition des nuages, les constituants internes de certains objets, la composition des eaux libres ou des aérosols...

### 1.5. Correspondances fenêtres spectrales - canaux satellitaires

**Le canal TM1 de Landsat TM (0.45/0.52 microns)**, correspond à la fenêtre du « bleu », mettra naturellement en évidence les objets « bleu » pour l'œil humain (océan, lacs, rivières, bitume...). Un objet bleu/vert comme le cèdre par exemple aura une réponse dans le canal du bleu et du vert alors que l'œil humain aura tendance à le classer en « vert ».

**Le canal TM2 de Landsat TM (0.52/0.60 microns) et XS1 de SPOT (0.50/0.60 microns)** mettra en évidence les objets « verts » pour l'œil (végétation, forêt, cultures, ...).

**Le canal TM3 de Landsat TM (0.63/0.69 microns) et XS2 de SPOT (0.60/0.68 microns)** captera prioritairement les objets « rouges » et, par différenciation avec les objets de couleurs pures, les objets aux couleurs composites : roches, villes, sols nus.... Les objets « blancs » par définition renvoient toutes les longueurs d'onde du visible, aussi trouverons nous une réponse d'un objet blanc dans les canaux bleu vert et rouge.

**Le proche infrarouge - PIR (0.8/1.3 microns)** correspond à la fenêtre utile pour la détection de l'activité chlorophyllienne et pas forcément à l'abondance de la végétation. Une forêt de feuillus en hiver, même répartie sur un espace important, aura une réponse faible dans le PIR en raison de l'absence de feuilles ou de la dormance de la végétation. Le proche infrarouge peut être aussi utilisé pour évaluer en partie la teneur en eau des sols et des plantes.

**Le moyen infrarouge - MIR (Landsat TM5, 1.55/1.75 microns et MIR SPOT4)** est utilisé essentiellement pour évaluer la teneur en eau des sols et des plantes (comme par exemple dans la mesure des déficits hydriques ou, à l'inverse, des zones irriguées).

**L'infrarouge thermique - IRT (Landsat TM6, 10.4/12.5 microns)** détermine directement (et en cas de non nébulosité) la température de surface des objets observés. A une réponse faible, correspond une température faible par rapport au reste des valeurs apparentes, et non pas forcément une température « froide ». Il ne s'agit pas d'un rapport<sup>8</sup> absolu température au sol/réflectance/niveau numérique quelle que soit l'image.

**Landsat TM7 (0.8/2.35 microns)** correspond à une fenêtre spectrale couvrant le proche et le moyen infrarouge. Ce canal est peu utilisé en lui-même mais intervient principalement dans la construction de néo-canaux.

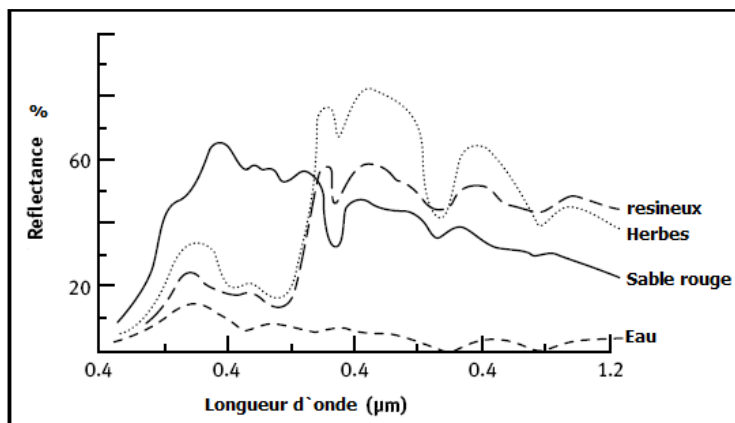
---

<sup>8</sup> On ne peut dire a priori qu'à un niveau numérique de 15 correspond une température de 10°C. Ce rapport n'est valable que sur une seule image et une seule zone sur laquelle on aura préalablement réalisé un échantillonnage des températures réelles au sol.

## 1.6. Signatures spectrales et niveaux numériques

Les objets ayant des réflectances dans de nombreuses longueurs d'onde, la succession des différentes réponses d'un objet dans une fenêtre d'ondes électromagnétiques s'appelle une signature spectrale (Fig.2). La végétation active par exemple a une forte réponse spectrale dans le vert (elle renvoie le rayonnement dans la longueur d'onde correspondant au vert), une forte réponse dans le proche infrarouge, une faible réponse dans le bleu ou le rouge par exemple (la végétation absorbe les rayonnements dans les longueurs d'onde du rouge et du bleu).

En analyse d'image de télédétection, la signature spectrale<sup>9</sup> utilisée est la valeur numérique d'un objet dans au moins 3 canaux satellitaires discrétisés et c'est cette signature qui permettra soit la reconnaissance d'un objet, soit sa classification par rapport à un groupe d'objet, soit l'étude de ses évolutions (caractères phénologiques, effets saisonniers, dépérissement...) dans le temps.



**Figure 2. Exemple de signatures spectrales pour la végétation, l'eau et le sable (Strand et al. 2007)**

## 1.7. Relation signature/objet

La mise en relation des réponses radiométriques brutes d'une image (les valeurs des pixels) avec les valeurs spectrales réelles et donc la nature des objets au sol doit absolument prendre en compte :

- Les données de la prise de vue satellitaire de départ contenant la date, l'heure solaire, les longueurs d'onde observées, la résolution.
- Les données de terrain, la topographie, l'état de la végétation... Pour mettre en relation la signature spectrale, c'est-à-dire la réponse spectrale «réelle» d'un objet et l'histogramme de répartition des objets dans une image, il est nécessaire de tenir compte d'un certain nombre de connaissances nécessaires en amont.

<sup>9</sup> Les signatures pour la végétation par exemple sont bien souvent théoriques et correspondent à des signatures moyennes (observées en laboratoire) et un ensemble de vérifications in situ reste indispensable à une bonne détection des objets et à leur mise en correspondance avec les réponses spectrales.



➤ La date de prise de vue : d'un point de vue végétatif, un chêne (espèce caducifoliée) aura une forte activité chlorophyllienne en fin de printemps et donc, à priori, une forte réponse dans le PIR et une faible activité (et donc une faible réponse dans le PIR) en hiver. De même, une espèce sempervirente, un pin par exemple avec des réponses plus ou moins constantes sur l'année, aura un fort indice d'activité chlorophyllienne en hiver et donc une forte réponse dans le PIR

➤ Le type de végétation et la succession végétale : une même espèce, à une même période de l'année et dans la même longueur d'onde pourra avoir plusieurs réponses spectrales au cours des années en raison de phénomènes édaphiques, bioclimatiques ou anthropiques : maladies, sécheresse, âge, feux, tailles... De plus, la succession de strates au sol peut induire des erreurs d'interprétation des réponses radiométriques dans la nature de l'espèce observée et dans la dynamique des successions végétales.

➤ Le modelé et la topographie : En fonction de l'éclairement solaire, des espaces contenant les mêmes espèces, à la même période et dans des longueurs d'ondes identiques peuvent engendrer des réponses différentes en fonction du modelé. Il existe un certain nombre d'algorithmes de correction des effets topographiques mais ils s'avèrent bien souvent très complexes et peu satisfaisant dans le cas d'un versant entièrement à l'ombre<sup>10</sup>

➤ La longueur d'onde d'observation : un même objet n'aura pas les mêmes réponses en fonction de la longueur d'onde étudiée. Un chêne vert aura une forte réponse dans le proche infra-rouge vers 1 micron, et donc un compte numérique élevé dans ce canal et une faible réponse (forte absorption) dans le violet (vers 0.4 micron).

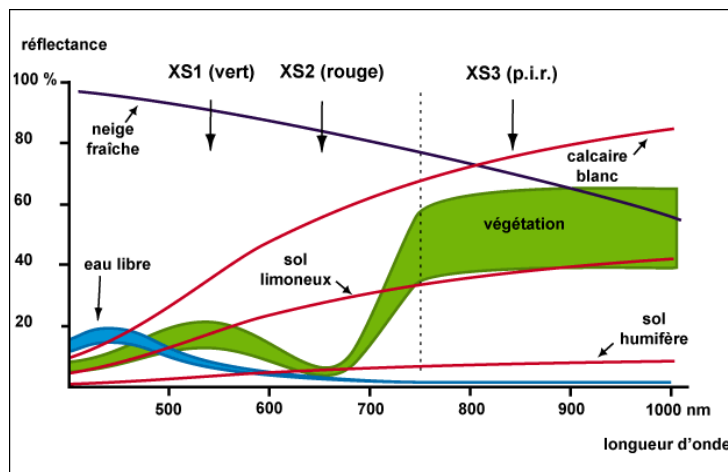
➤ La résolution : La même espèce, dans la même longueur, à la même date n'aura pas forcément la même réponse spectrale à des résolutions de 10, 20, 30 ou 120m. C'est dû à la taille de l'objet étudié, à la texture des ensembles d'objets, à la structure des groupes et à la combinaison des différents objets sur un même pixel.

➤ Les effets atmosphériques : Bien que les images étudiées soient en général claires et peu nuageuses, un certain nombre d'effets atmosphériques peuvent induire des « déformations » de la réponse initiale, voire des réponses totalement différentes. Une même zone prise par exemple avant et après une forte pluie induit des réponses radiométriques différentes.

---

<sup>10</sup> En général, lorsque les zones considérées n'excèdent pas 5 ou 10% de la surface totale de l'image, elles sont, soit éludées (non classées), soit affiliées aux zones adjacentes par extrapolation et surtout vérification terrain.

## 1.8. Interactions des rayonnements électromagnétiques - surfaces naturelles



**Figure 3. Comportement spectral des principaux éléments constitutifs des surfaces terrestre (Durrieu, 1994)**

augmente de manière presque exponentielle avec la longueur d'onde dans le visible et le proche infrarouge, ce qui se traduit par des surfaces d'eau très noires sur les canaux proche et moyen infrarouge [Guyot, 1983].

Au niveau d'une feuille vivante, le rayonnement solaire est fortement absorbé dans le visible : Ceci est dû aux pigments foliaires comme la chlorophylle. Dans le proche infrarouge, les feuilles se caractérisent par une forte réflectance. Dans le moyen infrarouge, ce sont les bandes d'absorption de l'eau (1450 et 1950 nm) qui commandent l'absorption de la feuille ce qui génère des pics de réflectance vers 1650 et 2200 nm.

La réflectance d'un couvert forestier devient plus complexe car elle intègre celles des arbres et celle du sol sous-jacent. Or ce dernier peut être couvert partiellement ou totalement par une végétation basse et lorsque la densité des couronnes des arbres est relativement faible, l'effet du sol et de la végétation basse peut-être dominant [Chamignon, 1990 ; Guyot, 1997]. La variabilité de la réponse spectrale de couverts forestiers dépend de facteurs externes et de facteurs propres à ces mêmes couverts.

### 1.8.1. Effets des facteurs externes

- Dimension de la surface visée ; - Hauteur du soleil ; - Angle zénithal de visée. - Le relief ; - Les ombres portées et les ombres propres.

<sup>11</sup> La teneur en eau du sol affecte sa réflectance et elle est d'autant plus faible que le sol est plus humide. Mais d'autres facteurs en dehors de l'humidité affectent la réflectance des sols ; ce sont : la composition minérale, la teneur en matière organique, la structure et la texture [Guyot, 1997 ; Bonn et Rochon, 1996].

### 1.8.2. Effet des facteurs propres aux couverts végétaux

#### - *Taux de recouvrement*

Pour un taux donné, l'effet du sol est d'autant plus possible qu'il présente un plus grand contraste de réflectance.

#### - *L'indice foliaire*

L'élément déterminant du comportement radiométrique des couverts végétaux est la masse foliaire. La densité du feuillage aura un effet direct sur la réflectance du couvert : elle peut être caractérisée par l'indice foliaire<sup>12</sup>.

#### - *Géométrie du couvert*

La sensibilité de la réflectance à l'inclination des feuilles est beaucoup plus grande dans le PIR que dans le visible [**Baret et al. 1996 ; Chamignon, 1990**]. Dans le visible, les feuilles ont une réflectance inférieure à celle du sol et lorsqu'elles se redressent, la réflectance augmente pour un indice foliaire donné. Par contre, dans le PIR, le phénomène inverse est observé car les feuilles ont une réflectance supérieure à celle du sol.

#### - *Activité physiologique des plantes*

L'activité physiologique des couverts végétaux peut affecter leur réflectance dans la mesure où elle a un effet sur la fonction de distribution des inclinations des feuilles. Un déficit hydrique peut ainsi être détecté si le port<sup>13</sup> des feuilles est changé.

#### - *Structure du peuplement*

Elle peut être décrite par trois grandeurs [**Guyot, 1983**] : le diamètre de la couronne, la distance inter-couronne et la hauteur des cimes. Ces trois grandeurs ont une influence directe sur les ombres portées et sur la visibilité de la sous-strate.

#### - *Contenu en chlorophylle*

La chlorophylle n'absorbe pas dans l'infrarouge, par conséquent ce domaine spectral sera indépendant du contenu en chlorophylle. Dans le visible (rouge), l'augmentation du contenu en chlorophylle diminue la réflectance des feuilles et cette diminution sera maximale dans les fortes bandes d'absorption de la chlorophylle comme le rouge ou le bleu [**Baret et al. 1996**].

---

<sup>12</sup> L'indice foliaire est défini comme le rapport entre la surface de feuilles et la surface du sol.

<sup>13</sup> Flétrissement temporaire, ou enroulement des feuilles.

# **Chapitre deuxième**

## **Traitement des données**

### **de la télédétection satellitaire.**

#### **2.1. Traitement des données**

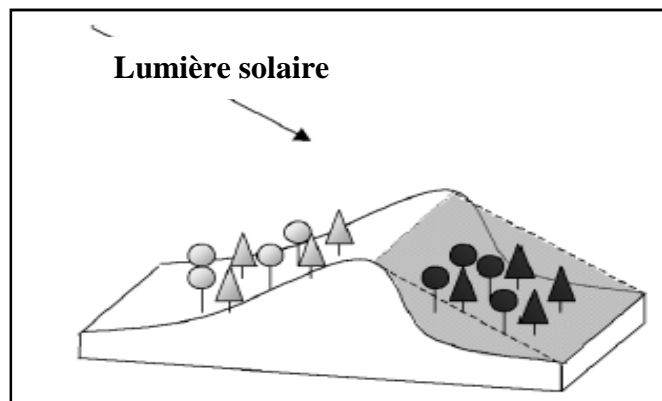
Généralement, les traitements des images satellitaires sont classés en trois types [Chamignon, 1990] : les pré-traitements, les traitements proprement dits et les post-traitements. Les pré-traitements (appelés aussi corrections) sont généralement suivis d'une phase de traitement de l'image qui permet de rattacher les valeurs radiométriques à des classes thématiques caractéristiques de l'occupation du sol. Les post-traitements fournissent généralement des statistiques sur les classes obtenues et une évaluation de la précision des résultats finaux.

##### **2.1.1. Les pré-traitements**

En fonction des conditions locales, ces corrections sont les Corrections radiométriques et les Transformations géométriques.

##### **2.1.1.1. Les corrections radiométriques**

Il existe deux grands types de corrections radiométriques qui sont la normalisation topographique et la modélisation atmosphérique. La correction atmosphérique est utilisée pour modéliser les conditions atmosphériques sous lesquelles ont été acquises des images multitemporales, tandis que la notion de correction topographique se rapporte à la compensation des différences de rayonnements solaires dues à la forme irrégulière du terrain.



**Figure 4. Effet de la topographie sur la réflectance [Riaño et al. 2003]**

L'effet topographique cause de grandes variations dans la réponse spectrale de types similaires de végétation. Les zones d'ombre reflètent moins que les zones ensoleillées (Fig.4). Les méthodes de corrections peuvent être groupées en deux catégories : celles basées sur les ratios, et celles basées sur les modèles numériques du terrain (MNT).

La première catégorie est de loin la plus simple et n'exige pas des données. La réflectance est supposée croître ou décroître proportionnellement aux deux bandes du ratio, et par conséquent, leur quotient va compenser l'effet de la topographie. L'inconvénient de cette méthode pour les classifications multispectrales est la perte de résolution spectrale. [Riaño et al. 2003].

Les méthodes basées sur la modélisation de conditions d'illuminations exigent des MNT de même résolution que l'image à corriger. Le MNT est exigé pour le calcul de l'angle d'incidence défini comme étant l'angle entre la normale au terrain et les rayons solaires. Cependant, ces corrections ne sont pas toujours nécessaires en présence de forêts de plaines.

Par ailleurs, plusieurs auteurs ont vérifié et confirmé que 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, 2003 ; Louy et al. 2002 ; Chartier et Servain, 2000].

#### ***2.1.1.2. Les corrections géométriques***

En général, l'utilisateur n'effectue que des corrections géométriques simples (translations, rotations...) et parfois plus complexes comme la transformation du niveau brut dans lequel on été acquises les images, en niveau cartographique pour permettre la superposition de la carte, résultante des traitements, sur un fond cartographique régulier. Ceci est possible au moyen des algorithmes proposés par le logiciel qui permettent des transformations polynomiales sur l'image à partir de points caractéristiques identifiés sur carte et sur image : les points d'amers<sup>1</sup>.

#### **2.1.2. Les traitements proprement dits**

Ces traitements<sup>2</sup> peuvent se réduire à de simples améliorations des images, ou s'étendre à de profondes analyses. Les améliorations d'images comportent, le seuillage, les compositions colorées, les composés diachroniques, les ratios. Les analyses comportent :

---

<sup>1</sup> Point identifiés sur carte et sur image.

<sup>2</sup> La finalité de ces traitements est d'extraire des images brutes, une information relative à une problématique qui intéresse l'utilisateur (occupation du sol en forêt, occupation et/ou utilisation du sol en agriculture, l'urbanisme, géologie...), soit par l'élaboration d'une cartographie ou par l'acquisition de statistiques.

Les analyses multispectrales, les analyses en composantes principales (ACP) et les analyses statistiques.

### 2.1.2.1. Les analyses statistiques

Les méthodes statistiques découlent principalement de calculs de probabilités et de distances mathématiques. Cependant, aucune de ces méthodes n'est parfaite et ne s'adapte mieux que toute autre à l'ensemble des situations envisageables lorsque la nécessité d'une classification en zones homogènes se présente. Parmi ces analyses, on peut distinguer la classification et la segmentation.

#### a) **Les classifications**

Le but de la classification est de partitionner l'image en classes ayant une similarité. La méthode consiste en une partition 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 et Puech, 1998].

La majorité des méthodes de classification appartiennent à la catégorie des classifications automatiques<sup>3</sup>. Leur principal avantage est que l'algorithme de classification peut être appliqué à travers l'image entière en un temps très court. Dans les études de la végétation forestière, deux procédés sont souvent utilisés : les classifications par parcelle et les classifications par pixel.

#### - *Classification par parcelle (per-parcel classification)*

On doit connaître les limites des objets pour réaliser une classification par parcelle. L'une des façons pour réaliser une classification par parcelle est de procéder par classification par pixel et assigner à la parcelle, la classe la plus représentée (classe modale) dans la parcelle [Alpin et al. 1999]. Pour la cartographie des peuplements forestiers, cette méthode peut être utile pour des images comparables à celles de Landsat TM/ETM+ ou SPOT HRV [Kayitakire et al. 2002].

#### - *Classification par pixel (per-pixel classification)*

Une classification par pixel est appliquée à une image multispectrale pour la discrimination des différents types de couverts forestiers. Un autre objectif est de tester ces données quand elles sont utilisées sans connaissances des limites des parcelles ni les

---

<sup>3</sup> Les deux autres catégories sont les classifications visuelles et les classifications hybrides.

limites de la zone forestière [Kayitakire et al. 2002]. Deux grands types de classification par pixel se distinguent par leurs avantages et leurs inconvénients : les classifications non dirigée et les classifications dirigées.

- *Les classifications non dirigées*

Les données sont classées en fonction de leurs caractéristiques spectrales, sans aucune information a priori sur la nature des objets à classer. L'interprète intervient pour fixer un nombre de groupes, des seuils. Les méthodes les plus courantes sont des classifications ascendantes hiérarchiques (CAH) ou des classifications à partir de centres mobiles [Camille, 2005 ; Girard et Girard, 1999].

La méthode des centres mobiles

Cette méthode s'utilisera avant tout pour aller à la découverte d'une image totalement inconnue. La méthode la plus utilisée est celle des k-moyennes car elle possède de nombreux avantages : la facilité, l'indépendance de l'ordre d'entrée des objets, la complexité linéaire, la rapidité de convergence. Mais elle possède également des inconvénients dont les principaux sont que le nombre K de clusters doit être fixé à l'avance, la difficulté de détecter de clusters mal isolés et/ou de forme allongée, et sa grande sensibilité aux éléments marginaux [Beck, 2006]. Pour remédier aux problèmes des K-moyennes, une méthode itérative ascendante hiérarchique a été mise au point.

La Classification Ascendante Hiérarchique

Son principe est assez simple : à chaque itération, on commence par réunir, dans une même classe, les deux pixels les plus proches en distance dans l'espace radiométrique, ensuite on remplace cette classe par une moyenne de pixels qui la représente pendant les itérations suivantes, jusqu'à ce que la classe soit avalée par une autre classe, puis on itère ce processus, jusqu'à ce qu'il n'y ait plus qu'une seule classe. La méthode des nuées dynamiques ou ISODATA (Iterative Self Organizing Data Analysis) est la plus utilisée. [Anderson, 1998].

Le principal avantage de cette méthode est que la subdivision est fondée sur les mesures de similarité radiométrique des classes qui couvrent habituellement de grandes étendues géographiques, Outre sa facilité et son utilité dans le cas où il est impossible de se rendre sur terrain, le nombre K de classes n'est pas fixé à l'avance comme c'est le cas dans la méthode des k-moyennes. La méthode réduit la sensibilité aux éléments marginaux et détecte les classes isolés.

Cependant les classes exigent toujours une identification du couvert par un analyste expérimenté, ce qui représente un inconvénient de taille. Enfin un autre problème est rencontré dans les types de couverts mélangés où à cause des petites variations spectrales ou un mélange de réponses spectrales de plusieurs objets, il faut souvent spécifier un grand nombre de classes pour différencier ces petites variations puis de regrouper les classes obtenues dans de nouvelles classes désirées.

- **Les classifications dirigées**

Elles s'appuient sur des zones témoins connues, identifiées appelées parcelles d'échantillonnage ou parcelles d'entraînement qui serviront à classer l'ensemble de l'image. Ceux-ci peuvent être soit définis à partir de comptes numériques sur un histogramme à plusieurs dimensions (méthode hypercube), soit à partir de polygones d'entraînement repérés géographiquement sur l'image (zones-test, zones d'apprentissage). [Girard et Girard, 1999].

La validité d'une classification dépend en grande partie de la représentativité des échantillons. Cette représentativité dépend de la taille de la parcelle (nombre de points), de sa situation (au centre, en périphérie, en dehors...) par rapport à l'objet étudié, de la nature de l'objet (pixels purs, mixtes...).

Pour pouvoir réaliser un bon échantillonnage<sup>4</sup>, il faut : - Avoir une idée relativement précise des objets et de leur répartition dans l'image ; - tenir compte des canaux les plus caractéristiques définissant l'image (même s'ils n'ont pas servi à la visualisation) ; - multiplier au maximum les échantillons de départ et procéder par élimination ; - étudier les valeurs statistiques obtenues et en particulier les profils spectraux ; - Procéder à différentes échelles depuis les grandes composantes jusqu'aux objets ponctuels.

Les méthodes de classification généralement utilisées pour assigner des pixels aux classes établies sont : par Minimum de distance, par Parallélépipède, par Maximum de vraisemblance (classification gaussienne) et par la Distance de Mahalanobis.

**Par maximum de vraisemblance**

C'est la plus utilisée et suppose une distribution gaussienne basée sur la moyenne et la variance de la zone d'entraînement pour chaque classe. D'après **Camille [2005]**, la classification par maximum de vraisemblance découle d'une méthode probabiliste : pour chaque pixel est déterminée la probabilité d'appartenir à une classe plutôt qu'à une autre.

---

<sup>4</sup> Une bonne classification s'appuie sur un bon échantillonnage et un bon échantillonnage s'appuie sur une bonne étude préalable de l'image via les histogrammes, les composantes statistiques et les documents disponibles.



Par distance de Mahalanobis

Elle est similaire à la méthode du maximum de vraisemblance mais suppose les covariances des classes égales ce qui justifie sa rapidité par rapport aux autres méthodes. Tous les pixels sont assignés à la classe la plus proche, à moins que l'utilisateur ne spécifie un seuil de distance, auquel cas, certains pixels risquent de ne pas être classés.

Par Minimum de distance

Elle calcule la moyenne des valeurs spectrales de chaque catégorie déterminée par entraînement et chaque pixel de l'image est affecté à la catégorie dont la moyenne est la plus proche de la valeur de ce point. Le problème est que les pixels qui n'appartiennent à aucune des catégories prédéterminées sont affectés à l'une d'entre elles au hasard.

Par parallélépipède (hypercube)<sup>5</sup>

A partir des zones d'entraînements, on calcule pour chaque classe les intervalles radiométriques concernés sur chaque canal : ceux-ci permettent la création de « cubes » (en réalité, ce sont plus des parallélépipèdes rectangles) dans l'hyperplan radiométrique. Si les cubes ne se chevauchent pas dans l'espace radiométrique, la segmentation est correcte.

**Tableau 1. Comparaison entre classification dirigée et non dirigée [Girard et Girard, 1999]**

Méthodes	Avantages	Inconvénients
Classifications non assistées	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Utile pour réaliser une première segmentation des images en grands thèmes d'occupation du sol.</li> <li>- Cette segmentation pourra être utilisée pour réaliser un masquage des thèmes non concernés par l'étude</li> </ul>	Le regroupement des valeurs de comptes numériques crée des classes dont la signification thématique est parfois difficile à identifier.
Classifications assistées	Les classes obtenues ont une signification thématique précise.	Le temps de réalisation est long en particulier pour le choix et la délimitation des zones d'apprentissage.

**b) La segmentation**

La segmentation est une opération qui décompose l'image en un ensemble de régions uniformes (appelés segments pour ne pas confondre avec la région au sens géographique du terme) chacune d'entre elles étant homogènes au sens d'attributs préalablement définis. Puis les régions sont étiquetées : à chaque segment est attribuée une

<sup>5</sup> La même que celle par minimum de distance, mais les pixels qui sont en dehors de la série de valeurs retrouvées dans les zones d'entraînement sont considérés comme non classés

étiquette différente [Ducrot, 2005]. Selon l'approche suivie, sont distinguées les techniques de segmentation orientées frontières et celles orientées régions.

- ***La segmentation orientée régions***

Les algorithmes de segmentation orientée régions offrent actuellement un plus grand potentiel que les méthodes de classification pour l'extraction des entités discrètes et sont de plus en plus intégrés dans les logiciels commerciaux de traitement d'images. Les algorithmes prennent en compte simultanément la similarité des propriétés de pixels ainsi que leur proximité spatiale afin de former des régions suivant un processus itératif. Les propriétés régionales comme les niveaux de gris ou la texture peuvent être utilisées.

- ***La segmentation orientée frontières***

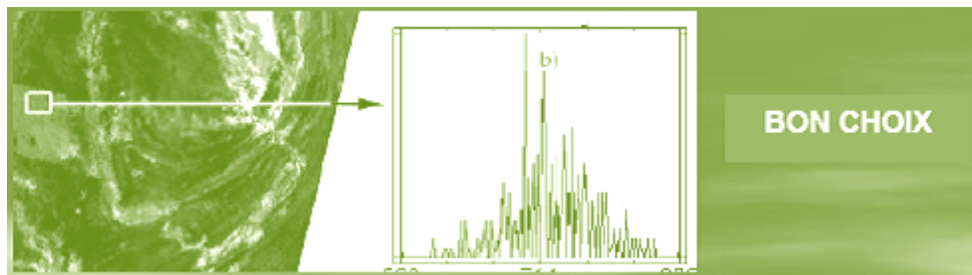
Il s'agit en quelque sorte de détecter les contours d'objets. Un contour peut être considéré comme une frontière entre deux régions différentes (suivant un critère de similarité donné, par exemple un niveau de gris identique à un epsilon près ou une couleur identique...). La détection d'un contour est généralement basée sur la détection du changement à la frontière de deux régions [Desachy, 2001].

### **2.1.3. Précision des classifications**

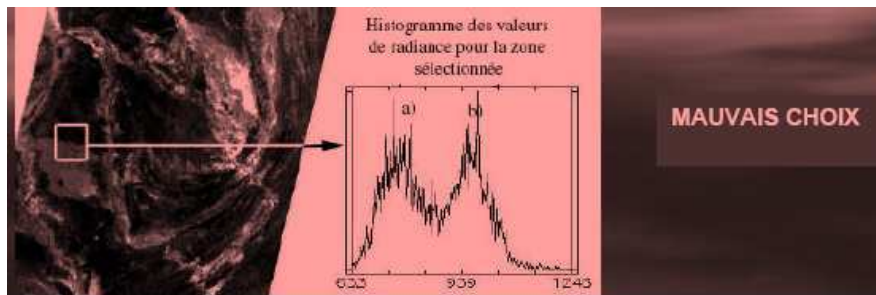
Généralement, les résultats des classifications non supervisées doivent être comparés avec des données terrain. Normalement, la vérité terrain (référence) est obtenue à partir de visites sur place ou des mesures récentes [Lillesand et al. 2004]. La qualité d'une classification par maximum de vraisemblance s'estime grâce à plusieurs paramètres : les comportements spectraux des zones-test, leur séparabilité, l'image des probabilités et la matrice de confusion [Guis, 2004].

- **Les comportements spectraux des zones-test.**

- En s'assurant de la distribution gaussienne de chaque classe d'entraînement. Si l'histogramme affiche deux ou plusieurs modes cela signifie que le choix des sites d'entraînement n'est pas approprié; autrement dit, que la distribution gaussienne n'est pas satisfaite. Il faut alors subdiviser la classe en sous-classes, une pour chacun des modes de la distribution, de sorte à ce que la densité de chaque sous-classe soit représentée par une fonction normale (Fig. 5a et 5b).



**Figure 5a : Histogramme montrant un bon choix des zones tests**  
[Hakdaoui, 2006]



**Figure 5b : Histogramme montrant un mauvais choix des zones tests**  
[Hakdaoui, 2006]

En vérifiant la possibilité d'une confusion inter-classes en recourant à l'**histogramme bi-dimensionnel** (les ellipses se chevauchent elles ?)

- Tests statistiques (**Distance Jeffries-Matusita**). L'indice de séparabilité de cette mesure est compris entre 0 et 2. Sous ENVI®, il est possible de calculer, en prenant les noyaux deux à deux, le coefficient de Jeffries-Matusita, reflétant la séparabilité des noyaux entre eux. Si ce coefficient est inférieur à 1.4, on peut considérer que les noyaux se séparent mal ; s'il est supérieur à 1.9, les noyaux sont bien séparés [ENVI, 2005].

La matrice de confusion et le coefficient Kappa sont les plus utilisés pour évaluer la qualité de chaque classification. La matrice de confusion permet de calculer la précision totale qui est égale au nombre de pixels bien classés, divisé par le nombre total d'individus. Généralement, la norme de 80% d'exactitude globale est souvent utilisée.

Quant à l'indice kappa, étant une probabilité, il peut varier entre 0 (aucun point bien identifié, donc une certitude absolue que la matrice est due uniquement à la chance) et 1 (tous les points bien identifiés, donc une certitude absolue que la matrice n'est pas due à la chance). Un Kappa de 0,85 signifie que 85% de la classification ne sont pas dus au hasard.

#### 2.1.4. Le paradigme segmentation - classification

Le problème qui se pose souvent concerne cette confusion souvent soulevée entre la segmentation et la classification. Autrement dit, où finit la segmentation et où commence

la classification. Pour certains, la classification est une approche faisant partie de la segmentation d'images.

Pour d'autres, la segmentation ne doit pas être définie comme étant une méthode de classification mais plutôt une méthode de regroupement de pixels contigus en régions (segments) relativement homogènes, autrement dit une étape de prétraitement de l'image avant sa classification [**Horning, 2004 ; Bellaïche, 2001**].

Cependant, il existe une distinction nette entre la segmentation et la classification. D'après **Ducrot, [2005]**, la segmentation est une opération qui décompose l'image en un ensemble de régions uniformes (appelés segments) chacune d'entre elles étant homogènes au sens d'attributs préalablement définis. Par opposition à la segmentation, la classification consiste à identifier la nature des régions trouvées.

Mais bien que toutes les deux se fondent sur les traits caractéristiques<sup>6</sup> des pixels il existe entre elles une différence de principe : La classification assume qu'il existe une relation biunivoque entre les classes d'occupation du sol et les traits caractéristiques des pixels. Il est donc possible en se fiant uniquement sur ces traits de poser un jugement quant à la classe d'appartenance d'un pixel quelconque. Le résultat est une carte thématique en format raster.

La segmentation considère que la relation entre traits caractéristiques des pixels individuels et classes d'occupation du sol n'est pas biunivoque. C'est l'appartenance du pixel dans un groupe de pixels contigus (un segment) ayant des traits caractéristiques similaires qui permet d'établir une telle relation. Le segment constitue en soi une entité cartographique dont la classe d'appartenance peut être établie en se servant des techniques de classification (étiquetage).

### **2.1.5. L'analyse orientée-objet**

Ce type d'analyse est très bien enraciné dans le développement à long terme et dominera la recherche de la télédétection dans le futur proche. La classification d'une entité compte sur le contexte dans lequel elle est contenue. Etablir le contexte d'une entité cependant, dépend de la capacité de grouper ce qui ressemble à des entités, et par

---

<sup>6</sup> Un trait caractéristique est une valeur numérique qui décrit une propriété quelconque d'une image : la brillance, la texture locale, etc.,

conséquent exige une certaine forme de classification<sup>7</sup>. Cette dernière est le problème de la segmentation.

### 2.1.5.1. Problème du contexte

De manière générale, les objets sont représentés par une série de caractéristiques propres, appelées attributs. Ces attributs peuvent être de différentes natures. Le problème de la prise en compte du contexte revient à admettre que certains attributs peuvent être déterminants pour la création de certaines classes et sans importance pour d'autres classes. [Beck, 2006] : c'est le cas du problème de classement de couverts végétaux sur base de la reconnaissance de certains espèces caractéristiques en leur sein.

Ainsi, si deux couverts comprennent plusieurs sujets de pin d'Alep, ce n'est pas pour autant qu'ils doivent être rassemblés dans un même couvert. En effet, le premier couvert peut traiter des arbres d'une forêt naturelle tandis que le second d'un reboisement ou d'un matorral arboré. il sera nécessaire donc de prendre en compte d'autres paramètres simultanément dans les deux couverts afin de différencier leurs contextes respectifs (Par exemple prendre les paramètres hauteur, densité, physionomie,...).

L'extraction d'objets caractéristiques passe par deux étapes principales, la segmentation et la classification. Les objets obtenus par segmentation peuvent être classés à travers deux méthodes: la classification le plus souvent par la méthode des k plus proches voisins et la classification basée sur la fonction d'appartenance. La première est recommandée lorsque plusieurs caractéristiques différencient les objets alors que la deuxième devient un choix optimal dans le cas contraire [Ivits et Koch, 2000].

La classification par les k plus proches voisins a besoin de zones test dans un espace multidimensionnel. Les objets issus de la segmentation sont classés à travers leur ressemblance à ces zones d'entraînement pour chaque classe. Cependant, après segmentation et en plus d'attributs spectraux, les objets auront de l'information supplémentaire telle que la forme, la texture, le contexte le voisinage etc [Baatz et Shape, 2000]. Dans la méthode de fonction d'appartenance, les segments sont classés par fonctions d'appartenance qui sont basées sur les ensembles flous, la logique floue étant une approche mathématique pour mesurer des situations incertaines [Willhauck, 2000].

---

<sup>7</sup> Classifier par pixel les objets d'une scène est un cas particulier de la classification par objet où de simples pixels sont les objets [Kok, 2000].

# *Chapitre troisième*

## *Bilan de la télédétection forestière*

### **3.1. Analyse descriptive et dendrométrie des peuplements forestiers**

#### **3.1.1. Identification de la végétation forestière**

L'identification de la composition en espèces de surfaces boisées n'est plus un défi avec l'apparition de satellites comme IKONOS, QUICKBIRD, ORBVIEW. L'établissement des limites entre les espaces forestiers et non forestiers peut se faire avec les données AVHRR. Les images de moyenne résolution permettent une cartographie au 1/50000 des types de peuplements forestiers [Begni *et al.* 2001].

Dans ce dernier domaine, les bandes rouge, PIR et MIR de Landsat et SPOT sont les plus utiles pour une discrimination générale de types de couverts forestiers et leur densités [Claudin et Lignon, 1995 ; Durrieu, 1994 ; Horler et Ahern, 1986]. Mais bien que ces données soient spatialement complètes et correctes, leur contenu en information est limité aux caractéristiques générales de la canopée [Cohen *et al.* 2001].

##### **3.1.1.1. Végétation herbacée et Végétation arbustive**

La végétation terrestre herbacée fait l'objet de plusieurs types d'utilisation dont la production d'herbes et de fourrage, la conservation des milieux et utilisation comme valeur d'usage. Les informations habituellement recherchées par les gestionnaires et les décideurs sont l'identification des groupements végétaux, l'évaluation des surfaces, de la qualité et de la quantité de la phytomasse produite [Girard et Blasco, 1996].

Des groupements végétaux seront identifiables par télédétection s'ils présentent à une date donnée, un comportement spectral particulier permettant de les séparer des autres groupements. Pour les formations herbacées, le choix des données de télédétection se fera en fonction de la surface du territoire à couvrir, des phénomènes à détecter et du niveau de précision attendu<sup>1</sup>.

---

<sup>1</sup> En l'absence d'une connaissance précise du comportement radiométrique des groupements végétaux étudiés, le choix des dates se fera en fonction des périodes durant lesquelles ces groupements ont les physionomies les plus différentes possibles. Les unités à identifier et à délimiter doivent être de dimensions supérieures à celles du pixel et couvrir des surfaces, si possibles, égales ou supérieures à 30 pixels.

### 3.1.1.2. Les peuplements forestiers

La stratification en stades d'évolution (semis, jeune ou adulte) semble possible au moyen d'images satellitaires [**Pain-Orcet et al. 1998 ; Boureau et Ratte, 1990**]. La distinction entre feuillus et conifères est possible à cause d'une différence fondamentale dans le proche infrarouge (PRI)<sup>2</sup>: les feuillus ont un couvert dense de leurs cimes avec une expansion horizontale à l'inverse des pins qui ont un couvert faible de la cime avec une distribution conique verticale [**Zheng et al. 2004**].

Plusieurs auteurs rapportent des exemples réussis d'utilisation d'images multispectrales de type SPOT et Landsat pour la caractérisation des peuplements forestiers résineux (Pin blanc aux états unis) [**Lashbrook et al. 2001**] et feuillus (chêne liège au Maroc) [**FAO, 1999b**]. En France, l'imagerie SPOT est utilisée pour actualiser la carte<sup>3</sup> forestière au 1/25000 de l'IFN (inventaire forestier national) [**Durrieu, 1994 ; Boureau et Ratte, 1990**].

### 3.1.2. Détection des changements

Dans tous les cas, la télédétection constitue un outil de suivi et de surveillance des changements dus à des causes naturelles (changement climatique, désertification) ou causes anthropiques (modification du zonage, implantation humaine spontanée...). La détection de changements d'occupation du sol en particulier l'afforestation, la reforestation et la déforestation ne peut être obtenue que par un suivi régulier (hebdomadaire ou mensuel) du territoire [**Begni et al. 2001 ; Bonn et Rochon, 1996**].

### 3.1.3. Détection des coupes

Les coupes de grandes dimensions sont visibles sur les images satellitaires mais pour les coupes plus petites, les données aéroportées sont souvent utilisées. Sur les images satellitaires et au delà d'un certain stade de croissance, les zones de régénération finissent par se confondre avec des peuplements plus âgés. Les reboisements ne sont détectables que lorsque la formation est totalement couvrante.

---

<sup>2</sup> Les houppiers des feuillus peuvent réfléchir 50% de plus dans le PIR que les houppiers des pins, dû aux structures différentes des deux canopées.

<sup>3</sup> La carte est basée sur la notion de type de peuplement qui caractérise des aires de plusieurs hectares dont le contenu forestier est relativement homogène mais dont la radiométrie comme la texture sont souvent très hétérogènes [**Durrieu, 1994 ; Boureau et Ratte, 1990**].

Les coupes rases sont manifestement identifiées et localisées particulièrement dans le domaine forestier résineux. Il est difficile d'apprécier l'incidence radiométrique de coupes partielles. Il n'est possible de détecter un tel type d'intervention que lorsqu'un minimum de 50 % du couvert est touché [Boureau et Ratte, 1990] et que la coupe ne remontait pas à plus de deux ou trois ans [Leckie et al. 2002].

#### 3.1.4. Détection des maladies

Lorsque un couvert bas ou une forêt subissent une certaine contrainte (déficit hydrique, attaque parasitaire etc.), les propriétés spectrales peuvent ne pas être modifiées; néanmoins, ces contraintes peuvent modifier le port des feuilles/ou l'indice foliaire et être ainsi détectées dans le visible et le proche infrarouge [Guyot, 1983].

Mais les méthodes opérationnelles de détection précoce des premiers signes du dépérissement ont été peu approfondies, la principale raison étant la faible résolution spatiale et spectrale des capteurs existants alors. La haute résolution spatiale, environ 4 mètres dans le domaine multispectral, est bien adaptée à des traitements d'image pour cette thématique forestière [Bonn et Rochon, 1996].

#### 3.1.5. Détection des feux et des zones brûlées

L'identification des feux est possible à partir des fumées dégagées par les feux actifs, de l'échauffement des surfaces ou la couleur caractéristique des secteurs brûlés pendant plusieurs semaines après les feux. La cartographie des zones brûlées nécessite la disponibilité d'images haute ou moyenne résolution à une date postérieure aux feux mais avant la reprise de la végétation qui peut être particulièrement active dès les premières précipitations [Begni et al. 2001].

Mais pour la détection et la localisation en temps réel des feux de forêts, il faut disposer d'images adaptées à ces objectifs comme LANDSAT, NOAA, ERS-2 et METEOSAT. La détection des feux par satellite dépend des caractéristiques du capteur, la chaîne de traitement des images, les algorithmes de détection, fréquence des prises de vue et la date d'acquisition des données [Stolle et al. 2004]. Quant à la reconnaissance des sols ayant subi le passage du feu, elle se fait à partir d'images multispectrales en particulier dans le vert, le proche infrarouge et le moyen infrarouge [Begni et al. 2005 ; Bonn et Rochon, 1996].



### 3.1.6. Détection des points d'eau

Les plans d'eau qu'ils soient naturels (lacs, étangs) ou artificiels (barrages, aquaculture) sont facilement identifiables à partir d'images satellitaires optiques du fait de leur comportement spectral (absorption dans le proche infrarouge). Toutefois, pour les cartographier précisément et connaître leur superficie, les images doivent avoir une résolution minimale de 20 à 30 m comme cela a été établi en France par les travaux du CEMAGREF (centre de machinisme, du génie rural, des eaux et forêts) [Puech, 1999].

### 3.1.7. Estimation du volume bois

Classiquement, le volume-bois d'un peuplement est estimé à travers des inventaires forestiers terrain où les paramètres hauteur et diamètre à hauteur d'homme sont mesurés directement [Baccini et al. 2004]. Les données de la télédétection optique ne captent pas bien les éléments verticaux de la structure forestière et par conséquent, la relation entre radiométrie et volume est relativement assez faible mais au total meilleure pour les conifères [Wulder et al. 2003].

Le domaine proche et moyen infrarouge du spectre a été identifié comme étant le plus sensible aux variations du volume-tige puisque la réponse spectrale dans ce domaine est fortement liée au degré de couvert des cimes [Mallinis et al. 2004 ; Wallerman, 2003 ; Gougeon, 2000]. Certaines études ont visé à quantifier indirectement certains paramètres forestiers liés à la dimension des troncs mais les techniques sont complexes et difficilement applicables sur de grandes étendues [Begni et al. 2001].

Les erreurs relatives sur l'estimation du volume bois au niveau du peuplement peuvent atteindre dans certains cas les 80% [Kayitakire et al. 2002]. Cependant, plusieurs auteurs ont démontré que l'estimation conventionnelle du volume bois peut-être améliorée par l'utilisation des données Landsat TM/ETM+ [Mallinis et al. 2004 ; Mäkelä et Pekkarinen, 2001 ; Tokola, 2000]. Le capteur TM de Landsat, par exemple, fournit une estimation acceptable du volume bois pour des parcelles forestières de 40 hectares alors que l'augmentation de la zone à prédire peut améliorer la précision des prédictions [Wallerman, 2003].

Certainement, la radiométrie satellitaire ne peut actuellement fournir de mesures dendrométriques absolues et ne le pourra peut-être jamais puisqu'on tente de relier une

réalité géométrique à une autre qui ne l'est pas [Renaud, 2000]. Toutefois, une bonne intégration des données provenant de différentes sources, en particulier l'intégration des données venant des échantillons de terrain avec l'imagerie satellitaire pourrait se révéler avantageuse pour les inventaires forestiers [Kleinn, 2002].

### 3.2. Méthodologies d'utilisation des données satellitaires pour la conception des plans d'aménagement

Au préalable, il faut reconnaître qu'il n'existe pas une méthodologie spécifique à l'aménagement forestier mais des méthodologies qui abordent selon l'objectif une des plusieurs facettes de l'aménagement uniquement dans sa phase d'analyse descriptive et dendrométrique des peuplements forestiers.

#### 3.2.1. Analyse descriptive

Les méthodologies développées sont généralement fondées sur l'interprétation visuelle et automatique des images satellitaires [Cihlar et al. 1998]. Des exemples d'interprétations visuelles réussies sont cités dans la littérature, notamment en cartographie forestière tropicale [Euler, 2005 ; Malingreau, 1993] et québécoise [Bonn et Rochon, 1996]. Mais elle a cédé devant l'apparition de nouvelles méthodes automatiques comme l'analyse orientée objet qui permet l'intégration à la fois des caractéristiques spectrales, texturales, de forme etc. [Mitri et Gitas, 2002].

Plusieurs méthodologies ont été développées pour permettre aux institutions locales d'utiliser l'imagerie satellitaire pour l'aménagement adapté de leurs ressources naturelles. Dans ce contexte, Beaulieu et al. [2002] ont développé une méthodologie qui consiste en un traitement d'une série d'images multidates pour aboutir à une cartographie au moyen de classifications basées sur le calcul d'indices comme le PVI et BRI (indice de brillance) et le moyen infrarouge.

Des classifications non-dirigées multidate et multispectrale d'images Landsat dans les domaines du visible et de l'infrarouge (méthode des k moyennes) a distingué les classes des forêts de conifères, feuillues et mixtes [Leckie, 2002]. Par ailleurs, certains recommandent pour le zonage d'unités de faire des classifications de canaux (rouge, proche infrarouge, moyen infrarouge) et d'employer des classifications dirigées [Bonn et Rochon, 1996].

Des classifications par pixel sont par ailleurs réalisées pour la cartographie des changements forestiers en moyenne montagne [Durrieu, 1994] et à l'évaluation des dégâts causés par les tempêtes qui ont touché certaines régions forestières de la France en décembre 1999 (classifications dirigées d'images SPOT4 par la méthode du max. de vraisemblance) [Godard, 2005].

En Afrique tropicale, une étude de Nziengui *et al.* [2000] montre l'intérêt de l'imagerie satellitaire pour la stratification forestière s'appuyant exclusivement sur les techniques de classification dirigées. Dans le même contexte, Belaiche [2001] présente une méthodologie basée sur l'analyse statistique des images comme l'ACP et la segmentation pour une stratification de la forêt en peuplements forestiers distincts.

Steven *et al.* [2001] ont proposé, pour la classification précise des espaces boisés méditerranéens, une méthode basée sur l'information spatiale et spectrale et combine les avantages des deux types d'information. La méthode passe par trois étapes: - La stratification par 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.

L'approche objet-orienté<sup>4</sup> semble être très prometteuse pour la cartographie forestière et la caractérisation des écosystèmes méditerranéens [Mallinis *et al.* 2006]. L'approche est utilisée avec succès sur des images ETM+ de Landsat pour la classification de zones hétérogènes ainsi que pour la reconnaissance des zones forestières dégradées [Schwarz *et al.* 2001]. Son principal avantage par rapport à l'approche par pixel est qu'elle garde intacte l'information spatiale [Flanders *et al.* 2003].

### 3.2.2. Analyse dendrométrique

Plusieurs méthodes de télédétection sont utilisées pour l'estimation de la biomasse forestière (le volume tige est une partie de cette biomasse) comme les indices de végétation, kNN, classifications des types d'occupations, segmentation, les régressions mais aucune méthode n'a été définie comme la plus appropriée [Labrecque *et al.* 2006].

---

<sup>4</sup> La méthode est performante sur des images de très grande résolution spatiale (IKONOS, QUICKBIRD, données Lidar) et sur les photographies aériennes [Caloz *et Pointet*, 2003].

En ce qui concerne les régressions, il n'y a pas une relation universelle entre les valeurs absolues des comptes numériques dans l'image satellitaire et les propriétés forestières.

Mais une nouvelle technique utilisant le Lidar est entrain de se développer en occident pour des analyses dendrométriques. A titre d'exemple, **Wulder et Seemann [2003]** ont mis au point une méthode qui combine les données Lidar aux données Landsat pour établir des relations empiriques de régression entre les valeurs des hauteurs estimées par le Lidar et leurs comptes numériques sur un segment donné (ligne donnée) permettant d'étendre le modèle sur une surface plus grande.

L'approche Lidar combine ainsi l'avantage des données optiques de Landsat de bien représenter la structure horizontale avec l'avantage du Lidar<sup>5</sup> de bien représenter la structure verticale des peuplements forestiers. Mais les données Lidar bien qu'elles soient très précieuses pour les applications forestières, demeurent difficiles à manipuler [**Cassien, 2007**].

### 3.2.3. Les tendances

Dans quelles mesures sont utilisées les données satellitaires pour la conception des plans d'aménagement et de quelle manière sont-elles exploitées. Trois approches méthodologiques semblent intéresser les chercheurs: la cartographie physiologique, les indicateurs pour l'analyse descriptive des peuplements et les régressions pour l'analyse dendrométrique.

La télédétection satellitaire joue un rôle fondamental dans l'estimation de quelques-uns des indicateurs de suivi et de surveillance au moment opportun, à moindres frais et de manière intuitive. Ils aident certains décideurs à concentrer leurs actions dans l'espace et le temps. [**Beaulieu et al, 2001**].

L'approche physiologique est une méthodologie basée sur l'information spectrale, temporelle et spatiale (texturale) fournie par les données satellitaires [**Shoshany, 2000 ; Steven et al. 2001**] et dans les régions méditerranéennes, plusieurs auteurs ont adopté une

---

<sup>5</sup> Le VCL (Vegetation Canopy Lidar) de la NASA (lancé en 2001) est conçu pour fournir des données de distribution verticale du couvert végétal mais son potentiel reste encore à explorer par la communauté scientifique.

classification basée sur la physionomie du couvert végétal et sa densité [Yanqui et al. 2004 ; Shoshany, 2000 ; Bornand et al. 1997].

Ces différents points de vue montrent les difficultés à adapter ce nouvel outil aux besoins de l'aménagement forestier et justifient la nécessité de développer des méthodologies simples mais utiles pour les gestionnaires forestiers. Mais 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, 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, 2000].

Nous pensons qu'il ne peut y avoir une seule méthodologie mais plusieurs, chacune développée en fonction de la nature de la zone d'étude, des caractéristiques de sa végétation, de son étage bioclimatique, mais aussi en fonction des besoins concrets de l'administration locale et des exigences du développement durable à l'échelle locale et régionale.

Pour valoriser le concept «méthodologie d'utilisation de la télédétection», il est primordial de bien définir non seulement les questions auxquelles doit répondre cet outil mais comment les résultats obtenus pourront ils être utilisés pour la conception des plans d'aménagement des forêts semi-arides.

# *Troisième partie*

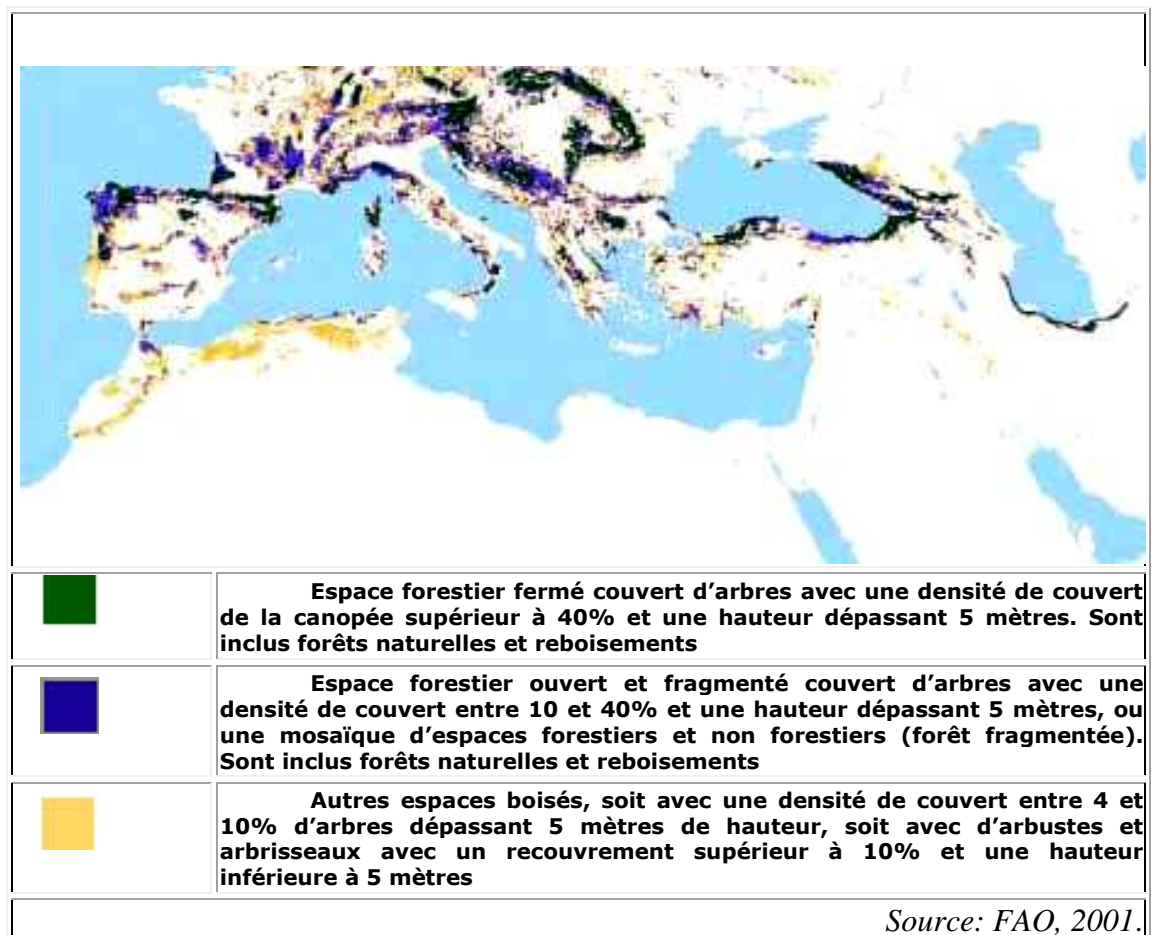
Intégration de la télédétection satellitaire  
dans le processus d'aménagement  
des forêts semi-arides

# Chapitre premier

## Caractéristiques de l'espace forestier semi-aride de l'Ouest-algérien

### 1.1. Caractéristiques générales

Pour mieux caractériser la forêt ouest-algérienne, il est utile de rappeler certaines particularités du contexte méditerranéen dans lequel elle se développe. La caractéristique première de l'écosystème méditerranéen est climatique<sup>1</sup>. La flore riche inclut plus de 25000 espèces de hautes plantes dont approximativement la moitié est endémique [FAO, 2000]. L'aire de certaines espèces végétales comme le chêne vert ou l'olivier, considérées comme les plus expressives de la «méditerranéité», a été souvent utilisée pour délimiter le bassin méditerranéen (Fig.6).



**Figure 6. Forêts du bassin méditerranéen**

<sup>1</sup> Le climat méditerranéen est défini par un été sec et chaud et une période pluvieuse correspondant aux saisons relativement froides allant de l'automne au printemps.

Il n'existe pas en région méditerranéenne une opposition tranchée forêt/zone cultivée mais plutôt un continuum entre forêts fermées et surfaces cultivées en permanence en passant par des intermédiaires de surfaces boisées plus ou moins extensivement pâturées ou occasionnellement cultivées [Boisvert *et al.* 1997].

Les principaux écosystèmes sont subdivisés ainsi en forêts, matorrals et steppes. Cependant, le climat et souvent l'homme interviennent par la transformation de la répartition spatiale de ces trois types d'écosystèmes en favorisant les phénomènes de steppisation, de matorralisation et dématorralisation<sup>2</sup> [Quézel, 2000 ; Aidoud, 1997].

## 1.2. Les écosystèmes forestiers

Sur la base d'un critère physionomique, sont définis en zones semi-arides<sup>3</sup> de l'Ouest Algérien trois principaux types d'écosystèmes qui montrent cependant différents stades intermédiaires :

### 1.2.1. Les forêts<sup>4</sup>

Les forêts de pin d'Alep (*Pinetum halepensis*) se trouvent principalement dans la zone semi-aride (Saida, Mascara, Sidi-Bel-Abbès, Telagh, Monts Ouled Naïl-Djelfa). Elles se présentent sous l'aspect de futaies généralement bienvenantes.

La forêt de thuya de berberie (*Tetraclinetum articulatae*) est une association xérothermophile et calcicole de l'étage semi-aride chaud, doux et frais. Elle est largement répandue dans l'atlas tellien de l'Ouest algérien. Elle forme des peuplements purs ou mélangés (chêne vert, pin d'Alep).

La forêt de genévrier de Phénicie (*Juniperetum phoeniceae*) est une association xérophile liée à l'étage semi-aride froid mais elle déborde dans l'étage aride (littoral de Mostaganem, Djelfa).

La forêt de chêne vert (*Quercetum ilicis*) se développe dans le semi-aride montagnard froid (Tiaret, Mascara, Sidi-Bel-Abbès, Tlemcen, atlas saharien occidental). Dans ce facies, l'association du chêne vert est généralement à l'état de taillis plus ou moins dégradé.

---

<sup>2</sup> Steppisation : envahissement par la steppe ; Matorralisation : embroussaillage des ensembles forestiers ; Dematorralisation : débroussaillage des ensembles préforestiers.

<sup>3</sup> Ce type d'aridité est pris dans le sens d'Emberger et qui se caractérise par une pluviométrie annuelle entre 300 et 600 mm et une durée de la saison sèche de 4 mois en moyenne.

<sup>4</sup> La forêt typique prend en région méditerranéenne le qualificatif de « sclérophylle » en raison de la consistance des feuilles persistantes.



La forêt de chêne liège (*Quercetum suberis*) se trouve dans le semi aride supérieur chaud ou doux (littoral oranais, Sidi-Bel-Abbès, Tlemcen, Mostaganem, Mascara).

### 1.2.2. Les matorrals<sup>5</sup>

Ils représentent la forme la plus typique de la végétation méditerranéenne. Les matorrals sur calcaires (garrigue) occupent des surfaces importantes en Afrique du nord et individualisent de multiples groupements [Quézel, 2000].

Parmi les principales espèces dominantes, figurent le chêne kermès (*Quercus. Coccifera* L), le lentisque (*Pistacia lentiscus* L), le nerprun alaterne (*Rhamnus alaternus* L), les cistes (*Cistus sp.*), le romarin (*Rosmarinus officinalis* L) [Ozenda, 1994].

Très répandue dans l'étage semi aride, l'association (*Oleo-lenticetum*) à lentisque et olivier sauvage (*Olea europaea ssp sylvestris* L) se présente sous l'aspect de matorral arboré haut (forêt basse) ou matorral bas (haute broussaille). Par dégradation, elle se transforme en Oranie, en une garrigue à doum (*Chamaerops humilis* L) ou à lentisque.

L'association du chêne kermès (*Quercetum cocciferae*) se présente aussi sous l'aspect de formations arborescentes mélangées a *Pistacia lentiscus* L et *Chamaerops humilis* L. En fonction de l'essence dominante, on distingue aussi les matorrals arborés à *Pinus halepensis* MILL, à *Quercus* ssp, des matorrals bas à romarin, à genêt, à cistes, à doum.

### 1.2.3. La steppe

C'est une formation basse et ouverte dominée par des xérophytes en touffes, laissant paraître le sol nu dans des proportions variables. Elle se substitue dans le semi-aride à d'anciennes forêts ou bien se trouve en intrication avec la végétation forestière dégradée [Letreuch, 1991].

En fonction du végétal dominant, il est possible de reconnaître deux types de steppes qui peuvent exister en formations pures ou en mélange: les steppes dominées par l'alfa (*Stipa tenacissima* L) et le sparte (*Lygeum spartum* L) et les steppes ligneuses à armoise blanche (*Artemisia herba-alba* L) [Le Houérou, 1995].

---

<sup>5</sup> Différentes dénominations existent selon par exemple la taille, la nature de la roche mère : garrigues et maquis français, chaparrals californiens, mallee australien. Ces groupements préforestiers représentent en zones semi-arides des structures bloquées dans les conditions écologiques actuelles et constituent dès lors de véritables climax [Quézel, 2000].

### 1.3. Importance socio-économique

Comme toutes les forêts du monde, la forêt méditerranéenne remplit les trois fonctions de production, de protection physique et paysagère.

#### Fonctions de la forêt méditerranéenne

[FAO, 2003 ; Seigue, 1985]:

- ✓ Une fonction de production sous ses deux aspects : social au profit des riverains et économiques au profit de propriétaire (état, commune, particulier). La production est principalement extra-forestière (graines, fourrage, fruits, résines...)
- ✓ Une fonction pastorale dans laquelle le caractère social est étroitement lié à l'économie et qui s'exerce en général au profit des riverains non propriétaires.
- ✓ Une fonction écologique ou de protection des terres et de régularisation du régime des eaux qui est essentiellement d'intérêt général
- ✓ Une fonction de réserve génétique et parfois foncière.
- ✓ Une fonction d'accueil: c'est cette fonction de la forêt méditerranéenne qui lui est reconnue par la société puisque dans les pays du sud et l'est méditerranéen, la forêt est perçue comme espace naturel ombragé et accueillant.

### 1.4. L'espace forestier algérien entre déforestation et reboisement

Depuis l'arrivée des Français en 1830 jusqu'en 1950, la déforestation<sup>6</sup> en Algérie a été considérable et la réduction des surfaces boisées a continué jusqu'à ce jour. Si le problème a été bien analysé, aucune solution de reconstitution forestière efficace n'a suivi [Bensaid *et al.* 1998].

Le plan national de reboisement national vise différents objectifs dont les aménagements forestiers et les reboisements<sup>7</sup> [DGF, 1999]. Le programme tend vers l'inventaire national actualisé des forêts et des ressources en terres à vocation forestière. Il a été décidé aussi l'intensification du reboisement<sup>8</sup> en portant la surface actuelle de 20000 hectares par an à 40000 hectares par an [Mezali et Goussanem, 2003].

---

<sup>6</sup> Sur 5 millions d'hectares, il ne subsistait que 3200 000 ha [Bensaid *et al.* 1998].

<sup>7</sup> Un volume de 1.246.909 ha a été retenu pour les vingt prochaines années durant lesquelles sera appliqué le Plan National de Reboisement (PNR) qui verra le taux de boisement progresser de 11 à 13% pour les zones sylvatiques.

<sup>8</sup> D'ici vingt ans, l'objectif sera la couverture par le reboisement de 21% du territoire du pays (soit une surface de 1.246.909 ha) et de 13% pour les zones sylvatiques. [ONU, 2002].

### 1.5. Perspectives d'aménagement

Les forestiers algériens ont toujours manifesté une certaine appréhension vis-à-vis de la production de bois et la tendance a été souvent vers une gestion préventive et de protection qui n'a pas toujours réussi [Grim, 1989]. Une organisation stricte demeure donc une nécessité vitale.

Ceci implique une méthode tenant en compte la grande hétérogénéité structurale des peuplements et un système rigoureux de suivi et de surveillance. Ces mesures ne pourraient être efficaces qu'à la seule condition d'établir au préalable un bilan qui soit une référence pour évaluer les actions futures sur l'évolution des surfaces boisées (Tab.2).

Les procès verbaux<sup>9</sup> d'aménagement forestier, ne contiennent pas une information fiable et présentent invariablement les forêts plus homogènes qu'elles ne le sont en réalité à cause des difficultés d'accès au terrain et donc le recours à des photographies aériennes parfois anciennes [Grim, 1989]. Les méthodes d'aménagement proposées étaient par conséquent incompatibles avec la réalité terrain.

La méthode d'aménagement qui décide de l'objectif et donc des actions futures doit normalement tenir compte de l'information écologique et dendrométrique. Toutefois, la collecte de données doit respecter les quelques principes de base suivants [PNUE/PAM/PAP, 2000]:

- ⇒ La collecte de données et d'information devrait être centrée sur des objectifs spécifiques et répondre à la demande des utilisateurs.
- ⇒ Les données et l'information de base devraient être orientées en vue d'une meilleure compréhension du fonctionnement du binôme ressources en terres/utilisation de ces ressources.
- ⇒ Les données à caractère géographique et physique sont requises en format spatial tel que les cartes ou toutes autres informations/observations géo-référencées.

L'organisation d'un programme d'aménagement forestier doit se traduire par la prise en compte des motivations justifiant les choix retenus en matière de gestion et les dimensions spatiale et temporelle de la gestion forestière d'où l'importance des nouveaux outils de description de l'espace (SIG), de son suivi (télédétection) et de prévision (modélisation) [CEMAGREF-ECOFOR, 2002].

---

<sup>9</sup> En plus, la plupart de ces PV sont devenus caduc à cause des changements intervenus au moment, durant ou peu avant l'exécution des projets [Grim, 1989].

La cartographie numérique est un élément indispensable à la gestion forestière et la télédétection satellitaire doit être l'outil privilégié du forestier [Bonn et Rochon, 1996]. Toutefois, le traitement d'image ne doit pas être une fin en soit pour le forestier, il doit servir pour comprendre, justifier, prouver une hypothèse scientifique forestière ou géographique.

Tableau 2. Expression des priorités sur les zones forestières semi-arides

DESIGNATION DE LA PRIORITE	OBJECTIFS	INDICATEURS : État, structure, composition, dynamique	INTERET D'UN TEL INDICATEUR	MOYENS TECHNIQUES
<b>1. CONNAITRE LES ESPACES</b>	1.1. Estimer les proportions des formations basses et hautes	Répartition des grandes typologies de végétation	Connaître l'occupation du sol	Télédétection-Photo aériennes et SIG
	1.2. Connaître le contexte environnemental des matorrals : les mosaïques d'habitats, les rapports matorrals/forêt	Structuration de la mosaïque paysagère (hétérogénéité) état, structure)	Connaître la mosaïque des habitats pour y adapter la gestion	Télédétection ou Photo-aériennes et exploitation par SIG
	1.3. Distinguer deux catégories de matorrals matorrals bas et matorrals hauts	Répartition des deux catégories de matorrals (état, structure)	Mieux gérer le problème de matorralisation et dematorralisation	Images satellitaires
	1.4 Disposer d'un inventaire cartographique fin de la typologie forestière	Répartition des différentes typologies forestières (état, surface, composition)	Surveillance générale de la biodiversité à l'échelle du peuplement.	Images satellitaires renseignées par des clés (MNT, indices de pluviométrie, géologie...
	1.5 Estimation de la disponibilité forestière	Estimation du volume sur pied Estimation générale de la biomasse aérienne	Mieux connaître les potentialités de production.	Images satellitaires intégrées aux échantillons terrain
<b>2. PRESERVER/ CONSERVER /RESTAURER LES ESPACES</b>	2.- Maintenir les surfaces forestières dans un état d'équilibre favorable	Évolution des surfaces et de la fragmentation des forêts et matorrals	Evaluer l'évolution des états de surface par rapport à une date référence :	Télédétection et SIG
<b>3. GERER LES ESPACES/ LA BIODIVERSITE</b>	3.1. Favoriser l'aménagement paysager	Dynamique de la matorralisation	Adapter les plans de gestion en relation avec les enjeux des zones semi-aride	Modèles effectués grâce au tableau de bord géographique
	3.2. Eviter la fragmentation liée aux pressions anthropogènes	Evaluation de la fragmentation par spatialisation des unités paysagères		

### 1.6. Présentation des zones d'étude

L'étude porte sur trois zones forestières de l'Ouest Algérien, éloignées géographiquement l'une de l'autre (Fig.7). Les trois zones retenues regroupent chacune plusieurs types de formations végétales et recouvrent des situations forestières variées dans des régions de plaine et de montagne : futaie résineuse, futaie feuillue, taillis, matorral arboré, matorral, des vides boisables et des vides non boisables.

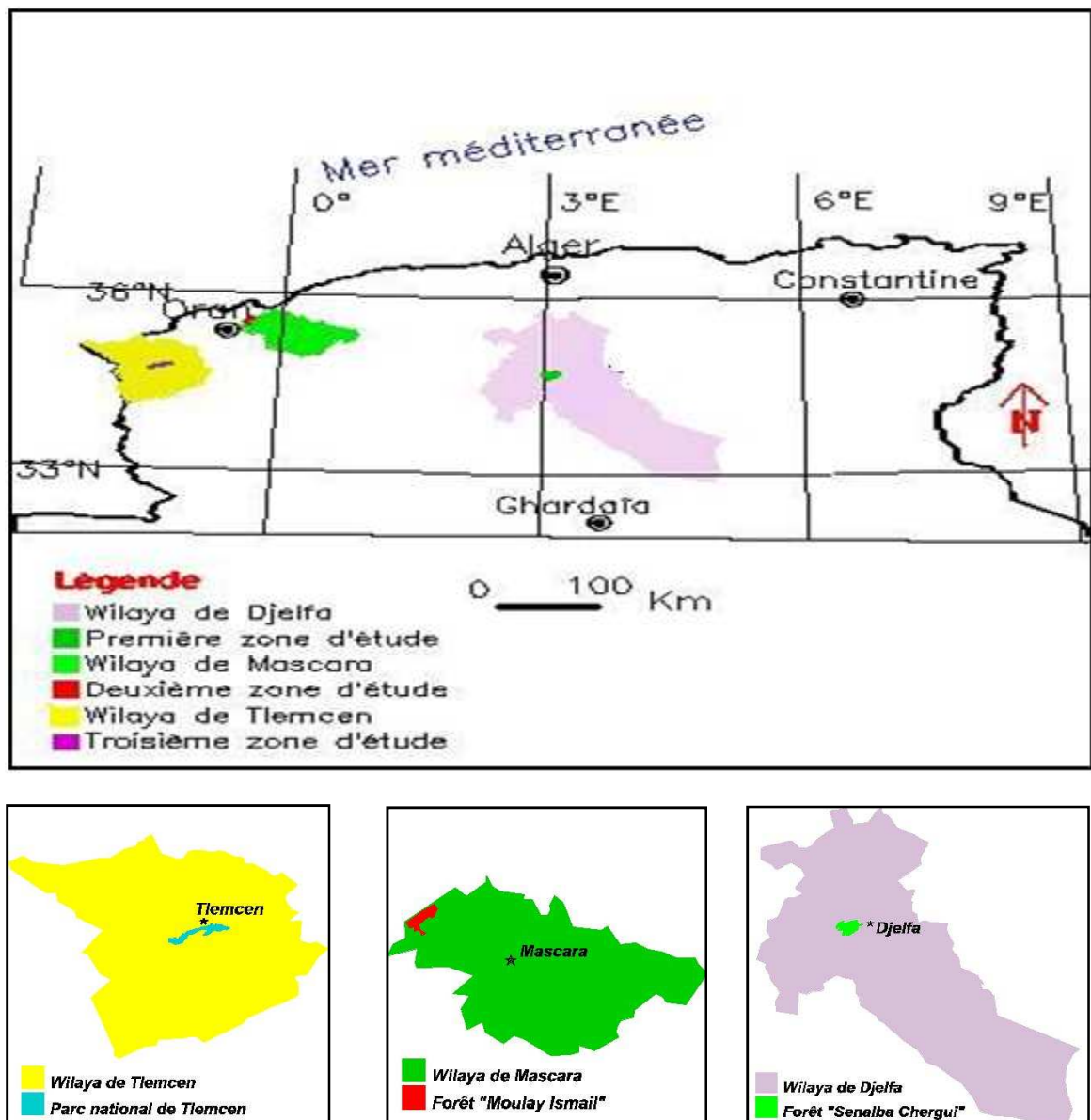


Figure 7. Localisation générale des régions et des zones d'étude

### 1.6.1. Première zone : Djelfa

#### 1.6.1.1 Situation générale

La forêt domaniale «Senalba chergui» représente une petite partie de tout un ensemble forestier et pastoral des monts de Ouled Naïl<sup>1</sup> (Atlas saharien) où elle occupe les collines montagneuses sur une superficie de 19000 hectares. Située au Nord-Ouest de la ville de Djelfa, elle occupe le dernier rempart contre le désert.

La végétation est dominée par trois essences, le pin d'Alep qui forme de très belles futaies, le chêne vert qui se mélange en sous-bois et le genévrier disséminé sur les crêtes au sol érodé. Cependant, ce sont les formations forestières basses de type matorral qui occupent la moitié de la surface.

Les espèces qui composent ces formations sont représentées par le chêne vert (*Quercus ilex*), le genévrier oxycèdre (*Juniperus oxycedrus*), le genévrier de Phénicie (*Juniperus phoenicia*), le pistachier lentisque (*pistacia lentiscus*), la filaire à feuilles étroites (*Phillyrea angustifolia*), l'ergot de coq (*Crataegus monogyna*), le romarin (*Rosmarinus officinalis*), les cistes (*Cistus ssp*) et les genets (*Genista ssp*). La strate herbacée est souvent constituée d'alfa (*Stipa tenacissima*) et plusieurs espèces de graminées.

#### 1.6.1.2. Relief et hydrographie

La forêt est située sur les collines et les hauts plateaux de l'Atlas Saharien. Elle occupe deux crêtes principales, respectivement le djebel Sénalba Chergui orienté Sud-Ouest, d'une longueur de 17 km et le djebel Haouas, orienté Nord-Est, d'une longueur de 20 km. L'altitude est comprise entre 1200 et 1492m.

Ces deux crêtes descendent en pentes douces au Sud, abruptes au Nord vers les hautes plaines. Il existe une série de crêtes secondaires mais elles sont moins accentuées. Le réseau hydrographique est constitué de nombreuses chabets déversant dans trois directions essentielles :

- Ouest-Est : Pour alimenter Oued Djelfa.
- Est-Ouest : Pour alimenter l'Oued Oumerdjanie.
- Sud-Nord : Pour alimenter l'Oued El Meguesmat et l'Oued Amgar.

---

<sup>1</sup> Dans les études de la végétation forestière, ces monts sont intégrés à l'Algérie occidentale [Letreuch, 1991].

### 1.6.1.3. Géomorphologie

L'ensemble du massif de Sénalba Chergui date du Crétacé. Dans ce synclinal de Djelfa, deux formations du quaternaire ont été remarquées : les formations du quaternaire moyen et les formations du quaternaire récent [B.N.E.F, 1983] :

**Quaternaire moyen** : Cet étage est formé de deux types de glacis.

*Glacis d'érosion* qui est recouvert par un matériau détritique assez grossier d'origine essentiellement colluviale à croûte lamellaire et les glacis d'érosion qui est recouvert d'un matériau détritique plus au moins grossier d'origine essentiellement colluviale.

*Glacis de dénudation* qui est couvert de matériau détritique très réduit.

**Quaternaire récent** : Il est caractérisé par les formations suivantes :

*Terrasses* constituées d'alluvions récentes à textures grossières à moyennes localisées sur les berges d'oueds.

*Formation éolienne* qui recouvre les terrasses anciennes.

### 1.6.1.4. Les sols

Dans les étages semi-arides des pinèdes de l'atlas saharien, les formations végétales recouvrent de nombreux types de sols appartenant aux unités suivantes :

*Les sols peu évolués* : se localisent le long des Oueds sur les terrasses récentes provenant de l'alluvionnement ; la texture est généralement sableuse à sablonneux-limoneuse.

*Les sols calcimagnésiques* : Cette série prend naissance sur les calcaires et comprend notamment les rendzines, les sols bruns calcaires avec ou sans encroûtement.

*Les rendzines* : sont situées sous les peuplements de Pin d'Alep à Romarin et Chêne vert rabougri ; l'alfa est fréquent. Ces sols sont peu profonds à profonds.

### 1.6.1.5. Le climat

La zone d'étude est une forêt pré-stéppique évoluant dans un contexte aride. Elle représente de ce fait un noyau semi-aride. Les synthèses climatiques affirment cette réalité<sup>2</sup>.

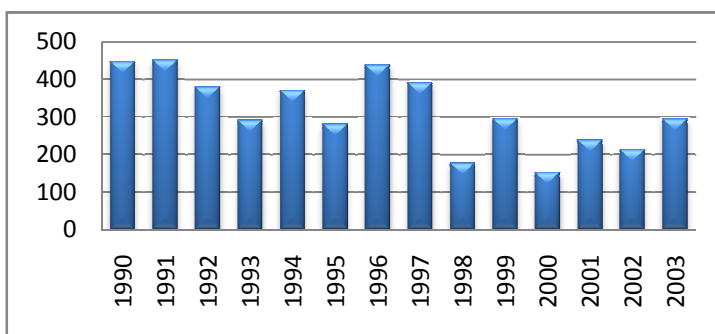
<sup>2</sup> Les données utilisées sont recueillies auprès de la station météorologique de l'ONM de Djelfa et sont relatives à la période 1990-2003 (voire les données complémentaires en annexe4).

**Tableau 3. Moyennes des températures mensuelles maximales et minimales (1990-2003)**

Mois	Températures (°C)			Précipitations P (mm)
	M	m	(M+m)/2	
Janvier	9,47	<b>00,37</b>	04,92	<b>48,23</b>
Février	12,05	01,30	06,47	34,02
Mars	15,49	03,45	09,47	27,01
Avril	16,62	05,50	11,06	30,32
Mai	23,85	10,52	17,18	34,32
Juin	30,22	15,37	22,79	15,07
Juillet	<b>33,69</b>	18,08	26,02	<b>06,78</b>
Août	33,12	18,03	25,57	17,92
Septembre	27,42	14,25	20,83	35,75
Octobre	21,31	09,62	15,46	28,22
Novembre	14,69	04,83	09,76	21,35
Décembre	10,79	08,55	09,67	27,34

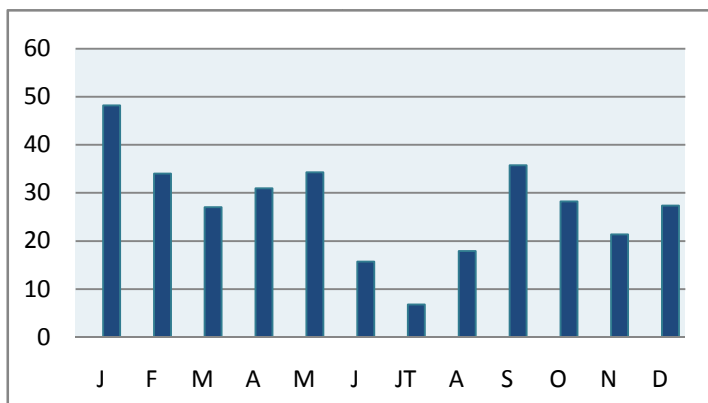
Source : ONM Djelfa, 2004.

#### a). Les précipitations



**Figure 8. Répartition des précipitations moyennes annuelles (1990-2003).**

2003) (Fig.8) fait ressortir un ensemble d'années sèches et humides par rapport à la



**Figure 9. Précipitations moyennes mensuelles (1990-2003)**

Les précipitations prennent plusieurs formes (pluie, neiges, brouillard .etc.). Mais c'est la répartition des pluies au cours de l'année qui est la plus importante (Tab.3).

L'analyse de la variation interannuelle des précipitations moyennes de la série (1990-

moyenne qui est de 326.3mm. L'année 1991 est la plus pluvieuse (451,5mm) alors que l'année 2000 et la plus sèche avec 152,2mm.

L'examen des histogrammes (Fig.9) montre une diminution des pluies de janvier à juillet puis une



augmentation jusqu'à décembre. Le mois le plus pluvieux est Janvier avec **48,23mm** et le mois le plus sec est Juillet avec **6,78mm**.

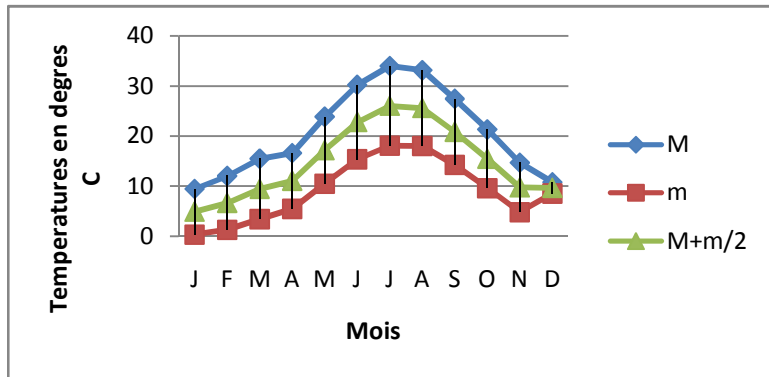
### b). Températures

L'hiver à Djelfa est rigoureux. La température de l'air descend souvent au dessous de zéro. En été, la région est

favorisée par l'altitude et ne connaît pas les chaleurs torrides du Sahara. Cependant, au mois de Juillet et Août la température peut atteindre

35°C à 40°C vers le milieu de la journée. L'analyse des

données montre que la température moyenne du mois le plus chaud (M) est observée en juillet avec **33,69 C°** alors que la température moyenne du mois le plus froid (m) est observée en janvier avec une valeur **0,37°C**.



**Figure 10. Variation des températures moyennes mensuelles de la période 1990-2003.**

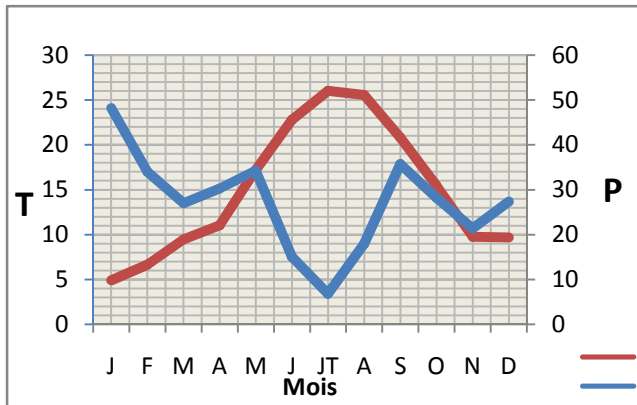
### c). Synthèse bioclimatique

Deux méthodes sont souvent utilisées pour caractériser le climat de la région méditerranéenne, le diagramme ombrothermique de Bagnouls et Gausson et le quotient pluviométrique d'Emberger.

#### ✓ Diagramme ombrothermique

Les diagrammes ombrothermiques de Bagnouls et Gausson permettent de comparer l'évolution des valeurs des températures et des précipitations. À ce sujet, Emberger précise : « un climat peut être météorologiquement méditerranéen, posséder la courbe pluviométrique méditerranéenne caractéristique, sans l'être écologiquement ni biologiquement, si la sécheresse estivale n'est pas accentuée » [Benabadji et Bouazza, 2000].

La méthode considère qu'un mois est sec quand le total des précipitations **P** exprimées en (mm) est égal ou inférieur au double de la température **T** exprimée en degrés Celsius.



**Figure 11. Diagramme Ombrothermique de la station de Djelfa (1990-2003)**

Le diagramme Ombrothermique (Fig.11) montre que la zone d'étude est caractérisée par deux périodes : une période sèche et estivale de 5 mois qui va de Mai jusqu'à Septembre et une période pluvieuse et froide qui s'étale de la fin du mois de Septembre jusqu'à la fin du mois d'avril.

✓ *Quotient pluviothermique et Climagramme d'Emberger*

La formule du quotient pluviométrique établie par Emberger en 1955 est la suivante :

$$Q = \frac{1000P}{\frac{(M+m)}{2}(M-m)} = \frac{2000P}{(M^2 - m^2)}$$

**P** : moyenne des précipitations annuelles [mm].

**M** : moyenne des températures maximales du mois le plus chaud en degré Kelvin.

**m** : moyenne des températures minimales du mois le plus froid en degré Kelvin.

**M+m/2** : température moyenne annuelle en degré Kelvin.

**M-m** : l'écart de la température en degré Kelvin.

L'emplacement de la station de Djelfa sur le climagramme d'Emberger a été déterminé au moyen de la formule simplifiée de Stewart où M et m sont exprimés en degrés Celsius.

$$Q_2 = 3,43 \frac{P}{(M-m)} = 33.27$$

La localisation de la station sur le climagramme d'Emberger montre que la forêt Sénalba Chergui est située dans l'étage bioclimatique semi-aride inférieur à hiver frais (Fig. 15).

**1.6.2. Deuxième zone : Mascara**

*1.6.2.1. Situation générale:*

De forme anticlinale, La forêt domaniale de Moulay Smaïl (réserve de chasse de Mascara) sépare deux synclinaux qui forment à l'ouest la plaine d'Oued Tlélât et à l'ouest la plaine de l'habra. Elle est située à environ 63 Km de la ville de Mascara et à 11 Km de la ville de Sig.

Administrativement, la forêt appartient à la commune d'Oggaz (Daïra de Sig). De forme allongée, elle s'étend de la route nationale n°04 au sud jusqu'aux salines d'Arzew et la zone humide de la Mactaa au Nord–Est. Elle couvre une superficie de 6530 hectares répartis en trois cantons.

### 1.6.2.2. Aperçu historique

C'est une forêt de plaine qui constitue avec la zone humide de la 'Mactaa' un ensemble écologique de très grande valeur environnementale. A cette grande valeur naturelle vient s'ajouter une grande valeur historique puisque la zone a abrité la célèbre bataille de la Macta entre les troupes de l'Emir AbdelKader et l'armée coloniale française.

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.

### 1.6.2.3. La végétation

**Le Canton la mare d'eau** (2920 ha) est occupé essentiellement par deux formations végétales: Peuplement artificiel de pin d'Alep (*Pinus Halepensis* Mill). ; Groupement végétal à base d'olivier sauvage (*Olea europaea ssp sylvestris* L) et de lentisque (*Pistacia lentiscus* L).

**Le Canton Djebel Djira** (1400 ha) 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'armoïse.

**Le Canton Ras Karoun** (2210 ha) 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'armoïse.

D'après les données fournies par l'administration, l'occupation du sol de la totalité de la forêt se présente comme suit:

Terrains boisés	: 30% soit 1960 ha
Terrains non boisés	: 60% soit 3920 ha
Terrains nus	: 10% soit 0650 ha

#### 1.6.2.4. Géomorphologie

Une grande partie du canton Ras-karoun est assise sur un substratum calcaire constitué par des dépôts continentaux lacustres. Le canton 'la mare d'eau' est constitué de trois formations géologiques, les marnes sableuses et les grés tendres fossilifères, les marnes gréseuses rouges et enfin les alluvions. Le canton Djira est constitué essentiellement de calcaires gréseux. Les rendzines sont rencontrées un peu partout.

Les sols gypseux rendziniformes se forment sur le gypse et les marnes gypseuses et se caractérisent par une teneur importante en salinité, une faible humidité mais ne sont pas caillouteux (Djira et Mare d'eau). Les regosols rencontrés dans le canton la mare d'eau, se caractérisent par une faible teneur en humus et une grande friabilité. Les sols bruns calcaires peu profonds, sont rencontrés sur des pentes moyennes à fortes souvent sur une croûte calcaire.

#### 1.6.2.5. Le climat

Faute de station météorologique dans la réserve de chasse de Mascara, les données climatiques de la station de Sig distante de 10 Km ont été utilisées. Ces données concernent la période 1996-2005 et sont synthétisées dans le tableau suivant (Tab 4) :

**Tableau 4. Températures et précipitations moyennes mensuelles de la période 1996-2005**

Mois	Températures (°C)			Précipitations P (mm)
	M	m	(M+m)/2	
Janvier	19.10	07.40	13.25	48.70
Février	16.30	06.50	11.40	40.10
Mars	19.80	08.50	14.15	45.30
Avril	22.60	10.40	16.50	37.50
Mai	25.70	12.60	19.15	19.00
Juin	31.10	18.70	24.90	07.80
Juillet	32.30	19.00	25.85	02.50
Août	<b>32.70</b>	19.10	25.90	01.20
Septembre	28.40	16.90	22.65	23.70
Octobre	25.30	13.80	19.55	26.90
Novembre	22.70	09.30	16.00	37.30
Décembre	17.40	<b>06.20</b>	11.80	32.50

Les Principales Caractéristiques climatiques sont :

- ✓ Précipitations moyennes annuelles : P= 322.5 mm/an
- ✓ Température maximale moyenne annuelle M = 32.7°C
- ✓ Température minimale moyenne annuelle m= 6.2 °C
- ✓ Neige = 0 jours/an

- ✓ Grêle = 2 à 3 jours/an
- ✓ Vent : les vents dominants proviennent du Nord-Ouest et Est-Ouest au courant des mois d'Octobre, Novembre et février.
- ✓ Sirocco : mois de Juillet et Août, dure de 5 à 6 jours par an.
- ✓ Gelées : hivernales mais rares, dure de 2 à 3 jours par an.

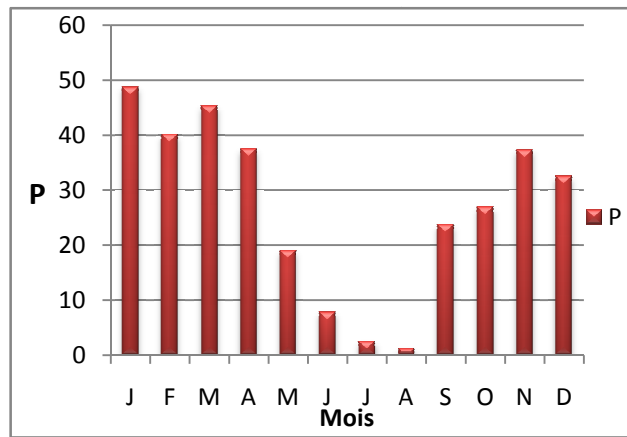


Figure 12. Répartition des précipitations moyennes mensuelles de la période 1996-2005

**- Quotient pluviométrique d'Emberger**

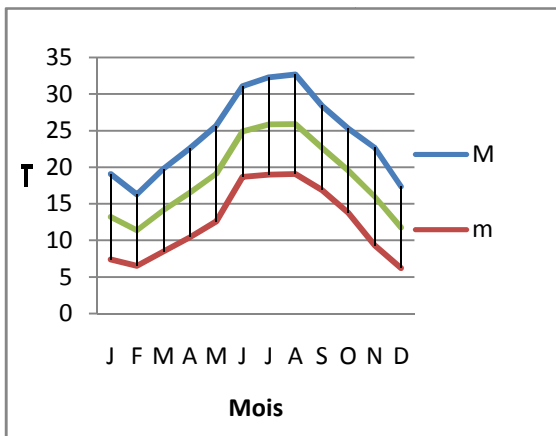


Figure 13. Variation des températures moyennes mensuelles de la période (1996-2005)

La formule simplifiée par Stewart a servi pour déterminer l'emplacement de la station sur le climagramme d'Emberger.

$$Q_2 = 3,43 \frac{P}{(M-m)} = 42.38$$

Le rapport de cet indice sur le climagramme d'Emberger montre que la Réserve de Chasse de Mascara est située dans l'étage bioclimatique semi-aride à hiver tempéré (Fig.15).

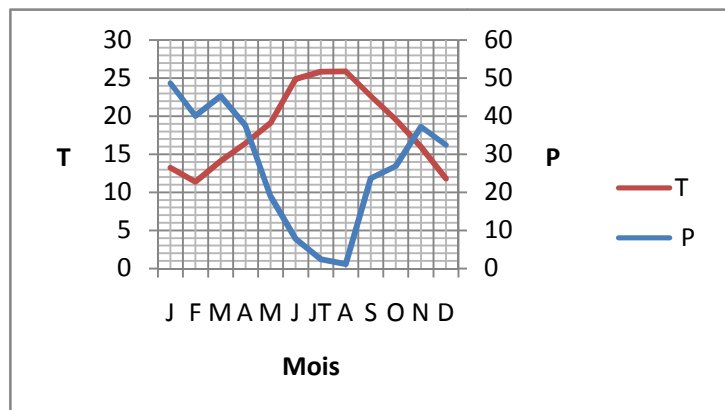


Figure 14. Diagramme Ombrothermique de la station de Sig (1996-2005)

### 1.6.3. Troisième zone : forêt domaniale de Tlemcen

La forêt domaniale suburbaine de Tlemcen est un boisement pur de pin d'Alep (*Pinus Halepensis* Mill) datant de 1890. Elle est localisée en amont de la ville de Tlemcen à une altitude moyenne de 1023 m. Son sous bois est caractérisé par la présence du genévrier oxycédere (*Juniperus oxycedrus* L), de l'asperge (*Asparagus acutifolius* L), du doum (*Ampelodesma mauritanica* L), du chêne vert (*Quercus ilex* L), du genêt épineux (*Calycotome spinosa* L) et du palmier nain (*Chamaerops humilis* L).

Généralement, elle présente une homogénéité topographique à l'exception de sa partie nord où nous assistons à un changement de relief et où la pente est de 25% et plus. C'est un des noyaux sub-humides inférieurs d'une région à ambiance climatique semi-aride. Aime [1999] [in Quezel, 2000] a intégré cette zone dans le semi-aride supérieur mais globalement, il n'y a pas une unanimité sur l'appartenance de la forêt de Tlemcen<sup>3</sup> à cet étage.

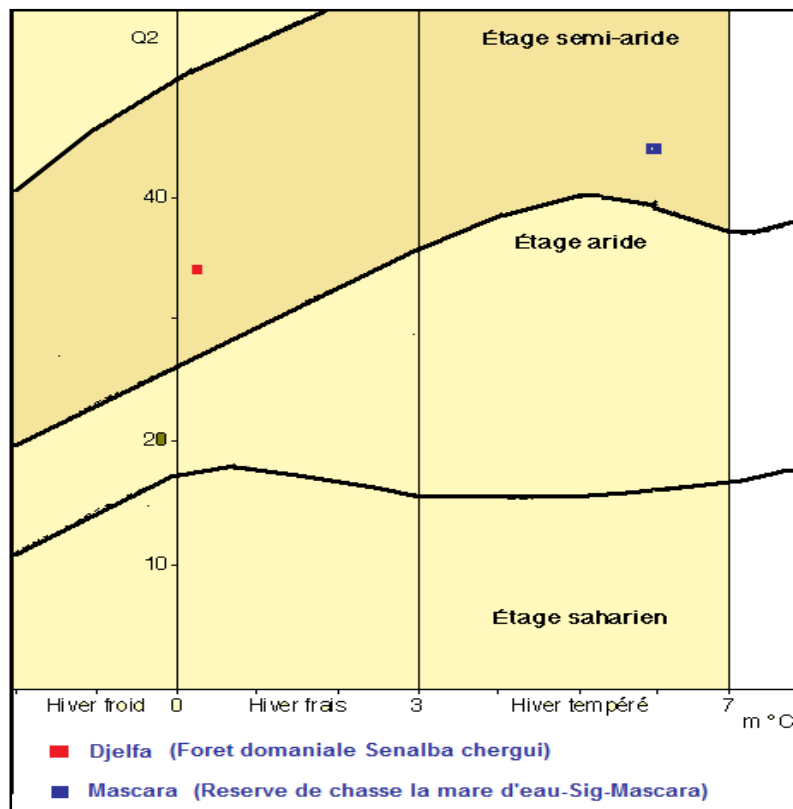


Figure 15. Localisation des zones d'étude sur le climagramme d'Emberger

<sup>3</sup> Le choix de cette zone ne signifie en aucune manière que la zone est semi-aride mais se justifie par la présence d'un peuplement pur de pin d'Alep, essence résineuse typique des zones semi-arides et de loin la plus dominante en surface. En plus, la méthodologie d'estimation du volume-tige de cette forêt est reproductible ailleurs, puisque techniquement elle n'est pas dépendante du climat.

## *Chapitre deuxième*

### *Approche méthodologique de cartographie et prédétermination des peuplements forestiers et leurs potentialités de production*

#### **2.1. Cartographie des peuplements forestiers**

L'espace forestier du Nord-Ouest algérien et les formations végétales qui s'y rattachent sont des paysages complexes à l'aspect intercalaire et graduel. Les vues à partir de l'espace ne sont pas donc les mêmes que les perspectives plus détaillées des organismes responsables de l'aménagement des forêts. **Pourtant, l'intégration de la télédétection dans le processus de gestion et de cartographie des ressources forestières de cette région permettrait de créer des scénarii d'aménagement, de développement et d'impacts environnementaux.**

Certes, les différents types de formations végétales représentent les principaux objets géographiques qu'il faudra identifier sur l'image satellitaire. Mais en ce qui concerne l'avenir du traitement numérique d'images, la recherche devrait porter sur la détermination de marches à suivre spécifiques à des problématiques données en profitant des algorithmes développés [Caloz et Pointet, 2003].

#### **2.2. Problème de cartographie et de délimitation de milieux hétérogènes**

L'étude du peuplement forestier en zones semi-arides se heurte fréquemment à des difficultés pratiques telles que la délimitation malaisée entre zones homogènes et non-homogènes [Grim, 1989]. Les forêts y sont souvent imbriquées avec diverses formations basses et il en résulte que l'information ramenée du terrain est insuffisante en ce qui concerne les limites et la physionomie et doit être complétée par les techniques de la télédétection [Ozenda, 1986].

Cette notion d'hétérogénéité doit être perçue en fonction du niveau d'observation puisque des classes peuvent être hétérogènes pour un niveau fin mais homogènes à un niveau plus élevé [Ducrot, 2005]. La basse résolution spatiale permet de réaliser une moyenne des réflectances à l'intérieur d'un pixel, donnant ainsi une signature spectrale propre à certains espaces hétérogènes ce qui n'est pas le cas des données TM et SPOT où cet effet de moyenne ne se produit plus [Bonn *et al.* 1989]. Les classifications par pixel

présenteront alors de nombreuses confusions et les résultats sont assez moyens [Guish, 2004 ; Puech, 2000].

Des analyses basées sur la texture offrent des possibilités pour caractériser l'hétérogénéité structurale des classes. Mais pour les couverts forestiers fermés et au delà d'une résolution de 10-15 mètres, les images ne contiennent quasiment plus d'information texturale. Par contre, pour les boisements lâches, l'organisation du couvert donne naissance à une structure qui semble être appréhendée à partir d'indicateurs de texture et ceci même lorsque la résolution est de l'ordre de 20 mètres [Durrieu, 1994].

Globalement, le contenu textural des images SPOT et Landsat est pauvre et seule l'information radiométrique est intéressante. Cependant et en ce qui concerne notre contexte d'étude, ce type d'images semble prometteur pour contribuer à la cartographie des états de surface de milieux hétérogènes. En effet, la résolution moyenne (20 et 30 mètres) homogénéise les informations et facilite l'interprétation de formations très hétérogènes spatialement et spectralement [Chamignon, 1990].

### 2.3. Classification de la végétation naturelle

Les diverses méthodes d'études de la végétation ont conduit à définir un grand nombre de groupements végétaux qu'il fallait classifier. En fonction des critères qui ont servi à définir ces groupements, on peut distinguer les classifications physiologiques, écologiques, dynamiques, climatiques et floristiques.

Mais, la couverture végétale du sol est l'aspect physique du terrain et 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, 1989]. La notion de formation<sup>1</sup> végétale était essentiellement physiologique, indépendante de la composition floristique.

Godron *et al.* [1968] définissent une typologie physiologique où chaque unité est définie par sa stratification verticale et par le recouvrement de chacune des strates. On distingue dans cette typologie : Ligneux hauts, Ligneux bas, Ligneux très Bas et Herbacées avec une indication sur la nature du substrat affleurant et/ou de l'espèce ligneuse dominante.

---

<sup>1</sup> Le terme formation est substitué souvent par " types de végétation" pour désigner les aspects physiologiques de la végétation.



La classification de Payette et Gauthier (1972) est d'un intérêt universel [Maire, 1989] : elle repose sur la qualification physionomique de la strate dominante et de la strate sous-dominante et distingue quatre types de strates<sup>2</sup> :

- Trois strates arborescentes: haute pour les arbres dépassant 20 mètres de hauteur, moyenne pour les arbres entre 10 et 20 m de hauteur, basse pour les arbres entre 5 et 10 m de hauteur;
- Deux strates arbustives: haute pour les arbustes entre 2,5 et 5 m de hauteur, basse pour les arbustes inférieurs à 2,5 m de hauteur;
- Deux strates herbacées : haute pour les herbacés dépassants 0,6 m, basse pour celles comprises entre le niveau du sol et 0,6 m;
- Une strate dite muscinale, concernant le tapis de mousses et de lichens.

En ce qui concerne la végétation naturelle méditerranéenne, la classification est essentiellement physionomique. L'institution "plan bleu" en France propose, à titre d'exemple, la liste typologique suivante [Boisvert et al. 1997]:

- Forêt dense, équilibrée, comprenant des arbres de toutes les classes d'âge ;
- Forêt dense, mais mal équilibrée, avec une classe très prédominante (forêt pouvant être issue de plantation, de taillis, ou de repousse après incendie) ;
- Forêt claire sur matorral, maquis, garrigue, lande ou steppe ;
- Matorral, maquis ou garrigue continu (ou peu discontinu) et bas ;
- Lande ou steppe arbustive, avec éventuellement quelques arbres isolés ;
- Lande ou steppe continue et rase ;
- Lande ou steppe en « peau de léopard » ;
- Sol nu.

La classification synthétisée par Fennane [2006] exprime mieux les types de végétation rencontrés en zones semi-arides de l'ouest d'Algérie. Elle distingue deux grandes catégories, les formations arborées et les formations arbustives :

**Formations arborées**, Présence d'arbres (hauteur > 5 m) dont l'abondance dépasse un certain seuil : 1 pied par hectare ? La classification de ces formations peut se faire suivant des critères phytosociologiques (associations végétales), dynamiques (séries de végétation) ou physionomiques.

*-Forêts ; - Matorrals arborés ; - Ermes arborés ; - Steppes arborées*

**Formations arbustives**, Présence d'arbustes et/ou d'arbrisseaux plus ou moins denses (recouvrement total > 5% ?) ; arbres absents ou très espacés, moins de 1 pied par hectare ? Comme pour les formations arborées, les types d'habitats liés à ces formations ne peuvent être actuellement distingués que sur des bases physionomiques.

*-Matorrals ; - Ermes arbustifs ; - Steppes arbustives ; - Steppes ligneuses ; -Steppes à halophytes*

<sup>2</sup> D'un point de vue terminologique, la strate dominante donne le nom générique au type de structure tandis que la strate sous-dominante complète cette première dénomination en la précisant.

Mais la physionomie de ces formations végétales est très liée à leur structure spatiale qui est très complexe rendant difficile la distinction entre le maquis, la garrigue et la broussaille et seuls les paramètres hauteur, densité de couvert et la composition en essences peuvent aider à identifier ces formations transitoires. Par conséquent, une norme devrait être établie pour les deux premiers paramètres essentiellement.

A cet effet, **Schönfelder et Schönfelder [1988]**, dans leur guide de la flore méditerranéenne, désignent par maquis, toutes les colonies constituées de grand arbustes sempervirents de 2 à 5 mètres de hauteur et par garrigue, les arbustes et sous arbrisseaux moins élevés inférieurs à 1,5 mètres. Dans son étude sur les formations basses du Nord-ouest algérien, **Benabdelli [1996]** adopte les normes suivantes : Matorral élevé ( $h > 2m$ ) ; Matorral moyen ( $0.60m > h < 2m$ ) ; Matorral bas ( $h < 0.60m$ ). Ces formations seront denses quand le recouvrement est supérieur à 75%, clairs lorsqu'il est entre 50 et 75% et enfin très clairs lorsqu'il est entre 25 et 50%.

#### 2.4. Classifications des images satellitaires

L'objectif de la classification est de produire des généralisations spatialement explicite montrant les classes individuelles sélectionnées représenter les différents niveaux d'organisation de la forêt. Parmi toutes les méthodes disponibles pour extraire de l'information des données satellitaires, les classifications sont de loin les mieux placées pour une méthodologie standard [**Steven, 2001**].

D'après **Estiva et al. [1998]**, le positionnement dans l'espace radiométrique, des strates arborée, arbustive et herbacées est possible. Par conséquent, les méthodes de classifications qui consistent en une partition de l'espace radiométrique en affectant chaque pixel à la classe dans laquelle sa radiométrie le positionne seraient capables d'hiérarchiser l'espace spectral en un certain nombre de classes spectrales, correspondant respectivement aux strates forêt, matorral arboré, matorral, herbacées.

Les classes dans ce schéma doivent être définies par leurs caractéristiques terrains afin que les produits de la classification soient utiles. Mais en regard des types de classes sélectionnés, l'expérience a montré que le schéma de classification doit être développé avec l'implication totale des intérêts d'au moins deux collaborateurs : les générateurs des produits de la classification et les utilisateurs de ces produits. Occasionnellement les deux groupes représentent la même personne mais fréquemment les utilisateurs ne sont pas impliqués dans le processus de classification [**Steven, 2001**].

Exiger l'entrée de l'utilisateur dès le début du processus aidera certainement à générer des produits plus utilisables, demander l'avis de l'utilisateur seulement pour évaluer le produit final est une mauvaise option. Les unités de la classification peuvent ne pas coïncider avec les unités cartographiables mais le lien entre classification et cartographie est très fort. L'application de la télédétection implique la mise au point d'une liste typologique qui prend en compte les possibilités de discrimination des différents types par les méthodes de télédétection.

Une typologie simplifiée est établie dans cette étude (Tableau 5) pour concilier la réalité terrain et les potentialités de la télédétection de moyenne résolution spatiale, en prenant en compte les trois traits physiologiques majeurs, la hauteur, la densité de couvert et la composition en essences dominantes. C'est une classification à quatre niveaux. Le type "forêt" désigne dans tous les cas, les peuplements feuillus ou résineux, ainsi que les taillis bienvenants de plus de 5 mètres de hauteur et de densité de couvert de la strate arborée supérieur à 10%, alors que les vides indiquent une absence ou une rareté de végétation.

**Tableau 5. Nomenclature simplifiée des différents niveaux de classifications utilisés**

Niveau I	Niveau II	Niveau III	Niveau IV
<b>1. Forêt</b>	1.1. Forêt dense 1.2. Forêt claire	1.1.1. Forêt dense + essence dominante probable 1.2.1. Forêt claire + essence dominante probable	1.1.1.1 Forêt dense + essence dominante réelle. 1.2.1.1. Forêt claire + essence dominante réelle
<b>2. Matorral</b>	2.1. Matorral haut dense 2.2 Matorral haut clair 2.3. matorral bas dense 2.4. Matorral bas clair	2.1.1. Matorral haut dense + essence dominante probable 2.2.1 Matorral haut clair + essence dominante probable 2.3.1. matorral bas dense + essence dominante probable 2.4.1. Matorral bas clair + essence dominante probable	2.1.1.1. Matorral haut dense + essence dominante réelle 2.2.1.1 Matorral haut clair + essence dominante réelle 2.3.1.1 matorral bas dense + essence dominante réelle 2.4.1.1. Matorral bas clair + essence dominante réelle
<b>3. Herbacées</b>	3.1. Herbacées	3.1.1. Herbacées	3.1.1.1. Herbacées
<b>4. Vides</b>	4.1. Vides	4.1.1. Vides	4.1.1.1. Vides

Dans le premier niveau, le type matorral désigne, le maquis, la garrigue et les taillis dégradés. Dans le deuxième niveau, des sous-types comme le matorral arboré (matorral haut) et le matorral bas distinguent les différentes formations en hauteur. En leur affectant le critère densité de couvert, elles seront définies, en plus, par ce dernier. Dans le troisième

niveau, les différents types seront définies par l'essence (ou les essences) dominante probable qui leur correspondrait. Enfin, dans le quatrième niveau, la classification sera affinée par l'affectation à chaque type, de l'essence (ou les essences) dominante réelle. Seront considérés comme denses les couverts entre 70 et 100%, et clairs, entre 10 et 70%.

## 2.5. Analyse des données de la télédétection

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<sup>3</sup>.

### 2.5.1. Définition des besoins

Le paysage forestier semi-aride est régulièrement soumis à des changements qui affectent autant sa physionomie que sa composition floristique. Devant l'ampleur du changement, les données forestières contenues dans les procès verbaux d'aménagement forestier ont perdu de leur fiabilité.

L'urgence est d'établir un état des lieux actualisé le plus rapidement possible et de manière que son actualisation régulière soit possible. Ceci garantirait un suivi et une surveillance de près. Le moyen le plus efficace pour accomplir cette tâche et qui soit disponible à un coût très bas est sans aucun doute l'interprétation des images satellitaires.

### 2.5.2. Collecte des données

Les observations de terrain, les mesures, les cartes et rapports existants sont exploités conjointement avec les données de télédétection. La définition des données et l'analyse des matériels existants aident à l'identification de besoins en données nouvelles, donc manquantes à rassembler. **Les contrôles de terrain sont un élément indispensable et complémentaire aux techniques de télédétection.**

---

<sup>3</sup> 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 [Aronoff, 1989] in [Estiva et Puech, 1998].

### 2.5.3. Analyse des données

Dans l'application des méthodes de télédétection, on peut distinguer trois types différents d'analyse :

**Les mesures** : elles consistent en des valeurs déterminées par la détection pour l'évaluation des conditions de l'environnement (température de surface, degré d'humidité du sol, quantité de matériel végétal, condition des cultures);

**La classification** : des régions/unités homogènes, d'égales conditions et caractéristiques sont définies; le résultat apparaît habituellement sous forme d'aires délimitées (unités cartographiques). Des séries de particularités communes peuvent être regroupées en zones, autrement dit les mesures peuvent s'appliquer en fonction de la classification qui aura été adoptée;

**L'estimation** : elle est habituellement appliquée aux produits de la classification. La finalité est l'estimation de la quantité de matériel (la biomasse sur pied) en vue de subdiviser la zone en unités possédant statistiquement les mêmes caractéristiques. L'avantage de la télédétection est que l'on peut établir une "stratification" de la région et que l'on peut obtenir des estimations avec moins d'échantillonnages de terrain et donc à un coût moindre.

### 2.6. La dialectique objet/signal et signal/objet comme position de recherche

Pour interpréter les mesures de rayonnements teledéteçtées, il convient d'établir les relations entre les rayonnements et les objets dans une double démarche : de l'objet vers le signal enregistré de cet objet et, inversement, du signal vers l'objet. Cette double démarche est nécessaire du fait que les relations entre signal radiométrique et objet ne sont pas univoques. En effet, le pixel, surface élémentaire au sol enregistrée par le satellite est une sorte de boîte noire qui contient des informations variées :

✓ Il peut exister une complexité horizontale si plusieurs composants coexistant sur cette surface élémentaire sont très différents et contrastés radiométriquement. Par exemple, si un pixel de 30m x 30m contient un affleurement rocheux (composant minéral) entouré d'un bouquet d'arbres ou d'arbustes (composant à dominante végétale), ces éléments vont être intégrés dans un signal unique pondérant leur moyenne radiométrique.

- ✓ Un même type de couvert à détecter peut avoir plusieurs signatures spectrales suivant sa densité, son taux de recouvrement et son environnement. Par exemple, une futaie de pin d'Alep très claire (0,1 ou 0,2) induit verticalement une végétation ne recouvrant que 10 à 20% du sol. Le poids radiométrique du sol (ou du sous-bois) est donc important, sa constitution pouvant aller de la végétation arbustive à la végétation herbacée et de ce fait, la caractéristique de l'objet futaie très claire est difficile à appréhender.
- ✓ Il peut aussi y avoir une complexité temporelle : les caractéristiques d'un même composant végétal varient d'une saison à l'autre ; stade phénologique différent, état sanitaire fluctuant, développement sur un sol plus ou moins sec, humide.
- ✓ De même, un signal peut être identique pour plusieurs composants. Par exemple, une futaie très claire (couvert ligneux haut) peut avoir la même réponse spectrale qu'un matorral (végétation basse).

En conséquence, la télédétection doit résoudre un double équivoque : un composant peut correspondre à plusieurs signaux et un signal peut correspondre à plusieurs composants. Autrement dit, dans une même classe spectrale, on risque de rencontrer des thèmes différents alors qu'un même thème risque d'être rencontré dans plusieurs classes différentes [Bencherif, 2002]. La double démarche proposée s'attache à lever les ambiguïtés de cette polysémie, en particulier par l'introduction dans l'analyse radiométrique, des composants et du contexte géographique (situation et environnement des composants).

### **2.6.1. De l'objet géographique au signal : donner de la mesure à l'objet**

Les différents types de couverts rencontrés en zones forestières semi-arides représentent des objets caractérisés par une situation géographique et une sémantique. Ces objets sont captés sous forme de rayonnements par le satellite et perceptibles selon des contraintes de résolution spatiale et spectrale.

La télédétection permet de "donner de la mesure" à l'objet géographique dans ses dimensions spatiales : géométrie, taille, environnement et voisinage, distance statistique (mode raster) et dans ses dimensions physiques et chimiques par la radiométrie. La signature spectrale rend compte globalement de ces deux caractères de l'objet.

D'autre part, ce signal radiométrique est une information qu'il faut décoder, à laquelle il faut donner un sens qu'il soit d'identification en donnant un nom sémantique au signal, qu'il soit d'interprétation en donnant un sens géographique à un ensemble de signaux.

### 2.6.2. Les objets géographiques à détecter

Les objets géographiques se définissent par leurs localisations, leurs mesures géométriques et leurs dimensions sémantiques. Ils peuvent être complexes et constitués de composants qui ont entre eux des relations spatiales définies par une organisation spécifique. Deux catégories d'objets géographiques sont identifiées comme des indicateurs de l'organisation spatiale :

- Des objets associés à des états de surface : Pour caractériser les états de surface d'un espace forestier, celui-ci est segmenté en plusieurs états de surface correspondant à différents types physiologiques de la végétation. Une partie des traitements d'images portera sur la détection des frontières entre ces niveaux.
- Les objets associés à des faciès paysagers, considérés comme des **indicateurs environnementaux (des formes de vie)** sont révélateurs de l'état et des tendances d'évolution d'un territoire forestier. Parmi les indicateurs définis, certains sont plus particulièrement représentatifs des unités paysagères qui structurent l'espace. Ils constituent les objets géographiques à identifier sur les images.

#### 2.6.2.1. Distinction sémantique entre occupation du sol et état de surface

L'occupation du sol est une matérialisation spatiale des activités humaines dans l'espace géographique. L'interprète construit l'information sur l'occupation du sol à partir d'une réalité physique constatée. La télédétection permet uniquement de détecter des états de surface qui correspondent à un état physique. La cartographie de l'occupation du sol implique d'établir les relations entre les états de surface détectées et les objets géographiques (ou catégories d'occupation du sol) qu'on cherche à cartographier.

L'espace forestier peut être considéré comme un *continuum* où sont situés des éléments qui peuvent avoir des caractéristiques plus ou moins similaires et des relations spatiales spécifiques. Il est préférable d'étudier ces éléments dans un contexte spatial où

existe une similarité des facteurs physiques (pédologie, relief, microclimat..) et des facteurs dendrométriques (densité de couvert, hauteur, essences dominantes..). Dès lors, ces éléments, dans un même contexte physique et ecodendrométrique, forment des entités pour lesquels on peut faire l'hypothèse d'une physionomie et donc d'un comportement radiométrique similaire.

### **2.6.3. Du contenant au contenu : deux démarches complémentaires**

Dans la segmentation (qui est une fragmentation successive), les différenciations spatiales sont séparées par des limites de natures variées. La limite d'un objet est l'entourage de l'objet qui permet de le définir en tant qu'entité et de l'isoler des autres objets ; elle est l'interface entre deux objets et en ce sens elle représente le "**contenant**". L'approche par le "**contenu**" de l'objet géographique concerne plus particulièrement la détection de la composante dominante.

Cette double approche est complémentaire : - le "**contenant**", permet d'établir les relations de différence ou de ressemblance entre les objets géographiques, il permet aussi d'établir les relations entre niveaux spatiaux. En ce sens, il permet d'aborder l'analyse du "contenu" ; - le "**contenu**" détermine les composants de l'objet géographique et leur organisation spécifique, en ce sens il permet la délimitation du "contenant".

#### **2.6.3.1. Approche par le contenant**

L'hypothèse de départ est que l'espace forestier semi-aride de l'ouest algérien, de par sa nature hétérogène, comprend différents niveaux d'organisation dont chacun est un couvert végétal défini par ses caractéristiques, mais aussi par ses relations avec d'autres couverts inférieurs ou supérieurs. La définition de ces niveaux permet d'étudier les processus globaux et locaux, en allant du système supérieur au niveau d'analyse choisi et réciproquement, en passant par les niveaux intermédiaires nécessaires à l'explication.

Pour cette définition, il s'agit d'établir les caractères déterminant chaque niveau : La définition de ces niveaux spatiaux, considérés comme des "objets géographiques", s'appuie ici sur la segmentation spatiale à partir d'images satellitaires, utilisant l'approche de la classification. Une classification est un découpage spatial qui doit permettre, à un niveau choisi, de définir des ensembles de même physionomie et probablement de même fonctionnement.



- . ***La segmentation automatique du continuum géographique.***

Pour étudier un territoire sur une image satellitaire, la première idée est de découper l'espace en délimitant des ensembles perceptibles par leurs différenciations. Cette segmentation s'élabore selon deux approches :

- si les continuités spatiales sont perceptibles, on utilise la méthode globale qui va de l'ensemble à l'élément, du global au particulier par désagrégation de l'information image.
- si les continuités ne sont pas perceptibles, on utilise la méthode analytique qui va de l'élément à l'ensemble, du particulier au global par agrégation de l'information image.

Dans la pratique de la segmentation, interviennent explicitement ou implicitement des connaissances autres que celles apportées par l'imagerie satellitaire (connaissance du terrain, raisonnement personnel, relief...). Il existe une multiplicité de segmentation suivant les problématiques et toute segmentation comporte des biais ; aussi toute délimitation devra être validée par l'analyse des zones délimitées et des différenciations entre ces zones.

***2.6.3.2. Approche par le contenu***

Elle consiste en l'identification du contenu thématique. Elle comporte la partie de collecte d'informations sur le terrain (zones d'entraînements). A partir de l'analyse et de l'identification du contenu thématique, il convient de reconstruire et de spécifier l'organisation spatiale des types physiologiques. Cette reconstruction permettra de confirmer ou d'infirmier les limites de zones.

***2.6.3.3. Approche contenu-contenant***

Elle consiste à identifier simultanément le contenant et le contenu. Une telle approche est possible grâce aux analyses orientée objet d'images qui permettent d'identifier les objets géographiques non seulement en fonction de leur attributs spectraux mais en plus de leurs attributs spatiaux (texture, forme, connectivité..). Dans cette approche, le contenu est défini par segmentation alors que le contenant est défini par classification dirigée.

# *Quatrième partie*

*Applications*

*Développement d'une méthodologie*

# Chapitre premier

## *Cartographie physiologique de la végétation forestière par classifications d'images SPOT*

### 1.1. Problématique et objectifs

Les méthodes de classification ne se prêtent pas toutes à une application facile pour des situations forestières hétérogènes et confuses. Les classifications par pixel qui utilisent les zones d'entraînement ne sont pas toujours précises dans de tels milieux. Même la classification par la logique floue semble moins performante dans le cas d'objets ayant une grande similitude spectrale [Gomes *et al.* 2003]. Par conséquent, en l'absence d'échantillonnage de référence adaptée ou implicitement, dans le cas des dates éloignées dans le temps où ce renseignement n'est pas en général disponible [Ducrot, 2005], la classification ne peut être que non dirigée. À partir des classes radiométriques, l'idée est de parvenir à détecter des objets similaires afin de les regrouper<sup>1</sup>.

L'exemple de la classification ISODATA ou "Iterative Self-Organising Data Analysis Technique" est très intéressant: l'expression 'self-organising' décrit la manière avec laquelle sont ordonnées les classes inhérentes aux données. Les classes sont créées par la formule du minimum de distance qui partage l'espace forestier sur la base de leur réflectance qui est fonction des caractéristiques du peuplement forestier, principalement, sa densité, sa hauteur et sa composition en essences.

Ceci conduit à penser que les classes, à priori inconnues, obtenues à l'issue des classifications non dirigées peuvent se prêter à une interprétation automatique si des relations entre critères dendrométriques<sup>2</sup> et classes spectrales sont mises en évidence. Ce sera une étape exploratoire permettant de constituer des ensembles homogènes d'où il

---

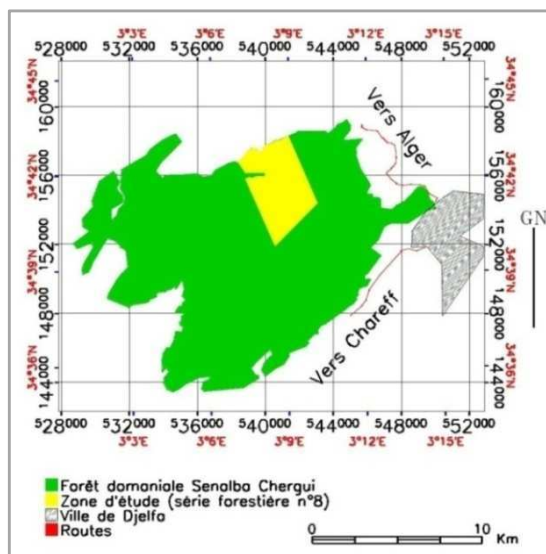
<sup>1</sup> Typiquement, un regroupement sera jugé satisfaisant si on obtient en sortie de la méthode des groupes d'objets homogènes (c'est-à-dire possédant des objets les plus similaires possibles) qui sont les plus hétérogènes possibles entre eux [Beck, 2006].

<sup>2</sup> Il a été démontré que la résolution spatiale optimale pour la majorité des classes forestières se situe entre 5 et 20 mètres et est déterminée beaucoup plus par les caractéristiques spatiales (hauteur, densité et organisation des peuplements) que par la composition en essences qui joue un rôle secondaire [Marceau *et al.* 1994].

est possible de sélectionner des sites d'entraînement pour cartographier des unités physionomiques définies par l'essence dominante.

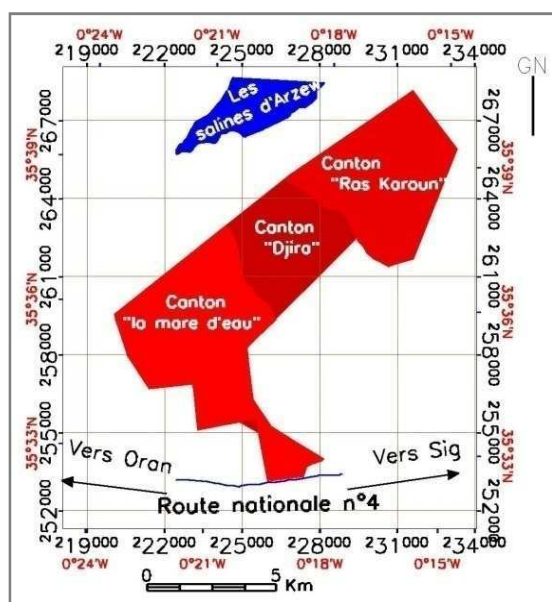
### 1.2. Les zones d'études

La huitième série forestière (forêt domaniale Senalba-chergui) est la première zone retenue (Fig.16). Elle représente un espace recouvrant des situations forestières variées : forêt résineuse de pin d'Alep, matorral arboré à genévrier oxycèdre et chêne vert, matorral à romarin, herbacées à alfa et des vides. Elle est située à environ 15 km au Nord-ouest de la ville de Djelfa. Sa superficie est de 196.5 ha et compte 39 parcelles d'une superficie moyenne de 38.4 hectares.



**Figure 16. Carte de situation de la série VIII, forêt senalba - Djelfa**

Le relief est assez doux, caractérisé par une zone plate au sud et au centre et une zone plus ou moins accidentée au nord. Les pentes les plus fréquentes sont des pentes faibles à moyenne, variant entre 5 et 20%, d'où un relief peu accidenté. Elle est exposée dans sa plus grande partie au Nord-ouest (25.1%), au Sud (23.8%) et au Sud-est (14.2%).



**Figure 17. Carte de situation de la forêt Moulay Ismail de Sig-Mascara.**

La seconde zone retenue est la réserve de chasse 'Moulay Ismail' de Sig (Fig.17). C'est une forêt de plaine où les formations rencontrées font parties des formations d'arbustes thermo et méso-méditerranéen. Pour complément d'information, certaines définitions concernant ces formations sont données dans l'encadré ci-dessous [d'après Rameau *et al.* 1996].

**1. Les fruticées à Oliviers et Lentisques:** Habituellement fruticées pluri-spécifiques dans lesquelles *oléa europaea subsp*, accompagné de *Pistacia lentiscus* joue un rôle physiologique 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 calycotome :** Formations thermo-méditerranéennes physiologiquement 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 subs.sylvestris*, *ceratonia siliqua*, *pisatcia lentiscus*

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

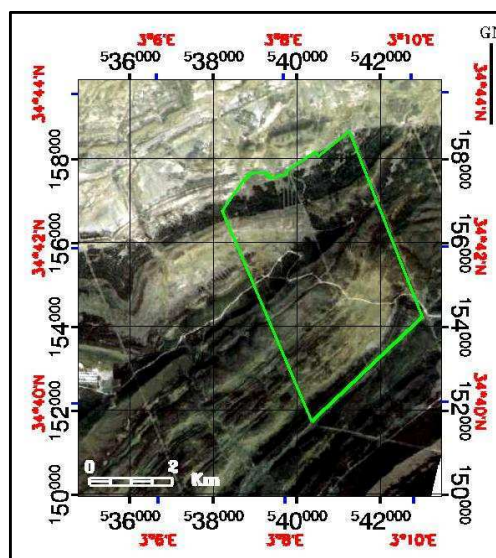
**5 Matorral à pin :** Fruticées et buissons sclérophylles méditerranéens et sub-méditerranéen dotés de pins.

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

### 1.3. Données satellitaires et dendrométriques

#### 1.3.1. Données satellitaires<sup>3</sup>

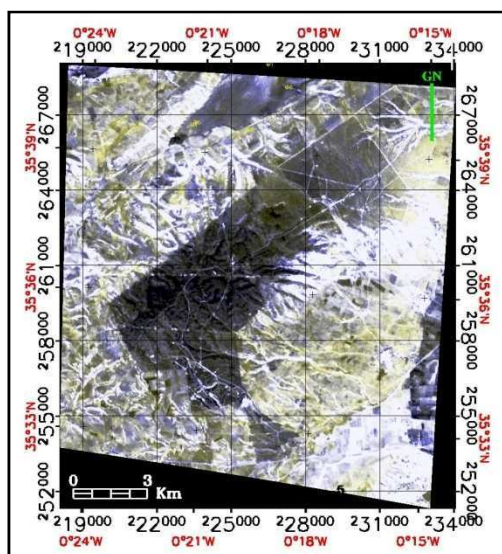
Une image SPOT multispectrale acquise le 23 Juin 1988 a été utilisée<sup>4</sup> (Fig. 18). La carte topographique (feuille n°341 de Djelfa) à l'échelle 1/50000, la carte d'aménagement forestier à l'échelle 1/25000 et la carte des types de peuplements à l'échelle 1/10000 ont été utilisées respectivement pour la sélection des points d'amers nécessaires à la correction géométrique de l'image, la numérisation des limites de la zone d'étude et son parcellaire et la confrontation aux classifications de l'image.



**Figure 18. Image SPOT en composition colorée couleurs naturelles (en vert, les limites de la zone d'étude)-Djelfa**

<sup>3</sup> Les données satellitaires proviennent du centre national des techniques spatiales d'Arzew.

<sup>4</sup> La date d'acquisition de l'image n'a aucune importance tant que la date de l'inventaire terrain est très proche de la date d'acquisition.



**Figure 19. Image SPOT en Composition couleurs naturelles (avec accentuation de contraste). Sig-**

Pour la seconde zone d'étude, une image SPOT multispectrale, acquise fin Mai 2002 a été utilisée (Fig.19). La carte topographique (feuille n°154, Saint-Cloud) à l'échelle 1/50000 a servi pour la sélection des points d'amers tandis que la carte des types de peuplements au 1/25000 (établie par photo-interprétation) a servi pour valider les résultats des classifications.

### 1.3.2 Données dendrométriques

Les données de la première zone proviennent des résultats de l'inventaire terrain de la forêt domaniale Senalba Chergui (Djelfa-Algérie), réalisé par le BNEF en 1984 puis actualisées par le BNEDER en 1996.

Les données<sup>5</sup> d'une trentaine de sous-parcelles ont été exploitées. Naturellement, l'inventaire concernait seulement les peuplements de pin d'Alep et parmi les paramètres déterminés<sup>6</sup>, figurent l'âge, la hauteur, le diamètre, le recouvrement et le nombre d'arbres par hectare (Tableau.6).

Les formations végétales<sup>7</sup> dans la seconde zone ont été définies à partir de la carte des peuplements (établie par photo-interprétation) puis un contrôle au sol a permis de prendre chaque unité (1 placette de 400m<sup>2</sup>/unité) et à caractériser le recouvrement de la végétation, sa hauteur moyenne, le nombre de strates et leur importance, et la composition en espèces dominantes (Tableau.7). Ce contrôle-terrain a permis aussi d'actualiser les données.

<sup>5</sup> Les données de l'administration locale des forêts ne signalent aucun incendie ou interventions sylvicoles ou autres, susceptibles de causer des changements dans l'occupation du sol entre la date de l'inventaire (1984) et la date d'acquisition de l'image (1988).

<sup>6</sup> Le nombre d'arbres par hectare est calculé par comptage du nombre d'arbres par placette. Le recouvrement est estimé à vue. Les valeurs de l'âge, de la hauteur et du diamètre sont des valeurs moyennes.

<sup>7</sup> Souvent, il est difficile de faire la distinction entre le maquis, le matorral et la broussaille et seuls les paramètres hauteur, densité de couvert et la composition peuvent aider à identifier ces formations transitoires.

## 1.4. Méthodologie

### 1.4.1. Les corrections géométriques

Les deux images ont été corrigées par rapport au système de projection Lambert Nord Algérie. La détermination des coordonnées cartographiques des points d'amers a été précise grâce à la présence de repères facilement identifiables sur l'image ; Il s'agit surtout de points d'intersection des tranchées pare-feu qui quadrillent les deux zones d'étude. La correction est faite par la méthode polynomiale de deuxième degré et l'erreur résiduelle est de l'ordre de 0,07 pixel pour la première image et 0,12 pixel pour la deuxième.

### 1.4.2. Les corrections radiométriques

Les corrections radiométriques n'ont pas été faites en raison de la faible superficie traitée et de la méthode de traitement adoptée. Pour la deuxième zone, la normalisation topographique n'a pas été faite, essentiellement à cause de l'aspect de plaine de la forêt.

### 1.4.3. Visualisation des images

Au cours des traitements, une composition colorée des 3 canaux initiaux de l'image (Vert, Rouge, Proche Infrarouge) est visualisée: le canal vert est affiché en bleu, le canal rouge en vert et le canal proche infrarouge en rouge. Ce mode d'affichage fait ressortir la végétation en rouge, l'eau en noir, les sols nus clairs.

### 1.4.4. Classifications des images

La classification des images a été opérée en deux phases: - une phase de classification non dirigée et une phase de classification dirigée

#### 1.4.4.1. Classifications non dirigées

Les classifications ont été faites avec l'algorithme Isodata sous le logiciel ENVI<sup>8</sup>. Les classifications ont été opérées avec un total en sortie de 7 classes pour la première zone et 20 classes pour la deuxième. Ce dernier nombre a été fixé en fonction du nombre maximal de classes thématiques existantes dans la zone d'étude et estimé à 14. Ces 20 classes, qui reflètent la diversité des états de surface ont été regroupées en grands groupes thématiques.

---

<sup>8</sup> Environment for Visualizing Images

Ces premières classifications visent essentiellement à mettre en évidence certaines relations qui puissent exister entre classes spectrales et certains paramètres dendrométriques comme la hauteur moyenne et la densité, ou sylvicoles telle que la composition en essences dominantes. Elle permettra d'identifier les grands types d'occupation du sol détectables par l'exploitation de la carte des types de peuplements et les données terrain.

**Les sept paramètres statistiques utilisés pour la classification.**

Nombre de classes = 7 à 20 ; Nombre d'itérations = 10

Indice de chevauchement = 0,01 ; Nombre minimal de pixels par classe = 1

Ecart-type = 4,5 ; Distance minimale entre les classes = 3

Nombre maximal de classes pouvant être agrégées = 2.

**1.4.4.2. Classifications dirigées**

Ces classifications concernent uniquement la deuxième zone. Les méthodes de classification généralement utilisées pour assigner des pixels aux classes établies sont: par minimum de distance, par parallélépipède, par maximum de vraisemblance et par la distance de Mahalanobis.

Les quatre algorithmes de classification ont été appliqués sur l'ensemble de la zone d'étude. L'algorithme le plus précis est utilisé par la suite pour la classification de chacun des trois cantons composant la zone d'étude. Chaque résultat de classification est évalué et les classes redéfinies si nécessaire. La classification finale (carte finale) est le résultat d'un assemblage des différentes classifications par canton.

Généralement, la réalisation des cartes de végétation exige un emploi logique de la couleur. Chaque type d'occupation du sol est désigné par une teinte conventionnelle, de telle sorte que les stades successifs sont représentés par des tons successifs de la teinte. La couleur intense (Marron foncé) est attribuée aux ligneux hauts. Pour accentuer le contraste, on a assigné aux vides et les herbacées respectivement le vert très clair et le vert foncé.



### *a) Numérisation des parcelles d'entraînement*

Pour élaborer la classification dirigée, des parcelles d'entraînement ont d'abord été numérisées sur les images pour chaque classe déterminée à priori (i. e. chaque classe d'occupation du sol qu'on voulait cartographier : forêt, matorral arboré, matorral, herbacées, vides.). Le comportement numérique de ces parcelles d'entraînement est supposé représentatif du comportement numérique de l'ensemble de la classe sur l'image.

Les parcelles ont été définies à partir de données terrain et données cartographiques (carte des types de peuplements). Ces parcelles, radiométriquement les plus homogènes possibles, étaient réparties de façon régulière sur l'ensemble de la zone d'étude et assises aux angles des intersections<sup>9</sup> des tranchées pare-feu, routes, pistes qui sillonnent la zone et qui sont nettement visibles sur l'image SPOT.

### *b) Séparabilité des parcelles d'entraînement*

Il faut nécessairement évaluer la qualité des sites d'entraînement par le biais d'outils statistiques avant de procéder à la classification. Nous avons utilisé le test de la **Distance Jeffries-Matusita** où l'indice de séparabilité de cette mesure est compris entre 0 et 2. De 0 à 1, la séparabilité n'est pas significative, de 1 à 1.9, la séparabilité va de faible à moyenne et de 1.9 à 2, la séparabilité est excellente [Hakdaoui, 2006].

La table de séparabilité<sup>10</sup> des parcelles d'entraînement permet d'évaluer leur qualité: sont-elles judicieusement définies ? Certaines ne méritent-elles pas d'être regroupées ou, au contraire, scindées ?

On cherche à minimiser la part de ces « impuretés » en fixant des seuils d'exigence de séparabilité, conditions sine qua non d'une bonne classification réalisée à partir de parcelles « pures ». L'analyse des tables de séparabilité (**annexe 7**) a ainsi permis de redéfinir des parcelles d'entraînement qui se distinguaient très bien (coefficient supérieur à 1.90).

<sup>9</sup> L'indisponibilité du GPS au moment des relevés floristiques nous a contraint de recourir à ce procédé.

<sup>10</sup> Voir en annexe 7, les tables de séparabilité des parcelles d'entraînement de la deuxième zone.

### c) *Construction des classes*

La classification finale est le résultat d'une démarche itérative: chaque résultat de classification est évalué et les classes redéfinies si nécessaire. A l'issue de cette démarche itérative, une classification en 14 classes a été construite de façon à obtenir des classes thématiques les plus pures possibles sur le plan radiométrique.

Les principales difficultés rencontrées au cours de la classification portaient sur des erreurs de classification (confusions) dues à certains objets géographiques distincts qui présentent des signatures spectrales proches.

Pour limiter les erreurs, une nouvelle détermination des classes d'objet a donc été nécessaire. Ainsi au sein de la classification en 14 classes, les principales confusions identifiées sont les suivantes:

- Matorral arboré dense à thuya / matorral arboré dense à lentisques d'où une multiplication de la classe matorral arboré à thuya.
- Matorral arboré clair à lentisques et oléastres / matorral arboré clair à lentisques et pin d'Alep d'ou regroupement au sein d'une même classe " matorral arboré clair à dominance lentisques.
- matorral dense à lentisques /matorral clair à lentisques d'ou regroupement au sein d'une même classe " matorral à lentisques".

## **1.5. Résultats**

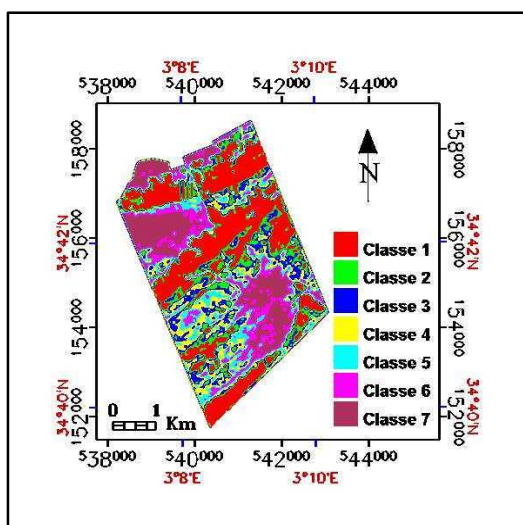
### **1.5.1. Les classifications non dirigées**

L'exploitation des données terrains et les documents cartographiques existants ont permis d'établir des correspondances entre classes spectrales d'un côté (Fig. 20 et 21) et les types de peuplements et leurs paramètres dendrométriques mesurés de l'autre.

Les tableaux des correspondances ci-dessous (Tab. 6 et 7) mettent en évidence une relation très intéressante entre l'arrangement des classes spectrales et les classes thématiques correspondantes.

La classification non dirigée par nuées dynamiques a découpé l'espace spectral en un certain nombre de strates forestières. Cette séparation spectrale, due en partie à la nature des essences dominantes de la strate haute, pourrait provenir de la hauteur aussi.

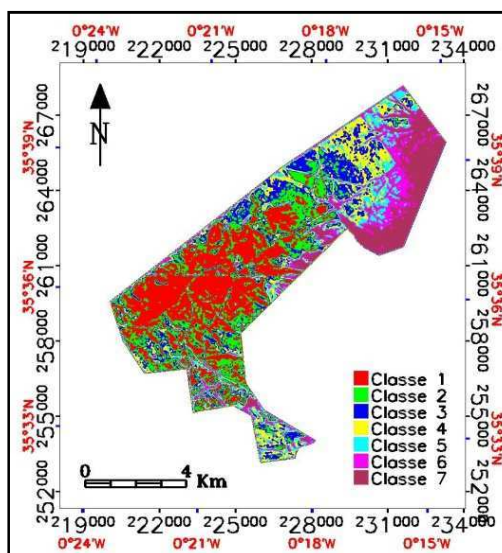
Cependant, le paramètre le plus représentatif de la radiométrie de l'image semble être la densité.



**Figure 20. Classification non-dirigée de l'image SPOT de 1988. Première zone**

matorrals occupent des classes spectrales différentes. La densité de couvert qui est différente pour les trois premières classes est donc le facteur déterminant.

En effet, malgré les valeurs relativement similaires de leur hauteur moyenne, le matorral arborescent et les



**Figure 21. Classification non-dirigée de l'image SPOT de 2001. Deuxième zone**

Par conséquent, la séparabilité observée est due essentiellement à l'effet combiné de la radiométrie et de la densité de chaque type de couvert. Le semblant d'effet de la hauteur peut être du en fait à la différence de radiométrie de couverts se distinguant physiologiquement sur terrain par leur taille (hauteur). Le tableau 8 résume ces observations.

**Tableau 6. Correspondances entre classes spectrales et classes thématiques-Djelfa**

Classe	Type de peuplement	Paramètres dendrométriques				
		Age (Années)	Hauteur (m)	Diamètre (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 et Matorral avec sujets uniques				< 0.1	
6 et 7	Vides et Vides avec sujets uniques				< 0.1	

**Tableau 7. Correspondances entre classes spectrales et classes thématiques-Mascara**

Classe spectrale	Type de peuplements	Hauteur	Densité
<b>1</b>	Perchis de pin d'Alep	5 à 10 m	Dense
	Reboisements d'Eucalyptus	12 à 15 m	Dense
<b>2</b>	Taillis de Thuya	2 à 3 m	Dense
	Matorral arborescent à lentisque	2 à 3 m	Dense
<b>3</b>	Taillis de Thuya	2 à 3 m	Densité variable (>10%)
	Matorral arborescent à eucalyptus		
	Matorral arborescent à lentisque		
	Matorral arborescent à lentisque et oléastre		
<b>4</b>	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
<b>5</b>	Fruticées à lentisques	0.5 à 1m	Claire
	Garrigues à genets	0.5 à 1 m	Clair
<b>6</b>	Herbacées	Très basse < 0.5	Densité variable >10%
<b>7</b>	Vides		Recouvrement <10%

**Tableau 8. Relations : strates spectrales - classes spectrales - classes thématiques**

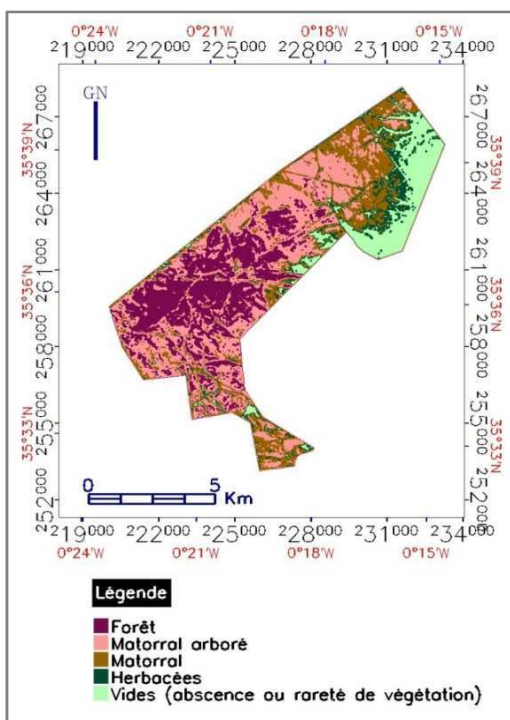
Classe spectrale	Strate spectrale	Classe thématique	Physiologie	
			Hauteur	Densité
1	I	Forêt	Très Haute	Dense
2	II	Matorral arborescent	haute	Dense
3				Clair
4	III	Matorral	Basse	Dense
5				Clair
6	IV	Herbacées	Très basse	Densité variable
7	V	Vides		

Globalement, les cartes issues de ces premières classifications expriment fidèlement la réalité terrain en termes de grands types d'occupation du sol (Fig.22), bien que certaines confusions entre Matorral arboré et taillis de thuya d'une part, entre pistes forestières et ligneux très clairs d'autre part aient été constatées.

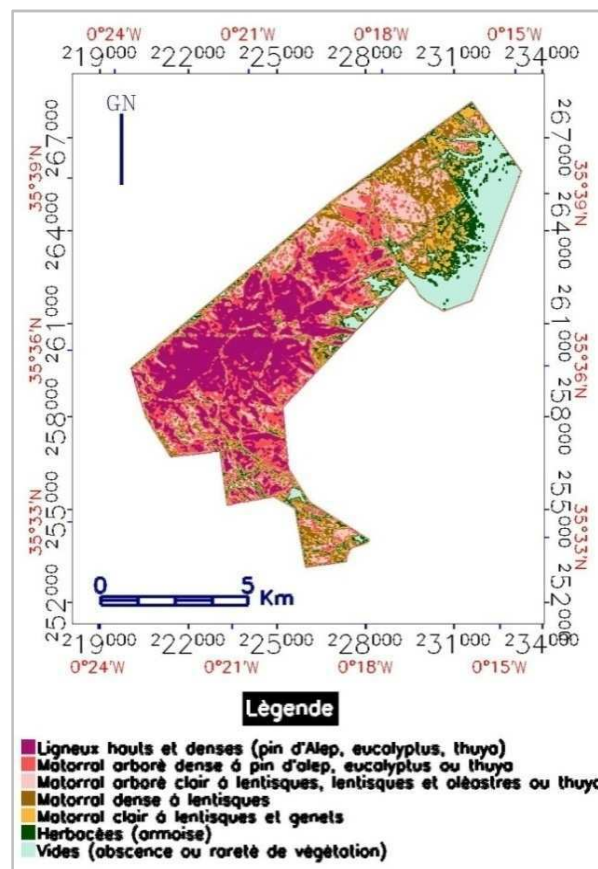
Les continuités devenues perceptibles, le deuxième problème est de connaître les modalités d'application de la méthode globale pour passer de la carte des grands types d'occupation du sol à la carte des types de couverts définis par l'essence (ou groupe d'essences) dominante. Une des solutions est de réaliser des classifications non dirigées

sur les différents cantons. De cette manière, l'aménagiste forestier (supposé connaître le territoire qu'il gère) et en s'appuyant sur les résultats cités auparavant, saura attribuer beaucoup plus facilement, l'espèce ou le groupe d'espèces qui composent le type de couvert.

La figure 23 illustre la carte provisoire des types de couverts forestiers auxquels on a affecté provisoirement l'essence dominante probable leur correspondant, selon le principe "et/ou".



**Figure 22. Carte des grands types physionomiques**



**Figure 23. Carte provisoire des types physionomiques définis par l'essence dominante**

Dans chaque poste de légende, il y aura autant de classes qu'il y a d'essences dominantes probables. Par exemple, la première classe sera interprétée comme ligneux hauts à pin d'Alep et /ou à Eucalyptus et /ou à Thuya. Les deux cartes précédentes seront considérées par la suite comme notre réalité terrain d'où seront sélectionnées les zones d'entraînements nécessaires pour réaliser des classifications dirigées.

### 1.5.2. Les classifications dirigées

L'exploitation de la carte des grands types d'occupation du sol (Fig.22) et les connaissances de l'interprète contribuent à la réalisation de classifications dirigées. Deux options peuvent être envisagées, soit lancer une classification sur l'ensemble de la forêt ou d'adopter une approche par canton. Il fallait choisir aussi l'algorithme de classification dirigée le moins imprécis (Tab.9).

**Tableau 9. Précision des différents algorithmes de classifications dirigées**

N°	Algorithme de classification	Précision globale %	Coefficient Kappa
1	Distance de Mahalanobis	15.69	0.11
2	Parallélépipède	20.81	0.12
3	Minimum de distance	49.24	0.39
4	Maximum de vraisemblance	67.50	0.63

La classification dirigée par la méthode du Max. de vraisemblance est de loin la plus précise. Mais cette précision relativement grande est encore insuffisante pour les besoins des gestionnaires forestiers. Des classifications dirigées par cantons et utilisant la méthode du Max. de vraisemblance ont donc été testées.

Comparées aux précisions précédentes, les matrices de confusion<sup>11</sup> correspondant à chacune des classifications par canton indiquent une précision très intéressante par rapport aux précédentes. La précision totale dans les trois cas est supérieure au minimum requis soit 80%.

Le tableau. 10 résume les résultats où on remarque que la précision des classifications diffère d'un canton à l'autre. Cette différence est due au degré d'hétérogénéité (d'homogénéité) du canton. En effet, la précision est meilleure pour le deuxième canton (Djira) qui est le moins hétérogène des deux autres.

**Tableau 10. Précision des classifications dirigées par cantons**

N°	Nomination du canton	Précision globale %	Coefficient de Kappa
1	Ras Karoun	90.45	0.88
2	Djira	97.26	0.96
3	La mare d'eau	82.05	0.79

<sup>11</sup> Voir en annexe 6 les différentes matrices de confusions.

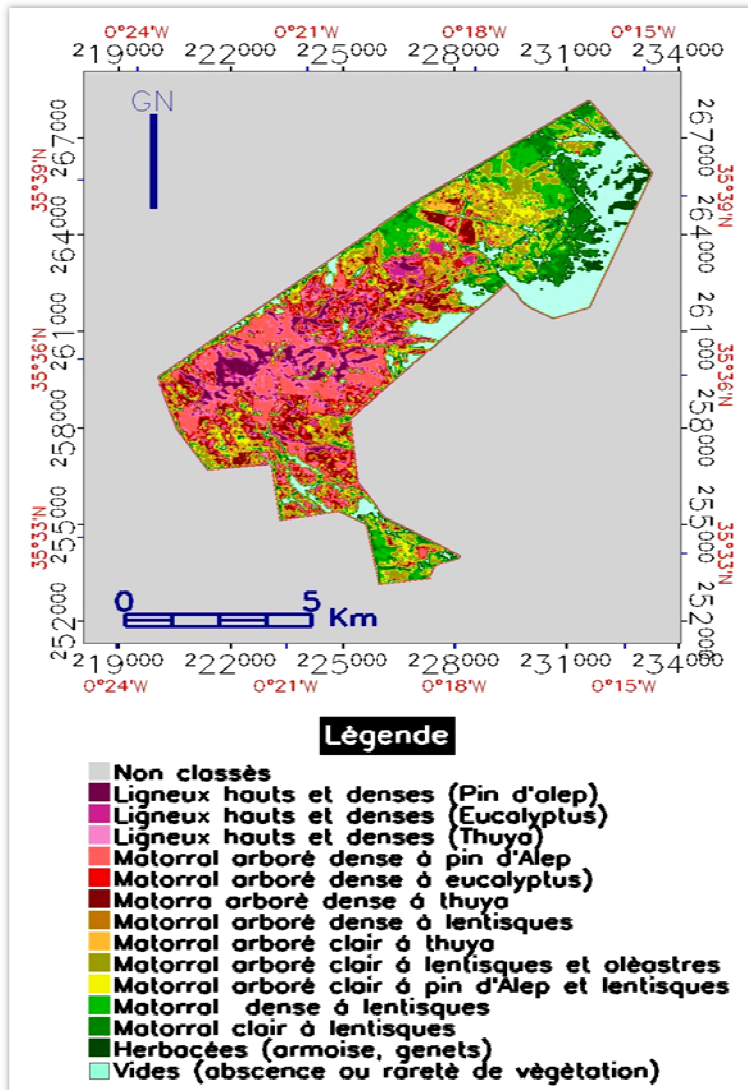


Figure 24. Carte finale des types physiologiques.

### 1.5.3. Estimation des surfaces

La surface forestière (Forest area) est un indicateur qui pourrait porter sur la superficie des forêts naturelles ou plantées, et son évolution dans le temps. Compte tenu de l'importance des formations arbustives en zones semi-arides, et des définitions employées par la FAO, il semble préférable de calculer l'indicateur à partir des superficies de la série « Forêts et terrains boisés » [Boisvert *et al.* 1997].

Dans le bassin méditerranéen, le climat semi-aride limite le potentiel de la productivité forestière. De plus, une fois la végétation forestière détruite, sa restauration est difficile, très coûteuse et prend beaucoup de temps. Ceci explique l'importance de cet indicateur pour l'environnement et le développement durable (Tableaux 11, 12, 13).

L'assemblage des trois classifications par cantons conduit à une carte finale de types d'occupation du sol, définis par la physiologie et les essences dominantes qui les composent. La précision moyenne de la carte est très satisfaisante et est égale à 90%. Le coefficient Kappa moyen est égal à 0.88. La figure 24 représente la carte finale obtenue par assemblage des classifications dirigées (par cantons) par la méthode du Max. de vraisemblance.

**Tableau 11. Répartition de la surface du canton "la mare d'eau" par types de peuplements (classification par Max. vraisemblance)**

Classe d'occupation du sol	Nombre de pixels	Résolution du pixel	Surface de la classe	surface
		ha	ha	%
Ligneux hauts et denses (pin d'Alep)	6742	0.04	269.68	8.69
Ligneux hauts et denses (Eucalyptus):	8405	0.04	336.20	10.83
Matorral arboré dense à pin d'Alep	15672	0.04	626.88	20.20
Matorral arboré clair à lentisques et pin d'Alep	17254	0.04	690.16	22.24
Matorral dense à lentisques et oléastres	14025	0.04	561.00	18.07
Matorral clair à genets et lentisques	9278	0.04	371.12	11.96
Herbacées	4709	0.04	188.36	6.07
Vides (absence ou rareté de végétation):	1517	0.04	60.68	1.95
Total	77602		<b>3104.08</b>	100.00

**Tableau 12. Répartition de la surface du canton "Djira" par types de peuplements (Classification par Max. vraisemblance)**

Classe d'occupation du sol	Nombre de pixels	Résolution du pixel	Surface	
		ha	ha	%
Ligneux hauts et denses (Thuya)	9751	0.04	390.04	26.11
Ligneux hauts et denses (pin)	9353	0.04	374.12	25.05
Matorral arboré dense à lentisques	4796	0.04	191.84	12.84
Matorral dense à lentisques et genets	3623	0.04	144.92	9.70
Matorral clair à lentisques et genet	3296	0.04	131.84	8.82
Herbacées	6525	0.04	261.00	17.47
Vides (absence ou rareté de végétation)	174	0.04	6.96	0.46
Total	37344		<b>1493.76</b>	100.00

**Tableau 13. Répartition de la surface du canton "Ras-Karoun" par types de peuplements (classification par Max. vraisemblance)**

Classe d'occupation du sol	Nombre de pixels	Résolution du pixel	Surface	
		ha	ha	%
Ligneux hauts et denses (Thuya)	2465	0.04	98.60	4.14
Ligneux hauts et denses Pin-Lentisque	6678	0.04	267.12	11.21
Ligneux hauts et denses (Eucalyptus)	6064	0.04	242.56	10.18
Matorral arboré dense à Eucalyptus	5463	0.04	218.52	9.17
Matorral arboré dense à Pin	8145	0.04	325.80	13.67
Matorral arboré clair à Lentisque	8205	0.04	328.20	13.77
Matorral dense à Lentisque+genet	7736	0.04	309.44	12.99
Matorral clair à Lentisque+genet	4889	0.04	195.56	8.20
Herbacées	4688	0.04	187.52	7.87
Vides (absence ou rareté de végétation)	5219	0.04	208.76	8.76
Total	59552		<b>2382.08</b>	100.0



## 1.6. Discussions

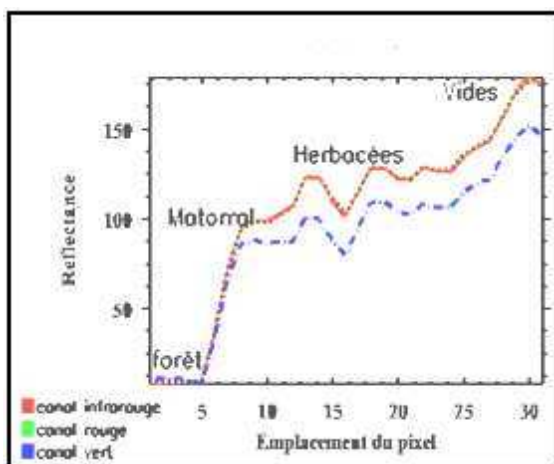
### - Sur les classifications non dirigées

Le problème de l'hétérogénéité thématique des classes spectrales persiste. C'est le paradoxe spécifique aux classifications non dirigées qui peuvent produire des classes très précises mais qui risque de ne pas coïncider avec les classes désirées [Steven., 2001]. Par exemple chez les futaies très claires, le recouvrement du sous bois l'emporte sur la faible densité des arbres d'où la confusion entre matorral arboré et futaies très claires: Les futaies étant très claires, la réflectance dominante est celle du sol sous-jacent occupé par un cortège floristique de même composition que le matorral.

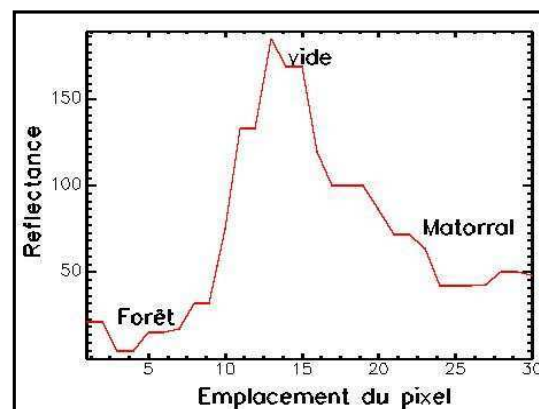
Les zones de transition créent elles aussi des problèmes d'interprétation. Les pistes forestières qui traversent les peuplements hauts et denses se confondent dans la classification avec les futaies claires ou très claires. La même remarque vaut pour les coupes forestières. Les coupes étant un type d'utilisation forestière, la télédétection ne peut les reconnaître comme telles quand elles ne sont pas rases. Mais il est toujours possible de les classer avec les peuplements clairs ou très clairs en fonction de leur physiologie au moment de la prise de vue.

Globalement, l'approche a permis de distinguer dans un premier temps trois ensembles: forêt, matorral et les vides. Les futaies adultes denses et claires sont bien individualisées. Le type matorral comporte les matorrals arborés hauts et les matorrals bas. Dans les vides sont inclus les sols nus, les vides rocheux et les vides avec sujets uniques. Cependant, les jeunes peuplements de pin d'Alep dont on ignorait l'existence

dans certaines parcelles de la première



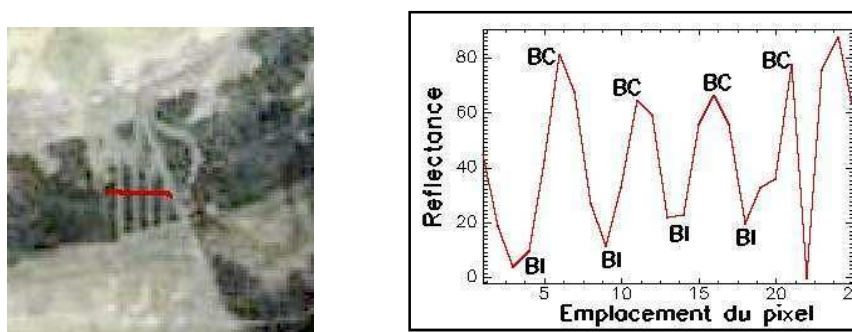
**Figure 25. Profil spectral par transect. Première zone**



**Figure 26. Profil spectral par transect. Deuxième zone**

zone sont confondus selon leur densité avec les peuplements adultes confirmant ainsi l'importance de ce critère dans la classification.

Des profils spectraux (Fig. 25 et 26) réalisés sur quelques transects couvrant au moins trois types de couverts, indiquent une bonne séparabilité des principaux types de couverts. La figure 27 illustre un transect (ligne rouge) à travers une coupe par bandes dans la première zone et où on observe sur le profil une transition tranchée entre bandes coupées (BC) et bandes intactes (BI).



**Figure 27. Profil spectral par transect (exemple d'une coupe par bande, première zone). A gauche transect en rouge sur l'image.**

L'analyse des résultats a mis en évidence l'effet de la densité, de la hauteur et de l'essence dominante (essences dominantes) sur la formation des classes spectrales. Mais le problème principal à ce stade de l'étude se rapporte à la reproductibilité de la méthode et il devient intéressant de connaître les possibilités d'exploitation de ces résultats pour une interprétation aisée des classifications non dirigées.

*Une des approches envisageables est de mettre en correspondances les valeurs radiométriques de l'image à interpréter avec les valeurs radiométriques de classes de référence au même stade phénologique. Ces valeurs-références seront utilisées comme masques radiométriques dans les classifications dirigées où les zones d'entraînement sont indisponibles. A notre avis, l'approche devra tenir compte d'une nomenclature appropriée, de la date idéale d'acquisition des images, des variations phénologiques de la végétation et de l'échelle de la classification.*

Compte tenu de l'abondance des fleurs dans le matorral en avril et mai, leur réflectance sera parfois différente de celle des végétaux verts environnants. Une acquisition au mois de juin-juillet paraît idéale pour une interprétation aisée des images.

La connaissance des variations d'état de surface liées aux conditions bio-climatiques ou aux pratiques sylvicoles est essentielle. En effet, la signature spectrale de la végétation se caractérise par une forte réponse dans le canal infrarouge où ce comportement est corrélé positivement à l'activité chlorophyllienne. Pour une même espèce végétale, cette activité chlorophyllienne varie en fonction de la pluviométrie et de la température [Hotyat, 1998].

- *Sur les classifications dirigées*

Une analyse de la carte finale des unités physiologiques a été réalisée conjointement avec le personnel technique afin qu'il puisse donner un avis général sur cette cartographie. Il ressort de cette analyse un excès des formations du type matorral, dû à l'effet combiné des pistes et de pixels mixtes. Particulièrement, ce sont les plantations d'eucalyptus dégarnies par les coupes illicites qui sont devenues dans plusieurs endroits des matorrals arborés à Eucalyptus.

La démarche suivie pour établir cette carte semble prometteuse dans la mesure où elle a pu spatialiser 14 types de couverts d'une zone fortement hétérogène. Les données surfaciques inhérentes à chaque unité physiologique mettent en évidence une grande biodiversité floristique mais montrent aussi une tendance nette vers la matorralisation. Ces données permettront de suivre l'évolution de l'écosystème et cibler les opérations de protection-restauration.

En plus, l'approche basée sur des classifications par parcelles (par cantons dans notre cas, précision moyenne 90%) est plus performante qu'une classification de l'ensemble de la zone (précision 68%). Le fait de séparer les cantons réduit l'hétérogénéité et par conséquent améliore la classification. Toutefois un minimum de données exogènes est exigé.

Les unités physiologiques ont été définies par l'essence dominante : il est clair que la radiométrie d'une image satellitaire est due à la végétation entière et non aux seules essences dominantes. En définissant les classes, nous devons donc décider comment classer des thèmes mixtes ou de transition.

Une des approches est de définir explicitement ces thèmes comme étant mixtes ou transitoires, l'autre est d'ignorer cette mixité et définir les classes par le thème dominant au sein d'une unité déterminée puisque la grande majorité des études ont toujours

caractérisé la mosaïque d'occupation du sol par le type d'occupation dominante [Shermann et Baudry, 2002].

Ainsi, la classe des ligneux hauts comporte des peuplements purs avec la dominance d'une seule essence, respectivement *Pinus halepensis*, *Tetraclinis articulata* et *Eucalyptus camaldulensis* ou *Eucalyptus.gonphocephala*. La densité de couvert de la strate arborée est grande par rapport à celle du sol sous-jacent d'où une nette individualisation des trois classes.

La classe Matorral est la plus diversifiée. Les matorrals à pin, à thuya, à eucalyptus ou à lentisque sont des formations arborescentes de fruticées et de buissons dotés respectivement de *Pinus halepensis*, *Tetraclinis articulata*, et *Eucalyptus ssp*. En fonction de la densité des fruticées, se sont distingués des matorrals denses ou clairs.

Les matorrals à lentisque sont des fruticées basses parfois ouvertes mais lorsque le lentisque dépasse les deux mètres, ils se présentent sous l'aspect de matorrals arborescents dotés de *Pistacia lentiscus* et *Olea europaea* ou *Pistacia lentiscus* et *Pinus halepensis*. Ces groupements comportent aussi *Juniperus oxycedrus*, *Cistus ssp*, *Rosmarinus officinalis*, *Genista ssp*, *Lavandula dentata*, *Rhus pentaphylla*, *Asparagus acutifolius*, *Calycotome spinosa*...

Probablement la présence généralisée de *Pistacia lentiscus* dans les différentes formations de matorral a engendré des confusions entre matorral à lentisque d'une part et matorral à lentisque et genet, lentisque et pin et lentisque et oléastre d'autre part. Les confusions dues à la densité de couvert pourraient provenir d'une mauvaise appréciation de ce critère lors de l'enquête terrain.

Les classifications par pixel sont des méthodes puissantes mais leur inconvénient est qu'elles s'appuient uniquement sur des attributs spectraux. Or dans le cas des écosystèmes forestiers semi-arides, d'autres attributs définissent les types d'occupation du sol comme l'espace, le contexte, la texture, etc. L'objectif de l'étude suivante (chap.2) est de tester l'analyse orientée-objet pour la caractérisation d'un paysage forestier hétérogène 'forêt Senalba-cherghi', une approche qui prend en compte, en plus de l'attribut spectral, les attributs de texture, d'espace, de compacité, de forme

# ***Chapitre deuxième***

## ***Analyse paysagère par classifications d'images ETM+ de LANDSAT***

### **2.1. Problématique et objectifs**

L'évolution de l'espace forestier d'un côté et les rapports entre la forêt et la société conduisent à des changements rapides en matière de planification et de gestion. Ces changements méritent d'être accompagnés par une démarche de réflexion et de recherche pour enrichir la définition, les outils et les méthodes de l'aménagement forestier.

La nouvelle stratégie forestière décidée en Algérie est basée sur la planification intégrée qui s'appuie, entre autres concepts, sur la gestion écosystémique [Doyon, 2003] qui elle-même est basée sur une série de principes scientifiquement fondés dont la réflexion au niveau du paysage et l'intégration des différentes échelles [Shlaepfer, 1997].

L'analyse d'un paysage est le processus de description et d'interprétation de l'écologie d'une région [Bradley et Hammond, 1992] permettant d'intégrer l'information environnementale à travers l'ensemble des types d'occupation du sol et fournit par conséquent un nouvel outil pour évaluer la gestion de l'espace forestier et les changements écologiques dans le temps [Kepner *et al.* 2007].

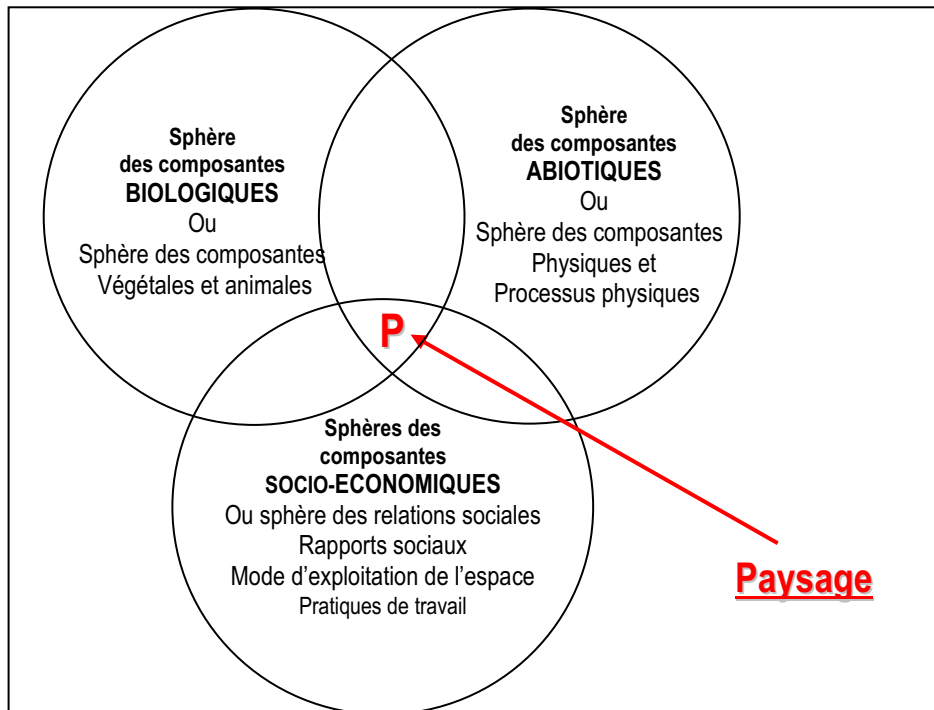
Un tel système d'analyse et de planification doit être basé néanmoins sur des études terrains et bureau alors que la planification paysagère à petite échelle doit être menée en utilisant la cartographie existante et les données satellitaires associées à une reconnaissance de la vérité terrain.

#### **2.1.1. Définition du paysage**

La compréhension du fonctionnement global du paysage (Fig.28) conduit à déterminer des unités de fonctionnement homogène que l'on nomme « unités paysagères » réalisées par le croisement de trois couches [Sejalon, 2003] :

- L'occupation du sol qui décrit de façon précise les formes de végétation.
- Etages qui représentent à la fois les différences de climat et d'altitude.

- Les usages qui participent à la modélisation des paysages et dont les limites des unités forestières (ou autres) ont un rapport étroit avec la morphologie du paysage (crêtes, fonds de vallons).



**Figure 28. Définition du paysage [D'après Sejalon, 2003a]**

Au sens commun du terme, le paysage désigne la physionomie d'un espace que l'on embrasse du regard ou celle d'une contrée que l'on traverse, parcourt ou survole. Dans un cas comme dans l'autre, cette notion est inséparable de celle d'espace visuel [Gay et Cheret, 1996]. Dans sa dimension horizontale, il apparaît comme l'arrangement dans certaines proportions de plusieurs affectations du sol, respectivement de plusieurs unités paysagères définies par une physionomie et une structure [MacGarigal, 2000].

Au niveau d'un territoire forestier semi-aride sud-méditerranéen, ces unités correspondent à divers objets géographiques, principalement les types de végétation herbacée, arbustive et arborée. Une des approches possibles pour évaluer et gérer ces formations peut se résumer à identifier et cartographier les unités paysagères composant le territoire à aménager.

Cette représentation cartographique de l'occupation du sol peut se concevoir de plusieurs manières dont la plus importante est la reconnaissance de la couverture du sol à partir d'interprétations automatiques d'images satellitaires [Leckie, 2002]. À l'échelle

paysagère, l'analyse par objet de ces images pourrait être avantageuse étant donné qu'une relation sémantique existe entre la notion d'objet en télédétection et la notion d'unité (ou sous-unité) paysagère en écologie.

Le concept est que les unités paysagères sont par définition des objets homogènes [Ducrot, 2005] alors que la segmentation d'image couvrant un territoire forestier délimite aussi des segments (des régions) homogènes. Bien qu'elle soit plus performante sur des images de très grande résolution spatiale et sur les photographies aériennes [Caloz et Pointet, 2003], l'approche orientée-objet semble être très prometteuse pour la cartographie forestière et la caractérisation des écosystèmes méditerranéens [Mallinis et al. 2006].

L'approche est utilisée avec succès sur des images ETM+ de Landsat pour la classification des types de peuplements forestiers (où la délimitation de zones homogènes est souvent difficile) et la reconnaissance des zones forestières dégradées [Schwarz et al. 2001]. Son principal avantage par rapport à l'approche par pixel est qu'elle garde intacte l'information spatiale [Flanders et al. 2003] qui est une des conditions de délimitation des unités paysagères<sup>1</sup>.

### 2.1.2. Contexte

La forêt Senalba chergui (Fig.29) est un modèle de forêt hétérogène. Il en résulte qu'une importante information sémantique nécessaire à l'interprétation d'une image n'est pas représentée dans des pixels individuels mais dans des objets images homogènes significatifs et dans leurs relations mutuelles.



**Figure 29. Localisation de la région d'étude et de la scène Landsat**

L'objectif est de tisser un lien entre les objets générés par l'analyse orientée-objet de l'image et les différentes unités physiologiques composant le territoire forestier étudié.

<sup>1</sup> Vu la complexité de cette notion, nous préférons utiliser la notion d'unité physiologique.

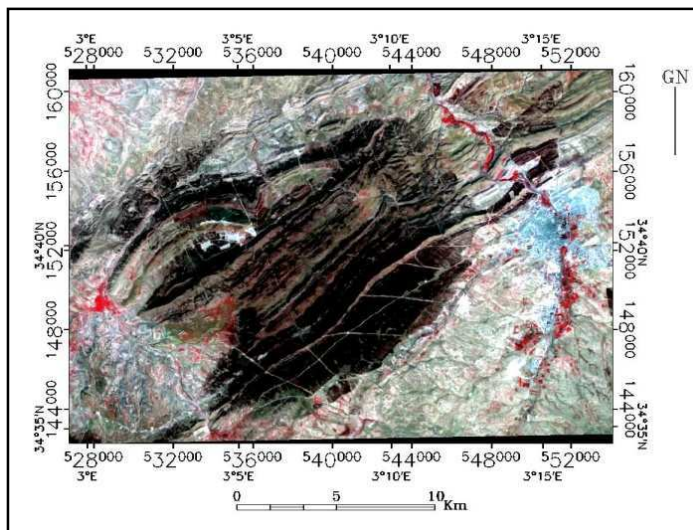
Cette étude n'a pas la prétention de prendre en compte toutes les facettes du concept paysage mais d'aborder cette notion en adoptant le principe contenu-contenant dont l'approche se traduit par une transcription spatiale à travers l'identification de limites des objets géographiques (le contenant) alors que l'approche par le contenu s'exprime par une description de ce qui en fait la spécificité de ces objets (contenu).

## 2.2. Données satellitaires

Une fenêtre couvrant la zone d'étude est extraite de la scène p196r036 d'ETM+ de Landsat<sup>2</sup> (Fig.30). Sa date d'acquisition est le 24-03-2001 alors que sa résolution spatiale est de 30 mètres. L'image est recorrectée géométriquement par rapport au système de projection Lambert Nord Algérie par la méthode polynomiale de deuxième degré avec une RMS de 0.77 pixel soit 23m en moyenne<sup>3</sup>. Quant aux corrections radiométriques, celles-ci n'ont pas été faites. Toutefois, des améliorations de dynamique et de contraste ont été effectuées pour une interprétation visuelle aisée de l'image.

## 2.3. Méthodologie

La planification paysagère à petite échelle doit être menée en utilisant la cartographie existante et les données satellitaires associées à une reconnaissance de la vérité terrain. Les études terrain ont porté sur la description des différents peuplements et



**Figure 30. Fenêtre géo-référencée extraite de la scène ETM+ de Landsat du 23 mars 2001**

l'élaboration d'une typologie paysagère. La carte des types de peuplements, la carte topographique ainsi que les résultats de l'inventaire dendrométrique ont contribué à cette description.

L'analyse orientée-objet est réalisée grâce au logiciel ENVI4.4 et plus particulièrement son module *ENVI Feature Extraction* qui

permet une telle analyse sur tout type de données images. Cependant, l'un des aspects

<sup>2</sup> La scène est téléchargée du site GLCF (Global Land Cover Facility) de l'université du Maryland (USA) <http://glcf.umiacs.umd.edu>.

<sup>3</sup> La précision des corrections faites par le GLCF est de  $\pm 30$ m, soit un pixel [Mihai et al. 2006].



innovateur de ce module est sa capacité de faire visualiser les résultats à chacune des étapes du traitement d'image [Envi, 2007].

### 2.3.1. Description physiologique

La typologie de l'espace forestier est réalisée en deux temps. En premier lieu, une étape exploratoire terrain<sup>4</sup> a permis d'identifier les principales unités physiologiques. Celles-ci correspondent à un niveau d'organisation spatiale pertinent permettant d'identifier au plus près les grandes catégories d'occupation du sol d'un territoire forestier.

En second lieu, une différenciation de chaque type en fonction de l'essence dominante est réalisée. Cette partition typologique produit des unités de même composition et physiologie. Le tableau 14 montre les principales unités physiologiques définies qui ont servi à la classification<sup>5</sup> de l'image (annexe 8).

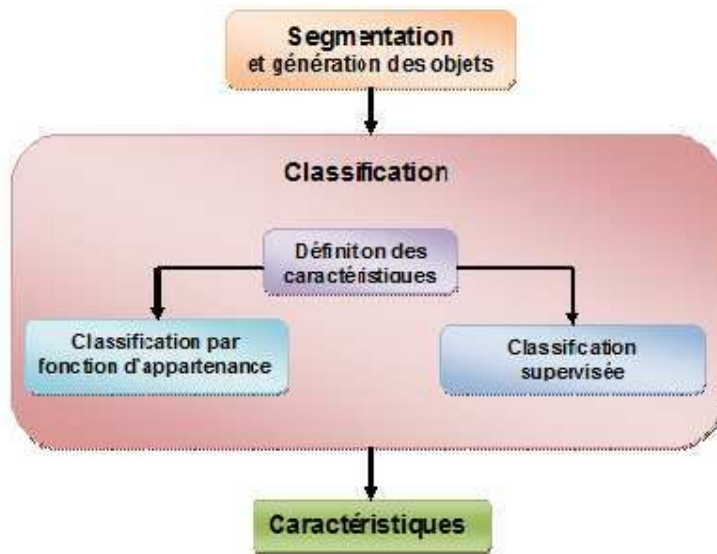
**Tableau 14. Principales unités physiologiques définies dans la zone d'étude**

Unités physiologiques	Description	Classes spectrales
<b>Forêts</b>	Peuplements à <i>Pinus halepensis</i>	Futaie dense ( $R \geq 80\%$ ; $20m \geq h \geq 10m$ )
	peuplements à <i>Pinus halepensis</i> avec différents degrés de recouvrement	Futaie dense ( $R \geq 80\%$ ; $9m \leq h \leq 12m$ ) Futaie dense ( $R = 50-70\%$ ; $9m \leq h \leq 12m$ )
	Peuplements à <i>Pinus halepensis</i>	futaie claire ( $R \leq 50\%$ ; $9m \leq h \leq 12m$ )
<b>Matorrals</b>	Matorral arboré mixte à <i>Pinus halepensis</i> , <i>Quercus ilex</i> et <i>juniperus oxycedrus</i>	Matorral haut ( $5m \geq h \geq 2.5m$ )
	Matorral à <i>Rosmarinus officinalis</i> et <i>cistus ssp.</i>	Matorral bas et dense ( $h \leq 1.5m$ )
<b>Herbacées</b>	Végétation à <i>Stipa tenacissima</i>	Herbacées ( $h \leq 0.5m$ )
<b>Espaces agricoles</b>		Cultures maraîchères
		vergers
<b>Sols nus</b>		Sols nus
		Végétation à très faible activité chlorophyllienne

<sup>4</sup> Les relevés floristiques proviennent de deux inventaires différents mais réalisés à la même période (entre mars et avril) d'acquisition de l'image mais pas de la même année. Le premier est réalisé en 1998 par le BNEDER, le second est exécuté sur terrain en 2003 par échantillonnage stratifié au hasard avec une assignation proportionnelle des échantillons aux strates. A cause du manque de données spatiales et statistiques réelles sur les strates, 50 points de sondage issus du premier inventaire ont été ré-inventoriés sur terrain sur 100m×100m lors du second inventaire et ce pour une meilleure analyse de l'image qui est acquise le 24-03-2001.

<sup>5</sup> Le décalage de temps entre les deux relevés a conduit à n'utiliser dans la classification que les relevés (une trentaine) montrant une certaine stabilité dans la physiologie des unités de végétation.

### 2.3.2. Segmentation de l'image



**Figure 31. Processus d'extraction des caractéristiques paysagères sous ENVI**

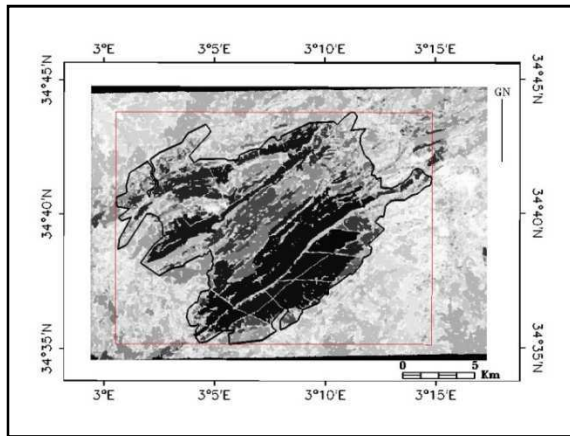
Sous *ENVI Feature Extraction*, la génération d'objets passe par quatre étapes: la segmentation de l'image, le fusionnement de segments, l'affinement des objets et le calcul des attributs. Les deuxième et troisième étapes sont optionnelles et permettent d'améliorer les résultats en fonction des objectifs de l'utilisateur (Fig.31).

Tout d'abord, l'utilisateur peut choisir l'échelle de la segmentation qui correspond au niveau de finesse de la segmentation en fonction des objets qu'il souhaite caractériser. Un grand facteur d'échelle se traduira par des objets de grande taille. Pour l'image utilisée, un facteur d'échelle de 45 a été choisi afin de distinguer en plus des différentes formations forestières, des objets tels que les enclaves et les clairières. Les étapes 3 et 4 ont été jugées inutiles une fois les résultats visionnés. La quatrième étape permet de calculer pour chaque objet, les attributs spectraux, spatiaux de texture et de couleur. Les trois bandes de l'image (infrarouge ETM4, rouge ETM3, et vert ETM2) sont utilisées dans la segmentation.

### 2.3.3. Classification de l'image

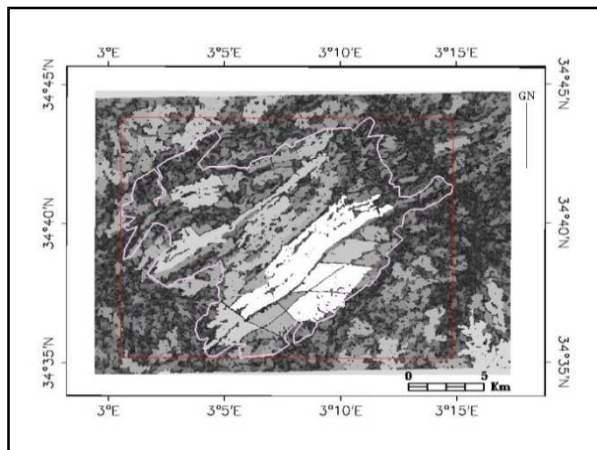
Après la segmentation, deux méthodes de classification sont possibles, l'une supervisée et l'autre par fonction d'appartenance. Disposant de données terrain et de zones d'entraînements, il était plus utile de choisir la méthode supervisée par la méthode des k plus proches voisins. Une autre raison qui justifierait ce choix est que la classification par la logique floue n'est pas très performante dans le cas d'objets ayant une grande similitude spectrale [Gomes et Marcal, 2003].

Après la sélection des zones tests, ont été choisis les attributs (spatiaux, spectraux, de texture et de couleur) à utiliser dans la classification. Généralement, l'utilisateur choisit l'attribut le plus performant pour chaque classe.



**Figure 32. Effet de l'intensité-attribut de couleur**

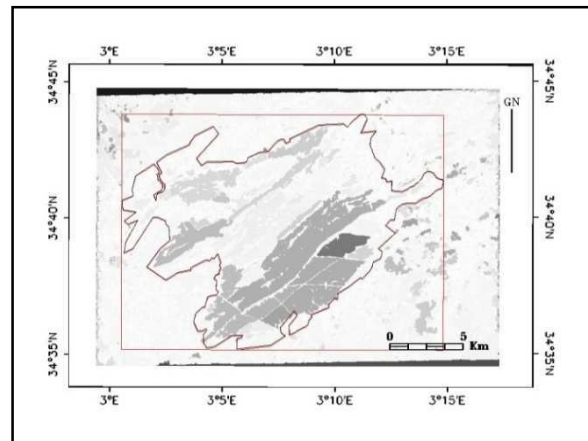
similaires ont été réalisés avec les autres attributs pour ne retenir après visualisation de l'image que la surface, la compacité et l'élongation pour les attributs spatiaux, l'entropie pour la texture et les valeurs maximales des pixels dans un objet des trois bandes utilisées ETM+2, ETM+3 et



**Figure 34. Effet de la compacité- attribut spatial**

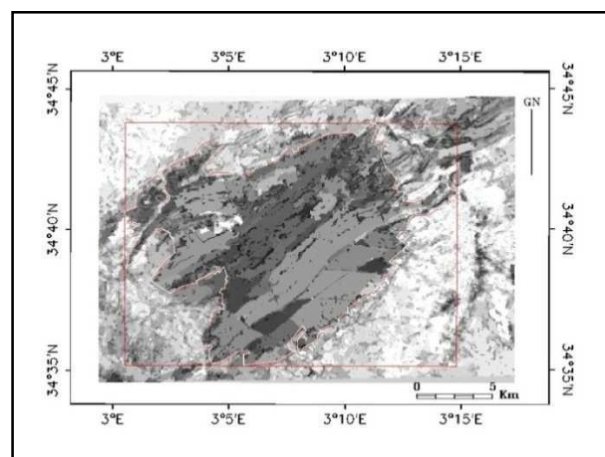
Il est possible de choisir la sélection automatique des attributs étant donné que cette option est plus utile en présence d'un grand nombre d'objets (ENVI, 2007). À titre de vérification, cette fonction

Les figures de 32 à 35 illustrent quatre exemples montrant l'effet sur l'image segmentée de la compacité (attribut spatial), de la valeur maximale des pixels dans un objet du canal ETM+4 (attribut spectral), de l'entropie (attribut textural) et de l'intensité (attribut de couleur). Des tests

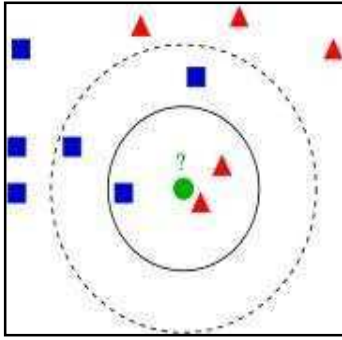


**Figure 33. Effet de l'entropie-attribut de texture**

ETM+4. Enfin l'intensité a été retenue comme attribut de couleur car elle exprime mieux la luminosité que les valeurs moyennes des pixels dans un objet des trois canaux utilisés.



**Figure 35. Effet de la valeur max des pixels d'ETM+ 4-attribut spectral**



**Figure 36 : Principe de classification par la méthode des k plus proches voisins**

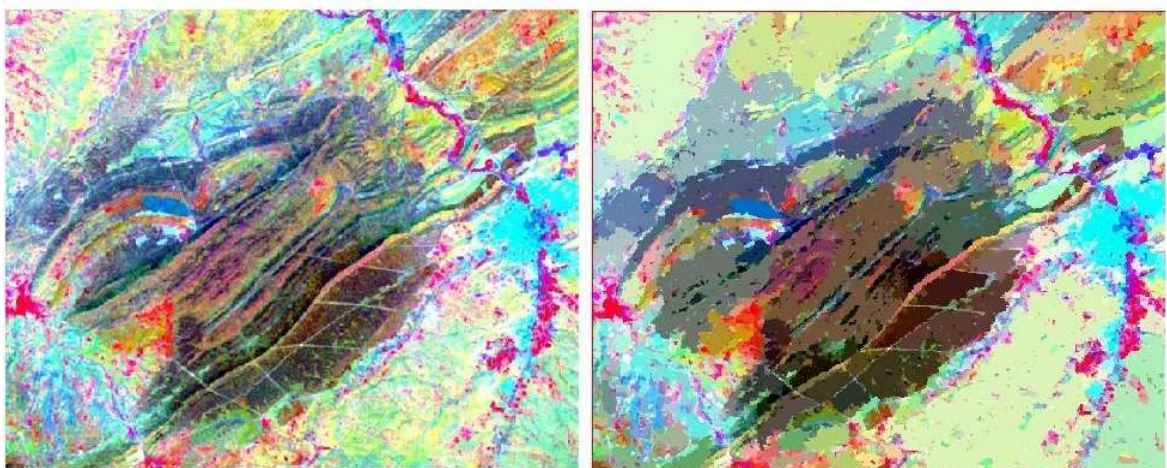
*La zone d'entraînement (cercle vert) devrait être classée soit dans la première classe (carrés bleus) soit dans la seconde classe (triangles rouges). Si  $k=3$ , elle sera classée dans la seconde classe parce qu'il ya deux triangles et seulement un carré dans le cercle. Si  $k = 5$ , elle sera classée dans la première classe (3 carrés et 2 triangles).*

automatique a donné des résultats relativement similaires à ceux obtenus par sélection personnelle sauf pour les attributs spectraux où toutes les valeurs minimales, moyennes et maximales des pixels dans un objet des trois canaux ont été sélectionnées.

Globalement, les attributs spatiaux de forme et de compacité semblent performants pour toutes les caractéristiques alors que les attributs de texture comme l'entropie et la variance semblent moins performants sauf l'entropie qui semble mettre en évidence les pineraies très claires et/ou fragmentées. Enfin, l'intensité (attribut de couleur) semble intéressante pour une séparation entre les trois types d'occupation qui dominent le paysage étudié, en l'occurrence les futaies de pin d'Alep, le matorral arboré et le matorral.

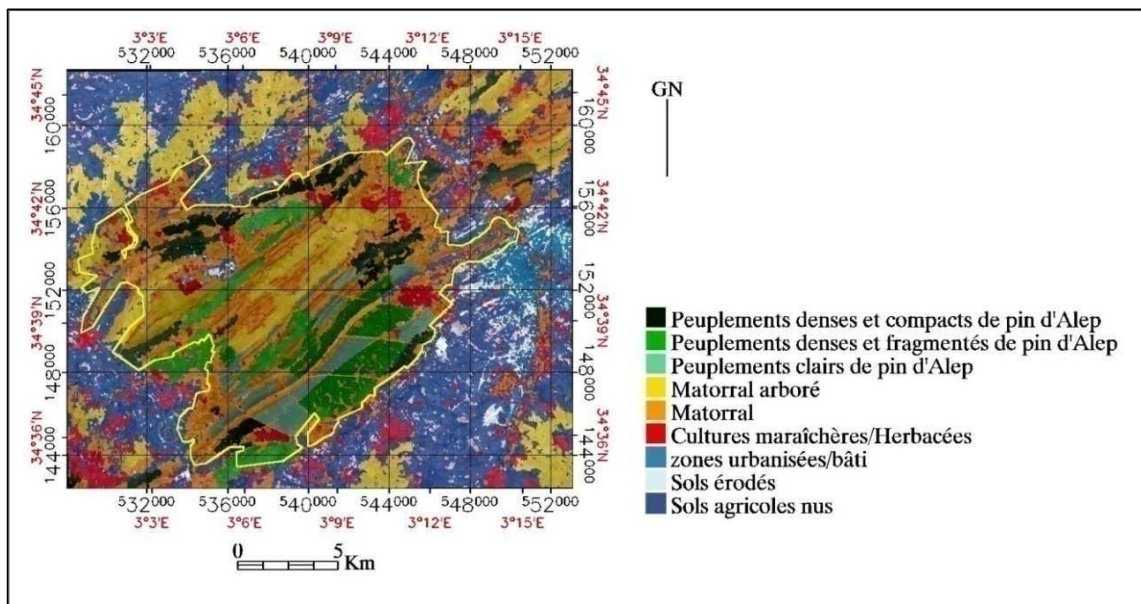
## 2.4. Résultats

La figure 37 permet d'apprécier l'image avant et après segmentation. Des zones confuses et hétérogènes sont homogénéisées simplifiant le contenu de l'image et le réduisant en nombre restreint d'objets géographiques très contrastés. La figure 38 est la carte issue de la classification par objet par la méthode des k plus proches voisins.



**Figure 37. Image ETM+ 432 avant segmentation (à gauche) et après segmentation (droite)**

Des unités physiologiques se sont individualisées tout en conservant l'information spatiale recherchée. Des peuplements denses dominants en continu sur une grande surface se sont constitués en une seule classe tout comme les peuplements denses et fragmentés et les peuplements clairs. En revanche, les formations de dégradation de type matorral et matorral arboré et l'agglomération urbaine de Djelfa se sont bien individualisés mais accompagnées de certaines confusions avec les enclaves pour les premières et les sols nus avec la troisième classe.



**Figure 38. Classification par objet de l'image ETM+ de Landsat du 23 mars 2001**

L'analyse orientée objet présente toutefois, un problème d'évaluation des résultats de la classification qui est plus compliquée qu'une évaluation de la classification par pixel utilisant une matrice de confusion.

Actuellement, la matrice de confusion traditionnelle ou K-Factor pour l'évaluation des classes est possible mais trop simple pour l'évaluation de l'objet. Un simple grand objet mal classifié a un impact énorme sur le facteur K en comparaison à beaucoup de petits objets correctement classés.

Bien sûr, l'évaluation par contrôle visuel, comme appliquée en photogrammétrie est toujours possible. Avant l'estimation de l'exactitude globale, les objets individuels sont évalués sur leurs traits spécifiques [Kok *et al.* 2000]. C'est cette dernière méthode qui a été adoptée pour évaluer la classification orientée objet qui, globalement traduit à l'échelle paysagère l'état spatial réel de la zone d'étude.

## 2.5. Discussions

L'analyse orientée objet d'images Landsat peut être très intéressante pour la caractérisation des espaces forestiers semi arides hétérogènes à condition de bien mener les deux étapes qui la composent, la segmentation et la classification. Cette caractérisation sera toutefois accompagnée d'une perte d'information dont la moins utile possible devra être sacrifiée. Dans de tels milieux forestiers, ce sont les structures et la composition en essences dominantes qui doivent être identifiées. Une attention particulière doit être prêtée dans ce cas au facteur d'échelle qui semble être déterminant dans la segmentation.

Des valeurs comprises entre 45 et 50 semblent convenables pour une meilleure segmentation et donc pour une meilleure classification. Des valeurs en dessous de 45 génèrent beaucoup trop d'objets de petite taille et l'image résultante est difficilement discernable de l'image initiale alors que des valeurs en dessus de 50 génèrent trop peu d'objets de grande taille se traduisant par une perte d'information et de caractéristiques d'intérêt. Ainsi et pour des valeurs de 55 ou 60, les matorrals et les matorrals arborés forment un seul grand objet tout comme les futaies claires et les futaies denses.

Le choix des attributs est déterminant dans la classification puisque certains attributs peuvent être plus utiles que d'autres. Pour l'image Landsat, les attributs de texture semblent n'apporter aucune information utile alors que les attributs spatiaux de forme, compacité, et élongation semblent performants pour toutes les caractéristiques qui dominent, telles les forêts de pin, le matorral arboré, le matorral et les vides.

La faible performance des attributs de texture provient de la faible résolution spatiale (30m). En effet, pour les couverts forestiers fermés et au delà d'une résolution de 10-15 mètres, les images ne contiennent quasiment plus d'information texturale sur les peuplements sauf pour les boisements lâches dont la structure semble être appréhendée à partir d'indicateurs de texture [Durrieu, 1994]. Ceci explique peut être l'intérêt de la texture pour appréhender les futaies très claires ou fragmentées de pin d'Alep.

La bonne performance des attributs spatiaux peut s'expliquer par la structure spatiale des différents types de peuplement où on assiste dans le synclinal de Djelfa à des phénomènes de régression et de fragmentation se traduisant par des couloirs et où s'alternent forêts, matorrals arborés et matorrals d'où l'utilité de l'attribut longueur ou élongation. En plus, les transitions entre ces différents types ne sont pas toujours nettes et

des attributs comme la compacité ou la surface contribuent plus ou moins à homogénéiser leur contenu par le type d'occupation dominant.

Les attributs spectraux et de couleur conservent toute leur importance dans les milieux forestiers hétérogènes, en particulier la valeur maximale des pixels dans un objet du canal infrarouge et l'intensité qui permettent une séparation entre types de couverts par densité et par composition en essences. Enfin, le choix du paramètre k de l'algorithme de classification doit être basé sur la performance de chacune de ses valeurs. Les valeurs 3 et 5 donnent généralement de meilleurs résultats.

La classification par objet semble apporter de la transparence, la simplicité et la netteté à la carte d'occupation du sol. Visuellement, l'effet «sel-poivre» souvent observé dans les classifications par pixel a disparu alors que les limites des objets sont devenues plus tranchées. Ces mêmes observations ont été déjà rapportées par certains auteurs [Aardt van, 2004].

Pour apprécier visuellement la qualité de la classification orientée-objet, une classification par pixel (méthode du max de vraisemblance) a été réalisée. Les zones tests sont les mêmes que celles utilisées dans la méthode orientée objet. La figure 39 représente la carte d'occupation du sol qui en résulte et dont la précision globale est de 90%. Le tableau 15 représente la matrice de confusion de cette classification.

La précision est bonne mais des confusions sont observées entre forêts claires et matorral/matorral arboré, entre le bâti et les sols nus érodés et particulièrement entre les vides et le matorral. Dans le premier cas, la réflectance dominante est celle du sous-bois qui est de même composition que les formations de matorral alors que les sols nus érodés

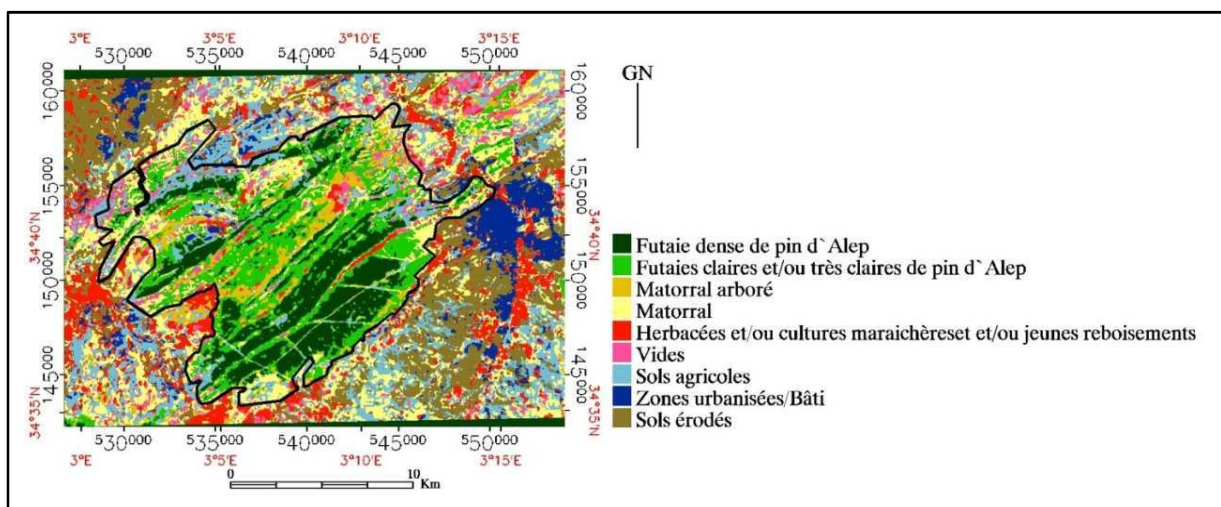


Figure 39. Classification par pixel de l'image ETM+ de Landsat du 23 Mars 2001.

ont de fortes radiométries et se confondent souvent avec le bâti. Seules les classes végétation active (herbacés, cultures maraîchères, jeunes reboisements), sols nus érodés et à moindre degré les futaies denses sont correctement classées. Probablement, la nomenclature utilisée et la description même de ces classes ont engendré des confusions inattendues particulièrement entre matorral arboré et vides.

En effet, les vides ne sont pas absolus mais se présentent souvent avec un très faible couvert arboré, arbustif ou herbacé, et une reprise de la végétation en période pluvieuse modifie leur physionomie. Mais ce sont les transitions floues entre les différents types de couverts forestiers et où la frontière est une surface qui comprend des caractéristiques de deux types connexes qui accentuent les confusions, alors que ces limites sont nettement plus tranchées dans la classification orientée objet où les surfaces de transitions sont réduites à des limites linéaires.

**Tableau 15. Matrice de confusion de la classification dirigée par la méthode du max vraisemblance**

CLASSE	FTDS	FTCL	MATARB	MAT	HR/CM/RB	VD	SAG	ZNUR	SLNE	TOTAL
N.CL	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
FT. DS	<b>96.30</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	11.02
FT.CL	1.85	<b>88.10</b>	2.86	9.68	0	0	0	0	0	8.90
MAT.ARB	0	4.76	<b>85.71</b>	9.68	0	5.56	12.50	0	0	8.05
MAT	0	7.14	5.71	<b>54.84</b>	0	16,65	25	0	0	6.14
HR/CM/RB	0	0	0	0	<b>100</b>	0	0	0	0	6.78
VD	0	0	0	25.81	0	<b>77.78</b>	0	0	0	4,66
SAG	1.85	0	5.71	0	0	0	<b>62.50</b>	0	0	2,75
ZNUR	0	0	0	0	0	0	0	<b>94.25</b>	0	34,74
SLNE	0	0	0	0	0	0	0	<b>5.75</b>	<b>100</b>	16.95
<b>TOTAL</b>	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100

*N.CL: non classés ; FTDS : futaie dense ; FTCL : futaie claire ; MAT ARB : matorral arboré ; MAT : matorral ; SAG : sols agricoles ; VD : vides ; HR/CM/RB: herbacées/cultures maraîchères/reboisements ; SLNE : sols nus érodés ; ZNUR : zone urbaine (bâti)*

La bonne performance de la classification orientée-objet est accompagnée d'une homogénéisation telle que certains objets sont fusionnés avec d'autres qui sont différents. Les enclaves forestières par exemple qui sont visibles dans la classification par pixel seront complètement fusionnées avec les formations de matorral dans la classification par objet.



Il semble que deux principaux attributs sont liés à cet état, l'un spectral et l'autre spatial. Les enclaves forestières sont des portions habitées de la forêt où se côtoient différentes cultures maraîchères et arboricoles. L'environnement immédiat de ces enclaves n'est jamais représenté par des forêts mais par des formations basses. En période printanière pluvieuse (tel notre cas), une végétation active apparaît là où souvent le sol est nu ce qui attribue à ces surfaces une physionomie similaire à celle des formations forestières basses.

L'effet du contexte spatial est aussi observé chez d'autres classes: les coupes par bandes ou par petites trouées ainsi que les parcelles très claires sont fusionnées avec les peuplements denses qui dominent en surface. Le même effet mais inverse est observé chez les futaies claires où des parcelles denses sont dissoutes dans les parcelles claires qui dominent. Les vides disséminés en petites taches à travers les différentes formations forestières disparaissent au profit de ces dernières.

Dans tous les cas, le contexte spatial s'est manifesté comme étant un attribut très important dans la classification et a produit des résultats plus réalistes que ceux générés par un traitement individuel de pixels indépendamment de leur voisinage. En effet, c'est l'objet dominant en surface qui assigne à la classe d'occupation du sol son aspect physionomique permettant de satisfaire une des conditions de l'analyse paysagère pour l'aménagement forestier [**Bencherif, 2008b**].

Apparemment, l'analyse orientée objet a pu résoudre cette problématique qui se pose pour les milieux forestiers semi-arides hétérogènes au moment où la matérialisation des contours des objets recherchés est considérée comme une étape importante dans le processus d'interprétation automatique d'une image [**Desachy, 2001**]: Les limites (le contenant) floues et parfois enchevêtrées des différentes compositions du paysage sont devenues plus nettes alors que le contenu est caractérisé par l'objet dominant<sup>6</sup>.

Donc la classification d'images en unités homogènes avec des limites nettes qui était impossible [**Marceau, 1994**] deviendrait davantage une réalité si elle est associée à une nomenclature appropriée permettant de contourner les quelques confusions observées. Certes, Il en résultera pour la méthodologie autant de gain en thématique que de perte en généralisation et reproductibilité [**Puech, 2000**] mais servira de base pour la caractérisation de l'espace forestier à l'échelle locale et régionale.

---

<sup>6</sup> Or la grande majorité des études ont toujours caractérisé la mosaïque d'occupation du sol par le type d'occupation dominante [**Shermann et Baudry, 2002**].

Mais au delà de cette performance technique, un autre aspect en relation avec l'aménagement forestier doit être abordé: la place de l'analyse paysagère pour l'aménagement forestier des zones semi-arides et l'apport de la méthode orientée-objet pour l'analyse paysagère de ces zones.

### 2.5.1. L'analyse paysagère pour l'aménagement forestier des zones semi-arides

Classiquement, l'aménagement forestier manipule des arbres individuels au niveau de la parcelle (peuplement) alors que l'aménagement forestier à l'échelle paysagère ou régionale implique la gestion et le suivi de dizaines de parcelles. Pour aborder un tel problème, il est nécessaire de disposer d'un système de travail qui aborde l'échelle et la complexité du problème. L'approche systémique fournit un tel système en regroupant les arbres en peuplements et les peuplements en paysages etc. Ces derniers sont les objets géographiques d'intérêt qu'il faut identifier et cartographier.

En effet, la réalisation de certains objectifs de protection paysagère et de conservation de la biodiversité nécessite de lier l'aménagement à des niveaux plus hauts à l'échelle régionale ou globale. L'analyse paysagère est seule capable de satisfaire une telle condition en délimitant des objets homogènes de surfaces importantes. D'autre part, cette cartographie à l'échelle locale ou régionale est une base d'information sur la ressource qui soit immédiatement utilisable par les gestionnaires et les utilisateurs et qui permette de se faire une idée sur la disponibilité et de l'évolution de cette ressource sur des étendues de dimensions variables [Bonn et Rochon, 1996].

L'aménagement et le suivi de l'espace forestier en zones semi-arides doivent être menés à plusieurs niveaux pour garantir la réalisation des objectifs à travers une variété d'écosystèmes forestiers. A l'échelle intra-peuplement, les opérations sylvicoles, d'exploitation et de plantation sont de courte durée et ont un effet direct sur des arbres individuels à l'intérieur du peuplement. A l'échelle du peuplement, les traitements sylvicoles conduisent pendant plusieurs décennies vers la structure souhaitée. Enfin à l'échelle du paysage, différents traitements sylvicoles appliqués à plusieurs peuplements déterminent avec le temps les éléments paysagers d'une structure forestière.

Ce dernier niveau souvent négligé par les forestiers est le point de passage entre au moins le niveau arbre et le niveau forêt dans le système hiérarchique et peut refléter non seulement les effets positifs des actions sylvicoles mais aussi les effets négatifs d'actions anthropogènes (défrichements) et naturelles (incendies, évolution régressive).

Donc, l'aménagement paysager doit être considéré comme une nouvelle forme de gestion forestière des zones semi-arides et où l'aménagement classique à l'échelle du peuplement doit être perçu comme une simple mais très importante étape du processus global d'aménagement paysager.

La principale composante de l'analyse paysagère est la délimitation de zones (protégées, urbaines) sur cartes, photos et images satellites [Bradley et Hammond, 2006]. La classification orientée-objet a permis un zonage du territoire étudié et de son environnement immédiat (zones urbaines, agricoles etc.). Or il existe une multiplicité de zonages et toute délimitation devra donc être validée par l'analyse des zones délimitées et des différenciations entre ces zones faisant intervenir des connaissances extérieures autres que celles apportées par l'imagerie satellitaire (connaissance du terrain, raisonnement personnel, relief).

Dans la forêt Senalba chergui, cette délimitation est achevée à l'intérieur d'un espace forestier hétérogène où sont distinguées divers types d'occupation, particulièrement des pineraies continues denses, des pineraies fragmentées, des matorrals arborés à chêne vert et genévrier, des matorrals à romarin, des herbacées à alfa. L'environnement immédiat auquel doit être prêtée une attention particulière, est représenté essentiellement par l'agglomération urbaine de Djelfa et les terrains agricoles. Donc, c'est tout un réseau d'objets géographiques ou plutôt des faciès paysagers qui sont identifiés avec des caractéristiques de forme et de surface.

Ces faciès paysagers sont des indicateurs environnementaux permettant de prévoir leurs dynamiques. En effet, la carte thématique (Fig.38) met en évidence la dominance des pineraies continues et compactes vis-à-vis des pineraies claires ou fragmentées d'une part des formations de matorral donnant l'impression d'un rétrécissement pour les premières et une propagation tout azimut des secondes. Cette configuration écologique doit être suivie et surveillée régulièrement avant de s'empirer de manière irréversible et servir de référence pour la conception de modèles écologiques spatiaux à espérer établir à l'avenir.

Entre-temps, certaines mesures adéquates doivent être prises pour freiner ou au mieux ralentir l'évolution régressive. Et c'est aux plans d'aménagement à l'échelle du peuplement qu'incombe cette mission où la priorité serait la conservation de nœuds de pineraies adultes ou vieillissantes à travers le paysage forestier. Certains recommandent que ces nœuds soient distants de 2 à 3 km à travers tout le paysage forestier avec une

surface minimale comprise entre 50 et 100 hectares [Bradley et Hammond, 2006]. En cas de non disponibilité de vieilles pineraies, il faudra considérer et conserver les moins jeunes classes d'âges.

Il est clair que ce sont les méthodes d'aménagement qui traitent des peuplements qui vont programmer dans l'espace et le temps les opérations sylvicoles appropriées pour façonner à court terme le peuplement et à long terme l'unité paysagère. Seulement dans ces zones à protéger, la dimension des parcelles<sup>7</sup> devrait être très limitée et comprise entre 5 et 10 hectares. Il nous semble que la méthode de la futaie régulière par très petites parcelles et/ou la futaie par parquet représentent des alternatives intéressantes en regard de la méthode jardinée.

### 2.5.2. Apport de la méthode orientée-objet pour l'analyse paysagère

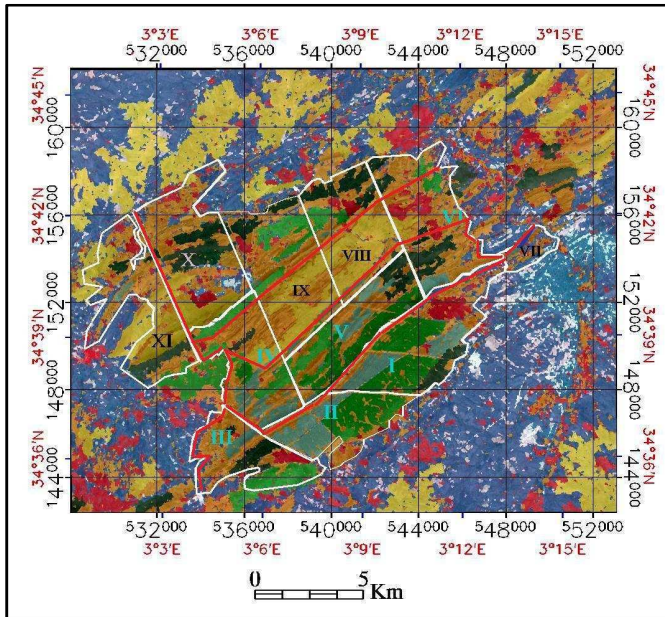
Les méthodes d'aménagement proposées pour les zones forestières semi-arides étaient incompatibles avec la réalité terrain. En effet, ces aménagements présentaient invariablement les forêts plus homogènes qu'elles ne le sont en réalité [Grim, 1989]. Cette présentation était pourtant à l'échelle du peuplement. L'approche orientée-objet a tendance elle aussi à homogénéiser les forêts mais à l'échelle du paysage ce qui est fondamentalement différent puisque le sens même de l'approche paysagère est le critère d'homogénéité.

L'analyse orientée objet a dévoilé à travers cette homogénéisation la répartition précise des forêts par rapport aux formations forestières. Cette configuration spatiale permet un redécoupage objectif en séries forestières. Le zonage actuel qui divise la forêt en 11 séries paraît un peu exagéré au regard de l'état des surfaces.

La délimitation des unités physiologiques fait apparaître automatiquement des zones très contrastées pouvant être délimitées en séries forestières si l'on tient compte que ces dernières sont des unités de traitement donc d'aménagement et d'objectif. La figure 40 illustre l'ancien zonage auquel on a superposé un zonage provisoire qui prend en compte les caractéristiques paysagères au moment de la prise de vue.

---

<sup>7</sup> A propos de parcellaire, on doit évoquer avec regret l'interruption de la méthode du pré-aménagement forestier qui a été élaborée par Grim [1989] et qui propose à juste raison un parcellaire géométrique de 10 hectares pour les forêts de plaines et peu déclives et qui aurait pu, avec quelques remaniements, accomplir cette délicate fonction de production et protection.



**Figure 40. Carte de l'ancien zonage (en blanc) et proposition d'un nouveau zonage (en rouge)**

Le problème de suivi et de surveillance des forêts semi-arides doit être appréhendé en fonction de sa dimension spatiale. En effet, ces forêts sont soit dispersées à travers d'autres paysages non forestiers (Tell algérien), soit isolées au milieu d'immenses paysages steppiques (Atlas algérien). L'approche classique s'est avérée inefficace dans les conditions de régression forestière observée et seule l'approche paysagère semble être en mesure de réaliser ces objectifs.

L'analyse orientée objet délimite des types physiologiques d'occupation du sol correspondant chacun à un ensemble homogène de peuplements. Ce critère d'homogénéité autorise une analyse<sup>8</sup> paysagère non seulement pour la zone d'étude mais aussi pour d'autres territoires similaires où l'étude du peuplement forestier se heurte fréquemment à des difficultés pratiques: accessibilité difficile, délimitation malaisée entre zones homogènes et non-homogènes mais surtout la difficulté d'acquérir et de conserver une vision globale<sup>9</sup>.

Enfin, la classification par objet s'apparente à une stratification forestière. Complétée par d'autres informations écologiques (type de sol, exposition, composition floristique ...), elle permettra de définir une typologie paysagère où chaque unité constitue une unité d'analyse. Ceci est très important pour l'identification du dynamisme forestier et par conséquent l'identification et la localisation des cibles de restauration [**Lapierre et Harvey, 2002**]. Enfin, cette stratification reflète la structure spatiale des éléments du paysage forestier au moment où il est de plus en plus reconnu que cette structure spatiale est un facteur significatif pour la détermination de la biodiversité [**Vogiatzakis et al. 2003**].

<sup>8</sup> Une telle analyse sera de nature descriptive qui consiste principalement en une représentation cartographique des éléments paysagers composant le territoire forestier.

<sup>9</sup> Le principal avantage de la télédétection satellitaire est la perception simultanée d'une vaste étendue [**Bonn et Rochon, 1996**].

## ***Chapitre troisième***

### ***Estimation des potentialités de production par intégration de données ETM+ de Landsat***

#### **3.1. Problématique**

Dans la pratique forestière, le volume bois au niveau du peuplement est estimé à travers trois méthodes : - l'inventaire traditionnel terrain, - la photo-interprétation - la télédétection. Mais bien qu'il est admis que cette dernière ne peut pas et ne pourra peut être jamais fournir des mesures dendrométriques absolues [Renaud, 2000], elle offre certains avantages comme la répétitivité, la corrélation potentielle entre biomasse et rayonnement électromagnétique et surtout le cout réduit par rapport aux méthodes traditionnelles [Lu, 2006].

Pour toutes ces raisons, des méthodes ont été développées pour l'estimation de la biomasse (le volume tige est une partie de cette biomasse) comme les kNN (méthode des k nearest Neighbours ou des k plus proches voisins), les indices de végétation, les classifications de l'occupation du sol, la segmentation ou les régressions mais aucune méthode n'a été démontrée comme étant la plus appropriée [Labrecque *et al.* 2006].

Classiquement, le volume-tige d'un peuplement forestier est estimé à travers des inventaires qui emploient des méthodes d'échantillonnage statistiques utilisant des placettes terrain où les paramètres hauteur et diamètre à hauteur d'homme sont mesurés directement [Baccini *et al.*, 2004]. Cet échantillonnage peut être au hasard, systématique ou stratifié. Cette dernière méthode possède l'avantage d'être plus précise que les deux premières mais demeure difficile à réaliser sur terrain et exige des données suffisantes pour une stratification correcte de la zone étudiée.

Probablement, c'est la raison principale qui a conduit les forestiers à manifester une préférence pour l'échantillonnage systématique. Pourtant, l'utilisation de la télédétection pourrait cependant valoriser cette méthode puisque l'intégration des données d'échantillons terrain aux données satellitaires s'est montrée très avantageuse [Kleinn, 2002]. Dans ce même ordre d'idées, la majorité des méthodes utilisent des images de moyenne résolution spatiale comme Landsat [Bettinger et Hayashi, 2006].

Les systèmes traditionnels de stratification s'appuient sur les valeurs moyennes des paramètres dendrométriques comme la densité, la hauteur et la surface terrière [SIF, 1991]. Mais pour les peuplements aux canopées fermées, les données TM contiennent le moins d'information sur ces paramètres même si la relation radiométrie-volume est meilleure pour les conifères [Wulder et Seemann, 2003].

Donc, les classifications basées uniquement sur le diamètre ou sur la hauteur ne sont pas fiables avec de telles données satellitaires. En effet, les classifications basées sur la hauteur sont utilisées dans les inventaires régionaux au moyen de photos aériennes alors que celles basées sur le diamètre (surface terrière) sont utilisées dans les inventaires terrain. La densité de couvert ou le nombre d'arbres sont insuffisants et n'ont aucune signification pour l'estimation du volume tige : Ils seront plus utiles s'ils sont combinés avec d'autres caractéristiques dendrométriques [SIF, 1991].

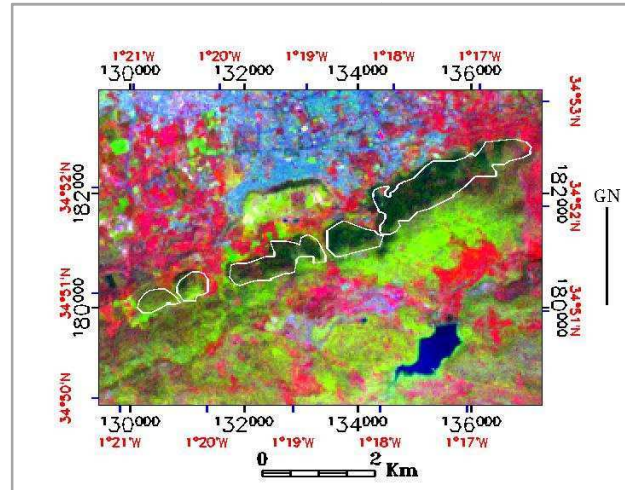
Les classifications de l'occupation du sol sont capables via la segmentation de l'espace spectral de former des classes homogènes pour les paramètres densité et hauteur [Bencherif, 2006]. Cependant pour mesurer ces variables (qui sont absolument nécessaires pour l'estimation du volume tige), il n'existe pas encore un procédé autre que les mesures terrain. L'objectif premier dans ce cas devrait être la mise au point de techniques avec un échantillonnage réduit au strict minimum (techniques au coût très réduit).

Cette section décrit une approche méthodologique de calcul du volume tige de la forêt de Tlemcen qui est un peuplement adulte équienne de pin d'Alep avec des densités de couvert différentes. L'approche est basée sur les données ETM+ de Landsat d'un côté et sur les données terrain issue d'inventaire par échantillonnage stratifié de l'autre : La classification par pixel est utilisée pour l'homogénéisation des classes spectrales et l'identification des strates en fonction du paramètre densité alors que les résultats de l'inventaire terrain sont intégrés au calcul du volume.

Sur une image classée, la réflectance des pixels de chaque classe représente la réflectance moyenne des arbres dans une placette comparable en surface au pixel. L'hypothèse est que si une classe spectrale est homogène en hauteur, âge et densité, le cubage d'un nombre réduit de placettes sera suffisant pour calculer le volume tige moyen par unité de surface.

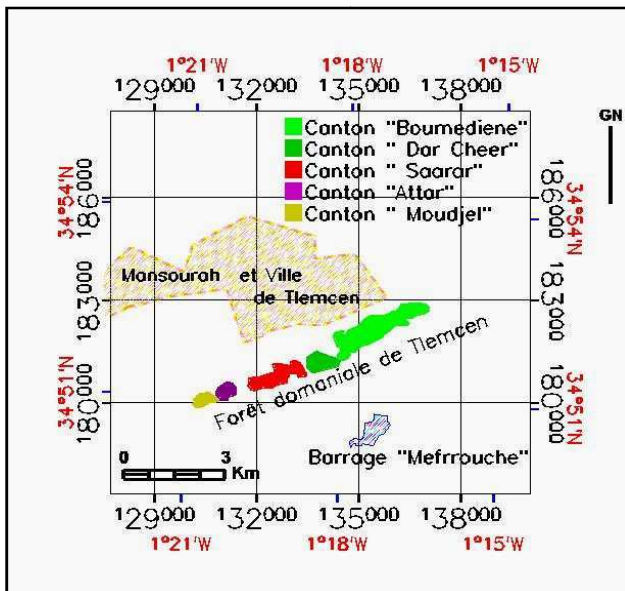
### 3.2. Données satellitaires

Une image ETM+de Landsat extraite de la scène 198r36 et acquise le 19 Mai 2002 a été utilisée. (Fig.41)<sup>1</sup>. Le choix de la date optimale de l'image (mois de Mai) est dicté par la nécessité d'obtenir une image sans nuages, et de reconnaître tous les éléments du terrain en évitant au maximum les confusions. L'image est acquise en niveau 9 correspondant à un niveau de prétraitement précis ou les corrections



**Figure 41. Localisation de la zone d'étude sur l'image Landsat (après stretch correlation)**

bidimensionnelles sont faites avec des points d'amers. Mais la RMS de ces corrections est de 1 pixel [Mihai et al. 2006]. Une nouvelle correction était donc nécessaire pour ramener cette erreur à moins d'un demi-pixel (0.45) soit une erreur de positionnement de 14m. Les corrections radiométriques n'ont pas été faites en raison de la très faible superficie traitée (300 hectares).



**Figure 42. Localisation et Zonage en cantons de la forêt de Tlemcen**

de la zone d'étude, de prendre un nombre élevé de classes puisque leur regroupement en classes thématiques produit le même résultat.

### 3.3. Classifications de l'image

Après un masquage géométrique de la zone d'étude (Fig.42), l'image (Une composition<sup>2</sup> en fausses couleurs ETM+432) a été soumise à un découpage statistique par la méthode des nuées dynamiques (Isodata). Le nombre maximum de classes à obtenir est redéfini à chaque nouvelle classification.

Il a été constaté après plusieurs tests qu'il est inutile, dans les conditions

<sup>1</sup> La scène est téléchargée du site GLCF, Maryland-USA. <http://glcf.umiacs.umd.edu>

<sup>2</sup> Un ratio PRI/R ; ETM+4/ETM+3 a produit le même résultat.



Pour affiner les résultats et apprécier la précision de la carte finale, la classification non dirigée a été suivie d'une classification dirigée par Max. de vraisemblance. La validité d'une telle classification dépend de la qualité de l'échantillonnage et de la construction des classes.

*Remarque: Tous les traitements de l'image ont été réalisés grâce au logiciel ENVI.3.5.*

### **3.3.1. Echantillonnage**

L'analyse des tables de séparabilité a permis de redéfinir des parcelles d'entraînement qui se distinguaient très bien, alors que celles qui se distinguaient mal ont été regroupées en une classe commune.

### **3.3.2. Construction des classes**

La classification finale est le résultat d'une démarche itérative : chaque résultat de classification est évalué et les classes redéfinies si nécessaire. A l'issue de cette démarche itérative, une classification en 6 classes a été construite.

Les six classes sont : futaie très dense<sup>3</sup> (**FTD**), futaie dense (**FD**), futaie claire(**FC**), Matorral (**MTR**), herbacées (**HRB**) et vides (**VD**). La précision de la classification dirigée est évaluée par une matrice de confusion.

### **3.3.3. Désignation et inventaire des pixels-échantillons**

Les résultats post-classification permettent d'obtenir des données sur la distribution du nombre de pixels par classe (strate) et d'identifier par leurs coordonnées les pixels échantillons qui feront l'objet de cubage. Partant de cette idée, deux variantes sont possibles : - utiliser les pixels faisant partie des zones d'entraînement utilisées dans la classification, - utiliser de nouveaux pixels échantillons à inventorier après avoir défini les strates.

Dans les deux cas, les pixels échantillons sont localisés par GPS. Sur terrain, les paramètres dendrométriques sont mesurés uniquement dans ces points de sondage de dimensions égales à la résolution spatiale de l'image, soit par exemple 30m\*30m ou 9 ares (0.09 ha)<sup>4</sup> pour Landsat-TM.

<sup>3</sup> La densité est exprimée par le degré de rapprochement des cimes (TD :>0.7 ; D :0.4-0.7 ; C :<0.4).

<sup>4</sup> Il faut remarquer que dans la pratique forestière, la surface des placettes varie entre 4 ares (0.04ha) et 10 ares (0.1ha) et que la forme des placettes n'intervient pas sur la précision du volume.

Appliquée sur le terrain, la méthode d'échantillonnage stratifié consiste à asseoir de manière systématique ou au hasard, les placettes-échantillons dans chaque strate thématique. Cependant et conformément aux règles de l'échantillonnage stratifié au hasard, des questions en relation avec l'affectation des pixels aux strates et l'intensité de l'échantillonnage dans chaque strate doivent être résolues [**Schreuder et al. 1993**]:

Dans cette étude, est utilisée l'assignation la plus commune (proportionnelle) où la distribution de l'échantillon est pondérée par la surface seulement. L'assignation est proportionnelle au ratio  $n/N$  où  $n$  est le nombre des unités de surfaces (en ha) dans une strate et  $N$ , le nombre total des unités dans toutes les strates.

Cette manière d'affectation est utilisée lorsque les variances des strates sont similaires ou lorsqu'il est impossible de les estimer avant l'échantillonnage. Le nombre d'échantillons à sélectionner par strate peut être déterminé de deux façons [**Schreuder et al. 1993**]:

– le taux d'échantillonnage et le nombre d'unités échantillons sont fixés avant l'inventaire. Dans cette approche, moins d'importance est donnée à la précision des calculs durant la phase de l'aménagement.

– Calculer le nombre d'unités pour une probabilité choisie et une erreur d'échantillonnage tolérée.

Dans cette étude, les zones d'entraînement utilisées dans la classification ont été inventoriées pour l'analyse de variance permettant de déterminer le coefficient de variation et l'erreur d'inventaire. Cette analyse permet une comparaison de la variance totale à celle des strates pour vérifier la viabilité de la stratification.

### **3.3.3.1. Stratification et analyse de variance**

La variance totale de la forêt peut être divisée en deux parties : variance inter-strates et variance intra-strates. Seule cette dernière (et l'erreur lui correspondant) est intéressante dans notre cas. Le schéma de calcul est représenté dans le tableau 16. Les calculs sont représentés dans le tableau 17 à partir des données terrains (Tab.18).

Le test F qui est positif permet de confirmer la viabilité de la stratification. Après avoir calculé le ratio ( $90.011/13.7869= 6.53$ ), on consulte la table de SNEDECOR et pour le point 5%, ligne 10 (12-2), la valeur de F est égale à 4.10 inférieure à 6.53 ce qui confirme les différences moyennes.

**Tableau 16. Inventaire par échantillonnage. Analyse simple de variance [Pardé et Bouchon., 1986]**

Origine de la variation	Somme des carrés des écarts	Degré de liberté	Variance	Ecart type des observations	Coefficient de variation	Ecart type de la moyenne (%)	
Variation totale	$\sum_1^n (x - \bar{x})^2 = \sum x^2 - \bar{x} \sum x$	Nb de placettes N moins un	$\sum x^2 - \bar{x} \sum x / n - 1 = V_T$	$\sqrt{V_T}$	Rapport en % de l'écart type à la moyenne	Colonne précédente divisée par $\sqrt{n}$	$S_T$
Variation entre strates	$\sum_i^m m_i \bar{x}_i^2 - \bar{x} \sum x$	Nb de strates M moins un	$\sum_i^m m_i \bar{x}_i^2 - \bar{x} \sum x / m - 1 = V_B$	$\sqrt{V_B}$			$S_B$
Variation des strates (résiduelle)	Différence entre les deux données ci-dessus soit R $\sum x^2 - \sum_i^m m_i \bar{x}_i^2$	N - m	$R / n - m = V_R$	$\sqrt{V_R}$			$S_{R < S_T}$

n : nombre total de placettes  
 m<sub>i</sub> : nombre de placettes dans chaque strate ;  
 m : nombre de strates  
 $\bar{x}$  : moyenne générale ;  
 $\bar{x}_i$  : moyenne dans chaque strate

Test F!! Voir si la décomposition en strates est valable en formant :  $\frac{V_B}{V_R}$  ( $V_B > V_R$ )  
 Se reporter à la table de SNEDECOR (1971) point 5%. En cas de test positif, on peut continuer et garder comme expression d'erreur à craindre pour une probabilité de 95% :  $\pm 2 S_R < \pm 2 S_T$

Par conséquent, et pour un seuil de probabilité de 95% et pour 11 degrés de liberté et 't' égal à 2.20, l'expression de l'erreur  $\pm 5.8 \times 2.20 = \pm 12.826\%$  doit être conservée (sans stratification, l'erreur serait de  $10.19 \times 2.20 = 22.418\%$ ). Il en résulte que le nombre de placettes satisfaisant cette erreur est de 22 placettes calculé par la formule  $n = (CV \times t / e)^2$  (1). Dans cette étude, 12 placettes seulement ont été prises en compte et par conséquent le volume à estimer sera affecté d'une erreur de  $\pm 14.66\%$  calculée par la formule:  $e = t \times CV / \sqrt{n}$  (2) où "t" est l'écart réduit pris de la table de Student.

**Tableau 17. Résultats de l'analyse de variance**

Origine de la Variation	SSD	df	S <sup>2</sup>	S	C <sub>v</sub>	MS
	m <sup>3</sup>		m <sup>3</sup>	m <sup>3</sup>	%	%
Variation totale	463.7522	11	42.1592	6.4900	40.68	10.19
Variation Inter-strates	180.1822	2	90.0911	9.4916	59.50	14.91
Variation Intra-strates (variation résiduelle)	124.0821	9	13.7869	3.7121	23.27	05.83

SSD : somme des carrés des écarts ; df: Degrés de liberté; S<sup>2</sup>: Variance; C<sub>v</sub>: Coefficient de Variation; S: écart-type des observations; MS: écart type moyen

**Nombre de placettes: 12; Nombre de strates: 3; moyenne totale: 15.95 m3**

### 3.3.3.2. Méthode de l'inventaire terrain

Le procédé adopté pour le cubage des arbres dans les 12 placettes-échantillons sélectionnées est basé sur la méthode de l'arbre modèle moyen dont le calcul, permet de déterminer le volume contenu dans chacune d'elles.

Ce choix peut être justifié par le fait que les mesures dans chaque cellule-terrain (la même dimension que le pixel) représentent la réponse spectrale moyenne de plusieurs arbres. Etant donné que le volume-bois dépend lui aussi du nombre d'arbres dans la cellule, on peut admettre que le volume dans chaque placette sera égal au produit du volume de l'arbre moyen par le nombre d'arbres dans la placette.

Le diamètre à hauteur d'homme de chaque arbre dans la placette a été mesuré avec un compas forestier, alors que la hauteur de deux ou trois arbres seulement de chaque classe de diamètre, est mesurée avec un dendromètre. Le centre de chaque placette a été positionné par des mesures GPS (Tableau.18).

#### Quelle précision espérer d'un GPS utilisé en mode standard sous couvert forestier ?

Des essais, réalisés sous différents types de couverts forestiers (mises à blanc, jeunes plantations, pessières de différents âges, hêtraies, taillis sous futaie) ont permis d'évaluer l'influence de ce couvert sur la précision du positionnement et de la navigation réalisés à l'aide d'un GPS de type GARMIN 12XL utilisé en mode simple (sans correction différentielle).

Les niveaux d'erreurs qui sont cités dans ces résultats correspondent à des erreurs à craindre pour un niveau de confiance de 95 %.

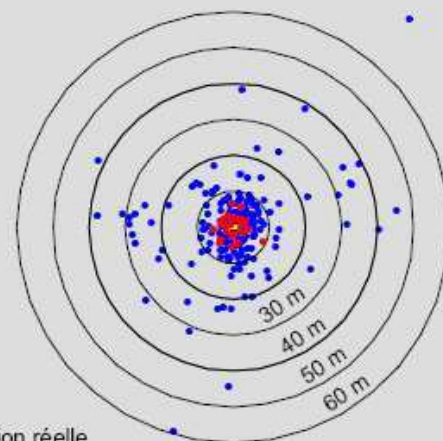
#### Précision du positionnement

Les erreurs de positionnement varient de 3 à 15 m en terrain découvert, pour autant que l'on soit suffisamment éloigné d'une lisière (de 20 à 30 m).

Les erreurs observées en bordure de trouées ou sous le couvert des peuplements varient de 5 à 20 m lorsque la disposition et le nombre des satellites sont optimaux. Ces erreurs peuvent atteindre 75 m sous couvert forestier lorsque les satellites potentiellement visibles sont moins nombreux et leur disposition moins favorable.

#### Précision de la navigation

La fonction de navigation du récepteur GPS permet de s'approcher de la cible avec une marge d'erreur de l'ordre de 10 à 15 m en l'absence de couvert forestier. Les erreurs de navigation peuvent atteindre 35 à 50 m en présence d'un couvert forestier.



- Position réelle
- Absence de couvert forestier
- Présence d'un couvert forestier

Influence du couvert forestier sur l'importance des erreurs observées lors d'un positionnement (conditions de réception favorables).

[D'après Lejeune, 2001]

A cause de ces erreurs à craindre sur le positionnement par GPS et sur la RMS des corrections géométriques, les placettes ont été assises au milieu de secteurs homogènes en ce qui concerne la densité et ce sur un rayon d'au moins 100m par rapport aux secteurs voisins différents

Tableau 18. Paramètres Physiques et dendrométriques des placettes d'inventaire

Strate	Nombre de placettes	Coordonnées géographiques (centre de la placette)						n	$\sum g$ m <sup>2</sup>	$g_m$ m <sup>2</sup>	$d_m$ m
		Longitude (w)			Latitude (N)						
		deg	min	sec	deg	min	sec				
Très dense	1	1	17	53.21	34	52	12.00	42	2.92	0.069	0.30
	2	1	17	59.24	34	52	26.60	45	3.15	0.070	0.30
	3	1	20	19.69	34	51	15.06	38	3.70	0.097	0.35
	4	1	20	24.49	34	51	11.23	61	3.06	0.050	0.26
Dense	5	1	18	36.43	34	51	38.95	30	3.58	0.120	0.39
	6	1	14	36.32	34	53	44.80	30	3.90	0.130	0.41
	7	1	19	13.30	34	51	26.80	30	3.83	0.127	0.40
	8	1	18	37.49	34	51	44.81	26	2.96	0.113	0.38
	9	1	19	9.62	34	51	33.57	28	5.18	0.185	0.48
	10	1	18	49.60	34	51	30.37	25	4.09	0.163	0.45
Clair	11	1	17	16.33	34	52	24.00	18	3.70	0.205	0.50
	12	1	19	19.07	34	51	33.70	20	2.76	0.115	0.38

$n$  : nombre d'arbres dans la placette ;  $\sum g$  : surface terrière totale des arbres de la placette  
 $g_m$  : surface terrière moyenne de la placette ;  $d_m$  : diamètre moyen

Les trois principales variables nécessaires pour le calcul du volume tige sont le diamètre, la hauteur et le nombre d'arbres. Le schéma de calcul est le suivant :

$$V_p = v \times n \quad (3)$$

$V_p$  : volume tige de la placette  $i$  (m<sup>3</sup>) ;  $n$  : nombre d'arbres dans la placette ;  $v$  : volume de l'arbre modèle moyen dans la placette (m<sup>3</sup>).

$$v = \sum v_i ; v_i = g_i \times h_i \quad (4)$$

$v_i$  : volume (m<sup>3</sup>) des billons de l'arbre modèle moyen ;  $g_i$  : surface terrière au milieu de chaque billon (m<sup>2</sup>) ;  $h_i$  : hauteur du billon (m).

Les paramètres moyens de l'arbre modèle sont le diamètre à hauteur d'homme et la hauteur moyenne. Cette dernière est prise directement de la courbe des hauteurs de chaque placette. Le diamètre moyen est calculé à travers la surface terrière:

$$\sum g/n = g_m ; g_m = \pi \times d_m^2/4 \quad (3) \Rightarrow d_m = \sqrt{4 \times g_m / \pi} \quad (5)$$

$d_m$  : diamètre moyen (m) ;  $\sum g$  : surface terrière totale des arbres de la placette (m<sup>2</sup>) ;  $n$  : nombre d'arbres dans la placette ;  $g_m$  : surface terrière moyenne de la placette (m<sup>2</sup>).

Après avoir déterminé le diamètre et la hauteur moyens, il faut chercher un arbre avec les mêmes mensurations, l'abattre<sup>5</sup> et calculer son volume par la formule commerciale d'Hubert par billons successifs de 2 mètres de longueur. Cependant, il n'est pas toujours facile de trouver un arbre avec les dimensions idéales (calculées). Dans ce cas, il est remplacé par un arbre ayant les dimensions les plus proches possibles : Ce sera l'arbre modèle réel. Les résultats sont présentés dans le tableau 19.

**Tableau 19. Paramètres de l'arbre modèle idéal et l'arbre modèle réel (h<sub>m</sub> and d<sub>m</sub>)**

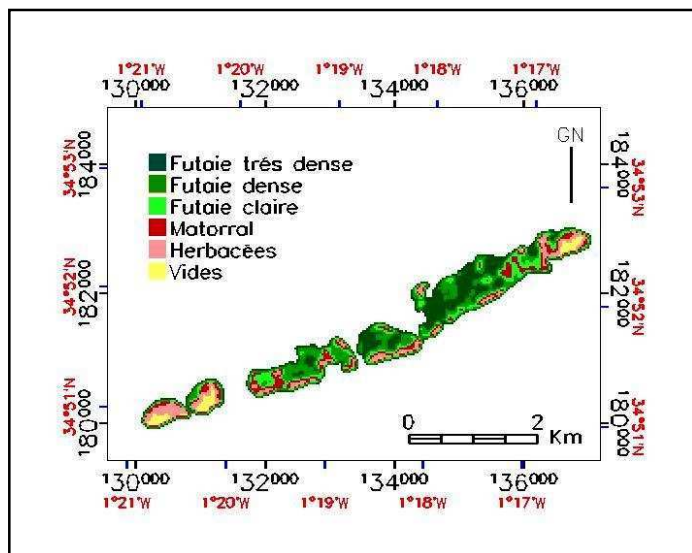
Strate	Nombre de placettes	Nombre d'arbres dans la placette	Paramètres de l'arbre modèle idéal		Paramètres de l'arbre modèle réel		V <sub>mm</sub> (m <sup>3</sup> )	V <sub>mr</sub> (m <sup>3</sup> )	V <sub>pr</sub> (m <sup>3</sup> )
			D <sub>1,30</sub>	H	D <sub>1,30</sub>	H			
			cm	m	cm	m			
Très dense	1	42	30	10.70	29.6	11.20	0.414	0.323	13.556
	2	45	30	10.40	29.70	11.00	0.316	0.319	14.355
	3	38	35	10.50	31.40	10.25	0.434	0.341	12.958
	4	61	26	8.80	25.50	9.20	0.214	0.216	13.176
Dense	5	30	39	12.30	38.85	12.50	0.612	0.617	18.510
	6	30	41	12.00	40.10	11.60	0.661	0.613	18.390
	7	30	40	12.10	40.50	12.75	0.633	0.684	20.520
	8	26	38	12.15	38.60	11.50	0.575	0.560	14.560
	9	28	48	14.00	48.20	13.50	1.038	1.016	28.448
	10	25	45	13.10	45.00	12.80	0.866	0.850	21.250
Clair	11	18	50	12.25	46.8	12.90	1.002	0.924	16.6320
	12	20	38	12.00	37.80	11.75	0.568	0.552	11.541

V<sub>pr</sub> : Volume réel contenu dans la placette ; V<sub>mr</sub> : volume moyen de l'arbre modèle réel  
 V<sub>mm</sub> : Volume moyen de l'arbre modèle idéal

### 3.4. Résultats

La précision totale de la stratification (Fig.43) est donnée par la matrice de confusion (Tableau.20) Les principales confusions identifiées sont : FTD/FD ; FC/MTR ; MTR/HRB, VD/HRB.

La stratification a permis dans un premier temps, de limiter l'inventaire dendrométrique à la strate forêt. Dans un deuxième temps, elle a permis d'affiner l'inventaire pour chaque sous-strate "forêt" en fonction de sa densité. La sommation des



**Figure 43. Classification supervisée par Max de vraisemblance. Image ETM+ de Landsat. 19 Mai 2002. Forêt de Tlemcen**

<sup>5</sup> Le relascope de Bitterlicht a épargné l'abattage de l'arbre et a permis d'estimer son volume tige directement sur pied.

différents volumes contenus dans chacune des sous-strates donne le volume total réellement disponible dans la strate forêt, puisque les pixels des strates matorral, herbacées et vides ne sont pas inclus dans le calcul. Le tableau 21 résume les résultats.

**Tableau 20. Matrice de confusion de la classification supervisée**

Classification	Terrain						Total
	FTD	FD	FC	MTR	HRB	VD	
Non classifiées	2.50	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.76
<b>FTD</b>	<b>97.50</b>	10.00	0.00	0.00	0.00	0.00	29.55
<b>FD</b>	0.00	<b>80.00</b>	0.00	0.00	0.00	0.00	13.64
<b>FC</b>	0.00	10.00	<b>90.00</b>	10.00	0.00	0.00	7.58
<b>MTR</b>	0.00	0.00	10.00	<b>90.00</b>	0.00	2.27	8.33
<b>HRB</b>	0.00	0.00	0.00	0.00	<b>100.00</b>	0.00	7.58
<b>VD</b>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	<b>97.73</b>	32.58
<b>Total</b>	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

**Tableau 21. Répartition de la surface d'étude par strates et volume**

strate	N <sub>pixel</sub>	S	V <sub>pixel</sub>	V <sub>pixel</sub> × N <sub>pixels</sub>	V <sub>pixel</sub> × N <sub>pixels</sub> / S
		ha	m <sup>3</sup>	m <sup>3</sup>	m <sup>3</sup> / ha
FTD	543	49	13.51	7335.93	150.111
FD	921	83	20.27	18668.67	225.220
FC	326	30	14.08	4590.08	156.440
MTR	620	56			
HRB	311	28			
VD	712	64			
Total	3433	310		<b>30594.68</b>	

**N<sub>pixel</sub>** : Nombre de pixels par strates **S** : Surface de la strate ; **V<sub>pixel</sub>** : Volume tige moyen contenu dans un pixel ; **V<sub>pixel</sub> × N<sub>pixels</sub>** : volume tige moyen contenu dans la strate ; **V<sub>pixel</sub> × N<sub>pixels</sub> / S** : Volume tige moyen par hectare

### 3.5. Discussions

Dans la classification par pixel, le paramètre le plus représentatif de la radiométrie semble être la densité étant donné qu'à hauteurs comparables<sup>6</sup>, les futaies correspondent à différentes classes spectrales (Tableau 22). Par conséquent, l'origine de la bonne séparabilité est le double effet de la densité et la de la radiométrie.

**Tableau 22. Correspondances classes spectrales-classes thématiques**

Nombre de Classes	Arrangement des classes	Identification Des classes	Physionomie	Hauteur	Densité de couvert	Nombre d'arbres
				m	%	n/ha
6	Classe 1	FTD	Haute	10-15	80-90	680
	Classe 2	FD		10-15	60-70	470
	Classe 3	FC		10-15	20-40	240-330
	Classe 4	MTR	Bass	1-2		
	Classe 5	HRB		<1		
	Classe 6	VD	Trés basse			

<sup>6</sup> L'effet apparent de la hauteur provient d'une différence de radiométrie de couverts ayant sur terrain différentes physionomies (hauteurs).

Comme il fallait s'y attendre, les calculs des placettes échantillons confortent le rôle secondaire voire non significatif de la densité pour le calcul du volume tige : une forte densité ne signifie pas une grande valeur du volume et inversement, une faible densité n'est pas synonyme d'une faible valeur du volume comme l'indique le tableau 21.

L'inventaire de seulement 0.36% (soit 1.08 ha /310ha) de la surface totale ont été suffisants pour estimer le volume alors que ce pourcentage dépasse souvent le 1% dans les inventaires statistiques traditionnels. Mais une surestimation du volume n'est pas à écarter et proviendrait des confusions entre certains objets. Les pistes forestières sont invisibles sous la canopée, les jeunes peuplements ont la même réflectance que les adultes, et le matorral est confondu avec les futaies très claires.

L'amélioration de la précision des calculs implique l'estimation de l'importance de ces confusions. La matrice de confusion et l'analyse de la table de séparabilité ont permis de quantifier ces confusions par la comptabilisation des pixels des objets pistes, routes, matorral et ce sont les confusions inter-strates qui sont les plus intéressantes à l'instar des strates basses (matorral, herbacées, vides) et strates haute (futaie adulte).

Ainsi, il a été établi que le taux de confusion est de 10% en moyenne et ne représente qu'une approximation du moment où les pistes ne sont pas visibles sur les images Landsat. Ces 10% ont été équitablement réparties entre les trois sous strates 'forêt' pour rectifier la valeur du volume obtenue (**30594.68 m<sup>3</sup>**). La nouvelle valeur du volume ajusté est de **27535.212 m<sup>3</sup> ±15%**.

La méthodologie n'a pas produit la précision exigée par l'aménagement forestier (Max ±10%). Cependant et pour certains inventaires expéditifs, une précision de ±15% est généralement admise [**Pardé et Bouchon, 1987**]<sup>7</sup>. Mais une bonne stratification et un taux d'échantillonnage adéquat devraient améliorer la précision de l'inventaire.

Certainement un inventaire complet serait plus utile, celui-ci étant la seule méthode capable de fournir le volume exact permettant une meilleure évaluation des données Landsat et la détermination de la vraie erreur qui en résulte.

<sup>7</sup> **Pardé et Bouchon [1987]** signalent aussi que le nombre de placettes est un paramètre plus important que le taux d'échantillonnage pour la précision.



## ***Chapitre quatrième***

### ***Méthodologie pour la conception de plans d'aménagement forestier***

#### **4.1. Aménagement forestier et inventaire**

L'aménagement forestier se décline essentiellement en deux types d'inventaires, descriptifs qui se traduisent essentiellement par une cartographie, et dendrométriques qui se traduisent par des estimations des potentialités de production. Les inventaires forestiers cartographiques se traduisent par deux types de classifications: classification des états de surface et classification écologique.

La télédétection satellitaire de par la nature des données qu'elle génère, caractérise en premier lieu des états de surface à travers des classifications par pixel. Elle pourrait caractériser l'écologie si celle-ci est réduite à une analyse paysagère basée sur la physiologie à travers des classifications par objet.

#### **4.2. Méthodologie d'analyse descriptive**

##### **4.2.1. Approche basée sur les classifications par pixel**

L'approche est basée sur le principe général pour la réalisation des zonages et qui repose sur deux conditions : si les continuités spatiales sont perceptibles, on utilise la méthode globale qui va de l'ensemble à l'élément, du global au particulier par désagrégation de l'information image. Si les continuités ne sont pas perceptibles, on utilise la méthode analytique qui va de l'élément à l'ensemble, du particulier au global par agrégation de l'information image.

Concrètement, la méthode analytique est utilisée pour homogénéiser les classes en fonction des paramètres les plus pertinents (densité, hauteur) qui aident à identifier par leur physiologie, les grands types d'occupation du sol d'un territoire forestier au moyen de classifications non dirigées. La méthode globale au moyen des classifications dirigées sera utilisée par la suite pour identifier l'occupation du sol par l'essence (ou le groupe d'essences) dominante à l'intérieur de chaque grand ensemble.

La première question est de chercher comment appréhender les différents états de surface à partir de données satellitaires de moyenne résolution dans un milieu hétérogène

qui varie continuellement. D'après les résultats précédents (Part.4, Chap.1), la classification automatique (non assistée) est intéressante et paraît convenable mais faut-il encore être capable d'interpréter les classes spectrales inconnues, autrement dit, mettre au point une méthodologie d'interprétation automatique des classifications non supervisées.

Des correspondances ont été établies entre classes spectrales et indices dendrométriques et sylvicoles. La classification non supervisée a permis de segmenter l'espace spectral en grands types d'occupation du sol, forêt adulte dense, forêt adulte claire, matorral dense, matorral clair, herbacées, vides correspondant à des états de surface, ligneux hauts denses (arboré dense), ligneux hauts clairs (arboré clair), arbustif dense, arbustif clair, herbacées, vides.

Cette présentation est une caractérisation physiologique du territoire étudié. Elle permet de caractériser l'état de la ressource forestière à l'échelle globale du massif, d'une forêt ou d'une série. Par contre, la gestion plus fine d'une parcelle ou d'une série, notamment le diagnostic sylvicole et les règlements d'exploitation (calendrier des coupes et des possibilités) nécessite une connaissance plus précise des types de peuplements présents sur la série ou le canton considéré.

#### ***4.2.1.1. La notion de type de peuplement<sup>1</sup>***

L'IFN de France le définit ainsi : 'Le type de peuplement forestier est une caractéristique complexe d'un peuplement recensable associant le régime et la composition de la strate forestière des tiges de futaie.

Classiquement, cette notion désigne les stades d'évolution d'une forêt : on y distingue la futaie, le perchis, le gaulis, le fourré et le semis. Or en zones semi arides, cette typologie est souvent compromise par l'extension de formations basses de dégradation de type matorral.

En effet, ces formations ne sont pas considérées comme des types de peuplement sensu stricto dès lors qu'ils ne représentent pas un stade d'évolution normale d'une forêt. Pourtant, ces formations sont une partie intégrante très importante du paysage forestier semi-aride qui parfois égale ou dépasse en superficie les forêts. Pour remédier à cette

---

<sup>1</sup> La loi 84-12 portant régime général des forêts définit le peuplement forestier ainsi : tout peuplement à l'état normal comportant au minimum cent arbres à l'hectare en état de maturité en zone aride et semi-aride [Chap. II, Art 8 et 9].

problématique, la notion de type forestier<sup>2</sup> est proposée pour compléter celle de type de peuplement

#### **4.2.1.2. La notion de type forestier**

Le type forestier est une catégorie de couverts forestiers qui présentent une physionomie identique ou suffisamment proche. Cette similitude (ou proximité) est synthétiquement exprimée en terme de physionomie (ligneux hauts, Ligneux bas, ligneux très bas, herbacées, vides...) et en terme de taille (étendue spatiale, valeur économique et écologique). Il est identifié à l'aide des données terrain ou cartographiques. Trois paramètres physionomiques issus des données sont retenus comme nécessaires et suffisants pour réaliser cette typologie : la hauteur, la densité de couvert et l'essence dominante.

#### **4.2.1.3. Méthodologie**

La méthodologie passe par deux grandes étapes dont la première consiste à mener en parallèle deux typologies:

- La première est une typologie physionomique des couverts forestiers. Elle permet de constituer des groupes de couverts forestiers (nommés types forestiers) marquées par une même structure physionomique, à partir des données sur la nomenclature des formations forestières méditerranéennes, d'études bibliographiques et essentiellement à partir des investigations terrain.

- La deuxième typologie adoptée est spatiale. Elle passe d'abord par la segmentation spatiale de l'espace boisé pour délimiter les différents types physionomiques. La typologie est ensuite réalisée en désagrégeant les types physionomiques de même organisation spatiale et paysagère en unités sylvo-paysagères (USP).

La deuxième étape consiste à mettre en relation ces deux typologies: les différents types forestiers avec les différentes USP. Cette mise en relation permet concrètement de territorialiser l'espace forestier, le plus finement possible avec les données utilisées: elle permet de spatialiser les groupes de couverts forestiers, et réciproquement de donner la dimension socio-économique et écologique de ces espaces forestiers.

---

<sup>2</sup> Type forestier : superficie forestière qui se distingue des autres par sa composition, notamment par son essence dominante et, souvent aussi, par ses classes de hauteur et de fermeture du couvert (SCF, 2005).

L'objectif est de mettre à la disposition des forestiers, une méthodologie simple et pas trop compliquée d'une chaîne de traitement d'images, aboutissant à une cartographie rapide des états de surfaces forestières (indicateurs d'états) nécessaires pour la cartographie d'indicateurs d'évolution qui en résultent en vue d'étudier l'évolution tant rétrospective que perspective.

#### 4.2.1.4. Définition de la notion de type physiologique

Sur la base de la définition de *l'unité Paysagère*, donnée par **Larcena et Puech (1998)**, «un ensemble défini par une organisation interne spécifique d'éléments, un objet complexe qui peut être appliqué aux milieux agricoles, forestiers et urbains», nous proposons la notion d'*Unité Sylvo-Paysagère*<sup>3</sup>, spécifique à la présente étude sur la cartographie forestière et appartenant souvent à "un même type physiologique de couvert forestier".

A l'intérieur d'un espace forestier, une *Unité Sylvo-Paysagère* sera définie comme étant une unité spatiale au niveau immédiatement inférieur au type physiologique. L'unité sylvo-paysagère est différenciable de ses voisines par ses composantes et organisations spatiales forestières et paysagères. Un type physiologique sera défini comme étant un groupe d'unités sylvo-paysagères, spatialement non mitoyennes, mais de composition et organisation forestière et paysagère similaires.

#### 4.2.1.5. Analyse de l'image satellitaire

Essentiellement, l'analyse s'appuie sur l'approche contenu-contenant. L'approche par le contenant doit conduire à délimiter des entités homogènes pour les paramètres hauteur et densité. Mais c'est à partir du moment où un lien est établi entre classes spectrales et ces paramètres dendrométriques, qu'on aura une bonne assise pour une cartographie forestière des zones d'égale apparence, appelant les mêmes règles de culture.

L'approche par le contenu doit définir le contenu, les éléments qui composent chacune des unités homogènes définies. Les principaux éléments qui intéressent le forestier sont certainement l'ensemble des espèces qui rentrent dans la composition de l'unité. Ce contenu peut très bien être caractérisé par l'essence (essences) dominante. L'organigramme (Fig.44) résume la méthodologie d'analyse.

---

<sup>3</sup> Par analogie à unité agro-Paysagère (d'après **Larcena et Puech, 1998**).

### ***a) La recherche des types physiologiques***

La typologie de l'espace forestier à étudier est réalisée en deux temps. En premier lieu, une segmentation spatiale (par classification non dirigée) en types physiologiques est produite à l'aide de l'imagerie satellitaire. En second lieu, une différenciation de chaque type physiologique en fonction de l'essence dominante est réalisée sur la base des connaissances terrain du photo-interprète. Cette partition typologique des types physiologiques produit les USP de même composition et organisation forestière.

Un raisonnement inverse est possible en procédant par segmentation spatiale en USP puis un regroupement typologique des USP de même composition et organisation forestière et paysagère produit les types physiologiques qui correspondent à un niveau d'organisation spatiale pertinent permettant d'identifier au plus près, les grandes catégories d'occupation du sol d'un territoire forestier, reconnues à l'aide de données terrain et cartographiques.

### ***b) Segmentation spatiale en unités sylvo-paysagères***

La première phase de délimitation des unités sylvo-paysagères provisoires est réalisée avec la même méthode que pour la délimitation des sous-unités forestières (les types physiologiques), c'est à dire des classifications-segmentations. Pour la segmentation spatiale, il est nécessaire de prendre en compte à la fois le territoire dans sa globalité et de son zonage existant. Mais les caractéristiques reconnues dans le cadre de cette étude, pour décrire les unités délimitées, sont uniquement relatives à l'occupation du sol par grandes catégories de couverts forestiers.

Le découpage spatial à l'intérieur de l'unité forestière en U.S.P. définitives est mis en place en fonction du zonage existant et de l'organisation de l'occupation du sol (composants, agencement spatial des composants). Cette segmentation spatiale est réalisée à partir des résultats de traitements d'images satellitaires ETM+ de Landsat et SPOT (étalements de la dynamique des canaux, compositions colorées et classification) qui ont permis d'obtenir une bonne différenciation des objets au sol (organisation spatiale et nature des grands types de couvert forestiers).

### c) Recherche des USP : désagrégation des types physiologiques

La désagrégation des types physiologiques en USP est effectuée en deux phases : En premier, il s'agit de dresser la liste des USP probables, pouvant correspondre à chaque type physiologique. En seconde phase, des classifications dirigées par max. vraisemblance sont lancées pour une partition définitive des types physiologiques en USP et dont certaines présenteront *un profil sylvo-cultural et une organisation spatiale similaires*. Un regroupement d'USP conduira nécessairement aux types physiologiques qui sont donc spatialement constitués d'**objets éclatés** mais sémantiquement structurés par un égal fonctionnement.

Les USP correspondent à une échelle de cartographie permettant d'identifier sur l'image satellitaire, les différents types physiologiques reconnus à l'aide de données terrain. L'ultime phase est de dresser le portrait de chaque USP par l'organisation spatiale de ses composants, les surfaces respectives des différents peuplements, et l'évaluation du **rapport de chaque couvert à la superficie de l'USP**. La totalisation (en hectares) de chaque couvert sur l'ensemble des USP de l'unité

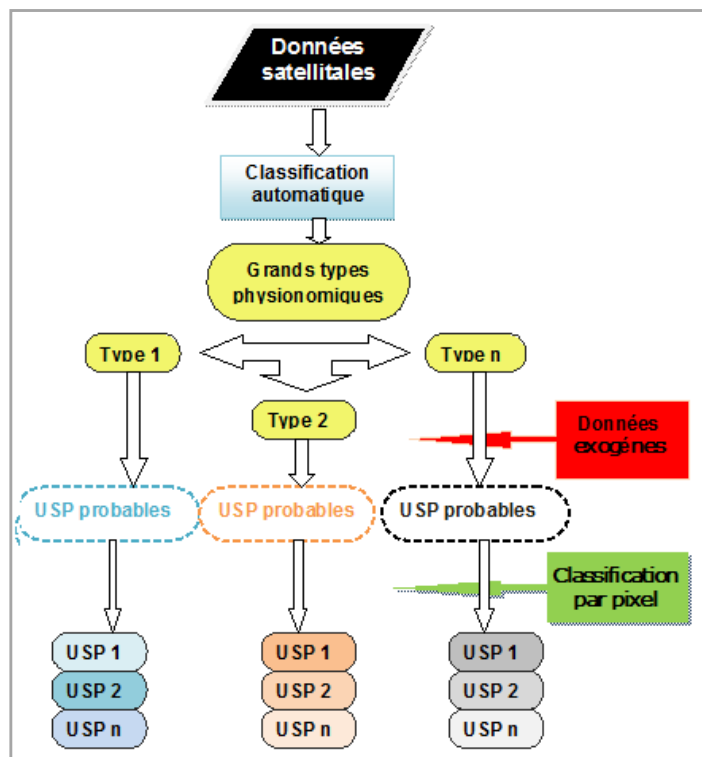


Figure 44. Organigramme méthodologique pour la cartographie des USP

forestière est comparée aux données de l'administration. Par exemple, la deuxième zone d'étude (Mascara) est découpée spatialement en 14 unités sylvo-Paysagères qui sont sémantiquement regroupées en 6 types physiologiques (voir Part.4, Chap.1).

### d) Gestion informatique des résultats

Pour une gestion informatique de cette structure hiérarchique (programmes S.I.G.), chaque type peut être décrit par une fiche [Tab.23]. Dans cette fiche, sont contenues les informations nécessaires à la détermination et la caractérisation du type et les données dendrométriques et cartographiques, qui sont élaborées grâce à l'inventaire forestier et à des cartographies de détail et représentent la distribution du type dans le territoire.

L'élaboration des données cartographiques et de l'inventaire permettent d'obtenir d'intéressantes informations pour la description des types: représentation de la distribution des types et des autres unités hiérarchiques, *données dendrométriques* (composition spécifique, surface terrière, volume moyen à l'hectare, rapport entre individus issus de la graine et drageons, souches à l'hectare, etc.), *quantité d'essences du rajeunissement, structure et tendances évolutives, gestion et sylviculture.*

De la comparaison des cartes forestières, de l'utilisation des sols et des unités de paysage, il est enfin possible de tirer des corrélations entre la distribution de la végétation par rapport aux sols et à la morphologie.

**Tableau 23. Fiche descriptive de l'unité sylvo-paysagère sous un SIG**

Fiche de l'unité sylvo-paysagère (code ou numéro)	
Identification	
Description	
<b>données dendrométriques</b>	composition spécifique
	surface terrière
	volume moyen à l'hectare
	souches à l'hectare
<b>Régénération</b>	
<b>structure et tendances évolutives</b>	
<b>gestion et sylviculture</b>	

#### 4.2.2. Approche basée sur les classifications par objet

L'approche par objet diffère de l'approche par pixel : en plus des attributs de radiométrie, de texture, de couleur, cette approche semble dépendre beaucoup plus de l'attribut spatial dans le contexte forestier semi-aride. Dès lors, des types d'occupation différents et mitoyens mais comparables en physionomie seront représentés par un seul objet.

En traitement d'image, cela signifie le passage d'une image brute radiométriquement très complexe à la production d'un document analysé pour lequel le continuum spatial et radiométrique est segmenté en entités intelligibles pour le thématicien. Ces entités sont des objets géographiques homogénéisés dont l'analyse permet de définir les surfaces couvertes au sol par des unités physionomiques.

### **4.2.2.1. Cartographie des unités physionomiques**

#### **a) Délimitation des unités**

On accepte comme point de départ sémiologique que toute unité cartographiée doit posséder des limites bien nettes en laissant de côté donc, les possibles franges de transition et en réduisant à des unités simples les mélanges et les interpénétrations entre des différents types de groupements. En ce faisant, on introduit bien sûr des simplifications, qui sont parfois discutables<sup>4</sup>.

#### **b) Niveaux d'interprétation**

Généralement, les bases pour l'interprétation des paysages en vue de leur cartographie reposent sur trois niveaux élémentaires [**Carreras et al. 1990**]: Physionomie de la végétation, l'écologie et la phytosociologie. Il semble que l'analyse orientée objet appréhende parfaitement le premier niveau ou chaque unité cartographique est attribuée à une classe<sup>5</sup> physionomique selon la communauté (ou les communautés) végétale dominante.

En prenant compte la situation des unités cartographiques par rapport aux conditions orographiques et leur relation avec les conditions édaphiques et bioclimatiques, l'interprétation atteint le deuxième niveau. Bien entendu, les données nécessaires sont exogènes et doivent être préparées ou prises d'une base de données d'un SIG. Enfin et en situant les unités cartographiées dans un système phytosociologique, l'interprétation peut être poussée vers le troisième niveau.

#### **c) Niveaux de complexité**

Pratiquement, il n'est pas possible à l'échelle des images de moyenne résolution de représenter des unités pures telles qu'elles sont en réalité et l'analyse orientée objet simplifie cette réalité très complexe surtout en ce qui concerne les classes de matorrals. Dans cet aspect du problème, les trois niveaux de complexité suivants sont adoptés:

---

<sup>4</sup> Il ne faut pas oublier que la cartographie doit être toujours une simplification logique et scientifique d'une réalité infiniment plus complexe tout en faisant ressortir les faits les plus significatifs et en effaçant le "bruit" des phénomènes de type secondaire [**Carreras et al. 1990**].

<sup>5</sup> Ces classes sont, concrètement et dans le cas étudié précédemment (Part 4, Chap.2): forêt de pin d'Alep, matorral haut à chêne et genévrier, matorral bas à romarin, herbacées à alfa, cultures (et végétation anthropogénique) auxquelles l'on pourrait ajouter la végétation des rochers et des éboulis et les aires dénudées ou à végétation très clairsemée.



**Unités presque simples.** Elles correspondent à des aires cartographiables sous la dominance presque absolue d'une seule espèce. Dans la pratique ces unités englobent des taches d'autres types de couverts mais-trop petits pour se distinguer en tant qu'objets différents. Il en pourrait être l'exemple de la pinède de pin d'Alep, comprenant surtout l'association forestière principale (*Querceto-Pinetum*) mais aussi parsemées par ci par là des clairières (*Cisto-Rosmarinetum*) et de quelques taches de cultures à dimensions très réduites.

**Unités complexes.** Elles occupent des aires à peu près uniformes écologiquement, en y dessinant des taches peu étendues, entremêlées ou à limites peu tranchées, de sorte qu'il n'est pas possible de les séparer au niveau cartographique. Par exemple, une zone occupée par des morceaux non susceptibles d'individualisation - de la chênaie climacique, des fragments d'herbacées, des cultures, etc.

**Mosaïques.** Ensemble de couverts en nombre très réduit (deux ou trois), sans relations dynamiques entre elles ou presque pas, mais se partageant une aire géographique non divisible part rapport à l'échelle de la carte. Par exemple, une aire de matorral comprenant une enclave (les cultures, le bâti).

#### d) Niveaux de lecture

Ils peuvent être réduit à un seul niveau physionomo-écologique et même le restreindre au seul trait physionomique. Dans le cas étudié, ces diverses classes physionomiques sont :

<b>Forêt</b>
1. Pinède dense et compacte à <i>Pinus halepensis</i> 2. Pinède dense et fragmentée à <i>Pinus halepensis</i> 3. Pinède claire à <i>Pinus halepensis</i>
<b>Matorral</b>
4. Matorral arboré à <i>Quercus ilex</i> 5. Matorral arboré à <i>Quercus ilex</i> et <i>Juniperus oxycedrus</i> 6. Matorral bas à <i>Rosmarinus officinalis</i>
<b>Herbacées</b>
7. herbacées à <i>Stipa tenacissima</i>
<b>Autres</b>
9. Cultures maraichères 10. Zones dénudées ou à végétation très clairsemée

En s'appuyant sur ces différentes considérations, la démarche qui peut répondre aux besoins exprimés par les gestionnaires en matière d'aménagement écologique est celle de l'analyse paysagère. Elle se découpe en plusieurs phases:

- La phase descriptive qui se traduit par un inventaire pré-paysager décrivant chacune des composantes biologiques, abiotiques et socio-économiques ;
- La phase cognitive qui consiste à repérer et identifier des unités paysagères (*ensemble spatialement homogène tel qu'il est perçu par les forestiers*) ;
- La phase expertise qui se traduit par l'analyse des évolutions potentielles du paysage;

Cette approche permet aussi de mettre en scène des indicateurs à des échelles allant de l'unité paysagère au suivi détaillé du peuplement forestier, utilisant des documents cartographiques de tous types disponibles sur l'espace. Certains indicateurs peuvent être appréhendés à travers le découpage de l'espace en unités paysagères de fonctionnement homogène permettant d'aborder les indicateurs de structure pour répondre au besoin d'aide au maintien des espaces.

### 4.3. Méthodologie de zonage

#### 4.3.1. Le parcellaire et l'inventaire forestier

Le parcellaire est l'opération qui consiste à diviser la forêt en un certain nombre de parties aussi homogènes que possible quant aux facteurs de production : sol, climat, peuplement, conditions d'exploitation et de vidange. Ces parties homogènes sont dites "parcelles"<sup>6</sup>. Elles permettent de décrire le peuplement forestier et en dresser l'inventaire; il

---

<sup>6</sup> Bien que le sol (substrat) et le climat sont des éléments essentiels pour le parcellaire, celui-ci doit en réalité délimiter des peuplements de nature et de structure différentes quant à l'essence, le régime, la densité, l'âge, la hauteur, le diamètre. Mais le véritable critère de la différence entre les parcelles réside dans la nécessité de leur donner une méthode de traitement différente.

s'agit de parcelles d'études. Elles permettent aussi de déterminer l'emplacement des coupes; il s'agit alors de parcelles de gestion. Souvent les deux notions se confondent.

Il existe trois types de parcellaire, Analytique<sup>7</sup> où à chaque type de peuplement et de classe d'âge correspond une parcelle, Géométrique<sup>8</sup> qui s'appuie sur les pistes et les TPF) et Topographique qui s'appuie sur les lignes naturelles du relief (forêts de montagnes).

Les forêts semi-arides présentent une hétérogénéité floristique et structurale et sont sujettes à des changements imprévus. Le parcellaire, analytique ou topographique, aura toujours des limites et pour s'adapter parfaitement aux deux contraintes, l'hétérogénéité et le changement, il ne peut être que géométrique.

#### 4.3.2. Approche basée sur un parcellaire flexible<sup>9</sup>

Un parcellaire flexible doit tenir compte de l'hétérogénéité des peuplements et des risques de changements rapides. Par conséquent, ce parcellaire ne peut être que géométrique. Le problème est de trouver les modalités adéquates pour assoir ce parcellaire. La méthode du pré-aménagement forestier [Grim, 1986] propose un parcellaire géométrique quadrangulaire où toutes les parcelles ont la même surface. Or cette façon de partage systématique peut entraîner une hétérogénéisation de la parcelle alors que celle-ci doit être homogène.

Une nouvelle approche est proposée. Son principe est de conserver le principe géométrique quadrangulaire mais avec des parcelles pas nécessairement d'égale surface. Autrement dit, les lignes du réseau primaire (verticales ou horizontales) ne seront pas nécessairement Nord-Sud et Est-Ouest, mais plus ou moins espacés les unes des autres en fonction de l'organisation spatiale du territoire étudié.

Probablement, le manque d'une vision globale sur cette organisation et une cartographie adéquate des types de peuplements rendait cette approche assez difficile. La télédétection satellitaire peut rendre cette approche possible à travers une cartographie

---

<sup>7</sup> Il permet d'obtenir une description précise de la forêt mais aboutit à une grande complexité pour définir la parcelle de gestion.

<sup>8</sup> Il ne tient pas compte de la variabilité des peuplements (cas des forêts homogènes et de plaines).

<sup>9</sup> Hof et Joyce [1992] [in Wallerman, 2003] ont déjà proposé une approche d'aménagement forestier basée sur des unités spatiales plus flexibles que les peuplements fixes, incluant une division quadrangulaire (cellules carrées) de la forêt.

physionomique par classifications d'images de moyenne résolution selon deux méthodes :

- Les polygones peuvent être tracés sur cette carte puis matérialisés sur terrain par les procédés GPS,
- Les polygones peuvent être tracés sur cette carte sans avoir besoin de les matérialiser sur terrain. Les limites seront identifiées par GPS en progressant sur terrain.

Dans les deux cas, les polygones seront flexibles: on peut les fusionner ou les subdiviser géométriquement en fonction des changements qui ont lieu et quelques soient leur nature.

### 4.3.3. Approche basée sur un zonage fonctionnel

#### 4.3.3.1. Contexte

Le choix des objectifs et des actions à entreprendre dans les territoires forestiers semi-arides reposent sur un certain nombre d'outils, entre autres, **une information de qualité qui soit disponible et un zonage fonctionnel**<sup>10</sup>. Si la première condition est assurée directement par l'imagerie satellitaire, la deuxième est une conséquence directe de la première. Selon les choix de développement effectués, on distingue plusieurs niveaux

- Zone à vocation ligneuse
- Zone à vocation multi-ressources
- Zone de récréation
- Etc.

Dans la Part. 4 - Chap. 2, nous avons déjà proposé un zonage qui s'adapte à la configuration écologique existante au moment de la prise de vue (Fig.40). Pour être fonctionnelle, chaque zone doit être incluse dans l'un des niveaux précités.

## 4.4. Méthodologie d'analyse dendrométrique

Il faut reconnaître tout d'abord qu'en matière d'analyse dendrométrique, la télédétection de moyenne résolution ne pourra jamais supplanter les méthodes traditionnelles dès lors qu'on tente de lier une réalité géométrique à une réalité radiométrique.

Par conséquent, des indices dendrométriques comme le diamètre, la hauteur, la surface terrière, la forme de la tige, qui sont nécessaires au calcul du volume, sont impossibles à déterminer par télédétection. En revanche, l'information spectrale permet

---

<sup>10</sup> L'expression zonage fonctionnel désigne la délimitation du territoire en zones homogènes quant à la vocation d'utilisation et de production (Conseil de l'industrie forestière du Québec, 2004)

certainement de réduire les mesures terrain des principaux indices rentrant dans le calcul du volume puis de les intégrer aux données spectrales. Les classifications par pixel paraissent adéquates pour estimer les potentialités de production au moins à titre expéditif dans les zones semi-arides et permettent un inventaire limité aux seuls endroits boisés (Fig.45).

Une classification par pixel s'apparente à une stratification basée sur la densité et la nature du couvert. Par conséquent et pour chacune des strates identifiées, la sélection des pixels échantillons sur une image géo-référencée et leur implantation sur terrain par GPS permettra de calculer le volume moyen contenu dans un pixel. La généralisation de ce volume à tous les pixels produit le volume moyen contenu dans la strate.

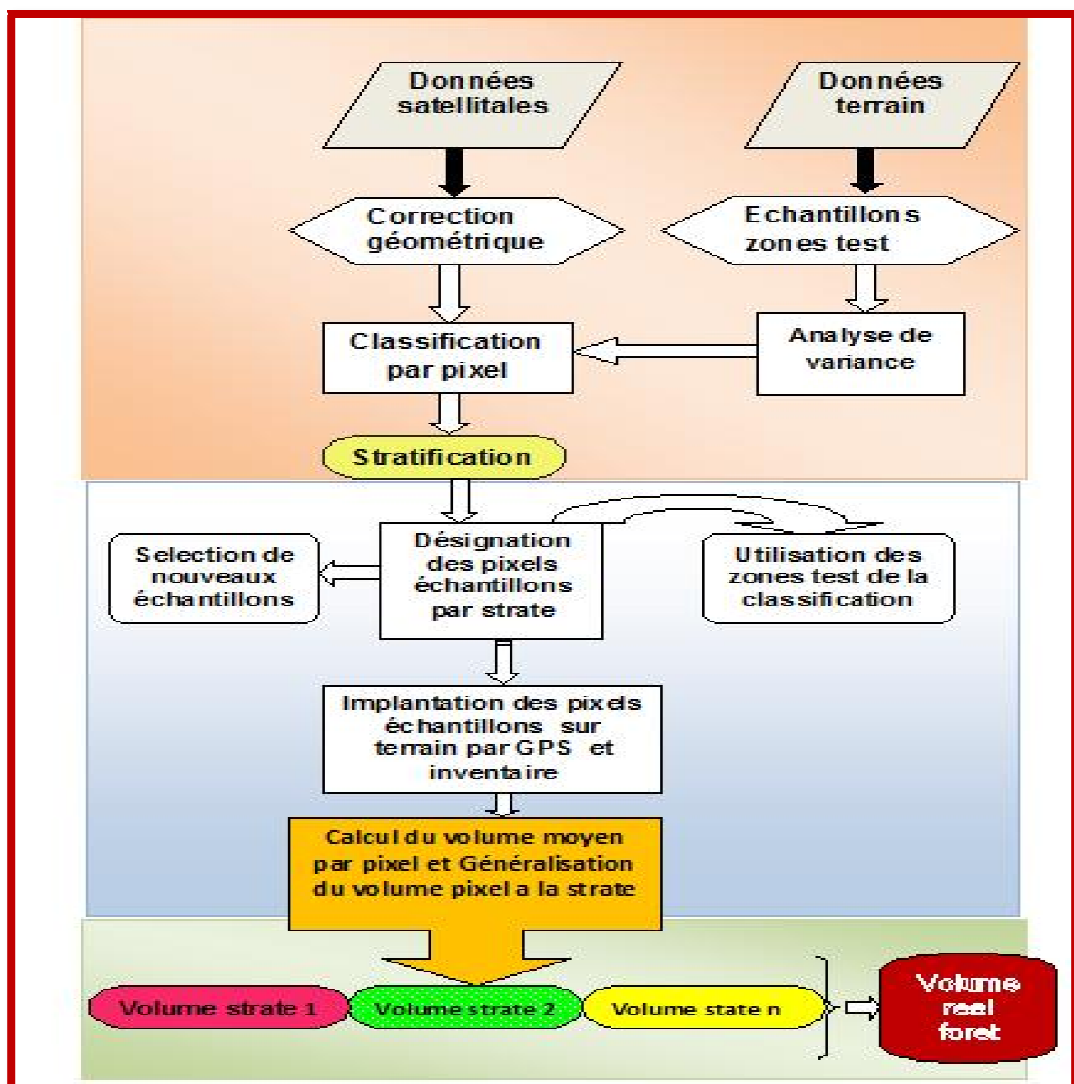


Figure 45. Organigramme méthodologique pour l'estimation du volume tige par télédétection satellitaire

## 4.5. Développement d'indicateurs sur l'espace forestier semi-aride

Pour les zones forestières semi-arides, trois thèmes/objectifs sont pris en compte selon les gestionnaires :

### Connaissance des espaces.

- **Objectifs** : Disposer d'un inventaire cartographique fin de la typologie forestière, Evaluer la disponibilité forestière.

### Préservation et /ou restauration des espaces

- **Objectifs** : Maintenir les surfaces forestières dans un état d'équilibre favorable.

### Gestion des espaces et de la biodiversité

- **Objectifs** : Favoriser l'aménagement paysager, Eviter la fragmentation liée aux pressions anthropogènes.

Le développement des indicateurs peut s'opérer en amont d'après les résultats des enquêtes de besoins des gestionnaires mais aussi suivant deux niveaux d'entrée d'analyse:

- L'approche paysagère axée sur le découpage du territoire en unités paysagères cohérentes (part 4, chap2)
- l'approche peuplement basée sur les unités sylvo-paysagères (part 4-chap1)

Trois indicateurs peuvent être proposés en s'appuyant sur la cartographie physionomique de la végétation forestière :

**Indicateur 1** : Surface forestière et localisation des grands types physionomiques.

C'est un indicateur **d'état défini** par la carte des grands types physionomiques (forêts, matorral arboré, matorral, herbacées).

**Indicateur 2** : Structure spatiale des unités sylvo-paysagères (unités et sous unités de paysages forestiers définies par l'essence dominante).

C'est un indicateur **d'état défini** par la caractérisation des unités paysagères et l'analyse spatiale (forêts denses, forêts claires, forêts fragmentées, espaces boisés fragmentés, vides forestiers).

**Indicateur 3** : disponibilité forestière : répartition de la biomasse aérienne et ou/ le volume tige. C'est un indicateur **d'état défini** par l'estimation respectivement de la biomasse aérienne en tonnes par hectare et du volume tige en mètres cubes de bois.

## Conclusions

**L**a forêt semi-aride est tout à la fois un paysage mais aussi un milieu écologique particulier se développant dans un contexte climatique aride (Atlas saharien) ou urbain (Atlas tellien). Une atteinte à l'intégrité d'un tel paysage n'est pas sans conséquence sur la protection des espèces animales et végétales qui y vivent et seule la protection de cet écosystème est capable de garantir une utilisation forestière durable. En effet, les aménagements classiques qui paraissent durables et viables à court terme perdront dans de tels contextes ce sens de durabilité à long terme.

**P**our toutes ces raisons, l'approche paysagère mérite d'être valorisée par les décideurs afin de concrétiser ce sens durabilité. Mais pour une analyse objective des peuplements forestiers semi-arides, elle nécessite un instrument dont la perception visuelle spatiale soit conforme à la dimension paysagère. Il n'existe pas un outil plus efficace autre que la télédétection satellitaire de moyenne résolution (SPOT et Landsat) pour offrir une vision globale, et dans ce sens, les classifications s'avèrent être des méthodes efficaces et parfaitement adaptées à l'approche dans le contexte forestier semi-aride.

**L**es classifications par pixels gardent toute leur puissance pour la cartographie forestière de zones forestières semi arides très hétérogènes. La méthode non dirigée est recommandée puisqu'elle permet de segmenter l'espace spectral en classes homogènes correspondant aux principaux types de couverts définis par leurs hauteurs et densités (forêt adulte dense/clair, matorral arboré dense/clair, matorral dense/clair, herbacées). Ces classes peuvent être des références et offrir par conséquent des possibilités pour interpréter les classifications non dirigées.

**U**ne des approches envisageables est de mettre en correspondances les valeurs radiométriques de l'image à interpréter avec les valeurs radiométriques de ces classes de référence au même stade phénologique. Ces valeurs-références seront utilisées comme masques radiométriques dans les classifications dirigées où les zones d'entraînement sont indisponibles (anciennes images) ou sont difficiles à sélectionner (grande hétérogénéité). Elles permettront en zones semi-arides d'identifier les principaux types physiologiques de la végétation forestière.

**L**es classifications dirigées par Max de vraisemblance interviennent pour caractériser le territoire forestier par sa physionomie et sa composition en essences dominantes. Elle permet de désagréger les types physionomiques en unités sylvo-paysagères (USP), notion introduite pour compléter celle de type de peuplement devenue incompatible avec la situation qui prévaut actuellement. Cette cartographie physionomique et les statistiques surfaciques inhérentes sur les USP permettront de calculer divers indicateurs de suivi et d'évaluation de l'évolution de l'écosystème forestier semi-aride.

**L**a méthode orientée-objet semble prometteuse sur les images ETM+ de Landsat en contribuant à la constitution, l'identification et la cartographie d'entités homogènes. Dans les conditions de dégradation de l'espace forestier semi-aride, cet avantage permettra de cibler les opérations de protection, d'aménagement et de restauration par la localisation des pineraies continues et compactes, des pineraies fragmentées, des différents types de matorrals et des vides. En plus, il permettra l'élaboration d'indicateurs environnementaux à l'échelle locale et régionale.

**P**our extraire cette information, le critère d'échelle ainsi que les attributs spectraux et spatiaux doivent être judicieusement choisis. Un facteur d'échelle compris entre 45 et 50, des attributs spatiaux de forme et spectraux comme la valeur Max des pixels semblent convenir à cet effet. Toutefois, l'approche ne doit pas occulter la priorité des images SPOT qui grâce à leur haute résolution spatiale se prêtent mieux à la segmentation que les images Landsat.

**L'**intégration des données ETM+ de Landsat aux données terrain a permis l'estimation du volume-tige d'une forêt résineuse adulte à travers des classifications par pixels-échantillons. Mais globalement, la classification basée sur le seul paramètre densité n'est pas utile et doit être soutenue par des mesures in situ des paramètres hauteur et diamètre qui entrent directement dans le calcul du volume.

**L**a procédure développée dans cette étude a pu fournir des données utiles sur la disponibilité forestière de la forêt de Tlemcen en inventoriant 0,36% seulement de l'ensemble de la zone. Par conséquent, l'apport de la méthodologie, sera certainement très important à l'échelle du peuplement forestier, pour l'estimation de la disponibilité forestière qui est un indicateur d'état très précieux pour l'aménagement forestier en zones semi-arides caractérisées par une tendance régressive du couvert forestier.



# Références bibliographiques

## A

- [1] **Aardt (van) J.A.N, (2004)** *An object-oriented approach to forest volume and aboveground biomass modeling using small-footprint Lidar data for segmentation, estimation, and classification*. Doctoral Dissertation. Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University. Blacksburg, Virginia, USA, 362p.
- [2] **Achhal el kadmiri A, Ziri R et Khattabi A, (2004)** Analyse phytosociologique des formations de matorral du massif des Béni-Snasséne (Maroc oriental). *Acta Botanica Malacitana* 29: Malaga, pp 67-87.
- [3] **Aidoud A, (1997)** *Fonctionnement des écosystèmes méditerranéens*. Notes de cours. Laboratoire d'Ecologie Végétale, Université de Rennes 1, France, 50p.
- [4] **Alpin P, Atkinson PM and Curran PJ, (1999)** Fine spatial resolution simulated satellite sensors imagery for land cover mapping in the united Kingdom. *Remote sensing for environment* 68, pp 206-216.
- [5] **Andersen GL, (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.
- [6] **Axes F, (1998)** Les images spot, une source d'information sur l'eau. *Congrès international de Kaslik - Liban - 18-20 juin 1998*, 7p.

## B

- [7] **Baatz M and Schape A, (1999)** Object-oriented and Multiscale image Analysis in Semantic Networks, *Proc. of the 2<sup>nd</sup> international symposium on operationalization of remote sensing*. August 16th – 20th, Ensched. ITC, 11p.
- [8] **Baccini A, Friedl MA, Woodcock CE and Warbington R, (2004)** Forest biomass estimation over regional scales using multi-source data, *geophysical research letters* 31, L10501, doi: 10.1029/2004GL019782.
- [9] **Baret C, Chelle M et Monget JM, (1996)** Les mesures de télédétection dans le domaine solaire. *In actes de l'école-chercheurs INRA en bioclimatologie. Tome 2, 'du couvert végétal à la région'*, le Croisic-France du 25-29 mars, pp53-65.
- [10] **Baret C, Chelle M et Monget JM, (1996)** *Variation de la réflectance au niveau du couvert*. In actes de l'école-chercheurs INRA en bioclimatologie. Tome 2, 'du couvert végétal à la région', le Croisic-France du 25-29 mars, pp305-318.
- [11] **Baskent EZ, Salih A, Lu T, Kaya SB, (2008)** Developing and Implementing Multiple-Use Forest Management Planning in Turkey. *Environmental Management* (2008), pp42-37.

- [12] **Batterham RJ, (2000)** *La géomatique des années 2000 au Canada. Aperçu de la structure de la technologie et de l'industrie*. ED. Management Consulting in Geomatics Inc. Ottawa & Vancouver, 43p.
- [13] **Beaulieu N, Jaramillo J, Fajardo A and Peñuela N, (2001)** *The use of remote sensing imagery in support to participatory natural resource management: A case study in the indigenous reserve of Humapo and La Victoria*. Internal report, PE-4, CIAT, Cali, Colombia, 20p.
- [14] **Beaulieu N, Leclerc G, Alvarez M, Wispeleare G, Jaramillo J, Rubiano Y, Fajardo A, Muñoz O and Peñuela N, (2001)** A proposed framework for using remote sensing imagery to monitor environmental dynamics in support to local planning efforts. *Article presented at the workshop on integrated natural resources management (INRM)*, ciat, cali, colombia, 28-31 august 2001.
- [15] **Beck N, (2006)** *Application de méthodes de clustering traditionnelles et extension au cadre multicritère*. Mémoire de fin d'études. Faculté des Sciences appliquées université libre de Bruxelles, 341p.
- [16] **Begni G, Darras S, Girard X, Hoepffner M and Houdry P, (2001)** *Projet GMES-NOW ("Global Monitoring for Environment and Security")*. Rapport. Ed. MEDIAS-France et MATRA SYSTEMES et INFORMATION. 91 p.
- [17] **Begni G, Escadafal R, Fontannaz D et Hong-Nga Nguyen A-T, (2005)** *La télédétection : un outil pour le suivi et l'évaluation de la désertification*. Les dossiers thématiques du CSFD (comité scientifique français de la désertification). n°2, 44p
- [18] **Bélanger JM et Hatin M, (2004)** *Problématique du réseau routier forestier principal. Maintien et mise en valeur de l'habitat de l'original sur les ZECS*. Mémoire présenté à la Commission d'étude de la forêt publique québécoise par la Régionale des zeccs des Hautes-Laurentides (RZHL), 21p.
- [19] **Bellaiche N, (2001)** *Apport de l'imagerie satellite dans la réalisation des plans d'aménagement forestier*. Etude sur la concession forestière de LEROY GABON. Rapport de projet pluridisciplinaire. ENSG, France, 80p.
- [20] **Bellefontaine R, Gaston A et Petrucci Y, (1997)** *Aménagement des forêts naturelles des zones tropicales sèches*. Cahiers FAO Conservation 32. Ed. FAO, 72p.
- [21] **Benabadji N et Bouazza M, (2000)** Contribution à une étude bioclimatique de la steppe à *Artemisia herba-alba* dans l'Oranie (Algérie occidentale). Notes de recherche. Science et changements planétaires/*Sécheresse*. Volume 11, Numéro 2, pp117-23.
- [22] **Benabdeli K, (1996)** Mise en évidence de l'importance des formations basses dans la sauvegarde des écosystèmes forestiers. Cas des monts des Dhaya (Algérie occidentale). *Ecologia Mediterranea*. XXII (3/4), pp101-112.
- [23] **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.

- [24] **Bencherif K et Letreuch Belarouci N, (2006)** Cartographie physionomique de la végétation forestière par télédétection satellitaire de moyenne résolution spatiale en zones semi-arides. *Bulletin des sciences géographiques* n° 18. Ed. INCT, Alger, pp38-50.
- [25] **Bencherif K, (2008a)** Apport de l'analyse orientée objet d'images Landsat ETM+ et de l'approche paysagère pour l'aménagement forestier en zones semi-arides. *Bulletin des sciences géographiques* n° 22. Ed. INCT, Alger, pp45-54.
- [26] **Bencherif K, (2008b)** Caractérisation d'un paysage forestier hétérogène par analyse orientée objet d'une image Landsat ETM+. Apport de la méthode pour l'aménagement forestier à l'échelle du paysage. *Revue de la société française de photogrammétrie et télédétection (RFPT)*, n°190 (2008-2), *IGN Paris*, pp3-14.
- [27] **Bencherif K, (2009)** Intégration des données ETM+ de Landsat aux données terrain pour l'estimation du volume bois d'une forêt de pin d'Alep. *Communication, JAS (Journées d'atelier scientifique), AUF, Alger*, 8-11 Novembre 2009, 14p
- [28] **Bensaid S., Hamimi S et Tabti W, (1998)** La question du reboisement en Algérie. Synthèse. *Cahiers sécheresse ; Vol.9, n° 1* : pp5-11.
- [29] **Bertrand A., Babin D et Nasi R., (1999)** Evolution et diversité du concept d'aménagement forestier. *Bois et Forêts des Tropiques*. Ed. CIFOR. 260: pp33-40.
- [30] **Bettinger P and Hayashi R., (2006)** Estimation of above-ground biomass with remotely sensed imagery: A brief literature review, University of Georgia Center for Forest Business, *Research Note* 25.
- [31] **Blumer C et Golay F, (1997)** *Intégration d'Informations Multi-Sources dans un SIRS de Gestion Forestière. Application à la Forêt de Bassecourt (JU)*. Travail pratique de diplôme 1996-1997. Département du génie rural. Institut de géomatique. Ecole polytechnique fédérale de Lausanne – Suisse, 82p.
- [32] **BNEF, (1983)** *Procès verbal d'aménagement de la série VIII. Forêt domaniale Senalba Chergui – Djelfa*. Alger, 75 p.
- [33] **BNEDER, (1996)** *Révision de l'aménagement forestier de Senalba chergui* (superficie 20000 ha). Rapport de synthèse, Djelfa.
- [34] **Boissard P et Andrieu B, (1983)** Résultats obtenus en télédétection phytosanitaire sur forêts à partir de données aériennes et spatiales (forêt de Lyon et Roumare). In 'Application de la télédétection à l'agriculture'. Séminaire, parie le 5, 6 et 7decembre 1983. Les colloques de l'INRA, n°2, pp37-50.
- [35] **Boisvert V, Montgolfier J, Vallee D et Glass B, (1997)** *Vers des indicateurs de suivi des espaces boisés en Méditerranée*. Note de méthode de l'observatoire méditerranéen pour l'environnement et le développement. Ed.CAR/PB. Sophia-Antipolis, France, 58 p.
- [36] **Bonn F, Charbonneau L et Brochu R, (1989)** *Analyse de l'utilisation du sol à partir des données SPOT et TM : aspects méthodologiques*. Télédétection

en francophonie. Éd. AUPELF-UREF. John Libbey Eurotext. Paris 1989, pp83-92.

- [37] **Bonn F et Rochon G, (1996)** *Précis de télédétection*, volume 2, applications thématiques. Presse de l'université du Québec, AUPELF, 633 p.
- [38] **Bornand M, Robez-Masson JM, Donnet A et Lacaze B, (1997)** Caractérisation des sols et paysages des garrigues méditerranéennes. Typologie et extrapolation spatiale par traitement d'images satellitaires. *Etude et gestion des sols*, vol.4 n°1, pp27- 42.
- [39] **Bradley T and Hammond H, (1992)** landscape analysis and planning summary, a component of wholistic forest use. SFF Web site. *Silva Ecosystem Consultants. www.sff.com*
- [40] **Bruneau M, (1985)** Identification and dynamics of the agriculture environments in the northeast of Thailand. *Cartosat*, série n°56. Paris, France.
- [41] **Brunelle J, Thomson K et Gilbert P, (1998)** Contribution de la télédétection à la cartographie du milieu forestier. Télédétection en francophonie, Ed. AUPELF-UREF, pp93-95.
- [42] **Brun S, (2004)** *De l'erg à la forêt. Dynamique des unités paysagères d'un boisement en région littorale, forêt des dunes de Menzel Belgacem, cap bon, Tunisie*. Thèse de Doctorat. Université de Paris IV – Paris-Sorbonne U.F.R. de géographie et aménagement, 322p.

C

- [43] **Caloz R et Pointet A, (2003)** Analyse comparative de la classification contextuelle et du maximum de vraisemblance : synthèse et cas d'étude *Télédétection*, vol. 3, n° 2-3-4, pp311–322.
- [44] **Camille S, (2005)** *Comment utiliser les histogrammes d'une image numérique*, Ecole Nationale Des Sciences Géographiques, ED.IGN, France, 26p.
- [45] **Cassien VV, (2007)** *exploitation de données lidar à haute résolution pour la foresterie*, projet de master sciences. Laboratoire des systèmes d'information géographiques. Ecole polytechnique fédérale de Lausanne.
- [46] **Carreras J, Carillo E, Masalles RM, Ninot JM et Vigo J, (1990)** A propos de la carte de végétation des Pyrénées. IV: vallées de barravés et de castanesa (haute ribagorça)". Quelques réflexions générales sur la cartographie de la végétation. *Botànica pirenaico-cantàbrica* : pp 609-615.
- [47] **CEMAGREF et ECOFOR, (2002)** Aménagement forestier. Etat des Lieux, territoires, information sur la forêt. *Revue ingénieries*, numéro spécial. Ed CEMAGREF Nancy, France, 155p.
- [48] **Chamignon C, (1990)** *Evaluation comparée des satellites à haute résolution spatiale en zone de moyenne et haute montagne méditerranéenne (données TM de Landsat et HRV de SPOT)*. Thèse de doctorat. Université d'Aix en Provence-Marseille, 290p.

- [49] **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. *cybergeog* n° 176, pp1-7. [www.cybergeog.fr](http://www.cybergeog.fr)
- [50] **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, 19p.
- [51] **Cihlar X, Chen J, Fung B and Latifovic M, (1998)** Classification by progressive generalization; a new automated methodology for remote sensing multichannel data. *International Journal of Remote Sensing*. Vol.19, n°14, pp2685-2704.
- [52] **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, pp315-319.
- [53] **CIFQ-conseil des industries forestières du Québec, (2004)** *commission sur les forêts. Quelques précisions sur des propositions du Conseil de l'industrie forestière du Québec*, document de travail, Saint-Foy-Québec, 5p.
- [54] **Cohen WB, Maiersperger TK, Spies TA and Oetter DR, (2001)** Modelling forest cover attributes as continuous variables in a regional context with Thematic Mapper data. *International Journal of Remote Sensing*, 22(12), pp2279-2310.

## D

- [55] **Desachy G, (2001)** *Analyse d'images*, Notes de cours, version1.3. Informatique. Université des Antilles et de la Guyane. Pointe à Pitre. 158p.
- [56] **DGF, (2001)** *Rapport national relatif à la mise en œuvre de la convention des nations unis sur la lutte contre la désertification*. Ed. Direction Générale des Forêts. Alger, 23p.
- [57] **DGF, (1984) Loi 84-12 de 1984**, Loi portant régime général des forêts. DGF, Alger, 25p.
- [58] **Doyon F, (2003)** L'aménagement intégré des ressources en milieu forestier : concepts et outils. Synthèse. *Colloque sur la planification forestière*. Université du Québec à Rimouski .31 oct. - 1<sup>er</sup> nov. 2003. ed.iquaaff. Québec, 46p.
- [59] **Ducrot D, (2005)** *Méthode d'analyse et d'interprétation d'images de télédétection multisources. Extraction de caractéristiques de paysages*. Mémoires de recherches. Habilitation à diriger des recherches. INP Toulouse, France. 235p.
- [60] **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, 201p.

- [61]**Dykstra DP, (1996)** Systèmes d'information appliqués à la foresterie *Unasylva* - No. 189 - L'informatique et la foresterie Vol. 47 - 1996/3. Ed. FAO, <http://www.fao.org/DOCREP/005/Y4001F02>

**E**

- [62]**Envi, (2001)** *User's guide*. Ed. Research systems.inc, USA. 948p
- [63]**Envi, (2005)** *User's Guide*. Ed. Research Systems, Inc. USA.
- [64]**Envi, (2007)** *User's Guide*. Ed. Research Systems, Inc. USA.
- [65]**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, 22p.
- [66]**Euler A, (2003)** Recourt à la télédétection et à l'interprétation des arbres de la canopée pour cartographier les types de forêt dans l'état d'Acre (Brésil). *OIBT- Actualités des Forêts Tropicales* 11/1, pp22-23.

**F**

- [67]**FAO, (1999a)** *Urban and peri-urban forestry – case studies in developing countries*. Ed. FAO, Rome.
- [68]**FAO, (1999b)** *Remote sensing for decision -makers* Séries, N° 15 " Satellite imagery to assist forest management - pilot study in Morocco". Ed. FAO, Rome, 11p.
- [69]**FAO, (2001)** *Global Forest Resources Assessment 2000: main report*. FAO Forestry Paper No. 140. Rome (also available at [www.fao.org/forestry/fo/fra/main/index.jsp](http://www.fao.org/forestry/fo/fra/main/index.jsp)).
- [70]**FAO, (2003)** *State of the world's forests 2003*. Part I: the situation and developments in the forest sector. Ed.FAO, 31p.
- [71]**Fennane M, (2006)** Esquisse des bases d'une typologie des habitats au Maroc. *Bulletin de l'Institut Scientifique*, section de la Vie, n°28, pp 1-5.
- [72]**Flanders D, Hall-Beyer M and Pereverzoff J, (2003)** Preliminary evaluation of eCognition object-based software for cut block delineation and feature extraction. *Canadian Journal of Remote Sensing*, vol 29, n° 4, pp441-452.
- [73]**Fofana M, (2002)** Télédétection et cartographie des ressources naturelles dans le contexte du programme d'action régionale de la lutte contre la désertification en Afrique. *Atelier de lancement du réseau TPN4-* Tunis, 8-10 Octobre 2002. Ed.OACT, 25p.
- [74]**Fontes F, Aizpuru M, Carayon JL, Guinko S et Hien M, (1999)** La carte numérique, un outil d'appui à la caractérisation et à l'inventaire des ressources végétales - Un exemple en milieu tropical sec, au Burkina Faso. Synthèse. *Cahiers Sécheresse*, volume 10, n°1, pp19-25.

**G**

- [75]**Galochet M, Godard V, Hotyat M, (2002)** Land Units and the Biodiversity of Forest Islets: From Satellite Images to Ground Analysis. Ed. by Lech

Ryszkowski *in: Landscape Ecology in Agroecosystems Management*. Boca Raton, CRC Press : pp317-330.

- [76] **Gay M and Cheret V, (1996)** Evaluation cartographique de la dynamique d'un paysage. Série *Geográfica*, vol. 6, pp37-57.
- [77] **GDTA, (1994)** <http://ceos.cnes.fr:8100/cdrom-00b2/ceos1/science/gdta/fr/a1fr/7.htm>
- [78] **Girard CM et Blasco F, (1996)** *Végétation herbacée terrestre*, In Bonn.F " Précis de télédétection, études thématiques. Tome 2" ed. AUREF-UPELF. Québec, pp198-223.
- [79] **Girard MC et Girard CM, (1999)** *Traitement des données de télédétection*. Ed. DUNOD. Paris, 504p.
- [80] **Godard V, (2005)** Evaluation des dégâts forestiers à l'aide d'un semis de points et d'imagerie satellitale optique. *Revue internationale de géomatique*, volume 15, n°13/2005, pp281-302.
- [81] **Godron M, Daget Ph, Long G, Sauvage Ch, Emberger L, Le Floch E, Poissonet J et Wacquart JP, (1968)** *Code pour le relevé méthodique de la végétation et du milieu. Principes et transcriptions sur cartes perforées*. Paris, CNRS, 291p.
- [82] **Gomes A and Marcal ARS, (2003)** Land cover revision through object based supervised classification of ASTER data. *ASPRS annual conference*, May 2003, Anchorage, Alaska, 9p.
- [83] **Gougeon FA, (2000)** *Towards Semi-Automatic Forest Inventories Using Individual Tree Crown (ITC) recognition technology transfer note*. Forestry Research Applications Pacific Forestry Centre Number 22 Ed. CFS (Canadian Forest Service). <http://www.pfc.cfs.nrcan.gc.ca>.
- [84] **Griguolo S, (2002)** The African side of the Mediterranean basin : a pixel-by-pixel eco-climatic classification. Communication. *International Conference on "Environmental Problems of the Mediterranean Region"* (EPMR 2002), Nicosia. 16p.
- [85] **Grim S, (1989)** *Le pré-aménagement forestier*. Volume 1. Ed. CEE et ministère de l'hydraulique d'Algérie. 369p.
- [86] **Groeve 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, pp233-240.
- [87] **Guis H, (2004)** *Caractérisation par télédétection des unités paysagères favorables à la multiplication des populations de Culicoides, vecteurs de la fièvre catarrhale ovine dans le bassin méditerranéen : Cas de la Corse*. Mastère spécialisé de la conférence des grandes écoles. Ed. CIRAD-EMTV. Projet SILAT. Systèmes d'information localisés pour l'aménagement du territoire, Montpellier. Rapport, 60p.
- [88] **Guyot G, (1983)** Influence des attaques parasitaires sur les propriétés optiques des organes des couverts végétaux, *In séminaire 'application de la télédétection à l'agriculture'*. Paris le 5,6 et 7decembre 1983. Les colloques de l'INRA, n°2, pp83-103.

- [89]Guyot G, (1987) *Climatologie de l'environnement : de la plante aux écosystèmes*. Ed.Masson, paris, pp1-61.

## H

- [90]Hakdaoui M, (2007) *Traitement de la donnée Landsat Sous ERDAS*. Notes de cours. Centre Régional Africain des Sciences et Technologies des Sciences et Technologies de l'Espace. Casablanca-Maroc, 115p.
- [91]Harvey BP et Vaillancourt J, (2000) *Consultation publique préalable à la confection des plans généraux d'aménagement forestiers des aires communes 31-02 et 31-04*. Projet réalisé pour l'Association Forestière Québec Métropolitain inc. par bphenvironnement et l'Atelier d'aménagement, d'urbanisme et d'environnement. Québec ; 30p. + 5 annexes.
- [92]Hoffman RR and Markman AB, (2001) *Interpreting remote sensing imagery: human factors*. Ed. CRC Press, 289 p.
- [93]Horler DNH and Ahern FJ, (1986) Forestry information content of Thematic Mapper data. *International Journal of Remote Sensing* 7, pp405-428.
- [94]Horning N, (2004) *Remote sensing. Image classification and interpretation*. Ed. Center for Biodiversity and Conservation at the American Museum of Natural History. [www.cbd.int](http://www.cbd.int)
- [95]Hotyat M, (1998) *De la donnée satellitaire à l'analyse stationnelle : recherche méthodologique pour une approche de la forêt française*. La réalité de terrain en télédétection : pratiques et méthodes. Ed. AUPELF-UREF, pp55-61.

## I

- [96]IFN, (2003a) Bases de données cartographique. [www.ifn.fr](http://www.ifn.fr)
- [97]IFN, (2003b) Nomenclature du type de peuplement. [www.ifn.fr](http://www.ifn.fr)
- [98]IFREMER-PMSE, (2002) *Apport des données du satellite spot-5 aux études environnementales de la zone du delta du Rhône et de l'étang de Bere*. Projet ' littoral de Provence occidentale'.Ed. PMSE (Pole méditerranéen des sciences de l'environnement). Aix en Provence, France, 37p.
- [99]Ivits E and Koch B, (2000) object-oriented remote sensing tools for biodiversity assessment: a European approach, <http://www.definiens-imaging.com>

## K

- [100]Kayitakire F, Farcy C AND Defourny P, (2002) IKONOS-2 imagery potential for forest stands mapping. *ForestSAT Symposium*. Edinburgh: Heriot Watt University, pp1-11.
- [101]Kepner W, Watts C, Edmonds C and Richter H, (2007) A Landscape Approach to Monitoring and Assessing Environmental Condition in the Upper San Pedro River Basin. <http://www.epa.gov/crdlvweb/land-sci/san-pedro.htm>



- [102] **Klein U and Sester M, (1998)** Segementation of remotly sensed images based on the incertainty of multispectral classification. IN Fritsh.D, English.M and Sster.M eds, Vol32/4, *IAPRS commission IV SYMPOSIUM ON GIS - between visions and applications*, Stuttgart, Germany, pp299-305.
- [103] **Kleinn C, (2002).** Nouvelles technologies et méthodologies pour les inventaires forestiers nationaux. *Unasylva*, 210 - Evaluation et surveillance des forêts Vol. 53 2002/3 FAO.
- [104] **Kok (de) R, Buck A, Schneider T and Ammer U, (2000)** Analysis of image objects from VHR imagery for forest GIS updating in the Bavarian Alps. *ISPRS*, Vol. XXXIII, Amsterdam, 2000, 8p.
- 
- L**
- [105] **Labrecque S, Fournier RA, Luther JE and Piercey D, (2006)** A comparison of four methods to map biomass from Landsat -TM and inventory data in western Newfoundland. *Forest Ecology and Management* 226, pp129-144.
- [106] **Lagabrielle E, Metzger P, Martignac C, Durieux L et Grellet G, (2005)** Guide critique d'utilisation des informations produites dans le cadre du projet TEMOS à la Réunion- rapport Cirad, IRD, les EPCI de la Réunion et la région Réunion. France.
- [107] **Lamhamedi MS, Ammari Y, Fecteau B, Fortin JA et Margolis H, (2000).** Problématique des pépinières forestières en Afrique du Nord et stratégies de développement. *Cahiers d'études et de recherches francophones/Agricultures* 2000 ; Volume 9, Numéro 5 : pp369-380.
- [108] **Lapierre H, Harvey BP, (2002)** Perception simplifiée de la forêt dans une approche de protection de la diversité des écosystèmes forestiers. Colloque sur la planification forestière. L'aménagement intégré des ressources en milieu forestier : concepts et outils. 31 octobre et 1 novembre 2002. Université du Québec, Rimouski, Québec.
- [109] **Larcena D et Puech D, (1998)** la dynamique des paysages : de l'approche spatiale par télédétection à la mise en place d'indicateurs comptables : la plaine de la Crau. Revue de l'économie méridionale. *In Congrès 'le paysage entre culture et nature'*. journée scientifique, Montpellier, France (23/01/1998) 1998, vol. 46, n° 183 (136 p), pp301-323.
- [110] **Lashbrook J, Williams R, Nichols J, Heiligmann R, Motsch B, Romig R, and Vimmersted J, (2001)** The Application of Remote Sensing to the Inventory of White Pine (*Pinus Strobus* L.) in Eastern Ohio. Research Bulletin 1194. September 2001, Ohio Agricultural Research and Development Center.
- [111] **Leckie DJ, Walsworth N, Dechka J and Wulder M, (2002)** An investigation of two date unsupervised classification in the context of a national program for Landsat based forest change mapping. *Remote Sensing Symposium*. Toronto, Juin du 24-28 International Geosciences and Remote Sensing Society's (IGARSS), 9p.

- [112] **Legg CA, (1992)** *Remote sensing and geographic information systems.geological mapping, mineral exploration and mining*, Ed.Ellis Horwood. England, 166p.
- [113] **Le Houérou N, (1995)** Bioclimatologie et biogéographie des steppes arides du nord de l'Afrique. *Options méditerranéennes*, série B, n°10, CIHEAM, Montpellier, 396p.
- [114] **Lejeune P, (2001)** Les possibilités d'utilisation du matériel GPS en forêt. Note technique forestière de Gembloux n°. Faculté universitaire des sciences agronomiques de Gembloux, Belgique. 10p.
- [115] **Letreuch Belarouci N, (1991)** Les reboisements en Algérie et leurs perspectives d'avenir. Vol.1. Office des publications universitaires, Alger. 294p.
- [116] **Lienard B, (1986)** La télédétection par satellites de dernière génération, un nouvel outil pour l'aménagement et la foresterie. Expérimentation en forêt domaniale de Rambouillet. Institut d'aménagement et d'urbanisme de la région d'île de France, Paris, 140p.
- [117] **Lillesand T, Chipman J and Kiefer R, (2004)** *Remote Sensing and Image Interpretation* Section 7.7 Image classification (pp550-552). Section 7.11, Unsupervised classification (pp573-577). Ed. Wiley: New York, 756 p.
- [118] **Lillesand T, Chipman J and Kiefer R, (2008)** *Remote Sensing and Image Interpretation* 6<sup>th</sup> edition. Wiley: New York. 756pp.
- [119] **Rondeux J et Lecomte H, (2002)** Les inventaires forestiers nationaux en Europe : Tentative de synthèse. Cahier n°5. Collection, les cahiers forestiers de Gembloux. Ed. Faculté de Gembloux, 29p.
- [120] **Louy O, Borne F et Marceau DJ, (2000)** Etude de la variabilité spatiale de *couverts forestiers en fonction de l'échelle d'observation*". *Géomatique Expert* n°9, pp20-30.
- [121] **Lu D, (2006)** The potential and challenge of remote sensing-based biomass estimation. *International Journal of Remote Sensing*: 27, pp1297-1328.

## M

- [122] **MacGarigal K, (2002)** Landscape pattern metrics. *Encyclopædia of envoronmetrics*. Volume2. John Wiley and sons (Eds), Sussex, England, pp1135-1142.
- [123] **Mäkelä H et Pekkarinen A, (2001)**. Estimation of timber volume at the sample plot level by means of image segmentation and Landsat TM imagery. *Remote Sensing of Environment* 77: pp 66 -75.
- [124] **Maire A, (1989)** *Analyse et classification de la végétation*, document technique n°15. *Bulletin de l'entomofaune*, numéro du 5 juin 1989, pp3-4.
- [125] **Malingreau JM, (1993)** Le point sur la surveillance par satellite des forêts mondiales. *Unasyuva* n°174 Ed. FAO *Revue internationale des forêts et des industries forestières* - Vol. 44 - 1993/3. www.fao.com
- [126] **Mallinis Karamanolis D, Karteris M and Gitas I, (2006)** An object oriented approach for the discrimination of forest areas under the criteria of

forest legislation in Greece using very high resolution data. *The international Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol. 34, Part XXX. 6p.

- [127]**Mallinis G, Koutsias N, Makras A and Karteris M, (2004)** Forest Parameters Estimation in a European Mediterranean Landscape Using Remotely Sensed Data. *Forest science*, 50: pp450-460
- [128]**Marceau DJ, Gratton DJ, Fournier RA and Fortin JP, (1994)** *Remote Sensing and the Measurement of Geographical Entities in a Forested Environment. 1: The Optimal Spatial Resolution*». *Remote sensing of Environment*, n° 49, pp105-117.
- [129]**Marceau DJ and Geoffrey JH, (1999a)** Scaling and Modelling in Forestry: Applications in Remote Sensing and GIS. *Canadian Journal of Remote Sensing*. Vol 25, n°4, pp 342-346.
- [130]**Marceau J and Geoffrey JH, (1999b)** Remote sensing contributions to the scale issue. *Canadian journal of remote sensing*. Vol. 25, n°4, pp357-366.
- [131]**Mezali M et Goussanem M, (2003)** Déclaration à la troisième session du forum des nations unis sur les forêts. 26 - 06 juin 2003. Genève, 9p.
- [132]**Michalland B, (1998)** Analyse du rôle de la politique forestière dans l'extension de la forêt en France. In : "*Gestion des territoires ruraux. Connaissance et méthodes pour la décision publique*". Actes de colloque, Clermont- Ferrand, 27-28 Avril. Ed. cemagref ; Tome 2, pp683-686.
- [133]**Mihai B, Savulescu I, Sandric I et Oprea R, (2006)** Application de la detection des changements a l'etude de la dynamique de la végétation des monts de Bucegi (Carpates meridionales, Roumanie). *Téléédétection*, vol 6, n°3, pp215-231.
- [134]**Mitri GH and Gitas IZ, (2002)** The development of an object-oriented classification model for operational burned area mapping on the Mediterranean island of Thasos using LANDSAT TM images. *Forest Fire Research & Wildland Fire Safety*, Viegas (ed.) 2002 Millpress, Rotterdam, ISBN 90-77017-72-0, 12p.

## N

- [135]**Nogueira EM, Bruce Nelson BW and Fearnside PM, (2005)** Wood density in dense forest in central Amazonia, Brazil *Forest Ecology and Management*. Volume 208, Issues 1-3, 5, pp261-286.
- [136]**Nziengui M, Rudant JP, Mougou E, Begue A, Pain-Orcet M, Balley S, Usselmann P et Ikogou S, (2002)** Imagerie spatiale et aménagement forestier au Gabon. *Bulletin - Société française de photogrammétrie et de téléédétection*, n°167, pp16-29.

## O

- [137]**Ohmann JL and Gregory MJ, (2002)** Predictive mapping of forest composition and structure with direct gradient analysis and nearest-neighbor imputation in coastal Oregon, USA. *Canadian Journal for natural resources*. Vol 32, pp725-741.

- [138]**Oliver D, Barbara K and Holger W, (2004)** *Automatic segmentation and characterization of forest stand parameters using airborne lidar data, multispectral and fogis data*. In Proceedings of the ISPRS working group VIII/2. 'Laser-Scanners for Forestland Landscape Assessment' Freiburg, Germany, 03-06 October.
- [139]**ONF, (1989)** Manuel d'aménagement. Ed. ONF. France, 151p.
- [140]**ONU, (2002)** Rapport national. Profil de l'Algérie. Sommet mondial pour le développement durable - Johannesburg du 26 août au 4 septembre 2002. CP2002-Algérie, 72p.
- [141]**Ozenda P, (1986)** *La cartographie écologique et ses applications*. Collection, écologie appliquée et sciences de l'environnement, numéro.7. Ed. Masson. Paris, France, 155p.
- [142]**Ozenda P, (1994)** *Végétation du Continent européen*. Ed. Delachaux & Niestlé, 272p.
- 
- P**
- [143]**Pain-Orcet M, Lo Seen D, Fauvet N, Trebuchon JF 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. Ed. CIRAD-forêt, 31p.
- [144]**Pardé J et Bouchon J, (1987)** *Dendrométrie*. (pp144-198), Nancy-France: ENGREF.
- [145]**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, 116p.
- [146]**Pointereau P, (1994)** Vers une foresterie durable. *Le Courrier de l'environnement n°23*, novembre 1994. INRA, France.
- [147]**Pouncey R, Swanson K and Hart K, (1999)** ERDAS field guide™. Fifth edition,. Revised and Expanded. Ed. ERDAS®, Inc. Atlanta, Georgia, USA, p 5 (698P)
- [148]**Puech C, (1991)** *Apport de la télédétection à l'aménagement des bassins versants par petits ouvrages en Afrique soudano-sahélienne. Utilisation rationnelle de l'eau des petits bassins en zone aride*. Ed. AUPELF-UREF. John Libbey Eurotext. Paris, pp323-340.
- [149]**Puech C et Vin P, (1998)** Une approche physique de la résolution optimale par analyse géométrique et radiométrique des éléments constitutifs du pixel. Application à un couvert forestier méditerranéen. *Canadian journal of remote sensing*, Vol.25, n°4, pp381-388.
- [150]**Puech C, (2000)** Utilisation de la télédétection et des modèles numériques de terrain pour la connaissance du fonctionnement des hydrosystèmes. Mémoire de recherche. Habilitation à diriger des recherches, Mécanique des milieux, géophysique et environnement, INPG Grenoble, 105p.

## Q

- [151] **Quézel P, (2000)** *Réflexions sur l'évolution de la flore et de la végétation au Maghreb méditerranéen*. IBIS PRESS (Eds). Paris, 217p.

## R

- [152] **Rameau JC, Bissardon M et Guibal L, (1996)** Types d'habitats français. Traduction originale de la version "CORINE biotopes". Troisième chapitre. Ed. Enegref. Nancy France, 52p.
- [153] **Renaud A, (2000)** Cartographie du volume ligneux des peuplements de la forêt boréale à l'aide de données d'altimétrie LASER. Mémoire de maîtrise en géographie (pp 3-12). Université du Québec à Montréal.
- [154] **Riano 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, pp1056-1060.

## S

- [155] **Saket M, (2002)** Lacunes dans les informations nationales sur les forêts et les arbres dans les pays en développement. *Unasylva* - No. 210 - Evaluation et surveillance des forêts Vol. 53 2002/3 .<http://www.fao.org/DOCREP/005/Y4001F02>.
- [156] **Seigue A, (1985)** *La forêt circum-méditerranéenne et ses problèmes*. Ed. Maisonneuve et Larose, Paris, 502p.
- [157] **Sejalon S, (2002)** *Contribution à la définition d'une méthode pour l'évaluation des sites Natura 2000*. Application au Parc National du Mercantour. Mémoire de fin d'étude pour le diplôme d'ingénieur de l'ENSHAP, 2002, 39p. + annexes.
- [158] **Sejalon S, (2003)** Approche Paysagère ; EON2000+ Annexe - Documents relatifs au projet EON2000+ (observation de la terre pour NATURA 2000), France, 4p.
- [159] **Schermann N et Baudry J, (2002)** *Analyse descriptive multi-échelle de la structure d'un paysage Application à la mosaïque d'occupation du sol d'un territoire agricole dans le bocage breton*. *Revue internationale de géomatique*. Volume 12 – n° 3-4/2002, pp1-18.
- [160] **Schlaepfer R, (1997)** Ecosystem-Based Management of Natural Resources: a Step towards Sustainable Development. International Union of Forestry Research Organisations, *Occasional Paper n°6*, Vienna, 17p.
- [161] **Schönfelder I et Schönfelder P, (1988)**, *Guide de la flore méditerranéenne*. Ed. Hatier, Fribourg, Suisse, 314p.
- [162] **Schreuder HT, Gregoire TG and Wood GB, (1993)** *Sampling Methods for Multiresource Forest Inventory*. John Wiley & Sons, New York, 446 p.
- [163] **Schwarz Stein Meier CH and Waser L, (2001)** Detection of storm losses in alpine forest areas by different methodical approaches using high-resolution satellite data, in: *Proceedings of the 21<sup>st</sup> EARSOL symposium*, Paris, 7p.

- [164]**Shirish A, Ravan P, Roy S and Sharma CM, (1995)** Space remote sensing for spatial vegetation characterization. *J. Biosci.*, Vol. 20, Number 3, June 1995, pp 427–438. © Printed in India.
- [165]**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, pp153-178.
- [166]**SIF (Service de l'inventaire forestier), (1991)** Placettes-échantillons permanentes, normes techniques. Ministère de l'énergie et des Ressources du Québec, Canada, 202p.
- [167]**Smith GM and Fuller RM, (2001)** An integrated approach to land cover classification : An exemple in the island of Jersey. *International Journal Of Remote Sensing*, 22, pp3123-3142.
- [168]**Steven EF, (2000)** *Remote sensing for sustainable forest management*. Ed. CRC Press, ISBN 1566703948, 9781566703949, 407p.
- [169]**Steven (de Jong) M, Hornstra T and Maas HG, (2001)** an integrated spatial and spectral approach to the classification of Mediterranean land cover types: the SSC method. *JAG*, Volume 3, pp176-183.
- [170]**Stolle F, Dennis. RA, Kurniawan I and Lambin EF, (2004)** Evaluation of remote sensing-based active fire datasets in Indonesia. *Intentional journal of remote sensing*, vol. 25, n°2, pp 471–479. Ed.Taylor and Francis.
- [171]**Strand H, Höft R, Stritholt J, Miles L, Horning N, Fosnight E and Turner W, (2007).** *Sourcebook on Remote Sensing and Biodiversity Indicators*. Secretariat of the Convention on Biological Diversity, Montreal, Technical Series, n°32, 203 p.

## T

- [172]**Tokola T, (2000)** The Influence of field sample data location on growing stock volume estimation in Landsat TM-Based Forest Inventory in Eastern Finland. *Remote Sensing of Environment* 74: pp422–431.
- [173]**Totte M, (1998)** La géomatique: intérêt et conditions d'appropriation pour les projets de développement. Un outil d'aide a la capitalisation et au suivi-evaluation des microrealisations. Exemple au Yatenga (Burkina Faso). Point de vue. *Cahiers sécheresse*. Vol 9, pp299-307.
- [174]**Travaglia C, Milenova C and Nedkov R, (2001)** Preparation of land use database in Bulgaria through remote sensing and GIS. *Environment and natural resources. Working paper*. Ed. FAO, Rome, Italia, 57p.

## V

- [175]**Vogiatzakis IN and Careddu MB, (2003)** Mapping the distribution and extent of *Quercus suber* habitats in Sardinia: a literature review and a proposed methodology *Geographical Paper* n°171, 25p.

## W

- [176] **Wallerman J, (2003)** *Remote sensing aided spatial prediction of forest temperature*. Doctoral dissertation. ISSN 1401-6230, ISBN 91-576-6505-2. Swedish University of Agricultural Sciences. Umeå.. Printed by: SLU Grafiska Enheten, Umeå-Sweden, 42p. (pp7-17).
- [177] **Willhauck G, (2000)** Comparison of object oriented classification techniques and standard image analysis for the use of change detection between spot multispectral satellite images and aerial photos, *ISPRS XXXIII conference*, Amsterdam, Netherlands, 8p.
- [178] **Wulder MA and Seemann D, (2003)** Forest inventory height update through the integration of lidar data with segmented landsat imagery. *Canadian journal of Remote sensing* 29: pp536-543.

## Y

- [179] **Yanqiu XX, Lihai W and Westinga E, (2004)**, Assessment of degraded matorralland using remote sensing imagery in Guadalteba Area, Spain *Journal of Forestry Research*, 2004,15(2), pp145-149. [www.jfr.nefu.edu.cn/ylist.aspx?id=92](http://www.jfr.nefu.edu.cn/ylist.aspx?id=92).

## Z

- [180] **Zöhrer F, Foster H and Schindle W, (1987a)** *Forest management plans for developing countries*. Munich, Federal Republic of Germany: DFS Deutsche Forstinventur-Service GmbH, 103 p.
- [181] **Zöhrer F, Forster H et Shindele W, (1987b)** Plans d'aménagements forestiers pour les pays en voie de développement .Ed. DFS (Deutch Forstinventur-service. Munich-R.F d'Allemagne, pp23-35.
- [182] **Zhenga D, Rademacher J, Chena J, Crowc T, Breseea M, Moined J (le) and Ryu SR, (2004)** Estimating aboveground biomass using Landsat 7 ETM+ data across a managed landscape in northern Wisconsin, USA. *Remote Sensing of Environment* 93, pp402-411.

## Sites Internet

- [www.ac-toulouse.fr/lyc-arenes-toulouse](http://www.ac-toulouse.fr/lyc-arenes-toulouse) (2004)
- [www.itc.nl/library/Papers/HUSSIN.application.ACRS.2002.pdf](http://www.itc.nl/library/Papers/HUSSIN.application.ACRS.2002.pdf)
- [http://www.pfc.forestry.ca/monitoring/inventory/terms/procedures\\_f.html](http://www.pfc.forestry.ca/monitoring/inventory/terms/procedures_f.html)
- [www.vanoise.com/fr/savoir/pa03\\_09.pdf](http://www.vanoise.com/fr/savoir/pa03_09.pdf) (2004)
- <file:///c:/multimedia/courswww/courstdl/lc1.html> (2006)
- <http://landcover.usgs.gov/pdf/anderson.pdf> (2005). National Land Cover Data
- <http://http://landcover.usgs.gov/classes.asp> (2005)
- FAO Land Cover Classification. <http://www.africover.org/LCCS.htm> (2004)
- [http://medias.obs-mip.fr/isle\\_reunion](http://medias.obs-mip.fr/isle_reunion) (2007)
- <http://ceos.cnes.fr:8100/cdrom00b2/ceos1/science/gdata/fr/a1fr/7.htm> (2006)
- [www.scf.ca](http://www.scf.ca), (2002)
- <http://www.epa.gov/crdlvweb/land-sci/san-pedro.htm> (2007)
- [http://eon2000plus.espaces-naturels.fr/indicateurs\\_MERCANTOUR.htm](http://eon2000plus.espaces-naturels.fr/indicateurs_MERCANTOUR.htm) (2008)
- [http://ifn.fr/cgi-bin/ratatouille.pl?modele=/pages/fr/bd/nomenclature-peuplement\\_forestier.htm](http://ifn.fr/cgi-bin/ratatouille.pl?modele=/pages/fr/bd/nomenclature-peuplement_forestier.htm)
- [www.cbd.int](http://www.cbd.int)

# *Annexes*



## Annexe 1

### Liste des abréviations

<b>ACP</b> : analyses en composantes principales
<b>AVHRR</b> : Advanced Very High Resolution Radiometer
<b>BNEDER</b> : Bureau National d'Etudes pour le Développement Rural
<b>BNEF</b> : Bureau National des Etudes Forestières
<b>BRI</b> : Brilliance Index
<b>CAH</b> : Classifications Ascendantes Hiérarchiques
<b>CEMAGREF</b> : Centre de Machinisme, du Génie Rural, des Eaux et Forêts
<b>CAO</b> : Cartographie Assistée par Ordinateur
<b>DGF</b> : Direction Générale des Forêts
<b>ECOFOR (GIP)</b> : Ecosystèmes Forestiers (groupement d'intérêt public)
<b>ETM+</b> : Enhanced Thematic Mapper Plus
<b>ERS-SAR</b> : European remote Sensing satellites- Synthetic Aperture Radar
<b>FAO</b> : Food and Agriculture Organisation
<b>GDTA</b> : Groupement pour le Développement de la Télédétection Appliquée
<b>GPS</b> : Global Positioning System
<b>HRV</b> : Haute Résolution Visible
<b>IFN</b> : Inventaire Forestier National
<b>IFREMER</b> : Institut Français de Recherche pour l'Exploitation des Mers
<b>IRS</b> : Indian Remote sensing Satellites
<b>ISODATA</b> : Iterative Self Organizing Data Analysis
<b>J-ERS</b> : Japanese Earth Resource sensing
<b>LIDAR</b> : Light Detection and Ranging
<b>MAUP</b> : Modifiable Area Unit Problem
<b>MNT</b> : Modèle Numérique de Terrain
<b>MODIS</b> : Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer
<b>MSS</b> : Multispectral Scanner
<b>NDVI</b> : Normalised Difference Vegetation Index.
<b>NavSTAR</b> : Navigation Satellite Timing and Ranging.
<b>NOAA</b> : National Oceanic and Atmospheric Administration
<b>ONU</b> : Organisation des Nations Unies
<b>OSR</b> : Optimal Spatial Resolution
<b>PER</b> : Programme d'Emploi Rural
<b>PIR</b> : Proche InfraRouge
<b>MIR</b> : Moyen InfraRouge
<b>IRT</b> : InfraRouge Thermique
<b>PNUE</b> : Programme des Nations Unis pour l'Environnement
<b>PNR</b> : Plan National de Reboisement
<b>PNUF</b> : Plan National de Développement Forestier
<b>PV</b> : Procès Verbal
<b>RESURS</b> : Russian earth surface resourcing satellites
<b>SCF</b> : service canadien des forêts
<b>SIF</b> : Service de l'Inventaire Forestier
<b>SIG</b> : Système d'Information Géographique
<b>SGBD</b> : Système de Gestion de Base de Données
<b>SPOT</b> : Système Pour l'Observation de la Terre
<b>TM</b> : Thematic Mapper
<b>UP</b> : Unités Paysagères
<b>USP</b> : Unités Sylvo-Paysagères

## Annexe 2

### Liste des tableaux

Tableau 1. Comparaison entre classification dirigée et non dirigée.....	28
Tableau 2. Expression des priorités sur les zones forestières semi-arides.....	46
Tableau 3. Moyennes des précipitations et des températures mensuelles maximales et minimales (1990-2003)-Djelfa.....	50
Tableau 4. Températures et précipitations moyennes mensuelles de la période 1996-2005-Mascara.....	54
Tableau 5. Nomenclature simplifiée des différents niveaux de classifications utilisés	61
Tableau 6. Correspondances entre classes spectrales et classes thématiques-Djelfa...	76
Tableau 7. Correspondances entre classes spectrales et classes thématiques-Mascara	77
Tableau 8. Relations : strates spectrales - classes spectrales - classes thématiques.....	77
Tableau 9. Précision des différents algorithmes de classifications dirigées.....	79
Tableau 10. Précision des classifications dirigées par cantons (Méthode par max. de vraisemblance).....	79
Tableau 11. Répartition de la surface du canton "la mare d'eau" par types de peuplements (classification par Max. vraisemblance).....	81
Tableau 12. Répartition de la surface du canton "Djira" par types de peuplements (classification par Max. vraisemblance).....	81
Tableau 13. Répartition de la surface du canton "Ras Karoun" par types de peuplements (classification par Max. vraisemblance).....	81
Tableau 14. Principales sous-unités paysagères définies dans la forêt Senalba.....	90
Tableau 15. Matrice de confusion de la classification dirigée par la méthode du max de vraisemblance- Djelfa.....	97
Tableau 16. Inventaire par échantillonnage. Analyse simple de variance.....	108
Tableau 17. Résultats de l'Analyse de variance (forêt de Tlemcen).....	108
Tableau 18. Paramètres Physiques et dendrométriques des placettes d'inventaire.....	110
Tableau 19. Paramètres de l'arbre modèle idéal et l'arbre modèle réel ( $h_m$ and $d_m$ )....	111
Tableau 20. Matrice de confusion de la classification supervisée-Tlemcen.....	112
Tableau 21. Répartition de la surface d'étude par strates et volume.....	112
Tableau 22. Correspondances classes spectrales-classes thématiques - Tlemcen.....	112
Tableau 23. Fiche descriptive de l'unité sylvo-paysagère sous un SIG .....	120

## Annexe 3

### Liste des figures

Figure 1. Spectre électromagnétique.....	15
Figure 2. Exemple de signatures spectrales pour la végétation, l'eau et le sable.....	19
Figure 3. Comportement spectral des principaux éléments constitutifs des surfaces terrestres.....	21
Figure 4. Effet de la topographie sur la reflectance.....	23
Figure 5a. Histogramme montrant un bon choix des zones tests.....	30
Figure 5b : Histogramme montrant un mauvais choix des zones tests.....	30
Figure 6. Forêts du bassin méditerranéen.....	41
Figure 7. Localisation générale des régions et des zones d'étude.....	47
Figure 8. Répartition des précipitations moyennes annuelles (1990-2003)-Djelfa .....	50
Figure 9. Précipitations moyennes mensuelles (1990-2003)-Djelfa.....	50
Figure 10. Variation des températures moyennes mensuelles de la période 1990-2003- Djelfa.....	51
Figure 11. Diagramme Ombrothermique de la station de Djelfa (1990-2003).....	52
Figure 12. Répartition des précipitations moyennes mensuelles de la période 1996-2005- Sig.....	55
Figure 13. Variation des températures moyennes mensuelles de la période (1996-2005), station de Sig..	55
Figure 14. Diagramme Ombrothermique de la station de Sig (1996-2005).....	55
Figure 15. Localisation des zones d'étude sur le Climagramme d'Emberger .....	56
Figure16. Carte de situation de la série VIII, Forêt de senalba-djelfa.....	69
Figure 17. Carte de situation de la forêt Moulay Ismaïl de Sig - Masara .....	69
Figure 18. Image SPOT de 1998 en composition colorée couleurs naturelles- Djelfa.....	70
Figure 19. Image SPOT en composition fausses couleurs. Mai 2001-Sig-Mascara.....	71
Figure 20. Classification non- dirigée de l'image SPOT de 1998. Première zone.....	76
Figure 21. Classification non- dirigée de l'image SPOT de 1998. deuxième zone.....	76
Figure 22 Carte des grands types d'occupation du sol de la forêt Moulay Ismaïl de Sig.....	78
Figure 23. Carte provisoire des types d'occupation du sol définis par l'essence dominante.....	78
Figure 24. Carte finale des unités physionomiques.....	80
Figure 25. Profil spectral par transect. Première zone .....	82
Figure 26. Profil spectral par transect. Deuxième zone .....	82
Figure 27. Profil spectral par transect (exemple d'une coupe par bande, première zone).....	83
Figure 28. Définition du paysage.....	87
Figure 29. Localisation de la région d'étude et de la scène Landsat du 23 mars 2001-Djelfa.....	88
Figure 30. Fenêtre géo-référencée extraite de la scène ETM+ de Landsat du 23 mars 2001.....	89
Figure 31. Processus d'extraction des caractéristiques paysagères sous ENVI.....	91
Figure 12. Effet de l'intensité-attribut de couleur.....	92
Figure 33. Effet de l'entropie-attribut de texture .....	92
Figure 34. Effet de la compacité- attribut spatial.....	92
Figure 35. Effet de la valeur max des pixels d'ETM+ 4-attribut spectral .....	92
Figure 36. Exemple de classification par la méthode des k plus proches voisins .....	93
Figure 37. Image ETM+ 432 avant segmentation et après segmentation .....	93
Figure 38. Classification par objet de l'image ETM+ de Landsat du 23 mars 2001.....	94
Figure 39. Classification par pixel de l'image ETM+ de Landsat du 23 mars 201.....	96
Figure 40. Carte de l'ancien zonage (en blanc) et la proposition d'un nouveau zonage (en rouge).....	102
Figure 41. Localisation de la zone d'étude sur l'image ETM+ de Landsat de Mai 2002- Tlemcen .....	105
Figure 42. Localisation et zonage de la zone d'étude en cantons- Tlemcen .....	105
Figure 43. Classification supervisée par Max de vraisemblance. Forêt de Tlemcen.....	111
Figure 44. Organigramme méthodologique pour la cartographie des USP.....	119
Figure 45. Organigramme méthodologique pour l'estimation du volume tige par télédétection .....	126

## Annexe 4

### Données climatiques complémentaires. Forêt Senalba chergui, Djelfa

Tableau 1 : Répartition annuelles des pluies (1990-2003).

Année	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003
<b>P (mm)</b>	447,4	451,5	380	291,4	371	281,1	438,8	391	177	295,6	152,2	238,9	212,8	295,3

Source : ONM Djelfa, 2004

Tableau 2 : Précipitation moyennes mensuelles (1990-2003).

Mois	J	F	M	A	M	J	JT	A	S	O	N	D
<b>P (mm)</b>	48,23	34,02	27,01	30,32	34,32	15,07	6,78	17,92	35,75	28,22	21,35	27,34

Source : ONM Djelfa, 2004.

Tableau 3 : Moyennes des températures mensuelles maximales et minimales (1990-2003)

Mois T	J	F	M	A	M	J	JT	A	S	O	N	D
<b>M</b>	9,47	12,05	15,49	16,62	23,85	30,22	33,96	33,12	27,42	21,31	14,69	10,79
<b>m</b>	0,37	1,3	3,45	5,5	10,52	15,37	18,08	18,03	14,25	9,62	4,83	8,55
<b>M+m/2</b>	4,92	6,67	9,47	11,06	17,18	22,79	26,02	25,57	20,83	15,46	9,76	9,67

Source : ONM Djelfa, 2004.

Tableau 4 : humidité relative moyenne annuelle

Mois	J	F	M	A	M	J	Jt	A	S	O	N	D
<b>Humidité (%)</b>	76,5	62,25	62,83	57,58	52,58	43,08	36,67	39,67	53,25	62,67	71,00	74,50

Source : ONM Djelfa.2004.

**Tableau 5 : Vitesses moyennes mensuelles du vent (1990-2003).**

Mois	J	F	M	A	M	J	Jt	A	S	O	N	D
Vitesses du vent m/s	3,90	3,65	3,97	4,46	4,05	3,5	3,32	3,99	3,06	3,4	3,8	3,88

Source : ONM Djelfa, 2004.

**Tableau 6 : Nombre de jour de gelée (1990-2003).**

Mois	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003
Nombre de jours	24	31	47	29	31	28	39	28	56	37	66	45	45	19

Source : ONM Djelfa, 2004.

**Tableau 7 : Evaporation mensuelle durant la période (1990-2003).**

Mois	J	F	M	A	M	J	JT	A	S	O	N	D
Evaporation (mm)	53,71	73,21	106,64	139,64	187,5	248,92	312,07	281,71	178,07	123,92	77	53,71

Source : ONM Djelfa, 2004.

**Tableau 8 : Nombre de jours de neige (1990-2003)**

Année	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003
Nombre de jours	7	14	7	5	10	6	7	0	0	5	0	5	1	13

Source : ONM Djelfa, 2004

## Annexe 5

**Tableau 9. Correction géométrique de l'image Landsat ETM+ de 2001 (Djelfa)**

ENVI Ground Control Points Table  
ENVI Image to Map GCP Table

Map (x,y), I	image (x,y)	Predict (x,y)		Error (x,y)		RMS error		
537625.00	145250.00	2295.50	3889.25	2295.24	3890.03	-0.26	0.78	0.82
537750.00	145450.00	2300.50	3869.25	2300.24	3870.03	-0.26	0.78	0.86
540425.00	147800.00	2401.25	3803.00	2401.44	3802.43	0.19	-0.57	0.60
540350.00	155250.00	2387.25	3540.75	2387.20	3540.89	-0.05	0.14	0.14
535700.00	152450.00	2220.33	3640.67	2220.35	3640.61	0.02	-0.06	0.07
536600.00	144750.00	2254.67	3907.67	2255.02	3906.61	0.35	-1.06	1.12
<b>Total RMS Error: 0.774687</b>								

**Tableau 10. Correction géométrique de l'image SPOT du 23 juin 1988 (Djelfa)**

ENVI Ground Control Points Table  
ENVI Image to Map GCP Table

Map (x,y),	Image (x,y),	Predict (x,y),		Error (x,y),		RMS Error		
537600.00	144750.00	801.00	891.00	800.99	891.03	-0.01	0.03	0.04
535650.00	152500.00	700.00	542.00	700.00	542.00	-0.00	0.00	0.00
540350.00	155300.00	928.00	408.00	928.01	407.97	0.01	-0.03	0.03
539200.00	144500.00	878.00	917.00	878.06	916.87	0.06	-0.13	0.14
540800.00	147800.00	953.50	771.00	953.46	771.09	-0.04	0.09	0.10
537600.00	144750.00	801.00	891.00	800.99	891.03	-0.01	0.03	0.04
<b>Total RMS Error: 0.074308</b>								

**Tableau 11. Correction géométrique de l'image SPOT du 30 Mai 2002 (Mascara)**

ENVI Ground Control Points Table  
ENVI Image to Map GCP Table

Map (x,y),	Image (x,y),	Preict (x,y),		Error (x,y),		RMS Error		
219960.00	259475.00	96.00	480.50	95.93	480.62	-0.07	0.12	0.13
227169.00	253255.00	456.50	798.00	456.49	798.02	-0.01	0.02	0.03
231620.00	268175.00	678.00	47.00	678.01	46.97	0.01	-0.03	0.03
223080.00	260055.00	251.00	451.50	251.12	451.29	0.12	-0.21	0.24
228840.00	264395.00	538.00	233.50	538.04	233.50	0.04	-0.00	0.04
228260.00	264500.00	509.00	227.50	508.91	227.60	-0.09	0.10	0.13
<b>Total RMS Error: 0.127540</b>								

## Annexe 6.

Matrices de confusion et statistiques générales. Forêt Moulay Ismail de Sig.  
Image SPOT-XS avec une résolution spatiale de 20 mètres

I. Canton "la mare d'eau" Précision globale 82.0513% Kappa Coefficient = 0.7924

Tableau 11. Matrice de confusion. Classification par max de Vraisemblance (en %)

	LHD (Pin)	LHD (Euclpt)	MAD Pin	MAC Ltsq+pin	MD Ltsq+Olstr	MC Ltsq+gnt	HRBC	VD	TOTAL
LHD(Pin)	88.89	44.44	15.38	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	21.79
LHD(Euclpt)	7.41	55.56	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	7.69
MAD (pin)	3.70	0.00	84.62	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	7.69
MAC(Ltsq+pin)	0.00	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00	11.54
MD(Ltsq+Olstr)	0.00	0.00	0.00	0.00	78.57	11.11	4.35	0.00	9.62
MC(Ltsq+gnt)	0.00	0.00	0.00	0.00	21.43	77.78	17.39	0.00	17.95
HRBC	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	7.41	78.26	0.00	12.82
VIDES	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	3.70	0.00	93.75	10.26
TOTAL	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

Tableau 12. Répartition de la surface par types de peuplements

Classe	Nombre de pixels	Résolution du pixel (ha)	Surface de la classe (ha)	% de la surface totale
Ligneux hauts et denses (pin d'Alep)	6742	0.04	269.68	8.69
Ligneux hauts et denses (Eucalyptus):	8405	0.04	336.20	10.83
Matorral arboré dense à pin d'Alep	15672	0.04	626.88	20.20
Matorral arboré clair à lentisques et pin d'Alep	17254	0.04	690.16	22.24
Matorral dense à lentisques et oléastres	14025	0.04	561.00	18.07
Matorral clair à genets et lentisques	9278	0.04	371.12	11.96
Herbacées	4709	0.04	188.36	6.07
Vides (absence ou rareté de végétation):	1517	0.04	60.68	1.95
Total	77602		3104.08	100.00

II. Canton "djira" Précision globale = (71/73) 97.2603% ; Kappa Coefficient = 0.9662

Tableau 13. Matrice de confusion. Classification par max de Vraisemblance (en %)

	LHD (Euclpt)	LHD (Pin)	MAD Ltsq	MD Ltsq+gnt	MC Ltsq+gnt	HRB	VD	TOTAL
LHD(Euclpt)	95.83	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	31.51
LHD(Pin)	4.17	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	13.70
MAD (Ltsq)	0.00	0.00	92.86	0.00	0.00	0.00	0.00	17.82
MDLtsq+gnt	0.00	0.00	7.14	100.00	0.00	0.00	0.00	8.22
MCLtsq+gnt	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	5.48
HRBC	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00	0.00	10.96
VD	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00	12.33
TOTAL	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

Tableau 14. Répartition de la surface par types de peuplements

Classe	Nombre de pixels	Résolution du pixel (ha)	Surface (ha)	% de la surface totale
Ligneux hauts et denses (Thuya)	9751	0.04	390.04	26.11
Ligneux hauts et denses (pin)	9353	0.04	374.12	25.05
Matorral arboré dense à lentisques	4796	0.04	191.84	12.84
Matorral dense à lentisques et genets	3623	0.04	144.92	9.70
Matorral clair à lentisques et genêt	3296	0.04	131.84	8.82
Herbacées	6525	0.04	261.00	17.47
Vides (absence ou rareté de végétation)	174	0.04	6.96	0.46
Total	37344		1493.76	100.00

III.Canton " Ras karoun" Precision globale = (180/199) 90.4523% Kappa Coefficient = 0.8863

Tableau 15. Matrice de confusion. Classification par max de Vraisemblance (en %)

	LHD Thuya	LHD (Pin et Ltsq)	LHD Euclpt	MAD Euclpts	MAD Pin	MAC Ltsq	MD Ltsq+gnt	MC Ltsq+gnt	HRB	VD	TOTAL
LHD(Thuya)	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	14.57
LHD(Pin et Ltsq)	0.00	100.00	30.77	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	32.66
LHD(Euclpt)	0.00	0.00	61.54	10.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	4.52
MADEuclpts	0.00	0.00	07.69	90.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	5.03
MADPin	0.00	0.00	0.00	0.00	100.0	5.26	0.00	0.00	0.00	0.00	5.03
MACLtsq	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	94.74	23.53	0.00	0.00	5.26	11.56
MDLtsq+gnt	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	76.47	22.22	0.00	10.53	8.54
MCLtsq+gnt	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	77.78	15.38	0.00	4.52
HRBC	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	84.62	5.26	6.03
VIDES	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	78.95	7.54
TOTAL	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

Tableau 16. Répartition de la surface par types de peuplements

	Nombre de pixels	Résolution du pixel (ha)	Surface (ha)	% de la surface totale
Ligneux hauts et denses(Thuya)	2465	0.04	98.60	4.14
Ligneux hauts et denses (Pin et Ltsq)	6678	0.04	267.12	11.21
Ligneux hauts et denses (Euclpt)	6064	0.04	242.56	10.18
Matorral arboré dense à Euclpts	5463	0.04	218.52	9.17
Matorral arboré dense à Pin	8145	0.04	325.80	13.67
Matorral arboré clair à Ltsq	8205	0.04	328.20	13.77
Matorral dense à Ltsq+gnt	7736	0.04	309.44	12.99
Matorral clair à Ltsq+gnt	4889	0.04	195.56	8.20
Herbacées	4688	0.04	187.52	7.87
Vides (absence ou rareté de végétation):	5219	0.04	208.76	8.76
TOTAL	59552		2382.08	100.00



## V. Forêt "Moulay Ismail" Précision globale = (752/1115) 67.4439% Kappa Coefficient 0.6284

Tableau 17. Matrice de confusion. Classification par max de Vraiesemblance (en pixels)

	LHD PA	LHD Eclpt	LHD Th	MAD PA	MAD Eclpt	MAD Th	MAD Ltsq	MAC Th	MAC Olsqr	MAC Ltsq	MAC PA-Ltsq	MDLtsq	MC Ltsq	HRB	VD	Total
NC	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
LHD	82	172	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	254
LHD	1	209	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	212
LHD	0	19	6	0	0	8	3	0	0	0	0	0	0	0	0	36
MAD	0	3	5	38	0	5	4	0	0	0	0	0	0	0	0	55
MAD	0	5	0	0	10	0	7	0	0	0	0	0	0	0	0	22
MAD	0	0	0	0	0	58	42	0	0	0	0	0	0	0	0	100
MAD	0	1	0	0	0	0	5	5	0	0	0	0	0	0	0	12
MAC	0	0	0	0	0	0	0	18	3	7	0	0	0	0	0	28
MAC	0	0	0	0	0	0	0	0	55	53	0	0	0	0	0	108
MAC	0	0	0	0	0	0	0	0	2	105	0	0	0	0	0	107
MD	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	81	11	0	0	0	92
MC	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	33	0	0	0	36
HRB	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	31	314	32
VD	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	21	21
	83	409	11	38	10	71	63	23	60	166	84	44	44	31	22	1115

Tableau 18. Matrice de confusion. Classification par max de Vraiesemblance (en %)

	LHD	LHD	LHD	MAD	MAD	MAD	MAD	MAC	MAC	MAC	MD	MC	HRBC	VD	VD	Total
NC	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
LHD	98.80	42.05	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	22.78
LHD	1.20	51.10	0.00	0.00	0.00	0.00	3.17	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	19.01
LHD	0.00	4.65	54.55	0.00	0.00	11.27	4.76	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	3.23
MAD	0.00	0.73	45.45	100.0	0.00	7.04	6.35	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	4.93
MAD	0.00	1.22	0.00	0.00	0.00	0.00	11.11	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.97
MAD	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	81.69	66.67	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	8.97
MAD	0.00	0.24	0.00	0.00	0.00	0.00	7.94	21.74	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.08
MAC	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	78.26	5.00	4.22	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.51
MAC	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	91.67	31.93	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	9.69
MAC	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	3.33	63.25	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	9.60
MD	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	96.43	25.00	0.00	0.00	0.00	0.00	8.25
MC	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	3.57	75.00	0.00	0.00	0.00	0.00	3.23
HRBC	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	100.0	0.00	4.55	2.87	
VD	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	95.45	1.88	
TOTAL	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0

**Tableau 19. Erreurs de commission et d'omission**

	Précision producteur %	Précision utilisateur %	Précision producteur Pixels	Précision utilisateur Pixels
Ligneux hauts et denses (Pin d'Alep)	98.80	32.28	82/83	82/254
Ligneux hauts et denses (Eucalyptus)	51.10	98.58	209/409	209/212
Ligneux hauts et denses (thuya)	54.55	16.67	6/11	6/36
Matorral arboré dense à pin d'Alep	100.00	69.09	38/38	38/55
Matorral arboré dense à eucalyptus	100.00	45.45	10/10	10/22
Matorral arboré dense à Thuya	81.69	58.00	58/71	58/100
Matorral arboré dense à lentisques	7.94	41.67	5/63	5/12
Matorral arboré clair à thuya	78.26	64.29	18/23	18/28
Matorral arboré clair à lentisques et oléastres	91.67	50.93	55/60	55/108
Matorral arboré clair à pin d'Alep et lentisques	63.25	98.13	105/166	105/107
Matorral dense à lentisques	96.43	88.04	81/84	81/92
Matorral clair à lentisques	75.00	91.67	33/44	33/36
Herbacées	100.00	96.88	31/31	31/32
Vides	95.45	100.00	21/22	21/21

**Tableau 20. Précision du producteur et de l'utilisateur**

	Commission %	Omission %	Commission pixels	Omission pixels
Ligneux hauts et denses (Pin d'Alep)	67.72	1.20	172/254	1/83
Ligneux hauts et denses (Eucalyptus)	1.42	48.90	3/212	200/409
Ligneux hauts et denses (thuya)	83.33	45.45	60/36	5/11
Matorral arboré dense à pin d'Alep	30.91	0.00	17/55	0/38
Matorral arboré dense à eucalyptus	54.55	0.00	12/22	0/10
Matorral arboré dense à Thuya	42.00	18.31	42/100	13/71
Matorral arboré dense à lentisques	58.33	92.06	7/12	58/63
Matorral arboré clair à thuya	35.71	21.74	10/28	5/23
Matorral arboré clair à lentisques et oléastres	49.07	8.33	53/108	5/60
Matorral arboré clair à pin d'Alep et lentisques	1.87	36.75	2/107	61/166
Matorral dense à lentisques	11.96	3.57	11/92	3/84
Matorral clair à lentisques	8.33	25.00	3/36	11/44
Herbacées	3.13	0.00	1/32	0/31
Vides	0.00	4.55	0/21	1/22

**Tableau 21. Répartition de la surface par types de peuplements**

Classe	Nombre de pixels	Résolution du pixel (ha)	Surface (ha)	% de la surface totale
Ligneux hauts et denses (Pin d'Alep)	7948	0.04	317.92	04,54
Ligneux hauts et denses (Eucalyptus)	6567	0.04	262.68	03,75
Ligneux hauts et denses (thuya)	9151	0.04	366.04	05,23
Matorral arboré dense à pin d'Alep	20639	0.04	825.56	11,80
Matorral arboré dense à eucalyptus	8938	0.04	357.52	05,11
Matorral arboré dense à Thuya	13645	0.04	545.80	07,80
Matorral arboré dense à lentisques	9667	0.04	386.68	05,53
Matorral arboré clair à thuya	9702	0.04	388.08	05,55
Matorral arboré clair à lentisques et oléastres	15576	0.04	623.04	08,91
Matorral arboré clair à pin d'Alep et lentisques	13152	0.04	526.08	07,52
Matorral dense à lentisques	15256	0.04	610.24	08,72
Matorral clair à lentisques	13586	0.04	543.44	07,77
Herbacées	8543	0.04	341.72	04,88
Vides	22421	0.04	896.84	12,82
<b>Total</b>	<b>174791</b>		<b>6991.64</b>	<b>100.00</b>

**SYMBOLES** : Euclpt : Eucalyptus ; Ltsq : Lentisque ; gnt : genet ; Th : Thuya ; Olstr :Oleas

## Annexe 7

### Tables de séparabilité des zones d'entraînement- deuxième zone d'étude

#### Image SPOT-XS

**Tableau 23. Séparabilité par paires de zones test (par ordre croissant)**

#### Forêt Moulay Ismaïl de SIG

Région #6 and Région #7 - 0.66129446	Region #9 and Region #10 - 0.84435536
Region #11 and Region #12 - 1.35510810	Region #7 and Region #9 - 1.41497599
Region #9 and Region #11 - 1.59343453	Region #5 and Region #7 - 1.63042438
Region #3 and Region #6 - 1.65626106	Region #2 and Region #7 - 1.66652974
Region #1 and Region #2 - 1.71015192	Region #7 and Region #10 - 1.72375258
Region #6 and Region #9 - 1.72502968	Region #7 and Region #8 - 1.78545718
Region #6 and Region #8 - 1.79767268	Region #9 and Region #12 - 1.81438702
Region #5 and Region #9 - 1.84791285	Region #5 and Region #10 - 1.85681009
Region #8 and Region #9 - 1.87653181	Region #10 and Region #11 - 1.92989798
Region #6 and Region #10 - 1.93481017	Region #8 and Region #10 - 1.93626477
Region #5 and Region #6 - 1.93886644	Region #3 and Region #8 - 1.94509550
Region #3 and Region #7 - 1.94896520	Region #12 and Region #14 - 1.96328640
Region #2 and Region #9 - 1.97418555	Region #11 and Region #14 - 1.98178826
Region #2 and Region #4 - 1.98762575	Region #7 and Region #11 - 1.98783499
Region #2 and Region #6 - 1.98790791	Region #9 and Region #14 - 1.98884785
Region #1 and Region #4 - 1.99202130	Region #2 and Region #11 - 1.99406902
Region #6 and Region #11 - 1.99603717	Region #10 and Region #12 - 1.99698711
Region #5 and Region #8 - 1.99730943	Region #10 and Region #14 - 1.99753030
Region #5 and Region #11 - 1.99766901	Region #2 and Region #5 - 1.99839531
Region #3 and Region #10 - 1.99866158	Region #2 and Region #10 - 1.99884930
Région #4 and Région #7 - 1.99894344	Region #4 and Region #6 - 1.99937802
Region #1 and Région #7 - 1.99954162	Region #3 and Region #9 - 1.99958544
Region #7 and Region #14 - 1.99966973	Region #8 and Region #14 - 1.99971182
Region #5 and Region #14 - 1.99980367	Region #6 and Region #14 - 1.99983261
Region #7 and Region #12 - 1.99986587	Region #3 and Region #4 - 1.99992990
Region #8 and Region #11 - 1.99993819	Region #2 and Region #14 - 1.99995074
Region #4 and Region #8 - 1.99996276	Region #3 and Region #14 - 1.99996759
Region #13 and Region #14 - 1.99996865	Region #4 and Region #14 - 1.99997682
Region #3 and Region #11 - 1.99998925	Region #12 and Region #13 - 1.99999358
Region #6 and Region #12 - 1.99999392	Region #4 and Region #11 - 1.99999446
Region #4 and Region #10 - 1.99999679	Region #4 and Region #12 - 1.99999761
Region #1 and Region #6 - 1.99999778	Region #2 and Region #3 - 1.99999884
Region #3 and Region #12 - 1.99999901	Region #4 and Region #9 - 1.99999936
Region #5 and Region #12 - 1.99999961	Region #1 and Region #9 - 1.99999967
Region #8 and Region #12 - 1.99999967	Region #2 and Region #12 - 1.99999981
Region #1 and Region #14 - 1.99999997	Region #2 and Region #8 - 1.99999998
Region #11 and Region #13 - 2.00000000	Region #3 and Region #5 - 2.00000000
Region #1 and Region #3 - 2.00000000	Region #10 and Region #13 - 2.00000000
Region #1 and Region #11 - 2.00000000	Region #1 and Region #12 - 2.00000000
Region #1 and Region #10 - 2.00000000	Region #6 and Region #13 - 2.00000000
Region #1 and Region #13 - 2.00000000	Region #3 and Region #13 - 2.00000000
Region #5 and Region #13 - 2.00000000	Region #8 and Region #13 - 2.00000000
Region #9 and Region #13 - 2.00000000	Region #4 and Region #5 - 2.00000000
Region #4 and Region #13 - 2.00000000	Region #2 and Region #13 - 2.00000000
Region #1 and Region #5 - 2.00000000	Region #7 and Region #13 - 2.00000000
Region #1 and Region #8 - 2.00000000	

**Tableau 24. identification des parcelles d'entraînement de l'ensemble de la zone**

Region #1:	Ligneux hauts et denses (Pin d'Alep)
Region #2	Ligneux hauts et denses (Eucalyptus)
Region #3	Ligneux hauts et denses (thuya)
Region #4	Matorral arboré dense à pin d'Alep
Region #5	Matorral arboré dense à eucalyptus
Region #6	Matorral arboré dense à Thuya
Region #7	Matorral arboré dense à lentisques
Region #8	Matorral arboré clair à thuya
Region #9	Matorral arboré clair à lentisques et oléastres
Region #10	Matorral arboré clair à pin d'Alep et lentisques
Region #11	Matorral dense à lentisques
Region #12	Matorral clair à lentisques
Region #13	Herbacées
Region #14	Vides

**Tableau 25. Séparabilité par paires de zones test (par ordre croissant).Canton Djira**

Region #3 and Region #4 - 1.24306623	Region #1 and Region #5 - 1.99997328
Region #2 and Region #3 - 1.85152538	Region #1 and Region #3 - 1.99999536
Region #4 and Region #5 - 1.85175810	Region #1 and Region #4 - 1.99999736
Region #1 and Region #2 - 1.86064099	Region #1 and Region #6 - 1.99999970
Region #2 and Region #4 - 1.87596485	Region #6 and Region #7 - 2.00000000
Region #3 and Region #5 - 1.96640767	Region #5 and Region #7 - 2.00000000
Region #2 and Region #5 - 1.96869926	Region #3 and Region #7 - 2.00000000
Region #4 and Region #6 - 1.98229098	Region #2 and Region #7 - 2.00000000
Region #3 and Region #6 - 1.98974160	Region #1 and Region #7 - 2.00000000
Region #2 and Region #6 - 1.99937953	Region #4 and Region #7 - 2.00000000
Region #5 and Region #6 - 1.99946358	

**Tableau 26. Séparabilité par paires de zones test (par ordre croissant). Ras karoun**

Region #2 and Region #3 - 0.96675172	Region #3 and Region #9 - 1.99997403
Region #6 and Region #7 - 1.54607650	Region #2 and Region #8 - 1.99998424
Region #7 and Region #8 - 1.57770165	Region #6 and Region #9 - 1.99998754
Region #3 and Region #6 - 1.70193972	Region #9 and Region #10 - 1.99998928
Region #4 and Region #6 - 1.81105801	Region #1 and Region #5 - 1.99998949
Region #3 and Region #4 - 1.82198926	Region #4 and Region #8 - 1.99999198
Region #2 and Region #6 - 1.82418069	Region #7 and Region #10 - 1.99999615
Region #8 and Region #9 - 1.86594409	Region #1 and Region #6 - 1.99999617
Region #7 and Region #9 - 1.89226519	Region #2 and Region #9 - 1.99999900
Region #1 and Region #2 - 1.95379707	Region #5 and Region #9 - 1.99999973
Region #2 and Region #4 - 1.95701426	Region #1 and Region #7 - 1.99999977
Region #5 and Region #6 - 1.95756832	Region #4 and Region #9 - 1.99999985
Region #3 and Region #7 - 1.96292958	Region #8 and Region #10 - 2.00000000
Region #2 and Region #5 - 1.96843031	Region #3 and Region #10 - 2.00000000
Region #3 and Region #5 - 1.98053887	Region #2 and Region #10 - 2.00000000
Region #4 and Region #7 - 1.98859902	Region #6 and Region #10 - 2.00000000
Region #2 and Region #7 - 1.99106800	Region #1 and Region #4 - 2.00000000
Region #5 and Region #7 - 1.99380499	Region #5 and Region #10 - 2.00000000
Region #4 and Region #5 - 1.99731461	Region #1 and Region #10 - 2.00000000
Region #1 and Region #3 - 1.99942759	Region #1 and Region #9 - 2.00000000
Region #6 and Region #8 - 1.99954875	Region #4 and Region #10 - 2.00000000
Region #3 and Region #8 - 1.99958483	Region #1 and Region #8 - 2.00000000
Region #5 and Region #8 - 1.99995807	

**Tableau 27. Séparabilité par paires de zones test (par ordre croissant).  
Canton la mare d'eau**

Region #6 and Region #7- 0.87866986	Region #2 and Region #4 1.98804948
Region #5 and Region #6 - 1.38443476	Region #2 and Region #6 - 1.99809610
Region #1 and Region #2 - 1.49952949	Region #3 and Region #7 - 1.99921762
Region #5 and Region #7 - 1.65684720	Region #2 and Region #5 - 1.99935061
Region #4 and Region #6 - 1.74333293	Region #4 and Region #8 - 1.99936681
Region #2 and Region #3 1.75969354	Region #1 and Region #6 - 1.99985285
Region #7 and Region #8 1.79155286	Region #2 and Region #7 - 1.99986104
Region #1 and Region #3 1.85650280	Region #3 and Region #5 - 1.99988565
Region #6 and Region #8 - 1.88839361	Region #3 and Region #8 - 1.99988972
Region #3 and Region #6 - 1.91830107	Region #1 and Region #4 - 1.99997051
Region #4 and Region #5 1.92893926	Region #2 and Region #8 - 1.99997947
Region #3 and Region #4 - 1.94248224	Region #1 and Region #7 - 1.99999893
Region #6 and Region #7 1.98127053	Region #1 and Region #8 - 1.99999937
Region #5 and Region #6 1.98767034	Region #1 and Region #5 - 2.00000000

**Tableau 28. Identification des parcelles d'entraînement par canton**

Canton la mare d'eau	
Region #1:	Ligneux hauts et denses (pin d'Alep)
Region #2:	Ligneux hauts et denses (Eucalyptus)
Region #3:	Matorral arboré dense a pin d'Alep
Region #4:	Matorral arboré clair a lentisques et pin d'Alep
Region #5:	Matorral dense a lentisques et oléastres
Region #6	Matorral clair a genet et lentisques
Region #7	Herbacées
Region #8:	Vides (absence ou rareté de végétation)
Canton Djira	
Region #1	Ligneux hauts et denses (Thuya)
Region #2	Ligneux hauts et denses (Pin d'Alep)
Region #3	Matorral arboré dense a lentisques
Region #4	Matorral dense a lentisques et genets
Region #5	Matorral clair a lentisques et genets
Region #6	Herbacées (armoïse)
Region #7	Vides (absence ou rareté de végétation)
Canton Ras karoun	
Region #1:	Ligneux hauts et denses (Thuya)
Region #2	Ligneux hauts et denses (Pin d'Alep et lentisques)
Region #3	Ligneux hauts et denses (Eucalyptus)
Region #4	Matorral arboré dense a Eucalyptus
Region #5	Matorral arboré dense a pin d'Alep
Region #6	Matorral arboré clair a lentisques
Region #7	Matorral dense a lentisques et genets
Region #8	Matorral clair a lentisques et genets
Region #9	Herbacées (armoïse)
Region #10	Vides (absence ou rareté de végétation)

## Annexe 8

### Localisation géographique des relevés floristiques des principales unités physionomiques-Djelfa

**Tableau 29. Principales unités physionomiques définies dans la zone d'étude**

Unités physionomiques	Description	Classes spectrales	Coordonnées UTM des relevés de terrain relatifs aux unités physionomiques
Forêts	Peuplements à <i>Pinus halepensis</i>	Futaie dense (R ≥ 80% ; 20m ≥ h ≥ 10m)	3442'42.32"N ; 38'25.48"E
			3442'25.72"N, 37'31.67"E
			3436'3.69"N, 35'51.51"E
			3436'15.71"N, 36'3.83"E
			3442'23.77"N, 39'2.42"E
	peuplements à <i>Pinus halepensis</i> avec différents degrés de recouvrement	Futaie dense (R ≥ 80% ; h = 9 à 12m) Futaie dense (R = 50-70% ; 9m ≤ h ≤ 12m)	3441'48.74"N, 37'0.25"E
			3439'18.58"N, 31'0'47.34"E
			3435'22.98"N, 35'46.99"E
			3437'43.41"N, 39'14.23"E
	Peuplements à <i>Pinus halepensis</i>	futaie claire (R ≤ 50% ; 9m ≤ h ≤ 12m)	3437'30.46"N, 39'6.37"E
			3436'43.38"N, 37'31.16"E
			3440'23.30"N, 31'1'18.83"E
			3439'12.26"N, 38'49.76"E
Matorrals	Matorral arboré mixte à <i>Pinus halepensis</i> , <i>Quercus ilex</i> et <i>Juniperus oxycedrus</i>	Matorral haut (5m ≥ h ≥ 1.5m)	3441'37.52"N, 38'54.50"E
			3441'43.88"N, 31'0'19.64"E
			3441'26.44"N, 38'28.71"E
			3441'18.77"N, 31'1'48.08"E
			3440'45.73"N, 38'30.88"E
	Matorral à <i>Rosmarinus officinalis</i> et <i>Cistus villosus</i> .	Matorral bas et dense (h ≤ 1.5m)	3442'8.94"N, 39'25.92"E
			3442'44.13"N, 38'57.98"E
			3441'10.61"N, 39'50.45"E
			3436'54.60"N, 35'18.00"E
			3436'28.67"N, 35'47.06"E
			3435'41.54"N, 34'24.21"E
			3441'58.68"N, 31'0'24.16"E
			3439'21.23"N, 31'2'7.96"E
Herbacées	Végétation à <i>Stipa tenacissima</i> et autres graminées	Herbacées (h ≤ 0.5m)	3439'21.66"N, 36'26.45"E
			3439'50.16"N, 39'15.58"E
			3435'54.37"N, 37'3.11"E
			3436'10.95"N, 38'13.63"E
			3439'31.44"N, 31'1'47.83"E
Espaces agricoles		Cultures maraîchères	3442'10.86"N, 38'28.79"E
			3441'11.50"N, 31'0'16.22"E
		vergers	3441'59.64"N, 31'0'0.63"E
			3441'52.25"N, 39'51.65"E
Sols nus	Sols nus		3442'3.31"N, 31'0'23.04"E
			3441'54.07"N, 31'0'14.06"E
			3440'19.09"N, 35'3.65"E
			3440'5.25"N, 34'0.93"E

## Résumé

Cette étude propose une méthodologie qui intègre l'information contenue dans les images satellitaires de moyenne résolution spatiale à la phase d'analyse de l'aménagement forestier en zones semi-arides de l'Ouest algérien. Des classifications basées sur des critères physiognomiques ont caractérisé les formations forestières de ces zones par la hauteur, la densité de couvert et la composition en essences dominantes. Pour une analyse descriptive, des classifications par pixel d'images SPOT et par objet d'images ETM+ de Landsat sont réalisées respectivement sur la forêt Moulay Ismaïl de Sig (Mascara) et la forêt domaniale «Senalba chergui» (Djelfa-Atlas saharien, Algérie). Les premières ont permis de décrire et cartographier des unités homogènes quant à ces critères prédéfinis malgré la grande hétérogénéité floristique et structurale du milieu étudié. Pour une identification sémantique de ces unités, les notions «type physiognomique» et «unité sylvo-paysagère» considérée comme un niveau d'analyse pertinent, sont introduites pour compléter la notion «type de peuplement» devenue insuffisante en zones semi-arides. La classification orientée-objet basée sur un facteur d'échelle compris entre 45 et 50, sur des attributs spatiaux et spectraux et sur la méthode des K plus proches voisins, a permis de caractériser à l'échelle du paysage, un milieu forestier hétérogène en simplifiant le contenu de l'image tout en conservant l'information utile sur les types d'occupation spectralement et spatialement homogènes : peuplements de pin d'Alep (denses et compacts, denses et fragmentés, clairs), les matorrals arborés à genévrier et chêne vert, les matorrals à romarin et ciste et les herbacées. En ce qui concerne l'aspect dendrométrique et les potentialités de production, une approche est proposée pour estimer le volume-tige de la forêt résineuse de Tlemcen à travers l'intégration de données ETM+ de Landsat (stratification par l'algorithme du Max. de vraisemblance) aux placettes-terrain de dimensions comparables à celles du pixel. Une analyse de variance suivie d'une stratification (précision 93%) ont permis avec les 12 placettes échantillons assises sur terrain d'estimer un volume de 27535,212 m<sup>3</sup>±14.66%, une précision considérée comme acceptable pour les inventaires dendrométriques expéditifs.

**Mots-clés :** Télédétection ; Aménagement ; Forêt ; Matorral ; Semi-aride ; Volume-tige; Ouest-algérien.

## Abstract

This study proposes a methodology that integrates contained information within medium spatial resolution satellite imagery to the forest planning's in semiarid zones of western Algeria. Classifications based on physiognomic criteria enabled to characterise forest formations of these zones by height, by cover density and by the dominant species composition. For a descriptive analysis, per pixel classifications of SPOT imagery and per object ones of Landsat ETM+ imagery are achieved respectively on the forest 'Moulay Ismail' of Sig (Mascara) and on the state forest "Senalba chergui" (Djelfa-Saharan Atlas, Algeria). First ones permitted describing and mapping homogeneous units concerning these predefined criteria despite the great floristic and structural heterogeneity of the survey zone. For a semantic identification of these units, notions as «physiognomic type» and «forest landscaped unit» admitted as a pertinent analysis level, are introduced to complete the «stand type» one, getting insufficient in semiarid zones. Object oriented classification based on 45-50 values of the scale factor, on spatial and spectral attributes and on the Knn method, permitted to characterize at the landscape level, heterogeneous forest environment while simplifying the image content and conserving useful information about spectrally and spatially homogeneous land cover types, such as various Aleppo pine stands (dense and compact, dense and fragmented, opened), high Juniper and oak shrub-lands, rosemary low shrubs-lands and herbaceous. As for the dendrometrical analysis, an approach is proposed for stem volume estimation of the coniferous forest of Tlemcen through Landsat ETM+ data integration (stratification using Max. likelihood algorithm) to field plots with the same size as the pixel. Analysis of variance forwarded by stratification (accuracy 93%) permitted by means of 12 field sample plots, to produce global growing volume estimate of 27535,212 m<sup>3</sup>±14.66% which is an acceptable accuracy for expeditious dendrometrical inventories.

**Key-words:** Remote sensing ; Planning ; Forest ; Shrub-land ; Semiarid ; Stem volume ; Western Algeria.

## ملخص

تستعرض هذه الدراسة طريقة منهجية لإدماج المعلومة المحتواة في الصور الفضائية ذات قدرة التحليل المتوسط في مرحلة التحليل من عملية التهيئة الحراجية بالمناطق الشبه الجافة من الغرب الجزائري. يمكن التصنيف المؤسس على معايير ملمحية من تمييز التشكيلات الحرجية بهذه المناطق بالعلو، بكتافة الغطاء، وبالتركيبية من حيث الأصناف الشائعة. من أجل تحليل وصفي، تم تحقيق تصنيفات بكسلية لصور سيوت و موضوعية لصور لندسات في كل من غابة مولاي إسماعيل- سيق- (معسكر) و غابة سنلبة شرقي (الجلفة-الأطلس الصحراوي). سمح التصنيف الأول من وصف و وضع خريطة وحدات متجانسة من حيث المعايير المحددة مسبقا على الرغم من التباين النباتي و البيئي الكبير للبيئة موضوع الدراسة. من أجل التعرف المدلولي على هذه الوحدات تم إدراج مفهوم «النوع الملمحي» و «الوحدة الحرجية المشهدية» كمستوى تحليل موضوعي لتكامل مفهوم «نوع المجموعة الحرجية» الذي أصبح غير كاف في المناطق الشبه جافة. أما فيما يخص التصنيف الموضوعي الموجه و المؤسس على عامل سلم ذات قيمة محصورة ما بين 45 و 50 و على خاصيات مكانية و طيفية و على طريقة knn, فقد يمكن على المستوى المشهدي، من وصف ووسط حرجي غير متجانس و ذلك بتهديب محتوى الصورة مع الحفاظ على المعلومة المفيدة حول أنواع شغل أراضي متجانسة طيفيا و مكانيا: مجموعات صنوبر حليبي (كثيفة متماسكة، كثيفة و متجزئة، خفيفة) أدغال مشجرة بالعرعار و البلوط الأخضر أدغال الإكليل و أخيرا أعشاب. أما فيما يخص التحليل القياسي للأشجار و إمكانية الإنتاج فهناك اقتراح مقارنة منهجية لحساب الحجم الساقفي الشامل لغابة تلمسان الصنوبرية و ذلك من خلال دمج معطيات صورة لندسات (تنضيد بكسلي) مع عينات ميدانية ذات نفس مقاييس البكسل. و سمح تحليل أنوفا المتنوع بتصنيف (نسبة دقة 93%) بمعية 12 عينة ميدانية من حساب حجم 27535,212 ± 14,66 % م<sup>3</sup> وهي نسبة خطأ مقبولة بالنسبة للجرد السريع.

**كلمات-مفاتيح:** استكشاف عن بعد ; تهيئة ; غابة ; احراج ; شبه جاف ; حجم ساقفي ; الغرب الجزائري