

TABLE DES MATIÈRES

INTRODUCTION	5
1. SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE.....	7
1.1. TELEDETECTION	7
1.1.1. <i>Définition</i>	7
1.1.2. <i>Evolution des techniques</i>	8
1.1.2.1. Capteurs satellites	8
1.1.2.2. Echelles de traitement de données et choix des canaux	8
1.1.2.3. SPOT 5	10
1.1.2.4. Applications des données acquises par SPOT 5	11
1.1.3. <i>Carte d'occupation et d'utilisation du sol</i>	11
1.1.3.1. Définition.....	11
1.1.3.2. Utilisations	12
1.2. TRAITEMENTS DES DONNÉES	12
1.2.1. <i>Traitements préliminaires</i>	12
1.2.1.1. Correction radiométrique	12
1.2.1.2. Correction géométrique	13
1.2.1.3. Orthorectification	15
1.2.2. <i>Fusion</i>	16
1.2.2.1. Définition.....	16
1.2.2.2. Techniques.....	16
1.2.2.3. Etablir une stratégie de fusion d'image	19
1.2.2.4. Application de cette démarche à notre travail	19
1.2.2.5. Validation.....	22
1.2.3. <i>Segmentation</i>	23
1.2.3.1. Définition.....	23
1.2.3.2. Objectifs et avantages	24
1.2.3.3. Méthodes	24
1.2.3.4. Validation.....	25
1.2.4. <i>Classification</i>	25
1.2.4.1. Définition.....	25
1.2.4.2. Méthodes	26
1.2.4.3. Classification au Sahel	27
1.2.4.4. Validation.....	28
1.2.5. <i>Légende</i>	28
1.2.5.1. Définition.....	28
1.2.6. <i>Système de classification de l'occupation du sol ou Land Cover Classification System (LCCS)</i>	29
1.2.6.1. Définition.....	29
1.2.6.2. Problèmes des systèmes actuels de classification typologiques	29
1.2.6.3. Proposition d'amélioration des systèmes de classification	29
1.2.6.4. Présentation du LCCS	30
1.2.6.5. Les avantages de la méthode LCCS	32
2. OBJECTIFS	34
3. CONTEXTE.....	35
3.1. LE PROJET	35

3.1.1.	<i>Le cadre</i>	35
3.1.2.	<i>Les institutions</i>	36
3.2.	LEFAKARA	37
3.2.1.	<i>Généralités</i>	37
3.2.1.1.	Situation géographique	37
3.2.1.2.	Relief	38
3.2.1.3.	Climat	38
3.2.1.4.	Pédologie	39
3.2.1.5.	Démographie et groupes ethniques	39
3.2.2.	<i>Elevage et système de production agricole</i>	40
3.2.2.1.	Système de production agricole	40
3.2.2.2.	Elevage	41
4.	METHODOLOGIE	42
4.1.	VUE GENERALE.....	42
4.2.	DONNEES.....	43
4.3.	ORTHORECTIFICATION.....	44
4.3.1.	<i>Collecte des points de contrôle au sol</i>	44
4.3.1.1.	Acquisition des GCP à partir des cartes topographiques de l'IGN	44
4.3.1.2.	Acquisition des GCP à partir de points relevés au dGPS	44
4.3.2.	<i>Modèle numérique de terrain</i>	44
4.3.3.	<i>Contrôle de qualité</i>	45
4.4.	FUSION	45
4.4.1.	<i>Méthode utilisée</i>	45
4.4.2.	<i>Validation</i>	46
4.4.2.1.	Validation spatiale	46
4.4.2.2.	Validation spectrale	46
4.4.3.	<i>Extraction de la zone du projet</i>	47
4.5.	SEGMENTATION.....	47
4.5.1.	<i>Méthode utilisée</i>	47
4.5.2.	<i>Validation</i>	48
4.6.	CLASSIFICATION.....	49
4.6.1.	<i>Méthode utilisée</i>	49
4.6.2.	<i>Validation</i>	50
4.7.	ENRICHISSEMENT DE LA CARTE D'OCCUPATION DU SOL.....	51
4.7.1.	<i>Ajout de la position des puits</i>	51
4.7.2.	<i>Application de la légende du LCCS</i>	52
4.7.3.	<i>Ajout de l'utilisation du sol à la légende de la carte</i>	52
5.	RESULTATS ET DISCUSSIONS	53
5.1.	ORTHORECTIFICATION.....	53
5.1.1.	<i>Sur base des cartes topographiques</i>	53
5.1.1.1.	Résultats	53
5.1.1.2.	Discussion.....	53
5.1.2.	<i>Sur base des points acquis au dGPS</i>	54
5.1.2.1.	Résultats	54
5.1.2.2.	Discussion.....	54
5.1.3.	<i>Modèle numérique de terrain</i>	55
5.1.4.	<i>Conclusions</i>	55
5.2.	FUSION	56
5.2.1.	<i>Validation spatiale</i>	56

5.2.2.	<i>Validation spectrale</i>	57
5.2.3.	<i>Discussion</i>	59
5.3.	SEGMENTATION.....	60
5.3.1.	<i>Résultats</i>	60
5.3.2.	<i>Discussion</i>	60
5.4.	CLASSIFICATION.....	61
5.4.1.	<i>La méthode</i>	61
5.4.1.1.	Résultats.....	61
5.4.1.2.	Discussion.....	64
5.4.2.	<i>Les classes d'objets</i>	64
5.4.2.1.	Résultats.....	64
5.4.2.2.	Discussion.....	64
5.4.3.	<i>Les matrices de confusion</i>	66
5.4.3.1.	Résultats.....	66
5.4.3.2.	Discussion.....	67
5.4.3.3.	Conclusions.....	72
5.5.	ENRICHISSEMENT DE LA CARTE D'OCCUPATION DU SOL.....	76
5.5.1.	<i>Localisation des puits</i>	76
5.5.1.1.	Résultats.....	76
5.5.1.2.	Discussion.....	76
5.5.2.	<i>Application de la légende du LCCS</i>	77
5.5.2.1.	Résultats.....	77
5.5.2.2.	Discussion.....	78
5.5.3.	<i>Ajout de l'utilisation du sol à la légende de la carte</i>	79
5.5.3.1.	Résultats.....	79
5.5.3.2.	Discussion.....	79
5.6.	PRESENTATION DES CARTES.....	80
6.	APPLICATIONS ET AVIS DES UTILISATEURS POTENTIELS.....	81
6.1.	APPLICATIONS.....	81
6.2.	AVIS DES UTILISATEURS POTENTIELS.....	81
7.	CONCLUSION ET PERSPECTIVES.....	83
8.	BIBLIOGRAPHIE.....	85
	ANNEXES.....	88

TABLE DES FIGURES

Figure 1 : Principe général de la télédétection	7
Figure 2 : Signatures spectrales de différents types de recouvrement	9
Figure 3 : SPOT 5	10
Figure 4 : Transformation IHS	17
Figure 5 : Transformation PCA.....	18
Figure 6: Niveaux de traitements de la fusion d'images.....	22
Figure 7 : Vue générale du LCCS, ses deux phases et les critères	31
Figure 8 : Afrique, Niger	35
Figure 9 : Niger, zone du Fakara Géologie et topographie.	37
Figure 10 : Scène SPOT 5 XS brut.....	54
Figure 11 : Scène SPOT 5 XS orthorectifiée.....	54
Figure 12 : Illustration de la fusion IHS des images XS et P	56
Figure 13 : Histogrammes de fréquence, pour les canaux du PIR, rouge et vert de l'image XS originale et de l'image fusionnée.	58
Figure 14 : Coefficient de corrélation bande par bande.	59
Figure 15 : Extrait de l'image fusionnée illustrant la difficulté d'interprétation de certaines zones	65
Figure 16 : Extrait de l'image fusionnée.....	69
Figure 17 : Illustration de la sélection de parcelles. Jaune = Végétation naturelle en régénération,	69
Figure 18 : Valeurs de plusieurs paramètres pour les classes "Végétation cultivée sur sol fumé" en noir et "Végétation naturelle en régénération" en bleu.....	70
Figure 19 : Valeurs de plusieurs paramètres pour la classe "Végétation cultivée sur sol fumé" en noir, et en bleu pour les parcelles à photo-interprétation difficile	71
Figure 20 : Valeurs de plusieurs paramètres pour les parcelles à photo-interprétation difficile en noir et de la classe "Végétation naturelle en régénération" en bleu.....	71
Figure 21 : Capteur actif.....	89
Figure 22 : Capteur passif.....	89
Figure 23 : Principe du dGPS	94

TABLEAUX

Tableau 1 : Erreurs de lecture en fonction de plusieurs échelles et de plusieurs standards	34
Tableau 2 : Caractéristiques des scènes SPOT 5	43
Tableau 3: Moyennes et différences des moyennes entre l'image XS et l'image fusionnée.	57
Tableau 4 : Déviations standards et différences des déviations standards de l'image XS et de l'image fusionnée	57
Tableau 5 : Coefficient de corrélation de deux bandes d'une même image.	59
Tableau 6 : Précisions globales et coefficients Kappa des matrices de confusion.....	66
Tableau 7 : Matrice de confusion (interprétation Christophe Coq).....	73
Tableau 8 : Matrice de confusion (interprétation Issa Garba)	74
Tableau 9 : Matrice de confusion des classes standards	75
Tableau 10 : Transposition de la légende dans le système LCCS.....	77
Tableau 11 : Coordonnées des points pour le calcul du décalage de la couche des puits, moyennes et écarts type	98

INTRODUCTION

Le Niger est un pays de la zone sahélienne, caractérisé par des conditions de pluviométrie et de température très difficiles. Cela rend la productivité agricole très faible et entraîne une surexploitation des sols. La fertilité du sol, l'environnement naturel et donc l'économie du pays s'en ressentent tout comme le niveau de vie des habitants.

Pour ces raisons, le Niger fait l'objet de nombreux projets d'aide au développement afin d'améliorer les conditions de vie, d'optimiser la gestion des écosystèmes et de mettre en place des systèmes d'aide à la décision.

Dans ce cadre, l'Université Catholique de Louvain (UCL) participe, au Niger, à un projet coordonné par l'institut international de recherche sur les cultures des zones tropicales semi-arides (ICRISAT) intitulé: « Amélioration des conditions de vie des producteurs sahéliens à travers la mise en œuvre d'outils bio-économiques d'aide à la décision ». L'objectif spécifique de l'équipe de l'UCL est d'élaborer des modèles bio-économiques d'aide à la décision faisant intervenir des aspects biophysiques, sociologiques et économiques.

Pour mener à bien cette mission, il s'est avéré nécessaire de percevoir la zone dans son ensemble tout en gardant une grande précision afin, notamment, de pouvoir distinguer les éléments constitutifs du système agraire et la répartition spatiale des ressources naturelles, des réseaux routiers et hydrologiques.

La télédétection à très haute résolution spatiale permet cette vue précise des surfaces terrestres. Les cartes détaillées d'occupation et d'utilisation du sol qui en découlent sont devenues des outils presque indispensables dans toute étude de l'organisation des systèmes socio-économico-environnementaux.

L'objet de ce travail est d'étudier la capacité des données satellitaires à très haute résolution de produire une carte qui soit une référence au point de vue planimétrique et qui soit également une carte détaillée de l'occupation et de l'utilisation du sol, et présentant aussi les éléments constitutifs du système agraire de la zone d'étude du Fakara dans le canton de Dantiandou (Niger).

Ce travail débute par une synthèse bibliographique présentant succinctement la télédétection, le satellite SPOT 5 et les cartes d'occupation du sol. Elle présente aussi les différents traitements à appliquer aux données afin d'en obtenir une carte.

Les objectifs complets du travail sont présentés dans la deuxième partie. Vient ensuite la présentation du contexte dans lequel s'est effectué ce travail, tant du point de vue institutionnel que géographique, et de la zone d'étude du Fakara.

La quatrième partie présente la méthodologie utilisée pour la correction géométrique, l'orthorectification, la fusion, la segmentation, la classification par objet et l'enrichissement de la carte.

Les résultats obtenus sont présentés et discutés par rapport aux objectifs dans la cinquième partie, qui reprend point par point les différentes étapes de la méthodologie. Cette partie présente aussi la carte produite.

La sixième partie discute des applications de la carte réalisée; viennent ensuite les conclusions et perspectives dans la septième partie et finalement la bibliographie et les annexes.

Lors de ce travail, la collaboration fut étroite entre l'UCL, le centre régional AGRHYMET et l'ICRISAT qui a notamment collecté des données au dGPS sur le terrain.

1. SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE

1.1. TÉLÉDÉTECTION

1.1.1. DÉFINITION

La télédétection est la discipline scientifique qui regroupe l'ensemble des connaissances et des techniques utilisées pour l'observation, l'analyse, l'interprétation et la gestion de l'environnement à partir de mesures et d'images obtenues à l'aide de plates-formes aéroportées, spatiales, terrestres ou maritimes. Elle suppose l'acquisition d'informations (caractéristiques physiques et biologiques) à distance, sans contact direct avec l'objet étudié (Bonn et Rochon, 1992). Le principe général en est présenté à la figure 1.

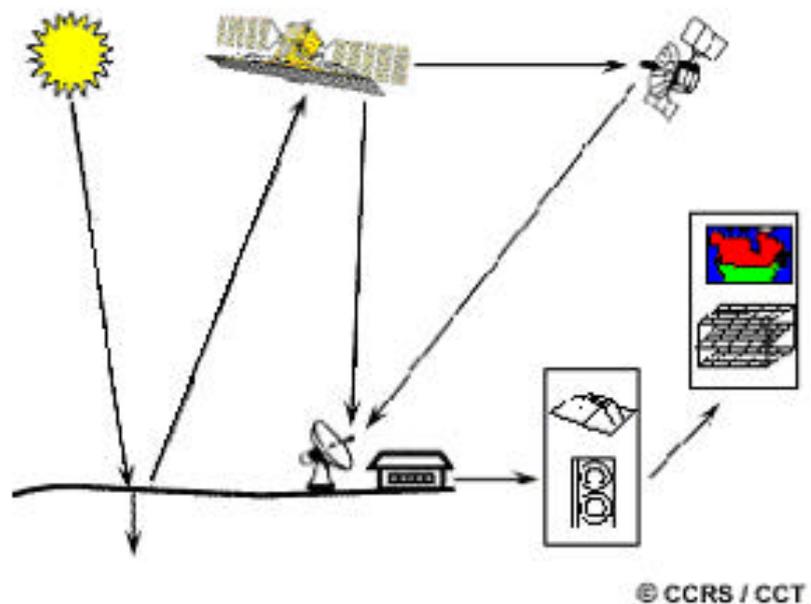


Figure 1 : Principe général de la télédétection

Source : <http://www.ccrs.nrcan.gc.ca/ccrs/homepg.pl?f>

1.1.2. EVOLUTION DES TECHNIQUES

1.1.2.1. Capteurs satellites

Un capteur comporte trois éléments constitutifs : un système optique, un filtre spectral et un détecteur. Le système optique fixe l'angle instantané de prise de vue, le filtre spectral (ou les filtres spectraux) définit le domaine spectral de la mesure et le détecteur transforme le signal physique en informations utilisables pour l'utilisateur.

Différents objectifs sont poursuivis par les satellites, certains fournissent une vision globale du territoire (SPOT Végétation,...) ; ils visent l'obtention d'images couvrant la plus grande superficie possible, sans faire de la résolution spatiale un paramètre contraignant. Ces satellites ont une très haute résolution temporelle, ce qui est très intéressant pour le suivi de l'environnement. D'autres analysent le territoire de manière précise (SPOT HVR, IKONOS,...) ; l'espace étudié est beaucoup plus petit et la résolution spatiale nettement meilleure. Dans ce travail, il s'agira de traiter des images à très haute résolution spatiale du cinquième Satellite Pour l'Observation de la Terre (SPOT 5).

La série des satellites SPOT fait partie du groupe des capteurs passifs, à opposer aux capteurs actifs (annexe 1) ; le dernier né de la série, SPOT 5, atteint une résolution de 10m pour le capteur multispectral (XS) et de 5m pour le capteur panchromatique (P).

1.1.2.2. Echelles de traitement de données et choix des canaux

Une image satellite est formée de composés élémentaires appelés «pixels» dont la valeur est définie par la mesure de la radiance moyenne. La plupart des logiciels de télédétection traitent les pixels un par un sur base de leurs propriétés spectrales (Bontemps, 2004).

Le développement des technologies a permis d'obtenir des images à très haute résolution, ce qui a provoqué un changement dans la manière de traiter l'information des données satellites. Le nombre de pixels mixtes, contenant plusieurs objets ou parties d'objets, a fortement diminué, ce qui facilite grandement l'interprétation des signatures spectrales. Ces images à très haute résolution remettent même en question la pertinence de l'échelle d'analyse, qui ne s'assimile plus nécessairement à celle du pixel (Pekkarinen, 2002).

Une nouvelle méthode a été élaborée pour traiter au mieux cette nouvelle information : la classification contextuelle ou segmentation. Elle intègre les informations contextuelles et spatiales. Les pixels sont toujours analysés sur base de leurs propriétés spectrales mais aussi

sur base des relations qu'ils entretiennent avec leurs voisins. L'image est divisée en plusieurs régions, dont la taille est supérieure à celle du pixel, les critères de regroupement étant la proximité, la répétitivité, la superficie, la forme, une certaine homogénéité de texture,... (Lillesand et Kiefer, 1994 ; Pekkarinen, 2002). Cette approche pourrait être d'une grande utilité pour le traitement des images à très haute résolution de ce travail.

Pour faciliter et optimiser la classification il est important de sélectionner les bandes spectrales les plus intéressantes, c'est à dire les plus discriminantes. Pour cela, il faut connaître le comportement spectral des éléments à distinguer. La réflectance d'un sol nu, par exemple, est de manière générale peu influencée par la longueur d'onde, par contre le taux d'humidité, la concentration en matière organique, le pourcentage de fer et la texture ont une importance prépondérante. L'eau, quant à elle, présente une signature spectrale avec trois bandes d'absorption, 1,45 μm , 1,9 μm , 2,7 μm ; ce qui se remarque dans la végétation (figure 2), plus ou moins fort en fonction de la concentration en eau dans les tissus foliaires (Bonn et Rochon, 1992). La signature spectrale de la végétation présente deux comportements totalement opposés dans le domaine du visible, plus particulièrement dans le rouge, et dans celui du PIR, la transition entre les deux se traduisant par une brusque augmentation de la réflectance.

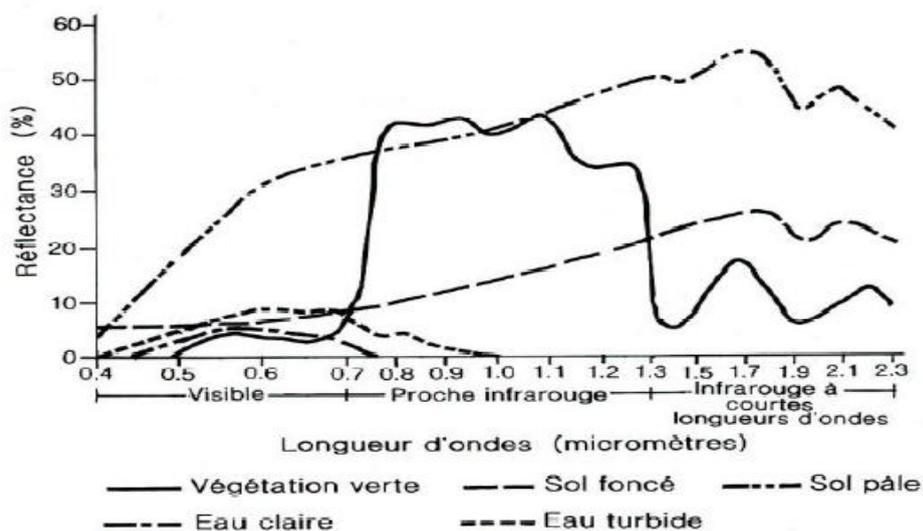


Figure 2 : Signatures spectrales de différents types de recouvrement

Source : Isac, 1996, dans Garba, 2002

Dans ce travail nous utiliserons une image P de SPOT 5, 0,49 -0,69 μm , et une image XS dont les canaux sont B1 vert (0,50 μm – 0,59 μm), B2 rouge (0,61 μm – 0,68 μm), B3 proche infra-rouge (PIR) (0,79 μm – 0,89 μm), moyen infra-rouge (MIR) (1,58 μm – 1,75 μm). Ces images ont été acquises le 28 septembre 2004.

1.1.2.3.SPOT 5

Le système SPOT a été engagé en 1978 par le gouvernement français sur une base essentiellement nationale, avec la participation de la Belgique et de la Suède, ces pays contribuant à 4% des coûts du programme.

Les satellites SPOT permettent de découvrir des objets d'une dizaine de mètres sur chacune des images de 60 kilomètres de côté. Recul, détail, répétitivité et souplesse d'emploi par une programmation au jour le jour sont autant d'atouts qui font des satellites SPOT un outil fort utile dans bien des domaines. L'augmentation de la résolution va néanmoins de paire avec une diminution de la vue globale du paysage et une limitation de la répétitivité des observations ; la fréquence des passages du satellite au-dessus d'un même point diminue.

Le 4 mai 2002, une fusée Ariane 4 a lancé SPOT 5 (figure 3). Les appareils emportés par SPOT 5 sont repris, en comparaison avec les satellites anciens de la famille SPOT, en annexe 2. SPOT résout les problèmes, mentionnés ci-dessus, par la possibilité de prendre des données obliquement, une même région peut ainsi être observée par un même satellite environ tous les 4 jours.

Les données satellites envoyées par SPOT 5 sont de très haute résolution spatiale, et ont ouvert la porte à un grand nombre de nouvelles applications. Cependant, cette grande quantité d'informations pose des problèmes de stockage, de transmission et de traitement.



Figure 3 : SPOT 5

Source : www.spotimage.fr

1.1.2.4.Applications des données acquises par SPOT 5

Avant l'ère spatiale, l'Homme n'avait jamais pu avoir une vision globale du monde qu'il habite. La mise en orbite des premiers véhicules spatiaux a fait reculer l'horizon accessible et a permis de montrer notre planète comme jamais nous ne l'avions vue auparavant.

Aujourd'hui, les satellites d'observation sont devenus indispensables aux scientifiques et industriels comme aux militaires. Equipés de systèmes de vision de plus en plus performants, ils sont capables soit de couvrir de manière systématique et répétitive des portions de territoires immenses, soit de produire des images très détaillées.

SPOT est un outil proche des besoins des utilisateurs dans des applications aussi diversifiées que l'agriculture, la cartographie, l'urbanisme, la gestion des forêts, la gestion des risques naturels, la géologie, l'exploration des ressources en eau, l'étude côtière et océanique, le contrôle et la surveillance de l'environnement.

Dans ce travail, des images acquises par SPOT 5 seront utilisées pour l'élaboration d'une carte détaillée d'occupation et d'utilisation du sol.

1.1.3. CARTE D'OCCUPATION ET D'UTILISATION DU SOL

1.1.3.1.Définition

Une carte d'occupation du sol représente la couverture (bio)physique observée sur la surface de la zone étudiée, elle est confinée 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. L'utilisation du sol établit un lien direct entre l'occupation du sol et l'activité des hommes dans leur environnement.

La carte d'occupation est une image des occupations du sol (land cover) qui s'élabore sur base d'une spatiocarte (document cartographique ayant pour fond des images satellites combinées éventuellement à des informations supplémentaires) ou d'une image brute. Le principe général est de faire correspondre les pixels ayant les mêmes propriétés à une classe qui définit le type d'occupation du sol. L'ensemble de ces classes est prédéfini dans le cas d'une classification supervisée.

Les avantages d'une légende illustrant l'occupation du sol sont multiples :

- Les critères utilisés sont scientifiques et donc objectifs, ce qui leur permet d'être compris sans ambiguïté par les utilisateurs de la carte.

- Il s'agit d'un langage standard et générique.
- L'inconvénient majeur étant que ce langage scientifique n'est pas accessible à tous.

La légende de l'utilisation du sol sera plus accessible à tous car il s'agit d'un langage plus usuel, mais il sera aussi plus subjectif, plus culturel ce qui peut être aussi un inconvénient.

1.1.3.2. Utilisations

Une carte d'occupation du sol peut être utilisée pour faire un état des lieux des ressources d'une surface, mais aussi, comparée à des données équivalentes antérieures, pour faire l'analyse de l'évolution et des changements de couvertures du sol. Elle peut aussi servir de base de travail lors d'enquêtes de terrain.

1.2. TRAITEMENTS DES DONNÉES

Le traitement des données consiste à traiter et déchiffrer les données satellites pour obtenir l'information désirée. Les images étant sous format numérique, les ordinateurs accélèrent le processus de traitement d'un grand nombre de calculs et d'applications pour en extraire une information cartographique de grande précision.

1.2.1. TRAITEMENTS PRÉLIMINAIRES

Ce travail se basera sur des images brutes qui présentent des distorsions et des dégradations ; les traitements préliminaires ont pour but de les éliminer afin d'obtenir une carte qui soit une référence planimétrique pour ses utilisateurs.

1.2.1.1. Correction radiométrique

Elle traduit les données brutes enregistrées par le satellite en intensité de rayonnement en exécutant une série de conversions. La station de réception transforme les données brutes en compte numérique que l'utilisateur transpose ensuite en luminance spectrale, elle-même convertie en réflectance effective (Bontemps, 2004). Un tel étalonnage facilite la comparaison des données entre plusieurs images prises à différentes dates et/ou par différents capteurs (Markham et Barker, 1986, dans Peeters 2000).

Elle s'applique ou non en fonction de l'objectif poursuivi et de la méthode d'analyse employée ainsi que du pré-traitement des images acquises.

1.2.1.2. Correction géométrique

Définition

L'environnement observé (courbure de la terre, variation d'altitude du sol, réfraction atmosphérique,...), le mouvement de la plate-forme (altitude, vitesse,...), les erreurs systématiques et aléatoires dans le système de mesure (Bonn et Rochon, 1992) causent des distorsions spatiales aux scènes brutes. Parce qu'elles sont inhérentes aux images satellites, une correction géométrique est indispensable; de plus, cette étape permettra d'attribuer aux images une projection cartographique.

Les erreurs systématiques

Les erreurs systématiques se corrigent par l'application de formules mathématiques qui modélisent les sources de distorsion, et qui sont réalisées par des centres de traitement de routine (Defourny, 2004).

Les erreurs non-systématiques

Ces erreurs par contre excluent tout traitement automatique et leurs corrections consistent à redresser l'image à partir de points de contrôle au sol ou ground control point (GCP), dont la principale propriété est d'être facilement localisables à la fois sur l'image satellite et dans un système de référence (cartes, autres images,...). La qualité de la correction est, en grande partie, conditionnée par la précision - capture et localisation - des GCP.

Traitement

La correction géométrique des erreurs non-systématiques se déroule en deux phases :

- Le logiciel définit, à partir d'un échantillon de GCP, une fonction mathématique de correspondance entre l'image et le support de référence, avec laquelle il crée une matrice carte « vide » corrigée. Afin de minimiser les déformations possibles, cette fonction est souvent une polynomiale du premier degré (Bontemps, 2004), elle provoque alors une translation.
- Mise en place d'un rééchantillonnage (Peeters, 2000): une valeur numérique tenant compte des valeurs numériques de l'image originale est attribuée à chacun des pixels de la matrice-carte. Ce processus fait appel, selon les cas, aux méthodes du plus proche voisin, de la convolution ou de l'interpolation bilinéaire.

L'analyse des erreurs résiduelles est faite sur les coordonnées d'un même point - image et cartes topographiques-. L'erreur quadratique moyenne ou root mean square error

(RMSE) représente la distance entre la position d'un GCP, une fois l'image corrigée, et sa position de référence sur la carte topographique.

$$RMSE = \sqrt{(x_r - x_i)^2 + (y_r - y_i)^2}$$

x_i et y_i sont les coordonnées d'un point sur l'image corrigée

x_r et y_r sont les coordonnées calculées dans le système de référence

Les GCP présentant les erreurs les plus élevées sont éliminés, pour autant toutefois que les points conservés restent suffisamment nombreux et soient uniformément distribués sur l'image. Une RMSE totale, faisant office d'indicateur de précision de l'ensemble de la correction géométrique, est calculée à partir des GCP restants. Une correction est jugée comme précise lorsque la RMSE atteint une valeur inférieure à celle du pixel.

$$RMSE_{tot} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n X R_i^2 + \sum_{i=1}^n Y R_i^2}{n}}$$

$X R_i$ est le résidu en X pour le GCP_i , c'est à dire la distance entre la coordonnée X initiale et la coordonnée X recalculée

$Y R_i$ est le résidu en Y pour le GCP_i , c'est à dire la distance entre la coordonnée Y initiale et la coordonnée Y recalculée

n est le nombre de GCP's

La correction de la géométrie d'une image permet donc de corriger les déformations non connues a priori mais également de rectifier les données enregistrées par le capteur selon une projection cartographique connue (système de coordonnées de référence).

(Defourny, 2004)

Le pré-traitement des données images SPOT

La société qui exploite les satellites SPOT propose à ces clients des images pré-traitées à différents niveaux de correction (annexe 3). Pour ce travail, les images SPOT 5 ont été acquises au niveau de pré-traitement 1B ce qui signifie que les images sont corrigées des déformations systématiques introduites par le système : effet panoramique, courbure et rotation de la Terre, effet de filé, angle de visée... Ces corrections sont de nature géométrique - mono-dimensionnelles, perpendiculairement à la trace du satellite, mais aussi radiométrique (ré-échantillonnage de l'image).

Ce type d'image est un produit privilégié pour la photo-interprétation et les études thématiques (www.spotimage.fr).

1.2.1.3. Orthorectification

Définition

L'orthorectification est le processus qui permet de corriger la parallaxe due aux changements d'altitude et donc de transformer une image brute en projection orthogonale précise. Sans orthorectification, l'échelle n'est pas constante dans l'image et une mesure précise de la distance et de la direction ne peut pas être effectuée.

Un Modèle Numérique de Terrain (MNT) permet de connaître la hauteur de chaque point dans l'image et son utilisation permet de fournir cette information à l'image.

L'orthorectification est une correction géométrique améliorée par l'ajout d'un MNT. Elle ajoute donc à la simple translation de la correction géométrique l'utilisation du MNT. Grâce à la projection orthogonale, chaque point dans l'image apparaît comme si l'observateur regardait directement vers le bas. Ce qui présente un avantage non négligeable par rapport à une simple correction géométrique, car l'échelle est alors constante sans se préoccuper de l'altitude, des distances et les directions peuvent désormais être exactement mesurées ; cet avantage sera fortement apprécié par les futurs utilisateurs de la carte. Néanmoins, l'orthorectification peut présenter des inconvénients si le MNT n'est pas assez précis par rapport à la résolution de l'image de départ.

Point de contrôle au sol (GCP)

Les GCP sont des points qui servent à redresser l'image. Il en faut un nombre suffisamment important, entre 20 et 40 par image, et ils doivent être bien répartis et très précisément localisables sur l'image. La précision de l'orthorectification sera en très grande partie fonction de la qualité et de la précision de ces GCP.

L'obtention des coordonnées de ces points peut se faire à partir de différents supports de référence: cartes topographiques, photos aériennes géoréférencées, etc. Ces points peuvent aussi être pris par des systèmes de positionnement à l'échelle du globe ou global positioning system (GPS) directement sur le terrain.

Plusieurs méthodes existent pour obtenir une position en utilisant le GPS (annexe 4). Elles dépendent de la précision requise par l'utilisateur et du type de récepteur GPS utilisé.

Modèle numérique de terrain

Un MNT donne l'altitude de points géographiques répartis à l'intérieur d'un maillage couvrant la zone de terrain considérée. Cela permet de reconstituer une vue du terrain en images de synthèse, de déterminer une trajectoire de survol du terrain, de calculer des surfaces ou des volumes, de tracer des profils topographiques et de manipuler de façon quantitative le terrain étudié.

1.2.2. FUSION

1.2.2.1. Définition

On définit généralement la fusion d'images comme la combinaison de deux ou de plusieurs images différentes pour former à l'aide d'un algorithme une nouvelle image (Pohl et Van Genderen, 1998). Les objectifs de la fusion d'images sont multiples, une revue globale en est faite par Wald (1999) et Pohl et Van Genderen (1998), Teggi (2001).

La fusion peut se pratiquer lors d'applications les plus diverses : établir et mettre à jour une carte topographique, étudier les occupations du sol, aider à la décision dans l'agriculture et la foresterie, surveiller régulièrement les inondations, les neiges et les glaces. Elle améliore notamment, les capacités d'interprétation et la lisibilité des résultats de données ayant des caractéristiques différentes. Un grand nombre d'auteurs a évalué le potentiel des images fusionnées pour classer des zones en classes d'occupation du sol (Srinivasan et Richards, 1990 ; Munechika et al, 1993 ; Serpico et Roli 1995 ; Benediktsson et al, 1997 ; Hegarat-Masclé et al, 2000, dans Amarsaikhan et Douglas, 2004).

1.2.2.2. Techniques

Plusieurs techniques existent pour fusionner des images satellites : les techniques liées à la couleur et les méthodes statistiques et numériques :

- Les techniques liées à la couleur comprennent des compositions de couleur de trois canaux d'images dans l'espace de couleur rouge, vert, bleu ou RGB (red, green, blue), et des transformations de couleurs comme la méthode Intensité Teinte et Saturation ou Intensity Hue Saturation (IHS).

✍ La méthode IHS (figure 4), a pour principe de convertir l'espace des couleurs RGB dans l'espace IHS plus proche de la perception humaine. Cette technique se réalise en 4 étapes (Chavez, 1991 dans Rakotoniaina, 1999) : rééchantillonnage des bandes originales de l'image XS (deux méthodes pour ceci : duplication des pixels en ligne et en colonne ou

interpolation bicubique), pour qu'elles aient les mêmes dimensions que l'image panchromatique ; transformation RGB en IHS de l'image XS rééchantillonnée ; rendre compatible l'histogramme (graphe donnant la fréquence d'apparition de chaque niveau de luminance de l'image) de l'image panchromatique à celui de l'image composante intensité ; remplacement du canal intensité par l'image panchromatique et application de la transformation inverse IHS vers RGB. La condition sine qua non pour qu'une fusion IHS fonctionne est que le spectre balayé par l'image panchromatique, se chevauche avec celui balayé par l'image XS (ce qui est bien le cas pour ce qui nous concerne).

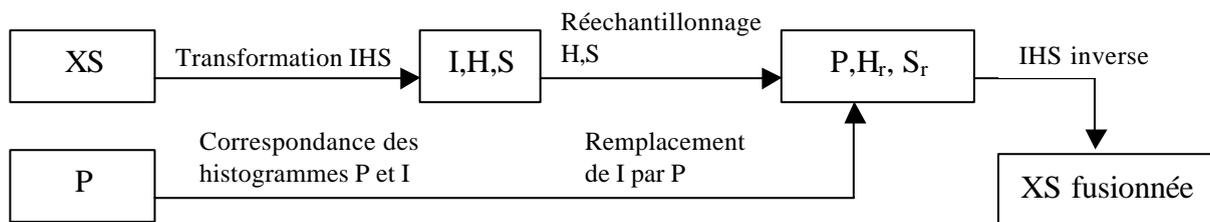


Figure 4 : Transformation IHS

Source : Vijayaraj et al , 2004

Cette méthode présente deux inconvénients : elle ne conserve pas bien l'information spectrale et oblige la suppression d'un canal lors de la fusion. Néanmoins les résultats obtenus lors de son utilisation sont très bons (cfr : 1.2.2.4).

- Les méthodes statistiques et numériques traitent séparément l'information spatiale et chaque bande spectrale. Les techniques de régression et de l'Analyse de la Composante Principale ou Principal Component Analysis (PCA) font parties de ce groupe (Rakotoniaina, 1999).

✍ La méthode PCA (figure 5) est une analyse factorielle des données basée sur le même principe de fusion que la méthode IHS. L'analyse des composantes principales est appliquée aux bandes de l'image XS et les composants principaux sont enregistrés. La première composante principale est remplacée par l'histogramme correspondant de l'image P. Il y a 4 étapes pour cette fusion : rééchantillonnage des images XS par duplication des pixels ; analyse et calcul des composantes principales à partir des images XS ; remplacement de la composante de la PCA par l'image P après avoir fait au préalable une spécification d'histogramme entre l'image P et la première composante de la PCA ; calcul de la PCA inverse.

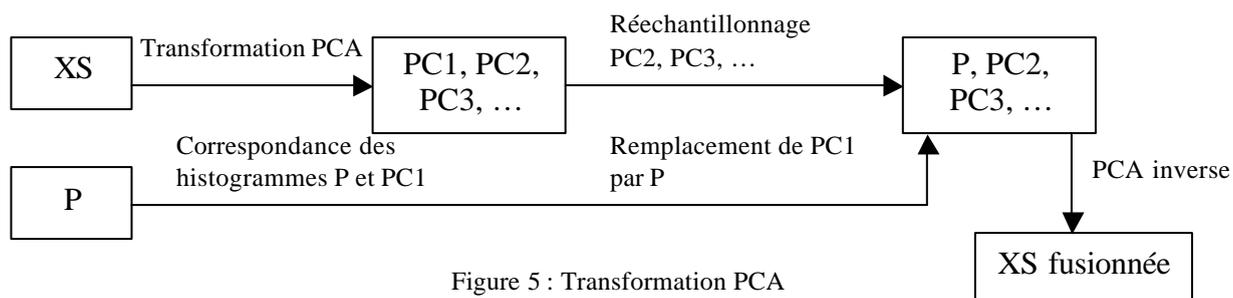


Figure 5 : Transformation PCA

Source : Vijayaraj et al , 2004

Un des avantages majeurs de cette méthode est qu'elle permet de conserver les quatre canaux fournis par l'image brute.

Beaucoup d'autres méthodes d'amélioration des images brutes existent, notamment, l'analyse multirésolution par ondelettes et l'application d'un filtre passe-haut.

✍ L'analyse multirésolution par ondelettes est abordée de deux manières dans la littérature. L'approche de Garguet (Garguet, 1994, dans Rakotoniaina, 1999) utilise l'information spatiale comprise entre les résolutions de 5 à 10m de la bande P pour simuler des images XS à 5m de résolution spatiale. La simulation des images XS à 5m de résolution spatiale se fait grâce à l'utilisation de la transformée en ondelettes et de l'analyse multirésolution. Cette méthode se réalise en trois étapes (Garguet, 1994, dans Rakotoniaina, 1999) : 1) correction géométrique afin d'obtenir une représentation des images à fusionner dans la même projection ; 2) spécification de l'histogramme afin d'obtenir une bonne corrélation des niveaux de gris entre les images P et XS; 3) simulation de l'image à 5m. L'approche de Ranchin (Ranchin,1993, dans Rakotoniaina, 1999) est de créer une image synthétique à 5m dans les trois canaux, proche de ce qu'observeraient les satellites SPOT dans les bandes spectrales correspondantes avec une résolution spatiale de 5m, l'objectif étant de ne pas modifier l'information originale des bandes XS. Il y a trois étapes dans cette approche : 1) modélisation de la transformation des coefficients d'ondelettes P compris entre 5 et 10m en coefficient d'ondelettes XS, à la même résolution ; 2) utilisation de ce modèle pour transformer les coefficients d'ondelettes P compris entre 5 et 10m en coefficients XS à la même résolution ; 3) reconstitution de l'image XS haute résolution à la résolution de 10m. Un gros désavantage de la méthode est sa lourdeur technique.

✍ L'application d'un filtre passe-haut ou High Pass Filter (HPF) extrait l'information spatiale propre à l'image haute résolution à l'aide d'un filtre, et l'introduit par simple addition dans les différentes bandes spectrales de l'image de faible résolution spatiale (Terrettaz, 1998, dans Rakotoniaina, 1999). Les composantes haute fréquence obtenues à l'aide d'un filtre

passé-haut sur l'image P correspondent en grande partie aux informations spatiales contenues dans l'image (Chavez, 1991, dans Rakotoniaina, 1999).

Chaque technique a évidemment des avantages et des inconvénients, il s'agira donc de choisir la plus appropriée au contexte de ce mémoire.

1.2.2.3. Etablir une stratégie de fusion d'image

Une démarche de fusion de données doit suivre un ordre et la séquence des questions à se poser est (Pohl et Van Genderen, 1998):

- « Quels sont les objectifs de la fusion et les applications des produits pour l'utilisateur ? »
- « Quels sont les types de données les plus appropriés pour répondre à ces attentes ? »
- « Quelle est la meilleure technique de fusion pour ces données et cette application ? »
- « Quelles sont les étapes de pré-traitement ? »
- « Quelle est la combinaison de données la plus appropriée ? »

1.2.2.4. Application de cette démarche à notre travail

Première question

L'objectif de la fusion sera d'améliorer et de faciliter la classification des objets issus de la segmentation afin de produire une carte d'occupation et d'utilisation du sol détaillée en région sahélienne à partir de données à très haute résolution.

Deuxième question

Les données prévues pour l'élaboration de la carte sont des images SPOT 5, une image XS (10m) et une P (5m) acquises le 28/09/2004.

Troisième question

La technique de fusion la plus appropriée pour rencontrer au mieux nos objectifs, va être fonction de plusieurs paramètres :

- Une analyse bibliographique, qui permettra de connaître les conclusions de plusieurs travaux sur le sujet.
- Les contraintes temporelles, techniques et logistiques inhérentes à ce mémoire.

Beaucoup d'auteurs ont essayé de pratiquer la fusion d'images avec des techniques et des sources de données différentes. Rakotoniaina (1999) conclut que les techniques basées sur l'analyse multirésolution par ondelettes donnent de meilleurs résultats que les autres techniques.

D'autres auteurs soutiennent l'utilisation de la méthode IHS : pour fusionner une image SPOT HRV, une LandSat TM et une SIR-B image (Ehlers, 1991) ; pour classifier et discriminer les communautés de végétations (Franklin, Blodgett, 1993) ; pour améliorer les couleurs lors du traitement de données hautement corrélées et pour faire ressortir beaucoup de détails (Yésou et al. 1993) ; pour améliorer significativement la discrimination visuelle des objets (Chen et al. 2003) et pour donner le meilleur résultat visuel (Amarsaikhan et Douglas, 2004).

Yésou (1993) conclut, après une étude comparative, que par rapport aux structures géologiques, l'application d'un HFP augmente les caractéristiques linéaires, mais aussi que la méthode PCA améliore les données, détecte bien les changements du couvert du sol et qu'elle est la meilleure technique pour la fusion de données SPOT et Seasat.

Garguet (1997) conclut, suite à une étude sur la fusion de deux images SPOT (P 10m et XS 20m) que la technique IHS donne une bonne qualité géométrique mais que l'information radiométrique est détériorée, il conseille donc son utilisation lorsque la résolution spatiale est plus importante que l'information radiométrique. Par rapport à l'application d'un HPF, il souligne que l'information radiométrique s'améliore mais que la qualité géométrique diminue; il en conclut que le HPF est à utiliser pour une étude de l'environnement de la végétation où la valeur radiométrique est proche de la réalité.

Ranchin (2003), quant à lui, a développé un concept de fusion basé sur le principe des ondelettes - ARSIS - qui s'utilise surtout pour la cartographie urbaine et agricole.

Li (2003) a étudié l'utilisation des *Discret Wavelet Frame Transform* (DWFT), et soutient qu'elles dépassent les performances des méthodes IHS et PCA, particulièrement quand la source des images n'est pas parfaitement enregistrée. Néanmoins cette méthode demande beaucoup plus de temps et d'espace mémoire.

Une combinaison de la transformation IHS et de la *Redundant Wavelet Decomposition* (RWD) a été proposée comme une méthode générale de fusion d'images. Les résultats montrent que cette méthode est préférable à la fusion IHS car elle permet d'introduire des détails spatiaux sans sacrifier le contenu spectral de l'image XS ; les images XS et P peuvent être fusionnées avec une résolution spatiale arbitraire. Cet avantage peut être utilisé pour fusionner les images que l'on obtiendra avec les futurs satellites ; de plus, cette méthode n'a pas besoin d'une forte corrélation entre les données pour être exécutée (Chibani et Houacine, 2002).

Quatrième question

Il n'y a généralement pas de pré-traitement particulier pour pouvoir réaliser une fusion d'images, il est néanmoins recommandé que les corrections - géométrique et radiométrique - de l'image soient effectuées avant la fusion sur les images individuelles (Pohl et Van Genderen, 1998), car après celle-ci la contribution de chaque capteur ne peut plus être distinguée ou quantifiée et par conséquent ne peut plus être traitée en conséquence. Pour ce qui est de la fusion d'images SPOT 5 XS et P, celles-ci n'étant pas prises avec le même angle de visée, les corrections doivent obligatoirement être effectuées avant la fusion.

L'orthorectification doit être de très haute précision, le géocodage doit être parfaitement identique entre les différentes scènes (au pixel près), ceci afin d'éviter d'éventuelles distorsions au niveau des couleurs dans l'image fusionnée et fausser ainsi la classification. Afin d'obtenir le calage le plus proche possible entre les deux images, la méthode de corrélation, qui consiste à redresser l'image XS à partir de l'image P orthorectifiée, est le plus souvent recommandée (Bontemps, 2004).

Cinquième question

Le projet dans lequel se réalise ce mémoire a acquis des images SPOT 5 (une XS 10m et une P 5m). Les images ont été considérées comme adéquates d'une part parce que leur emprise (60 x 60 km) permet une vue complète du site, et d'autre part, parce que leur résolution spatiale permet d'atteindre le niveau de détails requis.

Moment de réalisation de la fusion

La fusion peut se pratiquer à trois moments différents du travail (figure 6). Soit au niveau du pixel, (fusion des pixels), soit après une segmentation, (fusion des objets extraits de l'image), soit encore lors de la phase finale de la segmentation, (fusion des objets extraits et identifiés) (Pohl et Van Genderen, 1998).

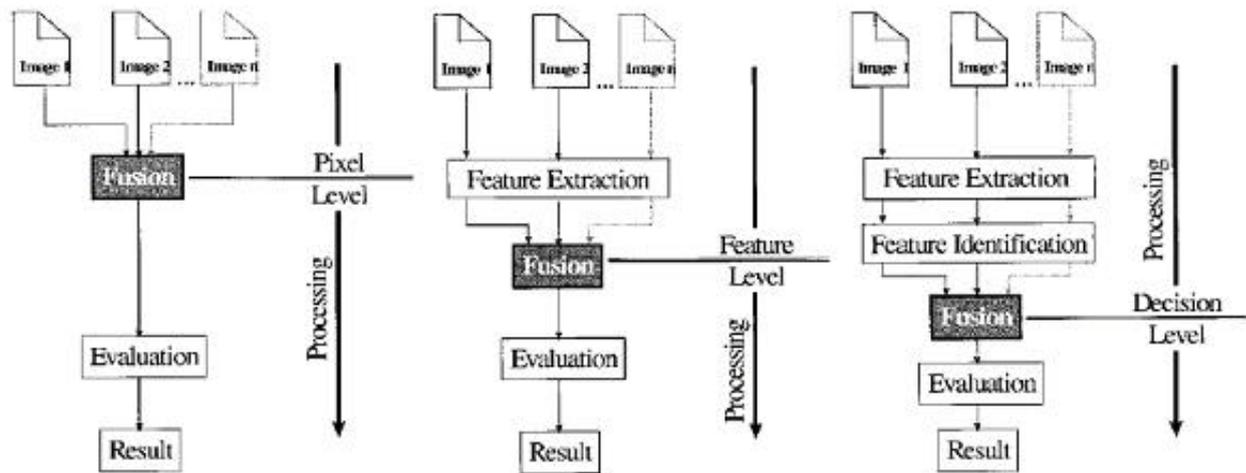


Figure 6: Niveaux de traitements de la fusion d'images
Source : Pohl et Van Genderen, 1998

Dans ce travail, la fusion aura pour but d'affiner la précision spatiale de l'image XS, de préciser et de faciliter la photo-interprétation des images, il est donc plus approprié de la réaliser au niveau du pixel (Amarsaikhan et Douglas, 2004).

1.2.2.5. Validation

La validation d'une fusion se fait sur deux points, afin de s'assurer de sa qualité et de son intérêt. Premièrement, il faut s'assurer de la pertinence de l'apport d'information spatiale, ce qui se fait par une comparaison visuelle d'un extrait de l'image XS et du même extrait issu de l'image fusionnée. Deuxièmement, il faut examiner l'information spectrale, sa dégradation et sa transformation.

Pour ce faire, il existe selon Teggi (2003) trois tests:

- Le premier test compare plusieurs caractéristiques de l'image brute et de l'image fusionnée.
 - ⌘ Le biais : défini comme la différence entre la valeur de la $X^{\text{ème}}$ bande de l'image XS et la valeur de l'image fusionnée. Idéalement cette différence doit être nulle.
 - ⌘ La différence des variances : définie comme la différence entre la variance de la $X^{\text{ème}}$ bande de l'image XS et la variance de l'image fusionnée. Une variance positive indique une perte d'information, une variance négative indique que la méthode « invente des informations ». Idéalement cette variance devrait être nulle.
 - ⌘ Le coefficient de corrélation entre la $X^{\text{ème}}$ bande l'image XS et l'image fusionnée : il montre la similarité entre les structures de petite taille. Il doit être le plus proche possible de un.

∞ La déviation standard de la différence entre la X^{me} bande de l'image XS et de l'image fusionnée : indique globalement le niveau de l'erreur pour n'importe quel pixel. Idéalement elle doit être égale à zéro.

- Le second test est basé sur la conservation de la corrélation entre chaque paire de bandes de l'image XS. Cela se fait en analysant la matrice de corrélation des bandes de l'image. Ce test examine la conservation, s'il y en a, des liens naturels entre les bandes, liens qui représentent une des plus importantes informations de l'image XS. Idéalement, chaque contenu spectral est intact, donc le coefficient de corrélation entre les bandes de l'image fusionnée est égal à celui qui existe entre les bandes de l'image brute. Ce test est aussi préconisé par d'autres auteurs comme Carper (1990), de Béthume (1997), Zhou (1998), dans Tonka (2000).

- Le troisième test est basé sur l'analyse des résultats obtenus après la classification en utilisant une classification de maximum de vraisemblance. Pour ces paramètres, il est indispensable que le spectre de l'image soit classifié avec précision, autant pour la phase d'entraînement que dans la phase d'assignation.

D'autres paramètres peuvent aussi être étudiés lors de la validation d'une fusion, comme par exemple les histogrammes de fréquence des produits initiaux et fusionnés (Wald et al, 1997, dans Tonka, 2000), la corrélation entre le canal panchromatique et la composante intensité de l'IHS (Bontemps, 2004), la différence des déviations standards (de Béthume et al, 1997 ; Zhou et al, 1998, dans Tonka, 2000).

1.2.3. SEGMENTATION

1.2.3.1. Définition

La segmentation d'image consiste à isoler une ou des régions dans une image numérique. Une région se caractérise comme étant un ensemble de points (pixels) ayant des propriétés communes (intensité, texture,...) qui les différencient des pixels des régions voisines. La segmentation base sa ségrégation sur les propriétés spatiales et spectrales des pixels. Lors d'une segmentation très fine, les petites régions formées seront plus homogènes et les grandes régions formées par une segmentation plus large le seront moins, il est donc important de se fixer un taux d'homogénéité à atteindre avant de commencer le travail. L'homogénéité d'une région va se calculer à partir des critères spatiaux et spectraux. La segmentation est un pas important dans l'analyse des données en télédétection (Kartikeyan et al, 1998).

1.2.3.2.Objectifs et avantages

La segmentation est une étape préliminaire à la classification. Elle n'a pour but que d'obtenir des objets dont la superficie est en adéquation avec les éléments à discriminer tout en y maintenant un degré d'homogénéité suffisant (Bontemps, 2004) et de rendre ainsi la classification plus facile, elle n'est néanmoins pas obligatoire. La formation d'objets trop grands nuit à la précision et des objets trop petits alourdissent grandement le travail de classification.

Toujours dans un but d'aide à la classification, il est possible de créer une hiérarchie de niveaux de segmentation (chacun de ceux-ci étant caractérisé par une certaine taille d'objet). Parmi tous ces paliers, un seul servira de support à la construction de la carte d'occupation et d'utilisation du sol. Les autres sont également classés mais les résultats sont uniquement exploités sous forme d'informations pour le niveau fondamental. En conclusion, le niveau de traitement proprement dit est classé en fonction de critères spectraux mais aussi à partir d'informations contenues dans les niveaux adjuvants, inférieurs et supérieurs. Les objets à discriminer n'ayant pas tous la même taille, il est parfois nécessaire de combiner dans le niveau fondamental plusieurs échelles de segmentation, c'est à dire de travailler avec des régions de différente taille (Bontemps, 2004).

La segmentation d'image est une technique communément appliquée dans le domaine de la reconnaissance d'éléments semblables, et s'appliquent très bien aux images SPOT (Pekkarinen, 2002).

1.2.3.3.Méthodes

Il existe de nombreuses méthodes de segmentation, classées en trois types, elles se basent soit sur les pixels, soit sur les frontières soit sur les régions (Pekkarinen, 2002).

Les méthodes basées sur les pixels

Ces méthodes analysent l'homogénéité des pixels entourant un pixel de départ, si celle-ci est forte, les pixels sont regroupés. Ces méthodes incluent des seuils et groupements dans l'espace.

Les méthodes basées sur les frontières

Ces méthodes sont basées sur l'idée que l'on peut diviser l'image en régions en détectant les frontières de celles-ci. En général, les algorithmes de détection de frontières consistent en différentes phases : filtrage, amélioration, détection et localisation des frontières

(Jain et al, 1995 dans Pekkarinen, 2002). L'étape de mise en évidence des frontières est généralement utilisée dans le voisinage local d'un pixel au moyen d'un opérateur de frontière. La phase de détection de frontière est généralement basée sur des seuils de sensibilité du résultat de l'amélioration de la frontière. Donc, seuls les pixels qui ont une magnitude de frontière supérieure à une certaine sensibilité sont considérés comme candidats frontières. Finalement, ces pixels sont reliés à un contour et la région qu'ils entourent est considérée comme étant un segment.

Les méthodes basées sur les régions

Les méthodes de segmentation basées sur les régions incluent la croissance de la région, la fusion de régions, la séparation de régions et leurs combinaisons. Dans les approches de croissance de régions, la première étape est d'identifier les points de départ de la segmentation, souvent appelés les pixels graines. Les régions sont construites autour de ces pixels en les reliant aux pixels similaires voisins. Dans les méthodes de fusion de régions, les régions adjacentes sont fusionnées si elles sont suffisamment similaires. Dans les méthodes de séparation des régions, une région est divisée en sub-région si la région initiale n'est pas homogène.

Le choix de la technique à utiliser dépend de l'application qui va être faite des données (Kartikyan et al, 1998). Pour ce travail, le choix se fera aussi en fonction de la méthode utilisée par le logiciel employé dans l'environnement de travail : e-cognition. Ce logiciel utilise une méthode basée sur les pixels.

1.2.3.4. Validation

Sur ce point, la littérature ne fournit aucune information. Une validation permettrait de s'assurer que les objets formés sont purs, c'est à dire qu'ils ne contiennent qu'une seule sorte de recouvrement ; dans le cas contraire, la classification d'objets mixtes introduirait des erreurs dans le travail.

1.2.4. CLASSIFICATION

1.2.4.1. Définition

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 d'une classification est une nouvelle image dont chaque pixel est identifié par une catégorie particulière d'objets (Defourny, 2004).

Les procédures de classification tentent de réaliser une interprétation assistée par ordinateur d'une image numérique. Une classification doit être indépendante de la source (image satellite, photographie aérienne,...).

1.2.4.2.Méthodes

On distingue deux types de méthodes de classification, la supervisée et la non supervisée :

- 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 à chacun des pixels de l'image l'une des catégories d'occupation du sol. Cette méthode présente un grand avantage, du fait que la classification peut alors être standardisée car elle est indépendante de la zone et de la méthode utilisée. Par contre le principal inconvénient est que cette méthode est rigide, c'est à dire qu'il est impossible de rajouter une classe, et que dans certains cas il n'est pas facile d'attribuer à une parcelle le nom d'une classe prédéfinie.

- La classification non supervisée se pratique si les domaines des classes sont inconnus. On cherche alors à établir des groupements de vecteurs de mesure dans l'espace de représentation en utilisant des critères mathématiques ou statistiques de ressemblance des valeurs considérées comme les domaines des classes. Une fois l'attribution des pixels de l'image complétée, la signification réelle de chaque classe reste alors à établir. Elle utilise des algorithmes d'analyse par regroupement. Ces algorithmes déterminent automatiquement des signatures et les classifient (Bonn et Rochon, 1992). Les avantages de cette méthode sont sa flexibilité et son adaptabilité. Elle est bien adaptée pour des zones spécifiques. Elle est par contre inadaptée pour toute standardisation de classes.

D'autres techniques de classification existent comme par exemple la classification par photo-interprétation, qui consiste à classer les pixels ou les objets sur base d'une très bonne connaissance du terrain et de sa représentation sur l'image.

1.2.4.3. Classification au Sahel

Lors d'une classification supervisée, il convient de définir un ensemble de classe auxquelles on pourra attribuer les différents pixels ou objets. La définition de ces classes sera évidemment fonction de la région d'étude et du degré de précision souhaité.

Un travail a été mené au Niger, dans la région de Niamey, en 1997. Le but était de réaliser une carte de « surface conditions for the 1° square » à partir d'une image SPOT XS de 20 m de résolution. Aucune segmentation n'a été effectuée. Les conclusions de ce travail sont les suivantes : la résolution de l'image ne permet pas de distinguer les différents types de brousses présentes sur les plateaux ; la différence entre les champs et les jeunes jachères n'est pas évidente (Herbés et Valentin, 1997). Nous verrons si ce travail obtient de meilleurs résultats.

Herbés et Valentin ont utilisé 16 classes de légende pour leur carte :

- | | |
|------------------------------|------------------------------------|
| - plateau, dense vegetation | - mid-old high grass fallow |
| - plateau, bare soil | - mid-old low grass fallow |
| - plateau, sparse vegetation | - recent fallow |
| - hillslope ironpan | - hillslope high density field |
| - degraded hillslope | - hillslope low density field |
| - old dense shrub fallow | - valley bottom high density field |
| - old mid-dense shrub fallow | - valley bottom low density field |
| - old sparse shrub fallow | - surficial waters |

Lors de la réalisation de cartes de synthèse et contenant les mêmes informations, ils ont ramené ces 16 classes à 8 classes :

- | | |
|------------------------------|------------------------------|
| - plateau, dense vegetation | - old fallow ; recent fallow |
| - plateau, bare soil | - hillslope fields |
| - plateau, sparse vegetation | - valley bottom fields |
| - degraded hillslope | - surficial waters |

Et pour une carte encore plus synthétique, ils ont gardé six classes:

- | | |
|-----------------------------|--------------------|
| - plateau, dense vegetation | - bush-fallow |
| - plateau, bare soil | - fields |
| - degraded hillslope | - surficial waters |

1.2.4.4.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 l'occupation du sol et la classe attribuée sur la carte réalisée. 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 contamination d'une classe** : Nombre d'objets correctement classés dans cette catégorie par rapport au nombre total d'objets de cette classe. Il représente également les erreurs par excès de chaque occupation du sol.

- **Le pourcentage d'omission d'une classe** : Nombre d'objets correctement classés dans cette catégorie par rapport au nombre d'objets sondés qui en font effectivement partie. Il représente aussi les erreurs par défaut de chaque occupation du sol.

- **La précision globale de la carte** : Nombre d'objets bien classés par rapport au nombre total d'objets sondés. Afin de s'assurer de la représentativité de cet indice et d'affiner ainsi cette information, il est recommandé d'examiner la précision de chaque classe prise séparément.

- **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.

1.2.5. LÉGENDE

1.2.5.1.Définition

La légende est l'application d'un nom générique et descriptif attribué à un ensemble d'objets regroupés par la classification, dans une superficie spécifique utilisant une échelle et un ensemble de données spécifiques. Une légende ne doit donc contenir qu'une partie de toutes les classes possibles pour la classification. Elle est donc dépendante de l'échelle, de la représentation cartographique, des méthodes utilisées et bien évidemment de la zone étudiée.

La légende utilisée sera issue de l'application du système de classification typologique de l'occupation du sol proposé par Di Gregorio et Jansen et décrit au point suivant.

1.2.6. SYSTÈME DE CLASSIFICATION DE L'OCCUPATION DU SOL OU LAND COVER CLASSIFICATION SYSTEM (LCCS)

1.2.6.1. Définition

Le LCCS est un système de classification typologique développé par Di Gregorio et Jansen en 2000, à ne pas confondre avec un système de classification d'image. Les systèmes de classification typologique servent à attribuer de manière systématique un nom à un type d'occupation du sol. Selon Di Gregorio et Jansen, les systèmes de classification typologique actuels comportent une série d'inconvénients qui posent problèmes lors de leur mise en œuvre, ils se proposent de les lever en proposant le LCCS.

Ce système de classification typologique sera appliqué à ce travail, nous discuterons de sa capacité à établir la légende détaillée d'une zone sahélienne.

1.2.6.2. Problèmes des systèmes actuels de classification typologiques

Les systèmes de classification actuels rencontrent des problèmes car notamment, aucun d'entre eux n'a été accepté internationalement et qu'aucun n'est standardisé. Ceci s'explique par le fait que souvent les classes d'occupation du sol sont inappropriées pour des objectifs particuliers, l'échelle utilisée est en relation à un objectif spécifique. L'ensemble des raisons de l'inaptitude des systèmes de classification typologique actuels à être utilisés comme système de référence est décrit en annexe 5.

1.2.6.3. Proposition d'amélioration des systèmes de classification

La définition de l'occupation du sol est la couverture (bio)physique observée sur la surface de la terre. Mais en plus, l'occupation du sol devrait être considérée comme une caractéristique géographiquement explicite que les autres disciplines pourraient utiliser comme référence géographique (Di Gregorio et Jansen, 2000).

Créer une classification typologique supervisée standardisée, hiérarchique et cohérente, contenant des frontières de classes systématiques et strictement définies, demande simplement d'apporter de la flexibilité dans le système de classification. Dans ce cadre ci, flexibilité a plusieurs significations : premièrement, le système de classification doit définir suffisamment de classes pour recouvrir tout le monde réel. Deuxièmement, la flexibilité doit adhérer avec les strictes frontières non-ambiguës et claires des classes. En plus dans un tel système, la description des classes doit être la plus neutre possible, en vue du grand nombre d'utilisateurs potentiels (Di Gregorio et Jansen, 2000).

1.2.6.4. Présentation du LCCS

Selon Di Gregorio et Jansen (2000), dans cette nouvelle approche, une classe d'occupation du sol est définie par la combinaison d'un ensemble de paramètres de diagnostics indépendants ; on les appelle les critères (forme de la feuille, hauteur, type de feuille,...). L'augmentation des détails dans la description des caractéristiques de l'occupation du sol est liée à l'augmentation du nombre de critères utilisés. Les frontières entre les différentes classes sont donc établies en fonction du détail recherché dans la définition des classes indiqué par la présence ou non de tel ou tel critère.

Les difficultés majeures sont, pour une classification supervisée, premièrement, le fait que tous les types d'occupation du sol doivent être définis, car il est évident que l'on définira les forêts avec d'autres critères que les glaciers, il va donc falloir adapter les critères afin qu'ils puissent différencier toutes les zones. Deuxièmement, il faut que deux zones définies par un même ensemble de critères, puissent être distinguées par l'ordre hiérarchique de ces critères, pour assurer un haut niveau de précision.

Les classes d'occupation du sol sont définies par un ensemble de critères, à cause de la complexité de l'occupation du sol et, dans le but de réaliser un arrangement logique, fonctionnel et hiérarchique, des critères morphologiques ont été appliqués.

Les deux phases de classification de la méthode

Le LCCS a été élaboré en deux phases principales (figure 7):

- Une phase initiale : *Dichotomous Phase*, durant laquelle huit occupations du sol principales ont été définies : Cultivated and Managed Terrestrial Areas ; Natural and Semi-Natural Terrestrial Vegetation ; Cultivated Aquatic or Regularly Flooded Areas ; Natural and Semi-Natural Aquatic or Regularly Flooded Vegetation ; Artificial Surfaces and Associated Areas ; Bare Areas ; Artificial Water bodies, Snow and Ice ; Natural Water bodies, Snow and Ice.

Pour cette phase, trois critères ont été utilisés : la présence de végétation, les conditions édaphiques, couverture artificielle ou non. Les définitions quantitatives de ces huit classes sont disponibles dans Di Gregorio et Jansen (2000)

- Une phase secondaire : *Modular-Hierarchical phase*, durant laquelle les classes d'occupation du sol sont créées en combinant un ensemble de critères pré-définis. Ces critères sont adaptés à chacun des huit principaux types d'occupation du sol, cette adaptation permet l'utilisation de critères plus appropriés pour définir les classes d'occupation du sol dérivées des types d'occupation du sol principaux et par la même occasion diminue les combinaisons de critères inutiles.

Chaque occupation du sol est définie par une formule booléenne qui exprime tous les critères utilisés, un identifiant (ID) utile dans un système d'information géographique (SIG) et un nom qui peut être standard.

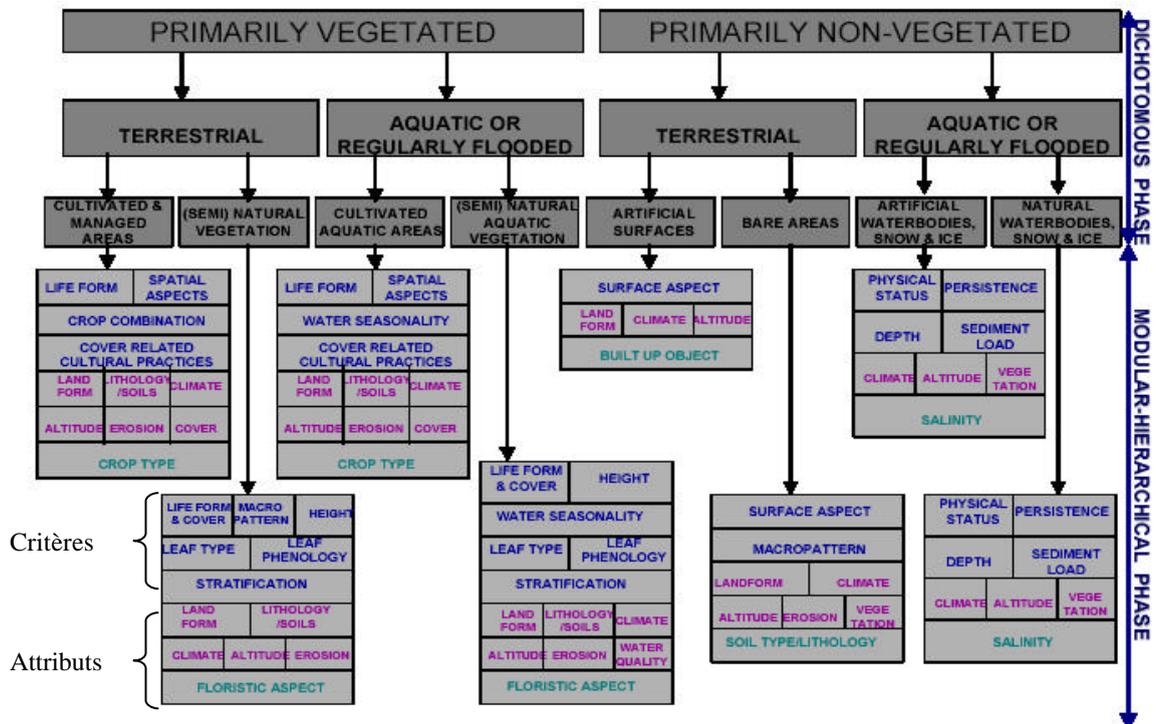


Figure 7 : Vue générale du LCCS, ses deux phases et les critères

Source : (Di Gregorio et Jansen, 2000)

Les attributs

Dans chacun des huit types d'occupation du sol on utilise des critères différents, ceux-ci vont maintenant être combinés avec des attributs pour établir une définition plus précise. Il existe deux types d'attributs :

- Les attributs environnementaux (*Environmental Attribut*) : Ils influencent l'occupation du sol mais ne sont pas des caractéristiques inhérentes, par exemple le climat, l'altitude, le sol, ..., ils ne doivent pas être confondus avec les critères.
- Les attributs techniques spécifiques (*Specific Technical Attribut*) : Ils font référence à des disciplines techniques, par exemple, l'aspect floral, le type de culture, le type de sol, ...

Ces attributs ne sont pas ordonnés hiérarchiquement et leur utilisation peut provoquer une séparation fine entre deux classes.

Application du système à la cartographie

Puisque la classification est utilisable pour la cartographie, le système donne une grande priorité à la capacité de produire des cartes, c'est pourquoi l'utilisateur doit suivre quelques règles spécifiques :

- Un niveau de classification supérieur doit être réalisé avant une classification à un niveau plus bas.
- Tous les critères d'une occupation du sol doivent être déterminés avant de passer au niveau suivant dans « l'arbre dichotomique » de classification.
- Toutes les occupations du sol ainsi définies sont arrangées hiérarchiquement dans la légende.
- Jamais l'utilisateur ne pourra définir une classe d'occupation du sol en utilisant uniquement des attributs. Ces attributs vont ajouter un second code aux classes d'occupation du sol parce qu'ils ne sont pas inhérents aux occupations du sol.
- Une formule booléenne, un code unique et un nom caractériseront chaque classe d'occupation du sol.

1.2.6.5. Les avantages de la méthode LCCS

Selon Di Gregorio et Jansen (2000), cette méthode comporte plusieurs avantages.

D'un point de vue conceptuel

Il s'agit d'une vraie classification supervisée dans le sens où avec tous les critères considérés, on couvre toutes les occupations du sol possibles. Une occupation du sol donnée est clairement et systématiquement définie en faisant une différenciation claire et non-ambiguë par rapport aux autres classes grâce à l'utilisation des critères comme suit :

- Purs critères d'occupation du sol (*Pure land cover classifiers*).
- Attributs environnementaux (*Environmental attribut*).
- Attributs techniques spécifiques (*Specific technical attribut*).

La classification est vraiment hiérarchisée. La différence entre une classe d'occupation du sol et une de ses subdivisions est donnée par l'ajout d'un nouveau critère.

Les classes proposées sont toutes uniques et non-ambiguës, grâce à leur consistance interne et à leur description systématique. De plus, le LCCS est conçu pour cartographier à toutes les échelles.

Di Gregorio et Jansen (2000, 2002, 2003) confirment que le système développé par la FAO est pragmatique et qu'il sert au mieux un grand nombre d'utilisateurs, qu'il favorise la standardisation et notamment en Afrique dans le programme Africover. Ce programme est un projet que la FAO a établi avec et pour les pays africains. L'objectif était de réaliser une base de données digitales géoréférencées de l'occupation du sol et d'un référentiel géographique à une échelle de 1:250.000 / 1:200.000 (et de 1:100.000 pour certaines zones prioritaires et les

pays de petite taille) et généralisée au 1:1.000.000, mis à jour, homogène et comparable d'un point de vue thématique et géographique sur tout le continent africain.

Cette classification peut être utilisée comme référence, pour deux raisons principales : la classification contient un grand nombre de classes ; l'importance est portée sur un ensemble de critères plutôt que sur un nom.

D'un point de vue pratique

Sa conception spécifique lui permet de s'intégrer facilement dans un SIG et dans une base de données. Car la manière dont sont construites les classes facilite les procédures de superpositions.

Cette classification peut être utilisée sans problème à des fins très différentes, ceux qui veulent classifier pour faire une base de données et ceux qui veulent l'utiliser. Sans communiquer entre eux, ils savent comprendre sans difficulté les opérations qui ont été faites.

D'un point de vue interprétation

D'un point de vue interprétation, les avantages sont :

- Grande flexibilité par rapport aux informations disponibles, au temps et au budget consacrés au projet.
- Cela rationalise la collecte de données sur le terrain. Les hommes de terrain doivent travailler avec un ensemble de critères et non plus avec un nom final de classe. Cela permet de faire le travail d'interprétation indépendamment du travail de collecte des données de terrain.
- Il facilite la standardisation et le procédé d'interprétation en contribuant à son homogénéité.
- L'analyse de la précision des résultats est dorénavant plus efficace, puisqu'elle porte non plus sur un seul nom de classe mais sur un ensemble de critères.

2. OBJECTIFS

Ce travail poursuit des objectifs multiples. Premièrement nous testerons la possibilité de produire une carte de référence planimétrique, à partir de données satellitaires à très haute résolution spatiale acquises par le satellite SPOT 5 le 28 septembre 2004. La précision planimétrique d'une carte est fonction de l'échelle et des spécifications théoriques qui lui sont liées, les erreurs de lecture inévitables sont variables selon les standards que l'on choisit comme l'indique le tableau 1. Tant que la précision planimétrique ne dépasse pas la précision de la carte, qui est calculée sur base des corrections géométriques, l'échelle sera jugée adéquate. Cette carte permettra de caler des bases de données et des relevés GPS en cours d'acquisition.

En tenant compte de la résolution spatiale des données (P 5m, XS 10m) et d'une erreur de lecture de 0,3mm, nous nous fixons l'objectif de produire une carte à l'échelle de 1:20.000 afin d'obtenir le meilleur résultat possible à partir des données disponibles. Il faudra donc obtenir une RMSE inférieure à la taille du pixel.

Echelles	Erreur minimum (0,1mm) IGN	Erreur minimum (0,3mm) IGN ^(?)	Erreur minimum (0,5mm) USGS ^(*)	Erreur minimum (0,85mm) USGS ^(*)
1:10.000	1 m	3 m	5 m	8,5 m
1:15.000	1,5 m	4,5 m	7,5 m	12,75 m
1:20.000	2 m	6 m	10 m	17 m
1:25.000	2,5 m	7,5 m	12,5 m	21,25 m
1:50.000	5 m	15 m	25 m	42,5 m
1:75.000	7,5 m	22,5 m	37,5 m	63,75 m
1:100.000	10 m	30 m	50 m	80 m

Tableau 1 : Erreurs de lecture en fonction de plusieurs échelles et de plusieurs standards

Le second objectif est de produire une carte qui soit également détaillée, c'est à dire qu'elle fasse apparaître les éléments constitutifs du système agraire, tels que les champs fumés, les champs non-fumés, les champs sur sol dégradé, les jachères, etc.

Ensuite nous tenterons de rendre la carte la plus pertinente par rapport aux utilisations qui en seront faites sur le terrain, en y ajoutant la localisation des puits, des pistes, des routes latéritiques et des couloirs de passage ainsi qu'une toponymie la plus complète possible.

Enfin, nous appliquerons le système LCCS afin d'établir la légende correspondant aux occupations du sol présentes sur la carte, cela nous permettra de profiter des avantages de ce système de classification et de discuter de sa pertinence en région sahélienne au niveau local.

[?] : source : Bontemps, 2004

^{*} : source : www.usgs.gov

3. CONTEXTE

3.1. LE PROJET

3.1.1. LE CADRE

Le Niger (figure 8) est un pays de l’Afrique sahélienne, dont plus de 85% de la population appartient au monde rural.



Figure 8 : Afrique, Niger

Il s’agit d’un des pays les plus pauvres du monde ; les facteurs humains, naturels et climatiques sont en bonne partie à l’origine des difficultés économiques du Niger.

L’environnement naturel est en constante dégradation. La baisse des productions pousse les agriculteurs à surexploiter les terres et la pression foncière est devenue source de conflits forçant une partie des exploitants à travailler des terres proches mais considérées auparavant comme marginales et vulnérables. Elle a de plus entraîné une réduction et parfois la disparition des jachères et entame le capital forestier.

La fertilité des terres traditionnellement exploitées a diminué. L’amenuisement des aires de pâturage a entraîné une dégradation du couvert végétal aux endroits où celui-ci reste fréquenté par les troupeaux. Le défrichement de nouvelles terres pour la culture et l’exploitation toujours plus poussée du bois de feu ont déjà réduit le capital forestier de 12% sur les quinze dernières années.

Malgré ce bilan négatif, les potentialités du monde rural sont loin d’être négligeables. Un tiers seulement des 15 millions d’hectares cultivables est annuellement ensemencé et seulement 20% des terres irrigables sont mises en valeur. On a recensé des potentialités de cultures fourragères irriguées dans certaines vallées. Plus de 400.000 ha de potentiel

halieutique ont été identifiés, sans compter les nombreux barrages collinaires et étangs piscicoles réalisables.

De plus, le Niger recèle d'énormes potentialités en eaux de surface et souterraines qui sont très peu exploitées. A peine 1% des écoulements superficiels (essentiellement dus au fleuve Niger) est exploité à des fins agro-sylvo-pastorales. L'énorme réserve d'eau souterraine (environ 2.000 milliards de m³, à comparer aux 30 milliards charriés annuellement dans le réseau hydrographique) n'est guère exploitée que par les sociétés de prospection minière en raison des coûts élevés d'accès.

3.1.2. LES INSTITUTIONS

La coopération belge par l'intermédiaire de la Direction Générale de la Coopération au Développement (DGCD) définit avec les pays partenaires le cadre des actions qu'elle entreprend.

Au Sahel, elle finance un projet coordonné par l'ICRISAT : « Amélioration des conditions de vie des producteurs sahéliens à travers la mise en œuvre d'outils bio-économiques d'aide à la décision ». L'ICRISAT est une organisation internationale, sans but lucratif et apolitique, dévouée au développement agricole basé sur les sciences.

Ce projet est mené en collaboration avec de nombreux partenaires dont l'organisation pour la nourriture et l'agriculture (FAO), le centre régional AGRHYMET et l'Université Catholique de Louvain (UCL).

L'équipe de l'UCL a pour responsabilité le développement de modèles bio-économiques d'aide à la décision faisant intervenir des aspects biophysiques (cultures), sociologiques et économiques. Plus spécifiquement, les objectifs de l'UCL sont :

- Au travers de l'utilisation d'un modèle de croissance des cultures, modéliser l'impact de pratiques agricoles sur la productivité des cultures et le risque associé en fonction du sol, des conditions climatiques et des pratiques de gestion à l'échelle parcellaire et du terroir villageois;
- Au travers de l'utilisation d'un modèle de simulation des sociétés rurales, modéliser les choix, les objectifs et les stratégies des acteurs au sein d'un terroir, concernant leurs diverses activités et les pratiques correspondant à ces activités, et ce, en fonction de leur environnement social, biophysique et économique;
- Au travers de modélisations socio-économiques, identifier les contraintes qui affectent les marchés des produits agricoles, du travail, du crédit et de la terre, et expliciter le choix des agriculteurs entre activités agricoles et d'autres activités économiques ou sociales.

Ces trois thématiques sont chacune traitées par un doctorant, la première est traitée par M. Pierre Akponikpe, la seconde par M. Mehdi Saqalli et la troisième par M. Eduardo Marinho. Ces trois doctorants étant encadrés par M. Defourny et M. Bielders (professeurs à l’UCL) et M. Gérard (Coordinateur du Centre Sahélien de l’ICRISAT). Ces études se font sur trois régions simultanément, le Fakara, Gabi et Zinder.

3.2. LE FAKARA

3.2.1. GÉNÉRALITÉS

Une étude préalable de la zone de travail dans son ensemble et à tous les points de vues est très importante afin de pouvoir ensuite faire une analyse juste et complète de l’occupation et de l’utilisation du sol.

3.2.1.1. Situation géographique

Le Fakara (figure 9) est une zone d’étude définie artificiellement et fait partie du canton de Dantiadou. Le Fakara est situé en zone sahélienne à 80 km de la ville de Niamey entre les latitudes 13° et 14° Nord et les longitudes 2° et 3° Est.

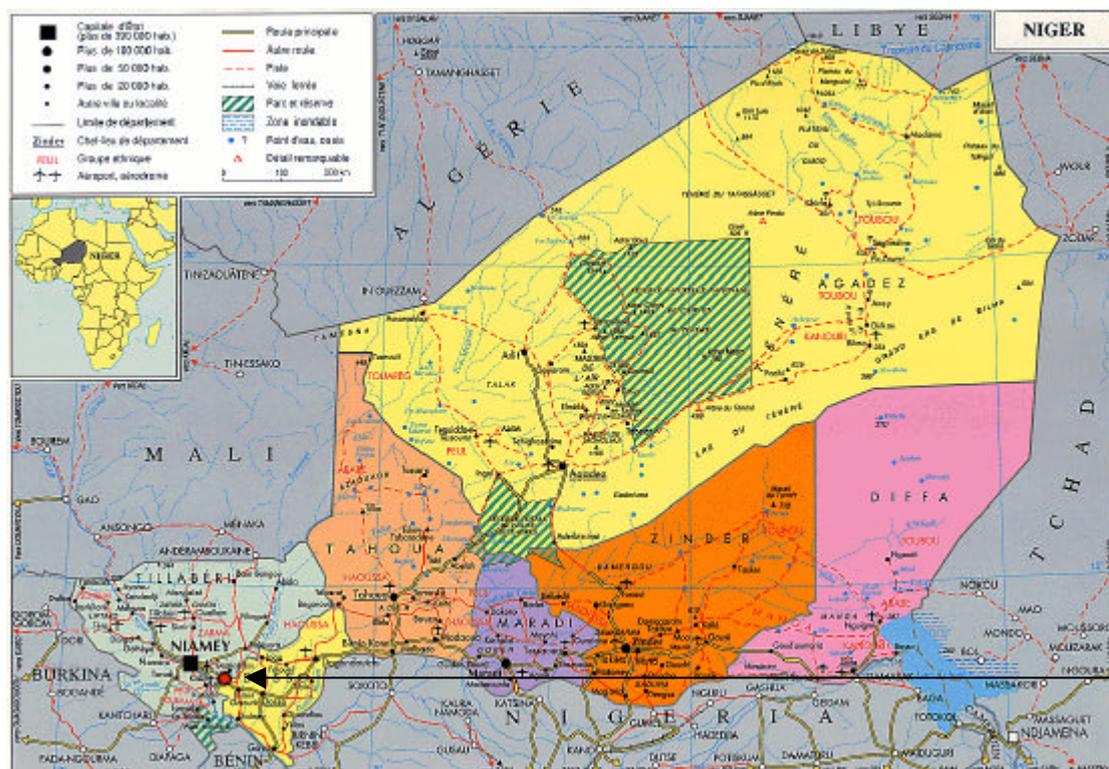


Figure 9 : Niger, zone du Fakara Géologie et topographie.

Le Fakara est situé dans la partie inférieure d’un grand bassin de dépôts sédimentaires s’étendant de l’Ouest du Niger au Sud-Est du Mali. La zone est dominée par une formation

géologique complexe de grès plus ou moins argileux et de dépôts épais du miocène, connue sous le nom de «Continental Terminal » (Hiernaux, 2002 dans Pereira, 2002).

3.2.1.2.Relief

Le relief est très peu marqué avec un maximum de 100m de dénivelé, on peut néanmoins en différencier quatre grands types:

- **Les plateaux** s'étendent sur les formations gréseuses du «Continental Terminal », avec des sols généralement peu évolués, peu profonds, à faciès ferrugineux, à faible capacité d'infiltration. Ce sont ces cuirasses ferrugineuses qui abritent la brousse tigrée. Les pentes ne dépassent guère 0,6 pour mille. La faiblesse de ces pentes contribue à la dynamique de la végétation. Sur ces plateaux, il existe quelques ensablements réservés à la culture. Ces plateaux constituent principalement un lieu de pâturage pour les animaux en saison de cultures, de prélèvement de bois de chauffe, ainsi qu'un lieu de cueillette.

- **Les talus** se trouvent juste après les plateaux, ceux-ci présentent une forte pente, ils sont composés de gravillons sombres et parfois de blocs hétérométriques éboulés sur affleurement gréseux. Ces talus sont exploités pour l'élevage et la production de bois.

- **Les glacis** et les jupes sableuses, situées entre les talus et les bas-fonds et sont constitués de sable rouge. Ce sont des dépôts de l'erg ancien datant de l'Ogolien. On distingue deux zones : une zone en amont ou jupe sableuse (pente de 5%), et une zone en aval (glacis) avec une pente faible qui se termine par un épandage large de 40 m. Ce glacis est creusé de ravines dues à l'écoulement des eaux des plateaux. Les glacis se caractérisent par leur couverture sableuse dominée par la végétation ligneuse. C'est le type de relief le plus représenté, abritant la quasi-totalité des terres de culture avec les terres situées dans les bas-fonds.

- **Les bas-fonds** se retrouvent dans le plus bas niveau de la toposéquence, ils occupent une très faible proportion de la surface totale. Ils reçoivent les terres arrachées aux talus, glacis et jupe sableuse.

3.2.1.3.Climat

Le climat de la zone est de type tropical semi-aride, et se divise en quatre saisons (annexe 6). Les précipitations annuelles moyennes sont de 526 mm (Schlecht et al. 2002, dans Pereira 2002) et se distribuent pendant la saison des pluies, de mai à octobre (Hiernaux, 2002 dans Pereira, 2002). Les images qui serviront de base à ce travail ont été acquises le 28/09/2004, il est certain que ce paramètre influencera les occupations du sol.

Le climat est caractérisé par une forte hétérogénéité des pluies avec de larges fluctuations inter-annuelles. De plus, sur une même année la variabilité de la pluviosité moyenne peut être

très importante, avec parfois des différences de 100mm de précipitations sur des champs distants de 5km seulement (de Rouw, 1997, dans Pereira, 2002). Toutes ces fluctuations ont des conséquences sur les productions agro-sylvo-pastorales.

La pluviométrie définit quatre zones (annexe 7) à travers le pays, le Fakara se trouve dans la zone sahélo-soudanienne, elle détermine aussi avec l'altitude les compositions végétales (annexe 8).

3.2.1.4.Pédologie

Les sols du Fakara, malgré leur substrat uniforme, ont des aptitudes agricoles différentes. Les sols sont majoritairement pauvres avec une CEC peu élevée et des teneurs en azote et en phosphate assez faibles.

3.2.1.5.Démographie et groupes ethniques

La zone du Fakara comptait en 2000, selon l'AGRHYMET, 24870 habitants. La pression démographique sur les terroirs est importante. La population du Fakara est essentiellement constituée de Peuls et de Djermas.

Les Djermas forment le deuxième grand groupe ethnique au Niger, après les Haoussas. L'économie des Djermas est principalement constituée d'une agriculture de subsistance. Les principales cultures (mil, sorgho, niébé) sont contrôlées par l'homme à la tête du ménage. Sur des champs individuels, les femmes djermas cultivent l'arachide, quelques variétés de légumes et sur les bords du fleuve Niger, du riz.

Les Peuls sont eux répartis sur un vaste territoire allant des pays sahéliens et du nord de la zone soudanienne à la savane humide de la côte ouest de l'Afrique (Neef, 2001, dans Pereira, 2002). Les Peuls vivent de manière semi-sédentaire, d'une économie pastorale, ils effectuent régulièrement des migrations.

Les interactions et la dépendance mutuelle entre les Djermas et les Peuls ont créé un système agro-pastoral hautement complexe qui doit pouvoir être en partie visible sur les images satellites et peut-être en partie décodé suite à une analyse minutieuse de celles-ci.

Pendant la saison humide, les Djermas confient généralement leur troupeau aux Peuls, contre paiement (argent ou nourriture) ou prêt de terrain, afin de pouvoir se consacrer entièrement aux travaux des champs.

3.2.2. *ELEVAGE ET SYSTÈME DE PRODUCTION AGRICOLE*

3.2.2.1. Système de production agricole

Le système de production agricole pratiqué dans la zone d'étude va fortement influencer les occupations du sol et encore plus fortement l'utilisation du sol. Il faut de ce fait porter une très grande importance à l'étude de ce point, afin de pouvoir saisir les indices qui nous permettront de correctement photo-interpréter les éléments constitutifs du système agricole.

L'agriculture est pratiquée par l'ensemble de la population de la zone, il s'agit de la principale activité économique. Son niveau d'intensification est très faible, comme pour l'ensemble des pays situés en zone sahélienne pour des raisons déjà décrites précédemment.

La principale culture d'importance est le mil, souvent associé au niébé. Les cultures d'importance secondaire sont le sorgho, l'oseille et l'arachide (Pereira, 2002). Le mil est semé avant les premières pluies, entre le quinze mai et la fin du mois de juin. Il arrive souvent que les agriculteurs doivent ressemer, à cause de l'espacement trop important entre la première pluie qui fait germer la graine de mil et la seconde.

Aux environs de la mi-octobre, le mil est mis en botte et conservé dans un grenier légèrement surélevé pour être à l'abri des rongeurs. Vu la date d'acquisition de l'image (28/09/2004), on risque d'avoir, sur l'image, des parcelles sans végétation ou avec une végétation très faible due aux résidus de cultures qui ne l'était pas le jour avant. Il faudra tenir compte de ce paramètre lors de l'analyse de la carte d'occupation du sol. Ces parcelles récoltées ne devront pas non plus être confondues avec des sols nus en permanence ou des sols à culture très peu rentable, il faudra tenter de les différencier lors de la classification car cette nuance sera très importante pour la carte d'utilisation du sol.

L'espace agricole est divisé en deux secteurs distincts, qu'il sera aussi très important de distinguer:

- **Les champs de case**, formant une auréole autour du village, qui bénéficie des apports organiques sous forme d'ordures ménagères, de déjections animales et humaines. Sur ces champs, disposant de conditions privilégiées, est cultivé le mil hâtif, en culture pure ou associée au niébé, au sésame ou au sorgho. Le mil hâtif, avec son cycle plus court est privilégié, sur ces champs plus riches, pour répondre aux besoins alimentaires de la fin de la « période de soudure ».

- **Les champs éloignés du village**, où les terres sont mises en culture afin de répondre aux besoins de plus en plus importants liés à la croissance démographique. Sur ces champs est

cultivé le mil hâtif ou tardif. Ce dernier, permettant des récoltes plus importantes, est cultivé en culture pure ou en association avec l'oseille ou le niébé.

3.2.2.2.Elevage

Les productions et les fonctions de l'élevage sahélien sont multiples. En plus des productions alimentaires, l'élevage joue un grand rôle dans l'exploitation familiale par l'apport de force de travail, l'apport d'énergie et l'apport de fumier, mais aussi un rôle économique et social.

Au Fakara, pendant la durée de la période culturale, les animaux sont éloignés du champ. Pour cela, ils sont mis en enclos ou, quand le troupeau est plus important, ils sont envoyés en transhumance vers le nord. Il serait intéressant pour ce point de pouvoir repérer les couloirs de passage empruntés par les troupeaux lors de cette transhumance, afin de pouvoir fournir des repères supplémentaires sur la carte.

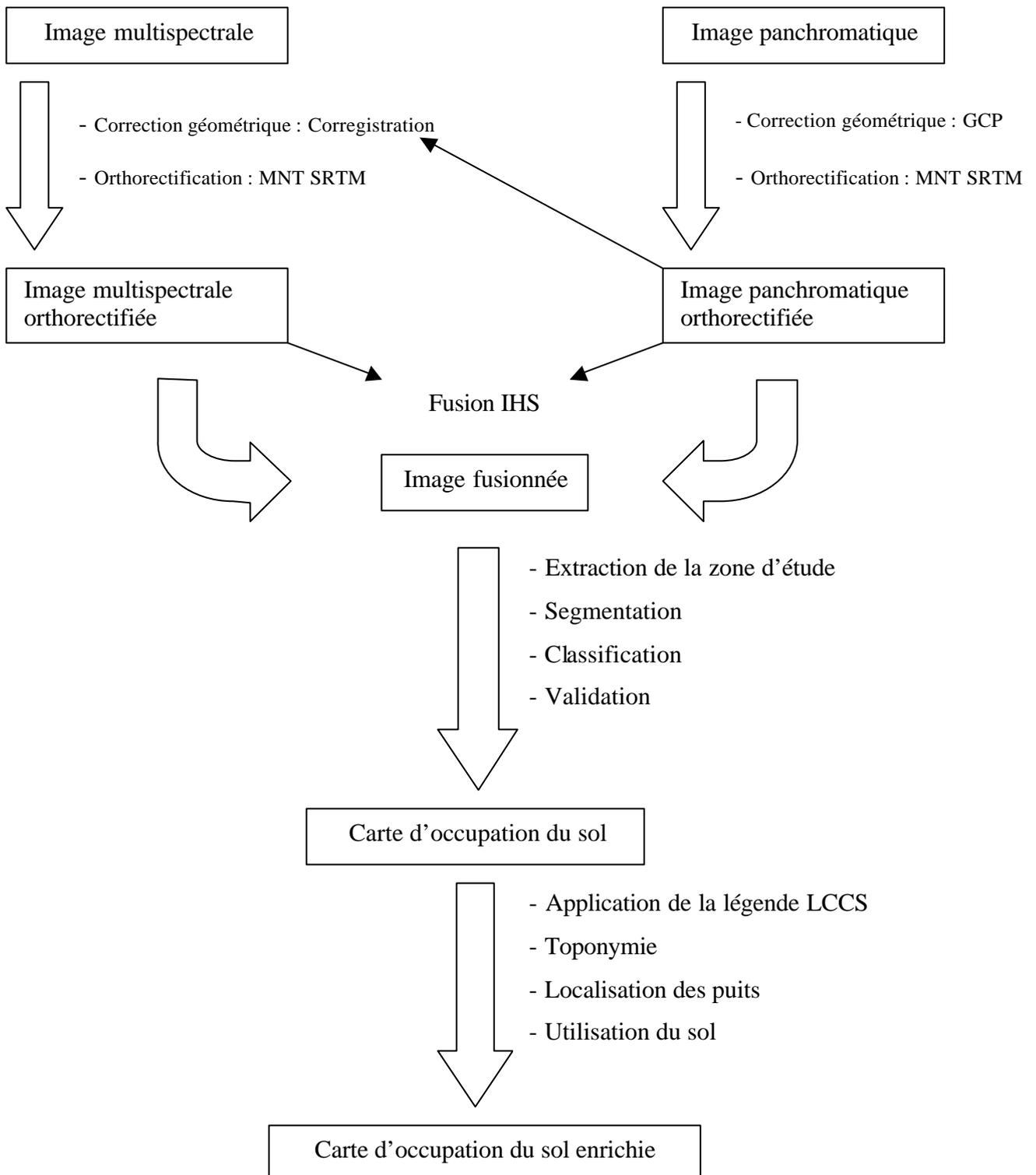
Le fait que les animaux aillent pâturer loin des villages apporte à ces champs éloignés de la matière organique fraîche, de part les déjections animales. De même, les campements nomades peuls circulant dans la zone avec leurs troupeaux sont une source de matière organique fraîche pour les parcelles qui les accueillent. Il ne faut donc pas s'étonner de voir des parcelles de végétation dense loin des villages.

L'agriculture et l'élevage, en tant que sous composantes du système agraire, sont complémentaires (fourrage, fertilité et énergie) mais très souvent en compétition pour l'utilisation de l'espace (extension des terres de culture et conflits subséquents entre agriculteurs et éleveurs).

4. MÉTHODOLOGIE

Les méthodes de traitement les plus avancées seront mises en œuvre afin d'obtenir les résultats souhaités, une vue globale de la démarche suivie est présentée ci-dessous.

4.1. VUE GÉNÉRALE



4.2. DONNÉES

Pour ce travail, les données disponibles sur la zone sont :

- Deux scènes SPOT 5 dont les caractéristiques sont présentées dans le tableau 2.

	Scène SPOT 5 XS	Scène SPOT 5 P
Date d'acquisition	28/09/2004	28/09/2004
Heure d'acquisition	10h29	10h29
Angle solaire - azimut	130,611509°	130,624486°
Angle solaire - élévation	66,466576°	66,472661°
Angle d'orientation	12,802854°	12,778988°
Angle d'incidence	L1, 449757°	L1,361786°

Tableau 2 : Caractéristiques des scènes SPOT 5

- Quatre cartes topographiques de l'IGN 1:50.000, en format papier et scannée : Niamey 4b, Niamey 4a, Niamey 2c, Niamey 2d. Celles-ci ont été réalisées par l'Institut Géographique du Niger et par l'agence de coopération internationale du Japon en 1994. La projection des cartes est la projection Mercator Transverse Universelle (UTM), fuseau N°31. L'ellipsoïde de référence est le Clarke 1880.

- Le modèle numérique de terrain SRTM de la zone, à 90m de résolution.

- Un fichier de formes reprenant le nom et le positionnement des villages du Niger, fourni par l'ICRISAT

- Un fichier contenant 36 GCP couvrant toute la zone, acquis le 4/4/2005 au dGPS (précision de 1 à 3m), fourni par l'ICRISAT.

4.3. ORTHORECTIFICATION

L'orthorectification appliquera le MNT SRTM d'une résolution de 90 m à l'image P, qui aura préalablement été corrigée géométriquement.

La correction géométrique de l'image P se fera à partir de GCP. L'image XS sera, quant à elle, orthorectifiée par corrélation à partir de l'image P corrigée, comme recommandé dans la littérature pour obtenir la meilleure correspondance entre les deux images. La corrélation consiste à attribuer les coordonnées des pixels, de l'image P corrigée, qui ont servi de GCP aux pixels de l'image XS qui leur correspondent. La corrélation de l'image XS se fera à partir de l'image P, et non l'inverse, car l'image P a une meilleure résolution spatiale (5m) ce qui permettra une localisation des GCP plus précise.

Aucune correction radiométrique ne sera réalisée vu les pré-traitements de l'image déjà réalisés, d'autant que lorsque les données d'entraînement et l'image à analyser sont comparables (corrigées ou non), l'étalonnage n'est pas nécessaire lors des opérations de classification, étant donné qu'il n'améliore pas significativement la précision du résultat (Song et al. dans Bontemps 2004). De plus, comme souligné dans la synthèse bibliographique, un tel étalonnage est utile pour faciliter la comparabilité des données (Markham et Barker, 1986, dans Peeters 2000), ce qui ne sera pas le cas dans ce travail.

4.3.1. COLLECTE DES POINTS DE CONTRÔLE AU SOL

Les résultats de deux processus de correction géométrique seront comparés dans ce travail, le meilleur sera gardé pour réaliser l'orthorectification.

4.3.1.1. Acquisition des GCP à partir des cartes topographiques de l'IGN

Une première collecte de GCP se fera à partir de cartes topographiques 1:50.000. Un maximum de points sera localisé et encodé, ils seront le mieux répartis possible et le plus facilement repérables sur l'image P, afin de s'assurer le meilleur résultat possible.

4.3.1.2. Acquisition des GCP à partir de points relevés au dGPS

Une seconde collecte de GCP sera effectuée sur le terrain au dGPS, en appliquant les mêmes principes que lors de la collecte précédente.

4.3.2. MODÈLE NUMÉRIQUE DE TERRAIN

Le MNT utilisé pour ce travail sera celui construit à partir de données SRTM car il fournit selon Sun (2003) la meilleure information d'altitude.

Les fichiers recouvrant la zone concernée par le travail seront téléchargés depuis le site Internet (<ftp://e0dps01u.ecs.nasa.gov/srtm/Africa/>). Ils seront ensuite assemblés, en évitant les chevauchements et en rebouchant les éventuels trous par extrapolation des valeurs voisines, afin de construire le MNT qui sera appliqué à l'image P.

4.3.3. CONTRÔLE DE QUALITÉ

La qualité des orthorectifications sera contrôlée sur base des valeurs de RMSE obtenues (cfr : 1.2.1.2). Pour rappel, le RMSE correspond à la distance entre la position d'un GCP une fois l'image corrigée et sa position de référence sur la carte topographique. Une valeur de RMSE inférieure au pixel (5m) est indispensable pour ce travail. En effet, le résultat obtenu doit permettre de réaliser une carte au 1:20.000 qui soit une référence planimétrique. La précision planimétrique de la carte doit donc être inférieure à 6m (tableau 1).

4.4. FUSION

Une fusion sera réalisée dans le but d'ajouter l'information spatiale de l'image P à l'information spectrale de l'image XS. Cette addition d'informations améliorera la précision de la segmentation et facilitera la photo-interprétation lors de la classification, en améliorant le contenu visuel de l'image (cfr : 1.2.2.1).

4.4.1. MÉTHODE UTILISÉE

La méthode la plus adéquate pour ce travail semble être, selon la littérature, la méthode IHS. En effet, elle répond aux objectifs poursuivis par la réalisation d'une fusion, elle facilite la discrimination des communautés de végétation (Ehlers, 1991), et elle améliore significativement la discrimination visuelle des objets (Chen et al. 2003). De plus, cette méthode semble être un bon compromis entre qualité des résultats, temps et complexité technique.

Cette méthode implique la suppression d'une bande spectrale de l'image XS. Le choix de la bande à sacrifier se portera sur la bande la moins utile pour la réalisation des objectifs, c'est à dire, la moins discriminante pour réaliser une classification par objet en région sahélienne.

Pour ce travail, la bande éliminée sera la bande du moyen infra-rouge (MIR) pour deux raisons :

- Elle n'est pas couverte par le capteur panchromatique (tout comme la bande proche infra-rouge (PIR)) et donc, le risque de dégradations et/ou de pertes d'informations est plus

important car la bande supprimée est remplacée par une autre bande qui n'a aucun point en commun avec la bande éliminée.

- Elle sera choisie par rapport à la bande du PIR car cette dernière est plus discriminante.

La méthode IHS présente un autre inconvénient non négligeable, elle dégrade l'information spectrale. Une attention toute particulière sera donc portée sur ce point lors de la validation de la fusion.

4.4.2. VALIDATION

La validation de la fusion doit se faire à deux niveaux :

- La pertinence et la qualité de l'ajout de l'information spatiale de l'image P.
- La conservation de l'information spectrale.

4.4.2.1. Validation spatiale

L'ajout d'information spatiale sera évalué par une comparaison visuelle d'extraits de l'image XS et de l'image fusionnée.

4.4.2.2. Validation spectrale

Afin de valider la qualité spectrale nous allons appliquer à la fusion réalisée différents tests parmi ceux présentés dans la synthèse bibliographique (cfr : 1.2.2.5) :

- Analyse des histogrammes de fréquence pour les canaux du PIR, rouge et vert de l'image XS originale et de l'image fusionnée.
- Analyse du biais.
- Analyse de la différence des déviations standards.
- Analyse des coefficients de corrélation entre les bandes de l'image XS et les bandes correspondantes de l'image fusionnée.
- Analyse de la conservation du coefficient de corrélation entre deux bandes d'une même image.

Les quatre premiers paramètres ont été choisis pour le bon compromis qu'ils présentent entre qualité de l'information, nécessité de temps et complexité technique. Le dernier a été choisi pour évaluer la conservation des liens naturels entre les bandes, et s'assurer que l'information n'a pas évolué et qu'elle peut toujours servir de base pour réaliser une classification de qualité.

4.4.3. EXTRACTION DE LA ZONE DU PROJET

Suite à la fusion, l'image sera découpée, car les scènes SPOT 5 recouvrent une zone bien plus grande que le site concerné par le projet. Ceci se fera dans un esprit de clarification de l'information à la seule zone concernée par le projet. Par la même occasion cela diminuera la variabilité de l'information dans l'image, mais aussi la taille des fichiers à traiter et par conséquent le temps de traitement des fichiers. Une bande de ± 5 km sera gardée en plus autour du site même.

4.5. SEGMENTATION

Une segmentation sera réalisée sur notre image fusionnée afin de rendre la classification plus aisée en regroupant les pixels ayant des propriétés spectrales et/ou spatiales similaires en objets plus importants correspondant aux éléments à discriminer (cfr : 1.2.3.1) (Bontemps, 2004).

Lors de la segmentation, une attention particulière sera portée sur le fait que les objets formés soient purs, c'est à dire qu'ils ne regroupent que des pixels appartenant à la même classe d'occupation du sol.

4.5.1. MÉTHODE UTILISÉE

La segmentation sera réalisée grâce au logiciel *e-Cognition* (*e-Cognition User guide* 3, 2000). La segmentation d'image, que l'on appliquera à notre image, fait partie des méthodes basées sur les pixels (cfr, 1.2.3.3). La procédure utilisée par le logiciel est la suivante : Elle se base sur une technique qui regroupe des petites régions ayant les mêmes propriétés en régions plus grandes à partir d'un pixel de départ. En plusieurs étapes successives, des petits objets de l'image sont regroupés en objets plus importants. La procédure de regroupement des éléments par paire est optimisée en minimisant l'importance de l'hétérogénéité des nouveaux objets créés. Si la plus petite croissance d'hétérogénéité excède la valeur seuil définie par les paramètres d'échelle, le processus de regroupement s'arrête. Le logiciel réalise des objets mitoyens de taille similaire.

Dans la zone du projet, les zones villageoises et urbaines se caractérisent par une combinaison hétérogène de différents comportements spectraux. Cela est dû à la présence simultanée d'habitations, de potagers, d'arbres,... dans ces zones. Afin que ce comportement particulier ne rende pas le reste du travail plus compliqué, une segmentation adaptée devra pouvoir les isoler précisément du reste de l'image. Ces objets «villages », seront classifiés

manuellement dans une classe village et une couche matricielle sera formée, celle-ci sera alors utilisée comme couche thématique lors de la classification du reste de l'image.

Les informations altimétriques contenues dans le MNT permettront de faire une segmentation sur base de ces données pour isoler les zones de plateaux des zones de plaines, une valeur seuil sera déterminée pour séparer ces deux zones fortement distinctes. Ces deux zones pourront ainsi, ensuite, être traitées séparément.

4.5.2. VALIDATION

La segmentation doit être validée afin de s'assurer que, lors de la classification, les objets classifiés sont purs, et non mixtes, ce qui introduirait des erreurs dans le travail.

Une méthode de validation est proposée et appliquée dans ce travail. Elle tient compte du type d'image à disposition, des connaissances acquises sur la zone de travail, des possibilités techniques, temporelles et logistiques disponibles pour ce travail.

Puisque l'objectif de la segmentation est de former des objets purs en terme de type de recouvrement, la méthode de validation se base sur une interprétation visuelle de la mixité d'une série d'objets formés par la segmentation.

Les différentes étapes de cette méthode sont :

- Sélectionner un nombre, statistiquement suffisant, d'objets à analyser par une sélection totalement aléatoire, puisqu'il n'y aucune différence particulière entre eux.
- Déterminer les classes d'occupation du sol que l'on souhaite discriminer lors de la classification, afin de valider la segmentation par rapport à ses objectifs spécifiques de précision.
- Analyser visuellement la pureté des objets en déterminant le nombre de classe d'occupation du sol de la liste présente dans l'objet. S'il n'en contient qu'une seule, l'objet est défini comme étant pur, dans le cas contraire il est défini comme étant mixte. L'analyse peut se faire à l'écran ou sur le terrain.
- Calculer le résultat en déterminant le rapport entre le nombre d'objets purs et l'ensemble des objets analysés. L'analyse des résultats est laissée à chacun en fonction des paramètres spécifiques de son travail.

4.6. CLASSIFICATION

La classification attribuera à chaque objet issu de la segmentation de l'image une catégorie donnée d'objets.

4.6.1. MÉTHODE UTILISÉE

La méthode de classification par objet, mise en place pour ce travail, sera une méthode de classification supervisée basée sur des zones d'entraînement déterminées par photo-interprétation.

La classification se basera sur une structure arborescente, la photo-interprétation sur une série de paramètres (la couleur, la taille, la forme, la localisation et les associations possibles des différents objets) et la discrimination des objets sur base de valeurs seuils de réflectance des canaux du PIR, du rouge et du vert, des informations spatiales et de l'indice de végétation NDVI. Le NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) est l'indice de végétation le plus connu et le plus utilisé (Geerken, 2004), il s'exprime de la manière suivante :

$$\text{NDVI} = (\text{PIR}-\text{R}) / (\text{PIR}+\text{R})$$

où PIR représente la réflectance du proche infra-rouge et R représente celle du canal rouge.

Ce type de classification nécessite une pré-définition précise d'un ensemble de classes d'occupation du sol que l'on voudrait voir apparaître sur la carte.

Les paramètres principaux dont il faut tenir compte sont :

- Les objectifs du travail – En effet ceux-ci déterminent le niveau de précision souhaité. Dans notre cas, l'objectif est d'établir une carte détaillée, précise et claire des éléments formant le système agraire de la zone. Pour éviter une surcharge d'informations, il faudra déterminer les classes importantes et les isoler des classes d'importance secondaire voire inutiles.
- Le nombre d'images disponibles – Il détermine la quantité et le type d'informations disponibles. N'ayant, pour ce travail, qu'une image à notre disposition les possibilités d'interprétation sont limitées. Nous ne pourrions pas recouper les informations d'images acquises à des dates différentes. Aucune interpolation abusive ne peut être commise sous peine d'intégrer des erreurs dans le travail.
- La date d'acquisition des images - Elle détermine grandement les occupations du sol, de part le calendrier des cultures. La carte d'occupation du sol sera réalisée à partir d'une image prise le 28/09/2004. Pour rappel, cette date correspond à la fin de la saison des pluies et au début des récoltes.

Une liste des classes à discriminer a été élaborée à partir des informations récoltées dans la littérature et auprès de Messieurs Garba, Apoknikpe, Marinho, Gérard et Defourny.

Les classes choisies sont définies comme suit :

- **Surface d'eau libre** : regroupe toutes les surfaces recouvertes d'eau à la date d'acquisition de l'image, faisant partie du réseau hydrographique ou non, permanentes ou non.
- **Kori** : regroupe toutes surfaces d'eau libre, non permanente et mouvante sèches à la date de l'acquisition de l'image.
- **Sol nu** : regroupe toutes les surfaces n'étant recouvertes d'aucune végétation à la date d'acquisition de l'image, en ce compris les roches affleurantes et les sols sableux.
- **Village** : regroupe les habitations, les places, les potagers, les marchés et toute autre construction.
- **Végétation naturelle en régénération** : regroupe les surfaces généralement cultivées où la végétation naturelle est momentanément laissée en croissance spontanée et non contrôlée.
- **Végétation naturelle en régénération depuis quelques années** : regroupe les surfaces généralement cultivées où la végétation naturelle est, depuis quelques années, laissée en croissance spontanée et non contrôlée.
- **Végétation cultivée sur sol non fumé** : regroupe les surfaces où la végétation est cultivée sur un sol sans aucun apport de matière organique fraîche.
- **Végétation cultivée sur sol fumé** : regroupe les surfaces où la végétation est cultivée sur un sol enrichi par des apports de matière organique fraîche.
- **Végétation cultivée sur sol dégradé** : regroupe les surfaces où la végétation est cultivée sur un sol dont l'état bio-physico-chimique ne permet pas un rendement maximum des cultures.
- **Bande boisée** : regroupe les surfaces recouvertes d'une végétation arbustive dense. Une partie de ces bandes de végétation forme avec des bandes de sol nu ce qui est communément appelé brousse tigrée.

4.6.2. VALIDATION

La validation aura pour but d'évaluer la qualité du résultat obtenu, elle se fera par l'analyse de trois matrices de confusion. Afin de construire ces matrices, une série de points de l'image doivent être sélectionnés et analysés. Cette sélection doit être faite de manière telle que les points soient les plus représentatifs de l'image et qu'ils permettent de réaliser une validation de qualité.

Les points seront choisis par une sélection stratifiée. Un minimum de cinq points par classe et un maximum de trois cents points pour l'ensemble de l'image seront requis. Les classes représentées par une surface en deçà d'un seuil fixé sur l'image se verront donc

attribuer cinq points aléatoirement distribués, et les autres classes une quantité de points directement proportionnelle à leur surface, aléatoirement répartis.

Par la suite, les points sélectionnés seront interprétés à l'écran et ces interprétations seront comparées avec les attributions de classes réalisées lors de la classification.

L'interprétation des points au niveau du pixel n'a ici aucun sens. En effet, il faut tenir compte de la taille minimum de l'unité cartographique et de la précision planimétrique. La validation ayant été réalisée sur le même document que la classification, les erreurs de précision planimétrique n'entrent pas en compte. L'objectif de ce travail, est d'obtenir une carte à l'échelle 1:20.000, l'erreur de lecture sera de 6,7m si on considère 0,3mm comme référence. L'interprétation se fera sur un carré de 3x3 pixels pour garder une marge de sécurité.

Une première matrice sera réalisée sur base de mon interprétation des points sélectionnés. La seconde sera réalisée sur base de l'interprétation de M. Garba, qui possède une très grande connaissance de la zone, la troisième sera réalisée sur base des mêmes données mais en regroupant les classes de même nature.

La comparaison des résultats obtenus par les deux premières matrices permettra de quantifier différentes sources d'erreurs, c'est à dire les erreurs de photo-interprétation personnelle et les erreurs dues à la méthode de classification supervisée. Tandis que les deux dernières permettront de comparer l'évolution de la précision des résultats en fonction de la précision de la classification et d'évaluer la capacité des données satellitaires à très haute résolution spatiale à produire une carte des éléments constitutifs du système agraire d'une région sahélienne.

4.7. ENRICHISSEMENT DE LA CARTE D'OCCUPATION DU SOL

4.7.1. AJOUT DE LA POSITION DES PUIITS

Le positionnement des puits présents sur la carte sera un enrichissement de grande importance. En effet, ils permettront aux utilisateurs potentiels de la carte de se repérer plus facilement et aux enquêteurs d'obtenir des informations plus précises et plus complètes car ces puits sont des points très bien connus des paysans locaux et pourront servir de points de repère.

Les puits seront localisés manuellement sur les cartes topographiques scannées car la résolution spatiale de l'image fusionnée (5m) ne permet pas de les repérer, ils seront ensuite repris dans un fichier de formes qui sera ajouté à la carte finale.

4.7.2. APPLICATION DE LA LÉGENDE DU LCCS

La FAO a développé un système de classification typologique que nous avons décrit ci-dessus (cfr : 1.2.6.4). Nous appliquerons ce système, en utilisant le logiciel LCCS 1, pour profiter des avantages que propose la méthode. Nous discuterons de la capacité du système à prendre en compte les classes d'occupation du sol que nous lui soumettrons.

4.7.3. AJOUT DE L'UTILISATION DU SOL À LA LÉGENDE DE LA CARTE

L'utilisation du sol sera ajoutée à la légende de la carte d'occupation du sol pour apporter à celle-ci les avantages que cette information apporte lors des enquêtes de terrain (cfr : 1.1.3.1). Les classes d'utilisation du sol formant la légende doivent répondre aux mêmes critères et aux mêmes objectifs que la légende d'occupation du sol.

5. RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

Cette partie du travail va présenter les résultats obtenus pour les différentes étapes de la réalisation de la carte et va permettre de les discuter par rapport aux objectifs poursuivis.

5.1. ORTHORECTIFICATION

Rappelons que l'objectif de l'orthorectification est d'obtenir une image qui soit une référence planimétrique à l'échelle de 1:20.000 et donc d'obtenir un RMSE inférieur au pixel.

5.1.1. *SUR BASE DES CARTES TOPOGRAPHIQUES*

5.1.1.1. Résultats

Vingt et un GCP ont été récoltés sur les cartes topographiques, ils sont bien répartis et facilement identifiables sur l'image P. Quinze ont été gardés pour l'orthorectification, qui a donné un RMSE de 4,5 pixels, c'est à dire une vingtaine de mètres.

L'image XS a été orthorectifiée par corrélation par rapport à l'image P orthorectifiée. Un RMSE de 0,49 pixel a été atteint par rapport à l'image P.

5.1.1.2. Discussion

La précision planimétrique obtenue est d'une vingtaine de mètres. Cette faible précision est due aux cartes topographiques à l'origine des GCP et au mode de collecte de ceux-ci. En effet, les cartes topographiques ont une échelle de 1:50.000, c'est à dire 1mm = 50m, les GCP ayant été récolté manuellement, des imprécisions d'une vingtaine de mètres sont inévitablement commises lors de la localisation du point de référence sur l'image P d'une résolution spatiale de 5m.

De plus, certaines zones des scènes satellites ne sont pas recouvertes par l'ensemble des cartes topographiques disponibles, ce qui laisse des zones sans point de contrôle et donc sans référence.

Enfin, ces cartes sont relativement vieilles (1994), les modifications plus récentes sur le terrain ne sont pas reprises - routes, ...- ce qui nous empêche de localiser de nombreux points remarquables identifiés sur l'image P.

La précision des GCP est ici le facteur limitant de la précision planimétrique de la carte car elle est inférieure à celle de l'image P.

La méthode ne fournissant pas de résultat suffisant pour atteindre les objectifs fixés et les limites de celle-ci ne nous permettant pas d'en obtenir de meilleurs, elle ne sera pas utilisée dans le cadre de ce travail.

5.1.2. SUR BASE DES POINTS ACQUIS AU DGPS

5.1.2.1. Résultats

Trente-six GCP ont été récoltés au dGPS sur le terrain, ils sont bien répartis et facilement identifiables sur l'image P. Vingt ont été gardés pour l'orthorectification. Le RMSE ainsi obtenu est de 0,91 pixel pour l'image P et 0,77 pixel pour la corrélation de l'image XS par rapport à l'image P.

5.1.2.2. Discussion

La précision obtenue dans ce cas est très bonne à en juger par le très faible RMSE obtenu - 4,5m -. Ceci s'explique par le fait que la précision des relevés dGPS (1 à 3m) est bien supérieure à la précision de l'image P (5m) ce qui permet aux GCP d'être localisés avec une très grande précision sur l'image P.

Dans ce cas-ci, le facteur limitant la précision planimétrique de la carte est la résolution spatiale de l'image P, autrement dit, la précision planimétrique de l'image P est exploitée à son maximum grâce à la qualité supérieure de la précision des relevés au dGPS.

Cette méthode offre le meilleur résultat et, de plus, ceux-ci sont compatibles avec les objectifs fixés, les images ainsi orthorectifiées seront utilisées pour la suite du travail. Les images XS brute et XS orthorectifiées sont présentées aux figures 10 et 11.

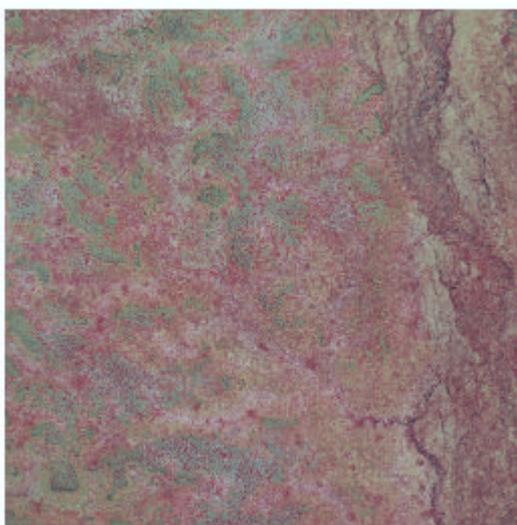


Figure 10 : Scène SPOT 5 XS brut

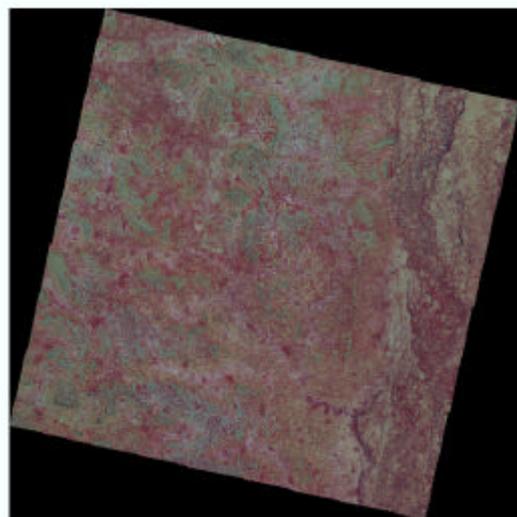


Figure 11 : Scène SPOT 5 XS orthorectifiée

5.1.3. MODÈLE NUMÉRIQUE DE TERRAIN

L'utilisation du MNT améliore la précision, mais son apport spécifique à celle-ci n'a pas été déterminé dans ce travail.

5.1.4. CONCLUSIONS

Afin de ne pas être le facteur limitant de la précision planimétrique d'une carte, les GCP doivent être relevés avec une plus grande précision planimétrique que celle de l'image de base.

Le dGPS a permis de relever des GCP à une haute précision (1 à 3m). La correction géométrique a donc pu se faire à partir de GCP dont la précision planimétrique était supérieure à celle de l'image P (5m) et ainsi permettre d'obtenir les meilleurs résultats possibles.

L'objectif de réaliser une carte de référence d'un point de vue planimétrique à l'échelle de 1:20.000 est donc atteint. De plus, en tenant compte d'une erreur de lecture de 0,3mm et de la résolution spatiale de l'image P (5m), on conclut que la précision maximale est atteinte pour les données disponibles. En effet, la précision planimétrique de l'image P corrigée est de 4,5m et, selon le tableau 1, une précision d'au minimum 6m est nécessaire à cette échelle.

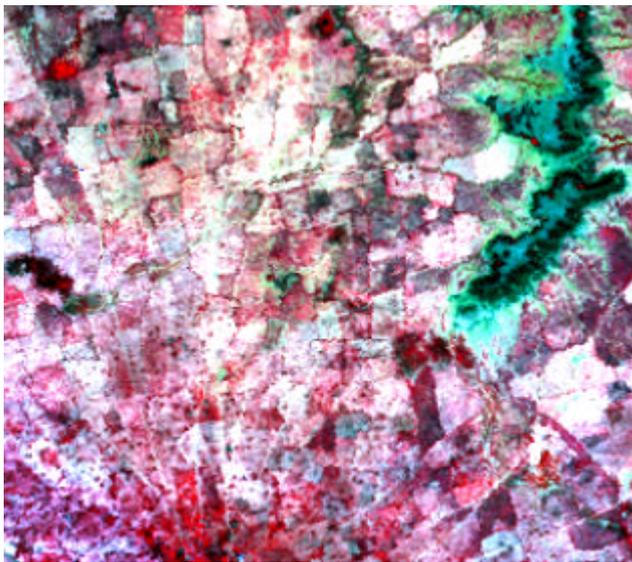
La difficulté principale, spécifique à la zone de travail, a été la recherche de points pouvant servir de GCP sur l'image P ; la zone, monotone et peu développée, recèle en effet peu de points remarquables tels que des croisements routiers importants.

5.2. FUSION

La fusion IHS effectuée avec l'image P et l'image XS perturbe l'information spectrale (cfr : 1.2.2.2) et a donc besoin d'être validée, afin d'en confirmer l'intérêt et la qualité.

5.2.1. VALIDATION SPATIALE

La comparaison visuelle de l'image XS et de l'image fusionnée, présentée à la figure 12, permet de confirmer l'amélioration de l'information spatiale de l'image fusionnée.



Fusion IHS

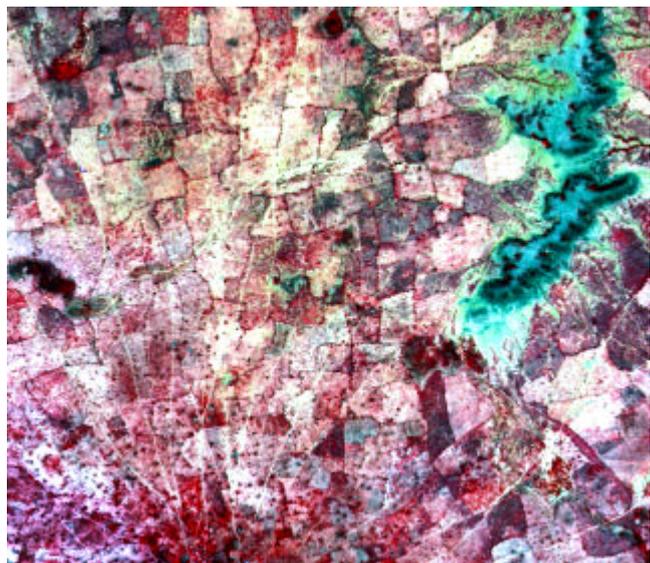
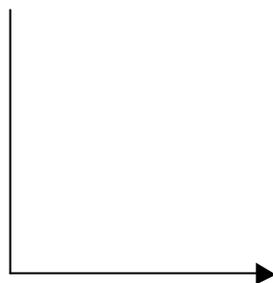


Figure 12 : Illustration de la fusion IHS des images XS et P

5.2.2. VALIDATION SPECTRALE

L'analyse d'une série de paramètres critiques permet de valider spectralement la fusion :

- Les histogrammes de fréquence (figure 13):

La fusion IHS modifie les histogrammes de fréquence, ce qui était attendu. Cela n'aura aucune influence sur l'utilisation du NDVI et sur la classification en général, car la fusion se passe avant la classification, et de plus, la classification se base sur des valeurs seuils relatives.

- Le biais :

Image XS	Moyenne	Image fusionnée	Moyenne	Biais
XS ₁	98,3	XS ₁	78,4	19,9
XS ₂	84,2	XS ₂	64,3	19,9
XS ₃	82,9	XS ₃	62,9	20

Tableau 3: Moyennes et différences des moyennes entre l'image XS et l'image fusionnée.

On remarque dans le tableau 3 une modification des moyennes, elle est constante pour toutes les bandes. La modification est significative mais n'est pas importante.

- La déviation standard :

Image XS	Déviati on standard	Image fusionnée	Déviati on standard	Différence des déviations standards.
XS1	66,2	XS1	53,3	12,9
XS2	58,9	XS2	47,6	11,3
XS3	56,5	XS3	44,6	11,9

Tableau 4 : Déviations standards et différences des déviations standards de l'image XS et de l'image fusionnée

On note dans le tableau 4 une différence relativement significative mais constante.

- Le coefficient de corrélation entre les bandes de l'image XS et les bandes correspondantes de l'image fusionnée :

Le coefficient de corrélation bande par bande exprime la similarité entre les structures de petite taille. Il doit se rapprocher le plus possible de 1.

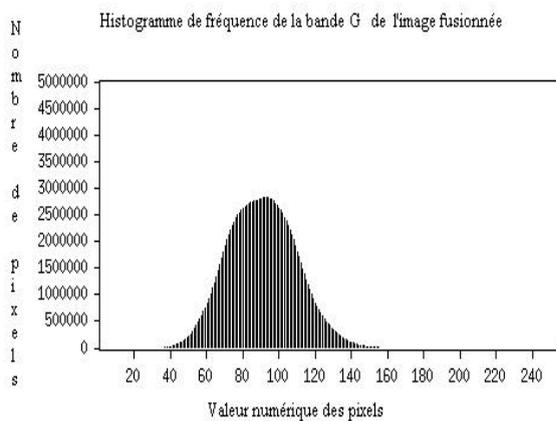
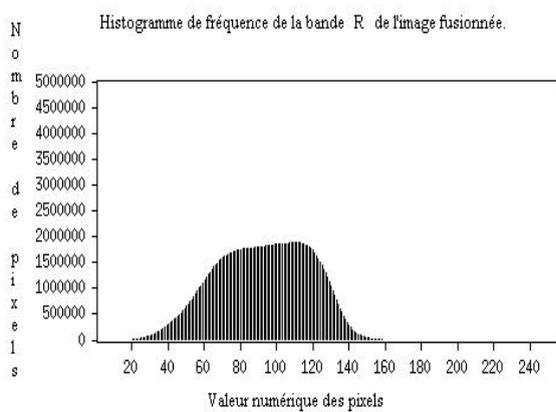
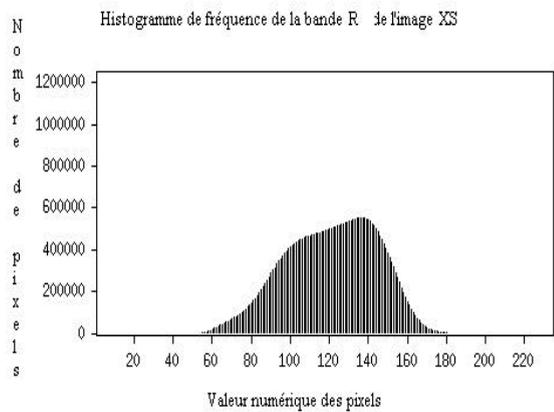
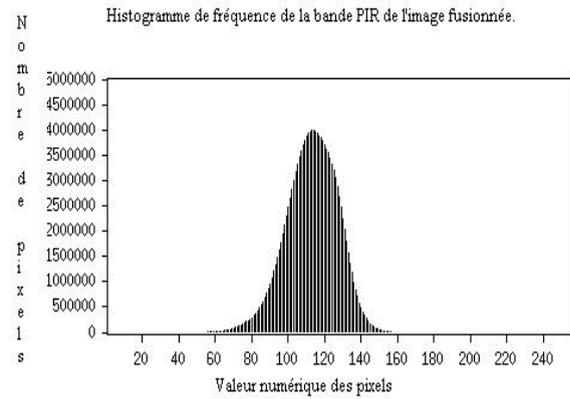
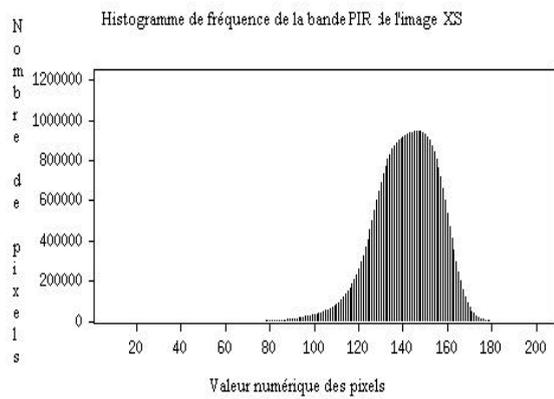


Figure 13 : Histogrammes de fréquence, pour les canaux du PIR, rouge et vert de l'image XS originale et de l'image fusionnée.

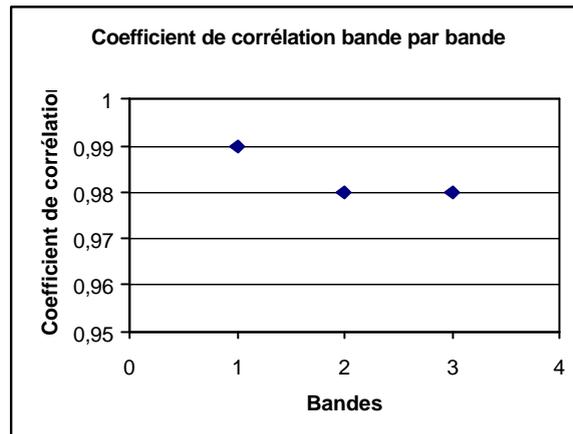


Figure 14 : Coefficient de corrélation bande par bande.

On remarque à la figure 14 que les corrélations sont très fortes, et donc la fusion est de qualité. En effet les valeurs généralement citées dans la littérature sont de l'ordre de 0,8 à 0,9 (Bontemps, 2004).

- La conservation du coefficient de corrélation entre deux bandes d'une même image :

Ce test permet l'analyse de la conservation des liens naturels entre les bandes. Le contenu spectral doit idéalement être conservé, le coefficient de corrélation entre deux bandes de l'image XS doit donc être identique après la fusion.

XS_1/XS_2	0,96	XS_{1f}/XS_{2f}	0,93
XS_1/XS_3	0,98	XS_{1f}/XS_{3f}	0,96
XS_2/XS_3	0,99	XS_{2f}/XS_{3f}	0,99

Tableau 5 : Coefficient de corrélation de deux bandes d'une même image.

Le tableau 5 montre une légère diminution des coefficients après la fusion, ce qui est attendu, néanmoins cette diminution n'est que minime et non significative, ce qui permet de dire que la fusion est de bonne qualité.

5.2.3. DISCUSSION

Une bonne corrélation a permis de réaliser un bon calage des deux images et, de ce fait, une fusion de qualité.

La photo-interprétation de l'image fusionnée est plus claire, plus facile et plus précise. Par exemple, la fusion a nettement amélioré les limites entre des zones d'occupation du sol différentes, qui en région sahélienne sont moins marquées.

La fusion IHS des images SPOT 5 XS et P, en région sahélienne, a permis d'atteindre les objectifs fixés pour celle-ci, sans entraîner de dégradation majeure à l'information spectrale.

5.3. SEGMENTATION

5.3.1. *RÉSULTATS*

Plusieurs niveaux de segmentation ont été utilisés dans ce travail. Un premier a permis de discriminer les zones de village du reste de l'image. Les villages ont été classifiés manuellement, pour ensuite former une couche matricielle qui a ensuite été utilisée comme couche thématique.

Un second niveau, basé sur une valeur seuil de l'altitude (250m), a permis de séparer les plateaux des zones de plaines. L'objectif de cette démarche était de séparer des occupations du sol différentes mais spectralement proches.

Ensuite le niveau fondamental a formé les objets qui ont été classifiés. Cette segmentation a été validée par la méthode décrite au point 4.5.2.

Afin de valider la segmentation, cent objets ont été sélectionnés aléatoirement. La liste de classes à discriminer a été établie (cfr : 4.6.1). Une analyse visuelle de ces objets a permis de déterminer que 94% de ceux-ci sont purs.

5.3.2. *DISCUSSION*

La méthode de validation est facile à appliquer et correspond à une analyse proche des objectifs spécifiques de segmentation et de la méthode de classification basée sur une analyse visuelle de l'image utilisée dans ce travail.

La segmentation a formé 94% d'objets purs. Ce taux élevé s'explique par la très haute résolution spatiale (5m) de l'image P par rapport aux structures du paysage à discriminer et par la bonne adéquation entre le niveau de précision de la segmentation et les différents types de recouvrement à discriminer.

L'utilisation du MNT lors de la segmentation a permis de faire une première séparation satisfaisante entre deux zones bien distinctes : les plateaux et les plaines. Néanmoins, des plateaux ou des plaines se situent en dessous ou au-dessus de la valeur seuil. L'analyse de la matrice de confusion nous permettra de discuter de la pertinence de l'opération et de voir si elle simplifie le travail, en permettant de séparer, sur un critère

simple, des types de recouvrement très différents («végétation naturelle en régénération» et les «bandes boisées») mais très proches spectralement.

La segmentation a formé des objets dont la superficie est en adéquation avec les éléments à discriminer tout en y maintenant un haut degré d'homogénéité, elle a donc entièrement rempli son rôle en facilitant grandement la classification. Cela démontre la possibilité de réaliser une segmentation d'objets pertinente et de qualité à partir d'une image fusionnée, issue d'images XS et P de SPOT 5 d'une région sahélienne.

5.4. CLASSIFICATION

5.4.1. LA MÉTHODE

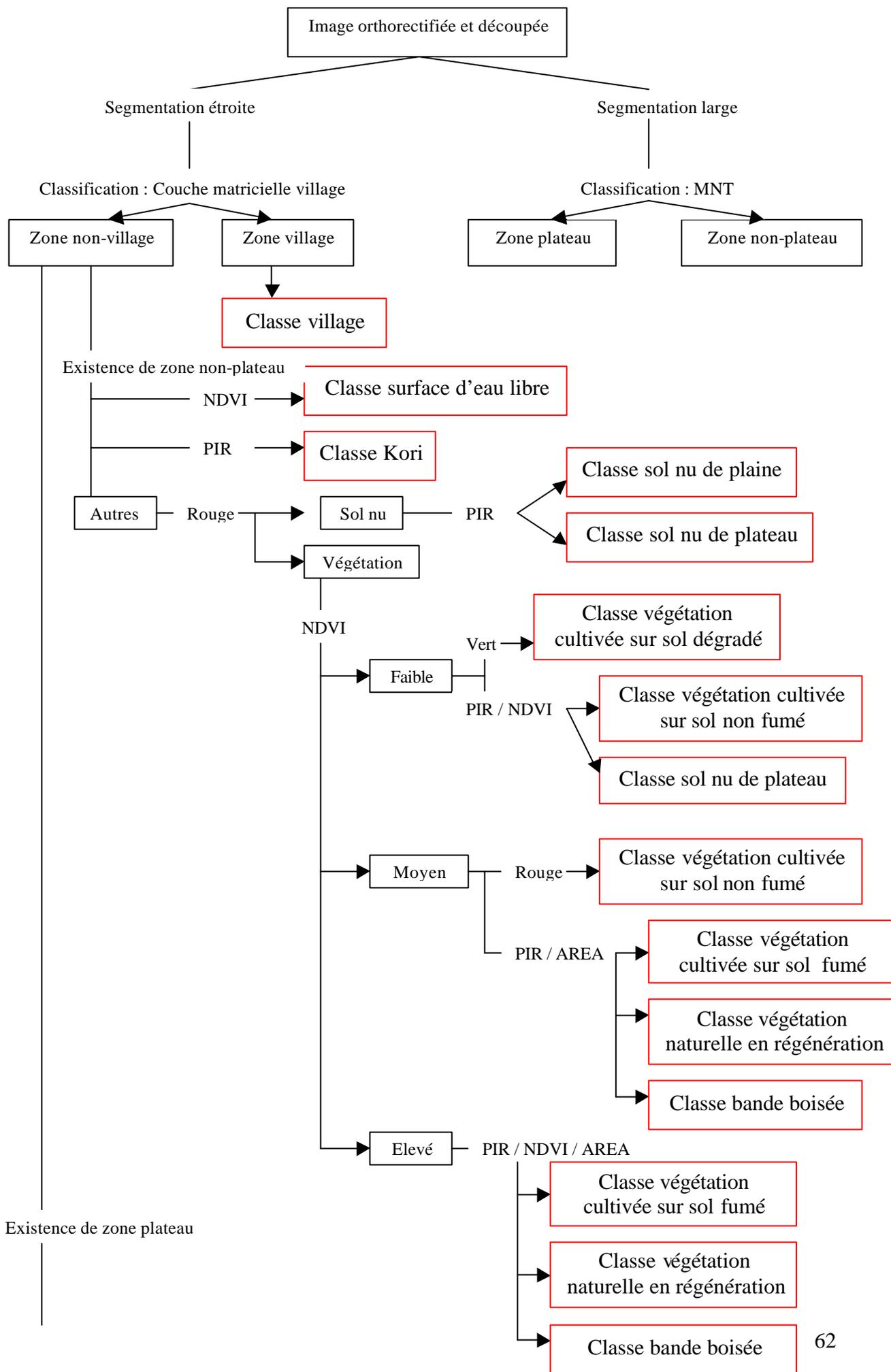
5.4.1.1. Résultats

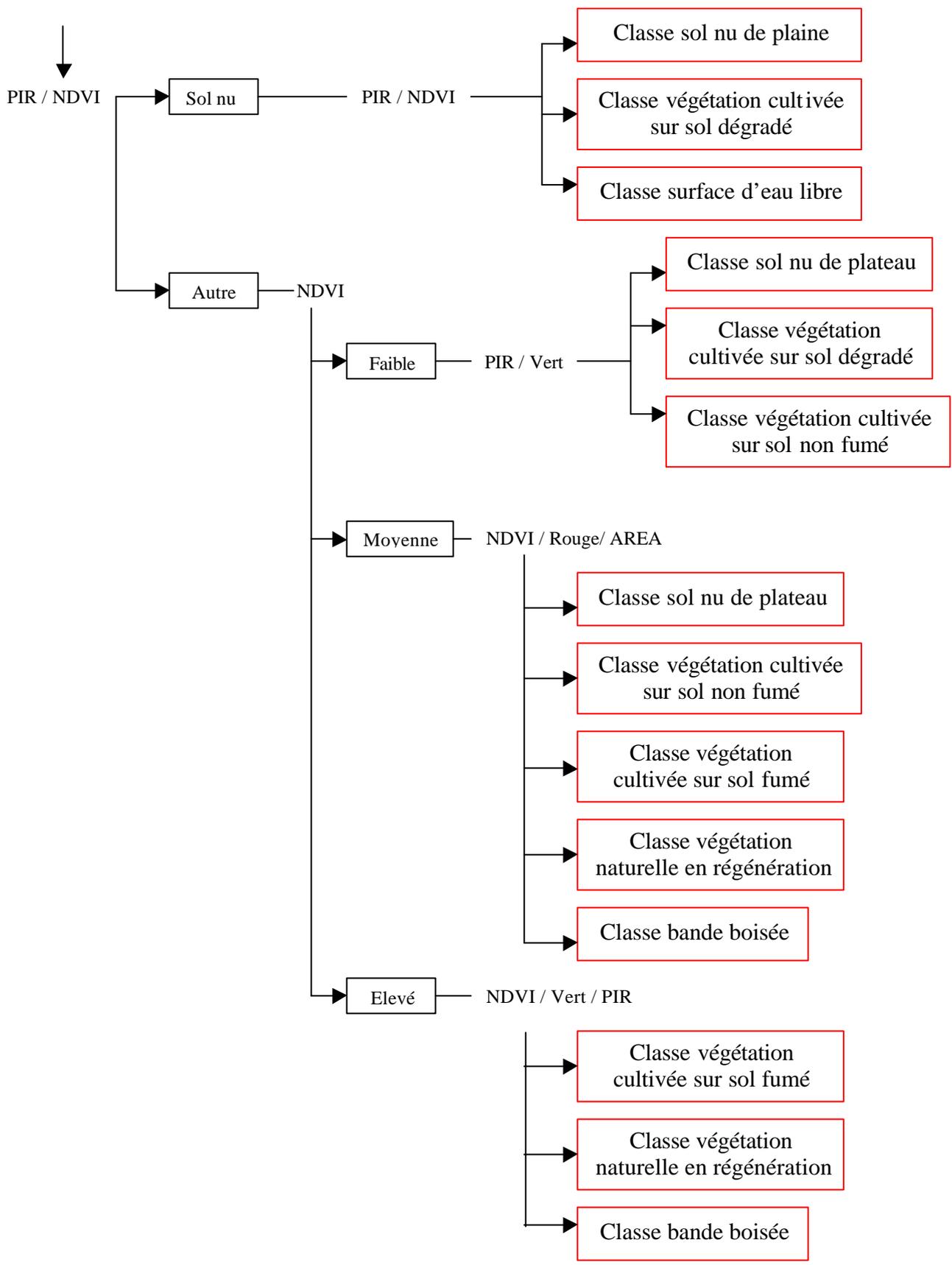
Les protocoles de segmentation et de classification utilisés pour ce travail sont décrits aux pages suivantes. La clé dichotomique a été construite de la manière suivante :

- Séparation des zones « villages » sur base de la couche matricielle.
- Séparation des zones « plateaux » et « non-plateaux » sur base d'une valeur seuil (250m) du MNT SRTM.

La suite des discriminations se fait par la détermination d'une valeur seuil pour une ou plusieurs bandes spectrales, pour le NDVI ou pour une surface d'objet.

- Pour la zone « non-plateaux » :
 - Les surfaces d'eau ont été discriminées à partir du NDVI.
 - Les koris ont été discriminés à partir du PIR
 - Le Rouge a permis de séparer les sols nus des surfaces recouvertes de végétation.
 - Le NDVI a permis d'établir une gradation de la densité de végétation.
 - Une discrimination sur base des critères les plus adéquats a ensuite permis d'isoler chaque classe d'occupation du sol.
- Pour la zone « plateaux » :
 - Les surfaces d'occupation du sol sans végétation ont été séparées des autres par le PIR et le NDVI et ensuite individualisées par d'autres valeurs seuil du PIR et NDVI.
 - Le NDVI a permis de classer les objets restant en fonction de la densité de végétation.
 - Une discrimination sur base des critères les plus adéquats a ensuite permis d'isoler chaque classe d'occupation du sol.





5.4.1.2.Discussion

La classification supervisée d'objets sur base de zones d'entraînement déterminées par photo-interprétation, est la méthode la plus adéquate pour ce travail vu l'incapacité à se rendre sur le terrain et la possibilité de côtoyer des personnes ayant une grande connaissance de la zone traitée. Néanmoins la comparaison de la matrice réalisée sur base de mon interprétation et de celle basée sur base des interprétations de M. Garba montre que cette méthode ne permet pas d'acquérir une connaissance équivalente à celle développée par une expérience de plusieurs dizaines d'années du terrain.

5.4.2. *LES CLASSES D'OBJETS*

5.4.2.1.Résultats

Toutes les classes pré-définies ont pu être discriminées, excepté la classe « Végétation naturelle en régénération depuis quelques années ». La classe « Sol nu » a été dissociée en deux classes distinctes, à savoir « Sol nu de plateau » et « Sol nu de plaine ». Une partie de la classe « Bande boisée » et une partie de la classe « Sol nu de plateau » ont été regroupées pour former une nouvelle classe nommée « Brousse tigrée ».

5.4.2.2.Discussion

Les classes choisies et leurs définitions sont le fruit d'une discussion entre différentes personnes ayant une grande connaissance de la zone et des utilisateurs potentiels de la carte, ce qui a permis d'obtenir un ensemble de classes d'occupation du sol précis, complet mais aussi pratique, pertinent et concret par rapport au fonctionnement du système agricole local et à l'utilisation future de la carte.

La connaissance des pratiques culturelles et de la répartition spatiale du système agricole a permis de compléter et de faciliter l'interprétation. Néanmoins la classe « Végétation naturelle en régénération depuis quelques années » n'a pas pu être discriminée et a été supprimée. Plusieurs facteurs justifient cette décision, ma connaissance incomplète de la zone ne m'a peut-être pas permis la détection certains indices, la faible densité de ce type de recouvrement dans la zone et, surtout, la très forte ressemblance avec la classe « Végétation naturelle en régénération ».

La dissociation de la classe « Sol nu » en deux classes, « Sol nu de plaine » et « Sol nu de plateau », s'est avérée intéressante et nécessaire pour la précision du travail.

En effet, la classe «Sol nu » regroupait deux types de sol nu différents de par leur origine, leur structure, leur localisation et leur utilisation :

- le «Sol nu de plaine » est un sol sableux qui provient de l'érosion de la roche mère, il se localise dans les plaines mais ne peut être cultivé car beaucoup trop pauvre.
- le «Sol nu de plateau » est une croûte ferrallitique issue d'un processus pédogénique particulier, il est dur comme le roc et ne peut être cultivé à cause de ces contraintes physiques. On les retrouve sur les plateaux, une partie d'entre eux participe à la formation, avec des bandes boisées, de la structure appelée «Brousse tigrée».

La brousse tigrée est une notion communément acceptée comme un type de recouvrement mixte du sol, il apparaissait donc pertinent, dans un souci de rendre la carte concrète et parlante au plus grand nombre, qu'une classe d'occupation du sol lui soit entièrement consacrée dans la légende.

L'ensemble des classes reprend la quasi-totalité des types d'occupation du sol de la zone ; cependant afin d'éviter une complexité trop grande de la carte, nous avons délibérément choisi de limiter le nombre de classes. Cet ensemble de classes fut donc contraignant lors de la classification de certains objets, qui ne correspondaient à aucune classe (figure 15), ceux-ci ont été classés dans la classe la plus proche de leur recouvrement réel. Cette démarche explique certainement en partie les erreurs détectées par les matrices de confusion.

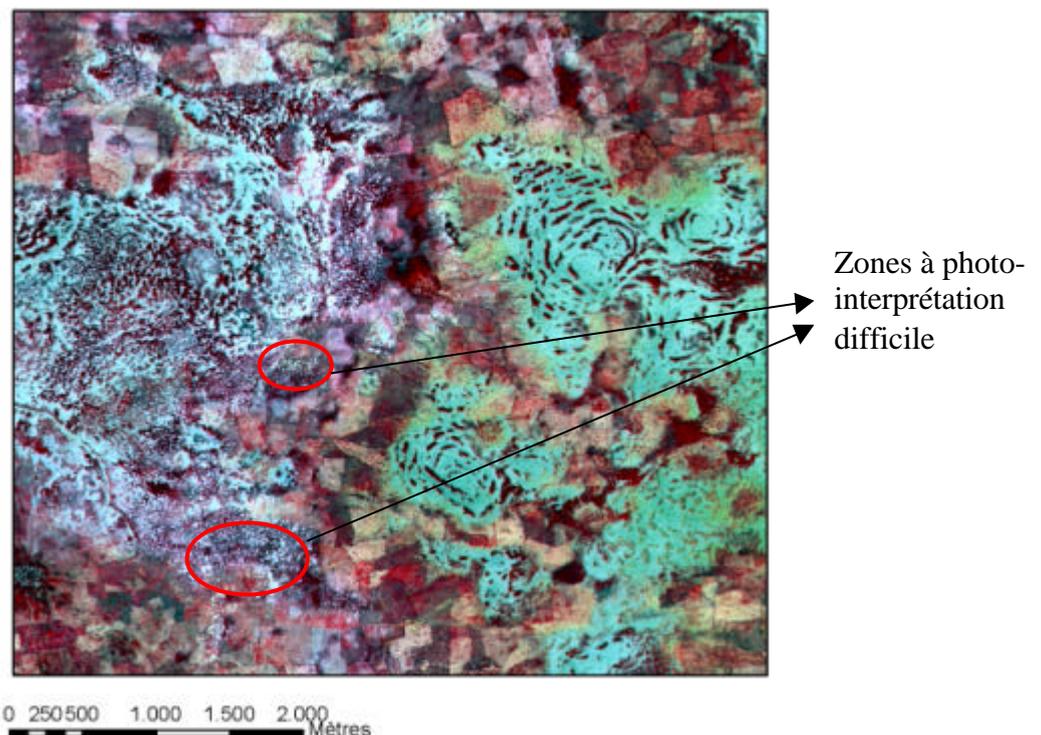


Figure 15 : Extrait de l'image fusionnée illustrant la difficulté d'interprétation de certaines zones

La date de la prise de vue a une très grande importance en télédétection. En effet, la carte d'occupation du sol produite affiche les occupations du sol à la date exacte de la prise de vue et il est important d'en tenir compte lors de son utilisation. Cette date va déterminer l'information que va contenir l'image. Dans notre cas, les images ont été acquises le 28 septembre, dans le calendrier cultural cette date se situe en pleine période agricole et correspond au début des récoltes du mil et à la fin de la saison des pluies.

Le fait que l'image ait été acquise en période agricole permet de discerner facilement les différents types de champs en fonction des densités végétales, mais le fait que certaines parcelles aient déjà été récoltées peut fausser l'interprétation. En effet, certains objets peuvent avoir été classés « Végétation cultivée sur sol dégradé » alors qu'il s'agit d'une végétation issue des résidus de fauche. Une visite de terrain ou l'analyse et la comparaison de plusieurs images de la zone à des dates différentes auraient pu permettre d'éviter ce problème. Par exemple, le recouplement d'informations issues d'une image acquise avant les récoltes et une après les récoltes auraient pu permettre de définir l'origine d'une faible densité de végétation (résidus de culture ou végétation cultivée sur sol dégradé).

Si l'image avait été acquise en dehors de la période agricole, la quantité d'informations à extraire de l'image aurait été nettement moindre, par contre, elle aurait permis de distinguer les cultures de contre-saison.

5.4.3. LES MATRICES DE CONFUSION

5.4.3.1. Résultats

L'analyse des matrices de confusion (tableaux 7, 8 et 9) va permettre de valider la classification.

Le tableau 6 présente les précisions globales et les coefficients Kappa obtenus par les différentes matrices de confusion.

Matrice de confusion	Précision globale	Coefficient Kappa
Interprétation Christophe Coq	0,873	0,845
Interprétation Issa Garba	0,704	0,64
Interprétation Issa Garba (Classes Standards)	0,806	0,716

Tableau 6 : Précisions globales et coefficients Kappa des matrices de confusion

5.4.3.2. Discussion

D'une manière générale, on remarque dans toutes les matrices de confusion que l'utilisation du MNT dans le but de discriminer les bandes boisées des autres occupations du sol spectralement proches a été pertinente. Il en est de même pour la classe village discriminée à partir d'une couche matricielle spécialement conçue à cet effet.

Analyse de la matrice de confusion réalisée sur base de mon interprétation

Cette matrice montre que la classification est de très bonne qualité. Cela s'explique par les bons résultats de la fusion et de la segmentation, par la précision de l'ensemble des classes pré-définies et surtout parce que la validation se fait sur base des mêmes critères de photo-interprétation que ceux qui ont servi à la classification.

En analysant les résultats de la matrice classe par classe, on remarque que les plus fortes imprécisions ont lieu entre la classe « Végétation naturelle en régénération » et la classe « Végétation cultivée sur sol fumé ». Cela s'explique par le fait que l'attribution de certaines parcelles à une des deux classes n'est pas évidente, tant spectralement que par photo-interprétation, cette explication est illustrée par un exemple dans l'analyse de la matrice de confusion réalisée sur base de l'interprétation de M. Garba.

Ces erreurs peuvent aussi être dues, en partie, à la segmentation qui a formé quelques objets mixtes de ces classes d'occupation du sol très proches.

Analyse de la matrice de confusion réalisée sur base de l'interprétation de M. Garba

Les résultats de cette matrice de confusion montrent une qualité moindre que ceux obtenus par la première. Les erreurs observées par cette matrice de confusion sont de deux sources différentes :

- Premièrement, les erreurs de photo-interprétation : le fait que l'interprétation de M. Garba se base sur une expérience très grande et très complète de la zone, aura pu lui permettre de détecter des indices spatiaux, temporels ou même culturels. Ces indices m'auront échappé de part ma connaissance incomplète de la zone et m'auront induit en erreur.
- Deuxièmement, les erreurs inévitablement produites lors d'une classification supervisée, qui sont dues à l'utilisation de valeurs seuil pour séparer deux classes d'occupation du sol.

On peut quantifier ces deux sources d'erreurs en analysant et en comparant les deux premières matrices de confusion réalisées :

- On suppose que les erreurs observées ($\pm 15\%$) par la première matrice de confusion sont exclusivement dues à la méthode de classification supervisée car les critères de photo-

interprétation utilisés pour la classification ont été les mêmes pour la validation, ce qui permet d'éviter cette source d'erreurs.

- On suppose que ces erreurs ont été détectées de la même manière par M. Garba.
- On conclut que les autres erreurs détectées par M. Garba ($\pm 15\%$) sont majoritairement dues à des erreurs de photo-interprétation de ma part.

En analysant cette matrice classe par classe, on remarque que les classes présentant les plus grandes augmentations d'erreurs, par rapport à la première matrice, sont les classes de végétation cultivée en générale et la classe « Végétation naturelle en régénération ».

Ces erreurs sont dues à la difficulté de photo-interprétation que présentent certains objets. Par exemple, distinguer clairement la limite entre les classes « Végétation cultivée sur sol non fumé » et « Végétation cultivée sur sol fumé » n'est pas toujours facile, de plus, on peut imaginer que certaines parcelles fumées ont un rendement plus faible que des parcelles, naturellement plus riches, mais non fumées. La limite doit donc être fixée arbitrairement, ce qui induit inévitablement des erreurs dans la classification. Il en va de même pour la limite entre les classes « Végétation cultivée sur sol non fumé » et « Végétation cultivée sur sol dégradé » et les classes « Végétation cultivée sur sol dégradé » et « Sol nu de plaine ».

Afin d'illustrer cette explication, nous allons analyser un exemple de classification difficile entre les classes « Végétation cultivée sur sol fumé » et « Végétation naturelle en régénération », la démarche est la même pour les autres classes présentant des difficultés de classification similaire.

La figure 16 montre un extrait de l'image fusionnée, nous y voyons notamment, la ville de Dantiandou, des végétations cultivées sur sol fumé, des sols nus de plateaux et des végétations naturelles en régénération.

La figure 17 illustre la sélection de certaines parcelles correspondant très clairement à l'occupation du sol « Végétation naturelle en régénération » et « Végétation cultivée sur sol fumé », une autre sélection est faite de parcelles dont la détermination de l'occupation du sol par photo-interprétation n'est pas évidente.

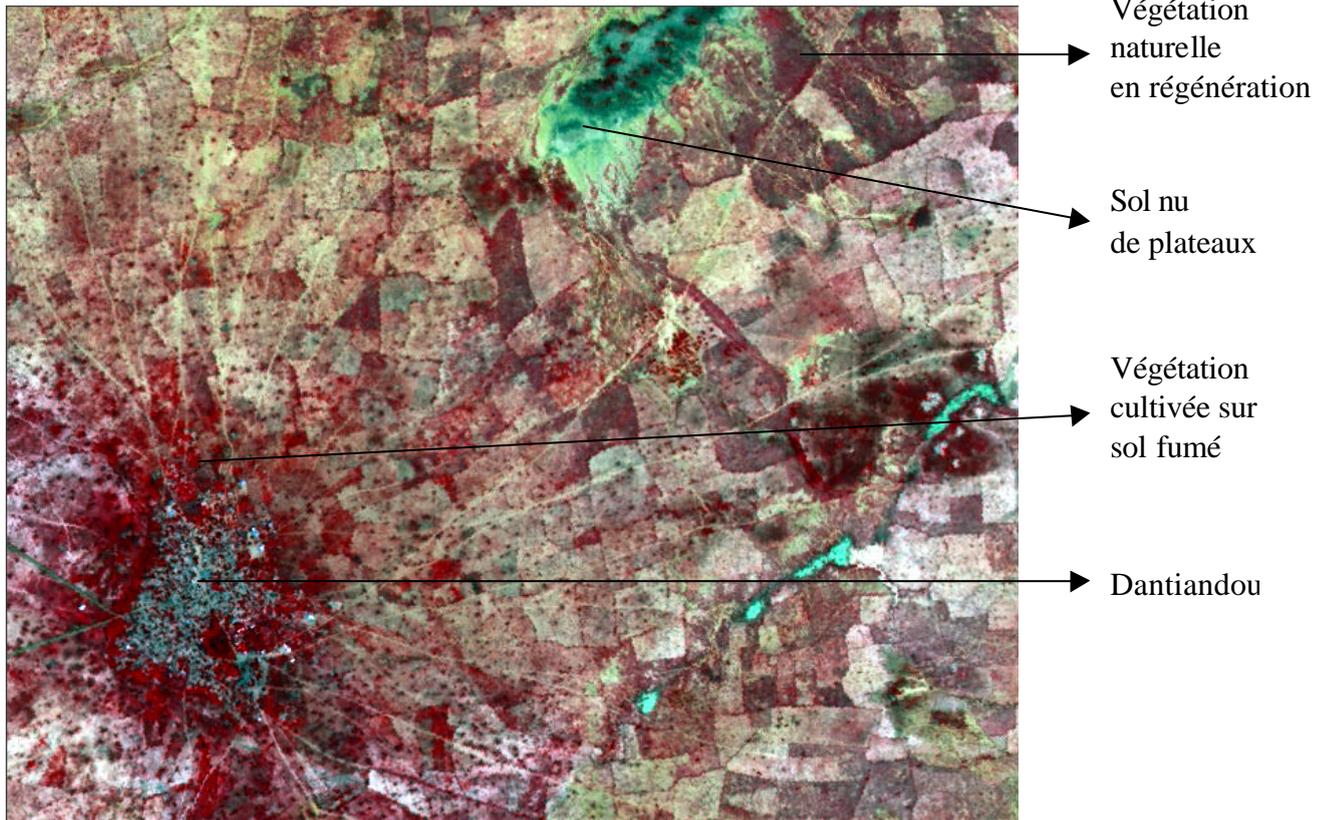


Figure 16 : Extrait de l'image fusionnée

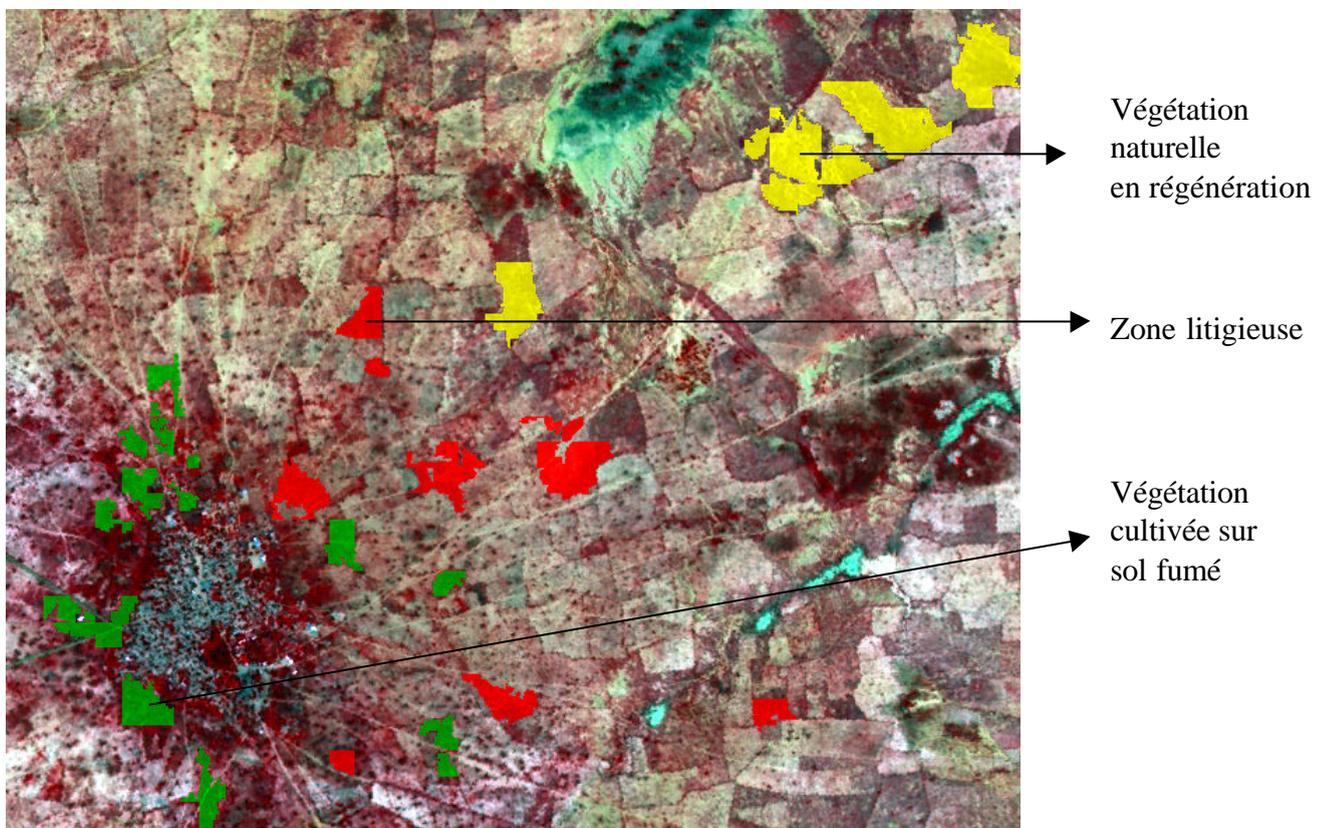


Figure 17 : Illustration de la sélection de parcelles. Jaune = Végétation naturelle en régénération, Vert = Végétation cultivée sur sol fumé, Rouge = hésitations

Suite à cette sélection, nous pouvons analyser les valeurs spectrales et d'autres paramètres pour les différentes sélections. La figure 18 montre en noir, les valeurs pour différents paramètres des parcelles sélectionnées comme « Végétation cultivée sur sol fumé », et en bleu, les valeurs pour ces mêmes paramètres des parcelles sélectionnées comme « Végétation naturelle en régénération ».

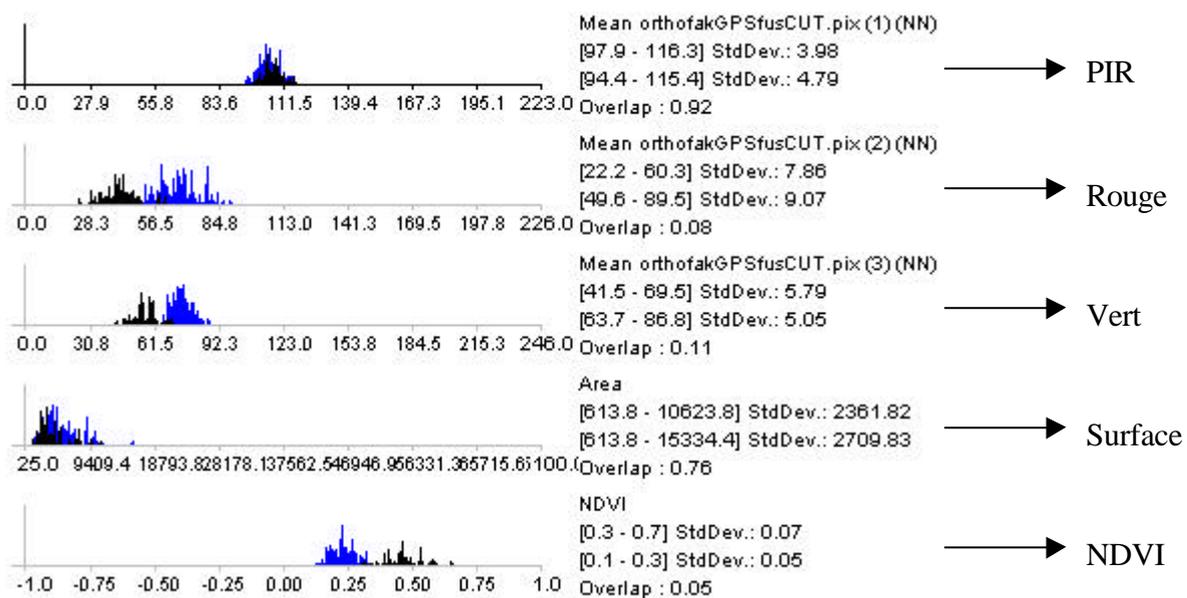


Figure 18 : Valeurs de plusieurs paramètres pour les classes "Végétation cultivée sur sol fumé" en noir et "Végétation naturelle en régénération" en bleu

On remarque, que la discrimination de ces deux occupations du sol est faisable aisément en utilisant les paramètres adéquats.

La figure 19 montre les valeurs pour ces mêmes paramètres pour la classe « Végétation cultivée sur sol fumé » en noir, et en bleu, pour les parcelles à photo-interprétation difficile. On visualise directement que les valeurs de tous les paramètres se superposent beaucoup plus. Il en va de même pour la figure 20 qui illustre les valeurs des parcelles à photo-interprétation difficile en noir et de la classe « Végétation naturelle en régénération » en bleu. Cette superposition des valeurs illustre bien la difficulté de discrimination des occupations du sol dont la limite est difficile à établir.

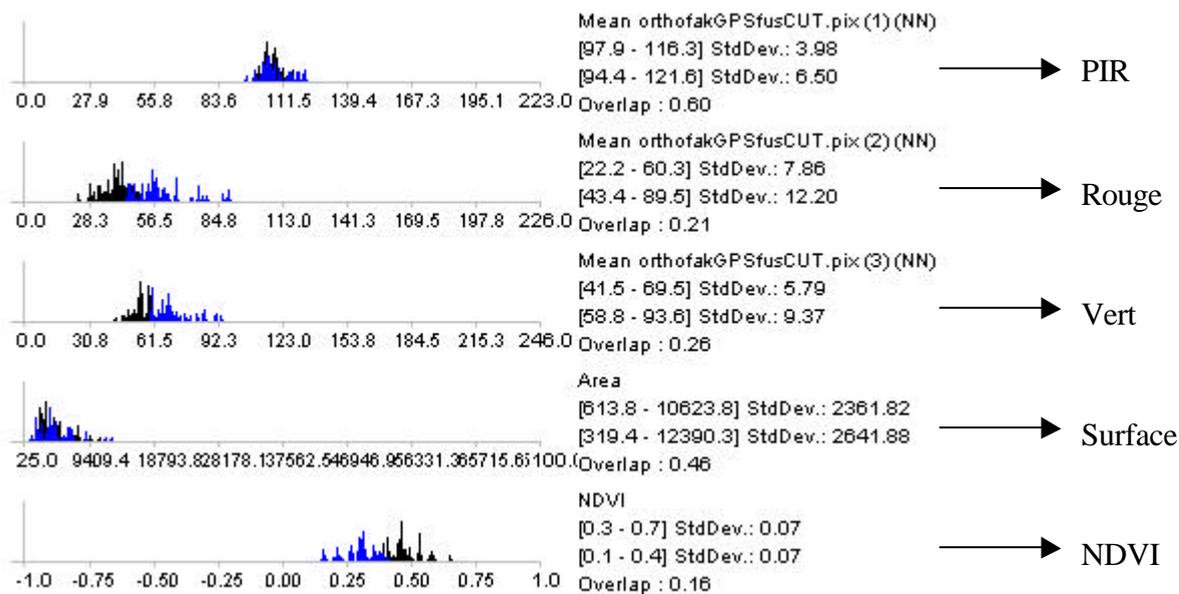


Figure 19 : Valeurs de plusieurs paramètres pour la classe "Végétation cultivée sur sol fumé" en noir, et en bleu pour les parcelles à photo-interprétation difficile

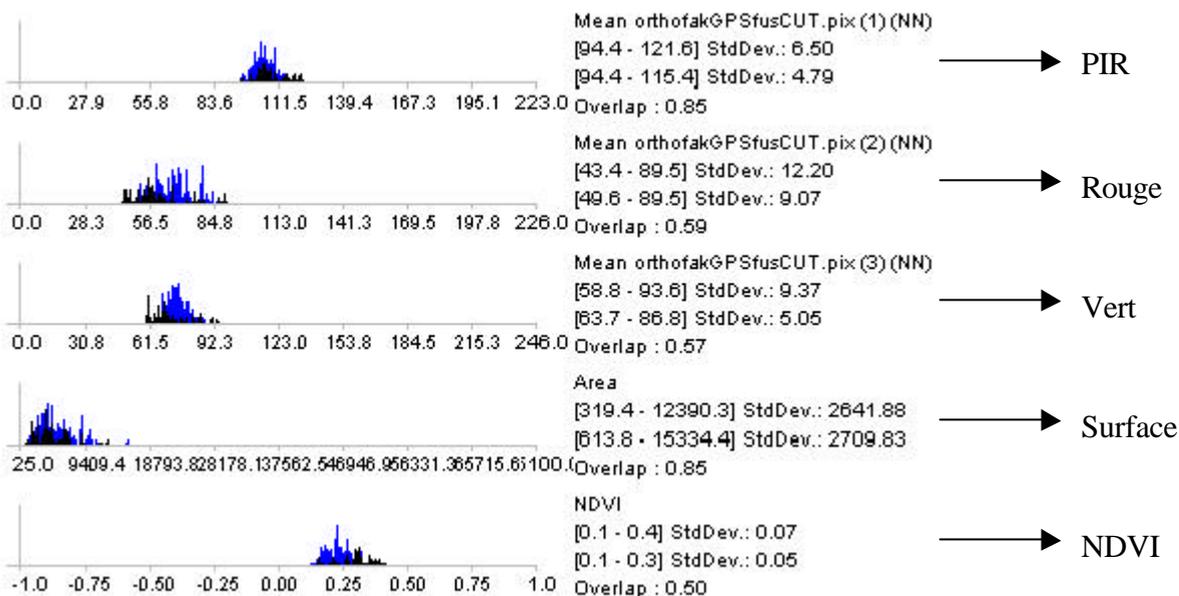


Figure 20 : Valeurs de plusieurs paramètres pour les parcelles à photo-interprétation difficile en noir et de la classe "Végétation naturelle en régénération" en bleu

Sur ce point donc, les classes pré-définies ont parfois posé problèmes car la limite entre certaines classes a été difficile à établir, celle-ci devant se faire à partir de critères subjectifs de photo-interprétation.

Analyse de la matrice de confusion réalisée sur base de classes standards

La dernière matrice de confusion a été réalisée sur base de classes plus standards d'occupation du sol. Dans notre cas, les classes de végétations cultivées ont été regroupées en une seule classe ainsi que les classes de sol nu. Cette matrice permet premièrement, de s'assurer que la discrimination entre les principales classes d'occupation du sol est de qualité et deuxièmement, de quantifier la perte de précision due à la volonté de discriminer les occupations du sol correspondant aux éléments constitutifs du système agricole.

L'analyse de la matrice montre que la discrimination des principales classes d'occupation du sol a été faite avec une bonne précision. Et en la comparant avec la seconde matrice de confusion, on note que la discrimination des éléments constitutifs du système agricole diminue de 10% la précision globale de la carte mais cette diminution se retrouve essentiellement dans les différentes classes de végétations cultivées.

5.4.3.3. Conclusions

L'image, issue de la fusion des images XS et P à très haute résolution spatiale acquise le 28 septembre par SPOT 5, permet de discriminer avec une grande précision les types d'occupation du sol suivants : surface d'eau libre, kori, sol nu, végétation en régénération, végétation cultivée, bande boisée, village.

Elle permet aussi de discriminer, au sein de la classe regroupant la végétation cultivée, les différents éléments du système agricole de la région, à savoir, les champs fumés, non-fumés et sur sol dégradé. Néanmoins, cela provoque une baisse de la précision globale, qui reste néanmoins tolérable.

Les principaux facteurs expliquant ces possibilités sont la très haute résolution spatiale de l'image fusionnée, qui permet de discerner les éléments constitutifs du système agricole et la date d'acquisition de l'image qui permet d'en distinguer les différentes pratiques culturales.

Classif/Réf	Village	Eau	Kori	SNPlateau	SNPlaine	VR	VCF	VCNF	VCSD	BB	No data	Total	% Omission
Village	5						1					6	83,3
Eau		3		1								4	75
Kori			6									6	100
SNPlateau				41				1		1		43	95,4
SNPlaine					5			1	1			7	71,4
VR	1					52	6	2	1			62	83,9
VCF							39	4				43	90,7
VCNF					2	2	1	81	2	1		89	91
VCSD		1						4	8			13	61,5
BB				1			3	1		16		21	76,2
No data											5	5	100
Total	6	4	6	43	7	54	50	94	12	18	5	299	
% contamination	83,3	75	100	95,3	71,4	96,3	78	86,2	66,7	88,9	100		87,3%

Précision globale = 0,873

Coefficient Kappa = 0,845

Tableau 7 : Matrice de confusion (interprétation Christophe Coq)

SNPlateau = Sol nu de plateau, SNPlaine = Sol nu de plaine, VR = Végétation naturelle en régénération, VCF = Végétation cultivée sur sol fumé, VCNF = Végétation cultivée sur sol non fumé, VCSD = Végétation cultivée sur sol dégradé, BB = Bande boisée

Classif/Réf	Village	Eau	Kori	SNPlateau	SNPlaine	VR	VCF	VCNF	VCSD	BB	No data	Total	% Omission
Village	5							1				6	83,33
Eau		3		1								4	75
Kori		1	5									6	83,33
SNPlateau				37	3			2	1			43	86,05
SNPlaine					3			1	3			7	42,86
VR					2	41	3	15	1			62	66,13
VCF					1	6	20	14		1		42	47,62
VCNF			1	4	5	1	1	68	10	2		92	73,91
VCSD		1		1				2	7			11	63,64
BB				2	1			1		17		21	80,95
No data											5	5	100
Total	5	5	6	45	15	48	24	104	22	20	5	299	
% contamination	100	60	83,33	82,22	20	85,42	83,33	65,38	31,82	85	100		70,57%

Précision globale = 0,706

Coefficient Kappa = 0,64

Tableau 8 : Matrice de confusion (interprétation Issa Garba)

SNPlateau = Sol nu de plateau, SNPlaine = Sol nu de plaine, VR = Végétation naturelle en régénération, VCF = Végétation cultivée sur sol fumé, VCNF = Végétation cultivée sur sol non fumé, VCSD = Végétation cultivée sur sol dégradé, BB = Bande boisée

Classif/Réf	Village	Eau	Kori	Sol nu	VR	VC	BB	No data	Total	% Omission
Village	5					1			6	83,33
Eau		3		1					4	75
Kori		1	5						6	83,33
Sol nu				43		7			50	86
VR				2	41	19			62	66,13
VC		1	1	11	7	122	3		145	84,14
BB				3		1	17		21	80,95
No data								5	5	100
Total	5	5	6	60	48	150	20	5	299	
% contamination	100	60	83,33	71,67	85,42	81,33	85	100		80,60%

Précision globale = 0,806

Coefficient Kappa = 0,7164

Tableau 9 : Matrice de confusion des classes standards

VR = Végétation naturelle en régénération, VC = Végétation cultivée, BB = Bande boisée

5.5. ENRICHISSEMENT DE LA CARTE D'OCCUPATION DU SOL

5.5.1. LOCALISATION DES PUIITS

5.5.1.1. Résultats

Un décalage systématique a été remarqué entre les cartes topographiques et l'image fusionnée. L'ellipsoïde de référence des cartes topographiques scannées n'ayant pas pu être enregistré de manière certaine, il est impossible d'utiliser cette information brute ; plusieurs solutions sont envisageables :

- Relever au dGPS les coordonnées d'un ensemble ou de tous les puits afin de calculer un décalage moyen entre les relevés et les coordonnées sur les cartes topographiques et d'ensuite appliquer ce décalage à l'ensemble du fichier de forme «puits».
- Calculer ce décalage à partir de points aisément identifiables sur les deux supports, tels que des croisements de routes. Cette méthode a l'avantage de ne pas nécessiter de campagne de terrain.

Afin de fournir une information de qualité, les coordonnées des puits issus des cartes topographiques ont été décalées. Le calcul de ce décalage (annexe 9) a été réalisé selon la seconde méthode décrite, quinze points ont servi à calculer un décalage de 119,57m vers l'est et de 149,75m vers le nord avec une variance de 13,6m vers l'est et de 17,74m vers le nord.

5.5.1.2. Discussion

L'identification précise des puits sur l'image fusionnée n'a pas été possible car la résolution spatiale n'est pas suffisante (5m). La localisation manuelle des puits sur les cartes topographiques scannées a pu être réalisée car la surface de travail n'est pas excessive (40 x 45 km) (pour une surface plus importante, une segmentation adéquate pourrait repérer le symbole des puits sur les cartes topographiques scannées).

Le décalage systématique entre les cartes topographiques et l'image fusionnée a été corrigé, néanmoins, une imprécision perdure. Un autre point à ne pas négliger, est l'année d'édition des cartes, en effet, les cartes topographiques datent de 1994, il est donc possible que de nouveaux puits aient été construits ou que certains aient été détruits.

Une campagne de terrain pourra permettre d'améliorer la précision de cette information en relevant au dGPS les coordonnées très précises de tous les puits situés dans la zone d'étude.

5.5.2. APPLICATION DE LA LÉGENDE DU LCCS

5.5.2.1. Résultats

La légende du système LCCS a été appliquée à ce travail (tableau 10). Les classes initiales ont été transposées comme suit :

Légende prédéfinie	Légende du LCCS
Surface d'eau libre	Natural Waterbodies
Kori	Non-Perennial Natural Waterbodies (Flowing)
Sol nu de plaine	Loose And Shifting Sands
Sol nu de plateau	Ironpan/ Laterite Crusts
Village	Urban Areas
Végétation naturelle en régénération	Herbaceous Open ((70-60%) – 40%) Vegetation
Végétation cultivée sur sol fumé	Continuous Fields Of Herbaceous Crops
Végétation cultivée sur sol non fumé	Scattered Clustered Fields Of Herbaceous Crops
Végétation cultivée sur sol dégradé	Scattered Isolated Fields Of Herbaceous Crops
Bande boisée	Fragmented (Striped) Closed Shrubland (Thicket)
Brousse tigrée	Ironpan/ Laterite Crusts And Fragmented (Striped) Closed Shrubland (Thicket)

Tableau 10 : Transposition de la légende dans le système LCCS

Ces classes se définissent comme suit selon le système LCCS :

- **Natural Waterbodies** : Surfaces d'eau naturelle stagnante ou mouvante, permanente ou non.
- **Non-Perennial Natural Waterbodies (Flowing)** : Surfaces d'eau naturelle mouvante et non permanente, c'est à dire, moins de neuf mois de l'année chaque année.
- **Loose And Shifting Sands** : Sol nu, dont la surface n'a pas un aspect ferme et consolidé, cette surface pouvant être pénétrée par une bêche ou une houe. Les particules peuvent être déplacées par un vent d'une force se produisant régulièrement.
- **Ironpan/ Laterite Crusts** : Sol nu, dont la surface est solide et d'une consistance ferme, cette surface ne peut pas être pénétrée par une bêche ou une houe. Ce sol est riches en fer et

irréversiblement altérés. Le fer est le ciment de ce sol qui contient peu ou pas de matière organique.

- **Urban Areas** : Surfaces construites, cette occupation artificielle est caractérisée par une durée d'occupation longue. Les constructions sont non-linéaires.

- **Herbaceous Open ((70-60%) – 40%) Vegetation** : Surfaces recouvertes par des plantes dépourvues d'une tige ou d'une pousse persistante en dehors du sol et d'une structure définitive ferme.

- **Continuous Fields Of Herbaceous Crops** : Surfaces recouvertes en continu, jusqu'à la récolte, par des plantes dépourvues d'une tige ou d'une pousse persistante en dehors du sol et d'une structure définitive ferme.

- **Scattered Clustered Fields Of Herbaceous Crops** : Surfaces recouvertes entre 20 et 50%, jusqu'à la récolte, par des plantes dépourvues d'une tige ou d'une pousse persistante en dehors du sol et d'une structure définitive ferme. Le reste de la surface est occupé par du sol nu de plaine précédemment défini.

- **Scattered Isolated Fields Of Herbaceous Crops** : Surfaces recouvertes entre 10 et 20%, jusqu'à la récolte, par des plantes dépourvues d'une tige ou d'une pousse persistante en dehors du sol et d'une structure définitive ferme. Le reste de la surface est occupé par du sol nu de plaine précédemment défini.

- **Fragmented (Striped) Closed Shrubland (Thicket)** : Surfaces recouvertes de plantes boisées, pérennes avec une tige boisée persistante et dépourvues d'une tige principale de plus de 5m. La croissance habituelle peut être droite, propagée ou couchée. La couverture, de plus de 65%, est interrompue, en structure rayée.

- **Ironpan/ Laterite Crusts And Fragmented (Striped) Closed Shrubland (Thicket)** : Addition des deux définitions précédentes.

5.5.2.2.Discussion

L'application de la légende du LCCS permet à tous ceux qui veulent utiliser la carte de comprendre les éléments de la légende et leurs définitions en consultant le guide LCCS (Di Gregorio et Jansen, 2000).

Le logiciel est très simple d'utilisation et a permis de transposer toutes les classes utilisées dans ce travail, les critères de classification typologique sont simples clairs et précis.

Il faut cependant trouver une juste balance entre une description trop complète qui introduirait des erreurs et une description trop vague qui diminuerait la précision de l'information fournie.

Le logiciel traite les recouvrements de sol mixtes comme une simple addition de deux occupations pures (brousse tigrée, par exemple, dans le tableau 9), le logiciel additionne le nom des classes qui le composent. Ce nom souvent long et complexe ne permet pas de bien percevoir l'occupation du sol ainsi définie. De plus, bien souvent, ces occupations du sol mixtes sont connues sous un nom plus commun. Dans ce travail, par exemple, la brousse tigrée est une notion connue et reconnue et afin de mieux faire apparaître cette occupation du sol particulière et ne pas susciter de doute, la brousse tigrée sera ajoutée à la légende en plus de celle du LCCS. Ne pas tenir compte des termes *culturels* connus et reconnus de tous est peut-être un point faible du système LCCS.

5.5.3. AJOUT DE L'UTILISATION DU SOL À LA LÉGENDE DE LA CARTE

5.5.3.1. Résultats

La légende de l'utilisation du sol définie pour ce travail est :

- **Surface d'eau libre**
- **Route latéritique**
- **Piste**
- **Couloir de passage**
- **Village**
- **Jachère**
- **Champ non fumé**
- **Champ fumé**
- **Champ sur sol dégradé**
- **Pâturage très extensif**
- **Terre non cultivable**

Les routes latéritiques, les pistes et les couloirs de passage ont été tracés manuellement à partir de l'image fusionnée et à l'aide des cartes topographiques, car ils n'ont pas pu être isolés, de manière satisfaisante, par la segmentation.

5.5.3.2. Discussion

La légende de l'utilisation du sol a été réalisée en collaboration avec des personnes connaissant très bien la zone et en tenant compte des mêmes paramètres que lors de la réalisation de la légende de l'occupation du sol, ce qui la rend proche des objectifs poursuivis par ce travail.

La numérisation des routes, pistes et couloirs de passage a été rendue possible car la taille et la résolution spatiale de l'image fusionnée (5m) le permettaient. La numérisation s'est basée sur l'image fusionnée mais aussi sur les cartes topographiques couvrant la région ; dès lors le problème de la date d'édition des cartes topographiques resurgit.

La numérisation manuelle a permis d'utiliser le pouvoir d'abstraction que possède le cerveau humain, lors de la localisation de pistes qui disparaissent et réapparaissent quelques pixels plus loin.

Plusieurs limitations ont, néanmoins, été rencontrées lors de ce travail :

- la résolution de l'image (5m) n'a pas permis de discerner toutes les pistes, car celles-ci n'ayant pas de recouvrement de sol particulier, il a été parfois difficile de les percevoir à travers d'autres recouvrements. Par contre, pour les routes latéritiques, cette difficulté n'a pas été rencontrée.

- déterminer l'utilisation qui est faite du sol à partir d'une seule image est compliqué. Par exemple, une parcelle peut apparaître comme nue alors qu'il s'agit d'une parcelle cultivée qui vient d'être récoltée. Afin de résoudre ce problème, il faudrait avoir à disposition plusieurs images et, par recoupement des informations, une carte de l'utilisation réelle des sols pourrait être réalisée. Pour bénéficier d'une information plus complète, il faudrait une image acquise aux alentours du premier mai, avant tout semis, pour discerner les parcelles destinées à la jachère (déjà recouverte de végétation). Une autre, avant les récoltes, permettrait de repérer les zones destinées à la culture et d'ainsi analyser le rendement en fonction de la réponse spectrale. Sans cette information la carte réalisée correspond à l'utilisation des sols pour une date donnée.

5.6. PRÉSENTATION DES CARTES

La carte produite est présentée aux pages suivantes sous différents formats :

- la première présente la totalité de la carte produite à une échelle de 1:150.000.
- les deux suivantes sont des extraits de la carte produite, qui illustrent la plus petite échelle utilisable, c'est à dire, 1:20.000.

6. APPLICATIONS ET AVIS DES UTILISATEURS POTENTIELS

6.1. APPLICATIONS

Pour présenter au mieux le travail d'orthorectification, de segmentation et de classification, des cartes et un atlas répondant aux objectifs du travail ont été produits sous formats numérique et papier.

Certaines cartes ont été présentées en fin de chapitre «Résultats et discussions» (ensemble de l'image échelle 1:150.000, extraits de l'image à l'échelle 1: 20.000). Une carte en format A0 (1:50.000) a également été produite et utilisée lors de la présentation orale de ce mémoire. L'atlas a été réalisé afin de pouvoir présenter l'ensemble de l'image à l'échelle la plus adéquate sous un format pratique et facilement utilisable par tous, il reprend l'ensemble de l'image à l'échelle 1:20.000 en format A4.

Ces différents documents auront des utilités diverses :

- permettre le calage de bases de données et de relevés GPS.
- permettre aux partenaires du projet de se situer dans la zone lors d'enquêtes de terrain.
- permettre aux paysans de visualiser l'espace qui les entoure et ainsi fournir des informations précises aux chercheurs.
- permettre des analyses spatiales et quantitatives des ressources naturelles, des puits, des voies de communication, de la structuration des jachères, des cultures et des pâtures. Ces observations pourront ensuite être introduites dans un modèle informatique.
- permettre l'analyse du système agraire et de ces éléments constitutifs.

6.2. AVIS DES UTILISATEURS POTENTIELS

Afin de se faire une idée objective de la qualité des documents réalisés, les cartes ont été soumises aux partenaires du projet qui seront amenés à les utiliser.

L'analyse s'est portée sur :

- l'échelle
- la légende d'occupation et d'utilisation du sol par rapport à l'utilisation.
- la présentation des cartes et de l'atlas.
- l'utilité et la qualité des ajouts (pistes, routes latéritiques, couloirs de passage, puits, toponymie).

Il ressort de cette analyse que la précision obtenue est suffisante pour l'utilisation de la carte sur le terrain lors des enquêtes. En effet elle permet de se localiser précisément et de repérer les points remarquables (puits, couloirs de passage,...). Pour ce qui est de l'utilisation des données numériques, la précision obtenue est la précision maximale qui peut être atteinte à partir des images utilisées dont la résolution spatiale était de 5m.

La présence des deux légendes plait beaucoup aux utilisateurs potentiels, elles sont complémentaires tout en ayant des spécificités propres. De plus la carte, ne souffrant d'aucune surcharge, est très lisible et les classes d'occupation du sol choisies sont appropriées pour l'utilisation qui sera faite de la carte.

L'atlas présente l'avantage non négligeable de pouvoir être emporté et manipulé facilement lors des visites de terrain, alors que les cartes en format numérique pourront être utilisées dans les modèles mis en place par les chercheurs.

La présence du nom des villages, des routes latéritiques, des pistes, des couloirs de passage et des puits est considérée comme un atout très intéressant de la carte car il s'agit de repères facilement identifiables autant par les paysans que par les chercheurs. Ils ont néanmoins souligné que la perfection aurait été de localiser la présence des arbres remarquables. Il est vrai que certains arbres sont visibles sur l'image mais s'agit-il d'arbres remarquables ???

Deux remarques plus générales ont été émises :

- La présence de jachère à moins de 1km du village est apparue étrange. Cette présence peut s'expliquer de plusieurs manières. Premièrement, il est possible que les terres proches des habitations fassent aussi partie d'un cycle de rotation intégrant une période de mise en jachère, personne n'a pu confirmer cette hypothèse. Afin de résoudre le problème, il faudrait pouvoir affirmer, suite à des visites de terrain, que jamais il n'y a de jachères à moins de x kilomètres des habitations et ensuite réaliser une correction de la classification en intégrant un paramètre de spatialité aux classes jachères. Deuxièmement, il peut s'agir d'une erreur de classification due à la forte ressemblance spectrale entre les cultures fumées et les jachères.
- La présence de «taches », correspondant à de petits objets ayant été classés différemment des grandes zones qui les entourent, introduit un bruit lors de l'analyse visuelle de la carte. Ces «taches » peuvent correspondre à des arbres, des bosquets, des puits non détectés ou d'autres occupations du sol particulières. Leur présence sur la carte introduit effectivement du bruit, mais elles peuvent devenir importantes lors de l'utilisation de cette information dans un modèle, par exemple, le rendement d'une parcelle pourrait être corrélé avec la présence d'arbres à proximité.

7. CONCLUSION ET PERSPECTIVES

La réalisation d'une carte 1:20.000, détaillée de l'occupation et de l'utilisation du sol, mettant en évidence les éléments constitutifs du système agraire et qui soit également une référence planimétrique, à partir de données satellitaires à très haute résolution, a permis d'atteindre les objectifs fixés.

En effet, l'utilisation du dGPS a permis de relevés des GCP très précisément (1 à 3m). L'image P ayant une résolution spatiale de 5 mètres, leurs localisations a pu se faire de manière très précise, ce qui a permis d'obtenir un RMSE de 0,91. La précision planimétrique l'image est donc de 5 mètres, ce qui revient à dire que grâce à des GCP plus précis que la résolution spatiale de l'image de base, le potentiel de précision planimétrique de celle-ci est exploité à son maximum.

La carte réalisée se voulait être une référence planimétrique, ce qui est fonction de l'échelle et de la précision de l'image qui en est à la base. En tenant compte d'une erreur de lecture de 0,3mm, l'échelle adéquate pour ne pas que la précision planimétrique ne dépasse la précision de la carte est de 1:20.000

La méthode de fusion utilisée pour ce travail (IHS) a amélioré l'information spatiale de l'image XS et a grandement amélioré la précision de la photo-interprétation, sans dégrader de manière significative l'information spectrale.

La segmentation a formé des objets purs et de tailles adéquates. Elle a donc facilité la classification plus facile et de meilleure qualité. A ce niveau de résolution spatiale (5m), la segmentation devient un outil indispensable, car les pixels formés sont quasiment tous purs (en terme d'occupation du sol), et qu'il est beaucoup plus facile de traiter les pixels identiques comme un seul groupe ; encore faut-il s'assurer que les groupes formés soient homogènes. Pour ce faire, la méthode proposée et appliquée dans ce travail est adaptée à la méthode de classification, efficace et simple à mettre en oeuvre.

La classification supervisée basée sur des zones d'entraînement déterminées par photo-interprétation était la méthode la plus adéquate pour ce travail, mais on a pu remarquer que celle-ci a été la source d'une série d'erreurs, dues à une connaissance incomplète du terrain, lors de la photo-interprétation.

La classification a discriminer avec une grande précision les occupations du sol suivantes : sol nu, eau, village, kori, végétation cultivée, végétation en régénération, bande boisée.

La très haute résolution spatiale de l'image fusionnée par rapport à la structure des éléments constitutifs du système agraire et la date d'acquisition de l'image par rapport au calendrier culturel (28/09/2004 : saison agricole) ont permis de discriminer au sein de la classe végétation cultivée, des éléments tels que les champs sur sol fumé, les champs sur sol non-fumé et les champs sur sol dégradé mais aussi au sein de la classe sol nu, les sols nus de plateaux et les sols nus de plaines. Cette mise en évidence des éléments du système agraire entraîne, néanmoins, une diminution de la précision globale qui reste toutefois acceptable.

Ce travail a permis la réalisation d'une carte très détaillée de la zone. A la légende d'occupation et d'utilisation du sol a été ajoutée la localisation des pistes, des routes, des couloirs de passages et des puits afin de rendre cette carte la plus pertinente possible par rapport à son utilisation sur le terrain mais aussi afin de l'enrichir d'informations précieuses lors d'études du fonctionnement des systèmes socio-économiques. Ce document pourra servir directement aux applications citées dans le chapitre qui y est consacré mais aussi, si d'autres cartes du même type sont réalisées dans les prochaines années, de base pour une analyse de l'évolution des ressources naturelles, de la taille des villages, de la densification des routes, de l'apparition de nouveaux puits, d'un changement de structuration agricole, d'une dégradation des sols, etc.

Des données satellitaires SPOT 5 ont été acquises pour les autres zones d'étude du projet (Gabi et Zinder). Au vu des résultats obtenus dans ce travail, on peut espérer que la méthodologie utilisée permettra d'obtenir des résultats équivalents pour la réalisation des cartes des autres zones. Néanmoins, des cartes topographiques plus récentes et une visite de terrain contribueront certainement à une amélioration des résultats.

La télédétection de précision, en général, pourra également participer de manière active à la prévention des famines qui ravagent les pays sahéliens. On pourrait imaginer qu'une analyse d'indices de végétation sur une image satellite acquise à un moment donné de la croissance des cultures pourrait permettre de prédire quantitativement la future récolte. Ce qui permettrait de tirer un signal d'alarme, si nécessaire, avant que la catastrophe ne se produise et de ce fait tenter de minimiser son effet par des actions adéquates.

8. BIBLIOGRAPHIE

AMARSAIKHAN D., DOUGLAS T., 2004, *Data fusion and multisource image classification*, International Journal of Remote Sensing, vol 25, n°17, pp3529-3539.

BONTEMPS S., 2004, *Cartographie et interprétation de l'évolution du développement territorial par télédétection spatiale au Cambodge*, Mémoire de fin d'études de la faculté des Sciences Agronomiques, UCL, Louvain-La-Neuve, 111p.

BONN F., ROCHON G., 1992, *Précis de télédétection – vol 1: Principes et méthodes*, Presses de l'Université du Québec, Canada, 485p.

CHEN C.-M., HEPNER G.F., FORSTER R.R., 2003, *Fusion of hyperspectral and radar data using the IHS transformation to enhance urban surface features*, ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, vol n°58, pp19-30.

CHIBANI Y., HOUACINE A., 2002, *The joint use of IHS transform and redundant wavelet decomposition for fusing multispectral and panchromatic images*, International Journal of Remote Sensing, vol 23, n°18, pp3821-3833.

DEFOURNY P., 2004, *Géomatique appliquée à l'environnement*, Notes de cours, Faculté des Sciences Agronomiques, UCL, Louvain-La-Neuve.

DI GREGORIO, JANSEN, 2000, *Land Cover Classification System: Classification Concepts And User Manual*, FAO, Rome

DI GREGORIO, JANSEN, 2002, *Parametric land cover and land-use classification as tools for environmental change detection*, Agriculture, Ecosystems and Environnement, Vol 91, pp 89-100.

DI GREGORIO, JANSEN, 2003, *Land-use data collection using the "LCCS": results from a case study in Kenya*, Land use Policy, Vol 20, issue 2, pp131-148.

E-COGNITION, 2000, User guide 3

EHLERS M., 1991, *Multisensor image fusion techniques in remote sensing*, ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, n°46, pp19-30

FRANKLIN S., BLODGETT C., 1993, *An example of satellite multisensor data fusion*, Computers & Geosciences, vol 19, n°4, pp577-583.

GARBA I., 2002, *Inventaire des ligneux par télédétection dans le terroir de Tiguo Tegur*, Travail de fin d'étude. Université Abdou Moumouni, 42p.

GARGUET B., 1997, *WaveMerg: a multiresolution software for merging SPOT panchromatic and SPOT multispectral data*, Environment Modelling & Software, vol 12, n°1, pp85-92.

- GEERKEN R., ILAIWI M., 2004, *Assessment of rangeland degradation and development of a strategy for rehabilitation*, Remote sensing of environment, n°90, pp490-504.
- HERES J.M., VALENTIN C., 1997, *Land surface conditions of the Niamey region : ecological and hydrological implications*, Journal of Hydrology, 188-189, pp.18-42.
- KARTIKEYAN B., SARKAR A., MAJUMDER K.L., 1998, *A segmentation approach to classification of remote sensing imagery*, International Journal of Remote Sensing, vol 19, n°9, pp1695-1709.
- LATIFOVIC, ZHU, CIHLAR, GIRI, OLTHOF, 2003, *Land cover mapping of North and Central America Global Land Cover 2000*, Remote Sensing of Environment, Vol 89, pp116-127.
- LEICA GEOSYSTEMS, 2001, *Notion de base du GPS*.
- LI S., KWOK J., WANG Y., 2003, *Using the discrete wavelet frame transform to merge Landsat TM and SPOT panchromatic images*, Information Fusion, n°3, pp17-23.
- LILLESAND T.M., KIEFER R.W., 1994, *Remote sensing and image interpretation*, John Wiley and Sons, 3rd edition, New-York, 750p.
- PEETERS A., 2000, *Analyse par télédétection de la dynamique spatio-temporelle des cultures sèches dans le casier du Bac Hung Hai (delta du Fleuve Rouge, Viêt-Nam)*, Mémoire de fin d'études de la faculté des Sciences Agronomiques, UCL, Louvain-La-Neuve, 130p.
- PEKKARINEN A., 2002, *Image segment-based spectral features in the estimation of timber volume*, Remote Sensing of Environment, n°82, pp349-359.
- PEKKARINEN A., 2002, *A method for the segmentation of very high spatial resolution images of forested landscapes*, International Journal of Remote Sensing, vol 23, n°14, pp2817-2836.
- PEREIRA B., 2002, *Approche système pour une simulation prospective des territoires appliquée à la gestion de la fertilité des sols dans la région du Fakara (Niger)*, Mémoire de fin d'études de la faculté des Sciences Agronomiques, UCL, Louvain-La-Neuve, 114p.
- POHL C., VAN GENDEREN J.L., 1998, *Multisensor image fusion in remote sensing: concepts, methods and applications*, International Journal of Remote Sensing, vol 19, n°5, pp823-854.
- RAKOTONIAINA S., 1999, *Analyse multirésolution par ondelettes en traitement du signal. Exemple d'application en Télédétection et Géophysique*, Thèse de doctorat, Université d'Antananarivo, Madagascar.
- RANCHIN T., AIAZZI B., ALPARONE L., BARONTI S., WALD L., 2003, *Image fusion—the ARSIS concept and some successful implementation schemes*, ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, vol, n°58, pp4-18.

SONG C., WOODCOCK C.E., SETO K.C., LENNEY M.P., MACOMBER S.A., 2001, *Classification and change detection using Landsat TM data : when and how to correct atmospheric effects?*, Remote Sensing of Environment, n°75, pp230-244.

SUN G., RANSON K.J., KHARUK V.I., KOVACS K., 2003, *Validation of surface height from shuttle radar topography mission using shuttle laser altimeter*, Remote sensing of environment, n°88, pp401-411.

TEGGI S., CECCHI R., SERAFINI F., 2003, *TM and IRS-1C-PAN data fusion using multiresolution decomposition methods based on the "a trous" algorithm*, International Journal of Remote Sensing, vol 24, n°6, pp1287-1301.

TONKA O., 2000, *Fusion de données pour la cartographie d'occupation du sol en Région wallonne et évaluation du potentiel de SPOT pour la détection et l'identification d'éléments linéaires naturels et semi-naturels*, Mémoire de fin d'études de la faculté des Sciences Agronomiques, UCL, Louvain-La-Neuve, 81p.

TRISURAT Y., EIUMNOH A., MURAI S., HUSSAIN M.Z., SHRESTHA R.P., 2000, *Improvement of tropical vegetation mapping using a remote sensing technique: a case of Khao Yai National Park, Thailand*, International Journal of Remote Sensing, vol 21, n°10, pp2031-2042.

VIJAYARAJ V., O'HARA C., YOUNAN N., 2004, *Quality analysis of pansharpened images*, Geoscience and remote sensing.

YESOU H., BESNUS Y., ROLET J., 1993, *Extraction of spectral information from Landsat TM data and merger with SPOT panchromatic imagery a contribution to the study of geological structures*, ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, vol 48, n°5, pp23-36.

YESOU H., BESNUS Y., ROLET J., PION J.C., AING A., 1993, *Merging Seasat and SPOT Imagery for the Study of Geological Structures in a Temperate Agricultural Region*, Remote Sensing of Environment, n°43, pp265-279.

<http://www.ccrs.nrcan.gc.ca/ccrs/homepg.pl?f>

<http://www.spotimage.fr>

<http://www.ceos.cnes.fr:8100/cdrom-00b2/ceos1/science/gdts/fr/a1fr/12.htm>

<http://ceos.cnes.fr>

<http://www.icrisat.org>

ANNEXES

1. Capteurs actifs vs capteurs passifs.
2. Appareils de SPOT 5 en comparaison avec les autres appareils SPOT.
3. Pré-traitement des images SPOT 5. (<http://ceos.cnes.fr>).
4. Méthode d'obtention d'une position au GPS.
5. Ensemble des raisons de l'inaptitude des systèmes de classification actuels à être utilisés comme système de référence.
6. Description des saisons présentes au Niger.
7. Zones pluviométriques du Niger.
8. Description des recouvrements végétaux du Niger.
9. Calcul du décalage du fichier de forme des puits.

1. Capteurs actifs vs capteurs passifs.

L'ensemble des capteurs se divise en deux groupes, les actifs (figure 21) et les passifs (figure 22). Les premiers éclairent leur cible artificiellement et enregistrent l'énergie renvoyée par la cible. Les seconds utilisent l'énergie naturellement émise ou réfléchie par l'objet de l'étude comme base de données (Defourny, 2004).

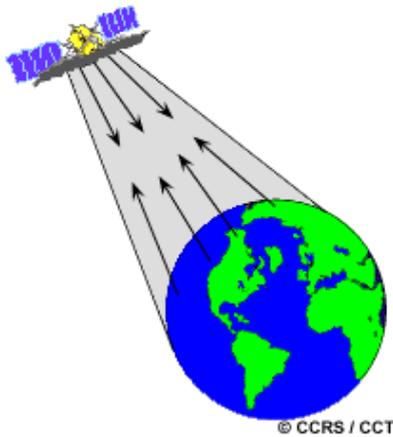


Figure 21 : Capteur actif

Source : <http://www.ccrs.nrcan.gc.ca/ccrs/homepg.pl?f>

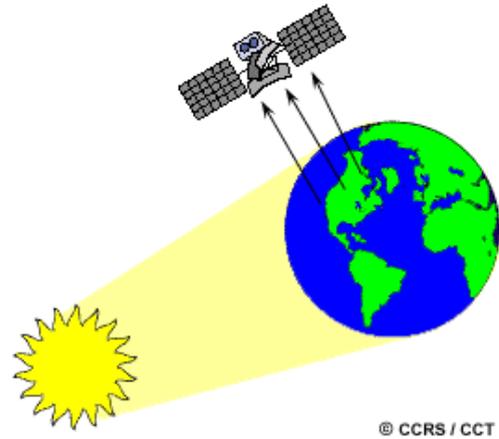


Figure 22 : Capteur passif

Source : <http://www.ccrs.nrcan.gc.ca/ccrs/homepg.pl?f>

2. Appareils de SPOT 5 en comparaison avec les autres appareils SPOT.

Spot 1, 2, 3, Spot 4, Spot 5 en chiffres

Satellite	Spot 1,2,3	Spot 4	Spot 5
<u>Caractéristiques générales</u>			
Masse totale	1800 kg	2760 kg	3000 kg
Générateur solaire (fin de vie)	1100 W	2100 W	2400 W
Altitude à l'équateur	822 km	822 km	822 km
Inclinaison sur l'équateur	98,7°	98,7°	98,7°
Vitesse du satellite	7,4 km/s	7,4 km/s	7,4 km/s
Période de révolution	101,4 mn	101,4 mn	101,4 mn
Durée du cycle orbital	26 jours	26 jours	26 jours
Dimensions		2x2x5,6 m	3,1x3,1x5,7m
Durée de vie	3 ans	5 ans	5 ans
AOCS pointage	0,05°/s	0,05°/s	0,05°/s + guidage en lacet
AOCS vitesse	6 10 ⁻⁴ °/s	6 10 ⁻⁴ °/s	6 10 ⁻⁴ °/s
Hydrazine	150 kg	150 kg	150 kg
Télémesure	2048 bps	4096 bps	4096 bps
Télécommande	20 mots/s	60 mots/s	60 mots/s
Lanceur	Ariane 2/3	Ariane 4	Ariane 4 ou 5
<u>Instrument haute résolution</u>			
	2 HRV	2 HRVIR	2 HRG
Bandes spectrales	1 panchromatique (10 m) 3 multispectrales (20 m)	1 panchromatique (10m) 3 multispectrales (20m) 1 moyen infra rouge (20m)	1 panchromatique (2,5 ou 5 m) 3 multispectrales (10m) 1 moyen infrarouge (20m)
Champ de vue	2x60 km	idem Spot 1	idem Spot 1
Répétitivité	2 à 3 jours	idem Spot 1	idem Spot 1
<u>Instrument stéréo HRS</u>			

Bandes spectrales			1 bande panchromatique (10m)
Champ de vue			120 km; visée arrière -20°, visée avant +20°
Répétitivité			26 jours

Instrument VEGETATION

Bandes spectrales		4 bandes spectrales	idem Spot 4
Champ de vue		2200 km	idem Spot 4
Répétitivité		couverture journalière de la quasi totalité des terres émergées	idem Spot 4

Case TMCU

Capacité d'enregistrement	enregistreur 2x 60 Gbits, 160 images	enregistreur 120 Gbits (redondé), mémoire de masse 9 Gbits , 400 images	mémoire de masse 90 Gbits , 550 images
Traitement image à bord	2 images traitées simultanément, puis transmises au sol ou stockées à bord avec un taux de compression de 1,3	2 images traitées simultanément, puis transmises au sol ou stockées à bord avec un taux de compression de 1,3	jusqu'à 5 images, 2 transmises au sol en temps réel, 3 stockées à bord avec un taux de compression de 2,6
Liaison télémesure image (8 GHz)	50 Mbits/s	50 Mbits/s	2x 50 Mbits/s
Détermination de l'orbite	Doris	Doris en temps réel, 5 m rms	Doris en temps réel, 5 m rms
Performance de localisation	350 m	350 m	50 m

Source: <http://spot5.cnes.fr/programme/11.htm#p2>

3. Pré-traitement des images SPOT 5.

Niveau 1A : C'est un niveau brut où seulement une égalisation des détecteurs est réalisée dans chaque bande spectrale. Ces corrections sont réalisées systématiquement. Ce niveau de pré-traitement est généralement utilisé lorsque des études radiométriques fines doivent être conduites. Il ne comprend pas de corrections géométriques.

Niveau 1B : L'image est corrigée des déformations systématiques introduites par le système : effet panoramique, courbure et rotation de la Terre, effet de filé, angle de visée. Ces corrections sont monodimensionnelles (perpendiculairement à la trace du satellite). Les corrections sont donc de nature géométrique mais aussi radiométrique (ré-échantillonnage de l'image). Ce type d'image est un produit privilégié pour la photo-interprétation et les études thématiques (www.spotimage.fr).

Niveau 2 : Les principaux caractères distinctifs du niveau 2 par rapport au niveau 1B sont une géométrie et une localisation améliorées par l'utilisation de données internes et externes :

- Les données internes prises en compte sont : les données d'orbite restituées ; la géométrie de la prise de vue ; les données auxiliaires de restitution d'altitude du satellite.
- Les données externes prises en compte sont : les paramètres du système de représentation plane choisi ; l'altitude moyenne souhaitée pour la rectification (c'est pour les points situés à cette altitude que la précision du produit sera la meilleure, en général, c'est l'altitude moyenne de la zone d'intérêt de l'utilisateur qui est choisie) ; éventuellement, les coordonnées d'un certain nombre de points au sol, dits points d'appui (Ground control point GCP), mesurées sur une carte, sur le terrain ou fournies par l'utilisateur.

Selon que l'on utilise des GCP ou non, on distingue deux sous-niveaux :

- Niveau 2A : Des corrections bidimensionnelles sont réalisées pour restituer la scène dans un système de représentation cartographique donné. Les corrections sont effectuées en utilisant seulement les données d'altitude du satellite et la géométrie de prise de vue sans prise de GCP (il n'est donc pas nécessaire de posséder des cartes topographiques). La précision interne de l'image est améliorée mais la précision en localisation absolue reste celle du niveau 1B (soit environ 800m). Cependant, une simple translation en X et en Y par rapport à un point connu permet un recalage précis en localisation.

- Niveau 2B : C'est un niveau de pré-traitement de précision dans lequel les corrections bidimensionnelles sont réalisées à l'aide de GCP. L'image est rectifiée dans la projection des cartes. Ce produit, comme le niveau 1B, ne prend pas en compte les déformations dues au relief et est donc d'autant plus précis que la visée est plus verticale et le relief moins important.

Niveau 3 : En plus des corrections du niveau 2B, la correction de niveau 3 tient compte des déformations dues au relief. Elle fait appel à des données issues d'un modèle numérique de terrain (MNT). La précision de localisation absolue est alors de l'ordre de 0,5 pixel. Le produit final est une image orthorectifiée.

4. Méthode d'obtention d'une position au GPS.

D'une manière générale, il est possible de subdiviser les techniques en trois grandes catégories.

- La navigation autonome utilisant un seul capteur indépendant : dans ce cas, la précision de positionnement est de l'ordre de 20 mètres pour les utilisateurs militaires et civils.
- La position différentielle par la phase fournissant une précision de 0,5 à 20 mètres.
- Le positionnement à corrections différentielles plus connu sous l'abréviation dGPS (figure 23) (differential GPS), fournit une précision de 0,5 à 5 mètres en fonction du modèle de dGPS utilisé.

Cette dernière technique compte deux capteurs, un de référence et un mobile (notion de base du GPS, Leica Geosystems, 2001). L'antenne du capteur de référence est installée sur un point mesuré précédemment dont les coordonnées sont ainsi connues. Le capteur mis en place sur ce point est appelé le capteur de référence ou la station de base. Le capteur est mis sous tension et entame la poursuite des satellites. Du fait de son installation sur un point connu, le capteur de référence peut estimer les distances vers les satellites poursuivis avec une très grande précision. Il est par conséquent capable de déterminer les écarts entre les distances mesurées vers les satellites et leurs équivalents calculés. Ces différences sont appelées des corrections.

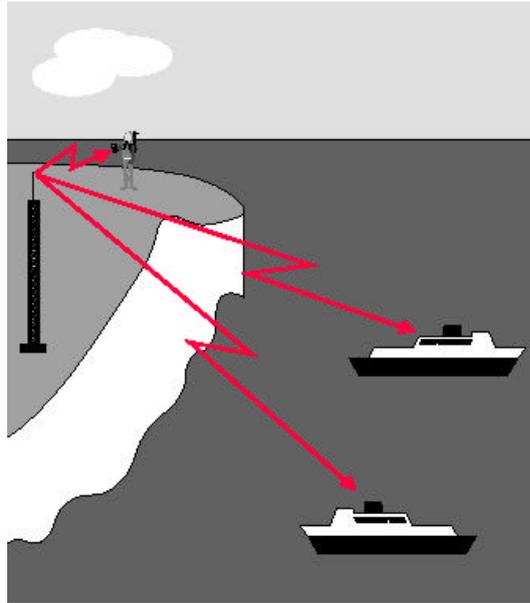


Figure 23 : Principe du dGPS

Source : Leica, geosystems

Le capteur de référence est généralement associé à une liaison de données radio utilisée pour la diffusion de ces corrections. Le capteur mobile est également équipé d'une liaison de données radio, ce qui lui permet de recevoir les corrections de distances diffusées par le capteur de référence. Le capteur mobile détermine également des distances vers les satellites. Il applique ensuite les corrections de distance reçues de la référence et on peut donc calculer une position avec une précision bien supérieure à ce qu'elle aurait été en cas d'utilisation des mesures de distances non corrigées. Le recours à cette technique permet de minimiser toutes les sources d'erreurs d'où l'accroissement dans la précision de la position (notion de base du GPS, Leica Geosystems).

5. Ensemble des raisons de l'inaptitude des systèmes de classification actuels à être utilisés comme système de référence.

- Objectif poursuivi : beaucoup de classifications existent pour classifier la végétation, mais elles sont par définition limitées dans leurs capacités à définir l'ensemble possible des classes d'occupation du sol. Certains systèmes classifient les végétations naturelles et d'autres les terres agricoles : ils ne peuvent donc aucun des deux être complets dans leurs classifications. Beaucoup de systèmes ont été développés pour un certain objectif, à une certaine échelle et utilisant un certain type de données, et ces systèmes en sont très dépendants.

- Constance : dans la plupart des systèmes de classifications actuels, les critères utilisés pour définir les classes ne sont pas systématiquement appliqués, souvent l'utilisation de différents ensembles de valeurs dépend de l'importance attribuée par les utilisateurs à une certaine caractéristique. Dans certaines classifications, les définitions de classes sont imprécises, ambiguës ou absentes.

- Principe commun sous-jacent : un ensemble de différentes caractéristiques est souvent utilisé pour définir une classe, comme le climat, la géologie, le type de sol,... Ce type de caractéristiques influence l'occupation du sol mais n'est pas inhérent à celle-ci. Cela mène à des confusions dans la définition des classes. Les classifications de la végétation utilisant les critères de hauteur de recouvrement, amèneront à des interprétations différentes en comparaison avec l'utilisation de la phénologie des feuilles et du type de feuilles. Il est donc important d'avoir un consensus global sur des critères à utiliser pour la description de l'occupation du sol.

- Système de classification supervisée : L'avantage de cette méthode est sa rigidité, bien que nous ayons déjà dit qu'il s'agissait aussi d'un inconvénient, ce qui est le meilleur moyen pour arriver à une standardisation des systèmes de classification. La difficulté est d'être capable de décrire toutes les occupations du sol que l'on peut retrouver dans le monde, ce qui va en plus engendrer un nombre énorme de classes. Le problème, en augmentant le nombre de classes prédéfinies dans le système de classification supervisée, est de savoir où l'utilisateur pourra trouver la définition qu'il cherche dans cet ensemble de définitions. Cette situation aggrave la standardisation, en effet, nous allons arriver à un point où chaque utilisateur va avoir sa propre opinion de comment interpréter certaines classes, et ce parce que la frontière entre deux classes sera déterminée par une différence infime. Les fausses ou différentes désignations de mêmes classes en classes différentes vont affecter la procédure de standardisation qui est un des objectifs majeurs de la classification. Finalement la tentative d'harmonisation va échouer. Le système de classification supervisée apparaît être un cercle vicieux : la tentative d'utiliser, comme outil de standardisation, une classification supervisée oblige à limiter toutes les possibilités d'occupation du sol à un nombre fini de classes.

6. Description des saisons présentes au Niger.

- **Une saison dite froide** (mi-décembre à mi-février) caractérisée par des nuits très fraîches avec des températures pouvant descendre au-dessous des 10°C et même de 0°C dans la zone septentrionale du pays.
- **Une saison sèche et chaude** (mars - mai) avec des vents brûlants et des températures qui peuvent être supérieures à 45°C.
- **Une saison des pluies** (juin - septembre) caractérisée par des précipitations, souvent orageuses, une forte humidité et une température moyenne de 33°C.
- **Une saison chaude sans pluie** (octobre à mi-décembre) avec une humidité relative élevée et une température moyenne de 35°C.

7. Zones pluviométriques du Niger.

- **La zone saharienne** au nord du pays, représentant environ 65% du territoire national, avec des précipitations inférieures à 100 mm par an et des températures supérieures en moyenne à 35°C.
- **La zone sahélo-saharienne** (12,2% du territoire national), avec des précipitations restant comprises entre 100 mm et 300 mm, cette région se caractérise par le nomadisme agricole et pastoral dans les oasis et les vallées des massifs montagneux.
- **La zone sahélo-soudanienne** (21,9% du territoire national), avec des précipitations variant de 300 à 600 mm et une partie soudanienne au sud, plus arrosée, c'est la zone de l'élevage extensif et de la culture de mil. Entre la zone agricole et la zone d'élevage existe une zone de transition où les deux activités sont intimement liées.
- **La zone soudanienne** qui reçoit plus de 600 mm d'eau par an et représente 0,9% du territoire national. Plus boisée que le Sahel, elle comporte une végétation de savane, caractérisée par une strate herbacée continue ou non.

8. Description des recouvrements végétaux du Niger.

- **Zone saharienne** : la végétation est dominée par des steppes, une végétation ligneuse disposée en mode diffus, des éphémères annuelles à cycles très courts et des graminées pérennes.
- **Zone Nord-sahélienne** : la végétation est dominée par des arbres et des arbustes épineux dans une formation très ouverte. On y trouve également des graminées annuelles. Cette zone demeure la région de prédilection de l'élevage. Dans les dépressions de ces zones, la végétation présente quelques similitudes avec la zone soudanienne.
- **Zone Sud-sahélienne** : la savane à combrétacées (famille des plantes tropicales) à dominance d'arbustes mésophylles caducifoliés domine, et des éléments sahéliens et soudanais qui montrent que la limite n'est pas stricte du point de vue de la végétation. Celle-ci est de type savane arborée et arbustive, et le tapis graminéen est constitué d'annuelles et de vivaces dans les dépressions humides.
- **La savane Nord-soudanienne** : La zone est caractérisée par un recouvrement arboré et arbustif de l'ordre de 20 à 25% avec des espèces ligneuses mésophylles. Le tapis graminéen, constitué de vivaces, est très important.
- Sur de nombreux **plateaux**, on retrouve un type de végétation caractéristique, la brousse tigrée, différent des autres types de végétation sahélienne par son organisation végétale, matérialisée sur le sol par une alternance d'arcs de végétation et des bandes de sol nu. Elle se développe naturellement au Sahel. Elle est essentiellement dominée par les annuelles comme la *Microchloa indica* (67%) et la *Cyanotis lanata* (21%) auxquelles s'ajoutent des combrétacées dans certains sites. La population végétale peut varier suivant les isohyètes pluviométriques (Hiernaux et Gérard, 1999 dans Pereira, 2002).

9. Calcul du décalage du fichier de forme des puits.

Coord X Image Fusionnée	Coord X IGN	Coord Y Image fusionnée	Coord Y IGN	Diff X	Diff Y	
456044,56	456167,36	1473149,9	1472994,69	122,8	-155,21	
473230,29	473350,23	1482670,02	1482515,27	119,94	-154,75	
489795,36	489948,37	1498585,99	1498446,32	153,01	-139,67	
492440,21	492543,48	1496837,31	1496696,78	103,27	-140,53	
454517,11	454626,63	1506034,96	1505875,99	109,52	-158,97	
455132,99	455257,01	1506258,51	1506101,83	124,02	-156,68	
459400,98	459503,02	1501961,78	1501795,39	102,04	-166,39	
463304,78	463417,22	1495637,16	1495492,59	112,44	-144,57	
468151,59	468278,78	1485942,77	1485773,69	127,19	-169,08	
469611,5	469716,76	1485069,64	1484906,41	105,26	-163,23	
459596,18	459704,72	1480371,79	1480277,17	108,54	-94,62	
465734,99	465851,01	1481790,36	1481637,32	116,02	-153,04	
468595,18	468725,75	1482035,95	1481883,43	130,57	-152,52	
468837,83	468967,24	1482334,06	1482178,07	129,41	-155,99	
486288,58	486418,06	1505751,99	1505610,93	129,48	-141,06	
				119,57	-149,75	Moyenne
				13,6	17,74	Ecart type

Tableau 11 : Coordonnées des points pour le calcul du décalage de la couche des puits, moyennes et écarts type

