

Modélisation prospective de l'occupation des sols de Madagascar à l'horizon 2030

Master 2 Professionnel Systèmes d'Information et Informations Géographiques
pour la Gestion et la Gouvernance des Territoires (SIIG3T).

Par Julien LAURENT

Année 2008-2009

Université Paul Valéry, Montpellier III

Enseignant-tuteur : Agnès BEGUE
Maître de stage : Laurent GAZULL

Organisme d'accueil : Unité Propre de Recherche ressources forestières et
politiques publiques (UPR 36), CIRAD



LETTRE DE MISSION

Nom / Prénom stagiaire : LAURENT Julien

Missions du stage

Objectifs :

Depuis maintenant trois ans, le CIRAD travaille à l'évaluation du potentiel de production de biocarburants de deuxième génération sur le continent Africain et à Madagascar.

Une des contraintes majeures à la réalisation de ce potentiel est la disponibilité en terres.

L'objet principal du stage est de développer un modèle spatial permettant de prédire l'occupation des sols de Madagascar à l'horizon 2030, afin de pouvoir construire des scénarios « crédibles » de mise en place de filières de production.

Tâches confiées au stagiaire – nature de ces tâches

- Analyse de l'occupation des sols en 2000
- Analyse des changements opérés depuis 10 ans (1990 - 2000)
- Analyse statistique des changements au regard de l'évolution démographique, des changements de système de culture, de l'amélioration des rendements, des types de sols, des contraintes climatiques, etc ...
- Construction d'un modèle de prédiction de l'occupation des sols à l'horizon 2030, dans un scénario *business as usual* où l'on suppose les conditions socio-économiques identiques à celles d'aujourd'hui

Compétences à mettre en œuvre : Analyse multicritère, Algèbre raster, Cartographie thématique

Résultats escomptés en forme de produit : Une cartographie de l'occupation des sols de Madagascar à l'horizon 2030.

Nom du tuteur de stage dans la structure d'accueil : GAZULL Laurent

Fonction du tuteur : Chargé de recherche en géographie

Coordonnées du tuteur : Campus international de Baillarguet

TA C-36/D

34398 Montpellier Cedex 5

N° Tel, fax et e-mail : Tel : +33 4 67 59 37 25

Fax : +33 4 67 59 39 09

E-mail : laurent.gazull@cirad.fr

Conditions du stage

Lieu et descriptif rapide de la structure d'accueil : UR 36 du CIRAD (Ressources forestières et politiques publiques)

CIRAD Forêt – TA/10 D - Campus International de Baillarguet – 34398 MONTPELLIER
CEDEX 5

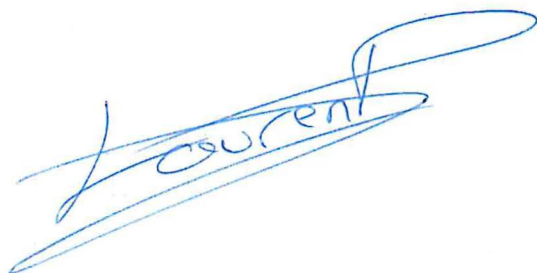
Équipements géomatiques : ARCVIEW 9.3 + Spatial Analyst

IDRISI Andes

Dates et durée : 01 mars 2009 au 31 août 2009

Rémunération : 398,13 €

Le stagiaire



Le tuteur

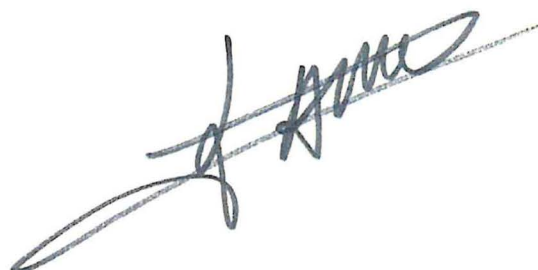


Table des matières

Lettre de mission.....	2
Introduction.....	7
I- Contexte général et démarche globale.....	9
I.1. Présentation du stage.....	9
I.1.1. Le CIRAD.....	9
I.1.2. La convention de recherche avec Total.....	10
I.2. Cadre de l'étude.....	10
I.2.1. Madagascar et son potentiel dans le biocarburant.....	10
I.2.2. Présentation de la zone d'étude.....	11
I.3. Démarche globale et présentation des outils.....	13
I.3.1. Démarche globale.....	13
I.3.2. Outils utilisés.....	13
II- Différentes méthodes de classification.....	14
II.1. la méthode supervisée.....	14
II.1.1. Définition.....	14
II.1.2. Méthode.....	14
II.1.3. Validation.....	16
II.2. La segmentation spatiale.....	19
II.2.1. Définition.....	19
II.2.2. Méthode.....	19
II.2.3. Validation.....	19
II.3. Choix d'une méthode mixte.....	21
II.3.1. Les indices de végétation : NDVI et TSAVI.....	21
II.3.2. Le seuillage : Définition.....	23
II.3.3. Méthode.....	23
II.3.4. Validation.....	25

III- Analyse de l'évolution entre 1990 et 2001.....	28
III.1.1. Analyse des changements.....	28
III.1.2. Recherche des facteurs explicatifs.....	32
IV- Occupation du sol à l'horizon 2030.....	34
IV.1.1. La chaine de modélisation.....	35
IV.1.2. Réseaux neuronaux.....	36
IV.1.3. Chaine de Markov.....	37
IV.1.4. Régression logistique.....	37
IV.1.5. Algorithme d'allocation.....	38
IV.2. La carte résultante.....	39
V- Résultats et discussions.....	40
Conclusion.....	42
Remerciements.....	43
Bibliographie.....	43

Index des illustrations

<u>Illustration 1</u> : Carte de localisation de la zone d'étude.....	12
<u>Illustration 2</u> : Schéma de la méthodologie utilisée.....	13
<u>Illustration 3</u> : Illustration du type d'occupation du sol.....	15
<u>Illustration 4</u> : Droite des sols en 1990.....	22
<u>Illustration 5</u> : Droite des sols en 2001.....	22
<u>Illustration 6</u> : Boite à moustache (NDVI).....	23
<u>Illustration 7</u> : Classification de l'image Landsat de 1990.....	28
<u>Illustration 8</u> : Classification de l'image Landsat de 2001.....	29
<u>Illustration 9</u> : Evolution de la culture autour du Lac Itasy et d'Antananarivo entre 1990 et 2001.....	30
<u>Illustration 10</u> : Histogramme des changements entre 1990 et 2001.....	31
<u>Illustration 11</u> : Carte de distance des routes et du graphique de la fonction exponentielle....	32
<u>Illustration 12</u> : Exemple de la fonction HISTO sur IDRISI.....	33
<u>Illustration 13</u> : Aperçu des principales fonctions et enchaînements à la modélisation de l'occupation du sol.....	36
<u>Illustration 14</u> : Carte d'occupation du sol en 2030.....	39

Index des tableaux

<u>Tableau 1</u> : Matrice de confusion de l'image Landsat 1990 par classification supervisée.....	16
<u>Tableau 2</u> : Matrice de confusion de l'image Landsat 2001 par classification supervisée.....	17
<u>Tableau 3</u> : Matrice de confusion de l'image Landsat 1990 par segmentation.....	19
<u>Tableau 4</u> : Matrice de confusion de l'image Landsat 2001 par segmentation.....	20
<u>Tableau 5</u> : Tableau de contingence de l'image Landsat 1990.....	26
<u>Tableau 6</u> : Tableau de contingence de l'image Landsat 2001.....	26

Introduction

Energie renouvelable, écologie, tels sont les mots d'ordre des normes sociétales actuelles. Des normes toutefois pas toujours appliquées, mais qui semblent néanmoins trouver un aboutissement dans les faits et actions de certains organismes connus ou non.

Depuis la découverte des carburants d'origines fossiles notre société a eu tendance à s'appuyer sur des acquis grâce aux progrès techniques que la science lui offrit. Dès lors, chaque avancée d'ordre technique allait de pairs avec le pétrole. Nonobstant, rien n'est intarissable et face au tarissement annoncé des gisements pétroliers ainsi qu'à la hausse du prix de celui-ci, de nouvelles solutions énergétiques doivent être trouvées. Une des solutions possibles est l'utilisation de la biomasse pour la production d'énergie, sous forme, entre autres, de biocarburants.

Toutefois, il faut différencier le biocarburant que l'on dira de première génération, à celui de deuxième génération. Les carburants de première génération sont fabriqués à partir des sucres, amidons, huiles ou graisses issues de produits agricoles traditionnels, tandis que les seconds sont dérivés des composés lignocellulosiques de tout type de plantes : cultures non-alimentaires, bois, algues.

Le secteur des biocarburants de première génération est actuellement en pleine expansion. Dans les pays du Nord les efforts de production se concentrent essentiellement sur le maïs, le colza et le tournesol. Dans les pays du Sud, la production provient essentiellement de la canne à sucre et du palmier à huile. En Afrique Sub-saharienne, de nombreux espoirs sont placés dans la culture du jatropha, qui est présentée comme une plante miracle pour la production d'huile en milieu semi-aride.

A Madagascar en particulier, le secteur des biocarburants est aujourd'hui dans sa phase de lancement. Deux filières sont privilégiées par les acteurs privés, le gouvernement, mais également par les organismes d'appuis : le bioéthanol, produit à partir de canne à sucre et le biodiesel produit quant à lui à partir du jatropha. Cette dernière étant une plante retenant particulièrement l'attention car présentant des capacités de résistance à des périodes de sécheresse prolongée, nécessitant peu d'entretien, et surtout étant composé d'une graine qui contient entre 27 et 40% d'huile. L'huile extraite du jatropha peut être ainsi utilisé dans de nombreux domaines comme la médecine, le savon ou encore dans la production de biodiesel.

Présentant de nombreux avantages, le secteur des biocarburants est ainsi l'enjeu de nombreuses recherches, telle que celles menées par l'entreprise TOTAL, qui effectue aujourd'hui d'importants travaux de Recherche et de Développement, en partenariat avec le CIRAD, pour analyser la contribution éventuelle de ces solutions biomasse à la fourniture d'énergies de substitution aux hydrocarbures. C'est dans le cadre de ces actions de recherche que se situe le présent stage.

Cette contribution dépend non seulement des avancées technologiques dans la transformation de la biomasse en carburant, mais surtout dans la capacité à produire cette biomasse dans le contexte actuel de compétition pour les terres.

L'objectif général de ce stage est d'analyser l'évolution actuelle de l'occupation des sols dans la région du Bongolava à Madagascar afin d'en dégager les principales tendances et de modéliser de manière prospective l'évolution future de cette même occupation à l'horizon 2030. Cette analyse est la première étape d'une étude plus générale visant à estimer le potentiel de Madagascar en termes de plantations énergétiques (Sorgho fibre, Eucalyptus)

La première partie du rapport s'attachera à la présentation du contexte général de cette étude, et cela afin de mieux prendre toute la mesure de l'importance de ce lieu d'étude, ainsi que des méthodes utilisées pour ce faire. La seconde partie s'attachera à présenter la méthodologie retenue pour aboutir à la réalisation de la carte de l'occupation du sol pour l'année 2030. La troisième partie analysera les évolutions observées entre 1990 et 2001 et recherchera les différents facteurs explicatifs de ces évolutions. La quatrième partie sera entièrement consacrée à la modélisation de l'occupation des sols en 2030, pour dans une dernière partie procéder à son analyse.

I- Contexte général et démarche globale

I.1. Présentation du stage

I.1.1. Le CIRAD

Le CIRAD (Centre de coopération International en Recherche Agronomique pour le Développement), est un établissement public placé sous la double tutelle du ministère de l'Enseignement supérieur et de la Recherche et du ministère des Affaires étrangères et européennes.

C'est un organisme de recherche agronomique finalisée au profit des populations les plus démunies dont la mission première est de "*contribuer au développement rural des régions chaudes, par des recherches et des réalisations expérimentales, principalement dans les secteurs agricoles, forestiers et agroalimentaires*".

Le CIRAD comprend ainsi trois départements de recherche :

- Département Systèmes biologiques (BIOS).
- Département Performances des systèmes de production et de transformation tropicaux (Persyst).
- Département Environnements et sociétés (ES).

Ce stage s'inscrit dans le département Environnements et Sociétés dans l'unité propre de recherche « Ressources forestières et politiques publiques ». L'objectif général de l'unité est d'analyser la contribution et le rôle des forêts dans le développement durable des pays du Sud. Il doit allier le développement local, l'intérêt des populations et la protection de la biodiversité. L'unité se positionne volontairement à la jonction des sciences sociales et environnementales, tout en prenant en compte les enjeux à différentes échelles et entre le niveau local et global.

Le CIRAD a choisi le développement durable comme ligne de force de son action à travers le monde. Cette démarche prend en compte les conséquences écologiques, économiques et sociales, à long terme, des processus de transformation des sociétés et des territoires du Sud

La majorité des recherches menées par cet organisme se fait ainsi en partenariat avec les pouvoirs publics, les instituts de recherche, les universités, les entreprises privées, les groupements de producteurs, les organisations professionnelles paysannes, les entreprises du secteur agro-industriel, et les organisations non gouvernementales.

I.1.2. La convention de recherche avec Total

Total ou Total Fina Elf est une entreprise pétrolière française privée. Depuis quelques années, Total s'engage pour le développement durable de l'environnement d'où son engagement dans des énergies renouvelables telles que le biocarburant.

Le stage s'inscrit dans l'analyse des potentialités de développement des filières biocarburants de deuxième génération concernant Madagascar pour l'horizon 2030. Mais pour se faire, il est naturellement important de construire, entre autre, des scénarios « crédibles » de mise en place de filière (surfaces allouées, mode de production, organisation logistique) ou encore d'évaluer et de localiser dans le cadre de ces scénarios les potentiels prévisibles de biomasse. D'où la nécessité de créer une carte probable de l'occupation du sol de cette région. A noter qu'une carte d'occupation du sol représente la couverture (bio) physique observée sur la surface de la zone étudiée, elle se destine essentiellement à décrire la végétation et les constructions humaines. Elle se différencie de la carte d'utilisation du sol qui reprend les arrangements, les activités et les actions que les hommes effectuent pour produire, changer ou maintenir certaines parties de terre.

I.2. Cadre de l'étude

I.2.1. Madagascar et son potentiel dans le biocarburant

Situé dans l'océan indien et avec une superficie de 587 000 Km² c'est-à-dire la superficie de la France et de la Belgique réunis, Madagascar présente un paysage aussi contrasté, que ces 1600 km de longueur et ces 570 km de large peu le permettre. En d'autres termes, le pays offre un contraste climatique selon ses régions, allant ainsi du climat équatorial au nord au climat semi aride à l'extrême sud.

Le relief divise quant à lui le pays en trois bandes ; à savoir, du nord au sud : une bande côtière étroite à l'est, des hauts plateaux au centre, une zone de plateaux plus bas et pour finir, des plaines à l'ouest.

Enfin, l'environnement qui en découle est multiple. L'île abrite différents paysages allant d'une forêt primaire riche en biodiversité à une forêt sèche en passant par des mangroves.

De part son hétérogénéité climatique et géomorphologique, l'île possède donc un fort potentiel dans la mise en place de cultures dédiées aux biocarburants. Selon le ministère malgache de l'Agriculture, sur une superficie totale d'environ 59 millions d'hectares, la surface agricole potentielle est estimée à 36 millions d'hectares. Mais cette superficie comprend les zones de pâturage libre et extensif. La superficie de terres arables serait estimée à environ 8 millions d'hectares. D'après le recensement agricole 2004-2005, la superficie réellement exploitée serait seulement d'environ 2 millions d'hectares et celle-ci n'augmenterait en moyenne que de 0,9% par an (ABP Consulting, Rural Struc, 2007).

En considérant les savanes comme des zones pouvant potentiellement être mises en valeur, il existerait ainsi à Madagascar un potentiel très important pour le développement de l'agriculture, de l'élevage, de la foresterie et des productions dédiées à l'énergie. L'extension des surfaces agricoles pourrait concerner : les régions occidentales (le « grand Ouest ») et le Nord du pays. Le potentiel d'extension est par contre beaucoup plus limité dans les zones rurales du Sud-est et dans la partie orientale des Hautes Terres. Ces espaces sont en effet déjà caractérisés par des phénomènes de saturation foncière

I.2.2. Présentation de la zone d'étude

La zone étudiée fait partie du Moyen-Ouest d'Antananarivo. La géomorphologie générale de la région est marquée par des surfaces d'aplanissement résultant de l'altération profonde des migmatites ou des gneiss d'âge précambrien. Partout s'étendent de larges étendues de plateaux succédés par des vallons et des talwegs. Les vastes espaces en sommet de plateau, couverts par des prairies de graminées, sont traditionnellement livrés à l'élevage extensif des bovins. La région fait partie du régime climatique tropical. Elle est caractérisée par une température moyenne annuelle inférieure ou égale à 20°C. Concernant les précipitations annuelles, elles n'ont peu changé depuis les trente dernières années. Mais c'est la répartition dans l'année qui comporte parfois des mois secs trop longs au début de la saison, ne permettant pas un bon démarrage de l'agriculture surtout pour les rizicultures de bas fonds. L'agriculture, comme dans toute l'île, constitue l'activité principale. De part son passé agricole, de ces conditions climatiques et humaines, tout ceci permet à la région d'avoir une vaste gamme de cultures tel que le riz, le maïs, l'orge et le soja.

La région, depuis les années est une terre d'immigration grâce à la présence des nombreux vallons qui offrent, après quelques aménagements, de bons terrains rizicoles. Comme la riziculture est à la base du système agricole pratiqué sur les plateaux malgaches, et que le riz est par excellence la nourriture quotidienne des populations, l'attrait exercé par les *vodirano* (« trous d'eau », vallons) a provoqué un ample mouvement de colonisation du Moyen-Ouest depuis l'époque de la conquête française (1895-1897).

Illustration 1 : Carte de localisation de la zone d'étude

Carte de localisation de la zone d'étude



Les terroirs de la zone présentent des aspects relativement homogènes: les vallons sont totalement aménagés en rizières; les champs de cultures intensives se situent sur les bas de pente et plus récemment autour des cases ; sur les pentes on rencontre de nombreuses parcelles plus moins éparses de cultures de céréales ; et enfin, au sommet des collines se trouvent les pâturages assez peu boisés et quelques parcelles de culture dispersées dans la prairie.

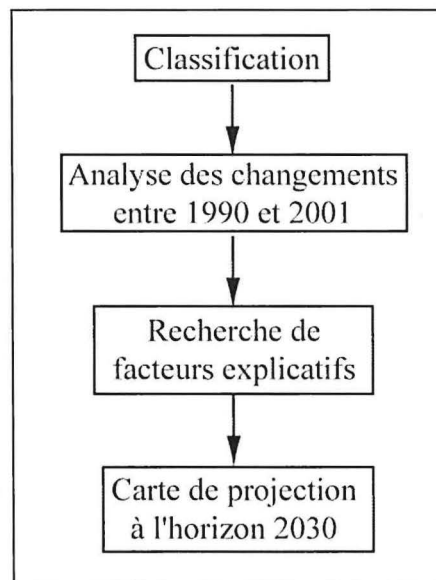
I.3. Démarche globale et présentation des outils

I.3.1. Démarche globale

Le stage s'est déroulé en 4 grandes étapes :

1. Classification de l'occupation des sols de 2 images Landsat datant de 1990 et de 2001.
2. Analyse de l'évolution entre ces deux dates et recherche de facteurs explicatifs.
3. Modélisation de l'occupation du sol à l'horizon 2030.
4. Analyse de la carte de l'occupation du sol de 2030.

Illustration 2 : Schéma de la méthodologie utilisée



I.3.2. Outils utilisés

Les 2 images utilisées furent deux images Landsat 5 et 7 de 22/03/1990 et de 29/04/2001 toute les deux de path de valeur 159 et row de 073 pris sur le site internet du Global Land Cover Facility (GLCF). Les images couvrent une bonne partie de la région étudiée de Bongolava. Concernant le choix des canaux, on a utilisé les canaux 5, 4 et 3 qui caractérisent l'infrarouge moyen, le proche infrarouge et le rouge. Choix délibéré, afin de mieux différencier les zones ayant peu ou pas de couvert végétal des zones ayant, au contraire, un fort couvert. D'autant plus que l'on se situe à la fin de la saison des pluies et c'est la phase, dans cette région moyen-ouest, de récolte du riz et de préparation du sol pour le maïs et l'orge.

Les classifications et la modélisation de l'occupation des sols à l'horizon 2030 se sont faites sous Idrisi Taïga. Le logiciel ArcGIS a été également utilisé pour la saisie des zones d'entraînement et certaines cartographies.

II- Différentes méthodes de classification

La classification est une des activités majeures en télédétection. Elle a pour but de réaliser une représentation abstraite de la situation sur le terrain. Elle utilise des paramètres de diagnostic bien définis. Elle classe les pixels ou les objets issus de la segmentation de l'image dans une catégorie donnée d'objets. Le résultat est une nouvelle image dont chaque pixel est identifié par une catégorie particulière d'objets (Defourny, 2004).

Différentes méthodes de classification sont possibles. Dans le cadre de cette analyse 4 méthodes ont été implémentées afin d'obtenir le meilleur résultat possible.

II.1. la méthode supervisée

II.1.1. Définition

La classification supervisée se pratique si les domaines des classes sont connus a priori. Toutes les méthodes supervisées comprennent deux phases : la phase d'entraînement et la phase de classification. Lors de la première phase, à l'aide d'échantillons de pixels dont la classe d'appartenance est connue, on établit des zones d'entraînement pour chaque classe. Une zone d'entraînement, est une zone de l'image dont l'occupation du sol est connue de l'utilisateur. Dans la seconde phase, on classe les pixels de l'ensemble de l'image par comparaison de chaque pixel avec les domaines connus. La procédure assigne ainsi à chacun des pixels de l'image l'une des catégories d'occupation du sol. Selon son appartenance vraisemblable à la catégorie considérée.

II.1.2. Méthode

Lors d'une classification supervisée, il convient de définir un ensemble de classes auxquelles on pourra attribuer les différents pixels. La définition de ces classes est évidemment fonction de la région d'étude et du degré de précision souhaité. Les classes ont été définies a priori en considérant les cartographies d'occupation des sols existantes, notamment la cartographie effectuée par le Royal Botanic Garden, dans le cadre du projet

« Madagascar Vegetation Atlas » (Moat et Smith, 2007), et les éléments a priori visibles sur les images Landsat. Dans un premier temps 11 ensembles ont été définis: Culture sous forêt, savane, culture de bas fond, culture sèche, forêt dense, sol nu, urbain, ombre de nuage, nuage, lac et rivière.

- Culture de bas fond : Se sont la plus part du temps des cultures de riz.
- Culture sèche : culture n’ayant pas besoin d’apport en eau constant tel que le maïs.
- Culture sous forêt : culture besoin d’un minimum d’apport en eau et situé à proximité des point d’eau.

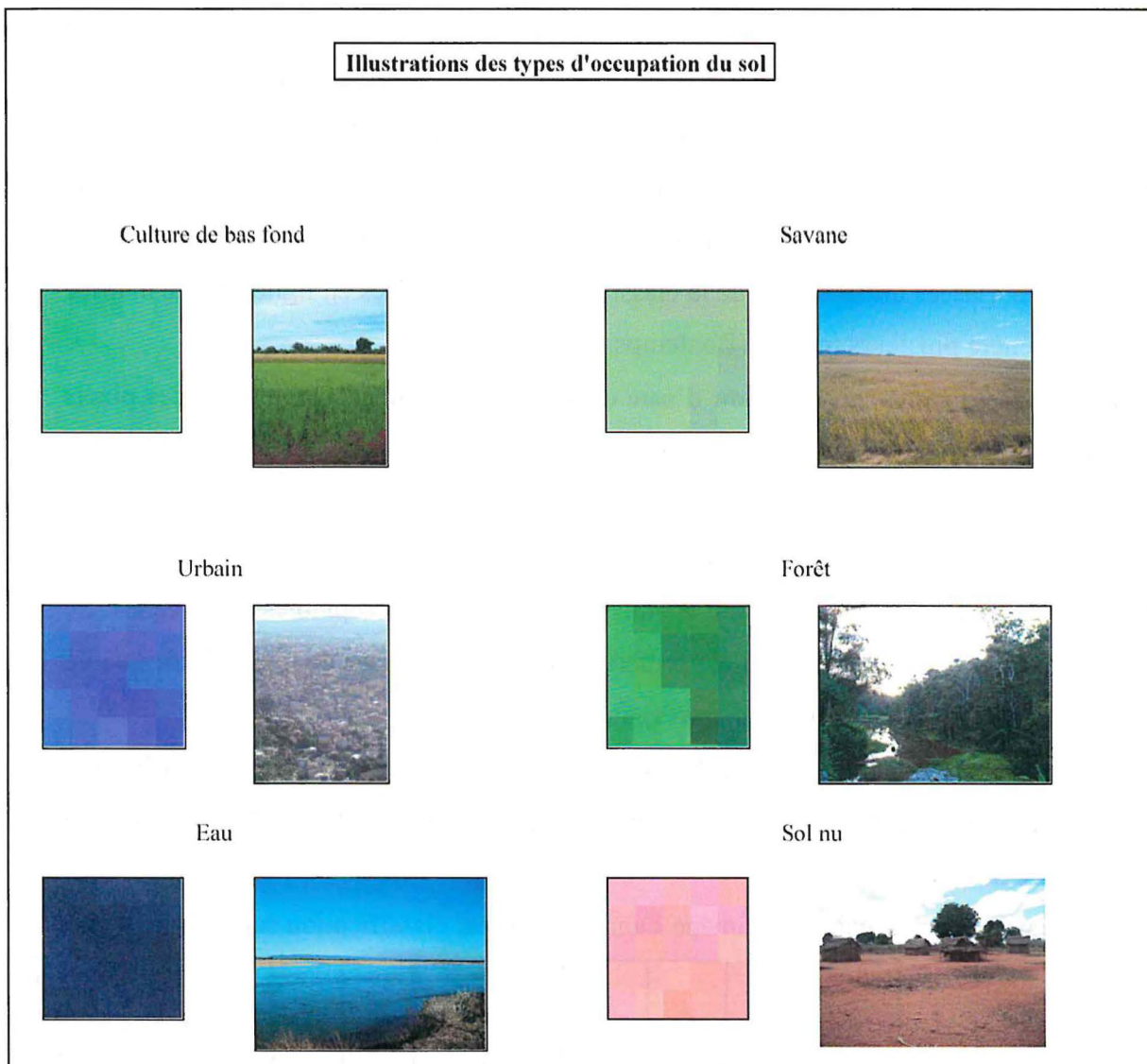


Illustration 3 : Illustration du type d’occupation du sol

Les zones d'entraînements ont été saisies en s'aidant de la « vérité terrain » qu'offrent les images à très haute résolution disponibles sous Google Earth. Ces images d'une résolution d'environ 0.5m permettent parfaitement de distinguer la plupart des classes initialement définies. Malgré cette très fine résolution, des confusions restent possibles entre les champs de cultures sèches (maïs, sorgho) peu entretenus ou mis en jachère et les savanes.

II.1.3. Validation

La validation d'une classification se fait en analysant une matrice de confusion. Il s'agit de relever un minimum de points dans chacune des classes présentes sur l'image et un maximum de points au total sur l'ensemble de l'image et ensuite de vérifier, pour ces points, la correspondance entre la vérité terrain (classe attribuée a priori par l'utilisateur) et la classe statistiquement attribuée par le logiciel. Les résultats de cette comparaison sont ensuite repris dans une matrice de confusion. Les différentes classes de référence utilisées sont positionnées en colonne et les classes utilisées lors de la classification sont reprises en lignes. Cette matrice de confusion génère plusieurs indices (Bontemps, 2004) :

- **Le pourcentage de commission d'une classe** : Le classificateur a affecté des pixels dans une classe autre que celle à laquelle ils appartiennent.
- **Le pourcentage d'omission d'une classe** : Le classificateur n'a pas su affecter à une classe de test. Ils sont considérés comme non classés.
- Il est à noter que les erreurs d'omission sont plus acceptables que celles de commission dans ce sens ou il est préférable de ne pas classer de pixel plutôt que de l'affecter à une classe qui ne lui correspond pas.
- **Le coefficient Kappa** : Il traduit la réduction de l'erreur commise lors de l'utilisation de la classification par rapport à l'erreur qui se produirait dans le cas d'une attribution aléatoire des classes.

Tableau 1 : Matrice de confusion de l'image Landsat 1990 par classification supervisée

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	Erreur de commission (%)
1- Culture forêt	333	430	34	797	113	111	0	0	0	0	0	81,68
2- Savane	10	10021	534	603	634	52	0	0	0	0	0	15,46
3- Riziculture	0	202	15623	131	2001	12	0	142	230	13	5	14,9
4- Culture sèche	30	656	442	3169	693	46	40	0	0	0	0	37,57
5-Forêt	0	9	1046	44	36255	0	0	36	19	0	0	3,08

6- Sol nu	7	346	129	150	30	2100	7	17	5	0	0	24,76
7- Urbain	0	9	13	130	3	15	2205	8	0	0	7	7,74
8-Ombre nuage	0	0	367	0	328	0	0	4087	0	28	0	15,03
9- Nuage	0	0	0	0	4	5	1	0	4523	0	0	0,22
10- Lac	0	0	11	0	1	0	0	0	0	28535	0	0,04
11- Rivière	0	0	92	0	0	0	1	0	0	30	345	26,28
Erreur d'omission (%)	12,37	14,15	14,59	36,92	9,5	10,29	2,17	4,73	5,32	0,25	3,36	
Coefficient Kappa = 88,42%												

Tableau 2 : Matrice de confusion de l'image Landsat 2001 par classification supervisée

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	Erreur de commission (%)
1- Culture forêt	1529	3330	244	2039	97	229	17	0	33	0	0	79,66
2- Savane	378	13801	4289	1869	618	774	22	13	0	0	0	36,59
3- Riziculture	81	2047	13979	770	906	98	110	413	1	18	67	24,4
4- Culture sèche	614	3296	1572	7716	492	169	384	0	3	0	0	45,84
5-Forêt	30	582	498	185	35480	5	3	149	0	0	0	3,93
6- Sol nu	68	1347	647	139	14	5366	7	30	0	0	0	29,56
7- Urbain	6	41	397	603	9	23	7060	25	12	1	18	13,85
8-Ombre nuage	0	277	102	22	233	83	0	10864	0	229	0	8,01
9- Nuage	9	0	8	1	0	0	17	0	14908	0	0	0,23
10- Lac	0	0	166	0	0	0	0	0	0	28874	0	0,57
11- Rivière	0	0	650	0	0	0	2	0	0	130	660	54,23
Erreur d'omission (%)	43,68	44,17	38,01	42,18	6,26	20,47	7,37	5,48	0,33	1,29	11,41	
Coefficient Kappa = 78,74%												

Tout d'abord, l'on observe que le coefficient Kappa sur les deux images est satisfaisant. Cependant, ces résultats sont à nuancer.

- La matrice de confusion a été calculée sur les seules parcelles d'entraînement et non pas sur un nouveau réseau de points de terrain.
- Pour ce qui est des erreurs de commission le pourcentage d'erreur varie d'une classe à l'autre. En effet, la classe de la culture de forêt a le plus fort pourcentage d'erreur sur les deux images. Ceci est dû à la forte corrélation entre cette classe et la Savane. En

effet, la savane a un faible couvert végétale tout comme la culture de forêt a la même époque, fin de saison des pluies.

Tant dis que les classes lac et nuages ont les plus faible taux d'erreur se qui est compréhensible étant donnée que se sont de grandes étendus sur l'image et ont des pixels bien caractéristique.

- Pour se qui est des erreurs d'omission, on retrouve les plus forts pourcentages d'erreurs dans les mêmes classes que précédemment.

Les erreurs, aussi bien de commission que d'omission, sont dues en grande partie au trop grand nombre de classes que l'on a voulu différencier par rapport aux différences statistiques entre les signatures spectrales. Les pixels de sol nu ressemblent aux pixels d'urbain ou encore les pixels de forêt sont identiques aux pixels de culture de bas fond. D'autant plus que selon que les versant sont exposé ou non au soleil, les pixels situés dans l'ombre rajoute des erreurs dans la classification. Sans compté le fait que l'ombre des nuages, leur pixel, sont quasi identique, aux pixels de la classe eau.

Pour y remédier, fut procédé à un remaniement de classes, pour n'en obtenir plus que 6 :

- Culture qui regroupe les classes culture forêt, riziculture, culture sèche. Ce qu'on définit par Culture se sont surtout les cultures de bas fond essentiellement les rizières.
- Forêt
- Savane qui prend aussi la classe sol nu
- Urbain
- Eau qui regroupe les classes lac et rivière
- Autres qui prend les classes nuage et ombre de nuage.

Il ressort de l'analyse résultant du regroupement des classes que moins il y a de classes, plus grande est la précision de la classification. En conséquence, les erreurs de confusion diminuent quand le nombre de classes diminuent. En effet, l'indice Kappa pour 1990 est de 90,08 % et pour 2001 il est de 82,68 %. A noter, que les erreurs de commission et d'omission sont moindre, mais d'un point de vu visuel la classification n'est pas satisfaisante. Ceci vient du fait que certaine classe se confonde encore comme entre la classe forêt et la classe culture. Ainsi, ce n'est pas parce que l'on a un indice Kappa élevé que la classification est bonne et que de nombreux pixels peuvent être mis dans la classe qui ne leur est pas approprié. C'est pour cela que fut utilisée une autre méthode de classification : la segmentation spatiale.

II.2. La segmentation spatiale

II.2.1. Définition

La segmentation spatiale est un procédé par lequel l'image est divisée en micro-régions considérées comme homogènes d'un point de vue spectral. La procédure groupe donc des pixels selon leur similarité spectrale. Le critère définissant la similarité varie d'un logiciel à l'autre. Plus le critère d'homogénéité est strict, plus la segmentation aboutit à un nombre de micro-régions important.

II.2.2. Méthode

On a procédé à différents tests afin d'obtenir une segmentation qui ne soit ni trop grande ni trop petite mais qui permet de voir au mieux les différentes classes. En effet, des tests de segmentation de valeur 0, 5, 10, 15 et 20 furent effectués. Au fur et à mesure que la valeur augmente la segmentation devient plus large. Enfin, pour notre zone d'étude et selon le résultat dont on souhaite obtenir, la segmentation de valeur 10 a été retenue.

II.2.3. Validation

Pour la validation, la même méthode que celle employée pour la classification supervisée fut utilisée, à savoir une matrice de confusion.

Tableau 3 : Matrice de confusion de l'image Landsat 1990 par segmentation

	1	2	3	4	5	6	Erreur de commission (%)
1- Culture	22771	143	964	0	0	383	6,14
2- Forêt	3799	6760	246	0	0	488	40,14
3- Savane	2699	0	18043	0	0	0	13,01
4- Urbain	0	0	68	1467	0	0	4,43
5- Eau	797	0	0	0	8932	0	8,19
6- Nuage	0	0	0	0	0	816	0
Erreur d'omission (%)	24,26	2,07	6,61	0	0	51,63	
Coefficient Kappa = 80,59%							

Tableau 4 : Matrice de confusion de l'image Landsat 2001 par segmentation

	1	2	3	4	5	6	Erreur de commission (%)
1- Culture	44401	49	1471	0	0	0	3,31
2- Forêt	4853	8304	2540	0	0	0	47,1
3- Savane	8722	0	23262	13	0	0	27,3
4- Urbain	0	0	62	1443	0	0	4,12
5- Eau	3233	0	0	0	23555	3326	21,78
6- Nuage	0	0	0	0	0	4123	0
Erreur d'omission (%)	27,46	0,59	14,9	0,89	0	44,65	
Coefficient Kappa = 74,21%							

Tout d'abord, le coefficient Kappa sur les deux images est correct mais moins bien que sur la classification supervisée. Cependant, la classification est visuellement meilleure mais avec encore cependant des incohérences dans certaines zones. Les erreurs de commission et d'omission sont plus faibles que sur la classification supervisée. Ceci est du à la classe culture qui a des pixels proche à l'ensemble des classes. En effet lorsque la culture de bas fond est irriguée, elle se rapproche de la radiométrie de la classe forêt, de la savane ou de l'eau. A l'inverse si la culture est moins irriguée elle se rapproche des pixels de savane. D'autant plus que la segmentation utilisée n'est peut-être pas assez fine du fait que certains segments englobaient les cultures de bas fond et celle des savanes proches.

Ainsi, malgré une fois de plus, un coefficient Kappa bon, la classification n'est là encore pas satisfaisante, des incohérences subsistent.

Pour obtenir une meilleure classification, la décision fut prise de recourir aux indices de végétation et d'allier des méthodes de seuillage d'indice aux méthodes de classification supervisée.

II.3. Choix d'une méthode mixte

II.3.1. Les indices de végétation : NDVI et TSAVI

Un indice s'exprime selon un intervalle choisi arbitrairement, de 0 à 1, de 0 à 100, de -1 à 1 ou tout autre intervalle numérique. Un indice représente une variable thématique. L'indice de végétation vise plusieurs objectifs :

- L'estimation de la masse végétale verte recouvrant le sol
- La description de l'état phénologique de la couverture végétale
- La prévision des récoltes
- L'inventaire de culture végétale à l'échelle continentale

On différencie les indices de végétation sans compensation tel que le NDVI *Normalized Difference Vegetation Index*, des indices de végétation avec compensation comme le TSAVI *Transformed Soil Adjusted Vegetation Index* (Baret *et al.*, 1989) qui utilise la droite des sols. D'autres indices de végétation avec compensation se basent sur les effets atmosphériques ou simultanément des effets des sols et de l'atmosphère.

Tout d'abord, sachant que la végétation réfléchit fortement dans le proche infrarouge et absorbe fortement dans la portion du spectre rouge, le TSAVI *Transformed Soil Adjusted Vegetation Index* (Baret *et al.*, 1989) a permis de mieux discriminer la couverture végétale des perturbations générées par les fortes réflectances des sols nus de notre zone d'investigation.

L'avantage de cet indice, c'est qu'il exploite la droite des sols en introduisant une constante correctrice (0,08) de l'effet du sol. Il est donné par l'équation suivante :

$$TSAVI = \frac{a(PIR - aR - b)}{(R + aPIR - ab) + 0.08(1 + a)}$$

Où a et b sont respectivement la pente et l'ordonnée à l'origine de la droite des sols.

Un TSAVI > 0 signifie que le pixel est recouvert par une végétation moins dense.

Un TSAVI = 0,7 signifie que le pixel est recouvert par une végétation très dense.

Un TSAVI = 0 correspond aux pixels de sols nus.

Un TSAVI < 0 survient surtout pour les surfaces en eau de très faible teneur minérale ou chlorophyllienne.

Pour obtenir la droite des sols, on procède à l'identification d'un certains nombres d'objet de sol nu sur les images, dont on a retrouvé et identifié sur Google Earth. Ensuite, est fait un relevé des valeurs radiométriques de ces objets, dans le canal rouge et le canal infrarouge.

Illustration 4 : Droite des sols en 1990

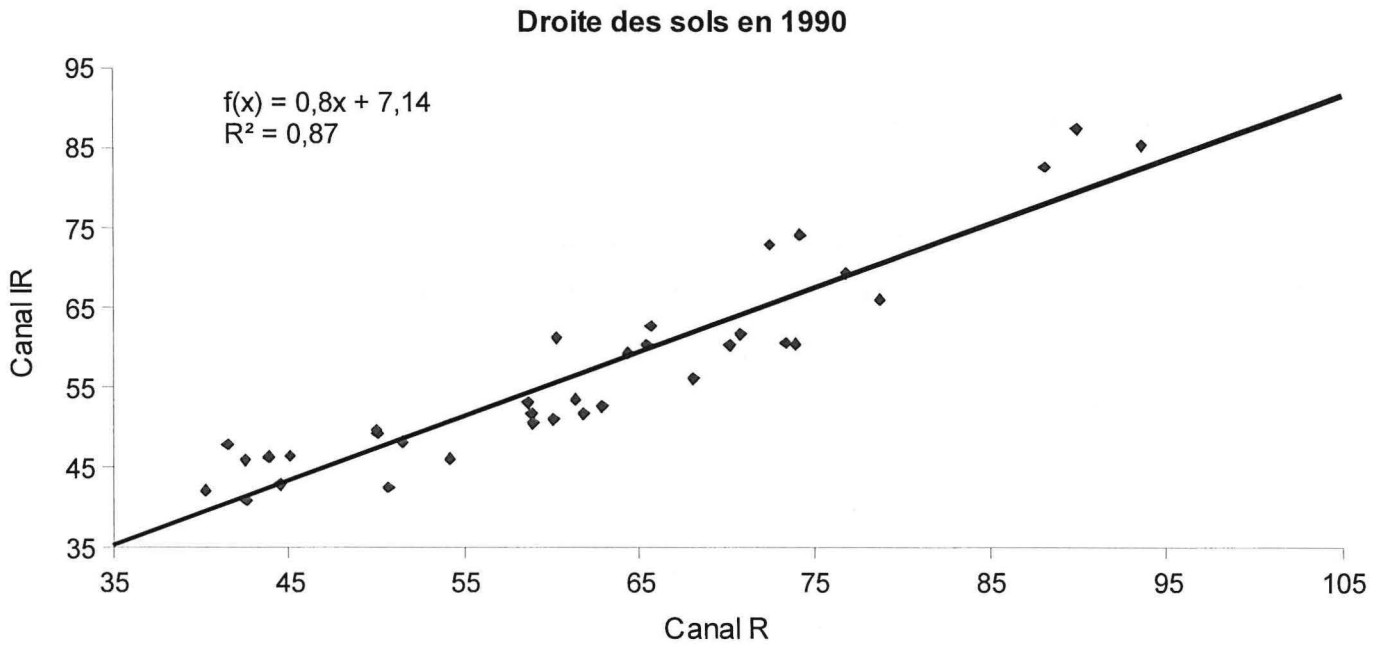
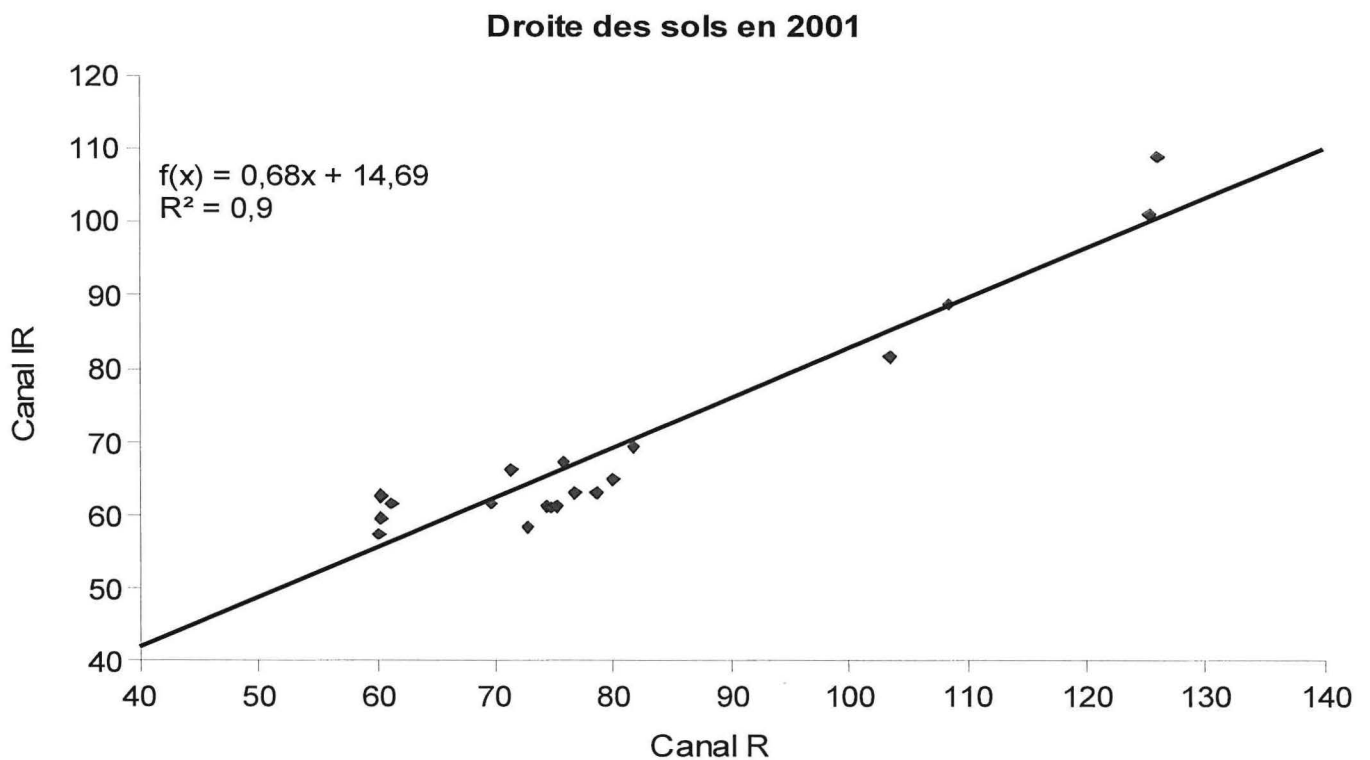


Illustration 5 : Droite des sols en 2001

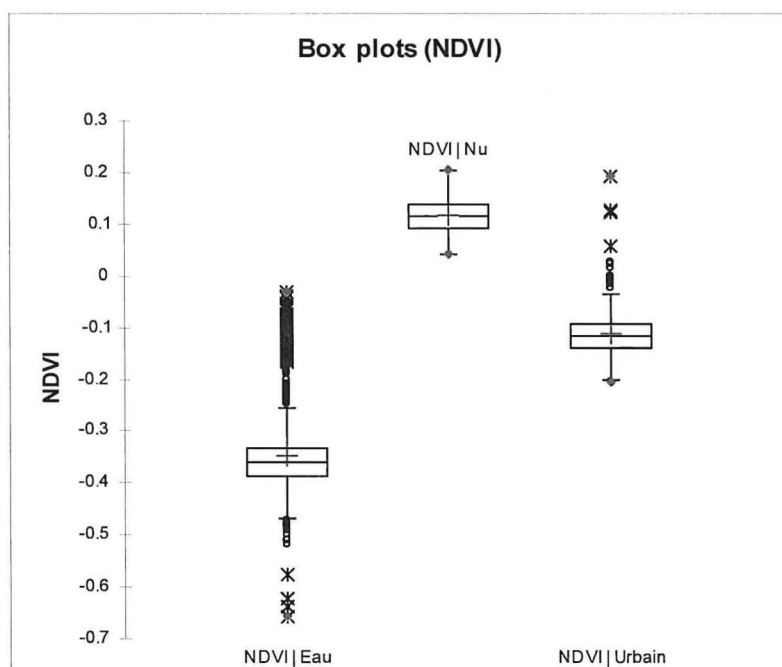


II.3.2. Le seuillage : Définition

Le seuillage consiste à déterminer ou situer les valeurs limites destinées à séparer des classes. Ces valeurs limites sont des valeurs radiométriques. On part de l'hypothèse qu'un mode a de fortes chances de représenter le centre d'une classe. L'histogramme effectué présente plusieurs modes. On estime les points bas de la distribution censés signifier une frontière entre classes. Ceux-ci sont choisis comme seuils des intervalles définissant les classes. Les pixels sont enfin classés selon l'intervalle où ils se trouvent.

Le graphique ci-dessous illustre les valeurs NDVI prises par 3 classes d'occupation : Eau, Sol nu, et Urbain. On voit que le NDVI discrimine parfaitement les classes sol nu (NDVI entre 0 et 0.2) et l'eau (NDVI inférieur à 0). Un seuillage du NDVI à 0 permet donc de séparer ces deux classes. En revanche des confusions sont possibles entre urbain et sol nu et entre urbain et eau.

Illustration 6: Boite à moustache (NDVI)



II.3.3. Méthode

Après analyse des deux indices NDVI et TSAVI, il est apparu que le TSAVI discriminait mieux les différentes classes recherchées.

Sur chaque image, le principe consiste à réaliser dans un premier temps un seuillage radiométriques sur le TSAVI sur la base d'informations de terrain prises sur Google Earth. De ce fait, plusieurs étapes préalables à la classification de ces deux images ont été indispensables :

- extraction du bâti

La procédure consiste à faire une requête spatiale de type "*Recode*" sur les valeurs radiométriques relatives aux zones de bâti très bien discriminées par le TSAVI.

- extraction des zones forestières

Pour cartographier ce thème, les valeurs du TSAVI $> 0,7$, correspondant à une végétation très dense ont été isolées. Cependant, à l'intérieur de cette classe subsistaient encore des zones correspondant à des parcelles de culture relativement dense. Celle-ci, ont été séparées du reste pour ne garder que les zones strictement forestières.

- extraction des mares permanentes et des surfaces en eau libre

Comme pour le bâti, ce type d'objet a été isolé par un seuillage sur le TSAVI. La procédure consiste à faire une requête spatiale sur les valeurs radiométriques relatives à toutes ces zones.

- extraction des nuages

Par seuillage radiométrique, la couche nuageuse a pu être isolée. Par la suite, une seule couche dite nuage à été gardée réunissant les deux précédentes.

Après l'isolement des quatre thèmes précédents, un masque fut réalisé afin de les extraire des images initiales.

Par la suite, une analyse en composante principale (ACP) fut réalisée et a permis ainsi de discriminer de manière significative les trois classes restantes: savane, sol nu et zone de culture. Sur chaque ACP, une classification supervisée est exécutée. La procédure consiste à mettre en relation tous les échantillons caractérisant le mieux chaque classe restante avec les valeurs de l'ACP.

Une ACP a pour objectif de décrire un ensemble d'observations décrites par des variables numériques par de nouvelles variables en nombre réduit. Ces nouvelles variables seront des combinaisons linéaires des variables originales et porteront le nom de composantes

principales (CP). En principe, la réduction du nombre de variables utilisées pour décrire un ensemble de données provoque une perte d'information. L'ACP procède de façon à ce que cette perte d'information soit la plus faible possible. On peut insinuer que l'ACP est une technique de réduction de dimensionnalité.

II.3.4. Validation

La qualité de cette classification est validée par une matrice des confusions (Tableau 5 et 6). Cette matrice est un tableau de contingence où figure en ligne en pourcentage le nombre de pixels appartenant à la classe choisie et en colonnes les confusions possibles avec les autres classes. Le taux de réussite de notre classification est de l'ordre de 93%.

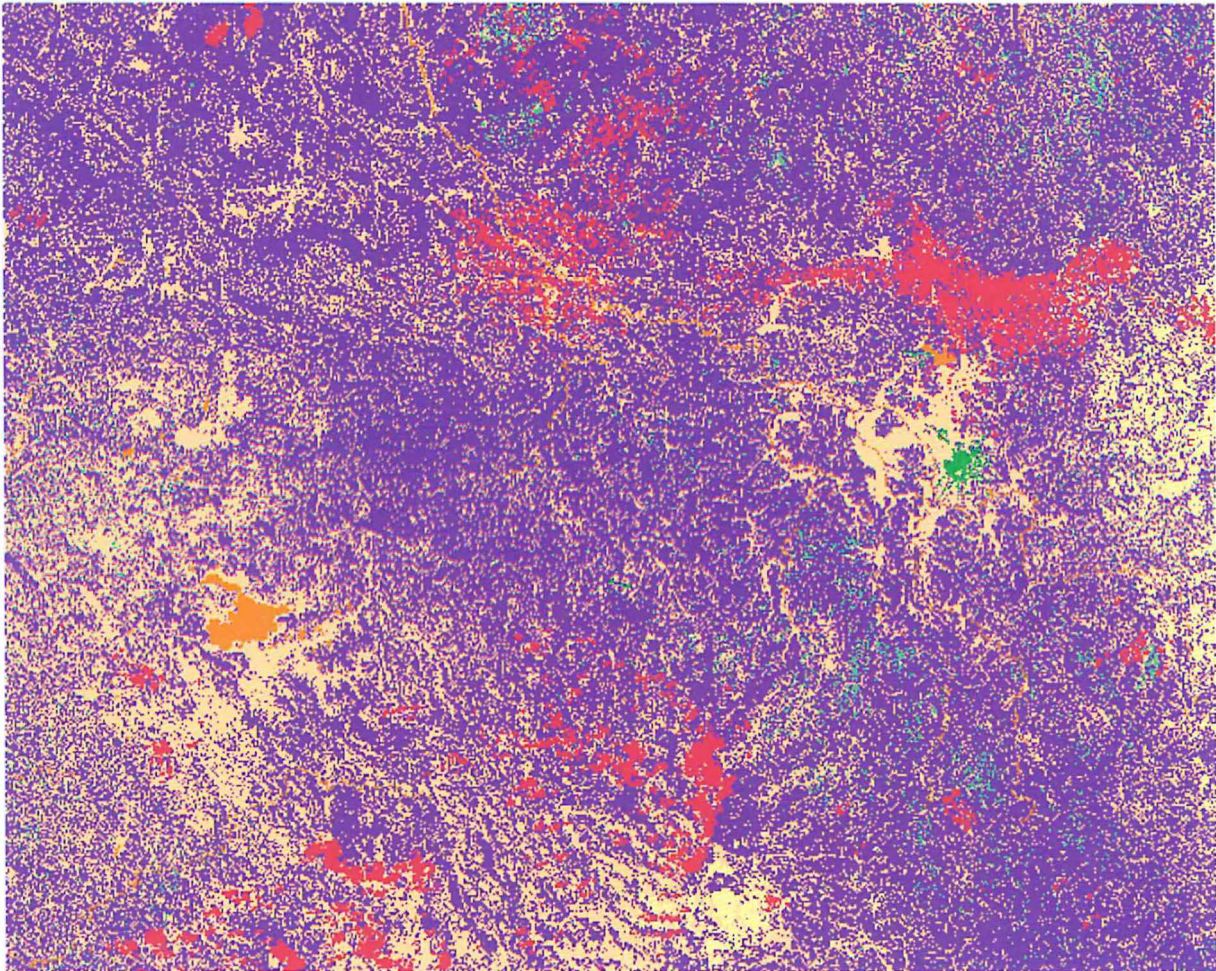
Malgré ce taux de réussite, positivement significatif de cette procédure de réduction de l'hétérogénéité de chaque image, il n'en demeure pas moins que quelques zones présentent encore des confusions radiométriques.

Du fait de la complexité du paysage, cette dernière méthode de classification se révèle la plus proche de la réalité, ou tout du moins la plus respectable.

Les résultats obtenus sont illustrés par les deux cartes suivantes

Illustration 7: Classification de l'image Landsat de 1990

Classification 1990









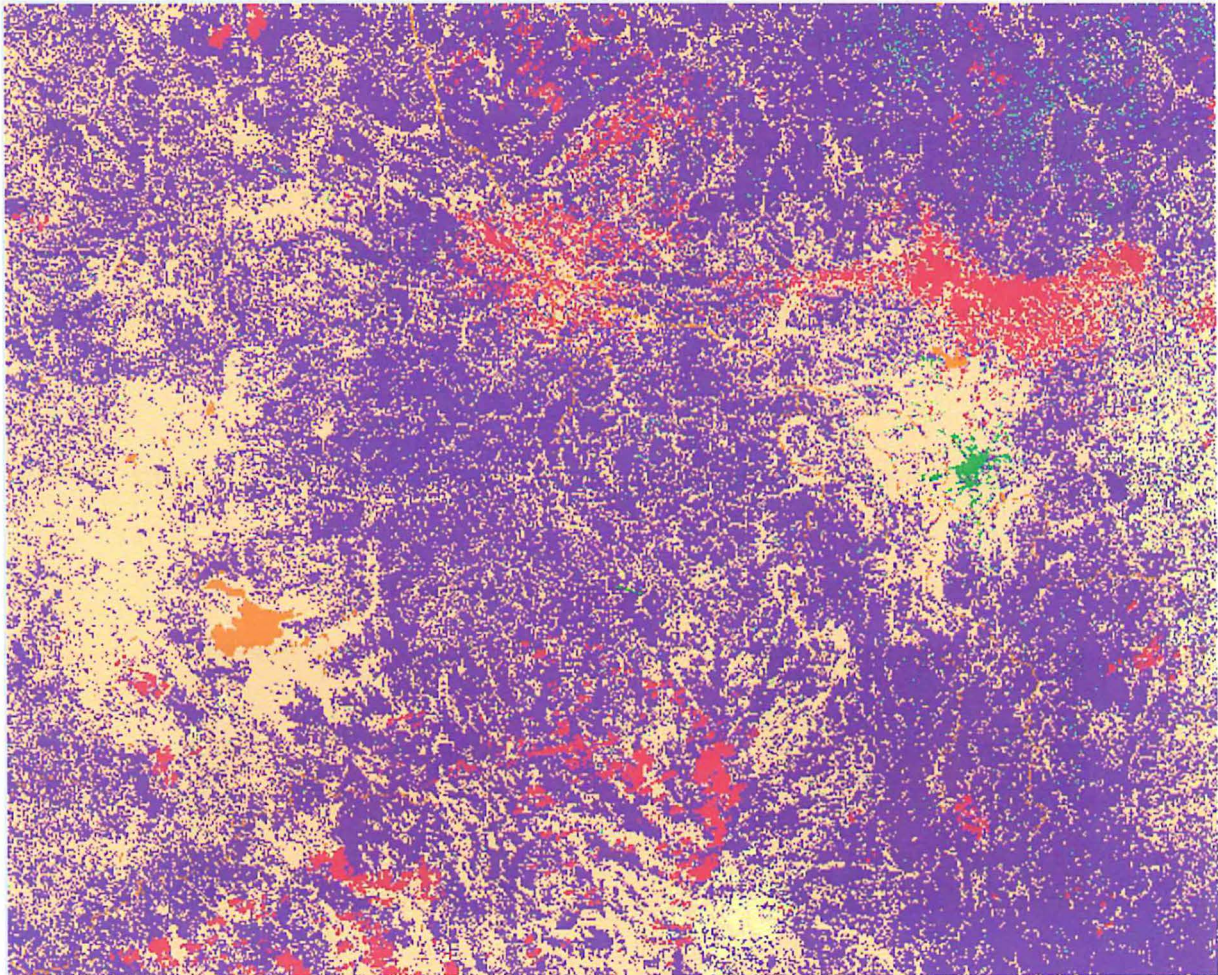







Légende	
	Savane
	Culture
	Forêt
	Sol nu
	Eau
	Nuage

Illustration 8: Classification de l'image Landsat de 2001

Classification 2001



Légende	
	Savane
	Culture
	Forêt
	Sol nu
	Urbain
	Eau
	Nuage

III- Analyse de l'évolution entre 1990 et 2001

Dans cette partie, une comparaison des deux classifications sera faite pour permettre d'observer les facteurs qui ont fait évoluer négativement ou positivement une classe vers l'autre.

III.1.1. Analyse des changements

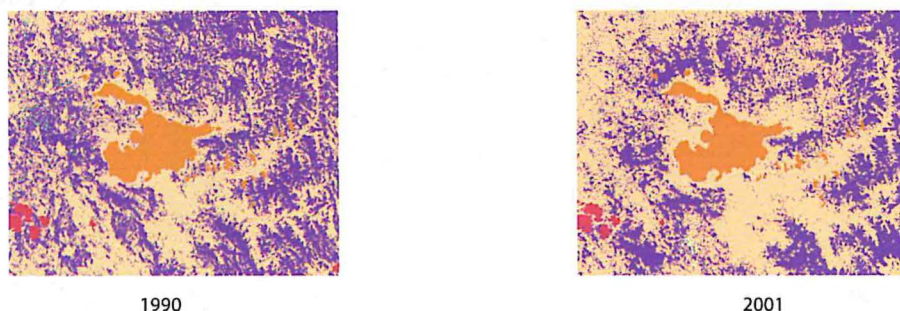
Entre 1990 et 2001, on peut observer différentes évolutions.

– Culture

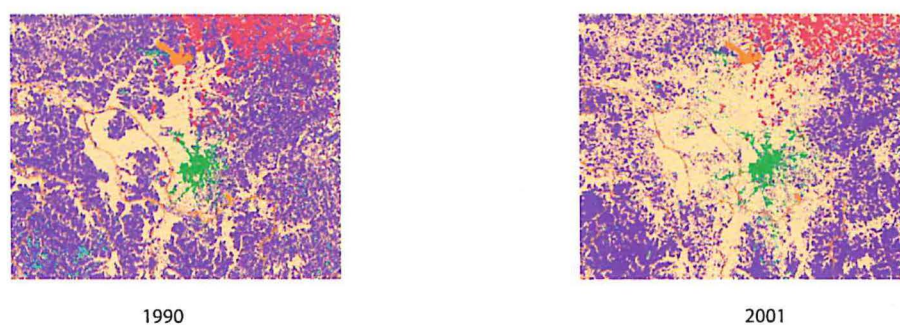
L'évolution de la culture est positive entre 1990 et 2001. En 1990, on a 383 804 hectares et en 2001 on a 464 778 hectares soit une augmentation de 80 974 hectares soit une progression de 21% en 10 ans. Cette augmentation confirme que cette région est véritablement un front pionnier agricole où de nombreux ménages venant de l'ensemble de l'île s'installent.

Illustration 9 : Evolution de la culture autour du Lac Itasy et d'Antananarivo entre 1990 et 2001

Evolution de la culture autour du lac Itasy entre 1990 et 2001



Evolution de la culture autour d'Antananarivo entre 1990 et 2001



– Savane

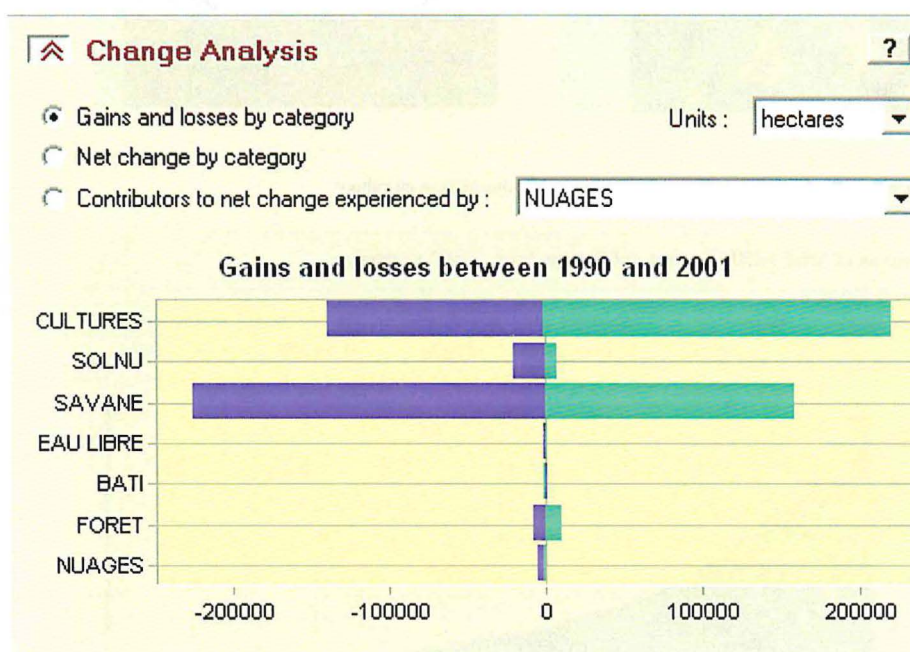
La savane a régressé, passant de 910555 hectares à 844725 hectares soit une baisse de 7%. Baisse en faveur des cultures qui a gagné 78 814 hectares sur les celle-ci. En effet, la savane a plus de chance de devenir des cultures de part sa proximité aux zones de culture existante et aussi du à sa forte prépondérance sur la région.

– Forêt

Enfin concernant la forêt, elle a augmenté grâce aux plantations de bois d'énergie, passant de 21 325 hectares à 23 036 hectares. Augmentation faible de 8% mais qui a surtout pris le pas sur les cultures (2 203 hectares) mais a régressé en faveur de la savane (369 hectares).

Le graphique suivant résume l'ensemble des évolutions observées. Les deux grandes transitions majeures sont Cultures -> Savane et Savane -> Cultures. Ces changements sont caractéristiques d'une agriculture itinérante sur les versants et les plateaux avec des temps de jachère relativement courts.

Illustration 10 : Histogramme des changements entre 1990 et 2001

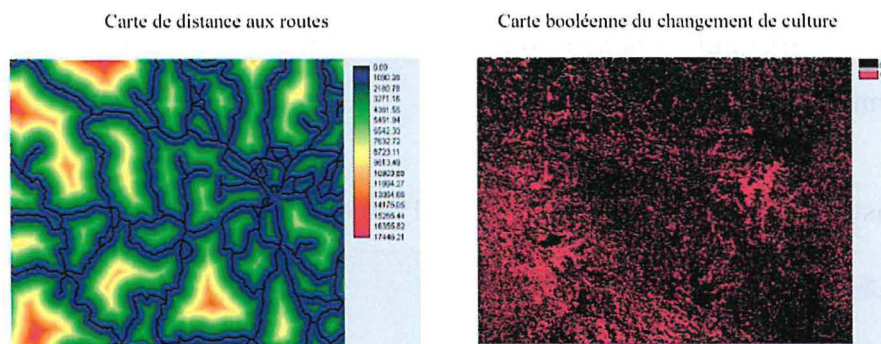


III.1.2. Recherche des facteurs explicatifs

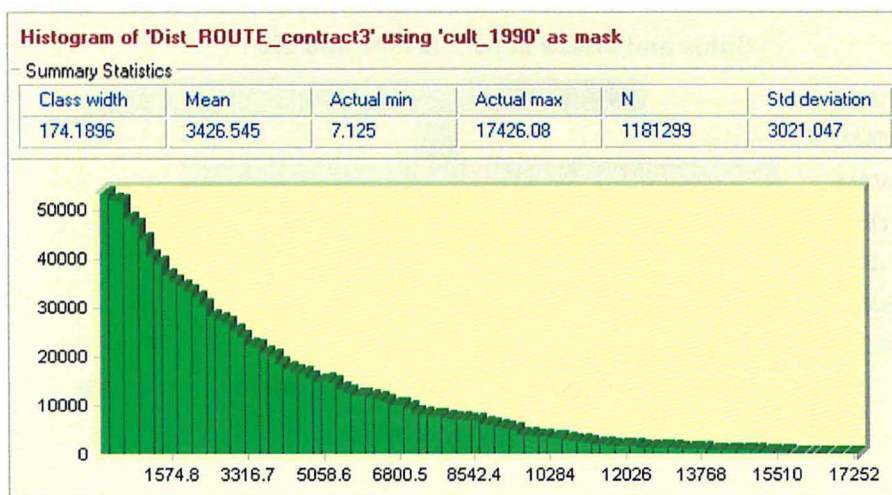
Afin d'expliquer statistiquement les évolutions de l'occupation des sols et en particulier les changements : Savane -> Culture et Culture -> Savane, on a cherché à corrélérer les fréquences de changement avec différents facteurs explicatifs a priori : distance aux routes, distance aux fond de talweg, les pentes, distance aux cultures de 1990, distance aux savanes de 1990 et l'indice de fragmentation.

On a analysé la pertinence de chaque facteur par une analyse graphique de sa corrélation avec la fréquence des transitions dans la classe d'occupation des sols considérée. Pour cela on a généré des cartes booléennes du changement (0 : pas de changement, 1 : changement), puis on a tracé un graphique du nombre de pixels de changement en fonction de chaque facteur supposé au moyen de la fonction HISTO d'IDRISI.

Illustration 11 : Exemple de la fonction HISTO sur IDRISI



Histogramme de la distance aux routes en fonction du changement en culture



L'histogramme montre bien que plus on s'éloigne des routes moins on a de chance de voir s'implanter des cultures.

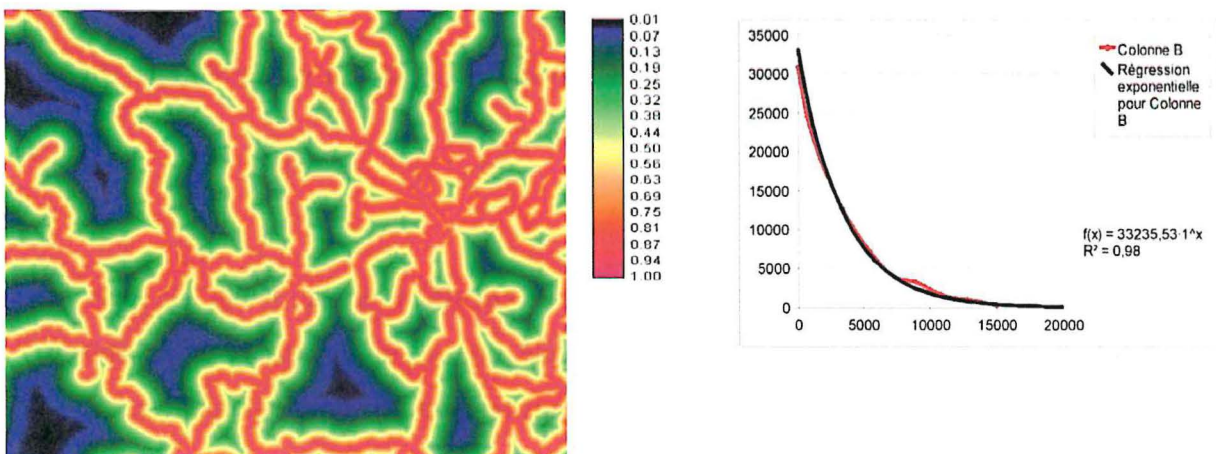
Par la suite, la relation entre fréquence du changement et facteur explicatif a ensuite été linéarisée en appliquant différents types de fonctions au facteur explicatif. Cette étape est nécessaire pour modéliser correctement les probabilités de transition.

– Distance aux routes

Pour produire cette carte de distance, un relevé des principales voies de la région prises. Afin de linéariser la relation entre la distance et la fréquence de changement, on a appliqué une fonction exponentielle négative à la distance. On émet l'idée que les routes jouent un rôle non négligeable dans l'évolution, c'est à proximité de celle-ci que les cultures ont le plus de chance de s'y implanter.

Illustration 12 : Carte de distance des routes et du graphique de la fonction exponentielle

Carte de distance des routes avec la fonction exponentielle



– Distance au talweg

La carte des talwegs a été créée à partir d'un modèle numérique de terrain (MNT) et de la fonction 'Distance' sur le logiciel Idrisi. Le MNT considéré fut le SRTM au pas de 90m. On a procédé par la suite à une linéarisation de la fonction distance par une fonction logarithmique.

Les cultures de bas fond se sont mis dans les fond de vallée, ainsi avec la carte de distance au talweg on insiste sur le fait que plus on s'éloigne d'eux on a moins de chance de trouver des cultures.

– Les pentes

La fonction 'Slope' sur Idrisi permet à partir du MNT de faire ressortir les pentes. Comme précédemment la fonction exponentielle a permis de linéariser. On insinue que sur les faibles pentes la culture va plus facilement s'installer.

– Distance aux cultures de 1990

Pour ce faire, fut extrait de la classification de 1990 les zones de culture pour produire une carte des distances aux cultures de 1990, toujours avec la fonction 'Distance'. On a appliqué la fonction inverse pour linéariser. A noter que cette carte de distance aux cultures n'a été appliquée que pour le modèle de changement de la savane à la culture.

On insiste sur le fait que c'est à partir des anciennes cultures que l'évolution va se faire.

– Distance aux savanes de 1990

Même procédé que précédemment pour la savane. Mais cette fois-ci on la appliqué pour le modèle de changement culture à la savane.

Même idée que pour les cultures, là où on a de la savane en 1990, s'il y a évolution, elle se fera à partir des savanes existantes.

– Indice de fragmentation

L'indice de fragmentation a été utilisé sur la classification de 1990. On part du principe qu'une parcelle isolée dans un paysage morcelé, que se soit de culture ou de savane, a plus de chance de changer qu'une parcelle incluse dans un grand ensemble homogène.

IV- Occupation du sol à l'horizon 2030

Pour produire la carte de l'occupation du sol à l'horizon 2030, nous avons eu recours au logiciel IDRISI avec son programme Land Change Modeler. Il analyse le changement de la couverture du sol des terres passées en modélisant la potentialité des changements afin de prédire ses changements dans l'avenir.

IV.1.1. La chaîne de modélisation

a) Calcul des probabilités de transition

A chaque occupation des sols on associe un ensemble de cartes de probabilité de changement vers une autre classe occupation du sol. Ces probabilités de changements sont calculées par régression logistique ou réseaux neuronaux en fonction des observations faites entre 1990 et 2001 et en fonction des facteurs explicatifs présumés.

Compte tenu des faibles changements des classes forêt, eau, et sol nu, seules les transitions Culture -> Savane et Savane -> Culture ont été estimées et modélisées.

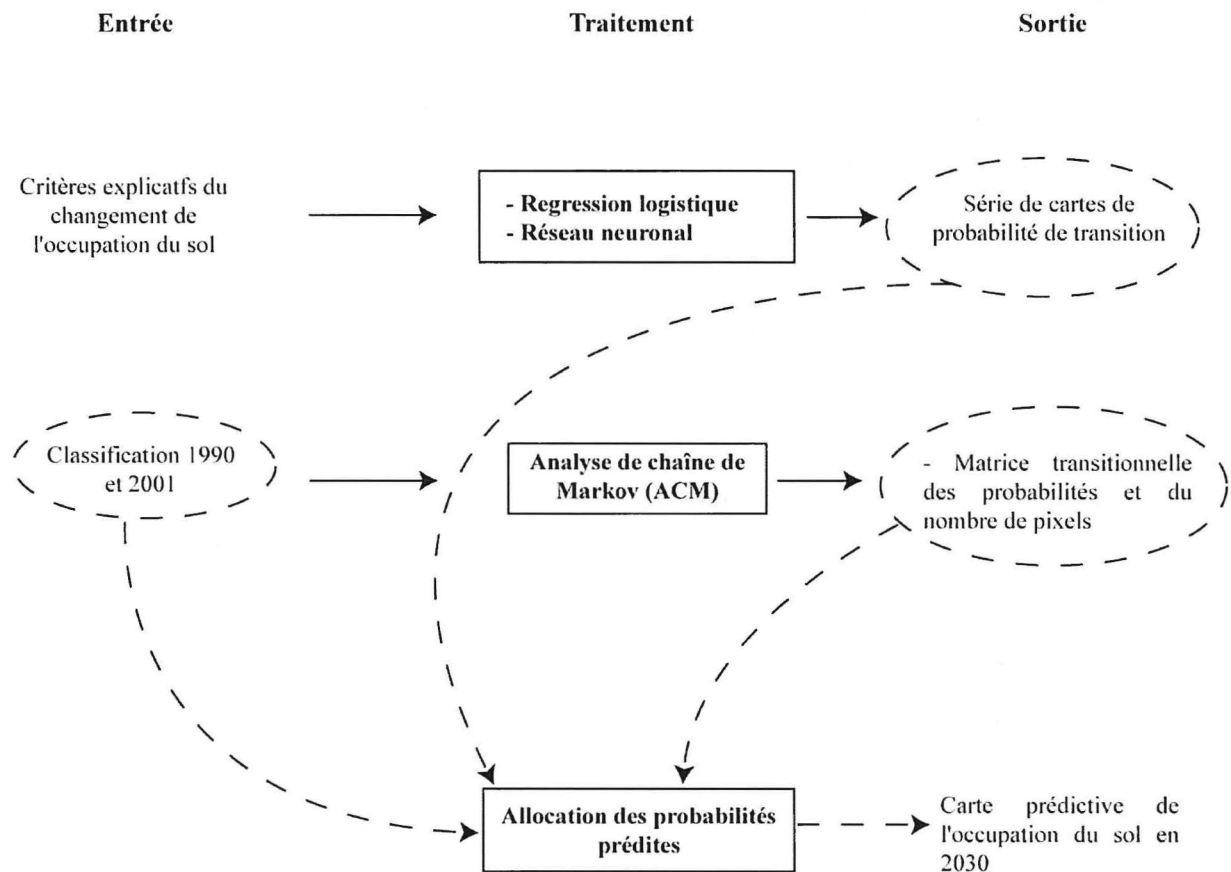
b) Le calcul des probabilités de transition de 2000 à 2030

L'analyse des chaînes de Markov entre 1990 et 2000 permet d'évaluer les probabilités de transition entre 2000 et 2020. Le résultat se présente sous forme d'une matrice dans laquelle sont codées les probabilités de changement de chaque catégorie d'occupation du sol ainsi que le nombre de pixels affectées entre la dernière date d'apprentissage et la date projetée.

c) L'allocation des terres entre 2000 et 2030

L'allocation spatiale des probabilités markoviennes calculées auparavant intègre les probabilités de transition, une évaluation multi-objective (EMO) tenant compte des compétitions entre occupations et des probabilités de transition, et un automate cellulaire, basé sur un filtre de contiguïté spatiale. La fonction utilisée sous Idrisi est itérative afin de tenir compte des distances temporelles entre les deux dates d'apprentissage et la dernière date d'apprentissage et la date de projection. Elle donne en sortie une carte prospective de l'occupation du sol probable

Illustration 13: Aperçu des principales fonctions et enchaînements à la modélisation de l'occupation du sol.



IV.1.2. Réseaux neuronaux

L'utilisation de réseaux de neurones est poussée par leurs grandes capacités d'adaptation et de souplesse face à un grand nombre de problèmes. Modèle de calcul dont la conception est schématiquement inspirée du fonctionnement de vrais neurones, humain ou non. Les réseaux de neurones ont connu une grande popularité notamment dans le domaine de la statistique. On les retrouve, aussi, dans la prédiction de séries chronologique.

Le réseau neuronal se caractérise par une couche d'entrée, une couche de sortie et une couche cachée dont le nombre varie. La couche d'entrée contient la valeur des neurones est celle des variables explicatives du modèle. Chacune de ces valeurs numériques est multipliée par un certain nombre de poids pour être, par la suite, additionnée et transformée par une fonction de lien au niveau des neurones de la couche cachée. Enfin, les valeurs numériques des neurones de la couche cachée subissent à leur tour une multiplication par des poids et leur addition donne la valeur des neurones de sortie qui modélisent la variable expliquée.

Le réseau reste souvent une boîte noire qui fournit une réponse quand on lui présente une donnée, mais le réseau ne fournit pas de justification facile à interpréter.

IV.1.3. Chaîne de Markov

La chaîne de Markov, de façon simplifiée, est la prédiction du futur, sachant le présent mais n'est pas rendu plus précise en y ajoutant des éléments d'information du passé.

Une analyse par la chaîne de Markov permet le calcul prédictif de l'occupation du sol. C'est un processus discret avec des pas de temporels discrets et dont les valeurs à la date prédite dépendent des valeurs à des dates antérieures. La prédiction est exprimée par une estimation des probabilités de transition. Le résultat se présente sous forme d'une matrice dans laquelle sont codées les probabilités de changement de chaque catégorie d'occupation du sol ainsi que le nombre de pixels affectées entre la dernière date d'apprentissage et la date projetée. La fonction calcule également une carte de probabilité conditionnelle pour chaque catégorie d'occupation du sol indiquant la probabilité markovienne par pixel de la modalité en question à la date projetée.

IV.1.4. Régression logistique

Le modèle de régression logistique est un modèle linéaire généralisé dans lequel la variable réponse est qualitative et qui permet d'obtenir une prédiction de celle-ci en tenant compte d'un ensemble d'informations issues de variables explicatives. Au lieu de prévoir la valeur de la variable, la régression logistique cherche à estimer la probabilité pour qu'elle soit égale à la valeur. Cela revient à estimer la probabilité pour que le pixel prenne la valeur de la classe d'occupation du sol considérée en fonction de la prédisposition du pixel pour cette classe. De façon générale, le modèle de régression logistique permet de modéliser, en fonction d'un certain nombre de paramètres, la probabilité pour que le type d'occupation du sol d'un pixel au temps t (c'est-à-dire la variable réponse) soit égale à une des 7 catégories d'occupation du sol. Il s'agit donc d'estimer les paramètres inconnus du modèle et ensuite les probabilités *a posteriori* de type d'occupation du sol connaissant les valeurs des différentes variables explicatives.

IV.1.5. Algorithme d'allocation

Le processus d'allocation vise à allouer spatialement les demandes en occupation des sols exprimées dans la matrice de transition issue de la chaîne de Markov.

Deux processus d'allocation sont disponibles dans Idrisi.

Le premier processus, dit « Hard » fait appel à un algorithme d'évaluation multi-objectifs concurrentiels (MOLA). Cette procédure analyse dans un premier temps la matrice de transition donnée et détermine les classes « demandeuses » (les classes d'occupation des sols qui vont acquérir des terres) et les classes « hôtes » (les classes qui vont perdre de la surface). Une procédure MOLA est appliquée à chaque classe « Hôte » en considérant toutes les autres classes demandeuses. La classe « Hôte » ne participe pas à l'allocation, elle ne peut que perdre des pixels. Nous sommes donc face à plusieurs objectifs : les classes « demandeuses », à mettre dans la classe « hôte ». L'allocation se fait en fonction du potentiel de transition de la classe « hôte » (pondérées par les effets du voisinage), et des quantités de changement définies par la matrice de transition de Markov.

Les résultats de l'allocation de chaque classe « Hôte » sont ensuite superposés pour produire la carte d'allocation finale.

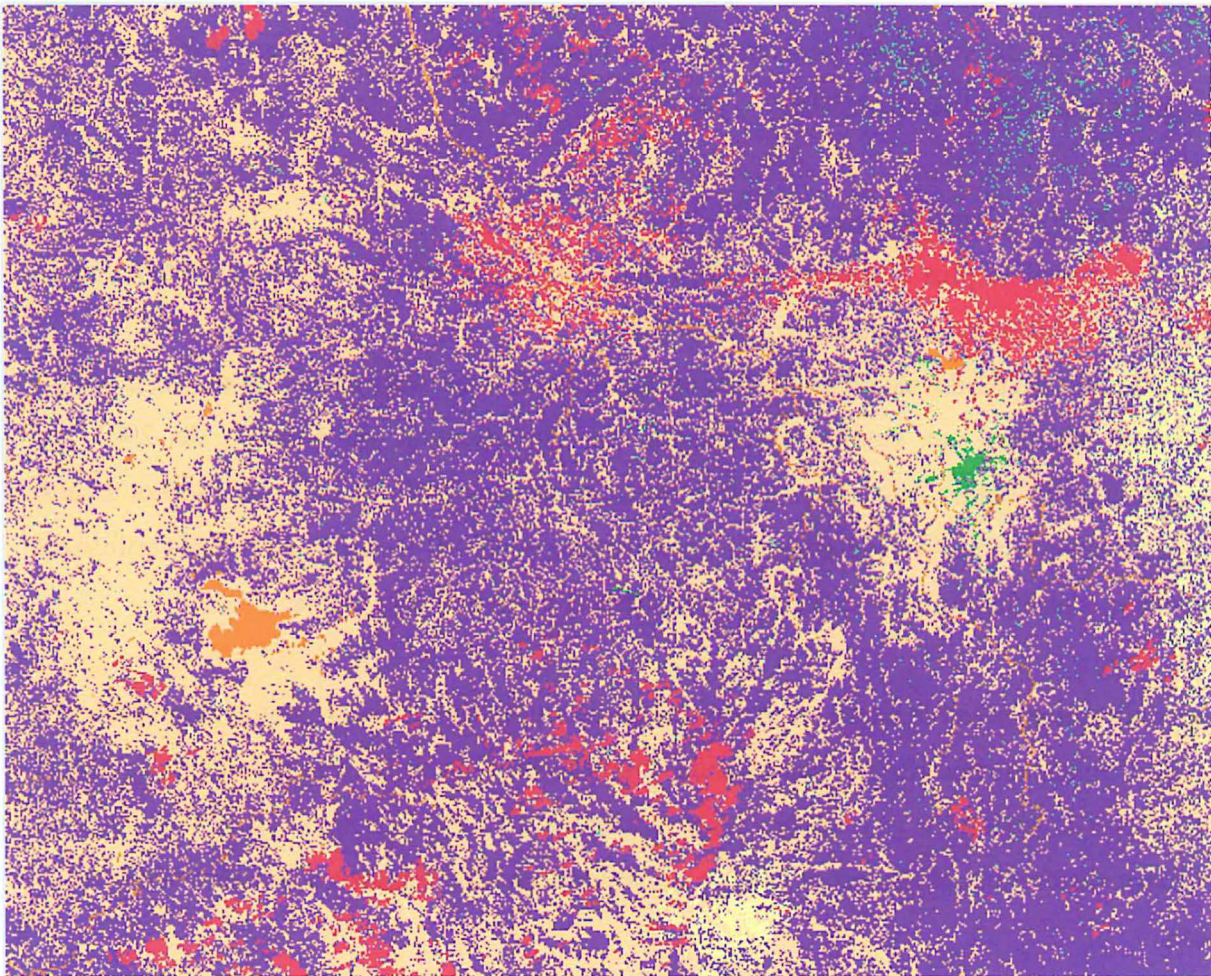
La seconde prédiction dite « Soft » est fondée sur une agrégation des différents potentiels de transition pour chaque classe d'occupation des sols. Deux types d'agrégation sont possibles : Maximum ou OU logique. L'agrégation de type maximum alloue à chaque pixel les chances de transition maximales qui existent à cet endroit pour tous les différents types de transitions possibles (choisies par l'utilisateur). L'agrégation de type OU logique calcule en chaque pixel le OU logique des différents potentiels de transition. Cette dernière option considère que les endroits les plus vulnérables sont ceux « demandés » par plusieurs transitions en même temps.

Par exemple, si en un pixel de classe A, le potentiel de transition vers la classe B est évalué à 0.6, et à 0.7 vers la classe C, l'agrégation de type maximum calcule sa propension au changement à 0.7 alors que l'agrégation de type OU logique l'évalue à 0.88. Il est laissé à l'utilisateur le soin de décider ce qui est le plus approprié dans le contexte de l'étude.








IV.2. La carte résultante

Illustration 14 : Carte d'occupation du sol en 2030

Classification 2030



Légende

- | | |
|---|---------|
|  | Savane |
|  | Culture |
|  | Forêt |
|  | Sol nu |
|  | Urbain |
|  | Eau |
|  | Nuage |

L'occupation du sol en 2030 montre une évolution significative de la culture au dépend de la savane uniquement. L'augmentation de la culture est de 52 221 hectares. Elle est passée de 464 778 hectares en 2001 à 516 999 hectares en 2030. A noter que cette augmentation est moindre que durant la période 1990-2001. La culture s'étend à partir des cultures existantes, on n'a pas un émiettement de la culture. On a une augmentation à l'Ouest et autour de la capitale Antananarivo.

V- Résultats et discussions

A l'issu du stage, on peut en tirer un bilan critique du travail sur l'évolution de l'occupation du sol à l'horizon 2030.

- L'étape de classification :

Le travail le plus laborieux et qui a demandé beaucoup de travail est l'étape sur la classification des images Landsat de 1990 et 2001.

Les différentes méthodes de classification utilisées, supervisée, segmentée, ou mixte, n'ont pu réellement atteindre un résultat satisfaisant. La classification de l'image de 2001 est notamment peu fiable. Cette image a été prise un mois plus tard que celle de 1990 et à cette époque et cette année, la végétation est apparue plus sèche. Il s'en est suivi des confusions importantes entre les cultures sèches déjà récoltées et la savane déjà jaunie

Une amélioration possible aurait, peut-être été de découper l'image en régions homogènes. En l'Est de l'image est une région plus humide, plus élevée, plus verte avec plus de forêt, tandis qu'à l'Ouest la région est plus sèche. Ainsi, en séparant l'image en deux, voire plus, et en la classifiant différemment on aurait obtenu un résultat en concordance à la radiométrie de la région.

Mais, compte tenu de la complexité du système agraire qui allie de très petites parcelles souvent dispersées dans les pâturage et la jachère, parfois plusieurs récoltes dans l'année, et des rotations de culture très rapides et des temps de jachère très courts, la solution la plus satisfaisante, notamment pour distinguer culture de bas fond, forêt, culture sèche et jachère, serait sans doute de considérer plusieurs dates dans l'année afin de dégager des patrons temporels types. Plus que la radiométrie, c'est sans doute l'évolution à l'échelle de l'année qui permettra de distinguer l'ensemble de ces classes.

Il est à noter que la plupart des cartes d'occupation des sols existant sur Madagascar et qui alimentent la plupart des débats sur la déforestation de l'île, n'ont considéré qu'une date dans l'année. On peut alors être très circonspects sur leur validité.

– L'étape de prévision :

La création de la carte à l'horizon 2030 avec le logiciel IDRISI a pausé là aussi quelques problèmes. D'une part au niveau de la durée de traitement souvent long du fait des nombres conséquents de cellules qui sont en jeu. D'autre part, les changements majeurs que l'on veut traiter est la progression de la culture sur la savane et inversement mais avec un poids plus important sur l'évolution de la culture. Or les facteurs tels que les routes ou les talwegs agissent pratiquement de la même manière sur l'un et l'autre des phénomènes. A une distance donnée à la route par exemple, une savane a pratiquement autant de chance de devenir de la culture, que la culture a de chance de devenir de la savane. Ceci est en grande partie dû aux temps de jachères qui sont très courts (entre 2 et 5 ans). Ainsi le paysage change très rapidement avec des retours à l'initial très difficiles à modéliser. On est loin des fronts pionniers brésiliens où la culture avance progressivement sur la forêt en suivant une ligne de front bien identifiable et sans reforestation à l'échelle des 10 ans retenus.

La modélisation des changements par une simple matrice de Markov qui ne considère qu'un état initial et un état final, et non pas par des trajectoires d'évolution ne permet malheureusement pas de prendre en compte ces évolutions cycliques complexes.

– L'étape de validation :

Aucune étape de validation n'a été menée pour valider la carte de 2030. Il serait possible de projeter l'évolution à une date récente comme par exemple 2006 et en comparer la véracité avec une image Landsat de 2006. Mais en l'état, un tel exercice n'aurait pas résolu les problèmes liés à la faible validité des classifications de 1990 et 2001.

Conclusion

Cette étude de l'évolution de l'occupation du sol à l'horizon 2030 a permis de mettre en évidence plusieurs difficultés notamment au niveau de la classification et de la prévision de l'occupation du sol à l'horizon 2030 avec le logiciel IDRISI. En effet, pour avoir une image de l'occupation des sols la plus proche possible de la réalité différentes méthodes de classification spectrales furent testées pour aboutir à une méthode mixte qui s'est avérée la meilleure mais comportant encore de nombreuses erreurs. Compte tenu de ces erreurs et d'un modèle ne pouvant prendre en compte des trajectoires complexes d'évolution de l'occupation des sols, la prévision n'a pas donné un résultat à la hauteur de nos espérances. Néanmoins, la suite logicielle offerte par Idrisi est apparue comme une solution très pertinente et particulièrement aisée à utiliser pour modéliser des évolutions simples non réversibles.

Remerciements

Je tiens avant tout à remercier le Docteur Laurent GAZULL, pour m'avoir partagé ces connaissances dans le domaine du sig et de la télédétection.

Je tiens à remercier Monsieur SAIDI Slim pour son aide et sa gentillesse.

Je remercie également Madame Agnès BEGUE pour le suivi du stage au sein du Master SIIG3T.

Tous mes remerciements également à l'ensemble des membres du département des forêts pour leur aide et leur bonne humeur.

Bibliographie

Ouvrage :

- Caloz R., Collet C., *Précis de télédétection, volume 3*, Agence Universitaire de la Francophonie, *Traitements numériques d'images de télédétection*, Presse de l'Université du Québec, 2001, p. 386.

Articles:

- Peter H. Verburg, Kasper Kok, Robert Gilmore Pontius Jr., A. Veldkamp, *Modeling Land-Use and Land-Cover Change*, Chapter 5, p.117-135.

- Peter H. Verburg, Paul P. Schot, Martin J. Dijst, A. Veldkamp, *Land use change modelling: current practice and research priorities*, *Geojournal* 61, 2004, p.309-324.

- Eric F. Lambin, Helmut J. Geist, Erika Lepers, *Dynamics of Land-Use and Land-Cover Change in Tropical Regions*, *Ann. Rev. Environ. Resour.* Vol. 28, 2003, p. 205-241.

- Paeglow M., Villa N., Cornez L., Ferraty F., Ferraty L., Sarda P., *Modélisations prospectives de l'occupation du sol. Le cas d'une montagne méditerranéenne*, Cybergeog :

Revue européenne de géographie, n°295, 06 décembre 2004. Disponible sur : <http://www.cybergegeo.eu/index2811.html>

- Camacho Olmedo M. T., Paeglow M., Garcia Martinez P., *Modélisation géomatique rétrospective des paysages par évaluation multicritères et multiobjectifs*, Cybergegeo : Revue européenne de géographie, n°365, 9 mars 2007. Disponible sur : <http://www.cybergegeo.eu/index4811.html>

-Laura C. Schneider, R. Gil Pontius Jr., *Modeling land-use change in the Ipswich watershed, Massachusetts, USA*, Agriculture, Ecosystems and Environment 85, ELSEVIER, 2001, p.83-94.

- Houet T., Hubert-Moy L, *Modeling and projecting land-use and land-cover changes with a cellular automaton in considering landscape trajectories: an improvement for simulation of plausible future states*, EARSel eProceedings 5, janvier 2006, p63-76.

- Robert G. Cromley, Dean M. Hanink, *Coupling land use allocation models with raster GIS*, Journal of Geographical Systems, 1998, p137-153.

- Guillermo A. Mendoza, *A GIS-based multicriteria approaches to land use suitability assessment and allocation*, Proceedings of the Seventh Symposium on Systems Analysis in Forest Resources, Traverse City, USA, 1997, p.1-7.

- Programme Ruralstruc *Les implications structurelles de la libéralisation sur l'agriculture et le développement rural, cas de Madagascar*, APD Consulting.

- Edouard N'GUESSAN, Marie-France B. et François B., *Suivi par télédétection spatiale d'une forêt tropicale humide protégée soumise à des pressions anthropiques*, Revue Télédétection, Vol. 3, n°5, 2003, p. 443-456.

- Tahar IFTENE et Khalifa DJERRIRI, *Evaluation de la méthode des histogrammes de la somme et de la différence par classification neuronale : application aux images de HRV (XS) de SPOT*, Revue Télédétection, Vol. 6, n°4, 2006, p.263-275.

- Stéphane Chalifoux, Miroslav Nastev, Charles Lamontagne, Rasim Latifovic, Richard Fernandes, *Cartographie de l'occupation et de l'utilisation du sol par imagerie satellitaire Landsat en hydrogéologie*, Revue Télédétection, Vol. 6, n°1, 2006, p. 9-17.

- Abdelkrim BENSALD, Zakaria SMAHI, Tahar IFTENE, Said BENZINEH, *Utilisation de la télédétection et des SIG pour l'aide à la surveillance du risque de dégradation des parcours steppiques*, Revue Télédétection, Vol 3, n°5, 2003, P. 387-402.

- Ben HOOLLINGSWORTH, Liqiang CHEN et Stephen E. REICHENBACH, *Automated cloud cover assessment for Landsat TM images*, 1996, p.13.

- Hyeugu CHOI, Robert BINDSCHADLER, *Cloud detection in Landsat imagery of ice sheet using shadow matching technique and automatic normalized difference snow index threshold value decision*, ELSEVIER, Remote Sensing of Environment, Vol 91, 30 mai 2004, p. 237-242.

- Richard R. Irish and Al., *Characterization of the Landsat-7 ETM+ Automated Cloud-Cover Assessment (ACCA) Algorithm*, Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, oct. 2006, p. 1179- 1188.

Sites internet :

- Site d'information de la région de Bongolava [consulté le 9 Mars 2009]. Disponible sur : <http://www.bongolava.org/>

- Site de la revue de recherche et d'application en télédétection : Télédétection [consulté le 9 Avril 2009]. Disponible sur : <http://www.teledetection.net/>

- Site d'image gratuite Landsat [consulté le 9 Mars 2009]. Disponible sur : <http://glcf.umiacs.umd.edu:8080/esdi/index.jsp>

Résumé :

Dans le domaine du SIG, la modélisation spatio-temporelle s'avère être particulièrement utile en ce qui concerne l'évolution des résultats et la mise en place de scénarii en terme d'occupation du sol. Ce travail illustre la méthodologie et les résultats obtenus pour la reconstitution probabiliste de l'occupation du sol de la région de Bongolava à l'horizon 2030. L'évaluation génère des cartes de potentialité d'occupation du sol pour chaque classe. Elle se base sur le fait, pour une date donnée, que des facteurs exercent des influences sur les différentes catégories d'occupation du sol. Cette évaluation permet de construire des cartes probabilistes d'occupation du sol futur. Leur interprétation permet de se prononcer sur les apports et les limites sans pour autant autoriser une validation.

Mots-clés : Occupation du sol, classification, modélisation, réseaux de neurones, chaîne de Markov, régression logistique.

Abstract:

In the area of GIS, spatial-temporal modelling proves to be particularly useful in regards to the evolution of results and the establishment of scenarios in terms of land occupation. This work illustrates the methodology and the results obtained for the probabilistic reconstitution of land occupation in the Bongolava region by 2030. This evaluation generates maps of potentiality representing land occupation for each class. It is based on the fact that, for a given date, some factors exert influences on the different categories of land occupation. This assessment helps build probabilistic maps of future land occupation. The interpretation of these maps makes it possible to come to a conclusion about the contributions and the limits without to authorize a validation.

Keywords: Occupation of soil, classification, modelling, neural networks, Markov chain, logistic regression.

Samari:

Long fil blong GIS, spatio-temporel modeling i pruv se hemi rili useful espeseli long evolusen blong ol risal mo implementesen scenario long saed blong okupesen blong graon. Wok ia i ilustretem metodoloji mo ol risalt wei i kamaot blong probabilistic ripleshmen blong okupesen blong graon long rijen blong Bongolava long yia 2030.

Assesmen ia i jeneretem ol map blong potensol lan use blong ij clas. Hemi bes long fakt se, long wan spesifik det, ol fakta oli usum ol influens long ol difren kategori blong lan use. Asesmen ia I alawem blong bilidim ol fiuja lan use probabilistic kad. Intapreteren blong ol kad ia bae I help blong disaedem ol contribusen mo ol limit.

Ol Kiwod: Lan use, clasifikesen, modeling, ol nurol netwok, Chen blong Markov, lojistik rigresen.

