

Estimation par télédétection de la ressource forestière sur le département du Var

MÉMOIRE DE FIN D'ÉTUDES

Morgane GOUDET
16^e promotion
2005-2008



Juin 2008

FICHE SIGNALÉTIQUE D'UN TRAVAIL D'ÉLÈVE DE LA FIF

Formation des ingénieurs forestiers de l'ENGREF Agro Paris Tech	TRAVAUX D'ÉLÈVES
TITRE : Estimation par télédétection de la ressource forestière sur le département du Var	Mots clés : Télédétection, classification, image satellite
AUTEUR(S) : Morgane GOUDET	Promotion : 2005-2008
Caractéristiques 1 volumes ; 93 pages ; 38 figures ; 21 annexes 4 illustrations 13 tableaux	

CADRE DU TRAVAIL

ORGANISME PILOTE OU CONTRACTANT :

ONF Var et CEMAGREF Montpellier

Noms des responsables et fonctions :

- Jean SANTELLI : Responsable projets complexes/aménagement à l'ONF Var
- Michel DESHAYES : Chercheur à la maison de la télédétection

Nom du correspondant ENGREF (pour un stage long) : Max BRUCIAMACCHIE

Tronc commun <input type="checkbox"/>	Stage en entreprise <input type="checkbox"/>	Autre <input type="checkbox"/>
Option <input type="checkbox"/>	Stage à l'étranger <input type="checkbox"/>	
D. d'approfondissement <input type="checkbox"/>	Stage fin d'études <input checked="" type="checkbox"/>	
Date de remise : 23/06/08		

Contrat avec Gref Services Nancy OUI NON

SUITE À DONNER (réservé au service des études)

Consultable et diffusable
 Confidentiel de façon permanente
 Confidentiel jusqu'au / / , puis diffusable

RÉSUMÉ

Les peuplements résineux des forêts méditerranéennes sont aujourd'hui sous-exploités. La filière bois énergie constituerait un nouveau débouché permettant un redémarrage de l'exploitation. Pour permettre de concrétiser son développement, dresser l'état de la ressource est indispensable. L'utilisation de la télédétection offre une bonne vue d'ensemble permettant de garder une cohérence territoriale en accord avec les objectifs. Une image SPOT testée sur le département du Var a permis d'envisager la télédétection comme technique d'estimation de cette ressource. La présente étude explore l'apport et les limites de la source satellite en termes de localisation des peuplements et de leur caractéristiques (feuillus, résineux, surfaces, volumes). Finalement, une méthodologie sera présentée.

SUMMARY

While Mediterranean coniferous forests are currently under exploited, they could potentially return to productive use through a new focus on wood based fuel production. Preliminary studies will be necessary to assess the viability of such efforts. This prototype study uses Remote Sensing data and techniques to leverage the coverage, speed, and cost benefits of that approach. We used a SPOT image covering the Var department in France for a classification study of tree resource density. We explore the strength and limits of such an approach for the localization of exploitable resources and the characterization of stand characteristics such as tree composition and wood volume. Finally, we present a methodical approach for future analyses of this kind.

REMERCIEMENTS

L'étude réalisée au cours de ce stage m'a permis d'appréhender la gestion forestière d'une manière innovante. L'objet de l'étude et les méthodes utilisées pour y répondre m'ont permis de découvrir une nouvelle approche de cette gestion.

La problématique s'inscrit dans les nouvelles orientations de gestion en matière de débouchés et de dynamique de gestion. Je souhaite adresser mes remerciements aux commanditaires de cette étude qui m'ont permis de traiter ces nouveaux aspects. Je remercie tout particulièrement monsieur Jean Santelli pour son accueil au sein de l'ONF du Var ainsi que pour toutes les personnes et le matériel qu'il a mis à ma disposition. Je remercie également madame Fabienne Tanchaud et monsieur Jean Labadie du conseil général du Var qui ont suivi avec intérêt mon travail.

La télédétection a été utilisée pour répondre aux différents objectifs. Ce stage m'a permis de tester son utilité et ses limites. J'ai découvert de nouveaux outils de gestion : les logiciels ERDAS Imagine, eCognition et ENVI. Je remercie monsieur Michel Deshayes pour m'avoir accueillie au cœur de la maison de la télédétection. Je remercie madame Sylvie Durrieu et monsieur Sylvain Labbé de m'avoir accueillie une semaine dans les cours du mastère SILAT au commencement de mon stage à Montpellier. Je remercie également toutes les personnes qui m'ont conseillée lors de divers problèmes techniques : mesdames et messieurs Nicolas Baghdadi pour le radar, Jean-Stéphane Bailly pour les analyses factorielles, Stéphane Dupuis et Thierry Tormos pour eCognition, Camille Lelong pour ENVI, Danny Lo Seen et Christian Puech pour les aspects MNT et Cédric Véga pour ArcGIS. Je remercie en particulier monsieur Mamouh El Hajj pour ERDAS Imagine et tous ses autres nombreux conseils. Je remercie également madame Thuy Le Toan et Mihai Tanase de m'avoir accueillie au CESBIO de Toulouse.

De nombreux agents et techniciens du département du Var m'ont beaucoup aidée. En m'accompagnant sur le terrain, ils ont grandement facilité les déplacements en forêt. Leur grande connaissance des forêts a amélioré la prise de note sur les peuplements. Je remercie en particulier messieurs Olivier Bonnin pour les forêts de Bauduen, Villecroze et le Muy, Rémy Schmitt pour le massif des Maures, Bertrand Obeltz pour la forêt de Vidauban, Christian Rivière pour Toulon et Thierry Faure pour Canjuers.

Je tiens également à remercier monsieur Guy Leroy pour avoir toujours mis à ma disposition les données SIG de l'ONF sur le département du Var.

Enfin je remercie les étudiants en stage à la MTD pendant la même période que moi avec qui les échanges ont été très bénéfiques.

SOMMAIRE

FICHE SIGNALÉTIQUE D'UN TRAVAIL D'ÉLÈVE DE LA FIF.....	3
RÉSUMÉ	4
REMERCIEMENTS	5
SOMMAIRE	6
LISTE DES FIGURES	8
LISTE DES ILLUSTRATIONS	9
LISTE DES TABLEAUX	9
LISTE DES ANNEXES	10
SIGLES ET ACRONYMES	11
INTRODUCTION	12
Partie 1 - OBJECTIF ET MATÉRIEL	13
I. Objectif	13
II. Matériel	13
II.1. L'image	13
II.2. Le champ de prise de vue	15
II.3. La résolution	15
II.4. Les logiciels	15
Partie 2 - PRÉTRAITEMENTS D'IMAGE	16
I. Correction des effets topographiques	16
I.1. Correction	16
I.2. Évaluation de la correction	17
II. Création d'un masque non forestier	18
III. Segmentation de l'image	19
III.1. La pixellisation	19
III.2. Segmentation à partir des histogrammes	19
III.3. Segmentation de décomposition et de fusion (split and merge)	20
III.4. Segmentation multicanal	20
Partie 3 – CLASSIFICATION	22
I. Évolution temporelle.....	22
II. La signature spectrale	22
II.1. Analyse des informations contenues dans l'image SPOT	22
II.2. Classification à partir des spectres radiométriques	24
II.2.a. DISCRIMINATION EN CATÉGORIE D'ESSENCE	24
II.2.a.i Classification parallélépipédique	24
▪ Méthode d'estimation des catégories végétales résineuse et feuillue.....	24
▪ Approfondissement de la détection des types de peuplements : estimation des densités et des peuplements mélangés.....	29
II.2.a.ii. Approche probabiliste non supervisée : classifications par centres mobiles	33
II.2.a.iii. Analyse des résultats	34
II.2.b. DISCRIMINATION DES ESSENCES	37
II.2.b.i. Profils spectraux	37
II.2.b.ii. Analyse factorielle discriminante	37
▪ Extraction des données de terrain	37
▪ L'AFD	38
II.2.b.iii Classification ascendante hiérarchique	39
II.2.b.iv. Méthode CART ou Arbre de décision	40
II.3. Comparaison des résultats avec l'étude Provence verte sur image Landsat	41
II.4. Analyse par ACP de l'information radiométrique exploitée	43

Partie 4 – ANALYSE TEXTURALE SUR PHOTO AÉRIENNE	45
I. Analyse texturale.....	45
II. Discrimination des essences.....	48
Partie 5 – ESTIMATION DE LA RESSOURCE FORESTIÈRE : MÉTHODOLOGIE RETENUE	49
I. Première étape : définition des peuplements purs.....	49
II. Deuxième étape : définition des peuplements intermédiaires	50
Partie 6 – ESTIMATION DE BIOMASSE.....	58
I. Relation entre indicateurs et indice	58
II. Image radar	59
CONCLUSION	63
BIBLIOGRAPHIE	64
CONTACTS	66
ANNEXES	70

LISTE DES FIGURES

Figure 1. — <i>Image test satellite SPOT 2005-Département du Var.</i>	14
Figure 2. — <i>Effet de la topographie. Source: ELOY del POTRO.</i>	16
Figure 3. — <i>Angles intervenant dans le calcul du cosi. Source : ELOY del POTRO.</i>	16
Figure 4. — <i>Relation entre valeurs de CN et valeurs de cosi avant et après correction des effets Topographiques.</i>	17
Figure 5. — <i>Profils spectraux en fonction de l'occupation du sol.</i>	19
Figure 6. — <i>Segmentation multicanal sous eCognition - Extrait de l'image SPOT, foêt de Canjuers.</i>	20
Figure 7. — <i>Segmentation avec eCognition à différents seuils.</i>	21
Figure 8. — <i>Signatures spectrales : réflectance en fonction de la longueur d'onde et de l'objet. Source: GIRARD, 1999.</i>	23
Figure 9. — <i>Signatures spectrales en fonction des objets. Source:DESHAYES, 2008.</i>	24
Figure 10. — <i>Profils spectraux des différentes occupations du sol de l'image test SPOT.</i>	25
Figure 11. — <i>Répartition des échantillons des différentes occupations du sol de l'image SPOT sur le diagramme bidimensionnel PIR et rouge.</i>	25
Figure 12. — <i>Hypercubes des trois occupations du sol: landes, résineux et feuillus, représentés sur le diagramme bidimensionnel PIR et rouge.</i>	26
Figure 13. — <i>Comparaison des classifications parallélépipédique, de l'IFN et de l'aménagement sur la zone extraite de la forêt de Canjuers.</i>	27
Figure 14. — <i>Hyper-cubes des sept occupations du sol: landes, mélanges, résineux et feuillus clairs ou non, représentés sur le diagramme bidimensionnel PIR et Rouge.</i>	30
Figure 15. — <i>Classification parallélépipédique en sept classes sur la zone en forêt de Canjuers extraite de l'image SPOT.</i>	30
Figure 16. — <i>Comparaison de la classification parallélépipédique et de la classification par photo- interprétation en quatre classes : feuillus, résineux, mélanges et landes.</i>	32
Figure 17. — <i>Classification probabiliste non supervisée en 6 classes et 7 itérations</i>	33
Figure 18. — <i>Répartition d'échantillons appartenant à la sixième classe inconnue définie par la classification probabiliste non supervisée sur la diagramme bidimensionnel.</i>	33
Figure 19. — <i>Signatures spectrales des cinq classes définies comme pouvant être discriminées :landes, résineux, feuillus, mélanges et peuplements clairs.</i>	35
Figure 20. — <i>Comportements spectraux et répartition des échantillons sur le diagramme bidimensionnel des essences cèdre, pin noir, pin sylvestre et pin d'Alep.</i>	37
Figure 21. — <i>Résultats de l'AFD sur les classes pin d'Alep, cèdre et pin sylvestre à partir de l' image satellite SPOT.</i>	38
Figure 22. — <i>Résultats de la CAH sur les classes pin d'alep, cèdre et pin sylvestre.</i>	39

Figure 23. — Comparaison des qualités des images Landsat et SPOT, extrait en forêt de Canjuers.	41
Figure 24. — Comparaison de la classification d'une ripisylve par l'étude Provence verte issue de l'image Landsat et par la classification parallélépipédique issue de l'image SPOT, extrait du département du Var.	41
Figure 25. — Échantillons d'objets ayant été classés différemment par l'analyse parallélépipédique sur l'image Landsat et l'étude Provence verte sur le diagramme bi-dimensionnel.	42
Figure 26. — Composition colorée des trois premières composantes principales en analyse texturale, extrait de la photo aérienne de Seillans.	46
Figure 27. — Différents indice d'Halarick en fonction de l'orientation. Source: DELENNE, 2006.	46
Figure 28. — Transect radiométriques sur deux textures extraites de la photo aérienne de Seillans.	47
Figure 29. — Résultats de l'AFD sur les classes pin laricio, chêne pubescent et chêne vert à partir d'une photo aérienne.	48
Figure 30. — Répartition d'échantillons des classes feuillus, résineux et landes sur le diagramme bidimensionnel et classes correspondantes.	49
Figure 31. — Segmentation des zones intermédiaires des classes dites pures et points d'échantillonnage sur le diagramme bidimensionnel.	50
Figure 32. — Descriptifs des peuplements par classe intermédiaire.	53
Figure 33. — Nouvelle segmentation du diagramme bidimensionnel en classes et illustration de la classification sur l'extrait en forêt de Canjuers.	56
Figure 34. — Relation entre l'indicateur de milieu RVI et les indicateurs de volume : les dates des incendies.	58
Figure 35. — Relation entre les coefficients de rétrodiffusion et les âges des peuplements extraits des données incendies.	59
Figure 36. — Effet de la densité des peuplements sur les valeurs de coefficients de rétrodiffusion.	60
Figure 37. — Relation entre coefficient de rétrodiffusion en HH et HV et volumes forestiers.	60
Figure 38. — Rétridiffusions directes et interactions multiples. Source : PRÉVOT, 2008.	61

LISTE DES ILLUSTRATIONS

Illustration 1. — Hétérogénéité des classes transitoires. Source : M. Goudet.	51
Illustration 2. — Limite de la télédétection : confusion entre peuplement résineux et couvert de genévriers. Source : M. Goudet.	52
Illustration 3. — Illustrations des cinq classes retenues. Source : M. Goudet.	55
Illustration 4. — Illustrations de la confusion volumique en télédétection Source : M. Goudet.	57

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1. — Tests de validation de la correction topographique dans les quatre bandes.	18
Tableau 2. — Calcul des changements de classes attribuées par l'analyse parallélépipédique et l'aménagement (en pourcentage)	28
Tableau 3. — Résultat de la matrice de confusion entre classification parallélépipédique et données aménagement (en pourcentage)	29
Tableau 4. — Matrice de confusion entre classification parallélépipédique et photo-interprétation (en pourcentage).	31

Tableau 5. — <i>Comparaison entre classification parallélépipédique et photo-interprétation pour les classes feuillus, mélange et résineux (en pourcentage).</i>	32
Tableau 6. — <i>Indices de séparabilité : indice de Jeffries-Matusita et divergence pour les cinq classe feuillus, résineux, mélanges et peuplements clairs.</i>	35
Tableau 7. — <i>Pourcentage de pixels issus des AOI correctement classés par l'analyse par maximum de vraisemblance.</i>	36
Tableau 8. — <i>Observations utilisées pour la CAH et classes associées après CAH.</i>	39
Tableau 9. — <i>Comparaison des surfaces des classes feuillus et résineux estimées par l'analyse parallélépipédique sur image SPOT et Landsat et par l'étude Provence verte.</i>	42
Tableau 10. — <i>Valeurs propres et variances des quatre composantes principales après ACP sur l'image SPOT.</i>	43
Tableau 11. — <i>Descriptifs des classes : classes de terrain associées, densités et volumes</i>	53
Tableau 12. — <i>Bilan des surfaces estimées par type de peuplements selon les classifications.</i>	56
Tableau 13. — <i>Volumes de 33 points de contrôle et classes leur correspondant d'après les données radar.</i>	61

LISTE DES ANNEXES

ANNEXE 1 : Graphique mettant en évidence la relation de dépendance entre le cosinus de l'angle incident et les valeurs de comptes numériques.	
ANNEXE 2 : Modèle créé sur ERDAS-Imagine effectuant la correction topographique sur photo satellite.	
ANNEXE 3 : Graphiques mettant en relation le cos i et les comptes numériques de l'image avant et après correction topographique.	
ANNEXE 4 : Modèle créé sur ERDAS Imagine pour la production d'un masque des zones non végétales sur l'image satellite SPOT.	
ANNEXE 5 : Résultats de l'application d'un masque radiométrique couvrant les zone de sols nus et les zones d'eau sur l'image test.	
ANNEXE 6 : Répartition des peuplements estimés de type feuillu et résineux sur l'image SPOT test par analyse parallélépipédique.	
ANNEXE 7 : Répartition des peuplements estimés de type feuillu et résineux sur l'image SPOT test par l'IFN.	
ANNEXE 8 : Comparaison des classification en peuplements feuillus et résineux dans les aménagements et par analyse parallélépipédique en forêts de Fox-Amphoux, Régusse et Bauduen.	
ANNEXE 9 : Comparaison des classification en peuplements feuillus et résineux dans les aménagements et par analyse parallélépipédique en forêt de Canjuers.	
ANNEXE 10 : Points de relevés de terrain sur les types de peuplements du Var.	
ANNEXE 11 : Données terrain sur le département du Var.	
ANNEXE 12 : Répartition des peuplements estimés de type résineux, mélange, résineux clair, feuillu clair et mélange clair sur l'image SPOT test par analyse parallélépipédique.	
ANNEXE 13 : Résultats de la méthode par arbre de décision.	
ANNEXE 14 : Classification en deux classes résineuse et feuillue de la partie commune à l'étude Provence verte et à l'analyse parallélépipédique sur image Landsat de résolution 30 mètres et SPOT de résolution 10 mètres.	
ANNEXE 15 : Estimation des types de peuplements feuillu et résineux par analyse parallélépipédique en forêt d'Aiguines.	
ANNEXE 16 : Photo aérienne de la forêts de Seillons-Source-d'Argens.	
ANNEXE 17 : Classes intermédiaires du diagramme bidimensionnel.	
ANNEXE 18 : Segmentation de la forêt de Bauduen dans les 36 classes et points de relevés.	
10 MÉMOIRE DE FIN D'ÉTUDES-2008- Estimation par télédétection de la ressource forestière sur le département du Var	

- ANNEXE 19 : Forêts communales du Var parcourues pour l'identification des 36 classes.
- ANNEXE 20 : Répartition des peuplements estimés de type feuillus, résineux, mélanges et landes boisées sur l'image SPOT test par analyse parallélépipédique.
- ANNEXE 21 : Classe de volumes des peuplements résineux estimés à partir d'image radar.

SIGLES ET ACRONYMES

ACP	:	analyse en composantes principales
AFD	:	analyse factorielle discriminante
ALOS	:	advanced land observation satellite
AOI	:	area of interest
CAH	:	classification ascendante hiérarchique
CART	:	classification and regression tree
CESBIO	:	centre d'études spatiales de la biosphère
CN	:	compte numérique
CODIR	:	comité directeur
CRPF	:	centre régional de la propriété forestière
DFCI	:	défense des forêts contre l'incendie
IFN	:	inventaire forestier national
MIR	:	moyen infrarouge
MNT	:	modèle numérique de terrain
MTD	:	maison de la télédétection
NDVI	:	normalized difference vegetation index
ONF	:	office national des forêts
PIR	:	proche infrarouge
PSG	:	plan simple de gestion
RVI	:	relative vegetation index
SIG	:	système d'information géographique
SILAT	:	système d'informations localisées pour l'aménagement des territoires
SPOT	:	système probatoire d'observation de la Terre ou satellite pour l'observation de la Terre
UHF	:	ultra high frequency
UT	:	unité territoriale

La superficie de la forêt dans le Var tient la deuxième place au niveau national. Néanmoins, au-delà du bois de feu, la ressource n'est que peu valorisée et l'exploitation est faible. La sous-exploitation des formations résineuses surcapitalise ces peuplements. Cela compromet la gestion durable des forêts varoises en raison des incendies très fréquents dans le département.

Les marchés du bois dans le Var sont moroses. Les débouchés pour le bois résineux se limitent à la papeterie de Tarascon (Bouches-du-Rhône). Les prix en sont fortement influencés d'une part par l'internationalisation du commerce de la papeterie qui entraîne une diminution des prix de cette matière première par le jeu de la concurrence et d'autre part par les coûts du transport. Le bois énergie permettrait d'utiliser la ressource au niveau local. Il n'entre pas dans le même cycle de compétition. L'exploitation pourrait se gérer de manière adaptée au besoin local.

Actuellement, les instances politiques expriment une véritable volonté de promouvoir le développement des énergies renouvelables et de l'exploitation de la ressource. La dernière réunion du CODIR à la direction générale de l'ONF (VALEIX, 2007) définit l'objectif actuel des plans d'action de l'ONF autour de l'augmentation de la mobilisation du bois en forêt publique tout en préservant la biodiversité. Avec le tarissement des ressources fossiles et leurs prix grandissants, le bois énergie suscite un regain d'intérêt. Ce nouveau débouché serait en accord avec les orientations de gestion. Il permettrait de réduire la biomasse combustible et d'ouvrir des milieux favorables à la biodiversité. Également, une exploitation plus importante diminuerait la compétition entre tiges face au stress hydrique croissant.

Avant de développer cette exploitation, il devient nécessaire d'estimer la quantité de ressource résineuse disponible et sa localisation. Seuls les bois résineux sont pris en compte pour le développement du bois énergie car le bois feuillu est déjà bien valorisé par le bois de chauffage.

L'estimation de la ressource disponible apporterait une garantie permettant de concrétiser la mise en place de cette nouvelle filière. Sur le département, les deux tiers du bois se trouvent en forêt privée et le plus souvent dans des forêts n'ayant pas d'aménagement. Une cartographie de la ressource permettrait de mettre en évidence une cohérence territoriale des zones potentielles d'exploitation et donc de motiver les propriétaires susceptibles de s'investir dans ce nouveau marché.

De nombreux investisseurs sont intéressés par l'exploitation du bois énergie sur le département du Var. L'estimation de la répartition et de la quantité de ressource résineuse peut permettre de développer les projets. Le frein principal à l'installation de nouvelles chaufferies ou de création d'usines utilisant le bois énergie est l'incapacité des prescripteurs à garantir à leurs clients une ressource durable. Définir une régularité et une pérennité de l'approvisionnement passe par l'estimation du potentiel en bois disponible.

L'estimation de ce couvert à échelle départementale est devenue une nécessité. Par classification, la télédétection pourrait apporter une première estimation. Il sera alors recherché méthodologie pouvant évaluer au mieux la répartition et les caractéristiques de cette ressource.

I. Objectif

L'objectif de la présente étude est de créer par télédétection une carte de répartition de la ressource en bois, en particulier résineux, sur le département du Var. Cette carte devra préciser et améliorer la construction des cartes d'occupation du sol de type forestier déjà établies sur le territoire. Le but est d'identifier de manière systématique les différents peuplements présents sur le territoire à partir d'images satellites qui offrent une vision globale et exhaustive du territoire.

La carte de répartition des différents peuplements et de leur biomasse pourra être utilisée par les investisseurs pour le développement de la filière bois énergie. L'étude de la ressource forestière sur le département du Var est un outil de prévision et d'aide à la décision. Elle apporte les éléments qui visent à maximiser l'utilisation des potentialités forestières départementales. La méthodologie porte sur le département du Var mais devra pouvoir être utilisée sur d'autres territoires.

La présente étude fait suite à une précédente déjà établie sur le département. L'étude nommée Provence verte se situait sur la zone ouest du département. Elle s'appuyait sur des images Landsat et des données IFN. Cette étude mettait déjà en évidence un désir de la part de l'ONF et du CRPF de produire un état des lieux en commun, donnant accès à la répartition de la ressource sur le département indépendamment du propriétaire.

Différents objectifs ont été exprimés par les institutions concernées par ce projet. Ils ciblent à la fois la valorisation et l'exploitation du milieu forestier du département (ONF, CRPF) et l'aménagement du territoire (conseil général).

Les objectifs de ce projet sont de différente nature :

- créer par télédétection une carte de répartition de la ressource en bois :
 - ✓ distinguer les résineux des feuillus,
 - ✓ évaluer la possibilité d'estimer les essences forestières,
 - définir une méthodologie pouvant identifier les zones déperissantes (zones de coupes sanitaires prioritaires pour la conservation du patrimoine),
 - préciser et améliorer les cartes déjà établies pour affiner l'état de la ressource existante,
 - définir une méthodologie permettant la reproduction de carte pour actualiser les résultats et pour permettre son utilisation dans d'autres contextes comme d'autres départements.
- Au-delà d'un résultat cartographique, c'est donc une méthodologie qui est recherchée.

II. Matériel

II.1. L'image

La détermination de la méthodologie a été testée sur une image test SPOT acquise en 2005. Elle possède deux bandes dans le visible : le vert entre 500 et 590 nm et le rouge entre 610 et 680 nm, ainsi que deux bandes dans l'infrarouge : le PIR entre 790 et 890 nm et le MIR entre 1 580 et 1 750 nm.

L'image se situe au nord du département. Sa surface est proche de 2 500 km² ce qui correspond environ au tiers (40 %) de la surface départementale (figure 1).

Les autres images permettant de couvrir la totalité du territoire n'ont pas été accessibles au cours du stage. Il n'a donc pas été possible d'accéder à la totalité du couvert départemental. Néanmoins, les résultats à terme seront appliqués sur le département entier à partir de la méthodologie qui sera établie.

Image test satellite SPOT 2005 Département du Var

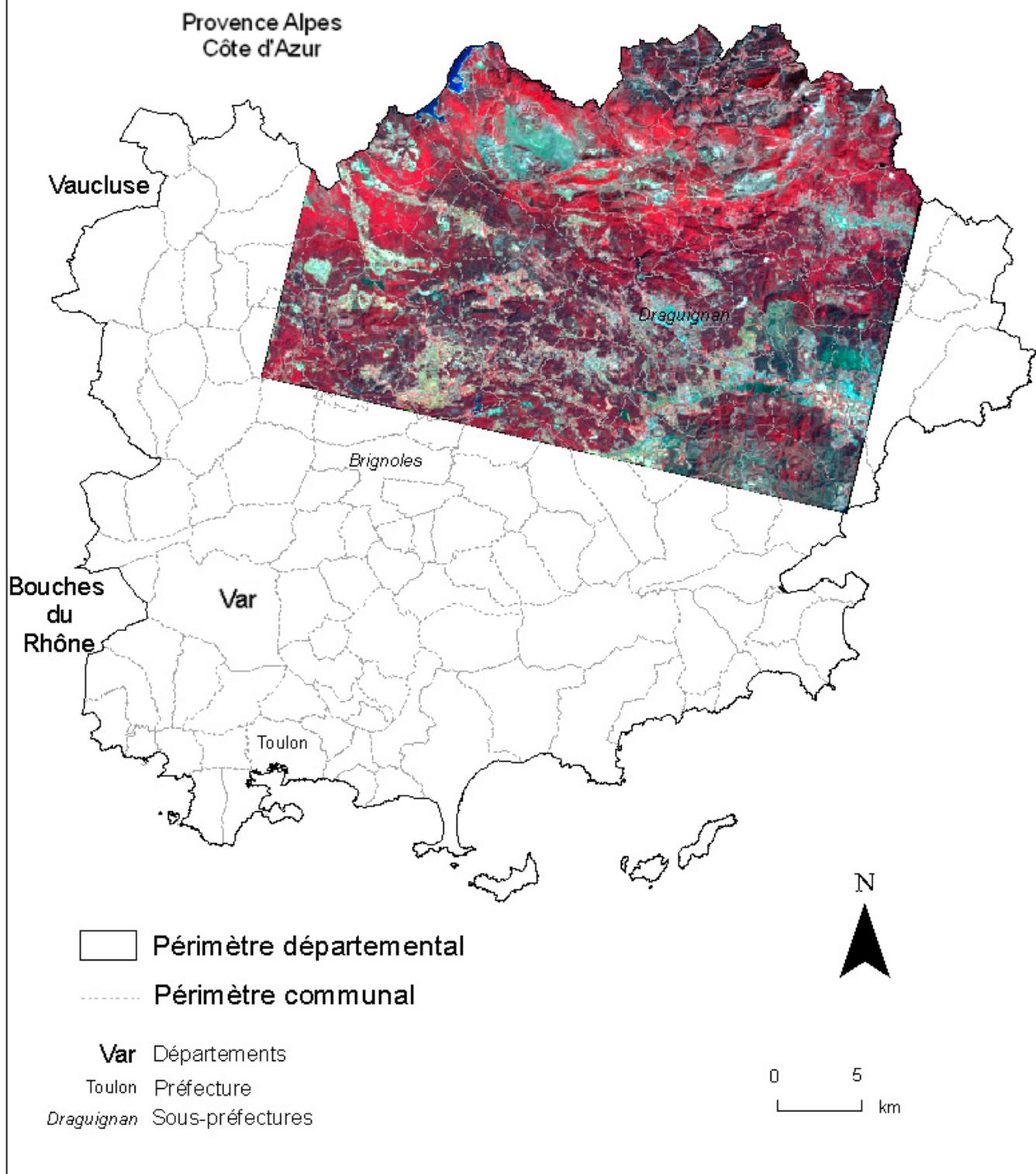


Figure 1.— Image test satellite SPOT 2005-Département du Var.

II.2. Le champ de prise de vue

Le champ de prise de vue est de 60 km par 60 km. L'intérêt des images satellitales est qu'elles permettent d'avoir un large champ de vision. Elles permettent donc une analyse globale, sur la totalité de l'espace. Il est possible de comparer les couleurs et les niveaux de gris d'un bout à l'autre de la scène. Ces comparaisons peuvent s'effectuer sur des milliers de kilomètres carrés alors qu'une photo aérienne ne le permet que sur quelques dizaines de kilomètres carrés. En revanche, la résolution est moins bonne mais la cohérence globale, indispensable pour la mise en place de projet comme celui de caractériser une ressource forestière à l'échelle départementale, est maintenue.

II.3. La résolution

La taille de l'objet à identifier définit la résolution des images. Par exemple, une analyse à l'échelle de la parcelle (coupe rase, éclaircie) ne demande qu'une résolution de 20 mètres. En revanche, une analyse dont le but est l'identification des essences (forme des houppiers) demande une résolution égale ou inférieure au mètre (BOURREAU, 2000). Selon la résolution, les entités sont non vues, détectées (préciser leur nature est impossible) ou identifiées (LABBÉ, 2008). L'objet identifié aura en général une taille égale ou supérieure à la résolution. La résolution des images de l'étude étant de 10 mètres, le plus petit objet pouvant être identifié est un sous-ensemble de peuplement. Il n'est pas possible d'identifier des variations d'occupation du sol plus petites que 100 m². Cela signifie que tout mélange inférieur à ce seuil sera identifié par une radiométrie moyenne et ne donnera aucune information de forme. Le signal spectral, c'est-à-dire la quantité d'énergie provenant de la surface en un pixel de l'image, correspond à la moyenne pondérée des signaux des divers objets se trouvant sur la surface explorée. Ce signal moyen ne permet pas de retrouver les divers signaux dont il est la moyenne (BARTALEV, 1996).

Dans le cadre de l'étude, les données utilisées ont été prédéfinies. La résolution, les canaux, le capteur et la date d'acquisition des images ont été imposés. Les différents canaux sont adaptés à une étude portant sur la végétation. Néanmoins, une résolution plus fine ou des acquisitions d'images à différentes dates auraient pu être intéressantes.

II.4. Les logiciels

Trois logiciels de traitement d'image ont été utilisés : ENVI 4.3 et ERDAS Imagine 9.2 distribués par Geosystems ainsi que eCognition 7.0 distribué par Definiens. Le logiciel ENVI a été utilisé pour les classifications les plus communément utilisées. Le logiciel ERDAS Imagine a été utilisé pour la création de modèles facilitant les traitements. Le logiciel eCognition a permis d'effectuer des analyses dites orientées objet et d'appliquer la méthodologie retenue.

Le logiciel XLSTAT, extension de Excel, a été utilisé pour toutes les analyses statistiques. Enfin, le logiciel ArcGIS distribué par ESRI a permis l'analyse des données géographiques.

I. Correction des effets topographiques

I.1. Correction

Sur l'image satellite, à chaque pixel est attribué une valeur de compte numérique, reflet d'une valeur radiométrique. Un compte numérique est attribué par bande spectrale. Il est proportionnel au flux d'énergie qui arrive au niveau du capteur. Il peut ne pas refléter la luminance des objets observés car il est soumis à plusieurs effets qui influencent sa valeur : l'effet de la topographie, l'effet de l'atmosphère et l'effet du capteur. L'effet du capteur est corrigé sur l'image fournie pour l'étude. Il existe des modèles de corrections sur ERDAS Imagine et ENVI corrigeant les effets atmosphériques (EL HAJJ, 2008). Aucun modèle n'est en revanche disponible pour corriger les effets topographiques.

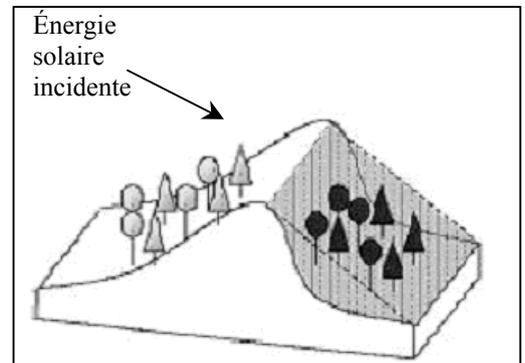


Figure 2.—*Effet de la topographie.* Source : POTRO.

Le relief a une influence non négligeable sur les variations des valeurs de comptes numériques (figure 2). Cela s'explique par les variations de la pente et de l'exposition pour un seul et même type de couverture du sol. Les conséquences peuvent être l'omission de détections dans les zones d'ombres ou des fausses interprétations. La correction de ces effets a pour but de réattribuer une même valeur de compte numérique à deux objets identiques malgré leur exposition différente.

La correction utilisée (*Correction Statistical-Empirical* en anglais) permet de corriger la luminance des objets par rapport à leur forte dépendance à la géométrie du soleil et de l'objet (POTRO). Pour l'appliquer, deux classes de réflectivité ont été créées à partir des données aménagement : la classe résineuse et la classe feuillue. Ces deux classes sont considérées comme homogènes entre elles.

Le principal paramètre géométrique considéré pour la correction des effets topographiques est l'angle d'incidence ou son cosinus (figure 3).

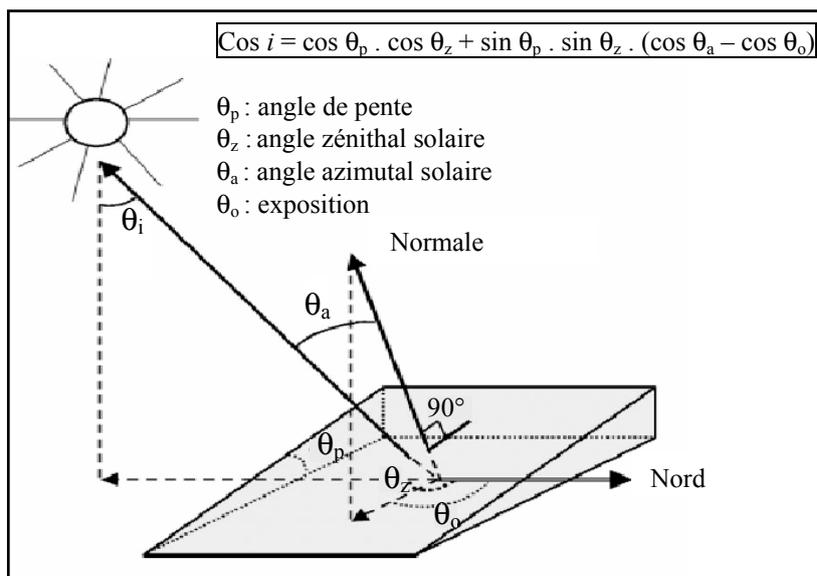


Figure 3.—*Angles intervenant dans le calcul du cos i.* Source : ELOY del POTRO.

La méthode repose sur la corrélation entre une variable dépendante et la variable indépendante $\cos i$. La relation entre les variables est traduite par une loi de régression qui sera à la base de la correction. L'objectif est de réduire l'influence de la variable indépendante.

Les graphiques mettant en relation le $\cos i$ et les valeurs de comptes numériques (figure 4a) montrent l'influence de l'angle d'incidence sur les valeurs de comptes numériques (ANNEXE 1). De manière générale, plus le cosinus est élevé, plus la valeur de compte numérique est élevée. Cette influence est la même pour les résineux et les feuillus (pentes positives). L'influence du $\cos i$ est différente en fonction de la catégorie d'essence feuillue ou résineuse car les pentes ne sont pas parallèles. Cela s'explique par les biais de l'échantillonnage. L'écart-type des valeurs de MIR est beaucoup plus important que dans les autres bandes. Les valeurs de compte numérique dans ces longueurs d'onde dépendent de la teneur en eau des objets, il y a donc une plus grande variabilité de valeurs. Le PIR apparaît comme la bande la plus discriminante entre les résineux et les feuillus puisque la moyenne des comptes numériques est significativement différente (respectivement 55,72 et 70,37) et l'écart-type est assez faible (respectivement 5,71 et 8,60).

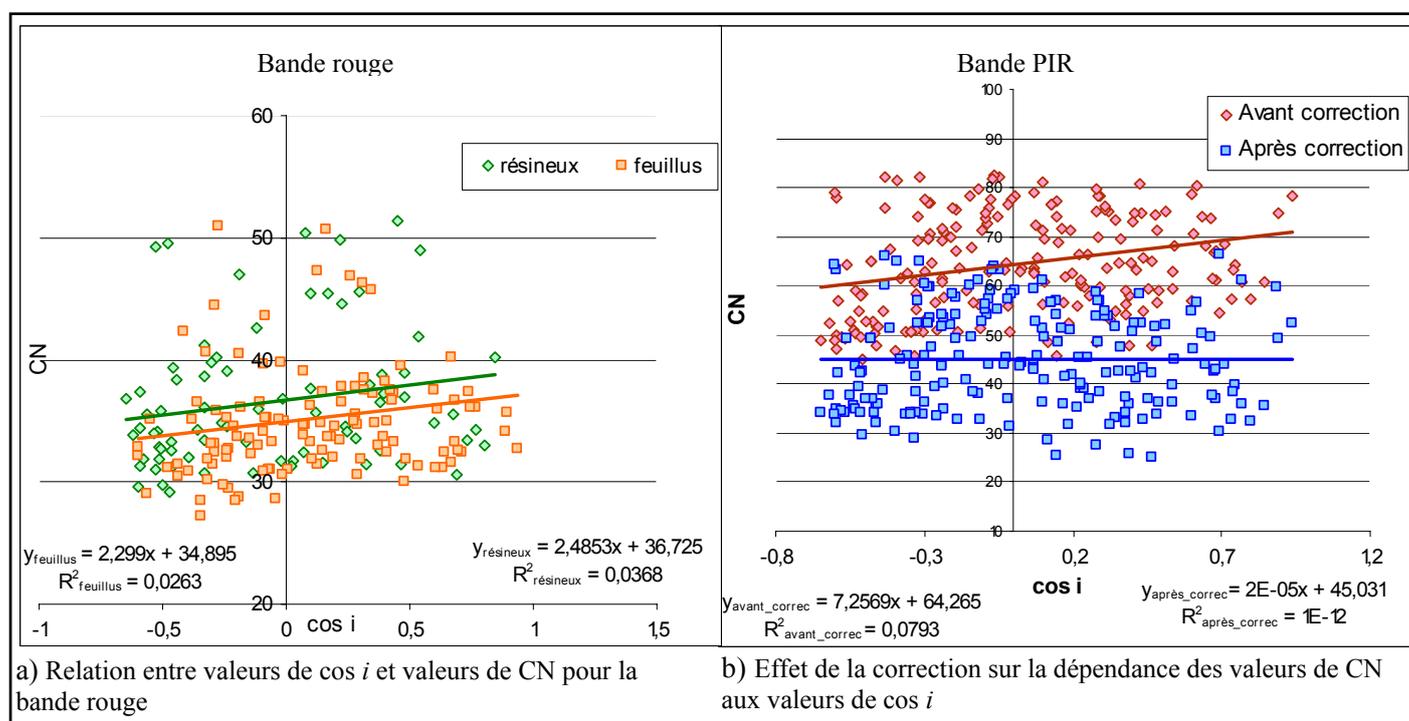


Figure 4.— Relation entre valeurs de CN et valeurs de $\cos i$ avant et après correction des effets topographiques.

Un modèle a été créé sous ERDAS Imagine (ANNEXE 2). Il permet d'effectuer les corrections pour chaque bande (figure 4b et ANNEXE 3) d'après la formule :

$$L_H = L_T - \cos i \times m - b + \bar{L}_T$$

- L_H : comptes numériques de la surface horizontale
- L_T : compte numérique à l'origine
- m : pente de la droite de regression
- b : ordonnée à l'origine de la droite de régression
- \bar{L}_T : moyenne des comptes numériques

La correction est appliquée sur l'ensemble du couvert forestier, peuplements résineux et feuillus confondus grâce à une droite moyenne. Il n'est en effet pas possible d'effectuer les corrections sur l'image en fonction des catégories d'essence puisque cela nécessiterait de savoir où se répartissent les différents types et c'est précisément l'information qui est recherchée.

I.2. Évaluation de la correction

Trois tests permettent d'évaluer les corrections : l'évolution de la pente de la droite, du coefficient de corrélation et de l'hétérogénéité intra-classe (tableau 1).

La distribution horizontale après correction est la conséquence de l'absence de corrélation du cos i sur les valeurs de compte numérique. Dans tous les cas, la valeur du coefficient de corrélation R^2 de la régression diminue après correction. Cette évolution confirme la baisse de corrélation entre les CN et le cos i . L'hétérogénéité intra-classe diminue si l'écart-type baisse ou si l'indice de différence normalisé des écarts-types (DNET) est négatif (POTRO). Ce dernier n'est pas toujours négatif et est le plus souvent très proche de 0. Cela montre que la topographie n'est pas le seul facteur d'hétérogénéité au sein des classes. La variabilité de la composition spécifique ou la structure sont des exemples d'autres sources d'hétérogénéité intra-classe. De plus, la répartition des types est influencée par les conditions de pente et d'exposition. Par exemple, les conifères se trouvent sur les versants les plus xériques.

		Avant correction	Après correction
Pente de la droite	Vert	2,0038	-0,000008
	Rouge	1,9382	-0,00001
	PIR	7,2569	0,00002
	MIR	4,4534	0,00004
DNET	Vert	-0,0220	-0,0233
	Rouge	-0,0178	-0,0131
	PIR	-0,0700	0,0179
	MIR	-0,0473	0,0111
R^2	Vert	0,0666	1E-12
	Rouge	0,0208	5E-13
	PIR	0,0793	1E-12
	MIR	0,0352	3E-12

Tableau 1.— Tests de validation de la correction topographique dans les quatre bandes.

La correction topographique améliore les valeurs de CN attribuées aux différents objets. Néanmoins, sur l'image test, les valeurs de R^2 sont très faibles. La relation entre les valeurs de CN et le cos i n'est donc pas significative. Néanmoins, il est conseillé d'appliquer cette correction avant toute analyse, en particulier sur les autres images du Var. Le modèle permet de simplifier son application.

Il faut noter par ailleurs qu'après correction, les valeurs de CN ne correspondent pas à la valeur réelle de réflectance. En fait, deux peuplements de même type tendent à avoir une valeur de compte numérique identique. Pour accéder aux valeurs réelles de réflectance, il conviendrait de faire des relevés de terrain et prendre ces données comme référence dans la rectification.

II. Création d'un masque non forestier

L'analyse étant thématique, seule une partie de l'image est intéressante : la zone végétale. Pour éviter les confusions dans la classification, l'image est préalablement segmentée en grandes classes d'occupation du sol. Les zones sans intérêt pour l'étude sont supprimées de l'espace traité au moyen d'un masque.

Trois différents masques ont été testés :

— un masque radiométrique à partir d'un indice créé sous eCognition :

$$\text{Indice} = (\text{ratio (bande vert)} - \text{ratio (bande PIR)}) / (\text{ratio (bande vert)} + \text{ratio (bande PIR)}) \times \text{max diff}$$

où ratio et max diff sont des fonctions du logiciel eCognition,

— un masque radiométrique à partir de l'indice NDVI :

$$\text{NDVI} = (\text{bande PIR} - \text{bande rouge}) / (\text{bande PIR} + \text{bande rouge}),$$

— un masque radiométrique qui s'appuie sur l'observation des profils radiométriques des différentes occupations du sol. Les sols nus peuvent être discriminés lorsque la somme des valeurs des bandes MIR et rouge est supérieure à 170. Les surfaces en eau peuvent être discriminées des végétaux quand la somme des comptes numériques des bandes MIR et PIR est inférieure à 80 et des ombres des végétaux quand la somme des comptes numériques des bandes rouge et vert est supérieure à 65 (figure 5).

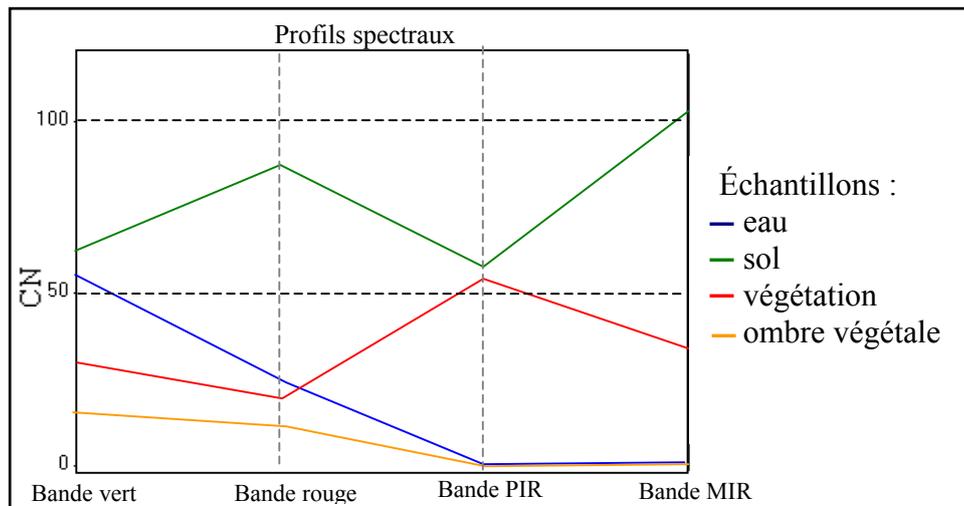


Figure 5.— Profils spectraux en fonction de l'occupation du sol.

En ce qui concerne les zones en eau, le troisième masque est de meilleure qualité. En effet, il ne discrimine que les zones en eau et pas les zones d'ombres végétales comme le font les deux autres indices. En ce qui concerne les sols, le premier indice n'est pas un bon indicateur. Le troisième masque reste de meilleure qualité.

Un modèle a été créé sous ERDAS Imagine (ANNEXE 4). Seules les valeurs de seuils sont à définir. Le masque attribue une valeur nulle aux pixels représentant l'eau et les sols nus (ANNEXE 5).

Il faut noter qu'il n'y a pas de liaison bijective entre les valeurs de compte numérique et les objets étudiés. La création d'un masque peut éliminer des pixels qui appartiennent aux objets étudiés et qui, dans les conditions d'acquisition de l'image ont les mêmes valeurs. Néanmoins, le masque s'avère utile pour les analyses qui ne prennent en compte que les objets d'intérêt. Cela permet notamment d'améliorer les résultats des analyses factorielles ou encore d'améliorer les contrastes à l'affichage.

III. Segmentation de l'image

L'identification automatique des peuplements par classification passe par une étape de segmentation d'image. La segmentation est le découpage complet de l'image en objets élémentaires disjoints. Il existe plusieurs types de segmentation.

III.1. La pixellisation

La segmentation la plus simple est le découpage de l'image en pixels. L'image utilisée pour l'étude est découpée en pixels de 10 mètres de côté, donc en unités de 100 m².

L'étude Provence verte a effectué sa classification à partir d'une segmentation de type pixellisation. La taille de pixel était de 30 mètres de côté. Lors de la classification, l'utilisation de cette segmentation crée souvent l'isolement d'objets de la taille du pixel.

Les autres segmentations sont plus complexes. Ces procédures ont pour but de minimiser les distances intra-groupe des zones segmentées pour les valeurs des comptes numériques.

III.2. Segmentation à partir des histogrammes

Les variabilités dans les répartitions des fréquences sur les histogrammes de l'image de l'étude ne permettent pas l'utilisation de cette segmentation. Les répartitions sont proches d'une distribution

gaussienne. Il n'y a donc pas de contrastes assez marqués. Un découpage dans la répartition des fréquences des comptes numériques n'est donc pas pertinent (LELONG et MOUGEL, 2008).

III.3. Segmentation de décomposition et de fusion (*split and merge*)

La segmentation de type décomposition et fusion (ou *split and merge* en anglais) divise l'image en zones homogènes issues du regroupement de pixels si un critère comparatif est rempli. Une segmentation de ce type est la décomposition en *quadrees*, où chaque segment de premier niveau est le regroupement de quatre pixels joints par un sommet. Cette segmentation ne convient pas à une analyse de type de peuplement puisqu'elle segmente l'image en unités toutes de même forme rectangulaire (LELONG et MOUGEL, 2008).

III.4. Segmentation multicanal

La segmentation multicanal se base sur les radiométries dans différentes bandes et regroupe des pixels si le critère comparatif est rempli. Elle est à la base de la segmentation choisie dans cette étude. Il faut définir une taille maximale de segment qui respecte les objets à étudier, c'est-à-dire les peuplements. Les objets à segmenter doivent avoir la taille maximale de celle du peuplement. Il faut segmenter l'image en objets de taille et de forme variées en fonction de critères radiométriques dans les quatre bandes.

La segmentation de type multispectral du logiciel eCognition offre cette possibilité. La délimitation des différents objets est déterminée par un seuil d'homogénéité radiométrique fixé par l'utilisateur. Ainsi, cette segmentation crée des objets correspondants à un ensemble de pixels de propriétés spectrales proches. Elle permet la création d'objets représentant le peuplement ou un sous-ensemble du peuplement (figure 6).

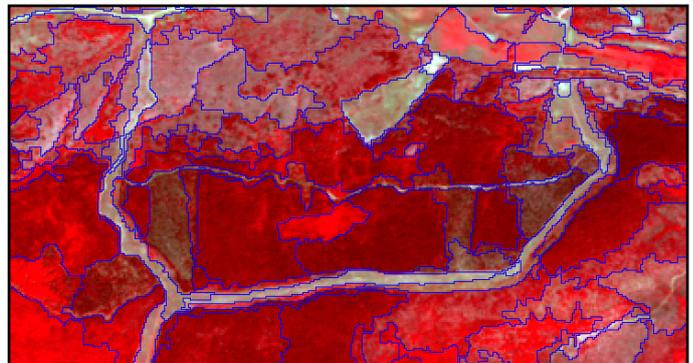


Figure 6.— *Segmentation multicanal sous eCognition - Extrait de l'image SPOT, forêt de Canjuers.*

La segmentation aboutit à des objets de petite taille sans aucune valeur thématique. La plupart des logiciels d'analyse d'image effectuent leur calcul à l'échelle du pixel. Le logiciel eCognition permet d'appréhender les mesures sur des informations spectrales de pixels constitutifs d'objets et non plus sur des pixels isolés. C'est l'analyse orientée objet. L'exportation des données fournit une valeur radiométrique moyenne d'un espace local cohérent et non une valeur de pixel unique, non représentative du milieu.

La taille et le seuil de rapprochement radiométrique entre objets doivent être cohérents avec l'objectif fixé. Le seuil d'homogénéité définit la taille des objets. Il doit permettre d'obtenir des objets suffisamment petits pour faire apparaître les différences d'occupation du sol mais de taille suffisamment grande pour ne pas alourdir l'analyse, d'autant qu'une segmentation plus précise n'apporte pas toujours de gain d'information pour la problématique fixée. Le choix du seuil fera varier la classification finale entre précision et cohérence globale. À la suite de différents essais, le seuil a été choisi à 10 (figure 7). Il se rapproche plutôt de la précision. Cela semble plus adapté pour commencer une classification.

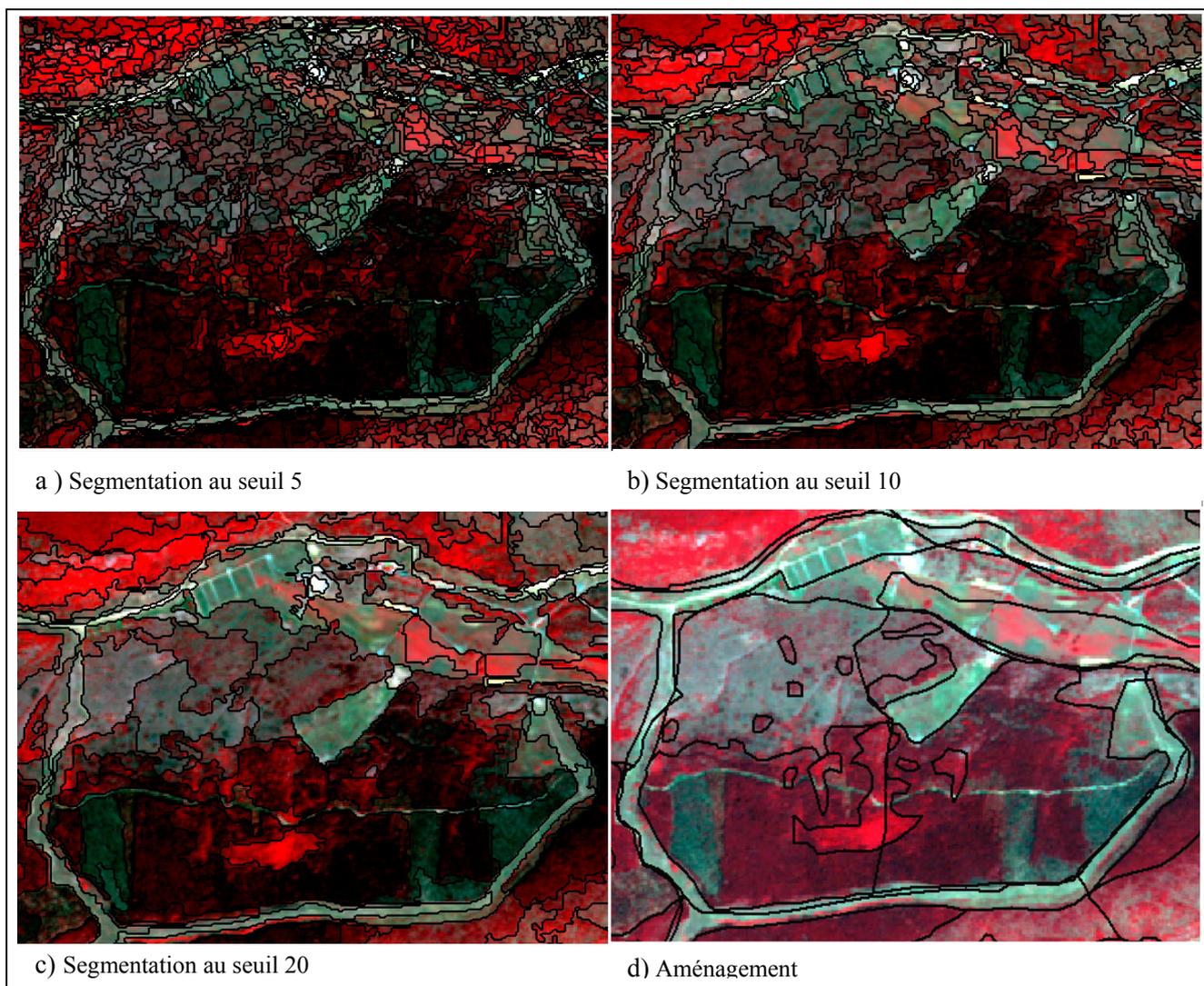


Figure 7.—*Segmentation avec eCognition à différents seuils. a) La segmentation n'apporte pas d'information supplémentaire à la segmentation au seuil 10 pour les objectifs fixés, b) Chaque type d'occupation du sol semble bien isolé. c) Confusion des différentes occupations du sol, en particulier dans les zones faiblement boisées figurées en vert clair. d) Limites des tailles d'objets à ne pas dépasser : polygones aménagement.*

La segmentation retenue est donc une segmentation multicanal dite orientée objet. Le seuil choisi permet de garder une précision dans l'analyse. Il pourra être modifié en fonction du degré de précision désiré. L'image corrigée et segmentée peut maintenant être classée. La classification est la dernière étape d'analyse de l'image qui permet d'attribuer à chaque objet une classe ou une thématique selon des critères auxquels il répond.

Une classification permet de ranger des individus dans des classes. La classification permet d'obtenir une cartographie thématique. Dans le cadre de l'étude, elle rangera les objets en classes d'occupation du sol. Chaque classe regroupe des objets ayant des caractères communs et en respect des seuils qui sont fixés. La classification peut être non supervisée ou s'appuyer sur une connaissance *a priori* du terrain.

Il existe différents descripteurs pouvant discriminer des objets : la signature spectrale, la texture et l'évolution temporelle (LELONG, 2008).

I. Évolution temporelle

Ce descripteur n'a pas été pris en compte dans cette étude puisque l'analyse ne s'appuie que sur un jeu d'image à une date donnée.

Néanmoins, il aurait permis de travailler sur l'estimation des zones dépérissantes. Les peuplements dépérissants ont des changements physiologiques qui conduisent à des modifications radiométriques. Ces changements modifient les teneurs en pigments, en eau, les structures internes des tissus ainsi que la quantité de feuillage. Cela modifie les comportements spectraux dans le visible et le PIR. Dans le visible, les valeurs de réflectance des feuilles vertes sont toujours inférieures à celles des feuilles sèches. Ainsi, les maladies, attaques parasitaires et déficiences peuvent être identifiées dans le visible. La sénescence provoque l'effondrement des cellules du parenchyme lacuneux qui diminue la réflectance dans le PIR et des pertes en eau qui réduisent la réflectance dans le MIR (GIRARD, 1999). Une information mono temporelle SPOT ne permet néanmoins pas l'identification de ces zones dépérissantes. Même si les peuplements dépérissants se traduisent spectralement par un signal de végétation plus faible, en région méditerranéenne, de nombreux peuplements sont naturellement hétérogènes (sols maigres, déficits hydriques, feux répétés...). Il devient alors très difficile de reconnaître sur les images satellites les zones dépérissantes des zones de couverts clairs. Une méthode mieux adaptée consisterait donc à comparer l'état actuel de la végétation à un état antérieur où le dépérissement n'était pas apparu et à identifier les évolutions négatives du signal végétal (étude diachronique).

Ces problèmes de dépérissements doivent toutefois être suffisamment marqués pour être identifiés sans ambiguïté. Pour que l'effet soit constaté, il doit concerner plusieurs pixels et donc plusieurs centaines de mètres carrés. L'identification potentielle concernerait donc des phénomènes de dépérissement importants.

II. La signature spectrale

Une manière d'appréhender les objets est d'étudier leurs propriétés spectrales grâce aux caractéristiques des ondes électromagnétiques absorbées, réfléchies et émises par ces objets. Cela nécessite une connaissance des comportements des objets dans les différentes longueurs d'onde.

II.1. Analyse des informations contenues dans l'image SPOT

Les quatre bandes PIR, rouge, vert et MIR de l'image fournissent des informations de différente nature concernant les végétaux. L'absorption des ondes électromagnétiques par les organes végétaux chlorophylliens varie en fonction des longueurs d'onde (figure 8).

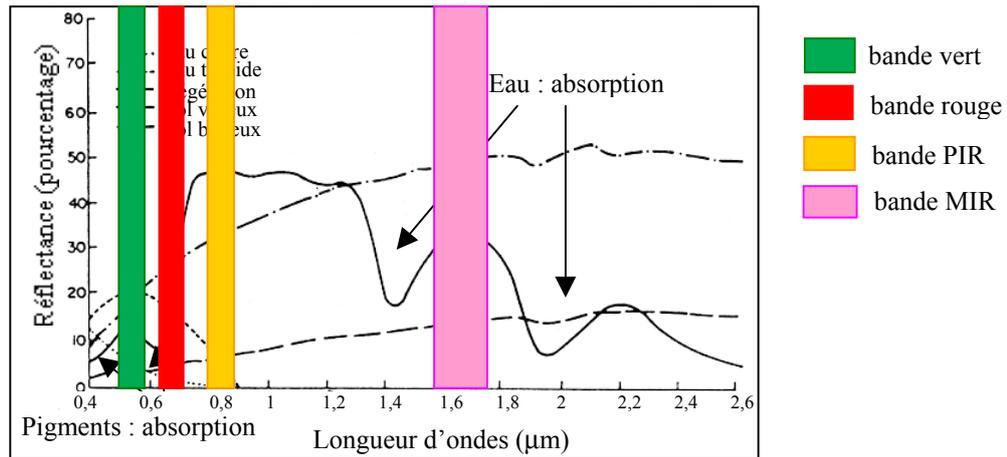


Figure 8.— Signatures spectrales : réflectance en fonction de la longueur d'onde et de l'objet. **Source : GIRARD, 1999.**

Dans le visible, cette absorption est importante. Cela est dû aux propriétés optiques des feuilles liées aux pigments végétaux, en particulier les chlorophylles, qui présentent deux bandes d'absorptions principales, l'une à 450 nm dans le bleu, l'autre à 650 nm dans le rouge.

Dans le MIR, deux bandes d'absorption existent chez les végétaux. Elles correspondent à l'eau de constitution des tissus végétaux. C'est donc ici la teneur en eau qui intervient.

Dans le PIR, la réflectance est élevée, les pigments n'interviennent plus. Dans ces longueurs d'ondes, les ondes électromagnétiques sont pour l'essentiel transmises ou réfléchies. La partie réfléchi, de l'ordre de 50 %, dépend de la structure des tissus végétaux, en particulier de celle du parenchyme (DEVINEAU).

Ainsi, la signature spectrale des végétaux est spécifique et très liée à la structure interne des feuilles : tissus, espaces intercellulaires et quantité d'eau. Le végétal est constitué, en plus d'une partie feuillée, d'une partie ligneuse qui par conséquent a une influence sur la radiométrie moyenne captée par le satellite. La proportion des différents éléments (nombre de feuilles dans le houppier par exemple) induit des variations dans la radiométrie globale, y compris pour une même essence (figure 9b). Même si des relations ont été établies entre des signatures spectrales et les objets, il reste difficile de caractériser un objet par sa signature puisqu'elle varie avec les conditions du milieu, l'âge, les saisons et les lieux. La même espèce végétale poussant à deux endroits différents n'a pas au même moment la même signature spectrale. Le comportement spectral d'un objet n'est pas unique et évolue avec les stades phénologiques et les états physiologiques. Même s'il est assez aisé d'identifier les zones de sols nus des zones végétales, une discrimination au sein des végétaux est difficile.

Les comportements spectraux restent spécifiques de chaque objet. Par exemple, la réflectance des feuillus est plus élevée que celle des résineux car ils ont une structure de feuille possédant plus de parenchyme lacuneux et moins de parenchyme palissadique (figure 9a). Le parenchyme lacuneux crée des réfractations plus grandes dues aux changements de milieu plus importants (GIRARD, 1999).

Ces comportements permettent de tirer des conclusions en ce qui concerne l'occupation du sol. Par exemple, le proche infrarouge est lié de façon positive à la biomasse végétale et le rouge l'est de façon négative.

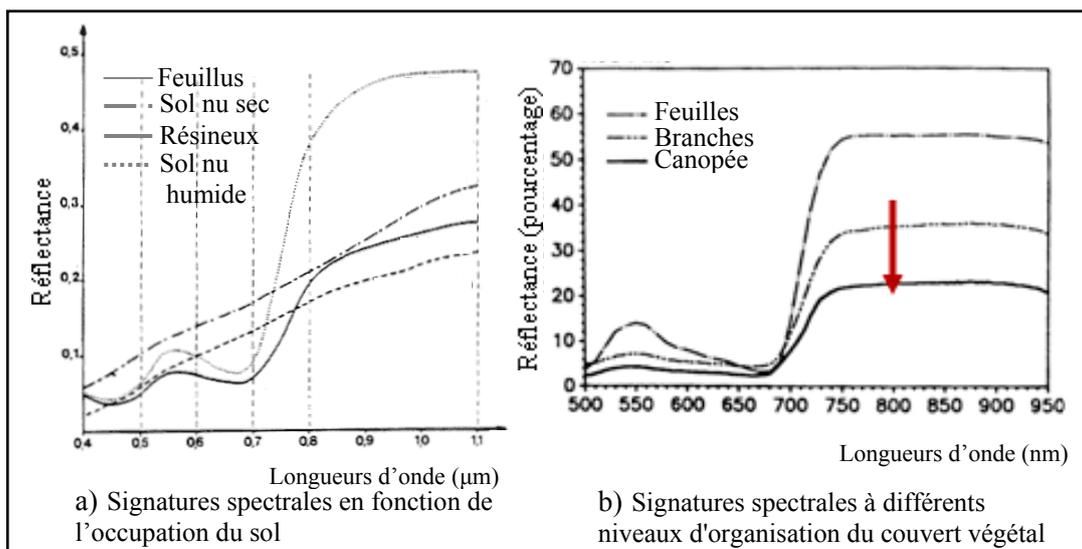


Figure 9.— *Signatures spectrales en fonction des objets. Source : DESHAYES, 2008.*

L'analyse de discrimination des différents objets doit donc faire appel aux caractéristiques des objets recherchés. Elle doit utiliser ces informations de manière appropriée par l'intermédiaire de combinaisons de bandes ou d'indices issus des quatre bandes d'origine. Le logiciel eCognition montre par exemple que la bande comportant le plus d'information pour discriminer des échantillons feuillus et résineux est la bande dans le PIR. Elle suffit à différencier les objets avec une distance estimée à 16. Il montre également que pour différencier ces deux mêmes classes et une classe supplémentaire sol nu, c'est la bande dans le MIR qui comporte le plus d'informations. Dans ce cas, trois bandes sont nécessaires pour discriminer ces classes (PIR, MIR et rouge) avec une distance estimée à 10,3. Pour une discrimination entre chêne vert et chêne pubescent, le logiciel n'isole pas de manière significative de combinaison de bandes apportant l'information nécessaire à la discrimination. Dans ce cas, la distance maximale trouvée est de 0,14.

L'utilisation des informations contenues dans les différentes bandes dépend donc des objets recherchés mais également de l'information disponible dans ces bandes.

II.2. Classification à partir des spectres radiométriques

II.2.a. DISCRIMINATION EN CATÉGORIE D'ESSENCE

II.2.a.i Classification parallélépipédique

La classification parallélépipédique est basée sur un modèle radiométrique et non sur des mesures de distance ou de probabilité. Chaque pixel est représenté par son comportement radiométrique sur un diagramme à autant de dimensions qu'il existe de bandes. Des échantillons permettent de définir des références à partir desquelles la classification peut se construire (GIRARD, 1999).

✓ Méthode d'estimation des catégories végétales résineuse et feuillue

Cette classification a été effectuée à partir des spectres radiométriques d'après l'affichage des différents objets. Trois différents profils ont été identifiés en affichage fausses couleurs (figure 10). Il est en effet possible de transformer l'étalement des valeurs de comptes numériques sur l'histogramme des comptes numériques. Cette transformation permet d'affecter des valeurs de grisé et des nouvelles combinaisons de couleurs plus faciles à détecter. Ces transformations ne changent en rien les valeurs des comptes numériques mais offrent une meilleure visualisation.

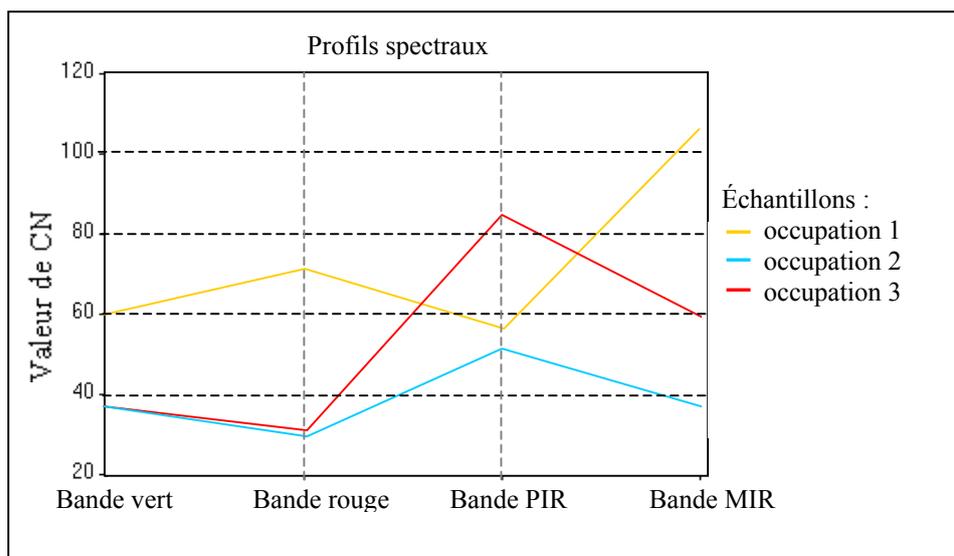


Figure 10.— Profils spectraux des différentes occupations du sol de l'image SPOT.

Des échantillons ont été prélevés pour chacune des trois classes avec le logiciel eCognition. L'histogramme bidimensionnel rouge et PIR permet d'observer la répartition des différents échantillons par rapport à l'ensemble des objets de l'image et par rapport aux droites qui définissent les sols et le couvert végétal (DESHAYES, 2008). Cette répartition des objets sur l'histogramme permet d'estimer le type d'occupation du sol auxquels ils correspondent (figure 11).

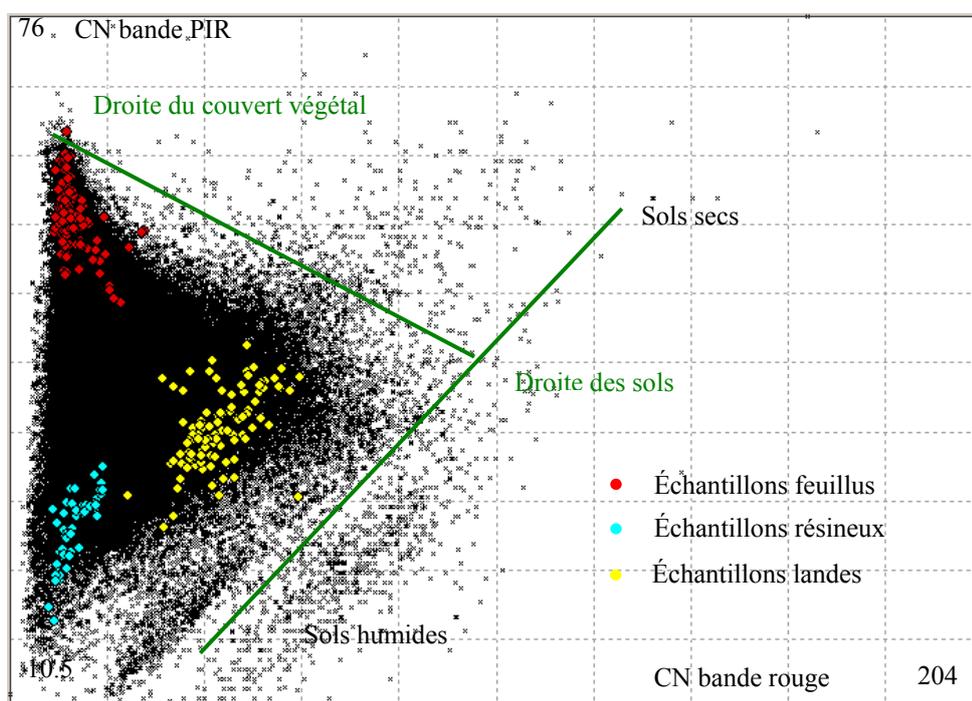


Figure 11.— Répartition des échantillons des différentes occupations du sol de l'image SPOT sur le diagramme bidimensionnel PIR et rouge.

Les échantillons de la classe rouge correspondent à un couvert végétal dense de forte réflectance dans le PIR. D'après les profils des comportements spectraux dans la littérature, cette classe correspond aux feuillus.

Les échantillons de la classe bleue ont les mêmes valeurs dans le rouge mais des valeurs beaucoup plus faibles dans le PIR. Cette classe correspond aux résineux.

Enfin, la classe jaune correspond à une végétation adaptée à des sols secs comme du maquis, de la garrigue ou des landes. De manière générale, elle correspond à une végétation basse.

Ces différents groupes et leurs attributions sémantiques sont confirmés par analogie avec les données aménagement. Seule la précision sémantique de la classe concernant les occupations de sol de type végétation basse n'est pas de bonne qualité. Il n'a pas été possible de faire la distinction entre surface herbacée, maquis, garrigues ou landes. Néanmoins, ces espaces ne sont pas la priorité de la classification. Les classes doivent en effet répondre à l'objectif fixé : déterminer les peuplements boisés et particulièrement résineux. La classe sera dorénavant nommée landes.

Ainsi, chaque type d'objet est situé dans un hyperespace à quatre dimensions. La classification revient à segmenter l'hyperplan radiométrique en volumes ou en parallélépipèdes (figure 12). C'est la classification hypercube ou parallélépipédique (GIRARD, 1999). La méthode de classification définit des classes d'après les minima et maxima des descripteurs, à savoir les bandes spectrales. Des seuils ont été définis pour chacune des classes. Chaque hypercube définit une classe permettant l'identification des catégories de végétaux résineuses et feuillues.

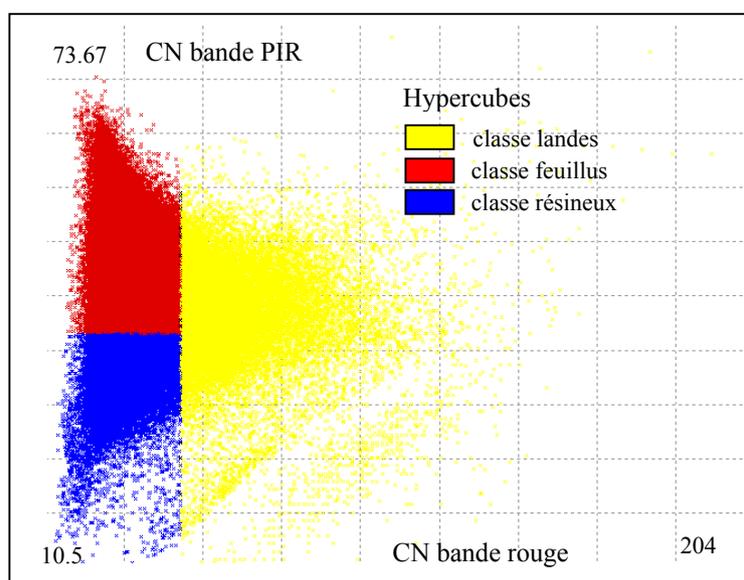


Figure 12.— *Hypercubes des trois occupations du sol : landes, résineux et feuillus, représentés sur le diagramme bidimensionnel PIR et rouge.*

Les maxima et les minima des trois parallélépipèdes ont été définis par correspondance visuelle. En naviguant de l'image à l'histogramme, il est possible de faire le lien entre l'information sémantique de l'histogramme et l'information graphique de l'image. Cette pratique permet de confirmer ou de réajuster les limites entre classes. Les limites précises et leurs formes restent hypothétiques. Les limites franches retenues paraissent peu réalistes mais elles permettent de classer l'ensemble de la zone végétale dans les trois classes.

Les résultats montrent qu'environ 107 000 hectares (1 070 km²) soit près de 43 % du territoire de l'image sont occupés par des peuplements résineux et environ 78 000 hectares (780 km²) soit 30 % du territoire sont occupés par des peuplements feuillus. Cela signifie que les trois quarts du territoire sont boisés (ANNEXE 6).

L'IFN sur la même zone estime les surfaces des peuplements feuillus à 70 000 hectares et les peuplements résineux à 91 500 hectares (ANNEXE 7). L'IFN définit un type de couvert végétal en peuplement forestier lorsque le taux de couvert des arbres dépasse 10 %. Ainsi, les peuplements de

très faible densité ne sont pas identifiés. Même si les nouvelles surfaces identifiées ne répondent peut-être pas aux critères d'exploitabilité (volume minimal exploitable par exemple), la télédétection permet d'accéder à une estimation de la répartition des peuplements plus complète et plus précise.

Ces résultats doivent être validés. Cette étape de validation permet tout d'abord de tester les résultats par rapport à des données de référence mais également de comparer les résultats avec ceux obtenus dans d'autres classifications.

Pour cela, une zone test en exemple a permis d'estimer les résultats. Cette zone appartient à la forêt communale de Canjuers dans le Nord du département. Sa surface est d'environ 200 hectares (figure 13).

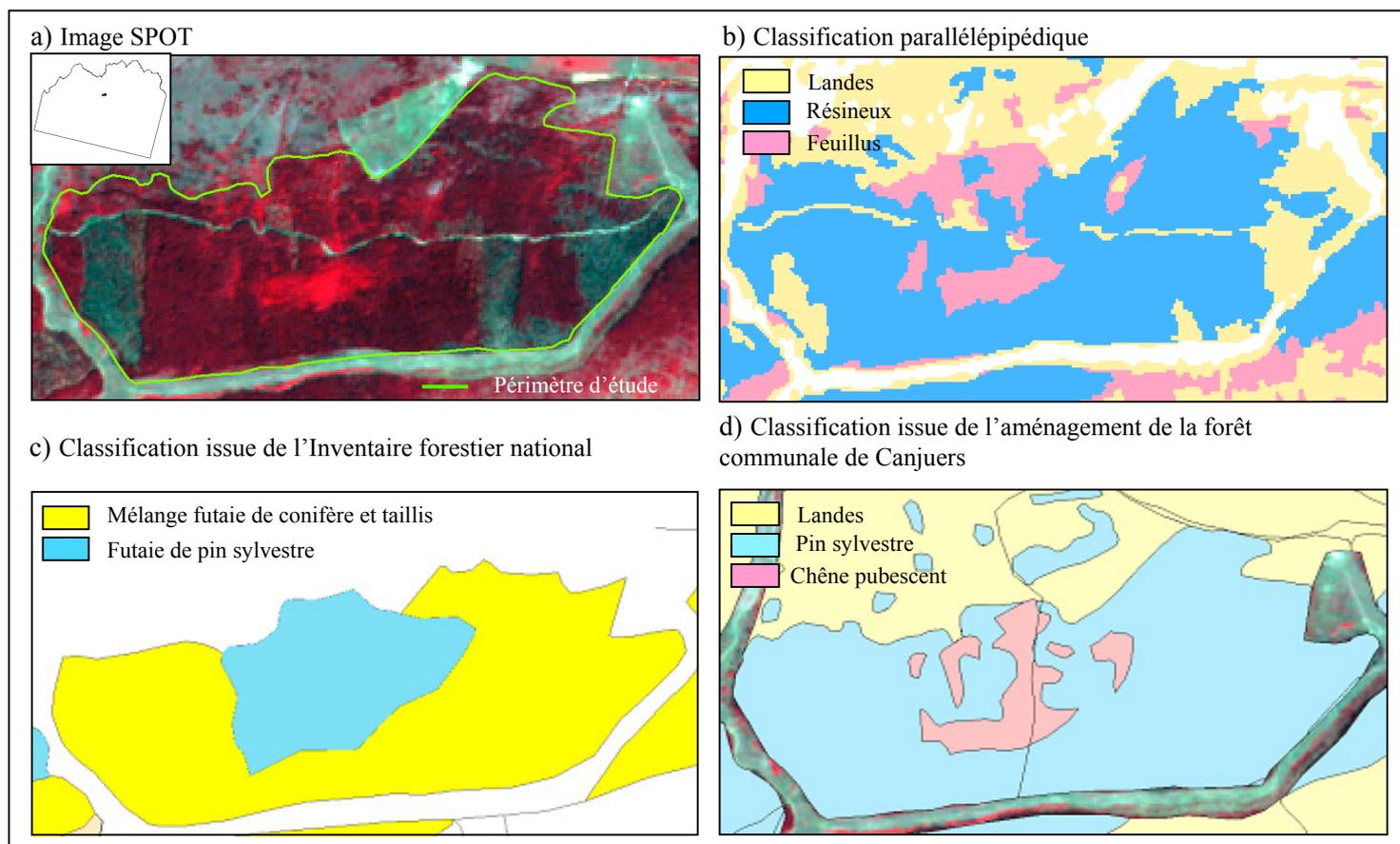


Figure 13.— *Comparaison des classifications parallélépipédique, de l'IFN et de l'aménagement sur la zone extraite de la forêt de Canjuers.*

Les résultats obtenus par la classification parallélépipédique sont plus précis que les données obtenues par l'IFN. L'IFN ne définit que deux classes avec un découpage des peuplements très simplifié et donc très approximatif. La zone feuillue n'a pas été isolée en tant que telle. Cette zone a été mélangée avec la futaie de conifère sous l'appellation futaie de pin sylvestre entraînant une erreur cartographique importante. Également, l'autre partie appelée mélange futaie de conifère et taillis est en fait un peuplement de résineux.

Les résultats de la comparaison avec les données aménagement montrent que 78 % des objets classés résineux dans cette classification l'ont également été par les gestionnaires qui ont rédigé l'aménagement de la forêt. Le pourcentage est de 66 % pour les feuillus et 68 % pour les landes (tableau 2).

		Aménagement		
		Feuillus	Landes	Résineux
Classification parallélépipédique	Non classés	9,7	21,9	1,0
	Feuillus	65,7	5,2	5,7
	Landes	20,0	68,4	15,7
	Résineux	4,6	4,5	77,6
	Total	100,0	100,0	100,0
	Changements classes	34,3	31,6	22,4

Tableau 2.— *Calcul des changements de classes attribuées par l'analyse parallélépipédique et l'aménagement (en pourcentage).*

L'observation de l'image permet de constater que les types de peuplements définis par l'aménagement ne correspondent pas toujours à l'occupation du sol visualisée. Par exemple, les zones moins boisées comprises dans les peuplements de résineux (16 %) n'ont pas été isolées. À partir de la comparaison des deux classifications, il est donc difficile de conclure que la classification parallélépipédique discrimine 77 % des résineux et 63 % des feuillus par rapport à la vérité terrain. Les données de l'aménagement sont très récentes puisqu'elles correspondent à un aménagement en cours de rédaction. La différence entre l'image et l'aménagement peut alors être due à une modification d'occupation du sol entre la date d'acquisition de l'image et la date de création des polygones si celle-ci est antérieure à 2005. Cela peut également être dû à une volonté de simplifier les aménagements. En effet, un peuplement résineux récemment passé en coupe garde son potentiel bois. Cet effet montre que la méthode d'acquisition des occupations du sol par télédétection permet de rapidement prendre connaissance des changements d'état des lieux. Ceci est particulièrement intéressant dans les zones mal connues qui ne sont pas contrôlées par un aménagement (en particulier les forêts privées sans PSG). Le satellite SPOT peut fournir des images tous les deux à trois jours. Cela signifie qu'il est possible d'avoir un renouvellement de l'information au moins 1 200 fois plus important que pour un plan d'aménagement valable 10 ans.

Des zones d'apprentissage permettent de valider cette classification. Elles correspondent soit à des données de photo-interprétation, soit à des enquêtes terrain. Les relevés de terrain constituent la meilleure approche de la réalité (GIRARD, 1999).

Au préalable des analyses de télédétection, des relevés de terrain ont été effectués. Ces relevés sont répartis au mieux sur le département : communes de Canjuers, Varages, Correns, Toulon, Vidauban, Bormes les Mimosas et Cotignac (ANNEXE 10). Les relevés concernent les peuplements les plus représentatifs du département et les essences les plus fréquemment rencontrées : chêne vert, pin d'Alep, pin sylvestre, pin maritime, chêne pubescent, chêne liège, châtaignier, pin parasol, cèdre et pin laricio. Ils ont été effectués dans les peuplements les plus purs en composition, les plus diversifiés en structure et en plusieurs exemplaires de manière à offrir la plus grande diversité au sein d'un même type de peuplement tout en permettant l'étalonnage de l'analyse en télédétection (ANNEXE 9). Ils constituent des points de contrôle pour la validation.

La matrice de confusion permet de calculer le pourcentage d'objets ayant été correctement classés (DURRIEU, 2008, GIRARD, 1999). Cette validation permet de vérifier si les points de relevé de terrain ont été correctement attribués aux bonnes classes.

Relevés terrain	Classification		
	Classes	feuillus	résineux
	Feuillu	100	10
	Résineux	0	70
	Mélanges	0	20
	Total	100	100

a) Prise en compte de la classe mélange dans la matrice

Relevés terrain	Classification		
	Classes	feuillus	résineux
	Feuillus	100	9
	Résineux+mélanges	0	91
	Total	100	100

b) Assimilation de la classe résineux et mélanges dans la matrice

Tableau 3.— Résultat de la matrice de confusion entre classification parallélépipédique et données aménagement (en pourcentage).

Les points feuillus ont été correctement placés à 100 % contre 70 % pour les résineux (tableau 3a). Le pourcentage de résineux restant a été classé comme peuplements mélangés. Cette classe n'étant pas identifiée à ce niveau de classification, il est envisageable que ce phénomène soit lié à l'effet de l'image optique dans les peuplements mélangés. L'image ne capte que la radiométrie des éléments de surface. Les peuplements résineux ont une hauteur supérieure à celle des peuplements feuillus. Les peuplements qui ont été identifiés comme mélangés par l'enquête terrain correspondent à des taillis de feuillus sous une futaie résineuse, peuplement typique des forêts méditerranéennes. C'est donc la radiométrie des résineux qui domine sur l'image. Les peuplements mélangés seraient donc identifiés comme résineux. Dans ce cas, quasiment 100 % des relevés de terrain ont été correctement classés (tableau 3b). Ces résultats permettent de constater que les classes mélanges et résineux pourraient porter à confusion. En réalité, l'ensemble des peuplements identifiés ici comme résineux correspondent en partie à des peuplements mélangés.

Il est néanmoins important de noter que sur l'image test, tous les points de relevés ne sont pas représentés. Il n'a donc été testé qu'une vingtaine de points sur la totalité effectués. Ceci est peu pour des analyses statistiques fiables.

Même si la classification fournit des résultats satisfaisants, elle reste très simplificatrice. Les classes feuillus et résineux contiennent des peuplements plus complexes. Un découpage de tout l'espace boisé en deux catégories est très réducteur. Les classes regroupent également des espaces correspondant à des peuplements clairs ou mélangés. Les résultats de la matrice de confusion le mettent en évidence. Ceci est particulièrement vrai pour les zones de transition. Un peuplement n'est pas de type feuillu ou résineux sans alternative. Certains peuplements sont à tendance ou à majorité résineuse ou feuillue. Il n'est néanmoins pas possible de définir à partir de quel pourcentage d'occupation de ces deux catégories un peuplement change de classe, d'autant plus que la radiométrie des résineux a plus d'influence puisque beaucoup de peuplements sur le département sont de type taillis feuillus sous futaie résineuse.

L'amélioration de l'identification de la ressource passe par l'approfondissement de la détection des caractéristiques de ces types de peuplement. Une approche discriminative des densités et des peuplements mélangés permettrait de préciser les classes.

✓ Approfondissement de la détection des types de peuplements : estimation des densités et des peuplements mélangés

Les classes précédemment définies sur l'histogramme bidimensionnel servent de référence pour la classification. Les objets qui se trouvaient répartis dans les zones intermédiaires des différentes classes issues des échantillons sont définies ici comme des classes mixtes. Ces classes possèdent en quantité variable les radiométries des autres classes. En fonction de leur pourcentage d'appartenance aux différentes classes dites pures, les occupations du sol sont classées en :

- peuplements résineux, feuillus ou mélangés,
- peuplements résineux clairs, feuillus clairs ou mélanges clairs.

Sept types de peuplements différents sont ainsi définis (Figure 14).

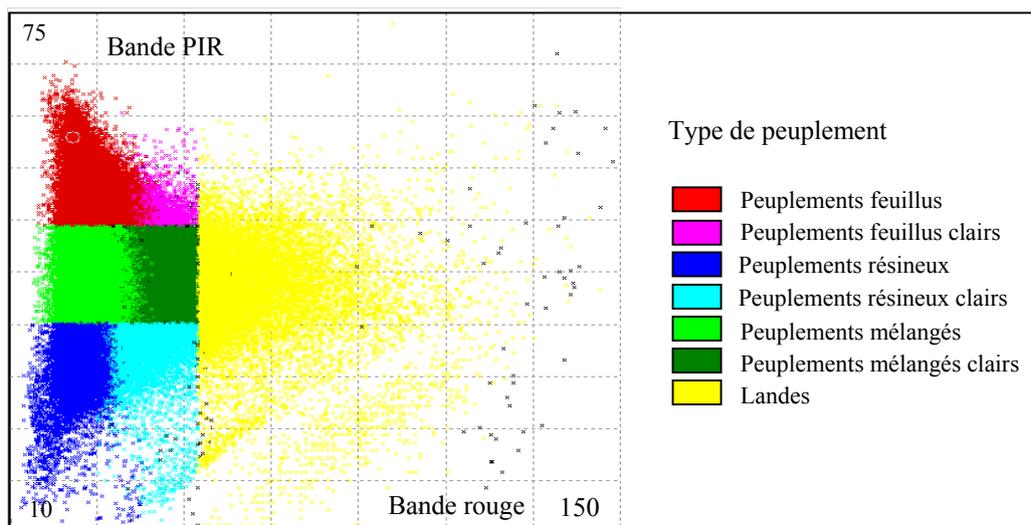


Figure 14.— Hypercubes des sept occupations du sol: landes, mélanges, résineux et feuillus, clairs ou non, représentés sur le diagramme bidimensionnel PIR et rouge.

Les valeurs radiométriques et les attributions sémantiques des nouvelles classes sont cohérentes. Par exemple, les peuplements clairs sont définis par des valeurs dans le rouge plus élevées. En effet, un groupe qui réunit un couvert végétal très chlorophyllien mais peu couvrant a une valeur dans le PIR forte mais une valeur dans le rouge plus élevée qu'un peuplement plus couvrant. Cela est dû à la contribution du sol. La radiométrie de l'objet est mixte.

C'est la segmentation orientée objet qui permet d'imaginer pouvoir effectuer ce type de discrimination. En effet, l'analyse de classification porte sur des objets qui regroupent un ensemble de pixels et non pas sur des pixels indépendants les uns des autres. Le mélange radiométrique des différentes classes comme landes et feuillus permet alors de définir un objet radiométrique moyen, mélange des deux autres radiométries pures. Cela permet d'attribuer une classe globale feuillus clairs et non une classe feuillue avec des pixels isolés classés landes (figure 15).

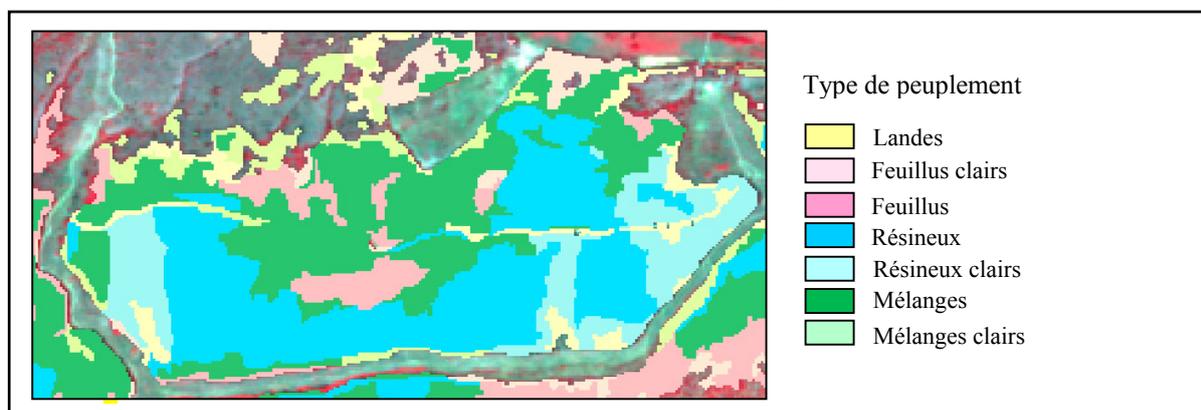


Figure 15.— Classification parallélépipédique en sept classes sur la zone en forêt de Canjuers extraite de l'image SPOT.

Sur l'image complète, les résultats montrent que les peuplements résineux occupent 50 000 hectares (500 km²), les résineux clairs 21 000 hectares (210 km²), les peuplements mélangés 35 000 hectares (350 km²), les peuplements mélangés clairs 32 000 hectares (320 km²), les feuillus 29 500 hectares (295 km²) et les feuillus clairs 17 000 hectares (170 km²). La part des peuplements purs qui a contribué à la classe peuplements mélangés est égale au sein des peuplements résineux comme feuillus (près de 40 %). Elle devrait théoriquement être plus importante au sein de la classe résineuse. Néanmoins, la part réelle occupée par les classes résineux et feuillus n'étant pas précisément connue, les choix des seuils doivent se faire de manière systématique.

La vingtaine de points de relevés pouvant être testée sur l'image ne répertorie pas l'ensemble des sept classes. Si les points représentés ont été correctement classés, cette validation reste limitante. Les relevés de terrain ont en effet été effectués dans des peuplements homogènes. Si leur classement porte peu à confusion, ce n'est pas le cas des peuplements plus hétérogènes. L'analyse de toute la zone en forêt de Canjuers permettrait de rendre compte de l'ensemble des types de peuplements. Néanmoins, il n'y a pas de connaissance terrain précise et complète de cette zone. Une analyse comparative, dont la référence est obtenue à partir d'une photo-interprétation de cette zone, permet de montrer que les objets peuvent être différemment classés et que les objets forestiers à plus grand degré de pureté et de fermeture du couvert sont mieux classés que les objets plus mélangés et à couvert plus ouvert (tableau 4).

		Photo-interprétation						
		Feuillus	Feuillus clairs	Landes	Mélanges	Mélanges clairs	Résineux	Résineux clairs
Classification parallélépipédique	Non classés	0,0	14,7	21,9	6,4	46,4	0,4	1,7
	Feuillus	93,9	27,4	0,0	7,4	1,2	0,1	0,0
	Feuillus clair	0,0	36,4	0,0	2,3	0,0	0,1	0,0
	Landes	0,0	0,0	51,1	1,5	15,3	0,0	3,5
	Mélanges	6,1	18,8	1,0	68,8	7,4	8,4	0,0
	Mélanges clairs	0,0	2,7	0,0	3,2	29,7	0,3	0,0
	Résineux	0,0	0,0	2,6	8,6	0,0	89,7	26,9
	Résineux clairs	0,0	0,0	23,4	1,8	0,0	1,3	67,9
	Total	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
	Changements classes	6,1	63,6	48,9	31,2	70,3	10,3	32,1

Tableau 4.— Matrice de confusion entre classification parallélépipédique et photo-interprétation (en pourcentage).

Les catégories de classement des objets restent néanmoins probables quelle que soit la classification. Par exemple, un objet identifié feuillu en photo-interprétation sera identifié feuillu ou mélange par la classification parallélépipédique mais ne sera pas identifié comme résineux ou landes. Ainsi, un pourcentage de chaque peuplement peut être identifié sans trop d'ambiguïté quelle que soit la classification et un autre pourcentage possède une radiométrie qui porte à confusion. Si les objets sont radiométriquement en limites de trois classes, selon la classification, ils seront attribués aux trois classes en proportions différentes. Il n'est donc pas possible, uniquement à partir de classification d'image et sans une analyse terrain de déterminer la classification qui se rapproche le plus de la réalité. S'il est possible de les comparer entre elles, il est en revanche impossible de faire un choix sur la classification qui définit les seuils les plus réalistes. Les matrices de confusion atteignent ici leur limite. L'utilisation de ces matrices suppose que les pixels soient purs et les classes discrètes. Chaque point doit pouvoir être classé sans ambiguïté dans une classe (DURRIEU, 2008). Ce n'est pas le cas ici, en particulier dans les zones de transition. C'est donc spécifiquement sur ces zones qu'une étude terrain serait informative. Elle permettrait de définir les seuils des différentes classes en fonction de l'objectif recherché : exploitabilité des peuplements pour le bois énergie.

La confrontation des résultats des différentes classifications relève quant à elle plutôt d'une étude comparative que d'une matrice de confusion. Elle permet de mettre en évidence les classes constantes et les divergences d'une classification à une autre. Les réponses montrent en effet que l'attribution des objets aux différentes classes est plus constant pour les classes pures feuillus et résineux et la classe mélanges (respectivement 94 %, 90 % et 69 %) que pour les classes de faible densité feuillus clairs, résineux clairs et mélanges clairs (36 %, 68 % et 30 %). Les concordances dans la classification des objets sont très hétérogènes. Si les classes landes, mélanges, feuillus et résineux semblent pouvoir être discriminées, le choix des classes feuillus clairs, mélanges clairs et résineux

clairs ne semble pas pertinent quant à une éventuelle discrimination. La comparaison simplifiée des classes feuillus, résineux et mélanges fournit des concordances beaucoup plus homogène (figure 16).

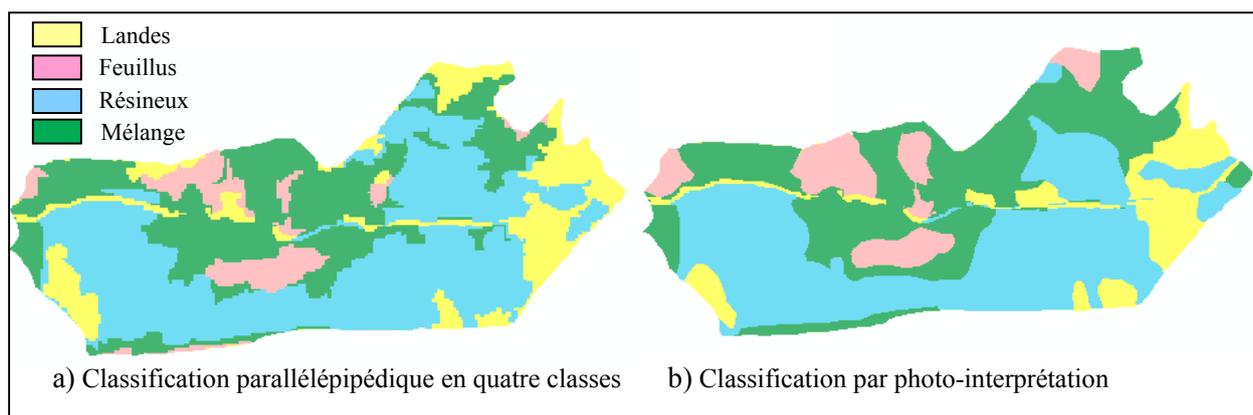


Figure 16.— *Comparaison de la classification parallélépipédique et de la classification par photo-interprétation en quatre classes : feuillus, résineux, mélanges et landes.*

Les pourcentages des objets classés dans les mêmes classes feuillus, résineux et mélanges dans les deux types de classification sont respectivement de 85 %, 79 % et 86 %. Cela dit, l’incertitude du classement de certains objets persiste (tableau 5).

		Photo-interprétation		
		Feuillus	Mélange	Résineux
Classification parallélépipédique	Non classés	7,7	5,5	2,4
	Feuillus	85,4	5,4	0,0
	Mélange	6,8	78,6	12,0
	Résineux	0,1	10,5	85,6
	Total	100,0	100,0	100,0
	Changements	14,5	21,4	14,4

Tableau 5.— *Comparaison entre classification parallélépipédique et photo-interprétation pour les classes feuillus, mélanges et résineux (en pourcentage).*

La classification parallélépipédique a montré des résultats plus précis que ceux fournis par l’IFN. Ils se rapprochent des données aménagement. Toutefois, la connaissance de ces dernières avec la réalité terrain n’est pas connue.

L’analyse met en évidence la difficulté pour définir les différentes classes pouvant être discriminées. Les sept classes définies ont été déterminées de manière systématique, par mélange des trois classes feuillus, résineux et landes dites pures. Aucune certitude n’a été établie quant à la faisabilité de discriminer l’ensemble de ces classes. Pour estimer cette faisabilité, l’utilisation d’une classification non supervisée peut permettre de définir les classes pouvant être discriminées sur l’image sans avoir à délimiter des classes hypothétiques.

De plus, les classes ont été définies d’après des bornes figées sur le diagramme bidimensionnel. Or, un objet n’appartient pas de manière stricte à une classe ou à une autre. C’est plutôt un critère de ressemblance qu’il faut prendre en compte. Sa signature spectrale ressemble plus ou moins aux signatures des objets dits purs. Dans ce cas, le terme de signature spectrale laisse place au terme de comportement spectral. L’approche probabiliste substitue à la signature spectrale d’un objet, décrite par une simple polyligne, le comportement spectral décrit par une distribution de probabilité centrée autour d’un comportement spectral moyen (GIRARD, 1999).

L’utilisation d’une classification non supervisée et probabiliste pourrait donc apporter de nouvelles informations sur l’identification des classes supposées discriminantes ainsi que les probabilités de rattachement des objets à ces classes.

II.2.a.ii. Approche probabiliste non supervisée : classifications par centres mobiles

Ces classifications définissent différentes classes à partir de points de départ (les centres de gravité) pris au hasard, auxquels sont agglomérés des pixels en fonction de leur distance aux points. Ces classifications se basent sur des mesures de distance et sur un choix *a priori* de groupes ou noyaux. Elles affectent à un pixel une classe en fonction de sa distance au centre de gravité de cette classe. Ces centres de gravité sont mobiles : ils se déplacent par étape ou itération afin de minimiser la distance intra-classe (GIRARD, 1999).

L'influence du nombre de classes est plus forte pour les types d'occupation du sol ayant une grande variabilité dans leurs signatures spectrales. Ainsi, les variations de classes modifient beaucoup les peuplements boisés et moins les occupations du sol de type landes. Le nombre de classes retenues est de 6. Il identifie les cinq classes correspondantes au masque et aux peuplements feuillus, résineux, mélanges et landes, ainsi qu'une sixième classe de sémantique inconnue. Une classification avec davantage de classes éclate des éléments de même nature au sein des autres classes. Des classes supplémentaires se font donc au dépend des classes les plus pures. Il en est de même pour un nombre inférieur de classes. Par exemple, un choix de 5 classes divise la classe feuillue en deux en lui associant des objets de la classe identifiée comme résineux clairs. Cela devient impossible d'interpréter les résultats.

Parce que les premiers barycentres des groupes sont projetés de manière aléatoire, rien n'assure que les noyaux tirés au hasard soient les plus discriminants. Le nombre d'itérations améliore cet effet. La première itération fixe les centres de gravité au hasard. Les itérations suivantes permettent de réajuster le centre de gravité en fonction du résultat précédent pour augmenter l'écart entre ces centres et minimiser la variance intra-classe. Sept itérations suffisent (figure 17). Au-delà, la nouvelle itération n'apporte rien. La convergence des pixels aux noyaux auxquels ils sont affectés est donc assez rapide, cela signifie que les différentes classes pourront sûrement être correctement séparées les unes des autres (GIRARD, 1999).

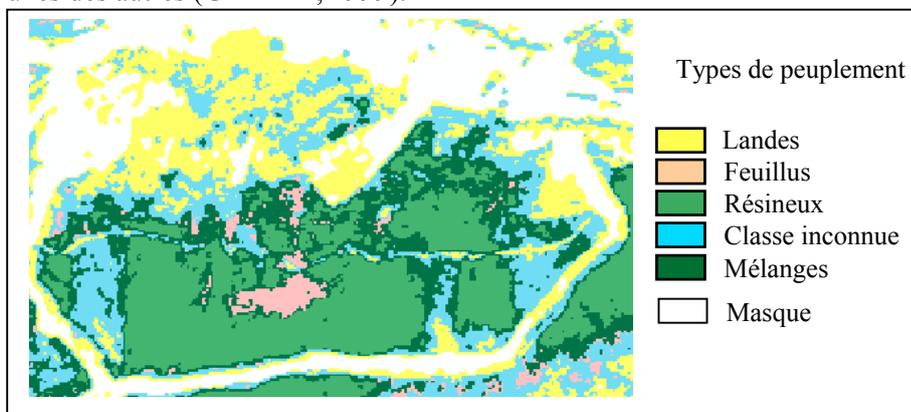
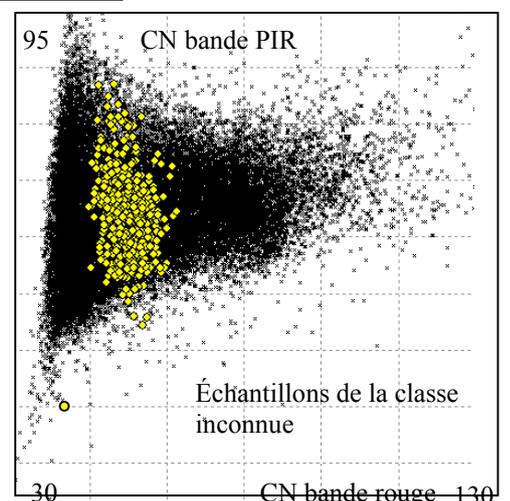


Figure 17.— Classification probabiliste non supervisée en 6 classes et 7 itérations.

Si les cinq premières classes discriminées par la classification barycentrique sont connues, une analyse plus approfondie de la sixième s'impose. La répartition des objets de cette nouvelle classe sur le diagramme bidimensionnel montre que la classe correspond aux peuplements clairs : feuillus clairs, résineux clairs et mélanges clairs confondus (figure 18)

Figure 18.— Répartition d'échantillons appartenant à la sixième classe inconnue définie par la classification probabiliste non supervisée sur le diagramme bidimensionnel.



La classification met en évidence le fait qu'une classe unique de type peuplements clairs pourrait être discriminée sans distinction de catégories. L'analyse permet de comprendre les précédents résultats qui présentaient certaines difficultés pour différencier les feuillus clairs, les résineux clairs et les mélanges clairs. Cette classification montre qu'une classe plus générale peut être isolée mais qu'il ne faut pas tenter de la différencier en catégories d'occupation du sol.

Il faut néanmoins noter que les peuplements clairs ne constituent pas réellement l'intérêt de l'étude puisque le but est de multiplier les coupes dans les peuplements sous-exploités. Les objectifs du Grenelle Environnement entraînent un intérêt pour des coupes dans les peuplements denses. Ce serait néanmoins intéressant de préciser ce à quoi correspond cette classe. Elle ne porte pas d'intérêt particulier pour notre problématique si elle correspond à des peuplements adultes peu denses à cause des conditions environnementales dans lesquelles ils se trouvent (sols pauvres, très soumis à la sécheresse...). L'accroissement en volume ne sera pas important (croissance lente et densité inchangée). Néanmoins, si elle correspond à des jeunes plantations, les surfaces constituent un futur potentiel d'approvisionnement. Il faut noter enfin que la localisation de ces zones peut avoir un intérêt particulier pour les acteurs de la DFCI.

La classification barycentrique donne des résultats assez satisfaisants compte tenu de sa rapidité et de sa simplicité. Néanmoins, la classification parallélépipédique reste préférable en termes de segmentation. La classification barycentrique s'effectue à l'échelle du pixel. Elle ne permet pas d'atteindre notre objectif global d'uniformité et de cohérence. Par effet de seuil, de nombreux pixels sont isolés, cela morcelle l'information globale et complique l'interprétation. Les résultats se rapprochent de ceux observés dans l'étude Provence verte. De plus, la classification définit les classes et l'utilisateur par une enquête terrain peut déterminer à quoi elles correspondent. À l'inverse, ce qui est recherché dans l'étude est plutôt une connaissance terrain de l'utilisateur qui par la suite définit les classes en fonction des objectifs fixés.

L'analyse par classification probabiliste non supervisée permet de comprendre les précédents résultats. Elle permet de confirmer qu'il existe quatre classes feuillus, résineux, landes et mélanges pouvant être discriminées ainsi qu'une seule et même classe peuplements clairs.

Ces différentes analyses ne permettent pas, en revanche, d'estimer la proportion de feuillus ou de résineux à partir desquelles il y a passage d'une classe à une autre.

II.2.a.iii. Analyse des résultats

La création de polygones utilisés comme échantillons (*AOI* en anglais) à partir des classes précédemment définies permet de valider les résultats obtenus. Ces zones de référence définissent les populations potentielles à partir desquelles s'effectue la classification.

La distance de Jeffries-Matusita et la divergence sont des facteurs de séparabilité qui traduisent les distances entre les différentes AOI. Ils définissent donc les distances inter-classes.

Il a été établi (DURRIEU, 2008) qu'une valeur se rapprochant de 2 définit une bonne séparabilité des classes. Entre 1,5 et 1,9, il faut reconsidérer les limites de la zone qui peut être hétérogène et inclure des objets trop proches d'un autre thème. En dessous de 1,5, il faut reconsidérer la pertinence des thèmes et en dessous de 1, il faut penser à fusionner les classes en une seule.

Les résultats comparatifs de l'ensemble des classes feuillus, résineux, mélanges et peuplements clairs montrent de bons facteurs de séparabilité puisqu'ils sont supérieurs au seuil 1,9 (tableau 6). Seules les classes mélanges et résineux ont un plus faible facteur de séparabilité. Cela met encore l'accent sur la forte similitude qui existe entre ces deux types de peuplements liée à la dominance résineuse sur le plan vertical dans les peuplements mélangés.

		Indice de Jeffries-Matusita				
		Feuillus	Résineux	Mélanges	Landes	Peuplements clairs
Feuillus			1,99	1,99	2,00	1,99
Résineux				1,84	2,00	1,99
Mélanges					2,00	1,99
Landes						1,97
Peuplements clairs						

a) Indice de Jeffries-Matusita

		Divergence				
		Feuillus	Résineux	Mélanges	Landes	Peuplements clairs
Feuillus			2,00	1,99	2,00	1,98
Résineux				1,69	2,00	1,99
Mélanges					2,00	1,99
Landes						1,99
Peuplements clairs						

b) Divergence

Tableau 6.— Indices de séparabilité : indice de Jeffries-Matusita et divergence pour les cinq classes feuillus, résineux, mélanges et peuplements clairs.

L'analyse radiométrique des classes permet de comprendre leurs différentes places (figure 19). Les spectres des peuplements purs sont bien cohérents avec la littérature. Les résineux ont une plus faible valeur dans le PIR que les feuillus.

Le spectre de la classe peuplements clairs se rapproche d'un spectre de type sol nu. La courbe qui caractérise les signatures spectrales des végétaux disparaît. Il est impossible de différencier la catégorie d'essence au sein de cette classe. La participation radiométrique des végétaux sur la radiométrie moyenne de l'objet est très faible. Elle est noyée dans la radiométrie du sol.

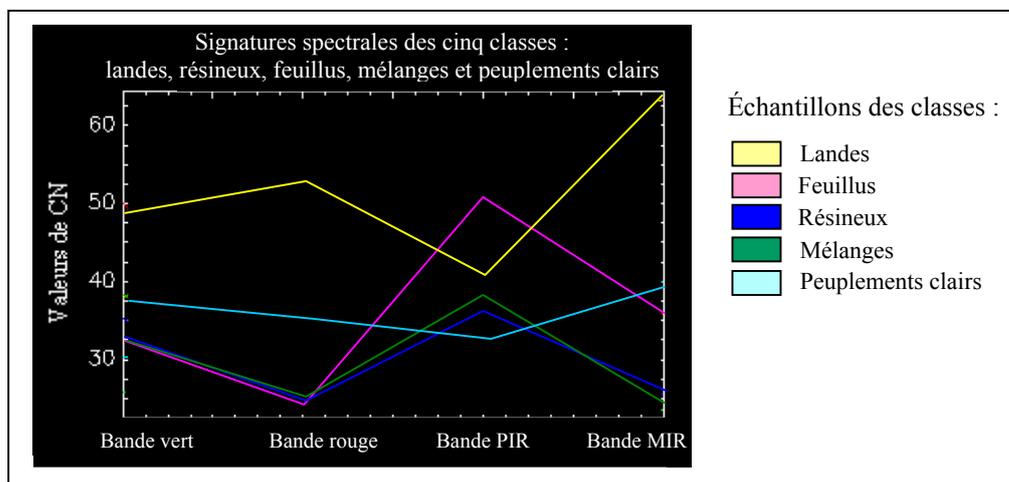


Figure 19.— Signatures spectrales des cinq classes définies comme pouvant être discriminées : landes, résineux, feuillus, mélanges et peuplements clairs.

Enfin, la signature spectrale de la classe mélanges se rapproche beaucoup de la signature de la classe résineux, en particulier dans le PIR.

Une classification supervisée par maximum de vraisemblance permet de fixer les classes. Elle calcule ensuite pour chaque pixel sa probabilité d'être rattaché à une classe (GIRARD, 1999). La classification à partir des AOI montre que les pixels utilisés pour la définition des AOI ont été classés correctement à plus de 93 % lorsque la probabilité maximale est de 0,7.

	Feuillus	Résineux	Mélanges	Landes	Peuplements clairs
Non classés	0,2	0,0	0,0	1,2	0,2
Feuillus	99,8	0,0	0,0	0,0	0,0
Résineux	0,0	97,3	7,0	0,0	1,4
Mélange	0,0	1,4	93,0	0,0	0,0
Landes	0,0	0,0	0,0	98,4	0,4
Peuplements clairs	0,0	1,3	0,0	0,4	98,0
Total	100	100	100	100	100

Tableau 7.— Pourcentage de pixels issus des AOI correctement classés par l'analyse par maximum de vraisemblance.

Cette classification ne pourrait pas être retenue. Comme la classification barycentrique, elle met en évidence les mêmes problèmes de segmentation et du choix des classes qui ne peuvent pas être définies par l'utilisateur. Elle demande en plus une connaissance préalable des classes à discriminer.

Les différentes analyses ont montré que cinq classes pouvaient être discriminées : feuillus, résineux, landes, mélanges et peuplements clairs. Néanmoins, les limites entre ces classes ne peuvent pas être définies sans une analyse terrain. Des seuils peuvent être fixés de manière approximative mais cela ne permet en aucun cas de définir à quoi ils correspondent. Les peuplements mélangés correspondent à quel pourcentage de feuillus et de résineux ? Un peuplement dit clair correspond à quelle surface terrière maximale ? Les seuils doivent donc être déterminés par une analyse terrain et en fonction des objectifs fixés. Un peuplement clair peut par exemple correspondre à un peuplement dont la biomasse est insuffisante pour motiver une exploitation.

D'autre part, si les différentes classifications ont permis d'identifier cinq classes caractérisées par leur catégorie d'essence et par leur densité approximative, il serait intéressant de caractériser ces classes et essentiellement la classe résineux par l'essence forestière. L'identification des différentes essences est très intéressante pour notre problématique. En effet, l'exploitation n'est pas la même selon l'essence, il est donc intéressant pour l'investisseur de savoir où les essences se répartissent sur le territoire. Par exemple, si la mécanisation est bien développée pour le pin noir et le pin maritime, la conformation des tiges du pin d'Alep n'offre pas les mêmes possibilités (PEETERS, 2006). La connaissance de la répartition des essences fournirait une information sur la facilité d'approvisionnement en bois. Le pin pignon est une essence qui n'est pas exploitée dans le Var car elle présente un fort attrait touristique. En conséquence, il participe à une surestimation de la surface de bois disponible pour le bois énergie. Également, en se régénérant bien, le cèdre semble être une bonne solution contre les dépérissements dus aux fortes chaleurs et au manque d'eau des chênes liège ou des pins sylvestre. Leur identification permettrait d'isoler des zones de pérennité forestière. Pour identifier les essences, une connaissance *a priori* du terrain est nécessaire. Les données terrain disponibles offrent une connaissance des essences constitutives du milieu.

II.2.b. DISCRIMINATION DES ESSENCES

II.2.b.i. Profils spectraux

L'observation des spectres radiométriques des essences cèdre, pin d'Alep, pin sylvestre et pin noir montre que s'il ressort des gammes préférentielles pour chaque essence, il n'est pas possible de discriminer les essences de manière significative (figure 20a). La zone de chevauchement des gammes est importante. Définir des limites pour chaque classe ne permettrait en rien d'obtenir une répartition des essences proche de la réalité. Par exemple, sur le diagramme bidimensionnel, une valeur de PIR proche de 40 correspond préférentiellement à l'essence pin sylvestre, mais ce pourrait tout aussi bien correspondre aux trois autres essences (figure 20b). Les indices de séparabilité sont d'ailleurs très faibles (compris entre 0,4 et 1,4).

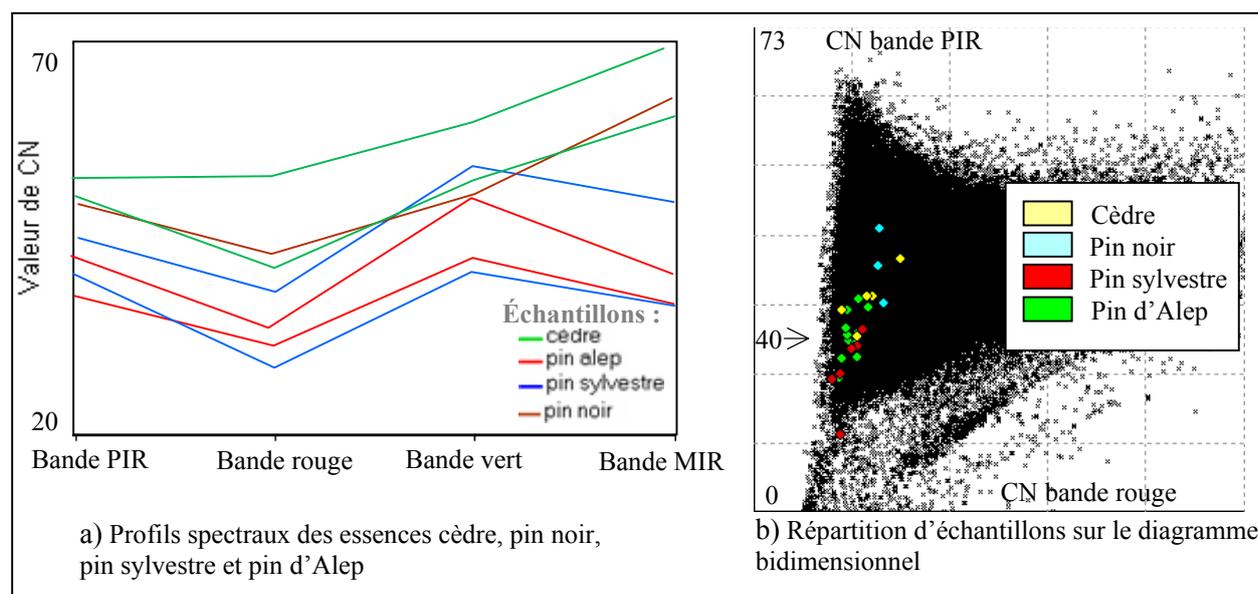


Figure 20.— *Comportements spectraux et répartition des échantillons sur le diagramme bidimensionnel des essences cèdre, pin noir, pin sylvestre et pin d'Alep.*

L'analyse des spectres radiométriques ne permet pas de discriminer les différentes essences. Une analyse factorielle permettrait d'aller plus loin dans l'estimation de la faisabilité d'une éventuelle discrimination. Elle permettrait de créer des nouvelles variables discriminantes, combinaisons de nos bandes d'origine.

II.2.b.ii. Analyse factorielle discriminante

Une analyse factorielle permet de mettre en évidence les liaisons et les caractères explicatifs des différentes classes pour l'ensemble des objets issues des échantillons. Elle permet de définir des combinaisons de variables expliquant les différences qui caractérisent les classes en minimisant la variance intra-classe et en maximisant la variance inter-classe (BOUROCHE et SAPORTA, 2007).

✓ Extraction des données de terrain

Une AFD se base sur des échantillons connus. Le logiciel eCognition permet d'isoler les objets issus de segmentation correspondant aux échantillons. Leurs surfaces et leurs formes sont définies par la segmentation et leurs attributs et leurs localisations sont issus des échantillons connus. Ces objets définissent les types d'occupation des sols de référence pour la suite de l'analyse.

Il existe deux types d'échantillons connus :

- les polygones issus des aménagements de l'ONF,
- les relevés de terrain effectués préalablement sur le département du Var.

Un test sur la classe résineuse a permis d'établir quel type d'échantillon fournit la classe la plus homogène. L'utilisation des polygones aménagement conduit à l'attribution, à tort, d'objets à la classe. En effet, certains polygones incluent des zones non boisées sur l'image (clairières, peuplements ayant été coupés depuis l'aménagement ...). Les trouées deviennent des objets indépendants par le jeu de la segmentation et sont affiliées à la classe résineux. Supprimer ce biais en éliminant les polygones possédant des zones non boisées fait apparaître un nouveau problème : les objets qui se trouvent au voisinage des polygones aménagement possèdent parfois un ou quelques pixels en commun. Ces pixels suffisent à classer les objets comme résineux.

L'attribution d'objets à partir des points de relevés de terrain est plus intéressante. Les points d'occupation du sol correspondent à une réalité très locale. De ce fait, seul un objet unique issu de la segmentation est identifié comme appartenant à la classe résineux. De plus, par le jeu de la segmentation, l'aspect lissé des données radiométriques est conservé. Une valeur radiométrique moyenne est retenue et non celle d'un pixel isolé. Les petites variations issues de perturbations très locales sont noyées dans la spectrométrie globale des objets. La classe est plus homogène, les valeurs de comptes numériques attribués à la classe ont un écart type plus faible avec cette méthode qui sera donc conservée.

Le nombre de points de relevés de terrain effectués est néanmoins insuffisant. Il faut compter suffisamment de zones d'apprentissage pour prendre en compte l'hétérogénéité intra-classe. Pour pallier ce problème, des points ont été créés à partir des couches aménagement en forêts domaniales de Aiguines, Ampus, Bauduen, Châteaudouble, Comps, Correns, Draguignan, Flayosc, Fox-Amphoux, Régusse, Salernes et en forêt communale de Canjuers.

✓ L'AFD

L'extraction des données de terrain permet d'avoir un jeu de données qui assure l'identification des individus et donc leur attribution dans les différentes classes. Sur l'image, les différentes classes résineuses sont les suivantes : pin d'Alep, pin maritime, pin noir, cèdre, pin sylvestre et sapin.

L'AFD est appliquée avec le logiciel XLSTAT sur les quatre bandes spectrales (Figure 21). Elle ne donne pas de résultats significatifs. L'AFD des trois classes pin d'Alep, pin sylvestre et cèdre montre une variabilité inter-classe très faible. Ainsi, le bruit des valeurs spectrales prend autant d'importance que la variabilité intra-classe. Une même valeur spectrale peut correspondre à plusieurs classes et une même classe à plusieurs réponses spectrales. Comme cela a été évoqué précédemment, dans le cas de la végétation, de nombreux facteurs influencent la réponse spectrale : la teneur en eau, le stade de développement de l'arbre, la teneur en chlorophylle, le couvert plus ou moins dense, l'état phytosanitaire. Ainsi, la variance intra-classe est très importante et conduit au chevauchement des enveloppes des signatures spectrales.

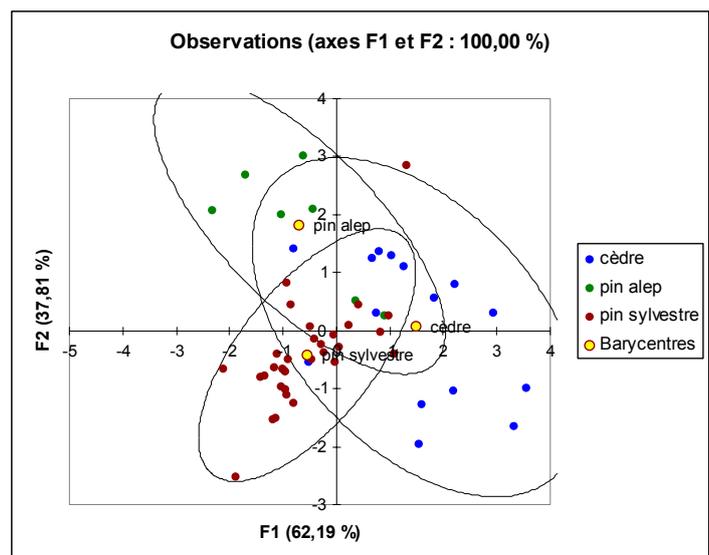


Figure 21.— Résultats de l'AFD sur les classes pin d'Alep, cèdre et pin sylvestre à partir de l'image satellite SPOT.

L'essence cèdre est pourtant l'une des essences résineuses qui se discrimine le mieux. Elle se distingue très bien des autres essences sur photo aérienne. Les résultats peu satisfaisants de l'AFD avec cette essence laissent penser que des discriminations au sein du genre pin, plus difficiles à effectuer, ne peuvent pas apporter de résultats satisfaisants.

Également, l'écart-type des essences les moins représentées sur la zone (cèdre et pin d'Alep) est très important. Cela est dû aux surfaces trop faibles occupées par ces essences. La résolution et la segmentation noient l'information spécifique.

II.2.b.iii. Classification ascendante hiérarchique

Les analyses factorielles expliquent les discriminations des classes de manière linéaire. Cela ne correspond peut-être pas au modèle de discrimination de nos classes essences. La classification ascendante hiérarchique permet d'effectuer une discrimination par seuil (figure 22). Elle est basée sur la mesure d'une distance qui est calculée pour chacun des pixels. Les pixels qui ont la plus petite distance sont regroupés puis sont assimilés comme une unique entité fictive (GIRARD, 1999).

Les distances intra-groupe sont des indicateurs d'hétérogénéité. Chaque coupure dans le dendrogramme définit un groupe auquel il peut être possible d'attribuer une thématique plus ou moins difficile à définir.

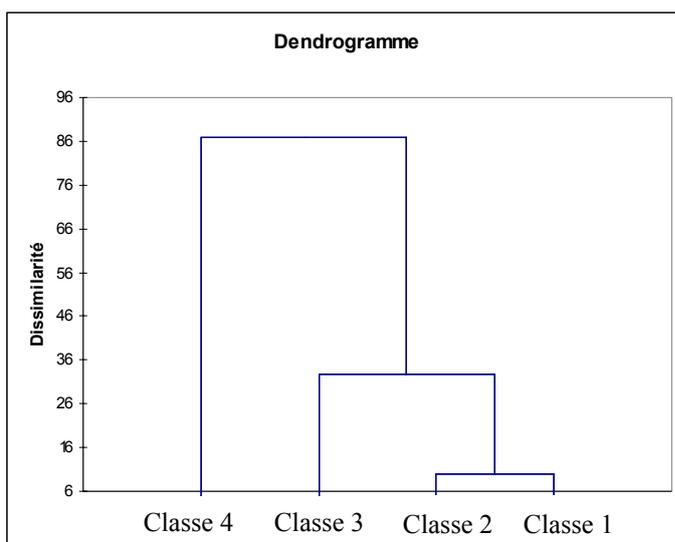


Figure 22.— Résultats de la CAH sur les classes pin d'Alep, cèdre et pin sylvestre.

Observatio	Classe	Essence	Observation	Classe	Essence
Obs1	1	Cèdre	Obs23	4	Pin sylvestre
Obs2	1	Cèdre	Obs24	4	Pin sylvestre
Obs3	1	Cèdre	Obs25	4	Pin sylvestre
Obs4	1	Cèdre	Obs26	4	Pin sylvestre
Obs5	2	Cèdre	Obs27	1	Pin sylvestre
Obs6	2	Cèdre	Obs28	4	Pin sylvestre
Obs7	1	Cèdre	Obs29	4	Pin sylvestre
Obs8	1	Cèdre	Obs30	4	Pin sylvestre
Obs9	3	Cèdre	Obs31	4	Pin sylvestre
Obs10	2	Cèdre	Obs32	1	Pin sylvestre
Obs11	4	Cèdre	Obs33	1	Pin sylvestre
Obs12	3	Cèdre	Obs34	4	Pin sylvestre
Obs13	2	Cèdre	Obs35	4	Pin sylvestre
Obs14	1	Cèdre	Obs36	4	Pin sylvestre
Obs15	4	Cèdre	Obs37	4	Pin sylvestre
Obs16	4	Pin Alep	Obs38	4	Pin sylvestre
Obs17	4	Pin Alep	Obs20	1	Pin Alep
Obs18	4	Pin Alep	Obs21	1	Pin Alep
Obs19	4	Pin Alep	Obs22	4	Pin Alep

Tableau 8.— Observations utilisées pour la CAH et classes associées par CAH.

Les résultats montrent que les classes ne correspondent pas à une essence en particulier (tableau 8). Le pin sylvestre et le pin d'Alep ont des radiométries très proches et sont souvent classés dans la même classe. La classe 3

est issue de deux échantillons cèdre uniquement mais la majorité des points cèdre sont classés dans deux autres classes (1 et 2).

II.2.b.v. Méthode CART ou arbre de décision

Cette méthode cherche à résoudre les problèmes de discrimination par divisions successives de l'échantillon en deux sous-ensembles. À chaque dichotomie, les deux parties sont les plus contrastées vis-à-vis de la variable à expliquer. L'objectif est de maximiser la variance inter-classe. La méthode sélectionne l'arbre optimal en se fondant sur l'estimation de l'erreur théorique d'affectation ou par réduction du critère d'impureté.

Les résultats donnent des indices de pureté souvent proches de 50 % (ANNEXE 13). Il y aurait donc une chance sur deux pour que l'objet soit mal classé. De plus, presque toutes les divisions prennent en compte des objets appartenant à différentes essences. Les spectres radiométriques des différentes essences sont très proches et le choix du meilleur arbre par la méthode se fait par réduction stricte du critère d'impureté. Ce processus est mal adapté puisqu'il signifie que si deux divisions sont très proches et jouent donc potentiellement le même rôle dans l'interprétation, le nœud qui assure la plus grande réduction de l'impureté en passant d'un nœud à ces descendants sera choisi.

Radiométriquement, le rapprochement ou l'éloignement des échantillons n'est pas en accord avec la nature des objets échantillonnés. Les discriminations n'ont pas de sens, elles aboutissent à des classes incohérentes car les critères discriminants (les signatures spectrales) ne sont pas caractéristiques d'une classe d'objet.

Il faut toutefois noter que cette méthode demande un grand nombre d'échantillons et que sur la zone, les surfaces occupées par le cèdre et le pin d'Alep sont insuffisantes pour remplir ce critère.

Une analyse radiométrique sur image satellite ne permet donc pas d'identifier les différentes essences. La texture associée à la résolution d'une photo aérienne pourrait apporter des nouvelles informations. Elle sera abordée en quatrième partie.

II.3. Comparaison des résultats avec l'étude Provence verte sur image Landsat

L'étude réalisée antérieurement nommée Provence verte portait sur l'estimation de la ressource forestière à partir d'une image Landsat. La comparaison de l'image SPOT avec l'image Landsat permet de faire deux constats. Le premier est lié à la résolution. L'image Landsat a une résolution de 30 mètres ce qui sous-entend une résolution neuf fois moins précise que l'image SPOT (figure 23).

Par ailleurs, l'image SPOT a été acquise en 2005. Elle fournit donc un état des lieux plus récent de 6 ans par rapport à l'image Landsat acquise en 1999. Les résultats sont ainsi plus proches de l'état actuel du territoire. C'est le cas par exemple, sur les extraits ci-dessous, de la zone exploitée après 1999 qui n'apparaît que sur l'image SPOT. Également, des objets sont totalement absents de l'image Landsat, c'est le cas par exemple de la route en bas à gauche de l'image.

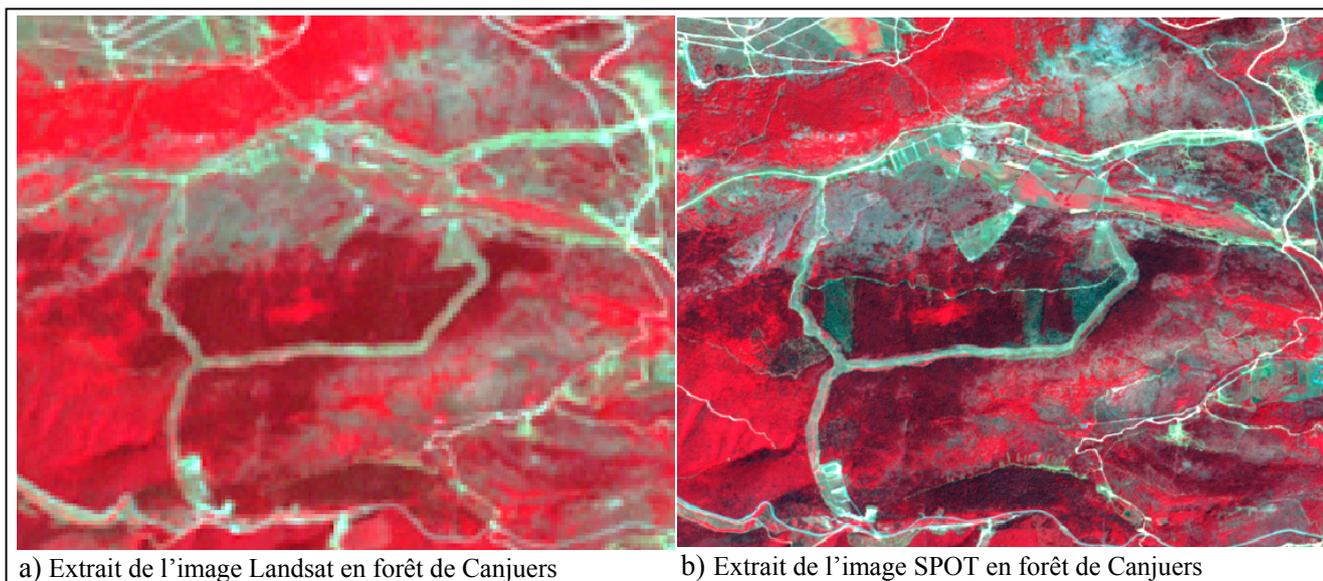


Figure 23.— *Comparaison des qualités des images Landsat et SPOT, extrait en forêt de Canjuers.*

En termes de classification, les résultats obtenus avec l'image SPOT offrent une meilleure vision de la réalité. Des objets qui ne sont pas visibles avec l'image Landsat prennent forme et les limites des objets sont plus fines. Dans l'exemple ci-dessous, la ripisylve quasiment inexistante sur l'image Landsat prend forme sur l'image SPOT (figure 24).

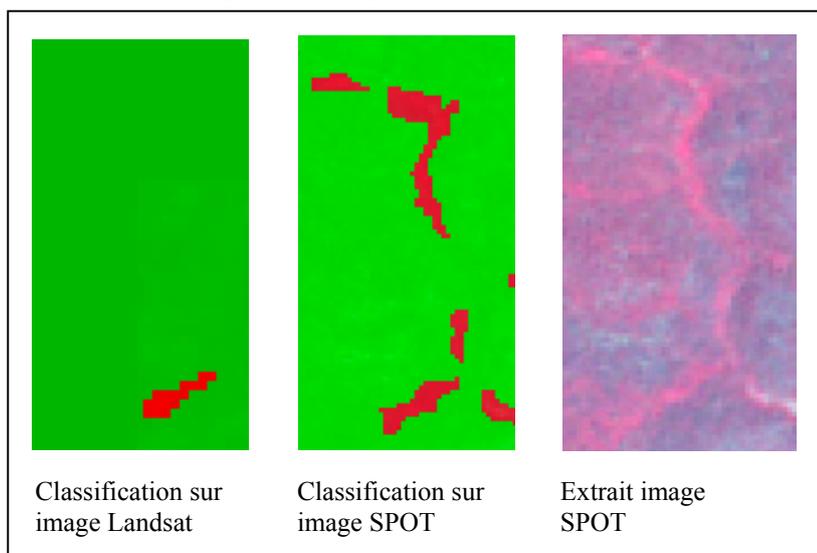


Figure 24.— *Comparaison de la classification d'une ripisylve par l'étude Provence verte issue de l'image Landsat et par la classification parallélépipédique issue de l'image SPOT, extrait du département du Var.*

La zone commune aux deux classifications parallélépipédique et Provence verte a été extraite de manière à comparer les résultats. Cette zone fait environ 665 km². La comparaison a été effectuée entre la classification obtenue par l'étude Provence verte et celle obtenue par la classification parallélépipédique effectuée à la fois sur image SPOT et sur image Landsat. Les différentes classifications sur la partie commune des deux études montrent que l'analyse parallélépipédique sur image Landsat est beaucoup moins fine que celle réalisée sur image SPOT (ANNEXE 14). Cela est dû à la résolution.

	Surface estimée feuillus (ha)	Surface estimée résineux (ha)
Classification parallélépipédique sur image SPOT	17 300	22 600
Classification Provence Verte sur image Landsat	17 500	23 000
Classification parallélépipédique sur image Landsat	17 900	22 800

Tableau 9.— Comparaison des surfaces des classes feuillus et résineux estimées par l'analyse parallélépipédique sur image SPOT et Landsat et par l'étude Provence verte.

Sur le territoire commun, la différence d'estimation des surfaces est au maximum de 3,4 % (tableau 9). Cette différence est faible pour une estimation de surface, sachant en particulier que les surfaces calculées par les logiciels eCognition et ArcGIS peuvent varier de 2 %. Les résultats obtenus par l'analyse parallélépipédique et l'analyse Provence verte estiment donc de manière similaire les surfaces feuillues et résineuses.

L'analyse des zones qui ont été identifiées différemment par les deux classifications montre qu'elles correspondent aux zones de transition identifiées comme zones de passage d'une classe à une autre sur le diagramme bidimensionnel (figure 25). Cela confirme la difficulté d'arrêter une limite qui définisse sans ambiguïté les seuils de passage. Il est difficile de définir si une classification est meilleure qu'une autre sans une vérification terrain. Des relevés terrain permettraient d'identifier les objets qui se trouvent sur ces zones critiques et donc de réajuster l'analyse. Sans vérification terrain, il subsiste une variation de surface qu'il est très difficile de classer. De plus, une identification des zones par le terrain permettrait d'identifier la forme des classes sur le diagramme bidimensionnel (la classe feuillue semble correspondre à une forme plus arrondie pour l'étude Provence verte que pour l'analyse parallélépipédique).

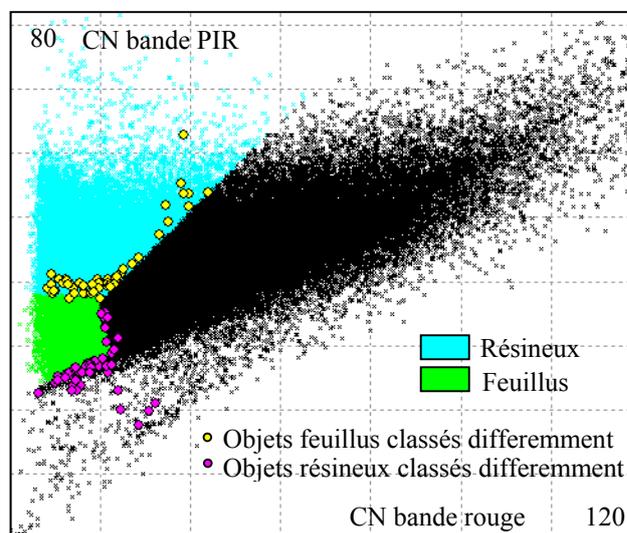


Figure 25.— Échantillons d'objets ayant été classés différemment par l'analyse parallélépipédique sur l'image Landsat et l'étude Provence verte sur le diagramme bidimensionnel.

De manière générale, certaines zones peuvent rester incertaines en termes de détermination car les radiométries correspondent aussi bien à un objet de type feuillu que de type résineux. S'il existe un comportement spectral type par objet, de nombreuses signatures spectrales peuvent correspondre au même type d'objet. Elles fluctuent en fonction des conditions dans lesquelles les objets se trouvent. L'extraction des résultats pour la forêt d'Aiguines dans le Nord du département a montré deux

particularités de l'analyse par télédétection. Les peuplements feuillus qui se trouvent à l'ombre des falaises ont été identifiés comme résineux (ANNEXE 15) et les hêtraies ont été identifiées comme feuillus clairs. Ces derniers ont un feuillage différents du chêne très majoritaire sur le département. La radiométrie des hêtres se rapproche d'une radiométrie estimée comme type de peuplement de chêne clair. Ces deux particularités sont liées au Nord du département et correspondent à un faible pourcentage du recouvrement sur le territoire mais elles permettent de mettre l'accent sur une limite de la télédétection. Si elle offre la possibilité d'analyser le recouvrement total du département, certaines zones particulières (transitoires, soumises à des perturbations particulières, non représentatives du milieu...) ont une radiométrie qui porte à confusion au regard de l'analyse à grande échelle. Seul un traitement à part peut pallier ces problèmes comme par exemple à travers un masque topographique permettant d'isoler les zones fortement ombragées dans le premier cas ou par un zonage des essences rares dans le deuxième cas.

Ainsi, il est nécessaire de poser des limites permettant de définir les seuils qui font passer un objet d'une classe à une autre. La limite peuplements clairs a mal été définie puisqu'elle prend en compte des hêtraies denses. Ces limites sont inaccessibles par analyse d'images satellites. Des relevés de terrain s'imposent sachant que certaines zones resteront des zones de transition dans lesquelles la classification des objets est floue. Seule une vérification terrain permettra de faire des conclusions quant à la faisabilité de l'identification de ces zones spéciales.

II.4. Analyse par ACP de l'information radiométrique exploitée

Une certaine quantité d'information a été exploitée dans les différentes analyses. Néanmoins, les données des images étant toujours plus ou moins corrélées, il est intéressant de rechercher une nouvelle représentation de l'information dans une autre configuration. Cela permettrait de vérifier si une information pouvant améliorer les discriminations n'a pas été prise en compte. L'analyse en composantes principales permet de projeter les valeurs des pixels sur des axes principaux décorrélés.

Les différents vecteurs propres de l'ACP sont les suivants :

Composantes principales	Valeur propre	Variance	Variance cumulée
1	1633,86	93,67	93,67
2	79,13	4,54	98,21
3	26,67	1,53	99,73
4	4,64	0,27	100

Tableau 10.— Valeurs propres et variances des quatre composantes principales après ACP sur l'image SPOT

Les deux premières composantes principales suffisent à expliquer plus de 98 % de l'information contenue dans l'image. Les équations linéaires permettent d'analyser les significations des deux axes de l'ACP.

$$ACP = a \times (\text{bande PIR}) + b \times (\text{bande rouge}) + c \times (\text{bande vert}) + d \times (\text{bande MIR})$$

$$ACP 1 = 0,475709 \times (\text{bande PIR}) + 0,466386 \times (\text{bande rouge}) + 0,490356 \times (\text{bande vert}) + 0,561904 \times (\text{bande MIR})$$

$$ACP 2 = 0,830183 \times (\text{bande PIR}) - 0,480047 \times (\text{bande rouge}) - 0,025276 \times (\text{bande Vert}) - 0,282334 \times (\text{bande MIR})$$

L'analyse a été effectuée sur le masque, ce qui signifie que les valeurs ayant été prises en compte ne concernent que la végétation. Les valeurs des coefficients a, b, c et d de la première

composante principale sont de même signe et de valeurs similaires. La première composante principale est donc proche de la demi-somme des valeurs des comptes numériques. Cela signifie que 94 % de l'information contenue dans l'image est contenue dans la somme des quatre canaux.

La seconde composante principale a une valeur a très élevée et de signe opposé aux valeurs b, c et d. La bande verte n'a quasiment aucune influence. C'est la bande PIR qui contient le plus d'information. Cette composante se rapproche d'un indice de végétation de type RVI. C'est donc cette ACP qui donnera les variations au sein de la végétation, en particulier entre résineux et feuillus.

Ainsi les résultats n'apportent pas d'information supplémentaire. En effet, les bandes définies comme expliquant la majeure partie de l'information (composition des quatre bandes et indice de végétation) ont très largement été exploitées par l'intermédiaire de combinaisons, d'indices et d'équations dans les analyses de discrimination. La composition colorée créée à partir des deux composantes principales ne fournit pas de renseignements complémentaires même si l'affichage améliore la lecture de l'information.

L'analyse en composantes principales montre que l'information contenue dans l'image à travers les quatre bandes disponibles a été exploitée. En conclusion, les analyses radiométriques ont montrées qu'une discrimination en cinq classes est possible mais qu'elle ne permet pas d'aller plus loin.

Au delà de l'information radiométrique, les peuplements sont caractérisés par une texture. L'étude de cette dernière pourrait apporter une information supplémentaire.

I. Analyse texturale

La texture est une notion qui dépend beaucoup de la résolution spatiale. Elle ne peut pas être traitée avec des images SPOT car les houppiers et les ombres qui définissent les textures ne se distinguent pas. Néanmoins, l'aspect textural apparaît sur photo aérienne. En 2009, l'IGN va fournir le recouvrement en orthophotos infrarouges numérisées de tout le département. La méthodologie de l'étude pourra être reproduite sur ces photos aériennes.

On peut, à chaque texture, attribuer des descripteurs forestiers. L'objectif serait alors de rechercher ces informations tant dans le plan horizontal (densité, taux de couvert, stade phénologique...) que dans le plan vertical (strates de végétation, mode de régénération en futaie ou en taillis...) et de les mettre en relation.

Une analyse de texture a été testée sur la photo aérienne scannée de la forêt de Seillons-Source-d'Argens, commune située au nord de Sainte-Maxime (ANNEXE 16).

La texture prend en compte l'objet et son contexte. Une photo aérienne permet d'accéder aux ombres, aux formes des houppiers, aux diamètres des houppiers, et ces données peuvent être mises en relation avec un état physiologique et une organisation dans l'espace. L'analyse texturale nécessite donc de définir des similarités texturales avant d'effectuer une segmentation spatiale. Seulement trois textures se distinguent visuellement sur la photo aérienne : les coupes récentes, les anciennes plantations et les peuplements adultes. Les indices de séparabilité donne de faibles résultats concernant les classes de type anciennes plantations et peuplements adultes (indice de Jeffries-Matusita = 0,48 et divergence = 0,59). La texture serait un nouveau paramètre permettant de discriminer ces peuplements.

Il existe trois types d'approches différentes en analyse texturale : à base d'histogrammes, à partir d'une matrice de co-occurrence (texture de Halarick) et à partir des paramètres de Fourier (LELONG, 2008).

La méthode à base d'histogrammes ne permet pas d'identifier la répartition de comptes numériques dans l'espace, elle ne donne que les fréquences.

La matrice de co-occurrence traduit le nombre de fois où l'on trouve un même motif par translation à un pas donné et dans une direction définie. La méthode sous-entend l'identification de primitives qui se répètent dans les textures.

La matrice peut prendre en compte différents indices de Halarick :

- la variance, qui est plus importante sur les zones de cultures et de coupes (en forêt, la distribution des niveau de gris dans le motif est autour de la moyenne),
- le contraste qui est faible dans les zones cultivées,
- la dissimilarité ou la quantité d'éléments distincts composant le motif élémentaire (faible dans les zones cultivées et forte dans les zones urbaines),
- l'entropie ou granulométrie de la texture ainsi que la corrélation ou l'uniformité de la texture, quasiment identiques sur l'ensemble des peuplements.

Différents calculs d'indices de texture ont été réalisés pour l'ensemble des indices de Halarick. Pour chaque indice, deux variables ont été testées : la taille des unités élémentaires des textures (fenêtre de 11 x 11 pixels et de 31 x 31 pixels) et leurs orientations (0°, 45° et 90°).

L'image résultante contient autant de bandes (144) qu'il a été réalisé de calculs d'indice de texture. Une ACP permet d'identifier quelles sont les bandes les plus explicatives de l'information contenue dans l'image. Trois composantes principales ont été retenues puisqu'elles suffisent à

expliquer plus de 90 % de l'information. Parmi elles, 10 bandes sont les plus représentatives (bandes verte et bleue pour les variables variance et contraste dans différentes orientations et différentes tailles de fenêtre). Les compositions colorées de ces composantes principales ne donnent pas de résultats pertinents. En effet, les composantes principales ont permis d'expliquer l'information concernant la texture de la desserte mais aucune information n'a permis d'isoler des textures d'occupation du sol végétale (figure 26).

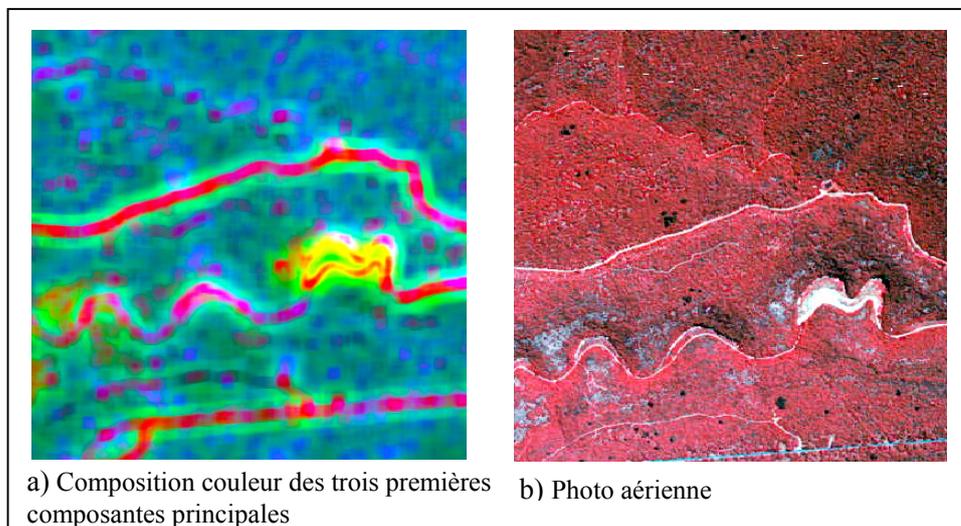
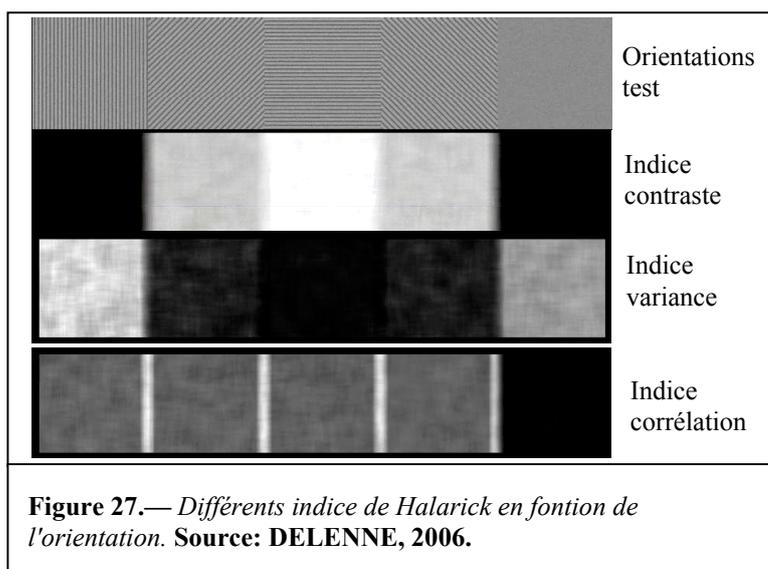


Figure 26.— *Composition colorée des trois premières composantes principales en analyse texturale, extrait de la photo aérienne de Seillons.*

Tous les indices utilisés sont dépendants de l'orientation. Or, aucun élément élémentaire dans les peuplements forestiers n'est répétitif dans une direction. Même une amélioration de contraste ne permet pas l'identification d'une structure à répétition. Seule la corrélation n'est pas dépendante de l'orientation (DELENNE, 2006). Cet indice traduit l'aspect lisse de la texture mais il ne varie pas significativement dans les peuplements forestiers (figure 27).



La difficulté principale dans l'analyse de texture vient de la définition des primitives. À l'exception des plantations très homogènes, aucune texture n'est composée d'un seul et même motif de base qui se répète. Or, pour analyser une texture, il est indispensable de déterminer la taille et l'orientation des unités constitutives des différentes textures. Une analyse texturale n'a donc d'intérêt et d'efficacité qu'à travers des textures de type plantation rectiligne. Une fenêtre de dimension réduite dans laquelle la perception est identique pour toute position envisageable par translation s'observe rarement dans un milieu forestier. Même sur des zones plantées où, en photo-interprétation il est possible de distinguer une texture, aucun motif ne se distingue sur les transects radiométriques (figure 28).

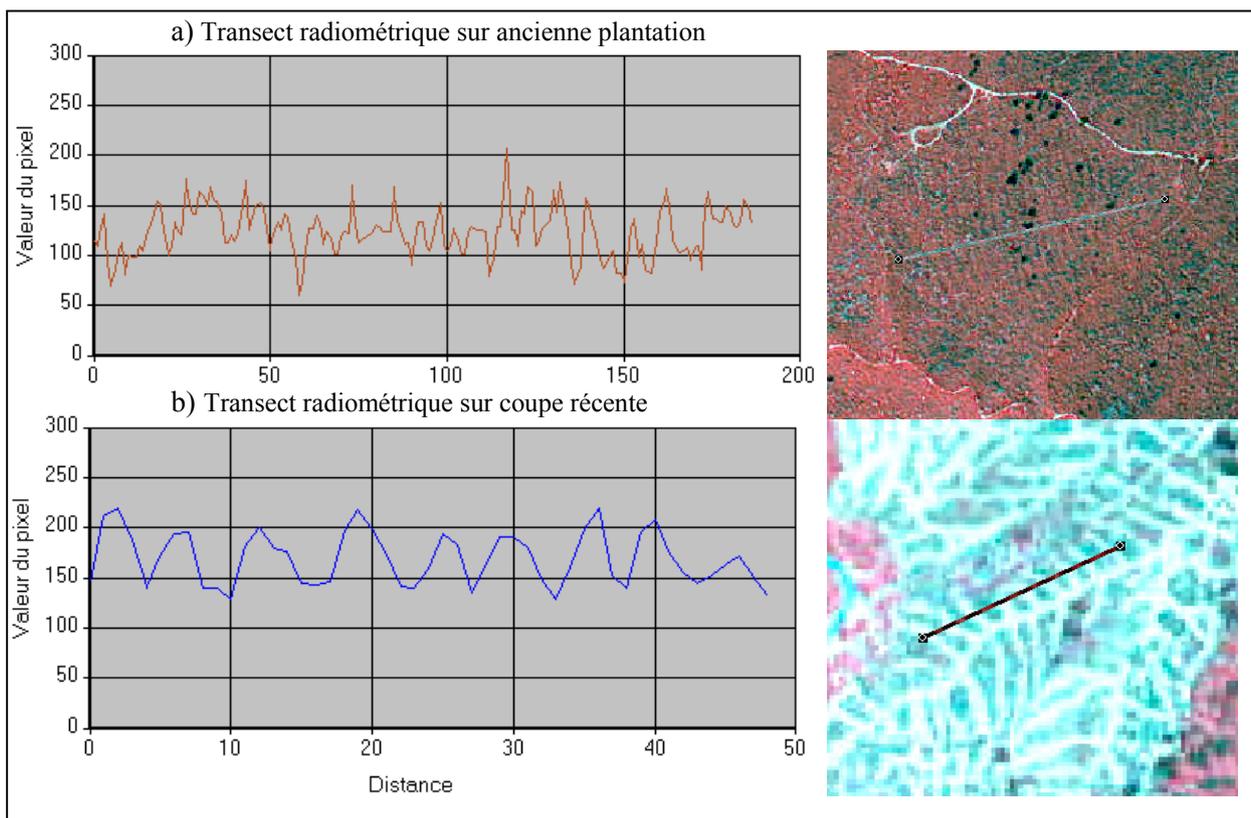


Figure 28.— *Transects radiométriques sur deux textures extraites de la photo aérienne de Seillons. a) Aucun motif répété ne se distingue. b) Un motif répété commence à s'apercevoir.*

L'analyse de Fourier n'apporte aucun résultat. Cette analyse se base sur la décomposition de l'image en somme d'ondes sinusoïdales pouvant osciller à différentes fréquences et à différentes amplitudes. L'existence de sinusoïdes sous-entend l'existence d'une alternance de deux motifs distincts selon une direction. Ce type de texture n'existe pas sur l'image. Il faut une texture très régulière orientée dans une même direction de type plantation de vigne pour qu'un motif puisse se répéter radiométriquement.

En conclusion, l'applicabilité pour l'analyse de texture concerne les structures très régulières de type plantation en ligne. L'application de ce type d'analyse atteint ses limites lorsqu'on s'intéresse à des structures plus aléatoires de type peuplement fermé et irrégulières de type plantation en courbes.

Pour améliorer la recherche de texture sur ce type d'occupation du sol, il serait intéressant de rechercher des nouveaux indices explicatifs, autres que les indices de Haralick. Il faudrait alors programmer l'analyse de l'image avec ces indices dans de nombreuses directions.

II. Discrimination des essences

La possibilité de différencier les essences à partir de la photo aérienne a été étudiée en utilisant l'analyse factorielle discriminante. L'AFD a été effectuée à partir de la décomposition de l'image en couleurs primaires : rouge (700 nm), vert (546 nm) et bleu (436 nm). L'analyse discriminante ne se fait donc pas sur des valeurs radiométriques de réflectance mais sur les couleurs d'affichage reproduites par un mélange des trois couleurs primaires. Ces valeurs se rapprochent de la décomposition de la bande PIR dans le système trichromatique. Les résultats montrent que ces valeurs suffisent à permettre une discrimination des essences (Figure 29).

La création d'une couche arithmétique sous eCognition ($97,19 \times F1 + 2,81 \times F2$) permettrait d'isoler les gammes de valeurs correspondantes à chaque classe.

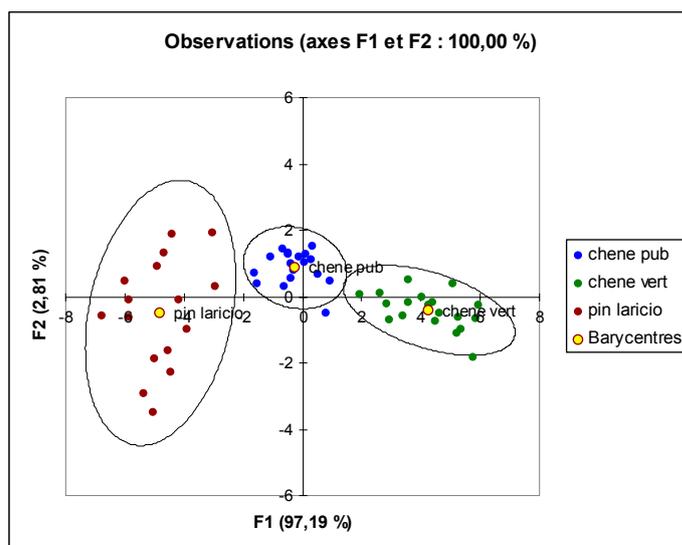


Figure 29.— Résultats de l'AFD sur les classes pin laricio, chêne pubescent et chêne vert à partir d'une photo aérienne.

En 2009, l'IGN fournira les photographies aériennes du département du Var numérisées. Cela permettra de mettre en place des traitements numériques et ainsi d'allier la finesse de la résolution des photos aériennes avec les traitements informatiques. Même si la discrimination de certaines essences comme le pin d'Alep et le pin maritime restera de faible qualité, une discrimination systématique des essences sera possible.

Il ressort de toutes ces classifications que les peuplements pouvant être discriminés sont les peuplements feuillus, résineux, mélanges, landes et peuplements clairs. Néanmoins, il n'est pas possible de placer de manière certaine les limites entre ces peuplements ni d'en définir les caractéristiques. La méthode choisie pour pallier cela et pour estimer au mieux la ressource forestière à partir de l'image SPOT s'effectue en deux étapes : la définition des peuplements les plus purs et la définition des peuplements intermédiaires.

I. Première étape : définition des peuplements les plus purs

La première étape consiste à extraire de l'image les zones représentant les peuplements les plus purs des classes landes, feuillus et résineux (figure 30b). Elles sont identifiées d'après les échantillons connus du terrain (figure 30a) et validés par analogie entre l'image SPOT et leur positionnement sur le diagramme bidimensionnel. La surface qu'elles occupent est de 46 000 hectares (460 km²) soit 18 % du territoire étudié.

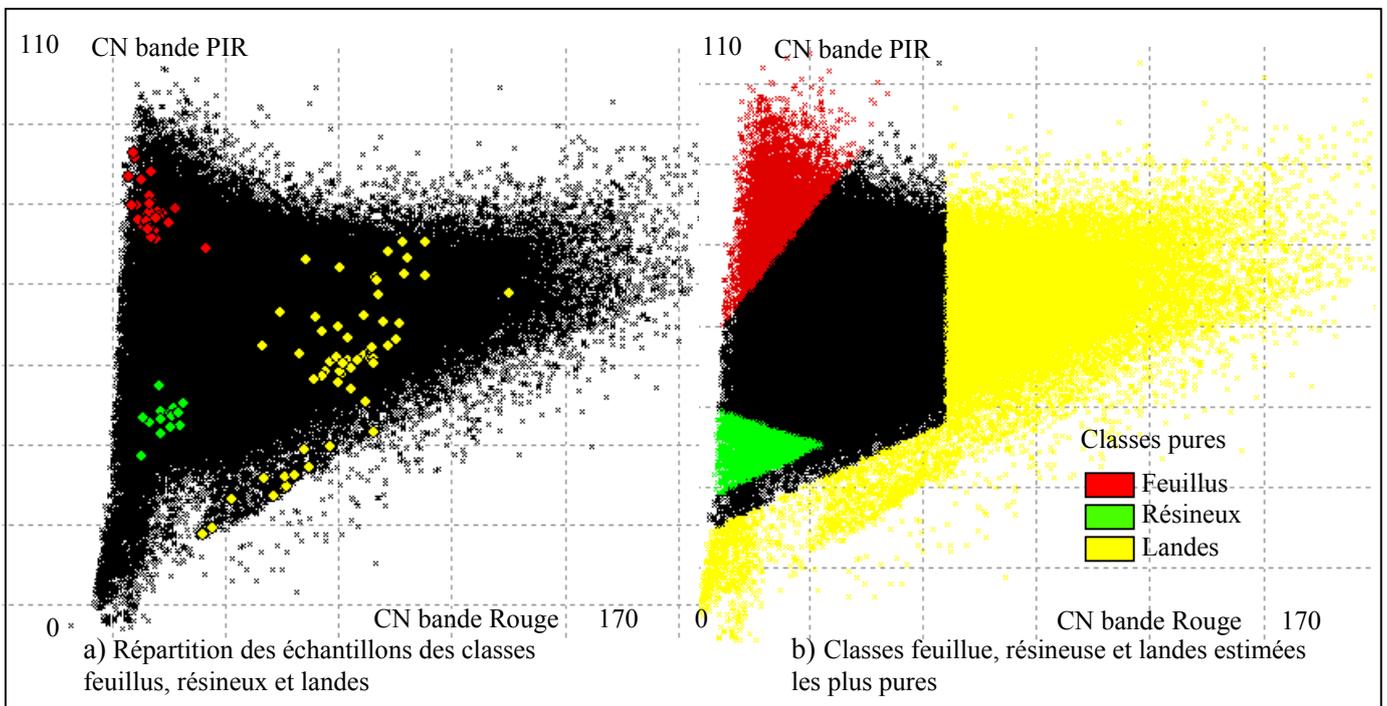


Figure 30. — Répartition d'échantillons des classes feuillus, résineux et landes sur le diagramme bidimensionnel et classes correspondante.

Les zones intermédiaires correspondent à des classes dont les limites et la sémantique sont incertaines et doivent donc être précisées. La surface occupée par les zones intermédiaires est de 204 000 hectares (2 040 km²). C'est sur ces classes en particulier que la deuxième étape se concentre.

II. Deuxième étape : définition des peuplements intermédiaires

Pour déterminer les seuils de passage d'une classe à une autre, une analyse terrain est nécessaire. Les zones intermédiaires sont divisées en 36 classes différentes non identifiées (figure 31a et ANNEXE 17). L'accent a été porté sur la zone intermédiaire des classes feuillus et résineux. Cette zone correspond à une vaste surface.

Sept classes représentent une surface entre 100 et 140 km², sept classes entre 50 et 100 km² et les 22 dernières entre 0,2 et 50 km². Le nombre de relevés de terrain a été plus important dans les classes les plus représentées (figure 31b). Plusieurs points de relevés doivent être effectués par classe. Cela permettra d'identifier l'hétérogénéité des points au sein d'une même classe (ANNEXE 18).

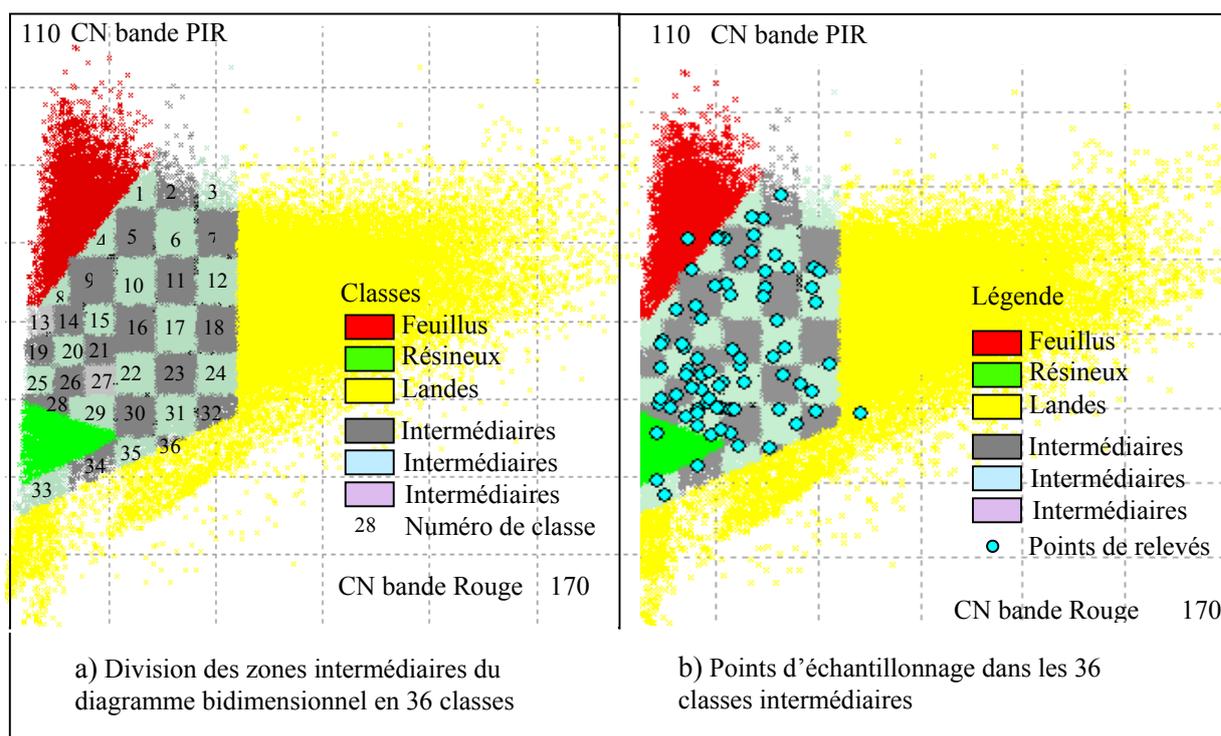


Figure 31.— Segmentation des zones intermédiaires des classes dites pures et points d'échantillonnage sur le diagramme bidimensionnel.

Le terrain permet par la suite soit de nommer les classes soit de les agglomérer s'il est estimé qu'elles correspondent à une même réalité puis de les nommer. Cela permettra de définir des seuils correspondant à une réalité terrain. Les limites seront définies de manière à ce que les seuils soient choisis en cohérence avec la problématique.

Au-delà de l'identification des points sur le diagramme bidimensionnel, c'est leur référence spatiale qui est importante. En effet, en fonction de l'image traitée (image brute, corrigée, masquée, entière ou non), le diagramme bidimensionnel change. La connaissance de points de contrôle sur l'image permettra de les repérer sur tout type de diagramme bidimensionnel et donc de pouvoir réajuster les seuils pour une quelconque autre analyse portant sur cette zone géographique.

L'analyse terrain a été effectuée sur trois forêts du Nord du département (ANNEXE 19) : la forêt de Bauduen (1 650 hectares), celle de Villecroze (400 hectares) et celle du Muy (990 hectares).

Les résultats de l'analyse terrain montrent que certaines classes correspondent à des types de peuplement bien définis ce qui permet de redéfinir les classes sur la diagramme bidimensionnel et

donc d'ajuster les seuils des classes. Par exemple, les classes 12 et 9 correspondent respectivement et sans ambiguïté aux classes landes et feuillus. D'autres classes sont plus hétérogènes et correspondent davantage à des changements progressifs de composition. Elles permettent de fixer les zones de transition. Par exemple la classe 5 regroupe des jeunes taillis qui peuvent correspondre à la fois à de très jeunes taillis très clairs proches d'une classe buissonnante haute et à de jeunes taillis plus hauts et plus âgés (illustration 1 a et b). La classe 29, elle, correspond aussi bien à un peuplement résineux qu'à un mélange à dominance résineuse (illustration 1 c et d). Comme il a été évoqué, ces zones particulières restent des zones transitoires qui regroupent des peuplements différents mais radiométriquement proches. Il est donc très difficile de définir les densités caractéristiques de ces classes.

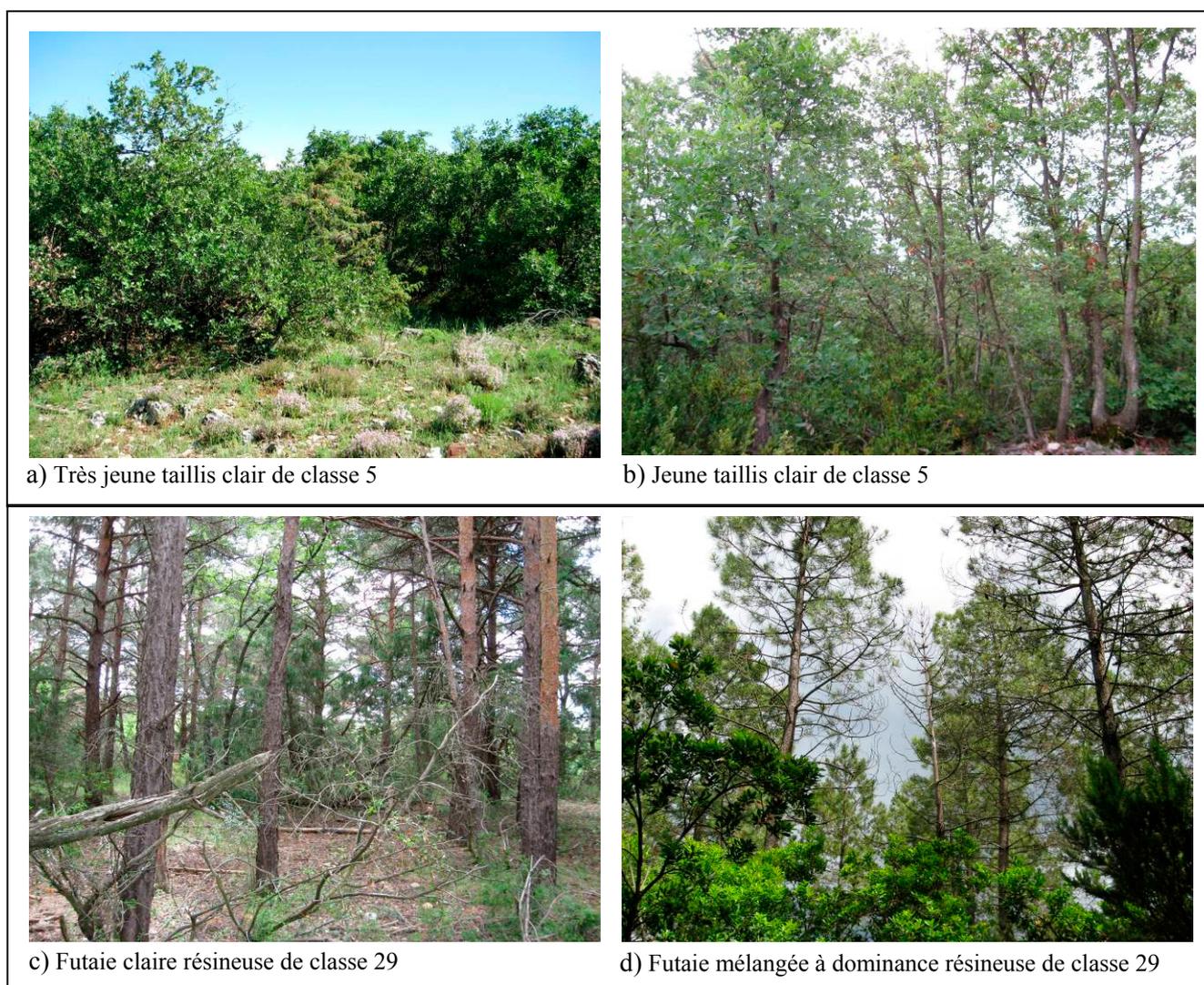


Illustration 1.— *Hétérogénéité des classes transitoires.* Source : M. Goudet.

Le terrain permet également de constater certaines limites de la télédétection. L'image satellite ne transmet qu'une représentation du couvert dominant des peuplements.

Il faut noter une particularité liée à la radiométrie associée à l'occupation du sol qui peut être la même pour deux peuplements différents si leurs valeurs sont très proches dans les quatre bandes disponibles. C'est le cas par exemple des classes 26 et 29 qui correspondent plutôt à des peuplements résineux mais qui, dans deux cas relevés, correspondaient à une vaste étendue de genévriers cades (illustration 2). Ce genévrier est plus haut que le genévrier de Phénicie, il peut atteindre 6 à 8 mètres et se confond dans ce cas avec un peuplement résineux. La contribution du sous-étage buissonnant peut fortement intervenir dans les confusions d'occupation du sol par télédétection. En effet, il est différent selon les forêts (plutôt buis sur Bauduen, genévriers sur Villecroze, localement calycotomes et figuiers

de barbarie sur le Muy) et influence la radiométrie globale des peuplements clairs très majoritaires en forêt méditerranéenne. Il n'est dans ce cas pas possible de faire la distinction par simple analyse radiométrique, seule une connaissance terrain peut identifier cette différence.

Ce phénomène a son importance en particulier dans la classe mélange. Un taillis clair qui possède un sous-bois très dense de genévriers pourrait être identifié comme mélange feuillus et résineux. Inversement, un peuplement résineux très clair avec un sous-étage buissonnant dense radiométriquement différent peut être classé en mélange et non en résineux.



a) Peuplement typique de classe 26

b) Couvert de genévriers cadés identifiés comme classe 26

Illustration 2.— *Limite de la télédétection : confusion entre peuplement résineux et couvert de genévriers.*
Source : M. Goudet.

Le sous-étage buissonnant tend à transmettre une radiométrie proche de celle des résineux. Souvent les classes possèdent deux catégories d'occupation du sol possible, l'une comportant du résineux et l'autre un sous-étage buissonnant dense.

L'analyse terrain des classes a également permis de rendre compte des vraies valeurs de densité. La majorité des peuplements méditerranéens correspondent à des peuplements clairs. L'attribution sémantique peuplements clairs ou non jusque là utilisée pour caractériser les classes ne doit donc pas porter à confusion. Les peuplements clairs correspondent plutôt à de très faibles densités. Ces types de peuplements correspondent davantage à des landes boisées qu'à des peuplements clairs. D'après les relevés de terrain, une gamme de surface terrière sera attribuée permettant ainsi de caractériser les densités de chaque classe.

La classe définie comme feuillue correspond à du taillis d'âge varié et de densité allant d'un couvert complet à un peuplement clair.

La classe résineuse correspond à des peuplements pouvant s'exploiter en vue de la problématique bois énergie. Elle peut représenter des peuplements exclusivement constitués de résineux ou des peuplements résineux denses qui cachent un sous-étage.

La classe landes arborées correspond à des occupations du sol divers (taillis, résineux, mélange taillis et résineux avec ou sans sous-étage buissonnant), mais dans tous les cas, elle correspond à des classes de trop faible volume pour solliciter une exploitation forestière. En effet, le prélèvement minimum pour un chantier demandé par les exploitants est de 50 m³/ha (PEETERS, 2006). Il est dorénavant possible de répondre à la question posée dans la partie 3-II.2.a.ii (pages 33 et 34) : la classe nommée peuplement clair correspond majoritairement à des peuplements adultes qui poussent dans des conditions environnementales ne permettant pas d'atteindre des peuplements de densité suffisante pour une exploitation. Cette classe peut donc être extraite des zones d'intérêt pour notre problématique.

La classe maquis, garrigues correspond à une large gamme de milieux ouverts : friches, prairies, zones débroussaillées, bordures de chemin, cultures cynégétiques, anciennes vignes...

La classe mélange peut contenir différents types de peuplements : soit un peuplement résineux avec sous-étage, soit un taillis surétagé, soit un taillis très clair avec un sous-étage dense de type genévrier. De manière générale, l'influence du sous-étage est notable dans ces peuplements, qu'ils soient de type feuillu ou arborescent. Il n'est pas possible par télédétection de définir avec exactitude les sous-ensembles de la classe mélange. Comparer la signature spectrale des objets avec le signal obtenu sur l'image n'a de sens que si le signal intègre des éléments tous identiques. Cela signifie qu'il est nécessaire que les objets étudiés se répètent sur des surfaces supérieures à celle correspondant à la résolution au sol (GIRARD, 1999). Dans la classe mélanges, le nombre d'essences arbustives et arborescentes au sein d'un même pixel est trop important. Cela dit, les peuplements mélangés ont en très grande majorité une réserve résineuse qui peut susciter une exploitation. Ces peuplements mélangés, largement majoritaires sur le département constitueraient donc une source de bois résineux pour le bois énergie (illustration 3).



Illustration 3.— *Illustrations des cinq classes retenues.* Source : M.Goudet.

Au vu des classes nouvellement définies, la segmentation de l'histogramme peut alors être réajustée (figure 33a). Les limites et les caractéristiques des classes sont plus en cohérence avec le terrain et la problématique de l'étude. Les résultats sur l'extrait en forêt de Canjuers offrent un nouveau découpage de l'espace (figure 33b). Sur l'ensemble de l'image SPOT, les surfaces respectives des classes feuillus, résineux, mélanges, landes arborées et maquis, garrigues sont de 50 000 hectares (500 km²), 37 000 hectares (370 km²), 74 000 hectares (740 km²) et 21 000 hectares (210 km²), (ANNEXE 20). Cela signifie que sur le tiers nord du département, 20 % de la superficie est occupée par des peuplements feuillus, 15 % par des peuplements résineux, 30 % par des peuplements mélangés à réserve résineuse et 8 % par des peuplements épars non exploitables.

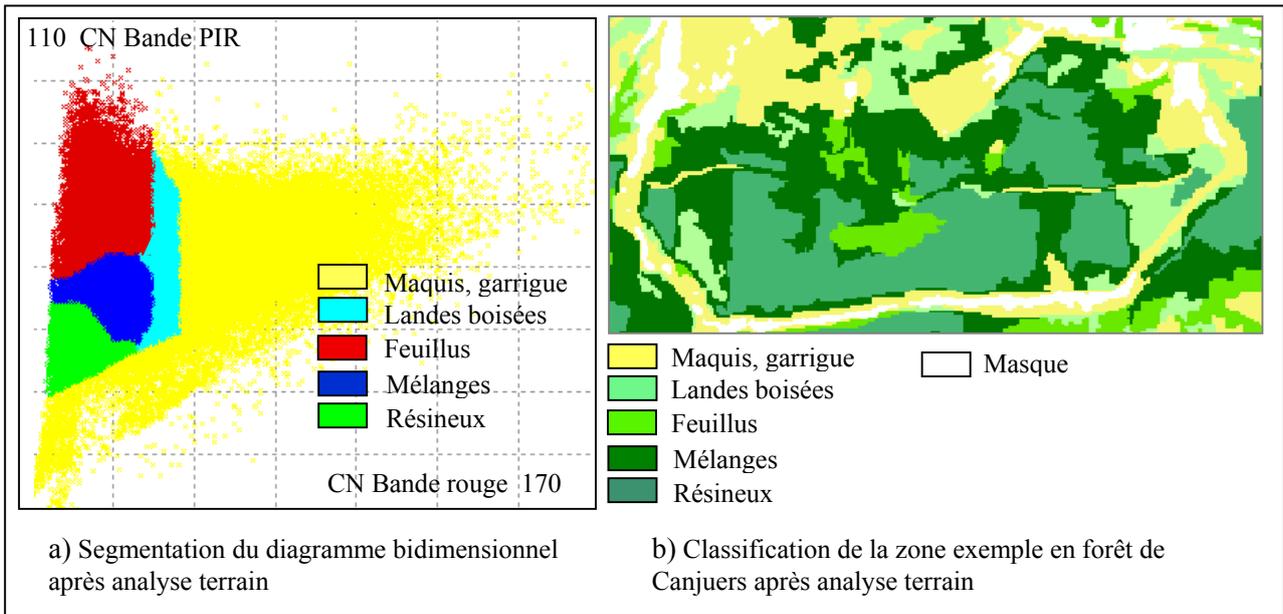


Figure 33.— Nouvelle segmentation du diagramme bidimensionnel en classes et illustration de la classification sur l'extrait en forêt de Canjuers.

Dans les classifications précédentes, la part occupée par les feuillus et les résineux avait été déterminée de manière systématique, en créant des hypercubes égaux. Par rapport à ces classes, les nouveaux résultats associent une part résineuse très importante dans la classe mélanges (tableau 12). Les résineux sont en effet très souvent à la base de cette classe qui reste majoritaire. Les classes résineux et mélanges restent proches comme il l'a été évoqué par les indices de séparabilité dans la partie 3-II.2.iii, tableau 6 (page 35).

Estimation des catégories végétales résineuse et feuillue (II.2.a.i p.26)	Classes et surfaces estimées (km ²)						Total
	Feuillus				Résineux		
	780				1070		1850
Approfondissement de la détection des types de peuplements : estimation des densités et des peuplements mélangés(II.2.a.i p.30)	Feuillus	Feuillus clairs	Mélanges	Mélanges Clairs	Résineux	Résineux Clairs	
	295	170	350	320	500	210	1845
	465		670		710		
Cinq classes discriminantes après relevés de terrain (partie 5 p.55)	Feuillus		Mélanges	Landes boisées		Résineux	
	500		740	210		390	1840

Tableau 12.— Bilan des surfaces estimées par type de peuplements selon les classifications.

Les gammes de volumes estimées des classes résineuses et feuillues sont très grandes. Il est en effet difficile de subdiviser ces classes sans commettre des erreurs. Ceci est, comme il l'a été évoqué, directement lié à l'hétérogénéité qui existe dans les classes. C'est également la conséquence directe de la représentation horizontale du couvert par les images satellites. Selon le type d'essence, le peuplement sera identifié dans la même classe alors que les densités sont différentes. C'est par exemple le cas de la classe 30 qui regroupe des peuplements de type pin sylvestre sur Villecroze et de

type pin parasol sur le Muy. Le nombre de tiges par hectares est sensiblement différent, mais le couvert horizontal semble identique. Cela est dû au port des pins parasols beaucoup plus couvrant que celui du pin sylvestre (illustration 4).



Illustration 4.— *Illustrations de la confusion volumique en télédétection.* Source : M. Goudet.

Les différentes classes peuvent ainsi regrouper des peuplements vraiment différents. Inversement, des classes qui sur le diagramme bidimensionnel sont très proches peuvent être difficiles à retrouver en proximité sur le terrain. La forêt du Muy a par exemple permis de faire des relevés dans des classes qui n'existaient pas à quelques dizaines de kilomètres au nord du département sur Bauduen ou Villecroze (classes 3, 13, 19, 24, 25, 28, 34, 35, 36). Les limites des classes restent difficiles à établir de manière catégorique. Les peuplements méditerranéens sont très variés et si la radiométrie varie significativement entre résineux et feuillus, d'autres variations franches dans la catégorie végétale restent difficiles, en particulier pour des peuplements mélangés possédant un grand nombre d'espèces arborées et arbustives pour un même pixel. La simplification des classifications dans les aménagements rend difficile la validation des résultats. La classification sera portée au reste du département. Une enquête terrain sur cette zone pourrait rendre compte des résultats.

Nous connaissons désormais à quoi correspondent les cinq classes définies comme pouvant être discriminées en termes de peuplement, de sémantique et de densité permettant une éventuelle exploitation. Les peuplements mélangés restent la grande majorité des peuplements forestiers du Var. Ces classes renferment un potentiel de bois résineux important. Le cumul des classes résineux et mélanges représente potentiellement 113 000 hectares de peuplements résineux sur les 250 000 hectares représentés par l'image SPOT. Cela représente environ 45 % de la surface distribués entre les pins sylvestres au nord et les pins d'Alep, maritimes et parasols au sud de la boucle feuillue de Canjuers.

Les estimations en termes de densité ne peuvent pas être plus précises. Aux classes feuillus et résineux retenues sont associées des larges gammes de volumes. Il serait intéressant d'approfondir la connaissance de ces classes en précisant l'estimation de biomasse.

I. Relation entre indicateurs et indice

L'estimation de la biomasse peut se faire à partir de la relation entre le volume ou l'un de ses indicateurs et un indice de milieu (LELONG, 2008). Les dates des incendies qui ont eu lieu sur le département depuis 1958 traduisent un état phénologique des peuplements qui peut être directement mis en relation avec le volume. Cet indicateur a été mis en relation avec le RVI, indicateur de phytomasse aérienne, déjà mis en évidence sur la droite de végétation du diagramme bidimensionnel PIR et rouge.

$$\text{RVI} = (\text{CN bande PIR}) / (\text{CN bande rouge})$$

Le RVI traduit donc une quantité végétale. Ses valeurs sont d'autant plus grandes que la végétation présente une forte activité chlorophyllienne, indicateur d'un couvert végétal important.

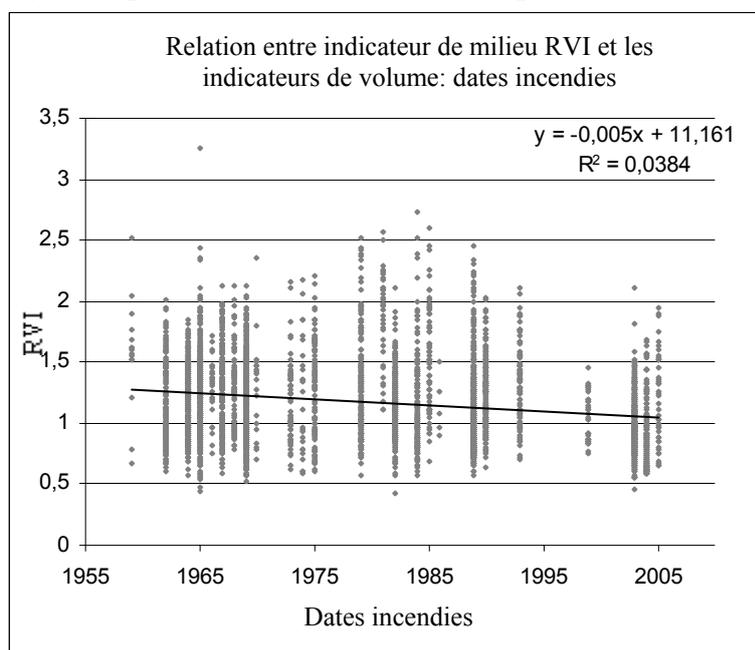


Figure 34.— *Relation entre l'indicateur de milieu RVI et les indicateurs de volume : les dates des incendies.*

De manière attendue, plus l'incendie est ancien et plus le RVI est grand (figure 34). Néanmoins, les résultats ne sont pas significatifs du tout ($R^2 = 0,038$). De plus, selon les types de peuplements, le mélange de matière sèche sur pied et de matière verte est différent et cela modifie la réflectance globale. C'est le cas de l'exemple précédemment évoqué concernant les peuplements de pin parasol (partie 5.II. illustration 4 page 57) : le port de cette essence est très couvrant, par imagerie optique, la quantité d'éléments chlorophylliens perçue sature vite alors qu'en termes de biomasse ligneuse, le volume peut continuer à croître. Également, la densité influence la réflectance globale puisque la part réfléchiée par les sols est plus importante en peuplements clairs. La réflectance moyenne n'est donc pas la même mais ne traduit pas forcément un volume sur pied moins important.

Les données optiques ne constituent pas un bon indicateur de biomasse. Les données radar dépendent des caractéristiques géométriques des cibles comme la taille ou la densité. Elles constitueraient un meilleur indicateur.

II. Image radar

Les données radar qui ont été mises à disposition sont de type ALOS bande L en HH et HV.

Le radar permet de créer des images de la surface en émettant des micro-ondes, longueurs d'ondes comprises entre 1 mm et 1 m. La rétrodiffusion dépend de la polarisation de l'onde incidente. Après s'être réfléchi, l'onde est dépolarisée, c'est-à-dire que l'onde de retour a deux composantes de polarisation horizontale et verticale. La polarisation d'un radar est caractérisée par celle de l'onde émise et par la composante mesurée au retour. Les deux appellations HH et HV signifient que le radar a émis une onde polarisée horizontalement (HX) et a mesuré la composante horizontale (HH) et verticale (HV) de l'onde reçue.

Le coefficient de rétrodiffusion dépend à la fois des caractéristiques de l'onde incidente (longueur d'onde, angle d'incidence, polarisation) et des caractéristiques du terrain. Il existe des corrélations entre les mesures radar à basse fréquence comme la bande L et les paramètres liés à la biomasse comme la hauteur, la surface terrière, le diamètre, l'âge des arbres ou le volume. Il est donc possible de chercher à établir un lien entre les paramètres diélectriques et géométriques du couvert végétal et le signal radar rétrodiffusé (POLIDORI, 1997).

Comme en optique, la résolution a son importance. Les surfaces naturelles comme les forêts sont des cibles composées de nombreux diffuseurs présents dans la cellule de résolution. Le champ électrique résultant est donné par la somme des champs élémentaires des diffuseurs présents dans cette cellule.

Les données ont été extraites en créant des AOI dans les zones connues. Elles sont issues des relevés de terrain qui donnent des estimations des volumes, des densités, des diamètres, des hauteurs et des surfaces terrières. Pour pallier le problème de bruit très important en imagerie radar, les segments ont en moyenne une taille de 10 pixels par 10 pixels.

Le traitement des données calibrées met en relation les valeurs de coefficient de rétrodiffusion et les estimateurs de biomasse des peuplements. L'observation de la même variable que précédemment (l'âge déduit des aires incendiées sur le département depuis 1958) montre une courbe croissante dans un premier temps puis une saturation (figure 35).

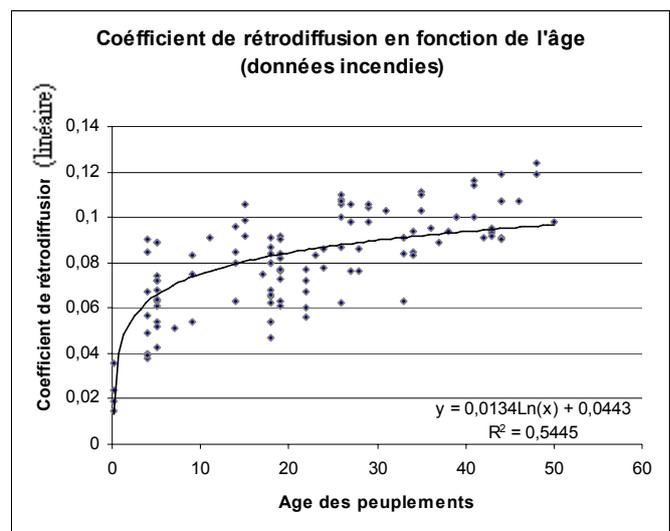


Figure 35.— Relation entre les coefficients de rétrodiffusion et les âges des peuplements extraits des données incendies.

Les résultats montrent des écarts-types très importants. Un coefficient de 0,08 peut correspondre à presque tous les âges. Plusieurs causes peuvent être à l'origine de ces résultats.

Il n'y a pas d'information sur le type de peuplement qui a été incendié ni sur celui qui repousse. La surface végétale incendiée peut avoir appartenu à une occupation du sol de type maquis et garrigues. Le volume en repousse est dans ce cas très différent de celui d'un peuplement forestier. Également, si le peuplement d'origine est de type feuillu ou résineux le volume au même âge n'est pas du tout le même et donc le coefficient de rétrodiffusion est sensiblement différent.

L'observation des résultats obtenus avec les relevés de terrain qui garantissent une occupation du sol de type forestier montre que les écarts-types restent grands. Deux peuplements de même âge ne sont pas forcément soumis aux mêmes contraintes environnementales qui peuvent être très limitantes en climat méditerranéen. Les données prennent en compte des types de peuplements de même âge de type landes boisées et de type peuplements résineux, plus dense. Or, le coefficient de rétrodiffusion est plus influencé par le sol dans un peuplement clair. Les valeurs de coefficient de rétrodiffusion sont en effet différentes en fonction de la densité (figure 36). La donnée âge n'est donc pas toujours représentative d'un volume surtout dans la région. Ce phénomène est le même pour les données diamètre ou hauteur. Ce n'est pas le cas en revanche pour les données volumes. Ainsi, seules ces données constituent des bons indicateurs de biomasse. Pour pallier le problème de volumes différents selon la catégorie d'essence, seuls les peuplements résineux, intérêt de l'étude, sont pris en considération.

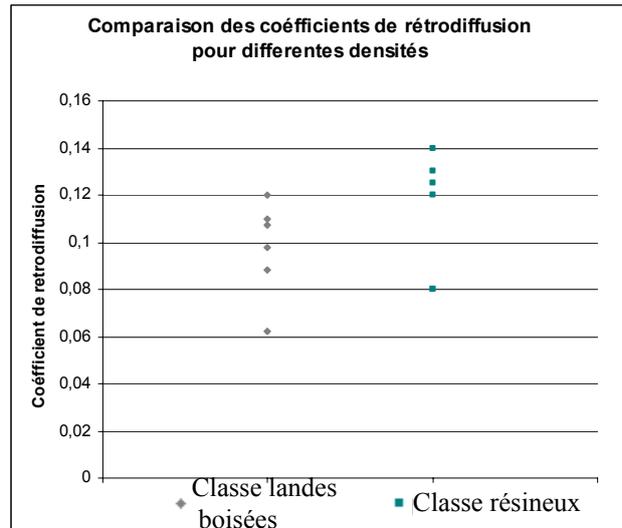


Figure 36.— Effet de la densité des peuplements sur les valeurs de coefficients de rétrodiffusion.

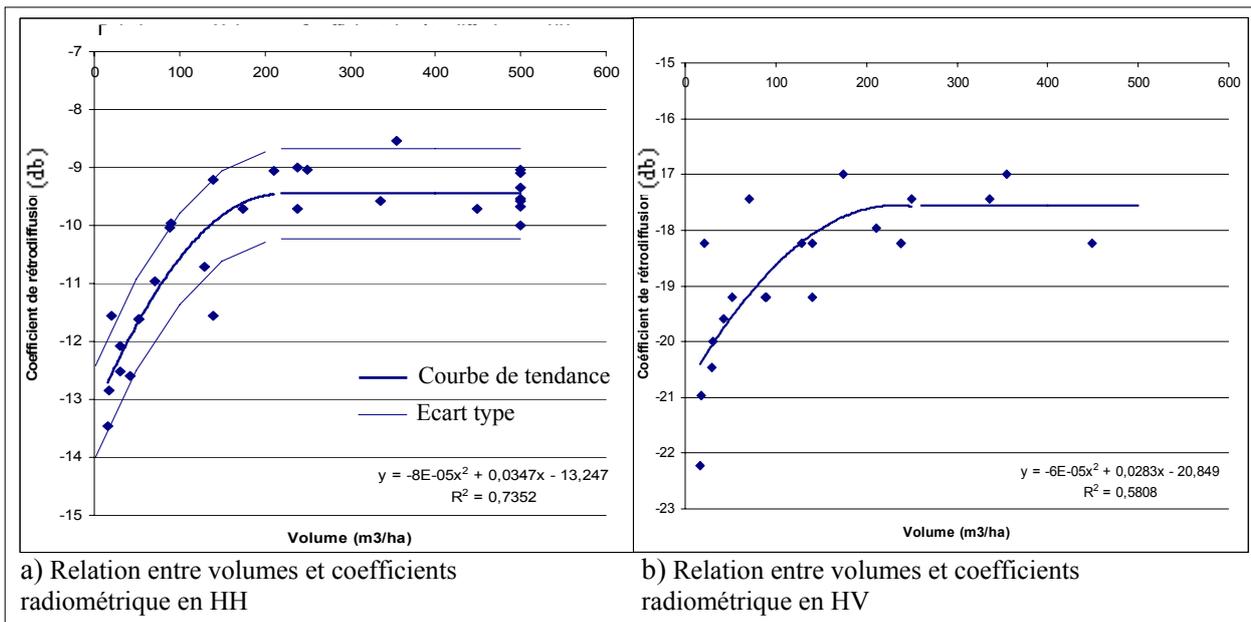


Figure 37.— Relation entre coefficients de rétrodiffusion en HH et HV et volumes forestiers.

Les résultats montrent une relation significative entre les deux variables, en particulier pour les données radar HH (figure 37). La corrélation binomiale est croissante jusqu'à 200 m³/ha puis il y a saturation. Les données concernant les peuplement adultes étant insuffisants, des données supplémentaires ont été estimées pour calculer l'écart-type dans la zone de saturation. Ces données ont été extraites à partir des peuplements identifiés comme résineux en optique, n'appartenant pas aux zones incendiées sur la période 1958-2005, c'est-à-dire âgés d'au moins 50 ans. Les volumes n'étant pas disponible, ils ont tous été figés à 500 m³/ha.

L'écart type montre que jusqu'à la saturation, l'estimation des volumes peut se faire à plus ou moins 50 m³/ha. Une variabilité autour des valeurs observées de biomasses persiste donc. Au-delà de

la variable volume observée, les caractéristiques du terrain influencent le coefficient de rétrodiffusion. En plus de la géométrie des objets, il dépend de l'humidité, de la rugosité et de l'orientation des éléments (BEAUDOIN, 1992). En zone de saturation, les peuplements peuvent être assimilés à des volumes d'au moins 150 m³/ha.

L'inversion de l'équation sur l'image permet d'identifier géographiquement les estimations de biomasse des peuplements sur le département. Elle a été appliquée aux peuplements mélangés, résineux et landes boisées.

Les résultats montrent que 21 000 hectares correspondent à des peuplements possédant entre 0 et 50 m³/ha, 30 000 hectares entre 50 et 100 m³/ha, 33 000 hectares entre 100 et 200 m³/ha et 50 000 hectares avec plus de 150 m³/ha de bois (ANNEXE 21).

Des points de contrôle issus des relevés de terrain ont été testés. Sur 33 points, seuls 18 points ont été correctement classés (tableau 13) soit environ 55 %.

Volume	163	250	304	158	189	250
Classe	au moins 150	au moins 150	au moins 150	100-200	au moins 150	au moins 150
Volume	129	265	201	343	185	54
Classe	100-200	au moins 150	au moins 150	au moins 150	au moins 150	50-100
Volume	67	171	43	56	497	Epars
Classe	50-100	100-200	0-50	50-100	au moins 150	0-50

a) Points de contrôle ayant correctement été classés

Volume	115	91	132	110	115
Classe	au moins 150	100-200	au moins 150	50-100	50-100
Volume	46	122	88	112	119
Classe	50-100	50-100	100-200	50-100	50-100
Volume	211	41	140	57	90
Classe	100-200	50-100	au moins 150	0-50	100-200

b) Points de contrôle n'ayant pas correctement été classés

Tableau 13. — Volumes de 33 points de contrôle et classes leur correspondantes d'après les données radar.

Les points ayant mal été classés (tableau 13b) correspondent à des volumes qui sont en limite de classe (ils sont souvent éloignés de 10 ou 15 % des bornes de classe). Les biais observés sont liés à la rétrodiffusion par interactions multiples. Contrairement à la rétrodiffusion directe, celui-ci parasite les résultats (figure 38). Les peuplements méditerranéens sont, comme rappelé précédemment, en majorité mélangés. Ils possèdent une grande variabilité en termes d'essences et de sous-étage et dans des proportions très variables. Si les résultats en forêt landaise (BEAUDOIN, 1992) s'appuient sur des peuplements très homogènes et monos-spécifiques, l'hétérogénéité méditerranéenne offre des résultats plus variables. Le comportement des ondes dans ce type de peuplement est beaucoup plus complexes.

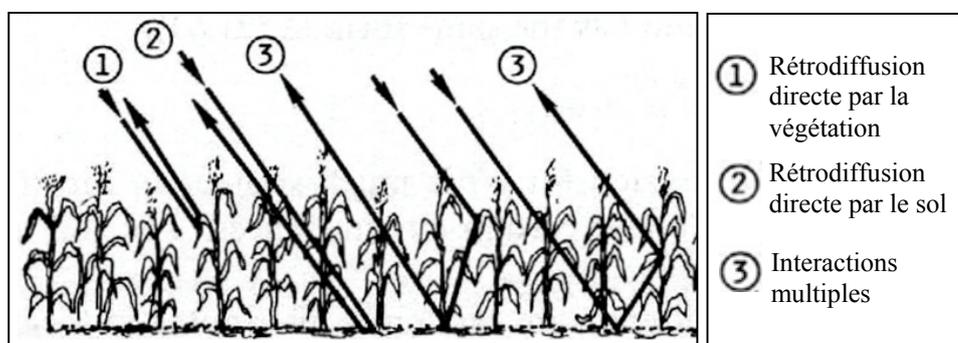


Figure 38. — Rétrodiffusions directes et interactions multiples. Source : PRÉVOT, 2008.

Ce phénomène est d'autant plus remarquable dans les sous-bois très importants. Seuls les objets dont la taille typique est de l'ordre de grandeur de la longueur d'onde sont visibles (POLIDORI, 1997). Cette taille correspond à 26 cm pour la bande L. Cela signifie que les plus petites branches ne sont pas visibles mais que les branches de sous-bois le sont et parasitent les résultats. Les trois classes de volumes supérieur à 50 m³/ha sont réparties entre les peuplements résineux et mélangés. Ainsi, et en particulier pour les peuplements mélangés, une part du volume total peut être issue d'un taillis en sous-étage.

Il serait intéressant de tester l'analyse sur des ondes plus grandes comme par exemple l'UHF de 0,3 à 1 m pour constater des différences. Peut être permettraient-elles d'estimer des diamètres plus important, comme les troncs, et de s'affranchir des branches.

Enfin, les images radar enregistrent de nombreuses distorsions (*cross-talk*, *speckle*, distorsions dans les zones de relief, déséquilibres entre canaux...). Il serait intéressant de les étudier afin de les corriger. Étalonner les données contre ces éventuelles contaminations pourrait peut-être améliorer les résultats.

Même si l'estimation des volumes n'est pas localement de bonne qualité, elle permet tout de même de rendre compte géographiquement des sources plus ou moins productives à l'échelle du département. Cette première approche permet de visualiser où se situent préférentiellement les zones de fort approvisionnement potentiel. Elles se trouvent dans les pins sylvestres du Nord-Est du département, au nord à proximité de Aups, Lorgues et à l'est de Seillons-Sources-d'Argens.

CONCLUSION

Les résultats obtenus par télédétection fournissent une estimation de l'occupation du sol. Même si la méthode est très efficace en termes de traitement de surface, de nombreux aléas influencent les résultats. L'information est parfois inaccessible en certains points de l'image. Si une ombre couvre des peuplements sur l'image, l'information concernant ces peuplement sera inévitablement biaisée. Il est important de se rappeler qu'une analyse par télédétection d'une surface forestière ne remplace pas des relevés de terrain en termes de précision. Cela dit, la télédétection offre la possibilité de traiter de grandes surfaces très rapidement. Un travail sur de petites surfaces ne serait d'ailleurs pas significatif ni exploitable. La télédétection permet en particulier d'accéder à des informations sur des zones dépourvues de plans d'aménagement. Cette méthode permet donc de conserver une cohérence à l'échelle globale, à l'échelle des massifs et non administrative. La télédétection est une technique très utile pour les projets de grande échelle. C'est pourquoi cette méthode reste une bonne solution pour une étude concernant la mise en place d'une nouvelle filière forestière comme le bois énergie. Cela demande une connaissance globale du territoire et non une connaissance précise comme il est demandé dans les aménagements. Même si très localement, la télédétection pourrait être discréditée, il faut la comparer aux autres méthodes existantes. Aucune campagne de relevés de terrain ne pourrait s'effectuer à l'échelle demandée. Les données IFN donnent de moins bons résultats. Notons également qu'il existe de nombreuses images satellitales et que si les images utilisées pour cette étude ont une résolution de 10 mètres, il en existe d'autres dont la résolution est plus fine (QuickBird par exemple).

La télédétection répond tout à fait à des problématique d'appréciation globale du territoire. La précision des résultats obtenus suffit à motiver le lancement d'une filière dépendante de la ressource en bois. L'étape suivante qui consiste à délimiter dans la précision la ressource vers laquelle les investisseurs vont pouvoir se fournir demande une approche différente. La télédétection peut constituer un travail préalable sur l'ensemble de la mise en œuvre de la nouvelle filière. Elle permet de fournir les informations préliminaires nécessaires pour développer des projets. Elle offre une première approche dans la répartition des peuplements résineux. Les résultats permettent de stratifier l'espace en zones plus ou moins homogènes et de repérer les zones propices où d'éventuels points de contrôle et de validation peuvent être réalisés.

La méthodologie retenue pour estimer la ressource se base sur une connaissance du territoire. Cet avantage permet d'être pleinement conscient des limites de la classification et d'appréhender la perception de la ressource en conséquence. La connaissance terrain permet de reconnaître les caractéristiques des différents peuplements. Si la classification parallélépipédique permet de segmenter et d'isoler différentes classes, le terrain permet de les identifier. C'est particulièrement important pour la classe mélanges qui se distingue des autres classes par classification mais dont les caractéristiques sont très complexes. Si cette classe correspond à un ensemble très varié de types de peuplement, seule une reconnaissance terrain permet d'en rendre compte. C'est donc la combinaison d'une analyse rapide, de grande échelle, permettant de définir le nombre de classes pouvant être discriminées et d'une analyse terrain permettant la reconnaissance et l'identification de ces classes qui offre la meilleure estimation de la ressource.

Sur le tiers nord du département, cette méthodologie définit cinq classes distinctes : feuillus, résineux, mélanges, landes boisées et maquis, garrigues. Deux d'entre elles sont concernées par l'exploitation forestière pour le bois énergie : les classes résineux et mélanges. Elles représentent une surface de 113 000 hectares dont plus de 40 % contient au moins 150 m³/ha. Il y a donc un réel potentiel bois permettant de motiver des investisseurs de la filière bois énergie. Ce constat reste à être validé sur l'ensemble du département par l'analyse complète du territoire à partir des images SPOT manquantes.

- BARTALEV S., DESHAYES M., DURRIEU S. et STACH N., 30 décembre 1996. *Intérêt des données SPOT 4/MIR pour l'inventaire et le suivi des forêts russes* – LTC (laboratoire commun de télédétection) CEMAGREF-ENGREF, département Gestion des Territoires – convention CNES 95/CNES/0370, rapport final – 55p.
- BEAUDOIN A. 28 octobre 1992. *Observation de la terre par radar imageur: estimation de la biomasse forestière*. – Thèse présentée devant l'université Paul Sabatier de Toulouse (sciences) pour l'obtention du diplôme de doctorat de l'université Paul Sabatier, spécialité : télédétection radar des surfaces terrestres – Préparée au Centre d'Étude Spatiale des Rayonnements, 9 avenue Colonel Roche, B.P.4346, 31029 Toulouse. – 172p.
- BOUREAU J. G., 2000. *Utilisation de données très haute résolution de SPOT-5 pour caractériser la texture forestière - Application aux besoins de l'inventaire forestier national*. - inventaire forestier national - Cellule Evaluation de la Ressource / Télédétection. 51p.
- BOUROCHE J.M. et SAPORTA G., février 2007. *Que sais-je, l'analyse des données* – Presses universitaires de France, 1980, 6 avenue Reille 75 014 Paris, PUF huitième édition – 127p.
- DEFINIENS, 2007. *Application User Guide*. – Tutoriel e-cognition Publication Definiens AG Trappentreustr. 1 D-80339 München Germany – 166p.
- DEFINIENS, 2007. *Definiens Data Management, Definiens Enterprise Image Intelligence Suite 7, User guide* – Tutoriel e-cognition Publication Definiens AG Trappentreustr. 1 D-80339 München Germany – 36p.
- DEFINIENS, 2007. *Definiens Developer 7, User guide* – Tutoriel e-cognition Publication Definiens AG Trappentreustr. 1 D-80339 München Germany – 482p.
- DELENNE C., 24 novembre 2006. *Extraction et caractérisation De Vignes à Partir de Données de Télédétection à Très Haute Résolution Spatiale Application en Languedoc-Roussillon pour la Constitution de Bases de Données Géographiques* – Thèse spécialité : Sciences de l'environnement mention télédétection, thèse préparée à l'UMR TETIS - Cemagref/CIRAD/ENGREF - Maison de la Télédétection, Montpellier. – 172p.
- Del POTRO E.. *Évaluation des méthodes de correction des effets de la topographie dans le cadre du projet METIS-forêts*. 39p.
- DESHAYES M., 2008. *Caractéristiques spectrales des principaux composants de la surface terrestre* – UMR TETIS CEMAGREF-CIRAD-ENGREF – Cours pour Mastère SILAT, module « Télédétection : principes de base ». 31 diapositives.
- DEVINEAU J. L., *Propriétés spectrales de la végétation*. Cartographie des états de surface (SATCARTO). 7 p. http://horizon.documentation.ird.fr/exl-doc/pleins_textes/pleins_textes_4/colloques/30003.pdf
- DURRIEU S., 3 mars 2008. *Précision et validation des classifications en télédétection*. UMR TETIS CEMAGREF-CIRAD-ENGREF – Cours pour Mastère SILAT, module « Extraction de l'information à partir des données de télédétection ». 39 diapositives.
- EL HAJJ.M., février 2008. *Pré-traitements radiométriques*. . – UMR TETIS CEMAGREF-CIRAD-ENGREF – Cours pour Mastère SILAT, module « Télédétection : principes de base ». 48 diapositives.
- GIRARD, C.M., GIRARD, M.C. - 1975. *Applications de la télédétection à l'étude de la biosphère*. Masson, Paris, Sciences Agronomiques, 186 p.
- GIRARD M.C. et GIRARD C., 1999. *Traitement des données de télédétection*. – DUNOD, Paris. – Technique et ingénierie, série environnement. 529p.
- HAME.T., TOMPO.F., PARMES.E. – 1987. *Stand based forest inventory from SPOT image*. Technical research centre of Finland, SPOT1: Utilisation des images, bilan, resultants, colloque international Paris, novembre 1987. 7p.
- LABBÉ. S., 2008. *Résolutions spatiales, spectrales et temporelles*. –UMR TETIS CEMAGREF-CIRAD-ENGREF – Cours pour Mastère SILAT, module « Télédétection : principes de base ». 47 diapositives

- LELONG.C., 22 février 2008. *Extraction de l'information en télédétection : introduction-Principes de l'extraction de l'information en télédétection*. UMR TETIS CEMAGREF-CIRAD-ENGREF – Cours pour Mastère SILAT, module « Extraction de l'information à partir des données de télédétection ». 15 diapositives.
- LELONG.C., 22 février 2008. *Extraction de l'information en télédétection : les méthodes de classification*. – UMR TETIS CEMAGREF-CIRAD-ENGREF – Cours pour Mastère SILAT, module « Extraction de l'information à partir des données de télédétection ». 66 diapositives.
- LELONG.C., 26 février 2008. *Extraction de l'information en télédétection : les indices de végétation et leurs relations avec les propriétés de surface*. . UMR TETIS CEMAGREF-CIRAD-ENGREF – Cours pour Mastère SILAT, module « Extraction de l'information à partir des données de télédétection ». 15 diapositives.
- LELONG.C., 28 février 2008. *Extraction de l'information en télédétection : l'analyse de texture*. – UMR TETIS CEMAGREF-CIRAD-ENGREF – Cours pour Mastère SILAT, module « Extraction de l'information à partir des données de télédétection ». 60 diapositives.
- LELONG C. et MOUGEL B., 2008. *Extraction de l'information en télédétection : les méthodes de segmentation*. – UMR TETIS CEMAGREF-CIRAD-ENGREF – Cours pour Mastère SILAT, module « Extraction de l'information à partir des données de télédétection ». 37 diapositives.
- ONF Var, CRPF Var et Coopérative Provence Forêt. 01 Juin 2005. *Étude ressource bois énergie dans la Provence Verte réalisée dans le cadre de l'étude de faisabilité technico-économique pour l'installation de chaufferie-bois et la mise en place d'une filière bois énergie en Provence Verte* – 47p.
- PEETERS J, 2006. Situation et perspectives d'évolution du bûcheronnage mécanisé en région Provence Alpes Côte d'Azur (MECALEP). AFOCEL. 92 pages
- POLIDORI L, 1997. Cartographie radar – Gordon and breach science publishers – Amsteldijk, 1st floor 1079 LH Amsterdam, Pays-Bas – 287p.
- PRÉVOT.L., février 2007. *Estimation de caractéristiques de couverts végétaux par télédétection radar : modelisation et inversion*. INRA-UMR LISAH – Cours pour Mastère SILAT, module « Télédétection : principes de base ». 22 diapositives.
- PRÉVOT.L., février 2008. *Les mesures de télédétection dans le domaine radar (hyperfréquences actives)*. INRA-UMR LISAH – Cours pour Mastère SILAT, module « Télédétection : principes de base ». 55 diapositives.
- VALEIX.J., 2007. *Mobiliser plus de bois en forêt publique tout en préservant mieux la biodiversité, composante "mobiliser plus de bois"*. Paris, Document de travail actualisé suite au Codir plénier du 8 novembre 2007 et à la réunion des directeurs Forêts des DT du 27 novembre 2007. 4 p.

CONTACTS

BAGHDADI Nicolas Directeur de recherche
UMR TETIS CEMAGREF-CIRAD-ENGREF
Maison de la télédétection
500 rue Jean-François Breton
34 093 Montpellier Cedex 05
04.67.54.87.24
n.baghdadi@brgm.fr

BONNIN Olivier Chef de projet spécialiste aménagements RBE suppléant
ONF
101 Chemin de San Peyre
83 220 Le Pradet
04.98.01.32.56
Olivier.bonnin@onf.fr

BAILLY Jean-Stephane Enseignant chercheur ENGREF-AgroParisTech
UMR TETIS CEMAGREF-CIRAD-ENGREF
Maison de la télédétection
500 rue Jean-François Breton
34 093 Montpellier Cedex 05
04.67.54.87.20
bailliy@teledetection.fr

CABANNES Bernard Ingénieur CRPF PACA
Maison de la forêt ZI Les Lauves
83 340 Le Luc
04.94.50.11.54
Bernard.cabannes@crpf.fr

CORTI Jean-Marc Technicien CRPF
Maison de la forêt ZI Les Lauves
83 340 Le Luc
06.73.48.22.35
Jean-marc.corti@crpf.fr

DESHAYES Michel Chercheur
UMR TETIS CEMAGREF-CIRAD-ENGREF
Maison de la télédétection
500 rue Jean-François Breton
34 093 Montpellier Cedex 05
04.67.54.87.51
michel@teledetection.fr

DREUX Roger Chef d'UT les Maures
4935 route du Dom
83230 Bormes-les Mimosas
04.94.71.06.07
Roger.dreux@onf.fr

DUPUIS Stéphane Assistant ingénieur en géomatique
 UMR TETIS CEMAGREF-CIRAD-ENGREF
 Maison de la télédétection
 500 rue Jean-François Breton
 34 093 Montpellier Cedex 05
 04.67.54.87.27
stephane.dupuy@teledetection.fr

DURRIEU Sylvie Ingénieur
 UMR TETIS CEMAGREF-CIRAD-ENGREF
 Maison de la télédétection
 500 rue Jean-François Breton
 34 093 Montpellier Cedex 05
 04.67.54.87.32
sylvie@teledetection.fr

EL HAJJ Mamoud Doctorant
 UMR TETIS CEMAGREF-CIRAD-ENGREF
 Maison de la télédétection
 500 rue Jean-François Breton
 34 093 Montpellier Cedex 05
 04.67.54.87.44
elhajj@teledetection.fr

FAURE Thierry UT Haut-Var Verdon, Technicien Canjuers
 Antenne Forestière de Canjuers
 83998 Canjuers
 04.94.39.24.69
thierry.faure@onf.fr

LABADIE Jean Conseil Général du Var
 DRTPF (délégation des routes, transport, port, forêt), direction du
 génie forestier, sous-direction prospective, service recherche et
 développement
 77 impasse Lavoisier
 OMEGA
 83 160 La Valette du Var
 06.03.84.21.34
jlabadie@cg83.fr

LABBE Sylvain Directeur adjoint UMR3S TETIS
 UMR TETIS CEMAGREF-CIRAD-ENGREF
 Maison de la télédétection
 500 rue Jean-François Breton
 34 093 Montpellier Cedex 05
 04.67.54.87.47
sylvain.labbe@teledetection.fr

LADIER Jean Chargé de développement technique
 Pôle Recherche en Sylviculture et Environnement
 ZI Saint Joseph Immeuble Acti +
 04 100 Manosque
 04.92.70.48.00
jean.ladier@onf.fr

LELONGE Camille Chercheur
 UMR TETIS CEMAGREF-CIRAD-ENGREF
 Maison de la télédétection
 500 rue Jean-François Breton
 34 093 Montpellier Cedex 05
 04.67.54.87.37
lelong@teledetection.fr

LEROY Guy Chef de projet spécialiste SIG, Correspondant DSF
 ONF
 101 Chemin de San Peyre
 83 220 Le Pradet
 04.98.01.32.64
guy.leroy@onf.fr

LE TOAN Thuy Ingénieur de recherche
 CESBIO, 18 avenue. Edouard Belin,
 31401 Toulouse cedex 9
 05 61 55 66 71
Thuy.Letoan@cesbio.cnes.fr

LONG Marlène Chargé de mission SIG
 Pôle Recherche en Sylviculture et Environnement
 ZI Saint Joseph Immeuble Acti +
 04 100 Manosque
 04.42.17.57.50
marlene.long@onf.fr

LO SEEN Danny UMR TETIS CEMAGREF-CIRAD-ENGREF
 Maison de la télédétection
 500 rue Jean-François Breton
 34 093 Montpellier Cedex 05
 04.67.54.87.34
loseen@teledetection.fr

OLBETZ Bertrand UT Dracénie, triage de Vidauban
 17 Les Grenaches
 Quartier Lambrède
 83 550 Vidauban
 04.94.73.17.37
Bertrand.olbetz@onf.fr

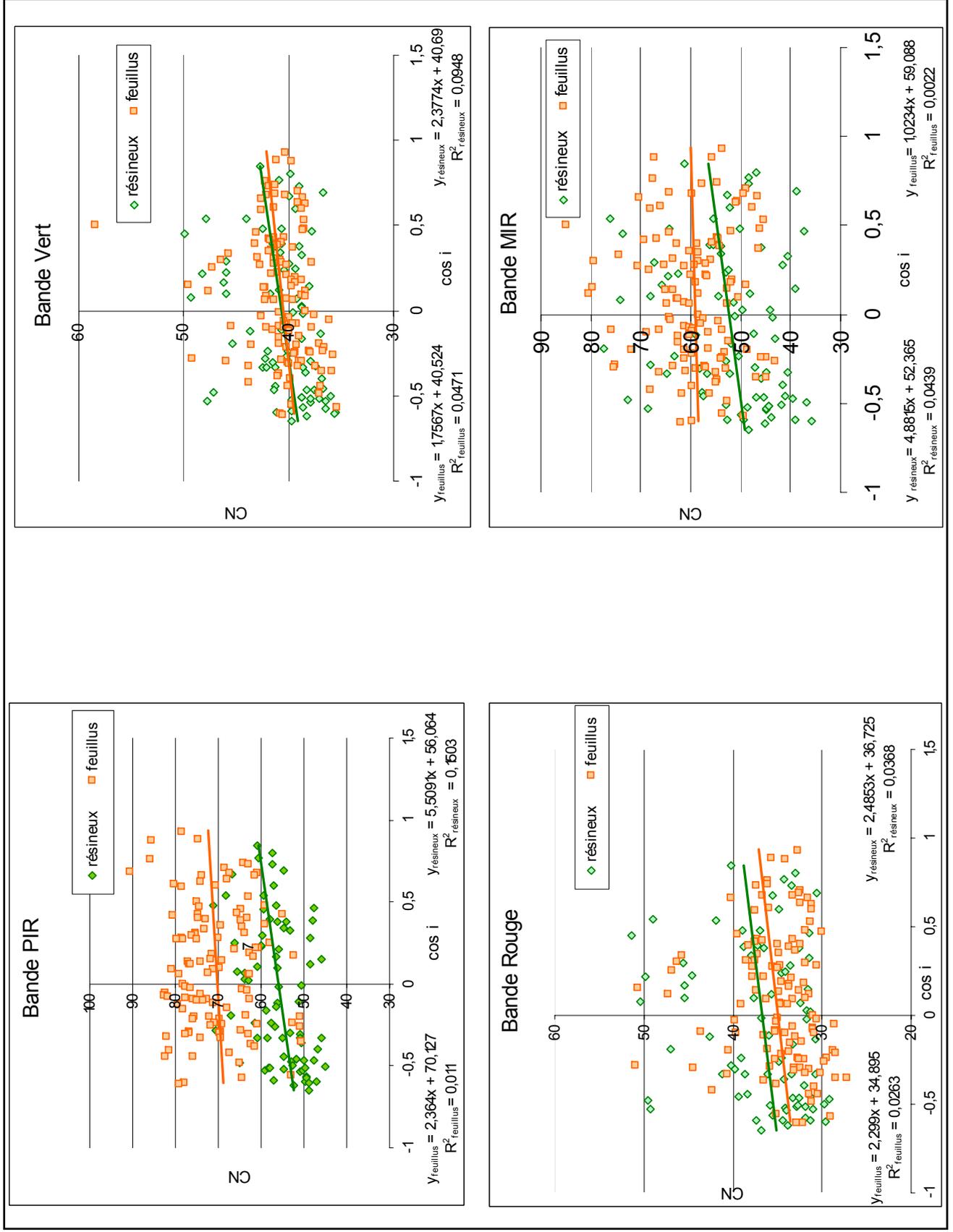
PUECH Christian Chercheur
 UMR TETIS CEMAGREF-CIRAD-ENGREF
 Maison de la télédétection
 500 rue Jean-François Breton
 34 093 Montpellier Cedex 05
 04 67 54 87 45
puech@teledetection.fr

RIVIERE Christian UT Crand Toulon, triage du Pradet
 80 rue Joseph Lantrua
 83500 La Seyne-sur-Mer
 04.94.08.02.87
christian.riviere@onf.fr

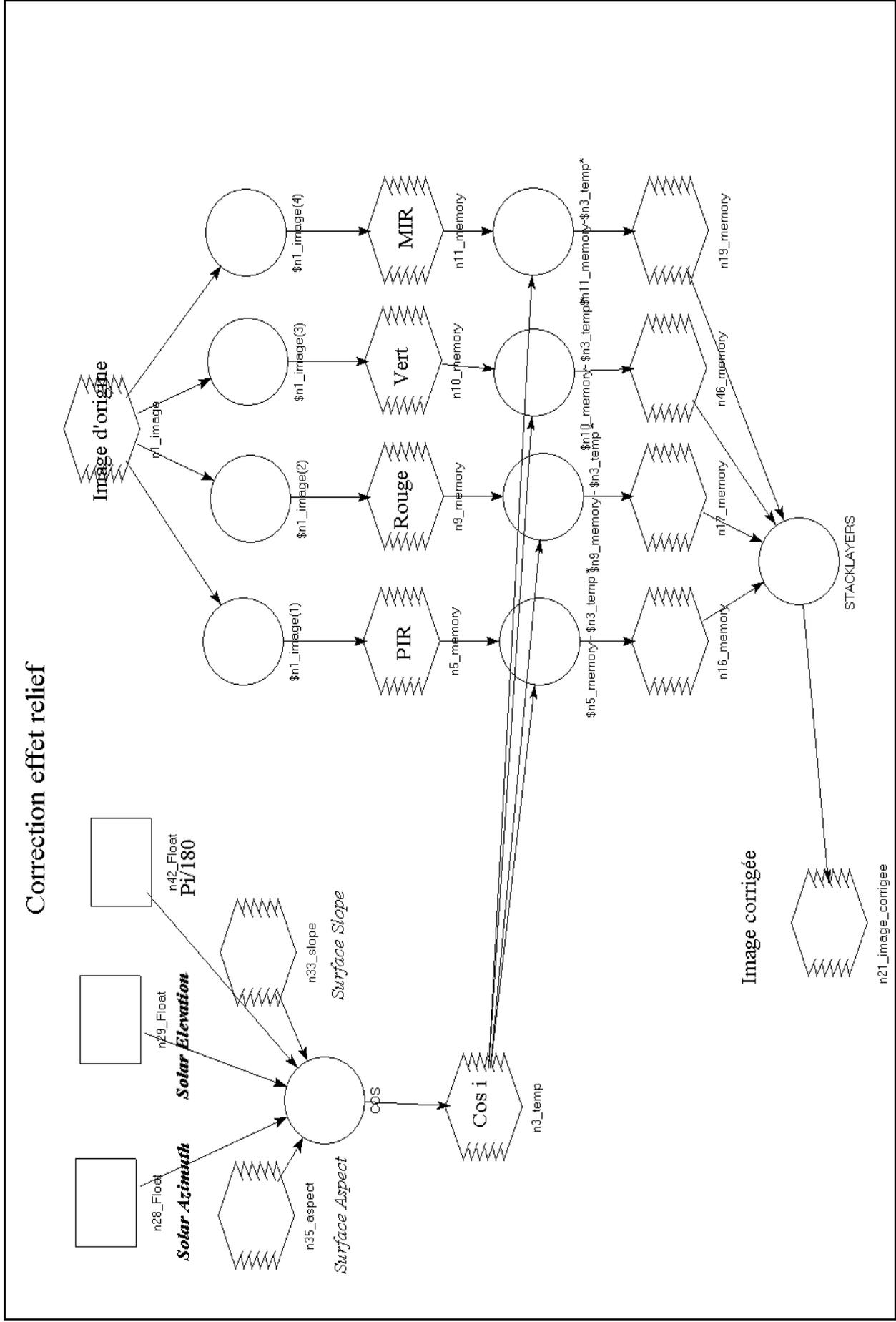
SANTELLI Jean	Responsable projets complexes/Aménagements ONF 101 Chemin de San Peyre 83 220 Le Pradet 04.98.91.16.88 jean.santelli@onf.fr
SCHMITT Rémy	UT Maures, triage de la Citadelle M.F. de la Citadelle 83230 Bormes-les-Mimosas 04.94.71.27.77 Remy.schmitt@onf.fr
TANASE Mihai	Doctorant CESBIO, 18 avenue. Edouard Belin, 31401 Toulouse cedex 9 05.61.55.85.31 Mihai.Tanase@tma.ro
TANCHAUD Fabienne	Chargé de mission filière bois Conseil Général du Var DRTPF (délégation des routes, transport, port, forêt), direction du génie forestier, sous-direction prospective,service recherche et developpement 77 impasse Lavoisier OMEGA 83 160 La Valette du Var 06.18.72.15.67 ftan chaud@cg83.fr
VEGA Cédric	Lidar forêt UMR TETIS CEMAGREF-CIRAD-ENGREF Maison de la télédétection 500 rue Jean-François Breton 34 093 Montpellier Cedex 05 cedric.vega@teledetection.fr

ANNEXES

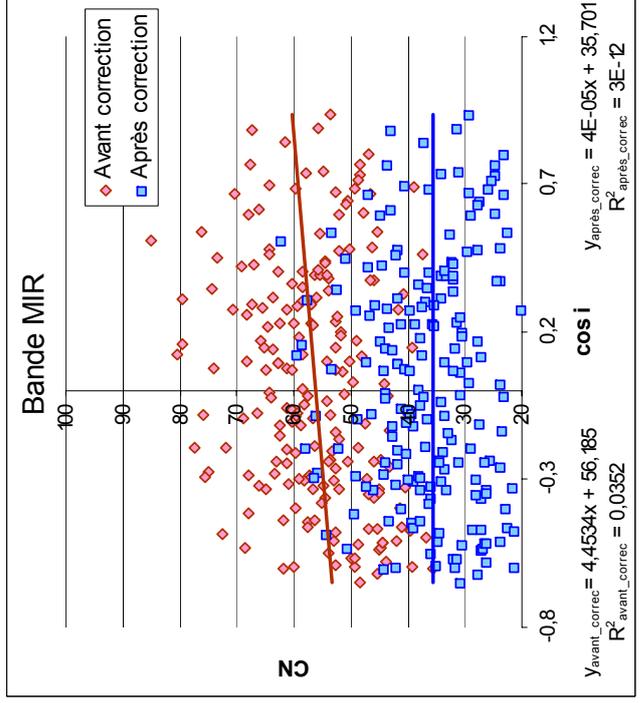
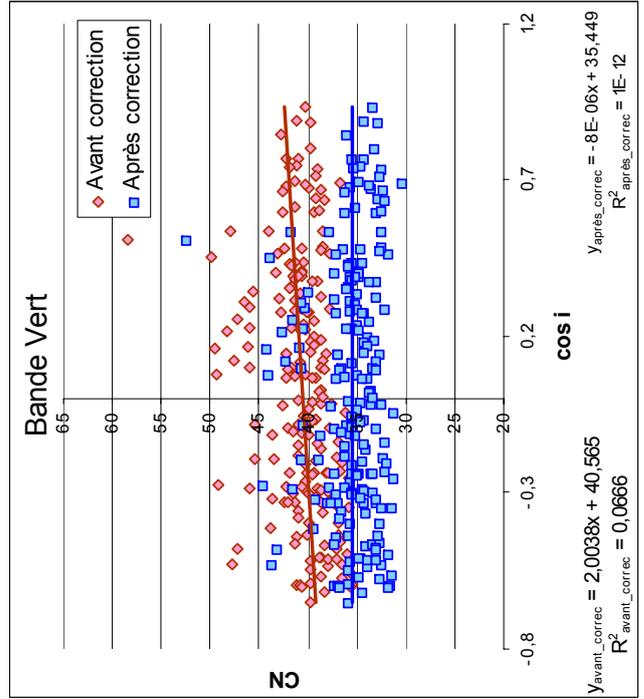
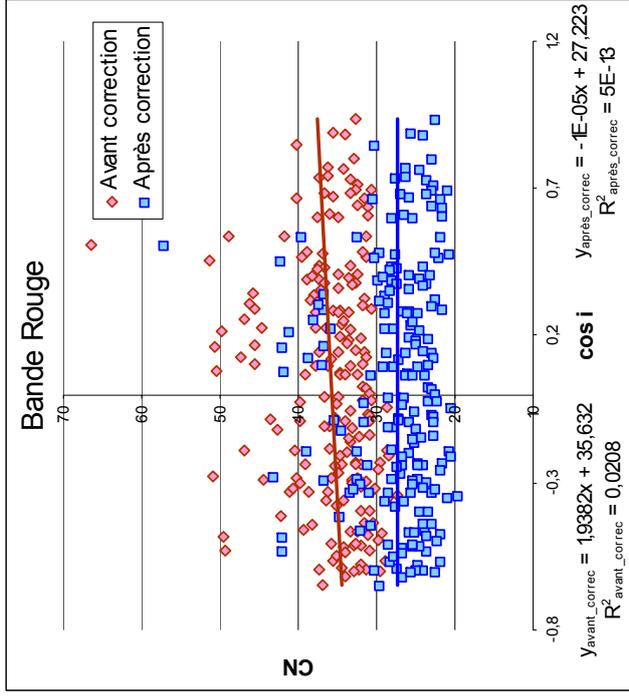
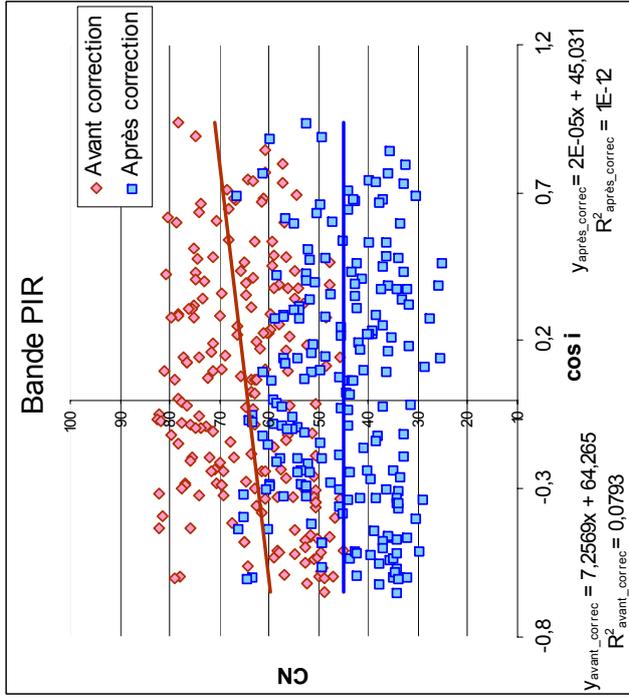
ANNEXE 1 : Graphique mettant en évidence la relation de dépendance entre le cosinus de l'angle incident et les valeurs de comptes numériques



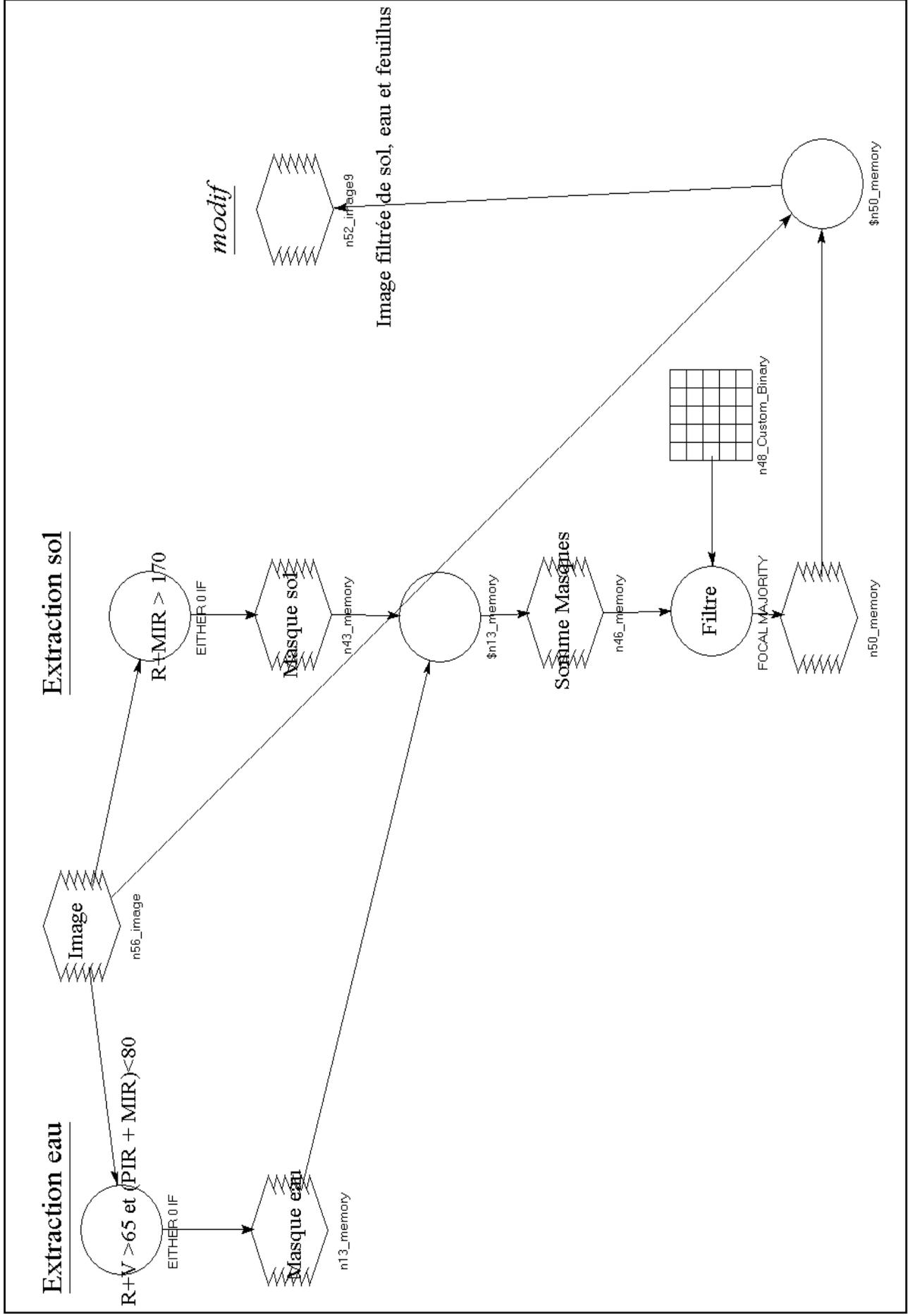
ANNEXE 2 : Modèle créé sur Erdas-Imagine effectuant la correction topographique sur photo satellite



ANNEXE 3 : Graphiques mettant en relation le $\cos i$ et les comptes numériques de l'image test avant et après correction topographique

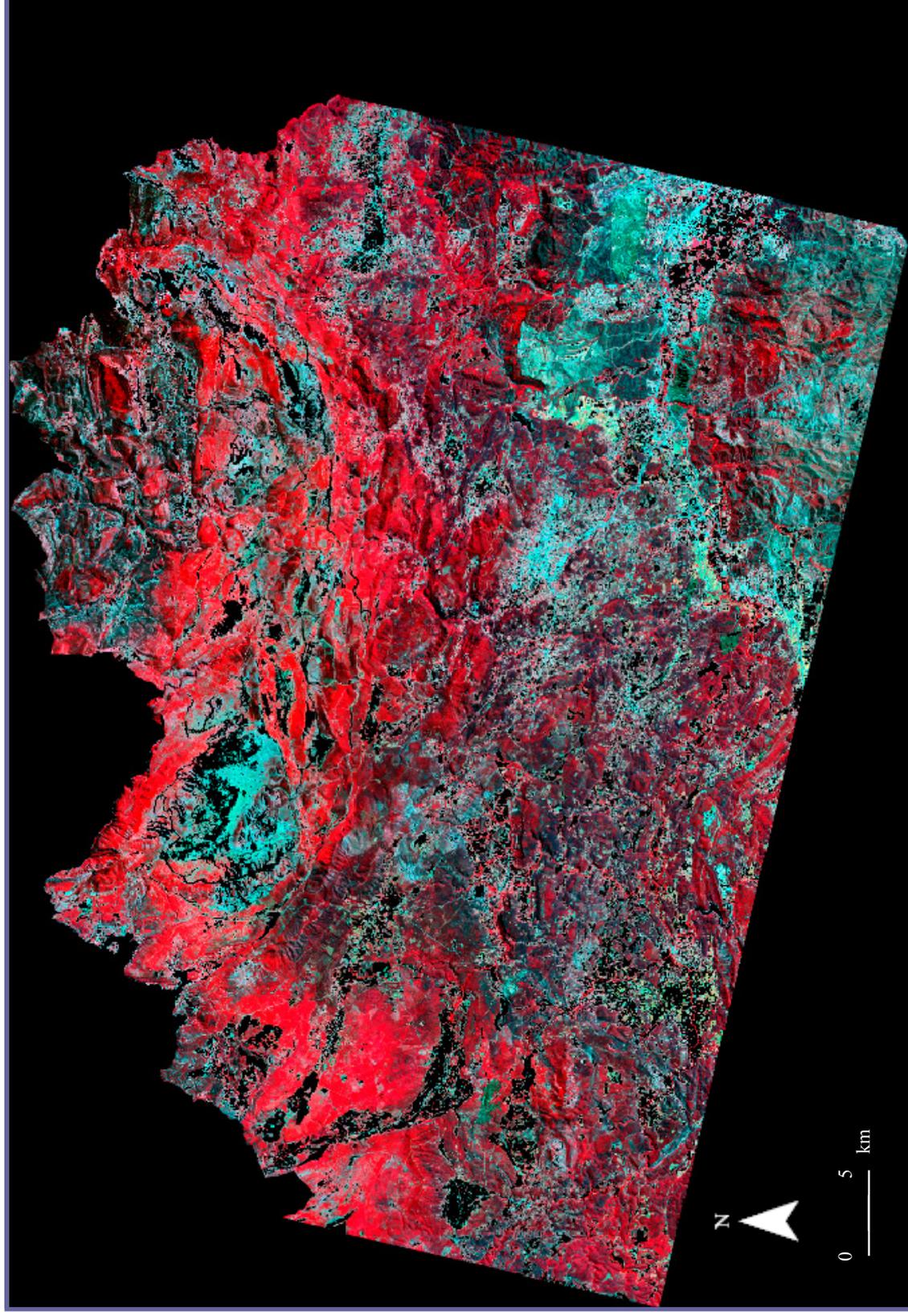


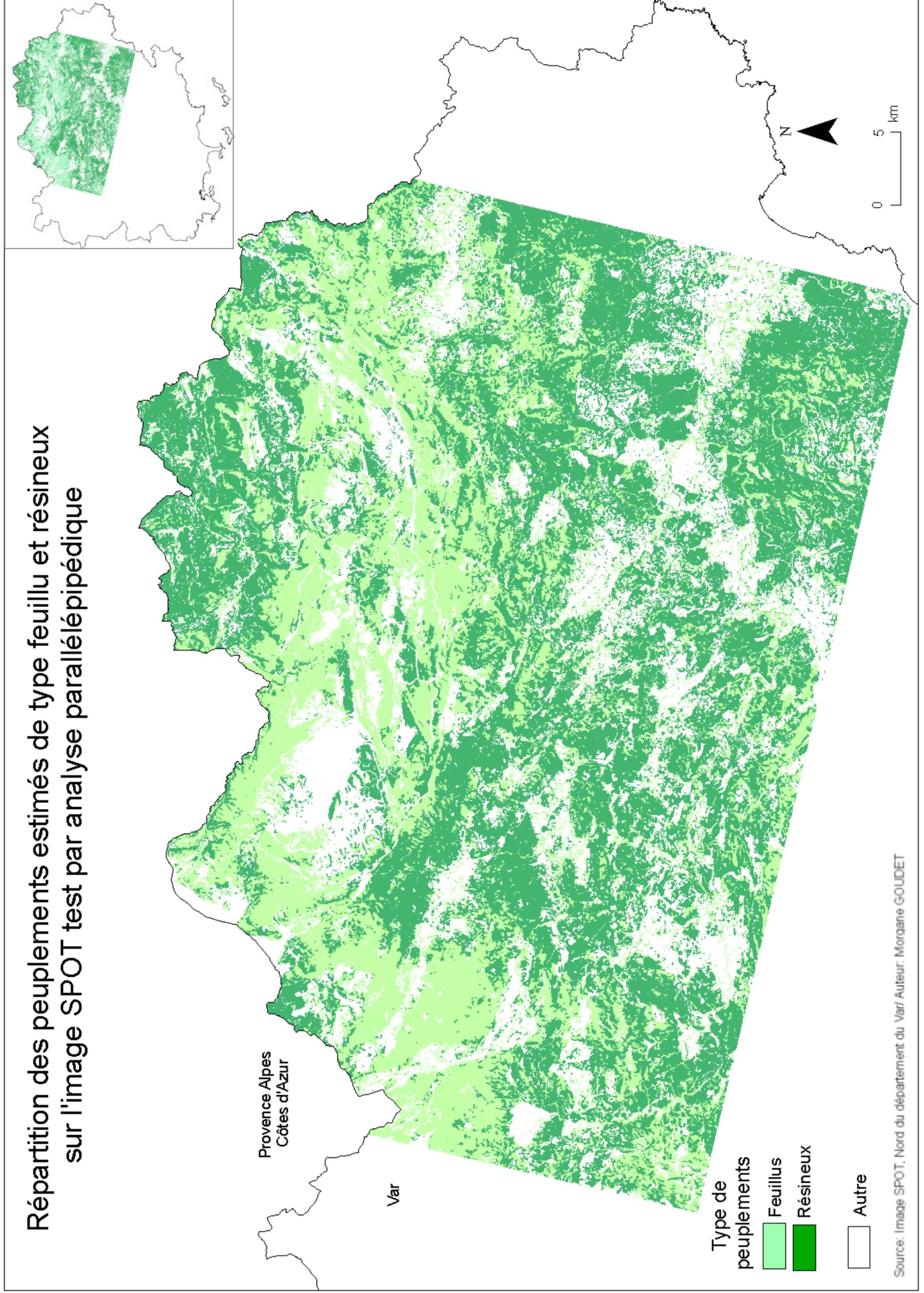
ANNEXE 4 : Modèle créé sur ERDAS Imagine pour la production d'un masque des zones non végétales sur image satellite SPOT

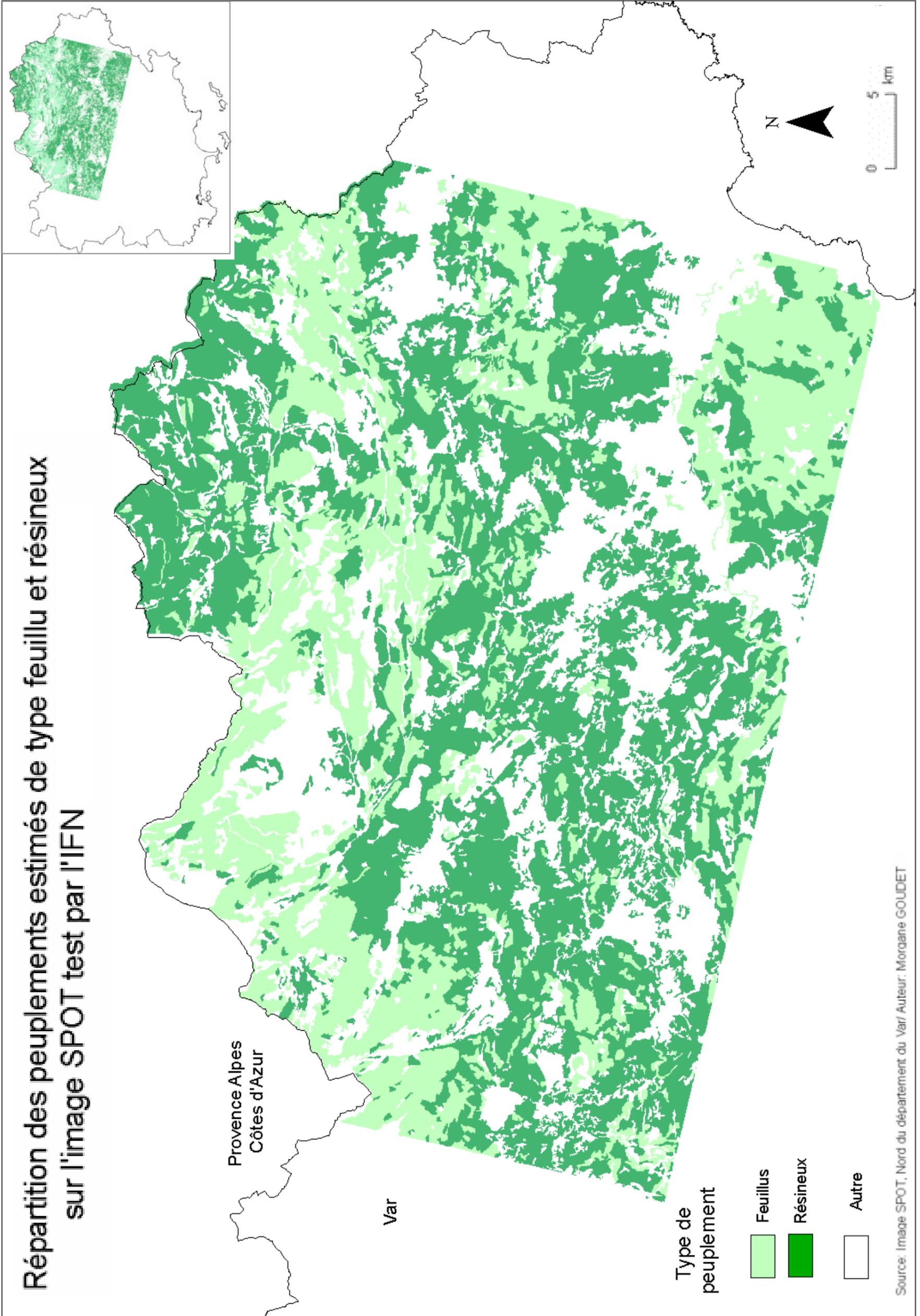


ANNEXE 5 : Résultats de l'application d'un masque radiométrique couvrant les zones de sols nus et les zones d'eau sur l'image test

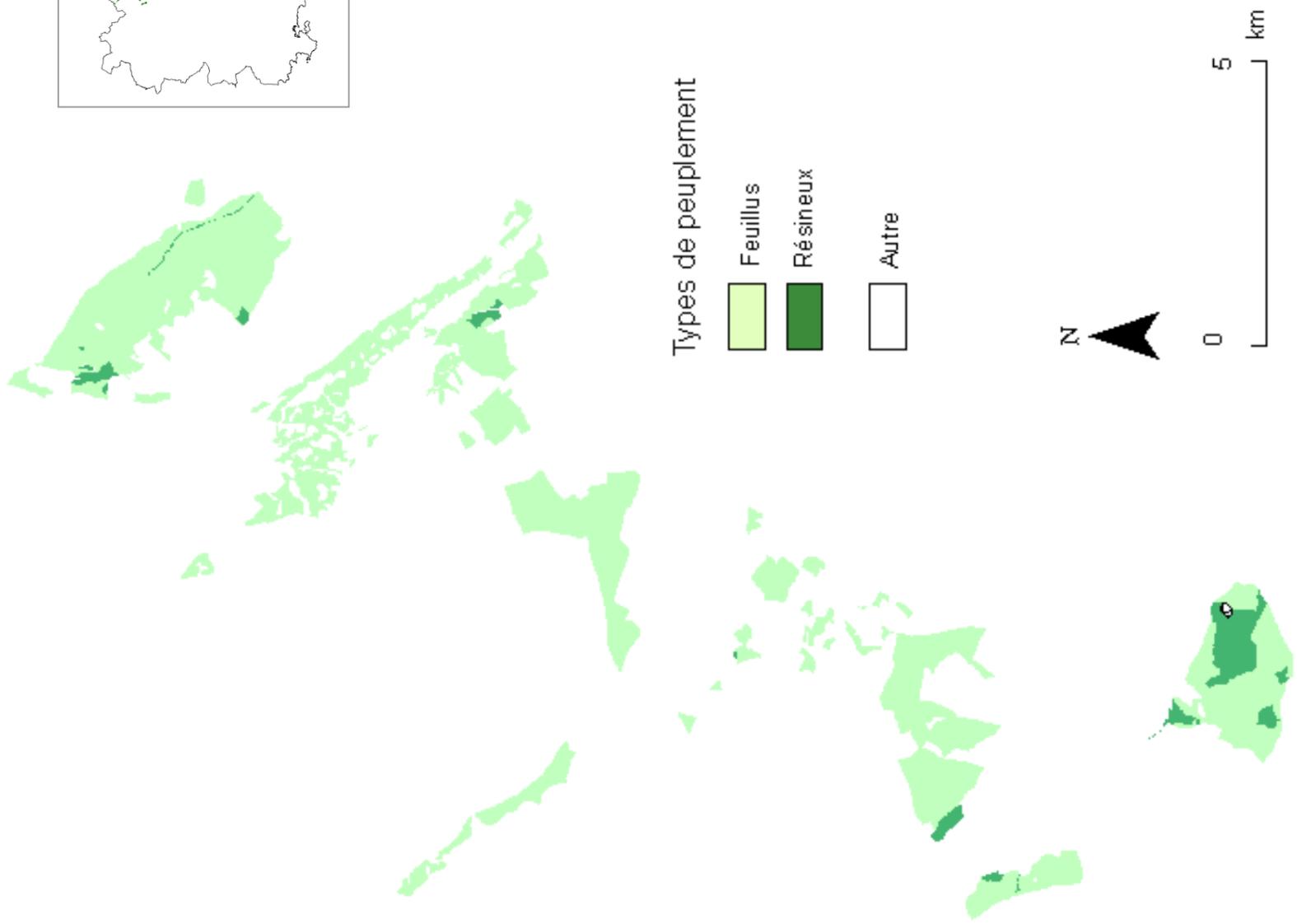
Masque sur les zones de sols nus et des zones d'eau sur l'image test SPOT







Peuplements feuillus et résineux des aménagements en forêts de Fox-Amphoux, Régusse et Bauduen

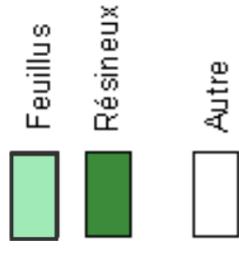


Estimation des peuplements feuillus et résineux par classification parallélépipédique en forêts de Fox-Amphoux, Régusse et Bauduen

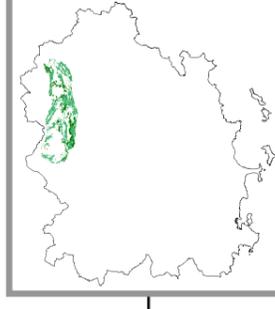


Peuplements feuillus et résineux définis par l'aménagement de la forêt de Canjuers

Types de peuplement

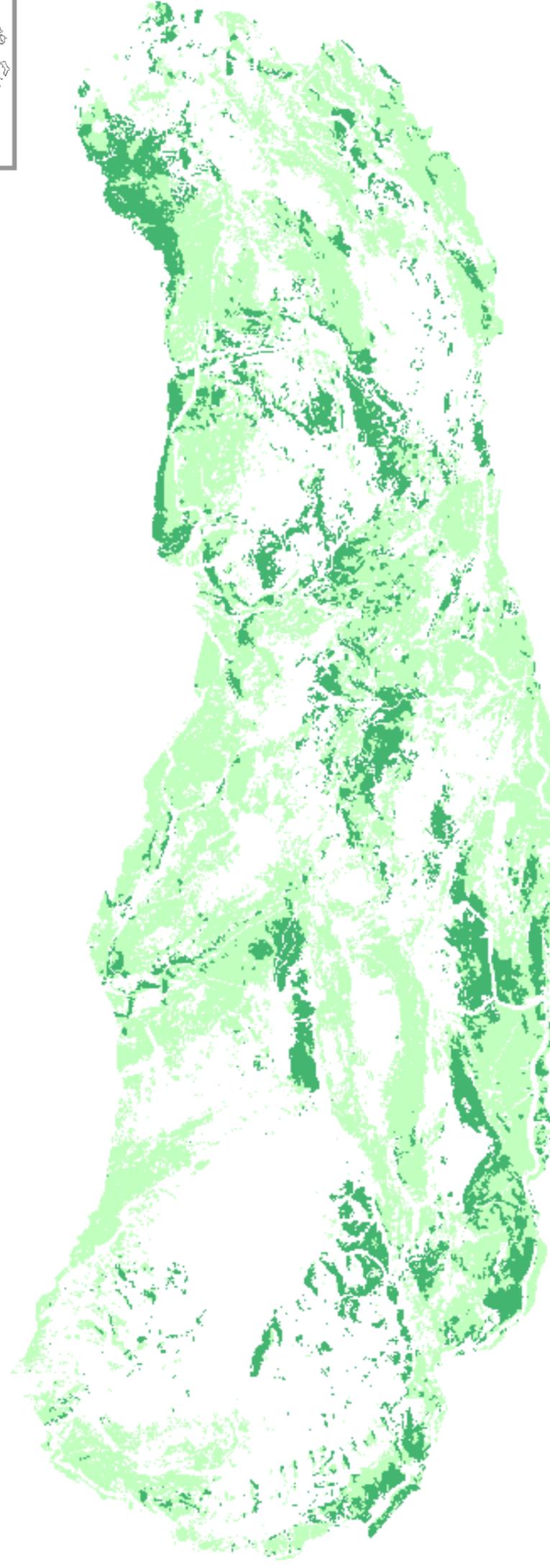
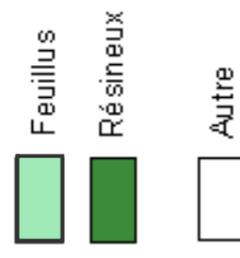


0 2 km



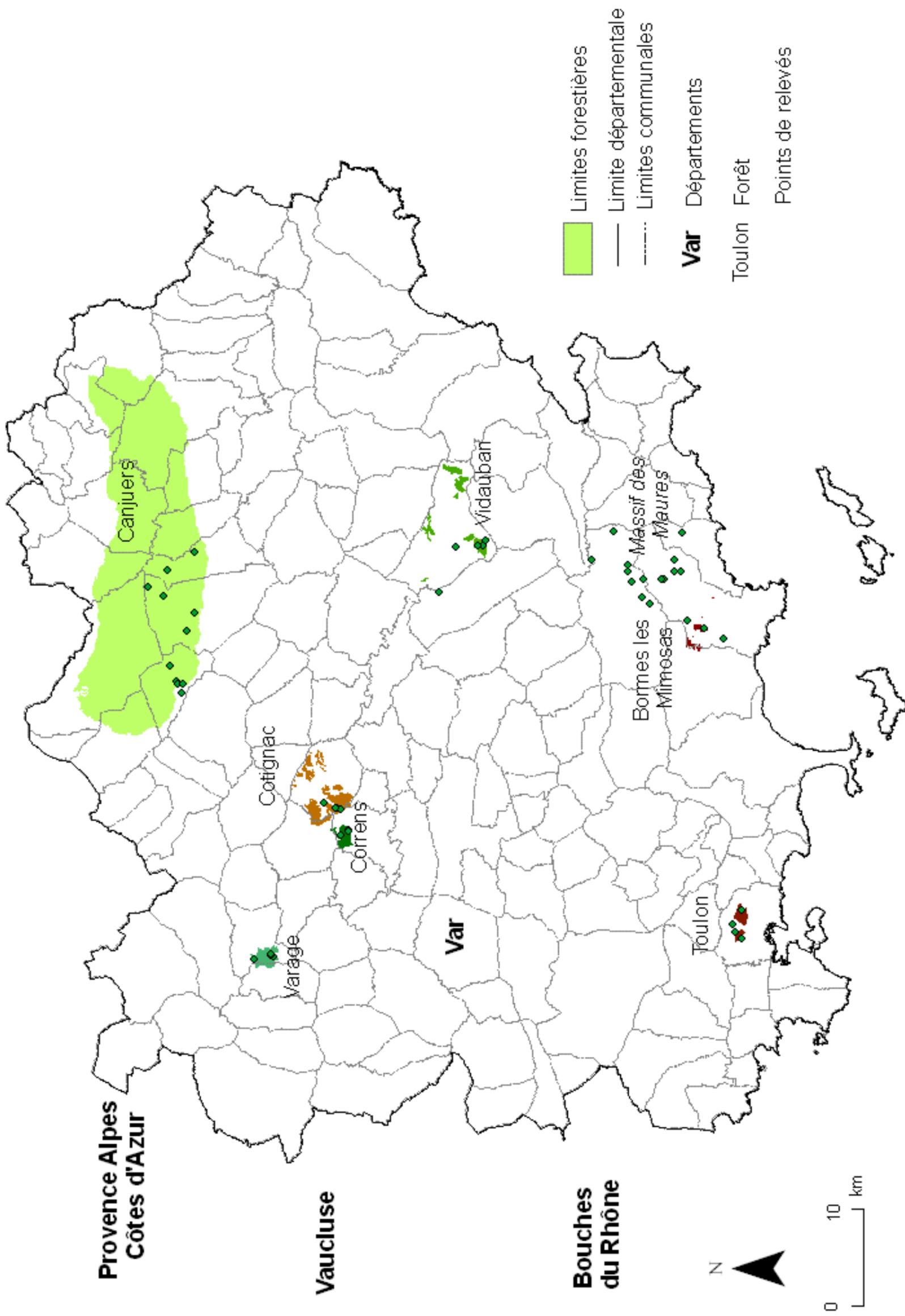
Estimation des peuplements feuillus et résineux par analyse parallélépipédique

Types de peuplement



0 2 km

Points de relevés de terrain sur les types de peuplements du Var

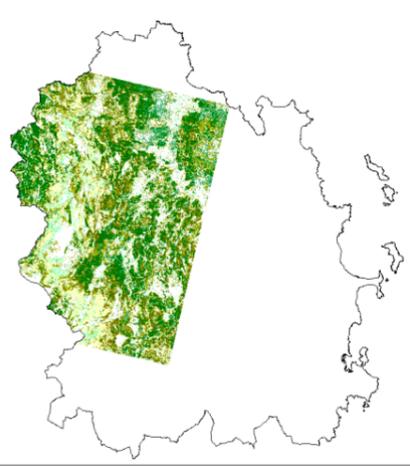


ANNEXE 11 : Données terrain sur le département du Var

Forêt	parcelle agmt	G		N	V (m ³ /ha)	Essence	Diam moyen	répartess	Pt GPS	Type peuplement						
Varage	1	PB	33	672		Pin sylvestre	20	100	2	Futaie adulte pure						
		BM	3	24	3											
		Gtot (m ² /ha)	36	696	238				4							
		PB (ps)	11	224					7							
		PB (pm)	1	20					8							
Varage	6a	BM (pm)	2	8		Mélangé par parquet de chêne, Ps et Pm	10	57								
		PB (ch)	16	326												
		GM (ch)	1	5												
		Gtot (m ² /ha)	31	583	192											
		PB	4	81												
Varage	4	BM	2	16		Châtaignier qqes pins	40	13	9	Vieille châtaigneraie cultivée (avec qqes pins)						
		GB	4	20	10											
		TGB	4	14												
		PB (pin)	1	20												
		Gtot (m ² /ha)	15	152	114											
Varage	4	PB (ch)	13	265		Chêne qqes Pin sylvestre qqes Bouleau qqes Châtaignier	15	71	11 à 17	Futaie de chêne (avec châtaignier, pin et bouleau)						
		BM (ch)	1	8												
		BM (ps)	3	24												
		PB (boul)	3	61												
		BM (boul)	2	16												
		GB (boul)	1	5												
		BM (chat)	1	8												
		Gtot (m ² /ha)	24	387	189											
		Cotignac	20 (rouge)	PB	14				285			Pin Alep	30	100	18	Futaie Adulte (50-60ans)
BM	4			32	19											
Cotignac	22 (vert taché orange)	Gtot (m ² /ha)	18	317	140	Pin maritime Chêne vert Pin alep	25	48	20	Taillis chêne vert surtagé de pin alep et maritime						
		PB (pa)	8	163	21											
		BM (pa)	8	64												
		PB (chv)	8	163												
		PB (pm)	4	81												
Cotignac	22 (marron)	Gtot (m ² /ha)	28	471	255	Pin maritime Pin Alep Chêne vert	30	63	22	Futaie (avec un peu de taillis)						
		BM (pm)	7	56	23											
		GB (pm)	3	15												
		PB (pa)	1	20												
		BM (pa)	2	16												
Cotignac	22 (bleu taché rose)	Gtot (m ² /ha)	34	535	265	Pin Alep Chêne vert	20	18	24	Taillis chêne vert surtagé pin Alep						
		PB (pa)	4	81	25											
		PB (chv)	18	367												
Correns	12	Cèdre-cèdre	3 mètres			Cèdres Pin parasol	15	50	26	Plantation (une ligne sur deux)						
		Cèdre-Pin	5 mètres		27											
		Pin-Pin	3 mètres													
Correns	4 et 7 (rose rayé)	Gtot (m ² /ha)	21	667	88	Pin Alep	25	100	28	Futaie clair pure Pin Alep						
		PB	19	387	29											
		BM	3	24												
Correns	9 (bleu avec carrés roses)	Gtot (m ² /ha)	22	411	185	Pin Alep	25	100	30	Pinède clair sur Guarrigue						
		PB	8	163	31											
		Gtot (m ² /ha)	8	163	32											
Toulon		PB	7	143		Pin Alep	20	100	69	Futaie claire						
		BM	2	16	70											
		GB	1	5												
Toulon		Gtot (m ² /ha)	10	164	72	Pin Alep	30	100	71	Futaie très clair						
		PB	1	20	72											
		BM	15	119												
Toulon		Gtot (m ² /ha)	20	160	180	Pin Alep	10	100	73	Jeune Futaie						
		PB	2	41	74											
		15 Perches (placette rayon 10m)	4	477												
Toulon		Gtot (m ² /ha)	6	518	21	Pin Alep	35	100	75	Futaie Adulte						
		PB	22	175	76											
		GB	10	51												
<p>MEMOIRE FINSETUDE-2008 Estimation de la ressource forestière sur le département du Var</p>																

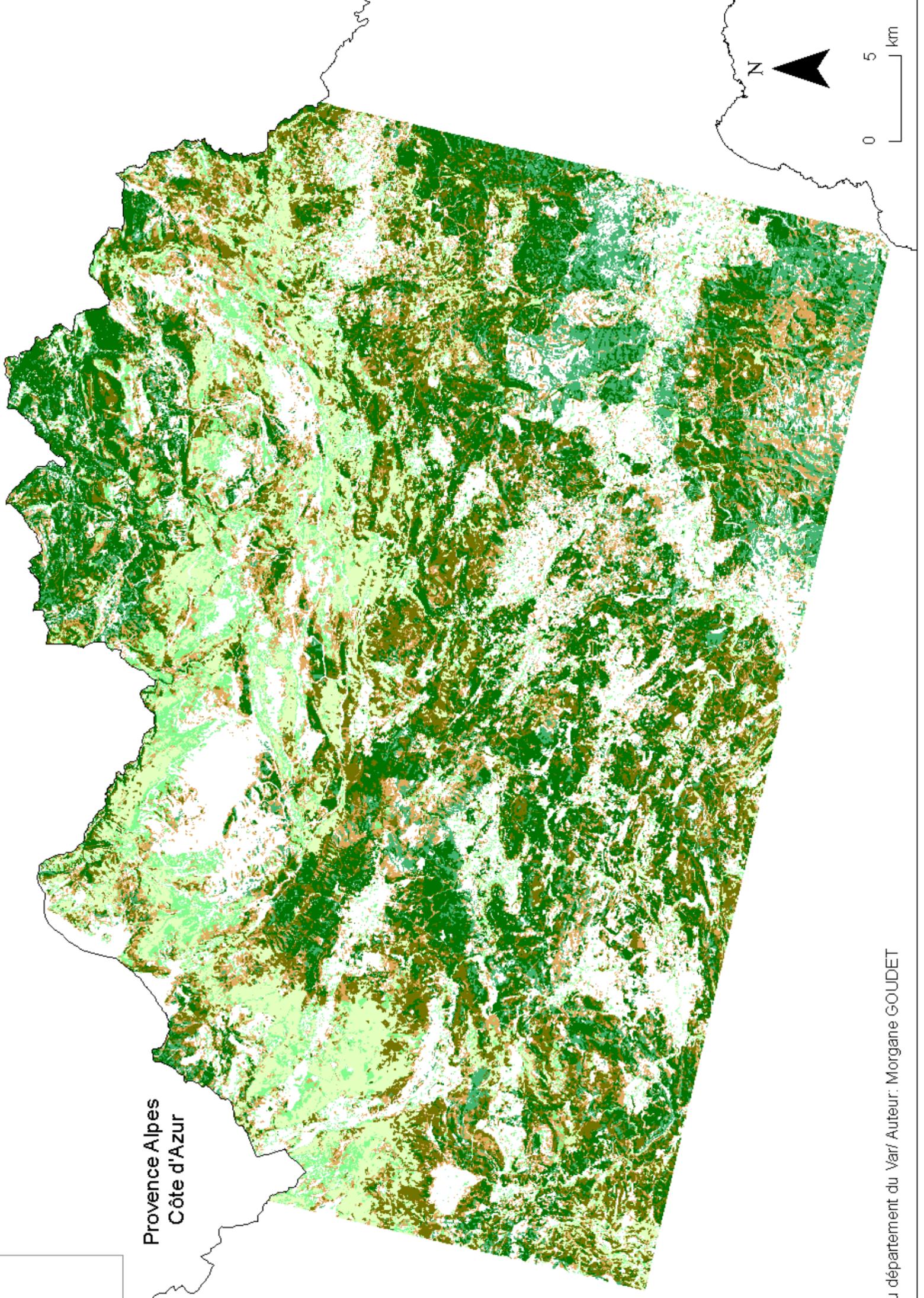
Bormes	5	Espacement G tot (m2/ha)	4 x 2	1250	18	Pin maritime	25-30	100	33 34	Plantation (2000) Pin maritime
Bormes (sud Pas de courtin)	9	Espacement (origine: 4*2) G tot (m2/ha)	4*4	625	16	Pin parasol		100	35 36	Plantation (1990)
Bormes	70	PB GB G tot (m2/ha)	5 12 2	102 95 10		Chêne liège		100	37 38	Futaie
Collobrière	59	PB (euca) BM (euca) PB (pm) BM (pm) G tot (m2/ha)	6 2 9 4	208 122 16 183 32	125	Eucalyptus Pin maritime (Chêne vert)	25 30	50 50	39 40	Futaie Mélangée
Collobrière	60	PB BM GB TGB G tot (m2/ha)	18 14 2 1	367 111 10 4	243	Chêne vert	25	100	42 43	Taillis
Collobrière		G tot (m2/ha)	35	492	252	Arbousier			44 45 46	
Collobrière	64	PB BM GB TGB G tot (m2/ha)	5 19 3 1	102 151 15 4	403	Yeuse	30	100	47 N piste	Vieille yeuseraie
Collobrière	64	PB BM GB G tot (m2/ha)	19 23 2	387 183 10		Pin maritime	25	100	47 48 S piste	Futaie pure Pin maritime
Collobrière	64	PB BM TGB G tot (m2/ha)	7 5 17	143 40 60	449	Châtaignier	80	100	49 50	Vieux verger
Collobrière	62	PB BM PB (avt exploitation) BM (avt exploitation) G tot (m2/ha)	6 22 28 37	122 175 297 754	336	Cèdres	30	100	51 52	Futaie
Bormes	84	PB BM TGB G tot (m2/ha)	9 16 4	297 183 127 14	672	Chêne liège	35	100	54 55	Futaie Adulte
Bormes	84	PB BM TGB G tot (m2/ha)	29 6 13 6	325 122 103 21	325	Chêne vert	30-35	100	56 57	Vieille yeuseraie sur souche
Bormes	74	PB BM GB TGB G tot (m2/ha)	8 17 3 1	163 135 15 4	500	Chêne liège	40	100	58 59	Vieille Futaie
Bormes	74 (jusque 73,75,76,77)	PB BM GB G tot (m2/ha)	8 7 4	163 56 20	302	Chêne liège (200ha)	25	100	60 61 62	Vieille futaie
Bormes	86 (la molle)	PB (chat) BM (chat) GB (chat) TGB (chat) BM (chl) TGB (chl) G tot (m2/ha)	8 16 2 1 1 6	239 163 127 10 4 21	122	Châtaignier (3.5ha) Chêne liège	45	90 10	63 64	Futaie malade mélangée
Collobrière	55	Espacement G tot (m2/ha)	3.3*3.3 7	918 244	52	Pin Laricio (25 ans)	15	100	65 66	Plantation
Collobrière	49	25 perches G tot (m2/ha)	4 16	477 722	151	Pin maritime (12 ans)	10	100	67 68	Futaie dense
Collobrière	49	25 perches G tot (m2/ha)	4 6	81 64 796	175	Pin maritime	25	100	67 68	Futaie dense

Répartition des peuplements estimés de type feuillu, résineux, mélange, résineux clair, feuillu clair et mélange clair sur l'image SPOT test par analyse parallélépipédique



Provence Alpes
Côte d'Azur

Var

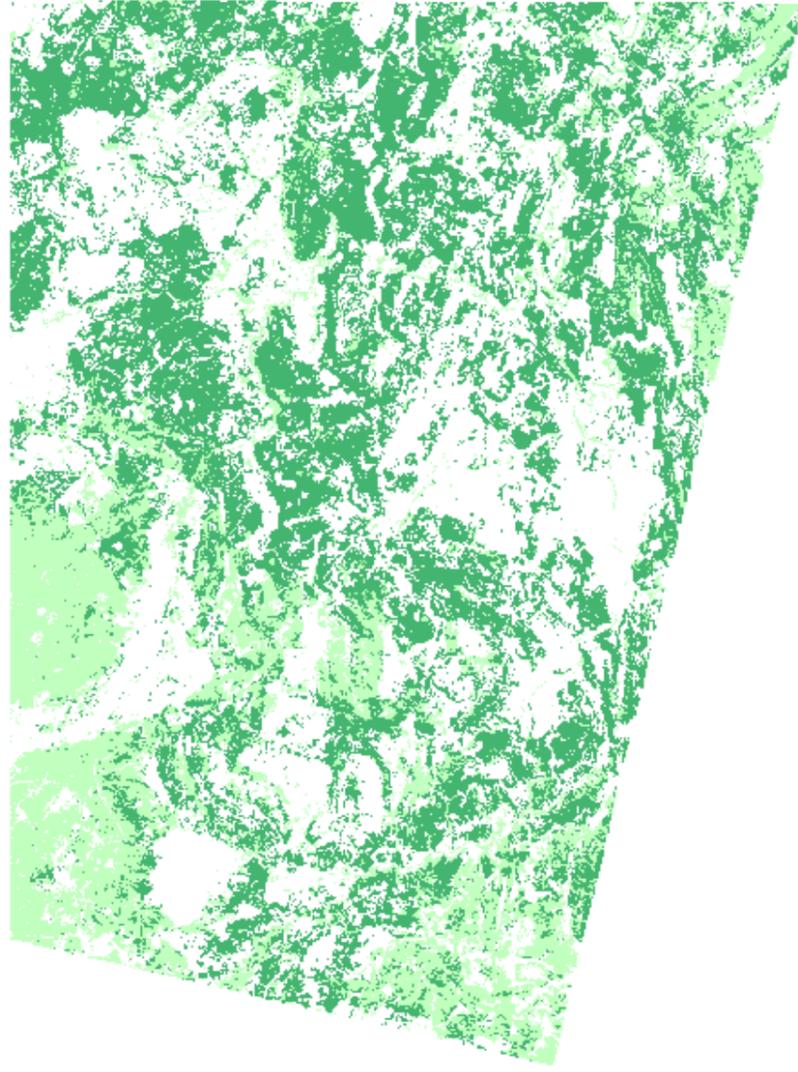


Type de peuplement

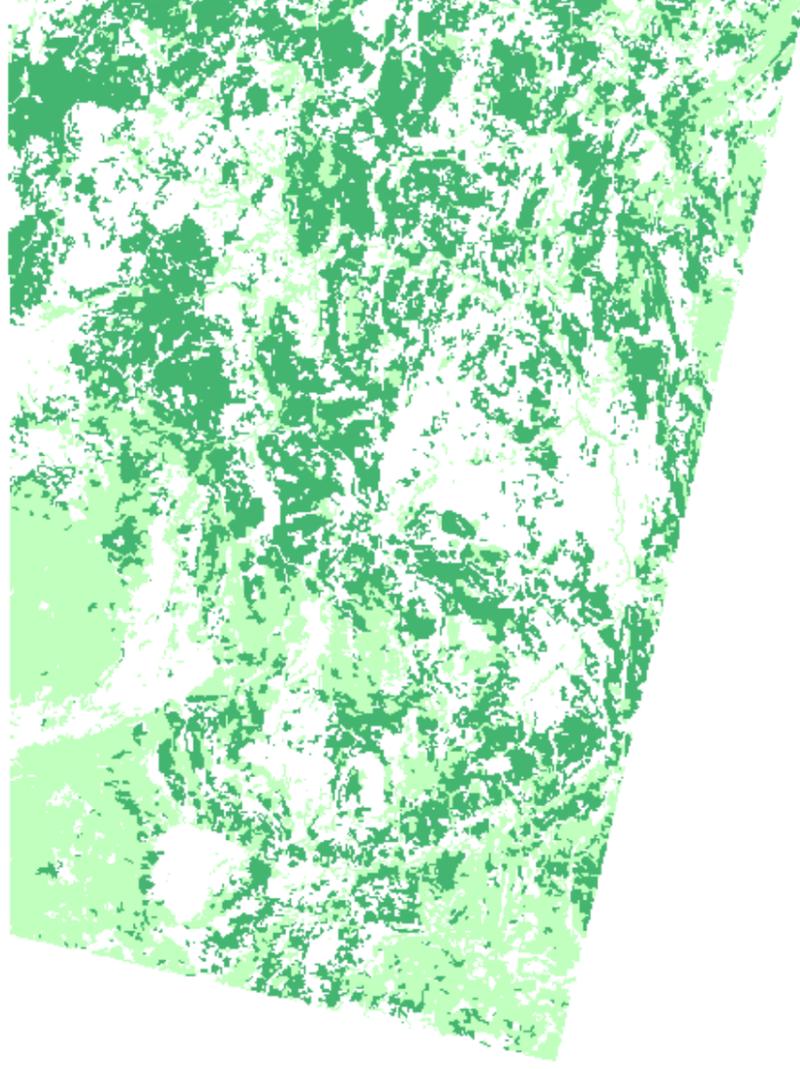
-  Feuillu clair
-  Feuillu
-  Mélange clair
-  Mélange
-  Résineux clair
-  Résineux
-  Autre



Classification issue de l'étude Provence verte sur image Landsat



Classification issue d'une analyse parallélépipédique sur image Landsat

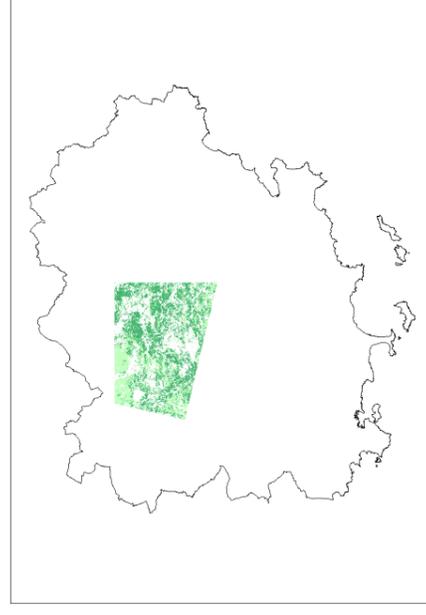


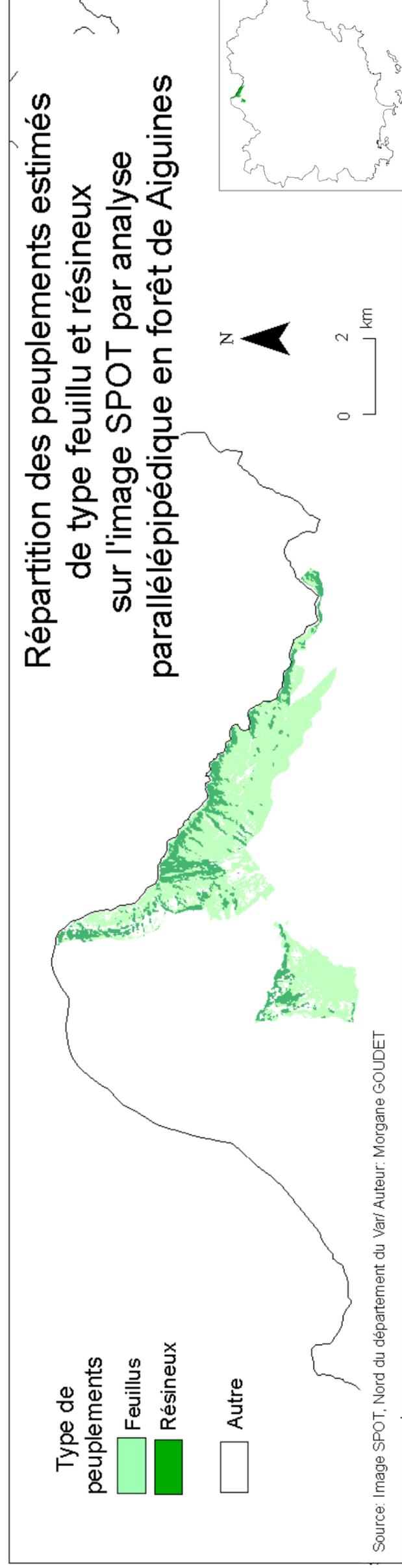
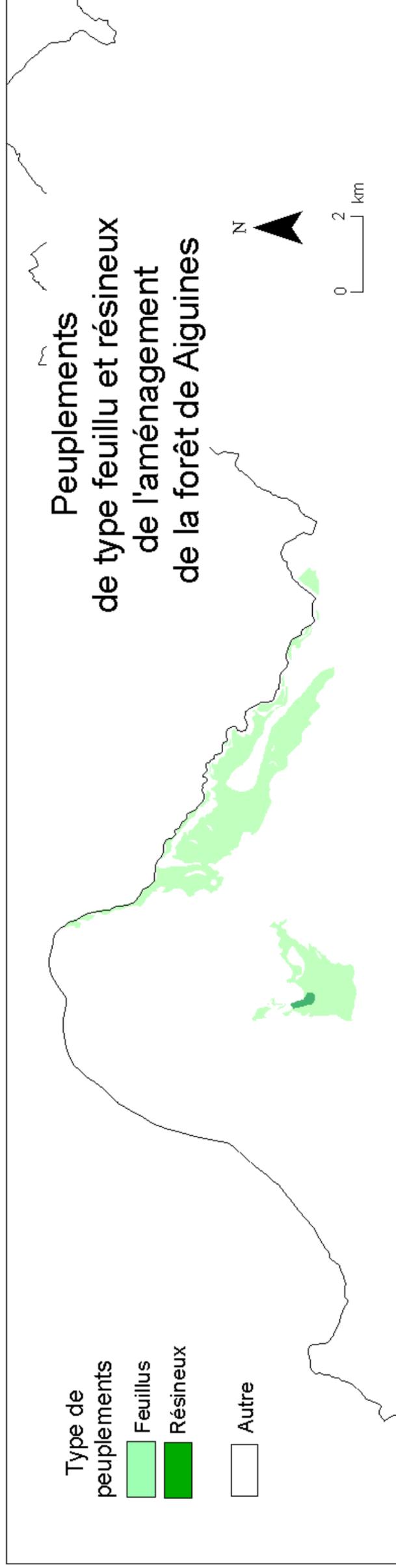
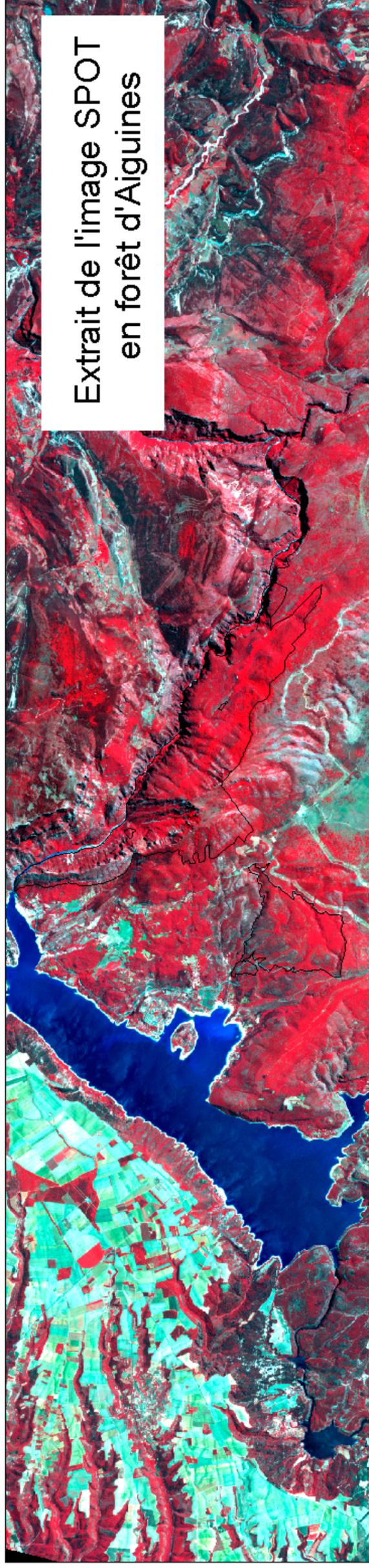
Classification issue d'une analyse parallélépipédique sur image SPOT



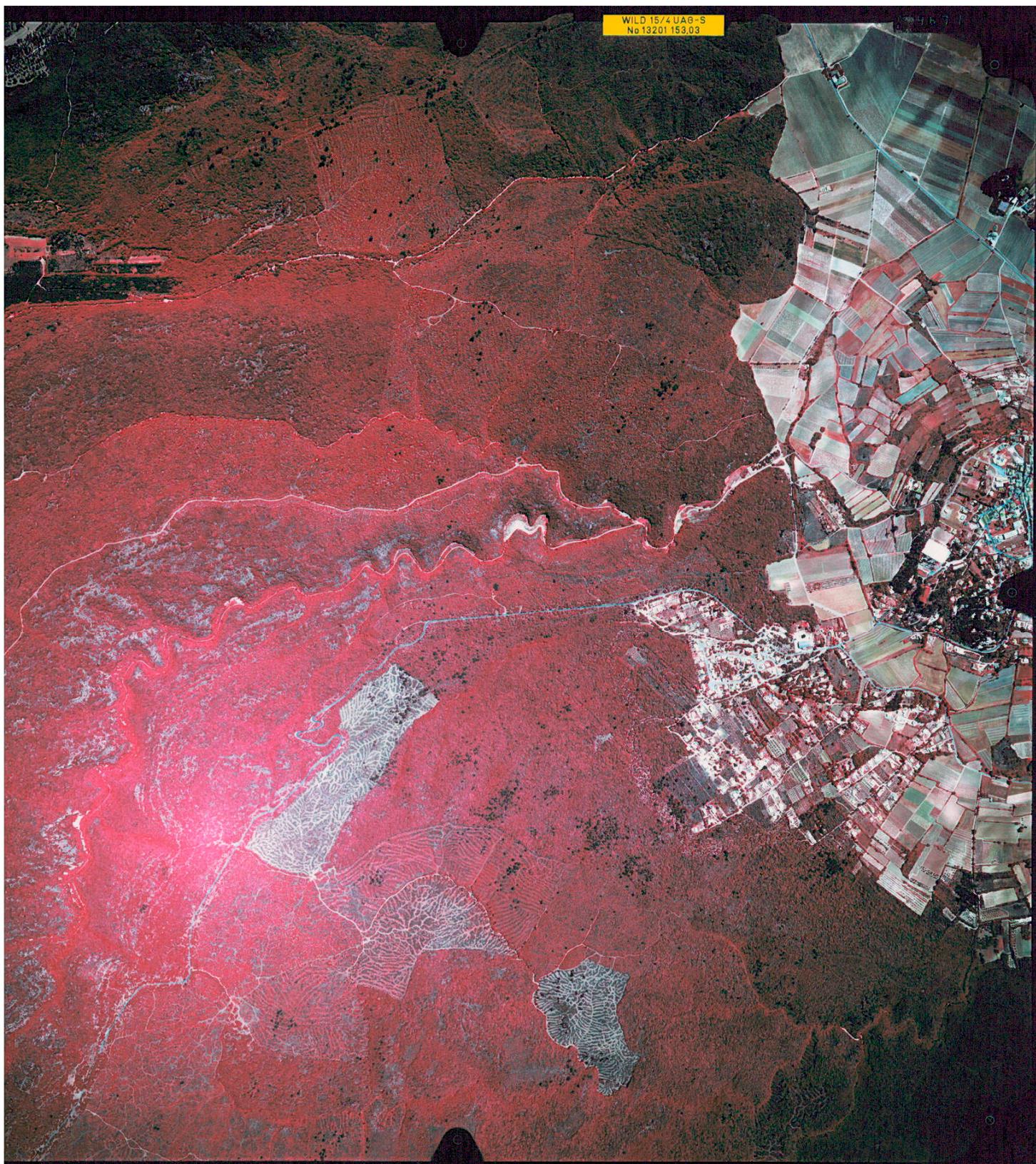
Types de peuplement

-  Feuillus
-  Résineux
-  Autre

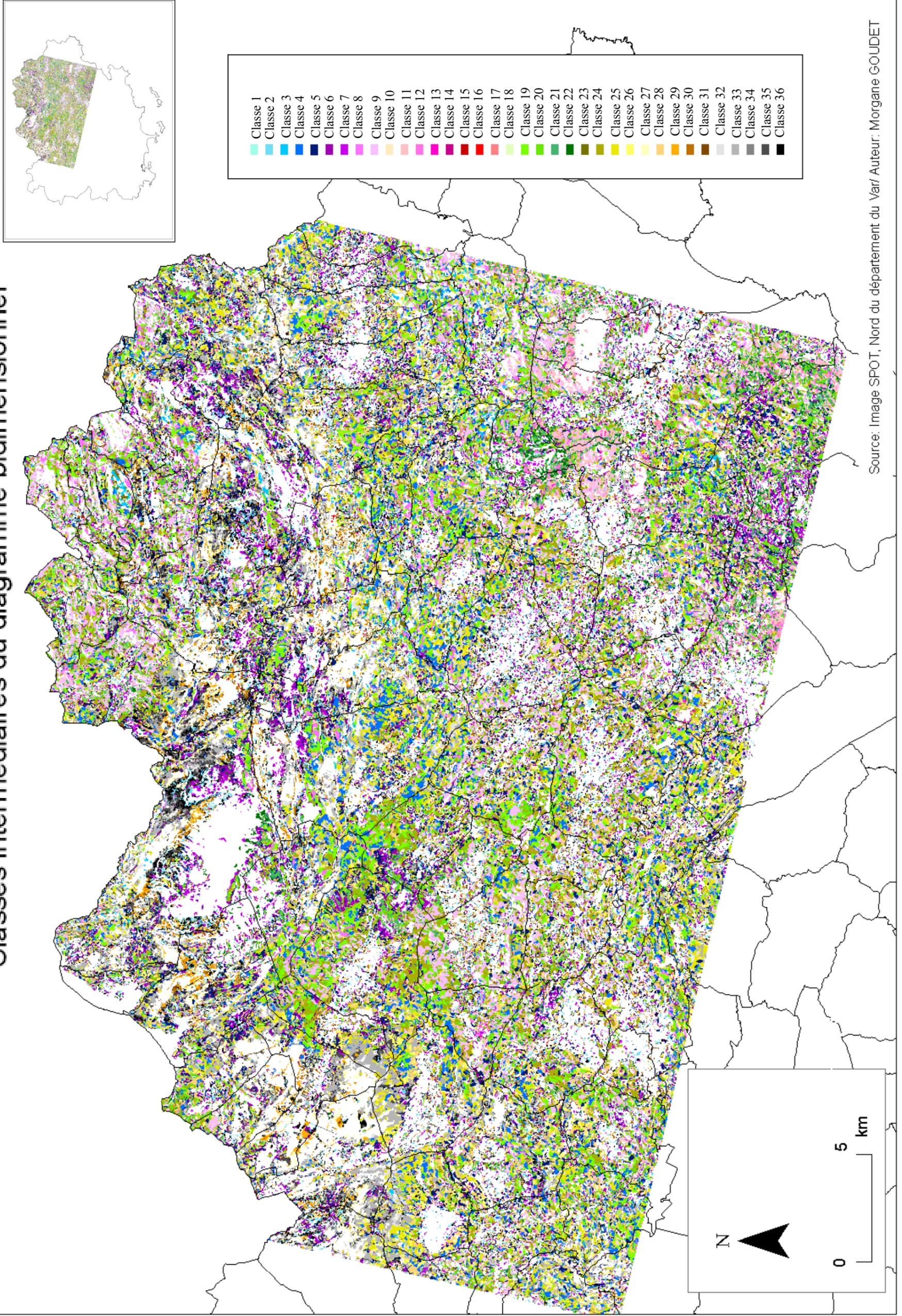




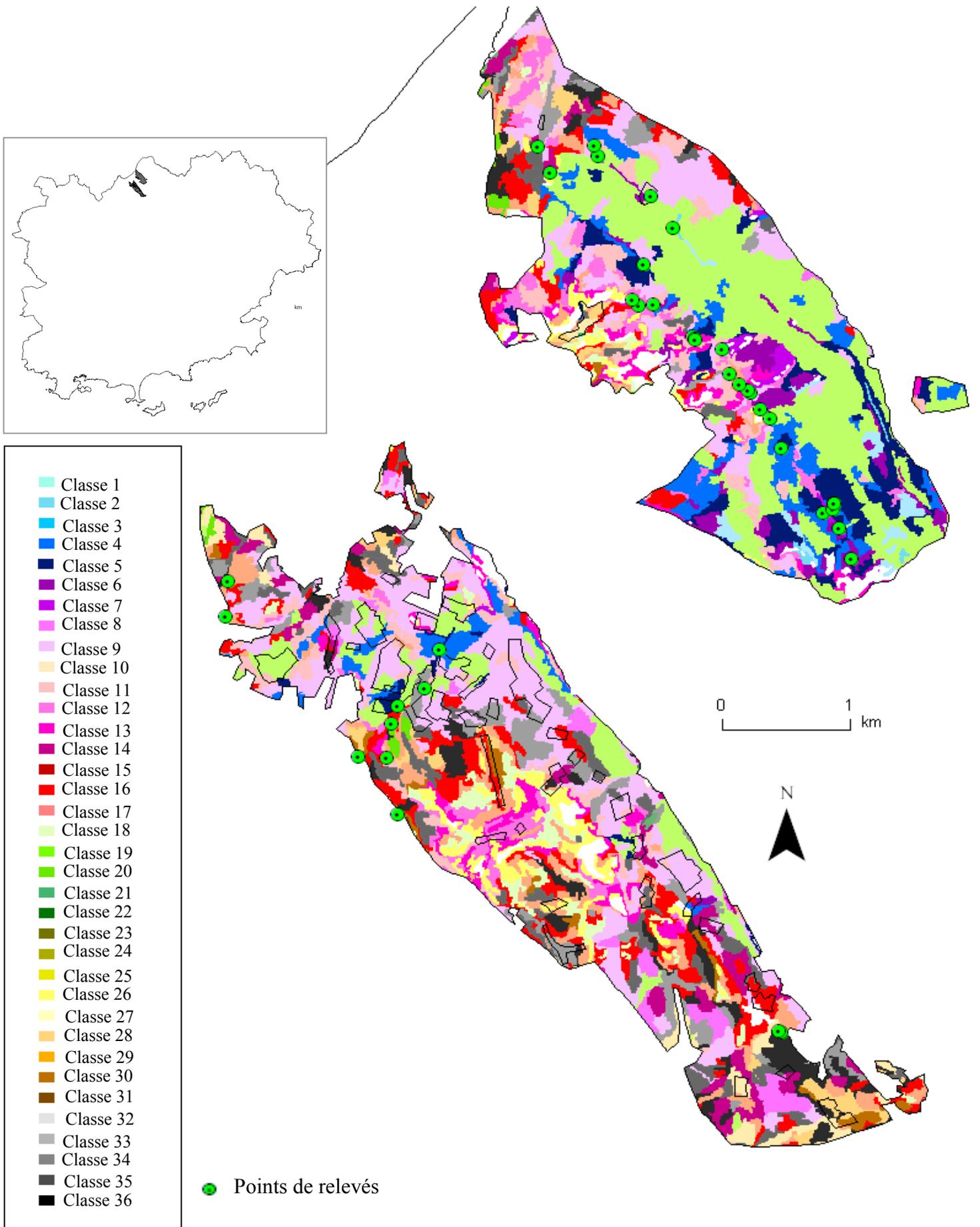
ANNEXE 16 : Photo aérienne de la forêts de Seillons-Sources-d'Argens



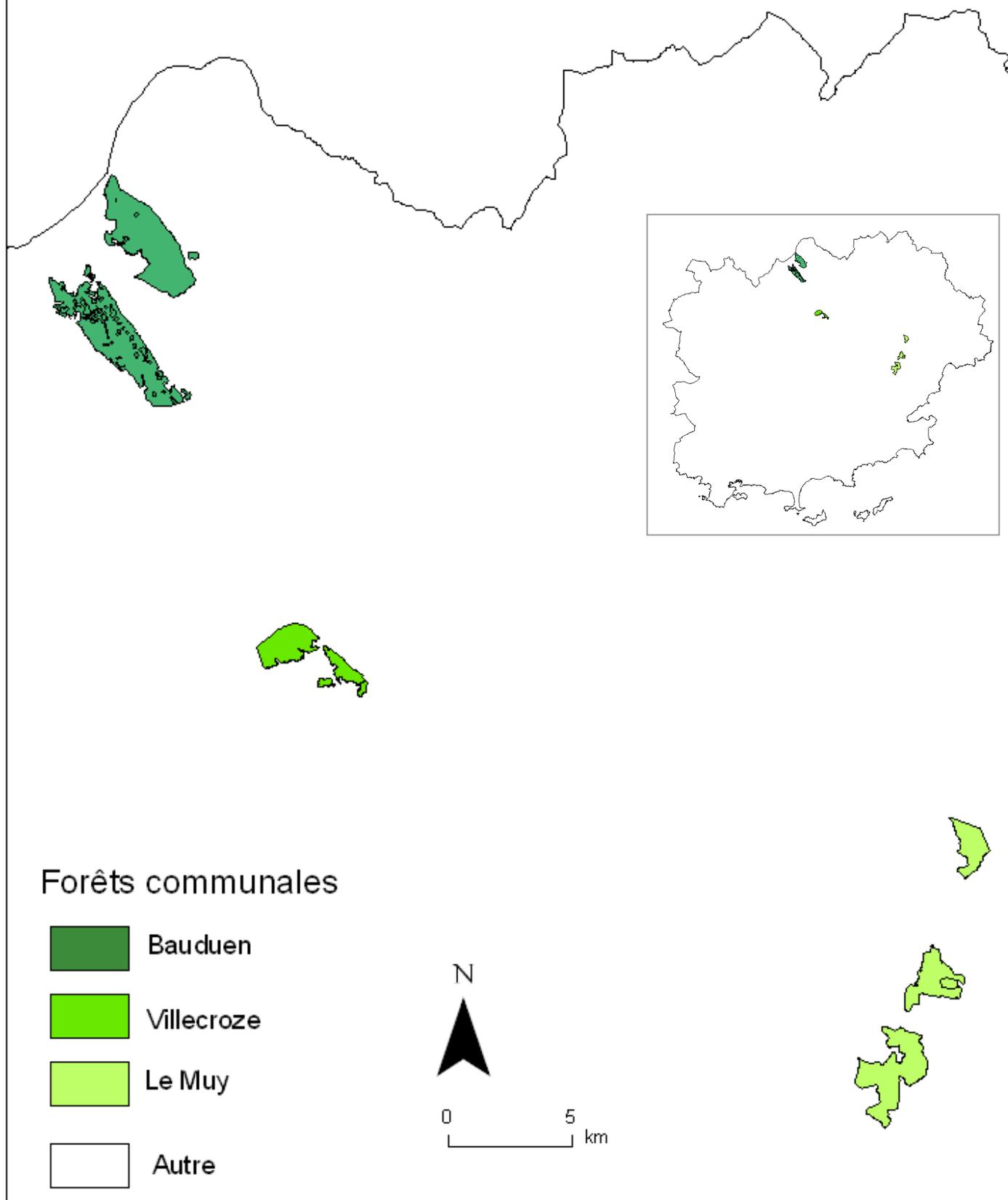
Classes intermédiaires du diagramme bidimensionnel



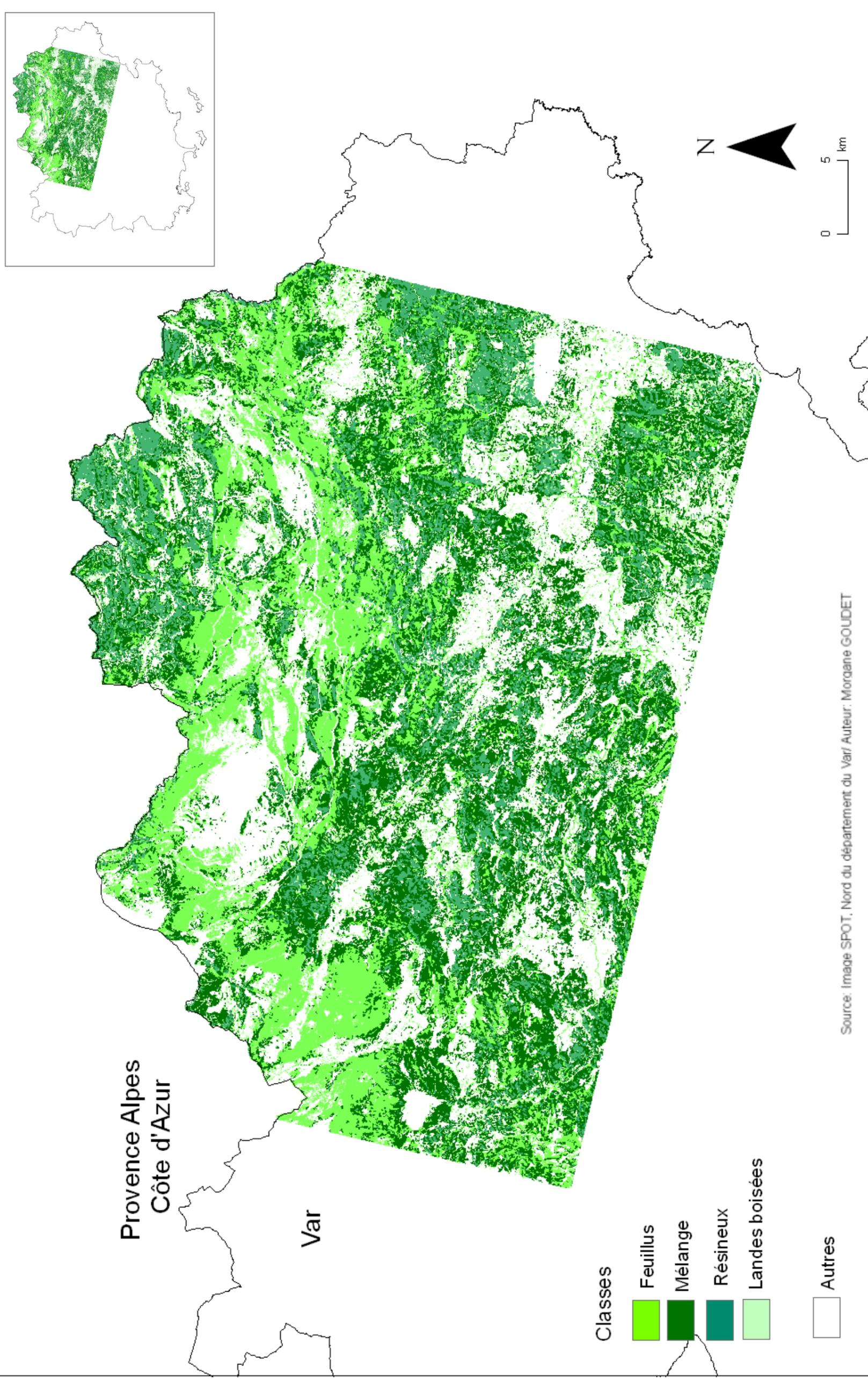
Segmentation de la forêt de Bauduen dans les 36 classes



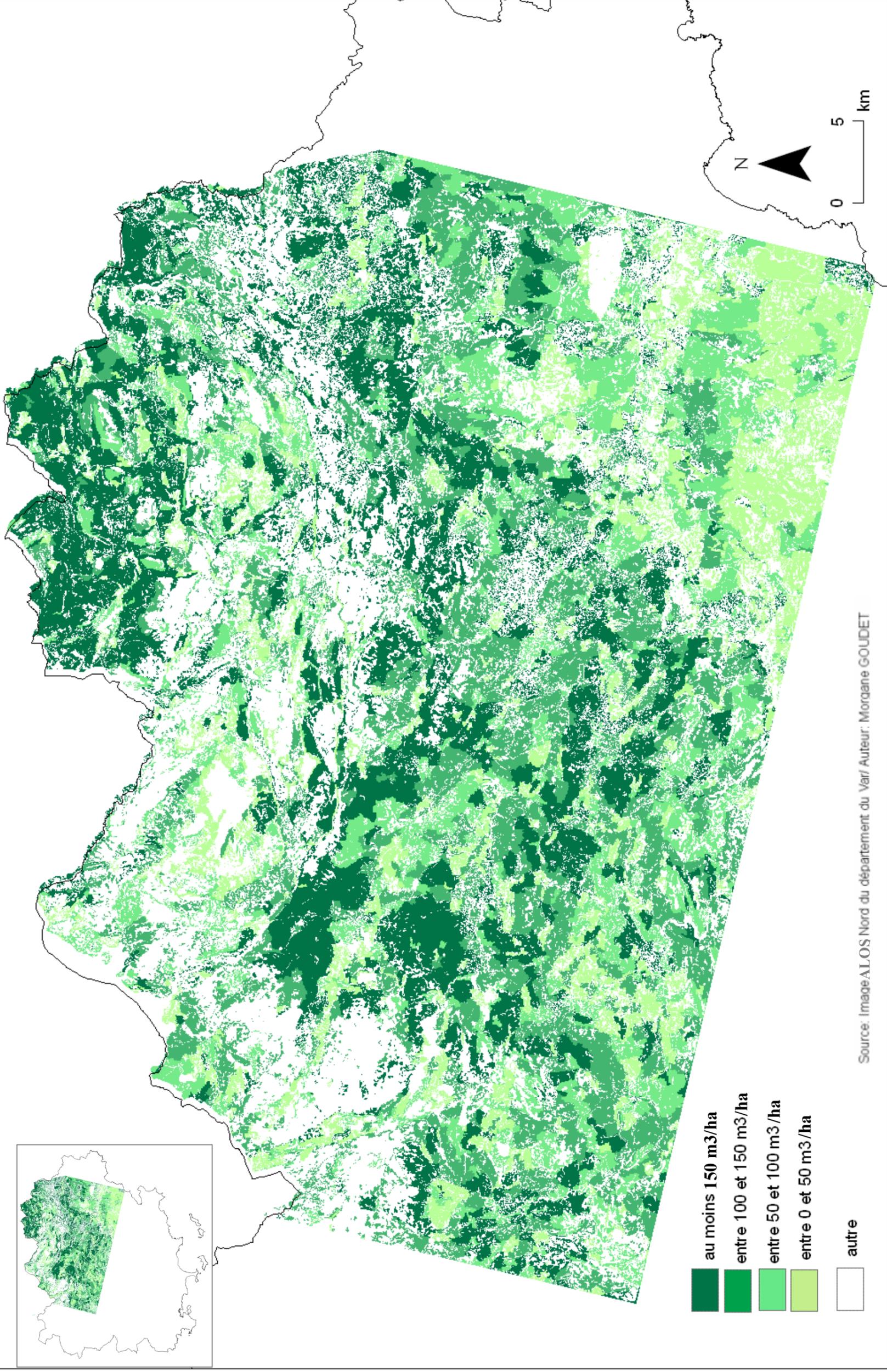
Forêts communales du Var parcourues pour l'identification des 36 classes



Répartition des peuplements estimés de type feuillus, résineux, mélanges et landes boisées sur l'image SPOT test par analyse parallélépipédique



Classe de volumes des peuplements résineux estimés à partir d'image radar



RÉSUMÉ

Les peuplements résineux des forêts méditerranéennes sont aujourd'hui sous-exploités. La filière bois énergie constituerait un nouveau débouché permettant un redémarrage de l'exploitation. Pour permettre de concrétiser son développement, dresser l'état de la ressource est indispensable. L'utilisation de la télédétection offre une bonne vue d'ensemble permettant de garder une cohérence territoriale en accord avec les objectifs. Une image SPOT testée sur le département du Var a permis d'envisager la télédétection comme technique d'estimation de cette ressource. La présente étude explore l'apport et les limites de la source satellite en termes de localisation des peuplements et de leur caractéristiques (feuillus, résineux, surfaces, volumes). Finalement, une méthodologie sera présentée.

SUMMARY

While Mediterranean coniferous forests are currently under exploited, they could potentially return to productive use through a new focus on wood based fuel production. Preliminary studies will be necessary to assess the viability of such efforts. This prototype study uses Remote Sensing data and techniques to leverage the coverage, speed, and cost benefits of that approach. We used a SPOT image covering the Var department in France for a classification study of tree resource density. We explore the strength and limits of such an approach for the localization of exploitable resources and the characterization of stand characteristics such as tree composition and wood volume. Finally, we present a methodical approach for future analyses of this kind.