

Table des matières

Introduction	6
I. Problématique et contexte scientifique	6
I.1. Problématique	6
I.2. Contexte scientifique.....	7
I.2.1. Le CIRAD	7
I.2.2. Le projet AMMA (Analyse Multidisciplinaire de la Mousson Africaine).....	8
II. Objectifs et méthodologie générale.....	10
II.1. Objectifs	10
II.2. Méthodologie générale et déroulement du stage.....	10
III. La zone d'étude.....	13
Chapitre 1 : Acquisition, organisation et pré-traitements des données	16
I. Les cartes thématiques : organisation dans un SIG	16
I.1. Recherche et acquisition de données thématiques sur le Sénégal.....	16
I.2. Tri, organisation et constitution des métadonnées.....	17
II. Les images satellites.....	17
II.1. Choix du type d'image satellite à acquérir.....	17
II.1.1. Les données Modis Terras Végétation Indices 250m	18
II.1.1.1. Le système MODIS/TERRA.....	18
II.1.1.2. Les produits "Vegetation Indices"	19
II.1.1.3. Les synthèses temporelles.....	21
II.1.2. Les données Spot Végétation 1km	23
II.1.2.1. Le système Spot Vegetation	23
II.1.2.2. Les produits VEGETATION	23
II.1.3. Les données Landsat ETM+	25
II.1.3.1. Le système Landsat ETM+	25
II.1.3.2. Les images Landsat ETM+ Orthorectifiée.....	25
II.2. Acquisition et préparation des images satellite	26
II.2.1. Acquisition, reprojection, reformatage et redimensionnement	28
II.2.2. Création de séries temporelles.....	29
II.2.3. Corrections radiométriques	31
II.2.3.1. Evaluation de la qualité des séries temporelles.....	32
II.2.3.2. Reconstitution des données manquantes par interpolation	35

Chapitre 2 : Identification du domaine cultivé	41
I. Stratification post classifications	41
I.1. Stratification à partir des cartes thématiques	42
I.2. Amélioration de la stratification à partir des caractéristiques phénologiques des cultures 45	
II.2.1. Classification spatio-temporelle Spot VGT.....	45
II.2.1. Définition des paramètres phénologiques	48
II.2.2. Cartes d'indicateurs phénologiques	50
II.2.3. Analyse des différences phénologiques.....	54
I.3. Classifications et réajustements de la stratification.....	55
III. Spatialisation, interprétation et signification des classes Modis.....	58
III.1. Classifications par nuées dynamiques	58
III.2. Interprétations des classifications	60
III.2.1. Identification des classes représentatives du domaine cultivé par photo- interprétation	61
III.2.1.1. Les critères pour l'identification des cultures	61
III.2.1.2. Les difficultés rencontrés lors de la photo-interprétation.....	62
III.2.2. Analyse discriminante des courbes de comportement temporel.....	64
IV. Analyse et validation des résultats.....	66
 Bilan et perspectives	68
I. Bilan du stage	68
II. Perspectives et évolutions	68
III. Bilan personnel	69
 Bibliographie.....	71
Mediagraphie.....	74
Table des figures	75
Table des cartes.....	75
Table des tableaux.....	75
Table des acronymes	76

Introduction

I. Problématique et contexte scientifique

I.1. Problématique

Depuis une cinquantaine d'années, on assiste à des changements climatiques planétaires d'origine naturels (variations climatiques) et industriels (ou anthropiques). Ces derniers sont dus à l'industrialisation de la planète et à l'utilisation massive d'énergies fossiles. Alors que les changements climatiques naturels se font sur de très longues périodes, ce qui implique une certaine adaptation des espèces animales et végétales, les changements anthropiques sont très rapides et par conséquent menacent énormément des écosystèmes souvent fragiles.

"Ce sont dans une grande mesure les conditions météorologiques - température, lumière et eau - qui déterminent la capacité des populations à cultiver suffisamment d'aliments pour eux-mêmes et leurs animaux. La variabilité naturelle des précipitations, de la température et d'autres conditions météorologiques est le principal facteur à l'origine de la variabilité de la production agricole qui, à son tour, est l'un des principaux facteurs expliquant le manque de sécurité alimentaire"¹. Certaines régions du monde, comme le Sahel, sont particulièrement exposées à cette variabilité.

Dans ce contexte, les études d'impact du climat sur la production agricole et sur les interactions homme-environnement sont de première importance. La modification des paysages agraires reflète entre autres les interactions entre changement climatique et activités humaines. Or, ces paysages sont perceptibles par télédétection à différents niveaux, de l'exploitation à la région.

Les progrès scientifiques importants de ces dernières décennies, notamment dans le domaine de l'aérospatial, ont permis la multiplication des satellites et des capteurs. Grâce à cette avancée, les informations acquises depuis l'espace sont nombreuses et diverses.

Les capteurs à haute résolution spatiale tels que Landsat Enhanced Thematic Mapper ou Spot Haute Résolution Géométrique, permettent généralement de rendre compte convenablement de la structure paysagère et de la répartition spatiale des principaux types de couverture végétale.

Mais, du fait de leur coût assez élevé et de leur faible couverture spatiale, les images haute résolution sont plutôt adaptées à l'observation de la surface terrestre à l'échelle locale ou régionale.

De plus, en zone semi-aride où l'activité culturale se mêle au pastoralisme, l'identification du domaine cultivé en utilisant seulement des images haute résolution est difficile car les cultures et la végétation herbacée ont des caractéristiques spectrales similaires. (Guo et al., 2004)

¹ FAO, Agriculture et changement climatique: le rôle de la FAO, 2 décembre 1997, <http://www.fao.org/Nouvelle/1997/971201-f.htm>

Depuis les années 80, l'utilisation des données de télédétection à basse résolution spatiale (résolution kilométrique) s'est largement développée, car elles permettent d'étudier et surveiller les vastes écosystèmes à une échelle nationale ou continentale. Les images satellitaires à basse résolution permettent d'effectuer un suivi régulier à très faible coût des ressources renouvelables. La perte de précision due à la faible résolution spatiale est compensée par un large champ d'observation et par une excellente résolution temporelle. Une répétitivité journalière est en effet essentielle pour un suivi régulier des ressources, principalement végétales. Cependant, la faible résolution spatiale (kilométrique) de ces données ne permet pas de fournir à elles seules une représentation satisfaisante du paysage. La taille des pixels des images basse résolution est trop grossière, par exemple, pour une identification des cultures à l'échelle parcellaire.

Mais, l'arrivée de nouveaux capteurs moyenne résolution comme MODIS / TERRA avec une résolution spatiale qui peut atteindre 250m, offre de nouvelles possibilités pour l'étude du domaine cultivé. Si sur le plan de la résolution spatiale, le passage d'une résolution kilométrique à une résolution de 250m permet d'envisager la mise en évidence des îlots de parcelles de cultures, cela reste toutefois à évaluer dans le cas de paysages agricoles fragmentés.

Dans ce contexte de diversité des données en télédétection, il semble intéressant d'exploiter au mieux l'ensemble des potentialités des différents capteurs, qui présentent soit une forte résolution temporelle, soit une forte résolution spatiale, afin de bénéficier des avantages de chacun.

Les données satellitaires haute résolution et basse résolution, combinées à des données exogènes (cartes thématiques, statistiques...) peuvent-elles permettre de rendre compte convenablement de la répartition du domaine cultivé à l'échelle du pays?

I.2. Contexte scientifique

I.2.1. Le CIRAD

Ce stage s'est déroulé à la maison de la télédétection à Montpellier qui regroupe au sein de l'unité mixte de recherche TETIS (Territoires, Environnement, télédétection et Informations Spatiales) les équipes de plusieurs organismes de recherche scientifique, dont le CIRAD qui est à l'initiative de cette étude. Le CIRAD est le Centre de coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement. Il est composé de 7 départements dont 2 ont des équipes de recherche à la maison de la télédétection : le département AMIS (amélioration des méthodes pour l'innovation scientifique) et le département TERA (territoires, environnement et acteurs). C'est pour le compte de l'équipe "*Spatialisation et variables agro-environnementales*" du département AMIS que cette étude a été effectuée.

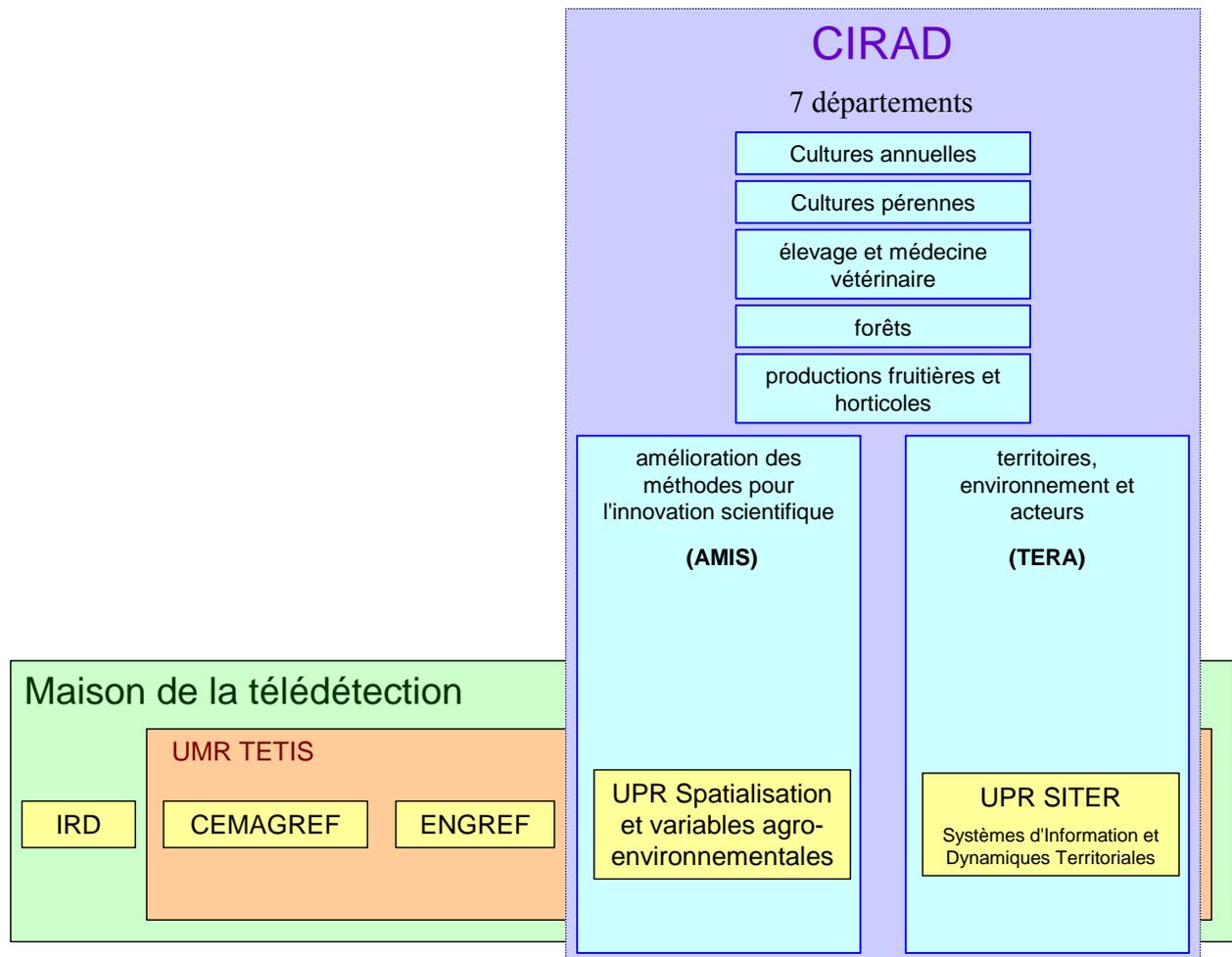


Figure 1 : Organisation du CIRAD et de la Maison de la télédétection

1.2.2. Le projet AMMA (Analyse Multidisciplinaire de la Mousson Africaine)

La présente étude s'insère dans le champ d'un grand programme européen de recherche scientifique sur la variabilité de la mousson africaine et ses impacts sur les ressources humaines : le projet **AMMA**.

Depuis une trentaine d'année, l'Afrique de l'Ouest connaît une sécheresse d'une ampleur sans précédent. Des perturbations de la mousson africaine, source vitale de pluie dans la région, serait à l'origine de cette sécheresse (Communiqué de presse "1^{ère} conférence internationale AMMA, 28 novembre au 2 décembre 2005, Dakar").

La mousson africaine commence en juin et dure jusqu'au mois de septembre. Elle naît de la rencontre entre l'air chaud provenant du Sahara et l'air froid et humide en provenance du golfe de Guinée. Lorsque ces deux phénomènes se rencontrent au dessus du continent africain, l'air frais et humide monte en altitude et passe au dessus de l'air chaud, créant une instabilité orageuse. Ces systèmes orageux se déplacent alors d'est en ouest, arrosant toute la région avant d'arriver sur l'Atlantique, où ils se transforment parfois en cyclones. Pour le Sahel, c'est le seul épisode de pluie de l'année. Toutes ses ressources en eau, végétales naturelles et cultivées en dépendent.

Le problème, c'est que ce phénomène ne se répète pas à l'identique tous les ans. Les conditions climatiques humides des années 1950 et 1960 ont cédé la place à des conditions beaucoup plus sèches, à partir des années 1970 (Conférence de presse AMMA du 18 février 2005).

Les scientifiques soupçonnent le réchauffement des eaux du proche Atlantique et le changement d'état des surfaces continentales (déforestation et utilisation des sols) d'être les causes de ces sécheresses (Le Monde, "Les scientifiques s'unissent pour comprendre la disparition de la mousson africaine", 20 Février 2005). Ces phénomènes ont fini par rendre la mousson africaine particulièrement irrégulière. Or la pénurie d'eau est dramatique pour les agriculteurs. S'ils sèment les cultures pluviales trop tôt, et que les premières pluies n'arrivent pas ou sont suivies d'une pause pluviométrique prolongée, les graines ou les jeunes plants sont perdus.

Dans ce contexte dramatique pour les populations locales, le programme européen **AMMA** (Analyse Multidisciplinaire de la Mousson Africaine) a été lancé en Octobre 2002. Il a pour objectifs :

- de mieux comprendre le fonctionnement de la mousson africaine afin d'améliorer les prévisions météorologiques et climatiques à court et long terme.
- De déterminer les impacts de la variabilité de la mousson sur les ressources en eau, l'agriculture, la sécurité alimentaire, la santé et le développement économique.

C'est dans le cadre de ce deuxième objectif que s'inscrit le sujet de ce stage et plus précisément dans le cadre du volet 3.1 du programme AMMA.

L'objectif principal de ce volet est de mesurer et de prévoir les impacts de la variabilité de la mousson sur les ressources agricoles pour permettre aux agriculteurs d'adapter leurs pratiques agricoles (choix des variétés, dates de semis etc...). Une des étapes préalables à cette analyse est donc de spatialiser le domaine cultivé à une échelle nationale (échelle utilisée pour l'étude des changements climatiques) avec une précision se rapprochant d'une spatialisation à l'échelle régionale. Cette spatialisation peut s'appuyer sur la télédétection, en utilisant des données satellites, comme Modis, Spot Végétation ou Landsat, dont les faibles coûts d'acquisition permettent la mise en place d'outils et une méthodologie utilisable par les partenaires Africains.

II. Objectifs et méthodologie générale

II.1. Objectifs

L'objectif de ce stage est d'établir une méthodologie qui permette d'identifier le plus précisément possible le domaine cultivé du Sénégal à une échelle nationale, à partir d'images satellites. On différenciera le domaine cultivé du domaine agricole qui contrairement au premier prend en compte l'espace pastoral. Le domaine cultivé sera donc considéré comme l'ensemble des cultures et jachères récentes.

Il s'agit donc de proposer et tester des indicateurs spatiaux, spectraux et temporels qui permettent de distinguer les cultures des autres types d'occupation du sol. Plus concrètement, parmi les indicateurs temporels, il s'agit de savoir s'il est possible d'identifier le domaine cultivé à partir du comportement phénologique de la végétation, déduit de la variation temporelle d'un indice de végétation, comme le NDVI (Normalized Difference Vegetation Index).

La méthodologie établie devra être reproductible facilement et à moindre coût car elle doit permettre le suivi régulier des ressources agricoles des pays concernés par la sécheresse et l'insécurité alimentaire.

II.2. Méthodologie générale et déroulement du stage

Comme cela a été évoqué précédemment, il semble important de profiter des potentialités des différents capteurs satellites pour mieux caractériser l'occupation du sol. Dans ce contexte, la méthodologie à établir doit permettre l'utilisation conjointe et la complémentarité des données basse, moyenne et haute résolution spatiale. Ces images pourront aussi être combinées avec des données exogènes (cartes thématiques) pour une meilleure analyse de l'occupation des sols.

La démarche adoptée dans cette étude est celle allant du général au particulier. A chaque échelle de travail, du pays à la micro-région en passant par les grandes zones agro-écologiques, les images satellites les plus appropriées en fonction de la résolution spatiale ont été utilisées.

La démarche proposée pour atteindre les objectifs énoncés précédemment se décompose en plusieurs étapes :

- choix et acquisition des données satellites et cartographiques qui pourront servir à l'identification du domaine cultivé. Ce choix devra s'effectuer en fonction de la facilité et des coûts d'acquisition, et en fonction des potentialités qu'elles offrent pour l'identification du domaine cultivé.

- Traitements et corrections radiométriques, géométriques et atmosphériques des données satellites

- Acquisition des cartes thématiques et autres données utiles

- Organisation des données acquises dans un SIG

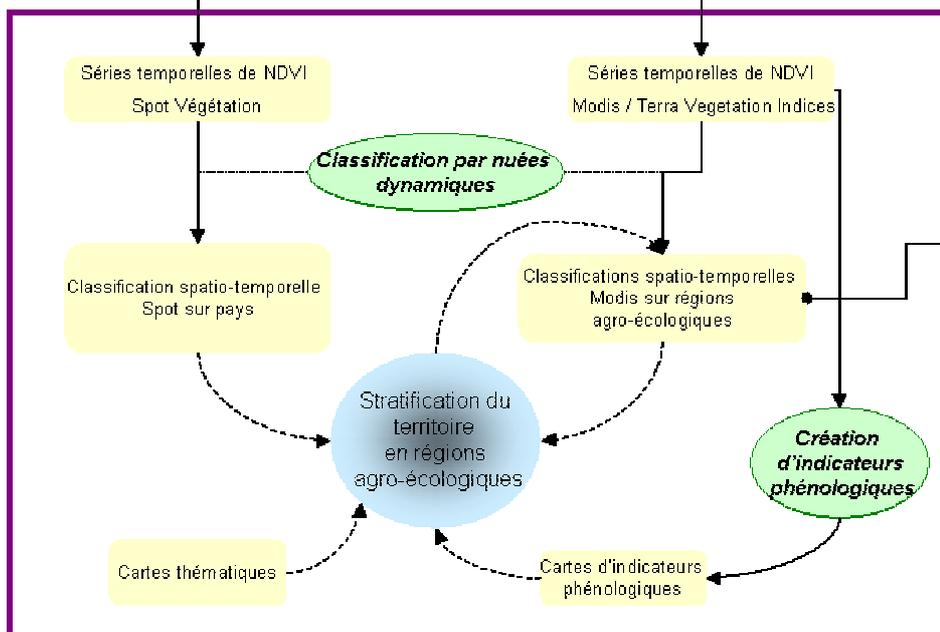
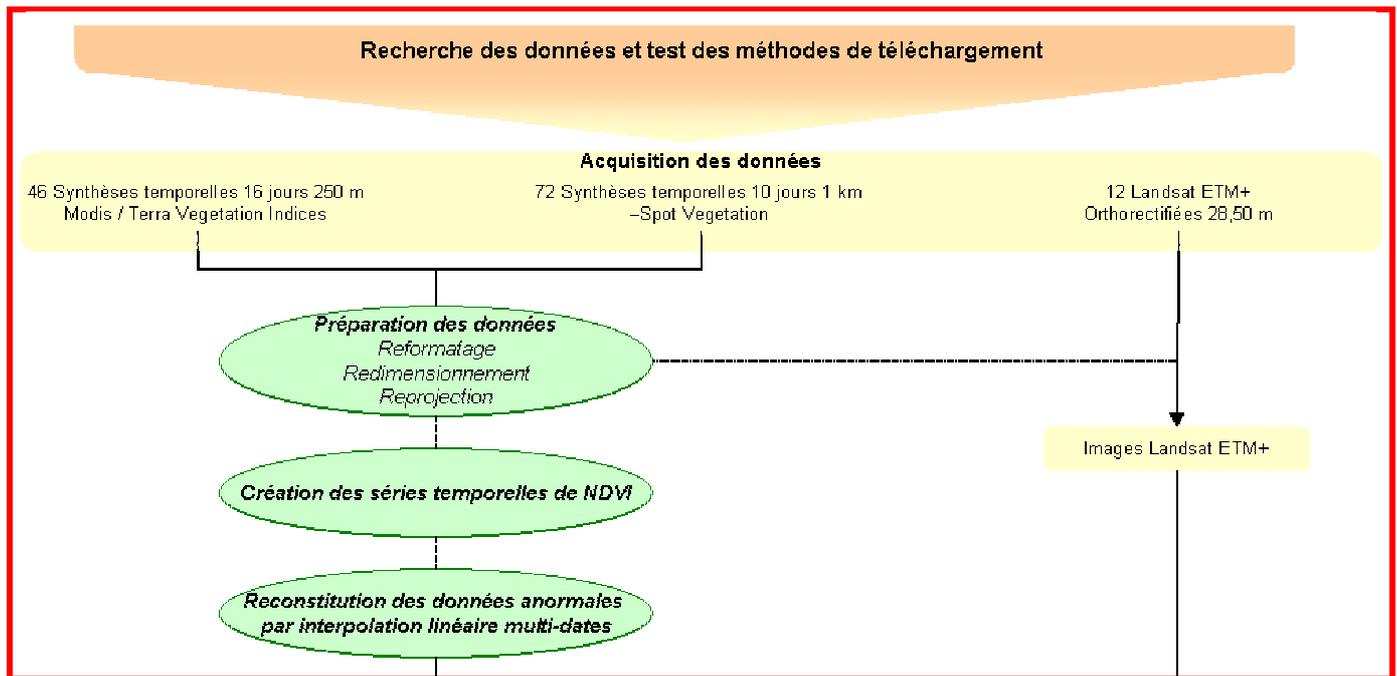
- Stratification du Sénégal en zones agro-écologiques relativement homogènes afin d'adapter les classifications ultérieures à chacune des entités paysagères.

- Test de divers indicateurs spatiaux, spectraux ou temporels sur les zones agro-écologiques
- Analyse et validation des résultats

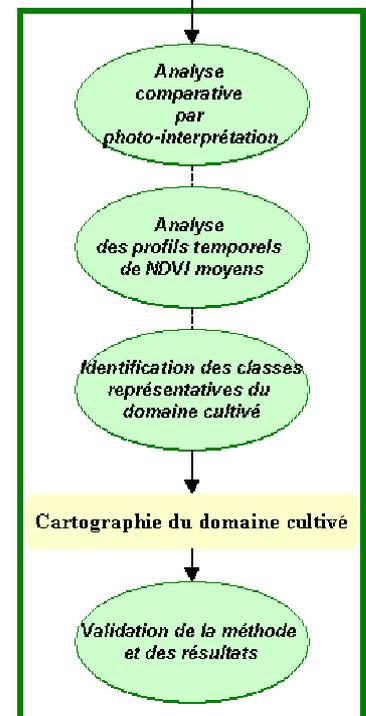
	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Septembre
Bibliographie	■	■					
Tests et choix des données satellittes	■	■					
Acquisition des données cartographiques	■	■					
Acquisition des données satellittes et pré-traitements		■	■				
Création d'un SIG		■	■				
Evaluation et amélioration de la qualité des séries temporelles			■	■	■		
Segmentation du Sénégal en zones agroécologiques					■	■	
Tests des indicateurs spatiaux, spectraux et temporels (classifications,,)					■	■	
Analyses et validation des résultats						■	■
Rédaction du rapport						■	■

Figure 2 : Planigramme du stage

1 . Acquisition et préparation des données



2 . Stratification du territoire en zone agro-écologiques homogènes



3. Identification du domaine cultivé

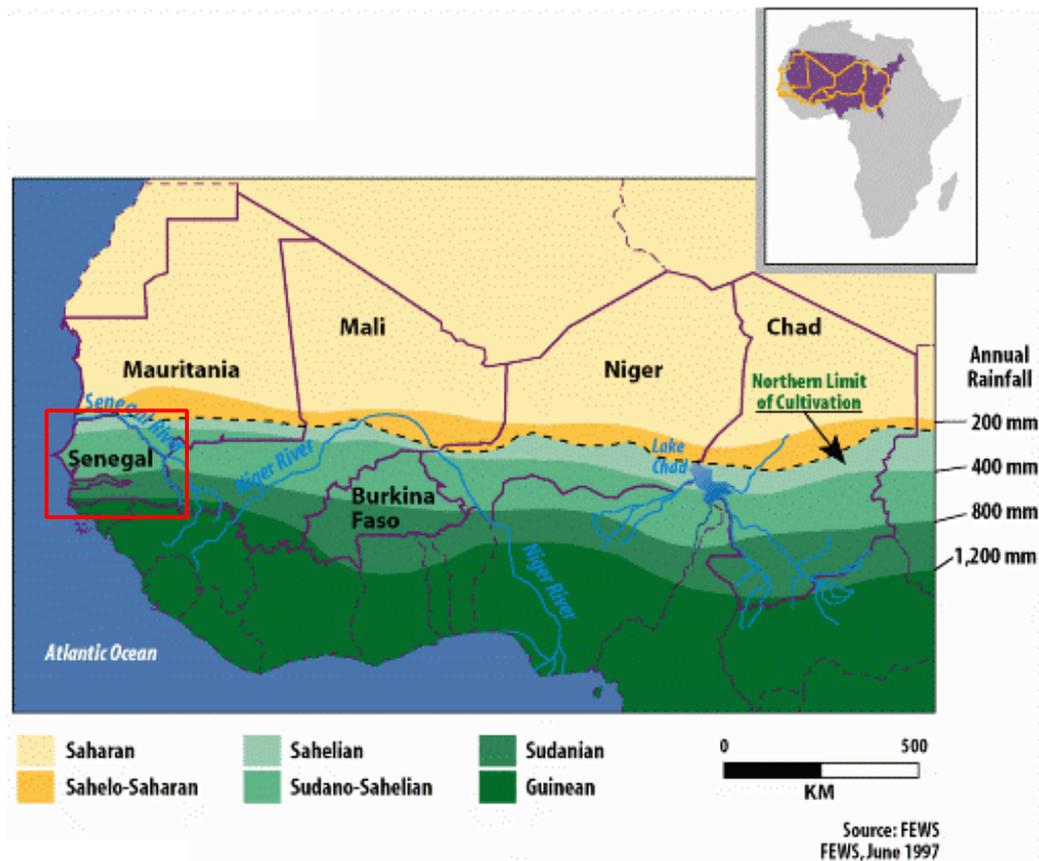
Rapport-gratuit.com

Figure 3: Schéma des traitements

LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES



III. La zone d'étude



Carte 1 : Le Sénégal et le Sahel

Le Sénégal est situé à l'extrême ouest du continent africain, entre 12°30' et 16°30' de latitude nord et 11°30' et 17°30' de longitude ouest. Sa superficie est de 196 722 km².

Il est limité au nord, par la république islamique de Mauritanie, à l'est par le Mali et au sud par les deux Guinées (Conakry et Bissau). Dans la partie méridionale, la Gambie constitue une enclave de 300 km de long sur 32 km de large.

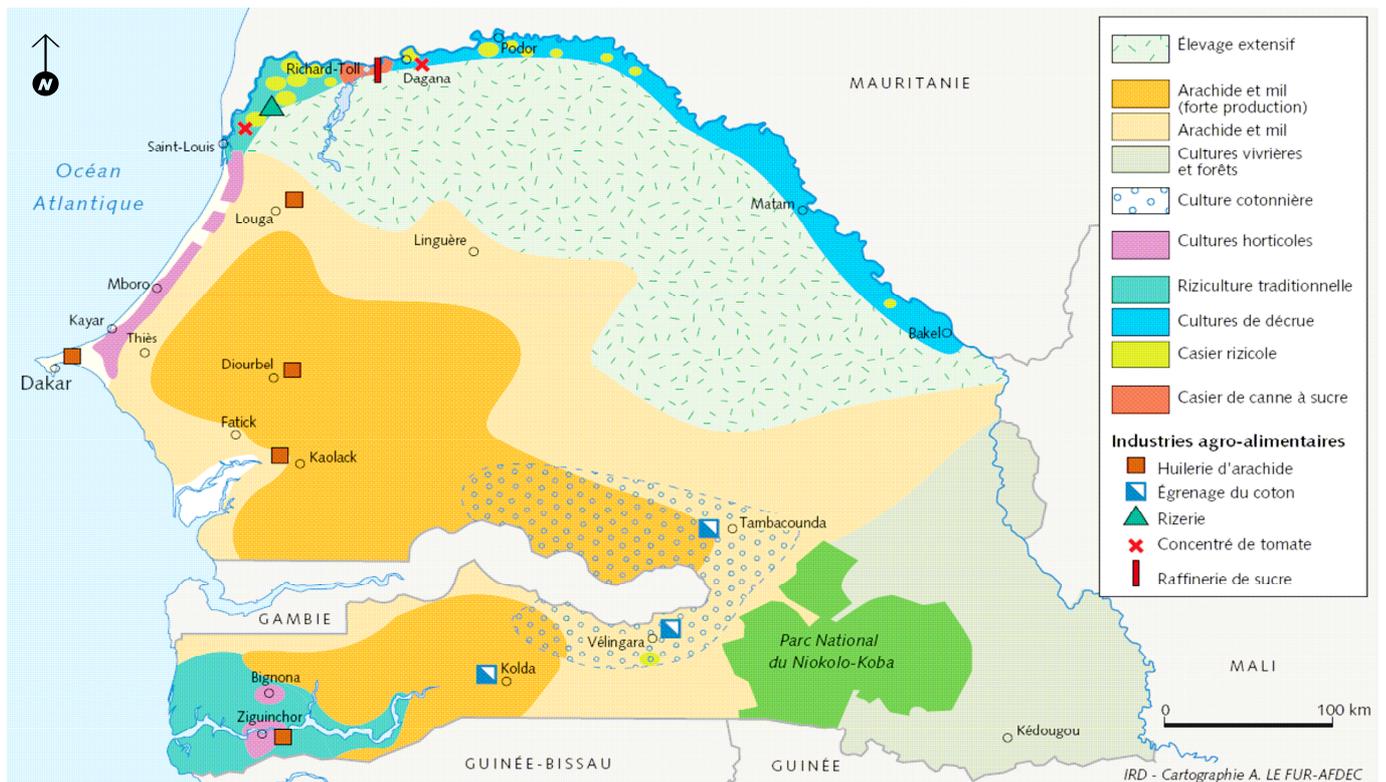
Le Sénégal appartient au domaine climatique soudano-sahélien de type semi-aride tropical marqué par l'alternance de deux saisons principales contrastées : une saison sèche (de novembre à avril) marquée par la prédominance des alizés maritimes et une saison pluvieuse, de mai à octobre, dominée par le flux de la mousson.

La pluviométrie varie fortement suivant un gradient climatique nord / sud ; elle passe de moins de 300 mm au nord à plus de 1000 mm au sud. Mais on assiste à une baisse générale de la pluviométrie depuis les quarante dernières années.

Carte 2 : Relief et pluviométrie du Sénégal



Carte 3 : Espace agricole du Sénégal



Sur l'ensemble du territoire national, l'Evapotranspiration Potentielle (ETP) annuelle varie entre 3200 mm au nord-est et 1900 mm au sud du territoire. Ainsi, avec un rapport Pluviométrie / ETP se situant entre 0.09 et 0.63, le territoire sénégalais est classé dans le domaine des terres arides et semi-arides.

Le pays présente un modelé peu contrasté dans l'ensemble avec une altitude moyenne inférieure à 50m. Les zones accidentées se rencontrent au sud-est du territoire où les points culminants atteignent 150 m. Quatre fleuves s'écoulent vers l'ouest et se jettent dans l'Atlantique : le Sénégal, le Saloum, la Gambie et la Casamance. Ils sont larges et sinueux et forment de larges estuaires à leur embouchure.

Les principaux types de sols rencontrés sont : des sols brun-rouge sub-arides, des sols ferrugineux tropicaux peu ou pas lessivés, des sols ferrugineux tropicaux lessivés, bruns ou beiges, des sols ferralitiques, des vertisols, des sols hydromorphes, des sols halomorphes, des sols peu évolués d'érosion et des sols de formations sableuses littorales.

L'agriculture est l'activité économique dominante du Sénégal. Elle est dominée par les cultures sous pluie dont le cycle végétatif coïncide avec la courte saison des pluies. La distribution et le type des cultures sont étroitement liés à la pluviométrie. Les cultures dans la moitié nord du pays sont en particulier sujettes aux effets de l'irrégularité des pluies et de la sécheresse. En plus des cultures sous pluie, deux autres types d'agriculture traditionnelle sont pratiqués. La première repose sur l'inondation des dépressions à partir du ruissellement. On rencontre ce type dans le sud humide et il correspond à la culture de rizières. La seconde consiste en la culture de décrue essentiellement de la plaine d'inondation du fleuve Sénégal. Une forme non traditionnelle d'agriculture est la culture irriguée. On la rencontre principalement le long du fleuve Sénégal là où l'eau est disponible toute l'année.

Les principales cultures de rente sont l'arachide et le coton que l'on retrouve essentiellement dans le bassin arachidier. Les cultures céréalières, comme le mil et le sorgho, sont pour l'essentiel destinées à la consommation locale. Malgré la grande diversité des cultures, le pays n'a pas encore atteint son autosuffisance alimentaire. Depuis quelques années, la production de riz augmente et remplace peu à peu le mil comme aliment de base.

Chapitre 1 : Acquisition, organisation et pré-traitements des données

La phase d'acquisition, d'organisation et de pré-traitements des données a été une partie importante de cette étude. En effet, au début de ce stage, seules quelques images Spot 5 et quickbird avaient été acquises sur le Sénégal. Dans le contexte de l'étude et pour répondre aux objectifs qui visent à établir une méthode reproductible pour identifier le domaine cultivé, nous nous sommes relativement vite orientés vers l'acquisition de données numériques gratuites. Celles-ci permettent, en effet, une mise à jour annuelle de la cartographie du domaine cultivé à moindre coût. Il s'agissait donc dans cette phase de trouver des données thématiques et satellites adaptées à l'étude du domaine cultivé, de les organiser dans un SIG et de les préparer avant leur analyse.

I. Les cartes thématiques : organisation dans un SIG

Une **carte thématique** est une représentation symbolique de l'espace qui permet de visualiser les données qualitatives et quantitatives associées à un lieu géographique. Ces cartes thématiques sont conçues pour décrire, comprendre et interpréter l'organisation de l'espace (POIDEVIN D., 1999). Dans le contexte de l'étude, les cartes thématiques serviront d'une part à la stratification du territoire Sénégalais en zones agro-écologiques homogènes, et d'autre part à l'analyse et la compréhension des résultats obtenus après les classifications spatio-temporelles. Certaines cartes ne serviront pas dans cette étude mais seront tout de même acquises afin de constituer une base de donnée sur le Sénégal intéressante et réutilisable dans d'autres études par d'autres équipes de recherche. Dans ce contexte de partage de l'information, les données seront organisées dans un SIG et les métadonnées seront créées et gérées dans un catalogue.

I.1. Recherche et acquisition de données thématiques sur le Sénégal

La recherche de cartes thématiques s'est déroulée de deux manières.

Tout d'abord, un inventaire des données disponibles au CIRAD sur le Sénégal a été fait en interrogeant les différents services. Cette première recherche a été peu fructueuse car la plupart des données du Sénégal acquises par le CIRAD sont des cartes papier, souvent anciennes. Parmi ces cartes, seules deux ou trois ont été retenues. Elles ne seront pas numérisées mais serviront d'aide visuelle à l'analyse du territoire. Quelques données numériques ont été trouvées mais l'absence de sources ou de légende n'a pas permis de les conserver.

La recherche des données thématiques s'est donc vite orientée vers la plus grande source d'information au monde, internet.

Essentiellement deux sites ont permis le téléchargement de données SIG gratuites sur le Sénégal :

<http://www.roselt-oss.org/accueil.php>

<http://www.ibimet.cnr.it/Case/ap3a/index.htm>

Au total, trente cinq couches d'informations concernant l'agriculture, le climat, la démographie, l'environnement, la géologie, l'hydrographie, le relief ou encore les infrastructures ont été téléchargées. Seules les données fiables, provenant de sources sûres et dont la structure est bien expliquée, ont été retenues.

I.2. Tri, organisation et constitution des métadonnées

Les données thématiques ont ensuite été trier et organiser dans ArcCatalog© (cf. annexe 1). ArcCatlog© est une interface-logicielle d' ArcGis© qui permet la gestion et l'organisation des bases de données et l'enregistrement et la visualisation des métadonnées.

Chaque couche d'information a donc été placée dans un dossier thématique lui correspondant (ex. « agriculture »).

Puis, les métadonnées ont été créés avec l'outil Export MDWeb© installé dans ArcCatalog© (cf. annexe 2). MDWeb est un outil mis à disposition de la communauté sous licence libre CeCill Il permet la constitution de catalogues de données. Export MDWeb© est une extension ArcGIS© 8.x qui permet de générer automatiquement des métadonnées au format XML ISO 19115 conforme aux gabarits standards de MDweb©. Le choix de cet outil pour la création et la gestion des métadonnées a été conforté par le projet en cours de développement au CIRAD qui consiste à mettre en ligne les données acquises et produites par le laboratoire de télédétection. Les métadonnées seront alors gérées dans un catalogue crée avec MDWeb© et devront être à la norme Iso 19115.

II. Les images satellites

II.1. Choix du type d'image satellite à acquérir

Nous avons choisi les images satellites en fonction de leurs potentialités pour l'identification du domaine cultivé à une échelle nationale et en fonction de certains critères pratiques tels que le coût ou la facilité d'acquisition.

Il nous a d'abord semblé nécessaire d'acquérir des images à basse résolution spatiale et à haute répétitivité pour exploiter la potentialité de distinction des cultures à partir de l'évolution phénologique. Il existe plusieurs capteurs produisant ce type d'images et adaptés à l'observation des surfaces terrestres : NOAA-AVHRR, SPOT-VEGETATION, ENVISAT-MERIS, TERRA-MODIS.

Notre choix s'est rapidement porté vers les images issues du capteur **Modis/Terra** qui dispose de caractéristiques techniques beaucoup plus intéressantes que ces concurrents. En effet,

Modis/Terra produit des images qui peuvent atteindre la résolution spatiale de 250m, contre 1km pour ses concurrents, en gardant une résolution temporelle journalière. De plus, ce capteur propose comme produits les indices de végétation NDVI et EVI.

Nous avons aussi choisi d'acquérir des séries temporelles **Spot Végétation** car leur résolution spatiale plus grande (1km) nous permettra d'analyser l'activité végétale à une plus grande échelle. Un des avantages de Spot/végétation est de fournir des compositions décennales (MVC) pratiquement dépourvues de nuages.

Ces deux types de données ont surtout l'avantage d'être disponibles gratuitement sur internet.

En ce qui concerne les images haute résolution, nous avons choisi d'acquérir des images **Landsat ETM+ orthorectifiées** car elles sont disponibles gratuitement sur internet.

II.1.1. Les données Modis Terras Végétation Indices 250m

II.1.1.1. Le système MODIS/TERRA

Lancé le 18 décembre 1999 par la NASA, le satellite américain TERRA a commencé à acquérir des images le 24 février 2000. Il se trouve sur une orbite héliosynchrone polaire à 705 km de la surface de la Terre. La mission de TERRA est orientée sur l'étude de l'évolution de la végétation et l'extension des déserts. Pour cela, il propose une offre variée de capteurs ayant des caractéristiques spécifiques afin de permettre l'observation des différents systèmes terrestres (atmosphère, surface terrestre, océans...).

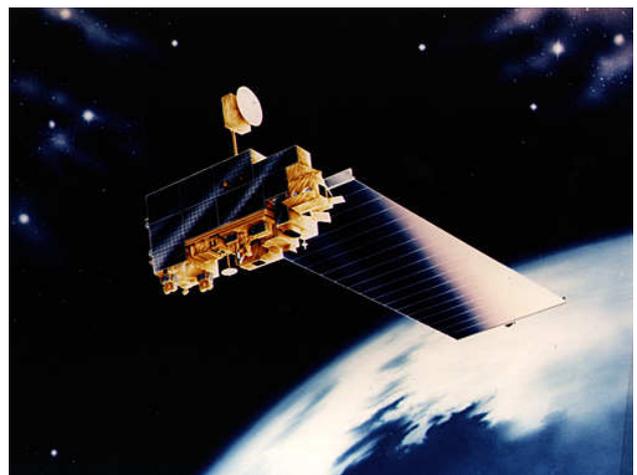


Figure 4 : Le satellite TERRA

Avec son couloir de visée d'une largeur de 2330 km, le capteur MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) embarqué sur TERRA et AQUA permet de voir chaque point de la Terre tous les 1 à 2 jours dans 36 bandes spectrales de 0,4 à 14,4 μm .

Il fournit des informations sur la température de surface des terres et des océans, la productivité primaire, la couverture terrestre, les nuages, les aérosols, la vapeur d'eau, et les feux.

La liste des produits proposée par ce capteur est grande et variée (cf. Annexe 3). Selon les produits, la résolution spatiale varie de 250m à 1km au nadir.

II.1.1.2. Les produits "Vegetation Indices"

Parmi les produits proposés par le capteur MODIS, nous avons choisi les indices de végétation. Deux indices de végétation sont produits par le capteur Modis : le NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) et l'EVI (Enhanced Vegetation Index). Ces deux indices sont calculés à partir des produits de réflectance terrestre de base (MODIS Terra surface réflectances) qui ont été corrigés des effets atmosphériques (dispersion moléculaire, absorption de l'ozone et des aérosols).

Quatre produits "Vegetation Indices" sont disponibles pour le capteur Modis/Terra :

- Vegetation Indices 16-Day L3 Global 500m
- Vegetation Indices 16-Day L3 Global 1km
- Vegetation Indices Monthly L3 Global 1km
- Vegetation Indices 16-Day L3 Global 250m

C'est ce dernier produit " Vegetation Indices 16-Day L3 Global 250m SIN Grid " que nous avons choisi pour notre étude car c'est celui qui offre la meilleure résolution spatiale.

Aire = ~ 10°x 10°lat/long
Dimensions de l'image = 4800x4800 lignes/colonnes
Taille moyenne du fichier = 507 MB
Résolution spatiale = 250 meters
Projection = Sinusoidal
Format = HDF-EOS
Nombre de paramètres = 11

**Tableau 1 : Caractéristiques du produit
" Vegetation Indices 16-Day L3 Global 250m SIN Grid"**

Les données de ce produit sont rassemblées dans un fichier HDF-EOS (Hierarchical Data Format - Earth Observing System) et sont dans la projection Sinusoïdal (SIN). Pour chaque fichier HDF-EOS correspondant à une synthèse temporelle de 16 jours, on a 11 paramètres différents qui sont présentés dans le tableau 2.

Tableau 2 : Détail des paramètres contenus dans un fichier HDF "Vegetation Indices 16-Day L3 Global 250m SIN Grid"

Nom	Résolution spatiale	Largeur spectrale (nm)	Unité	Type de données et nombre de	Valeur du fond	Fourchette de valeurs	Facteur de division
Synthèse temporelle NDVI - 16 jours	250 m	-	NDVI	Entier codé sur 16 bits	-3000	-2000 - 10000	10000
Synthèse temporelle EVI - 16 jours	250 m*	-	EVI	Entier codé sur 16 bits	-3000	-2000 - 10000	10000
Qualité du NDVI - 16 jours	250 m	-	Bit	Entier codé sur 16 bits	65535	0 - 65536	-
Qualité du EVI - 16 jours	250 m*	-	Bit	Entier codé sur 16 bits	65535	0 - 65536	-
Réflectance de la bande rouge (bande 1) - 16 jours	250 m	620 - 670 nm	Réflectance	Entier codé sur 16 bits	-1000	0 - 10000	10000
Réflectance de la bande PIR (bande 2) - 16 jours	250 m	841- 876	Réflectance	Entier codé sur 16 bits	-1000	0 - 10000	10000
Réflectance de la bande bleue (bande 3) - 16 jours	250 m*	459 - 479	Réflectance	Entier codé sur 16 bits	-1000	0 - 10000	10000
Réflectance de la bande MIR (bande 7) - 16 jours	250 m*	2105- 2155	Réflectance	Entier codé sur 16 bits	-1000	0 - 10000	10000
Moyenne de l'angle zénithal pour chaque pixel - 16 jours	250 m	-	Degré	Entier codé sur 16 bits	-10000	-9000 - 9000	100
Moyenne de l'angle solaire pour chaque pixel - 16 jours	250 m	-	Degré	Entier codé sur 16 bits	-10000	-9000 - 9000	100
Moyenne de l'angle azimutal relatif pour chaque pixel - 16 jours	250 m	-	Degré	Entier codé sur 16 bits	-4000	-3600 - 3600	10

* Rééchantillonnage à 250 m à partir d'une résolution spatiale originale de 500m

Les données du NDVI et de l'EVI sont codées sur 16 bits. Pour passer des valeurs radiométriques (comptes numériques) aux grandeurs physiques (NDVI ou réflectances de surface), il faut diviser par 10000 les comptes numériques.

Par contre, il est important de préciser que l'EVI n'a pas une véritable résolution spatiale à 250m. En effet, l'utilisation de la bande bleue, disponible uniquement à 500 m, dans l'algorithme de calcul abaisse la résolution spatiale maximale de cet indice à 500 m. Cependant, cet indice est également disponible à une résolution de 250 m suite à un rééchantillonnage.

Suite à ce constat et dans le contexte de notre travail, il nous a semblé préférable de conserver un indice connu et utilisé par l'ensemble de la communauté scientifique. En effet, la connaissance des défauts et qualités d'un indice testé de longue date garantit une meilleure comparabilité. C'est donc le NDVI qui a été utilisé dans cette étude.

L'indice de végétation à différence normalisée ou NDVI a été proposé par Rouse et al. en 1973. Sa formule est la suivante :

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

ou PIR = Proche Infrarouge

R = Rouge

Les valeurs théoriques de cet indice sont comprises entre +1 et -1. Son pouvoir séparateur est appréciable : les nuages, l'eau et la neige ont une plus grande réflectance dans le visible que dans l'infrarouge, leur NDVI est donc négatif et on peut ainsi les isoler aisément. Les roches et sols nus, par contre, ont une réflectance semblable dans le visible et le proche infrarouge, leurs indices

varient de part et d'autres de la valeur zéro. Le NDVI de la végétation évolue entre 0,1 et 0,9, la réflectance dans le proche infrarouge étant nettement supérieure à celle du visible.

Le NDVI est corrélé à la production végétale. La quantité de biomasse herbacée produite au cours de la saison des pluies reflète l'activité végétale. Celle-ci est liée à la quantité totale de précipitations, à sa distribution temporelle, mais aussi au type de sol et aux espèces présentes.

Par contre, le NDVI varie en fonction de nombreux facteurs dont il est parfois difficile d'estimer l'importance relative. Parmi ceux-ci, on retiendra les facteurs liés à la plante, à son environnement (sols, pente), aux conditions de prise de vue (angle zénithal solaire et angle de prise de vue), au vieillissement des capteurs et à l'atmosphère. Le NDVI est très sensible aux conditions atmosphériques et aux variations angulaires (Girard M-C et Girard C). De plus, il a tendance à saturer pour les couverts de végétation très denses (Huete et al., 1997).

Mais la synthèse temporelle permet de minimiser les inconvénients du NDVI.

II.1.1.3. Les synthèses temporelles

La synthèse temporelle consiste à extraire une seule valeur par pixel parmi les multiples valeurs du même pixel enregistrées sur une période de seize jours.

La synthèse temporelle permet de corriger les réflectances des effets directionnels et des éventuels résidus de l'atmosphère, en particulier les nuages.

Les synthèses temporelles de 16 jours des indices de végétation Modis sont élaborées à partir d'un algorithme particulier. Cet algorithme a besoin de plusieurs observations pour générer une composition. Le chevauchement des fauchées du capteur permet d'enregistrer plusieurs enregistrements par jour pour un même pixel, quatre au maximum. Donc en théorie, sur une période de 16 jours, on peut obtenir au maximum soixante quatre enregistrements. Cependant, en réalité, la présence de nuages et la couverture spatiale réel du capteur, font que ce nombre d'enregistrement varie entre soixante quatre et zéro.

La première étape de l'algorithme consiste à filtrer les données en fonction de leur qualité, des nuages et de la géométrie de visée. Seuls les pixels de bonne qualité, sans nuages, sont alors retenus pour la composition. Le nombre de valeurs acceptables sur les 16 jours, pour chaque pixel, est généralement inférieurs à 10 et varie souvent entre 1 et 5. Il faut ensuite appliquer une méthode permettant d'extraire une seule valeur par pixel. La méthode alors utilisée dépend du nombre de pixels retenus après le filtre de qualité :

- Si aucune des valeurs du pixel enregistrées sur les 16 jours n'est considérée comme acceptable, alors la méthode utilisée est la **MVC Maximum Value Composite**.

Cette méthode consiste à attribuer au pixel de la synthèse sa plus forte valeur enregistrée sur les 16 jours. Cela permet de réduire considérablement les effets dus aux perturbations

atmosphériques. L'inconvénient de cette méthode est que chaque valeur du NDVI retenue se trouve dans une configuration angulaire a priori différente des autres. Or les réflectances, et donc le NDVI, dépendent de la configuration angulaire. Il devient alors difficile de comparer les NDVI pour chaque synthèse temporelle.

- Si il n'y a qu'un seul pixel de bonne qualité alors c'est celui ci qui sera retenu pour la synthèse.

- Si le nombre de pixels de bonne qualité est compris entre 1 et 5, la méthode de synthèse utilisée est la **CV-MVC (constraint-view angle Maximum Value Composite)**. Parmi les "bons" enregistrements, les 3 observations ayant la plus forte valeur de NDVI sont comparées et l'observation ayant le plus petit angle de visée et étant plus proche du nadir est choisie pour la synthèse.

- Enfin, si le nombre de pixels de bonne qualité est supérieur à 5, la méthode utilisée est la **BRDF -C (Bidirectional reflectance distribution function composite)**. Toutes les valeurs retenues après le filtre sont utilisées pour interpoler la valeur de réflectance au nadir. Cela permet d'obtenir des valeurs ayant les mêmes configurations angulaires (au nadir).

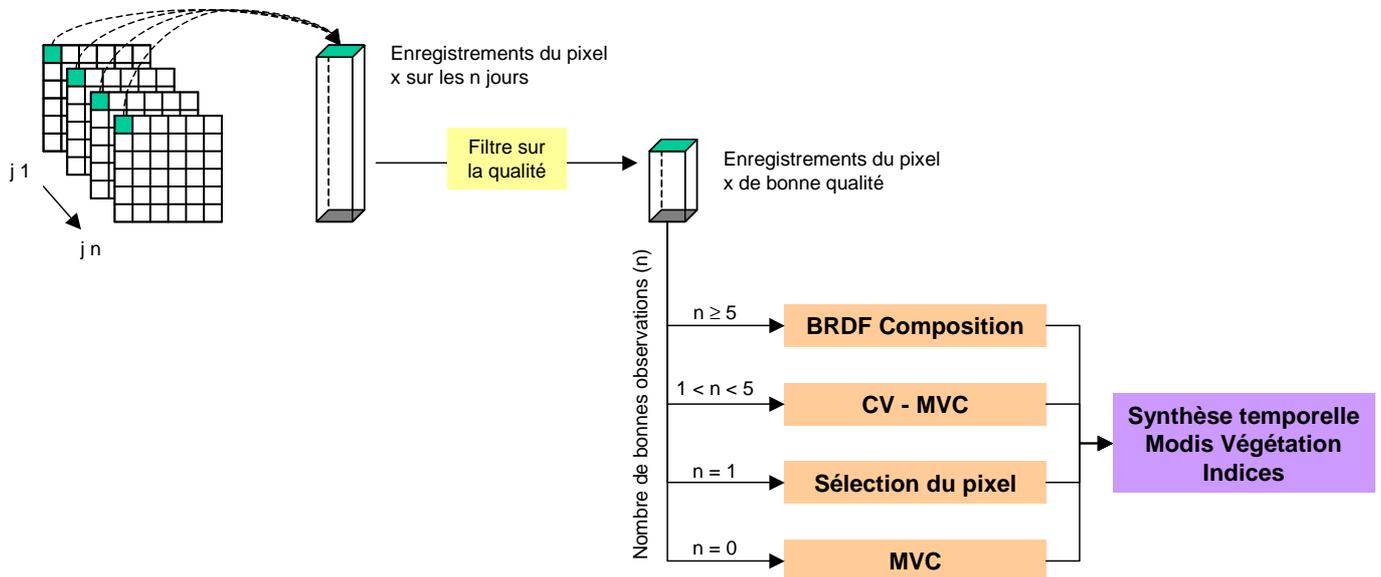


Figure 5 : Algorithme pour la constitution des synthèse temporelle MODIS Vegetation Indices

II.1.2. Les données Spot Végétation 1km

II.1.2.1. Le système Spot Vegetation

Le programme VEGETATION, lancé sur l'initiative du CNES (Centre National d'Etudes spatiales), a été développé conjointement par la France, la commission européenne, la Belgique, l'Italie et la Suède.



Le premier instrument VEGETATION, opérationnel depuis le 1er mars 1999 a été placé sur le satellite Spot 4 lors de son lancement en mars 1998. Il complète les instruments classiques HRVIR (Haute Résolution dans le Visible et l'Infrarouge). Le capteur VEGETATION 2 est embarqué sur le satellite Spot 5 lancé en mai 2002 et a commencé à acquérir des images le 1er mars 2003.

Figure 6 : Le satellite Spot 5

Ces deux instruments de télédétection spatiale sont placés sur le même plan orbital à 830 km d'altitude. Ils auscultent de façon continue la surface terrestre dans quatre bandes spectrales (bleu, rouge, proche infrarouge, moyen infrarouge). Les prises de vues avec une fauchée de 2 250 km, offrent une résolution constante de 1 150 m. Leurs données sont captées par la station suédoise de Kiruna, puis transmises au Centre de Traitement des Images Végétation (CTIV) au Vito (Vlaamse Instelling voor Technologisch Onderzoek), à Mol (Belgique), où elles sont traitées et archivées.

Le champ de leurs applications est vaste. Il couvre l'occupation et l'utilisation des sols, l'étude des changements de la biosphère, l'interactivité entre climat et végétation, la gestion de l'environnement, l'évaluation des feux de forêts et des zones de brûlis, le suivi des ressources en eau, la surveillance des risques d'inondations, l'évaluation des dommages au couvert végétal...

II.1.2.2. Les produits VEGETATION

Les données acquises par le capteur VEGETATION subissent des pré-traitements géométriques et radiométriques avant d'être distribuées sous plusieurs formes :

- **Produit VGT-P (P: physical):** Les images corrigées géométriquement et radiométriquement sont accompagnées d'un ensemble de données physiques sur la calibration, les propriétés géométriques, les paramètres atmosphériques. Les comptes numériques des pixels représentent la réflectance apparente du sol au sommet de l'atmosphère, c'est ce que l'on appelle la réflectance TOA (Top of Atmosphère). Ces

produits sont destinés à des équipes de recherche ayant développé des outils et des méthodes spécifiques pour utiliser ces données.

- **Produit VGT-S (S = synthesis):** Ce sont des synthèses temporelles constituées avec la méthode MVC (Maximum Value Composite), c'est à dire que chaque pixels de la synthèse correspond à la plus forte valeur de NDVI enregistrée pour le même pixel au cours des 10 jours. Les synthèses sont donc, au final, des "mosaïques temporelle" où la radiométrie d'un pixel et de son voisin peuvent avoir été acquises à des dates différentes. Les images sont corrigées des effets atmosphériques et le compte numérique de chaque pixel représente donc en théorie la réflectance au sol.

Il existe deux types de produits S :

- Produit VGT-S1 : synthèse journalière avec méthode MVC
- Produit VGT-S10 : synthèse décadaire (10 jours) avec méthode MVC
- **Produit VGT-D10:** Ce sont des synthèse décadaire (10 jours) constituées avec la méthode BDC (BiDirectional Compositing). Cette méthode consiste à créer une fenêtre temporelle glissante qui varie en longueur de sorte à toujours collecter un nombre constant de données sans nuages. Pour chaque pixel, il s'agit donc de collecter les 12 dernières données enregistrées sans nuages pour ce même pixel et d'appliquer pour chacune de ces valeurs le modèle BRDF qui consiste à interpoler la réflectance au nadir. Les réflectances ainsi obtenues sont moyennées pour obtenir une seule valeur décadaire. (Duchemin et al., 2000)

C'est ce dernier type de produit, les synthèses temporelles VGT-D10, qui a été choisie pour l'étude car la méthode BDC présente plusieurs avantages par rapport à la méthode MVC : moins de bruits sur les profils temporels grâce à une meilleure correction des effets directionnels et comparaisons entre les différentes dates plus faciles car les données sont dans la même configuration angulaire (au nadir). Ce produit est téléchargeable sous forme de dossier zippés contenant les décades des 5 canaux (Bleu, Rouge, PIR, MIR et NDVI) et des fichiers annexes tels que le masque nuageux ou encore les paramètres utilisés pour la fonction de correction de la BDC (cf. tableau 3). Certains fichiers seront détaillés plus précisément par la suite.

Tableau 3 : Détails des paramètres contenus dans un fichier zip "Spot VGT-D10"

Code	Nom	Résolution spatiale	Largeur spectrale (nm)	Type de données et	Valeur du fond	Fourchette de valeurs	Format
PHYS_VOL	Description des fichiers	-	-	-	-	-	TXT
LOG	Données physiques (projection, corrections, algorithmes etc,,)	-	-	-	-	-	TXT
RIG	Description du Copyright	-	-	-	-	-	TXT
BO	Réflectance de la bande bleu (B0) - 10 jours	1km	0.43 - 0.47 μm	Entier codé sur 16 bits	0	0 - 1500	HDF
B2	Réflectance de la bande Rouge (B2) - 10 jours	1km	0.61 - 0.68 μm	Entier codé sur 16 bits	0	0 - 1500	HDF
B3	Réflectance de la bande PIR (B3) - 10 jours	1km	0.78 - 0.89 μm	Entier codé sur 16 bits	0	0 - 1500	HDF
MIR	Réflectance de la bande MIR (MIR) - 10 jours	1km	1.58 - 1.75 μm	Entier codé sur 16 bits	0	0 - 1500	HDF
NDV	Synthèse temporelle NDVI (NDV) - 10 jours	1km	-	Entier codé sur 8 bits	0	0 - 1500	HDF
BSM	BDC Status Map - 10 jours Qualité du modèle BRDF, neige/glace, nuages/ombres, terre/eau	1km	-	Entier codé sur 8 bits	0	0 - 256	HDF
SZN	Angle solaire zénithale normalisé utilisé pour la fonction de correction de la BDC	1km	-	Entier codé sur 8 bits	-	0 - 256	HDF
TP	valeur moyenne de l'épaisseur optique sur la période utilisée pour la BDC	1km	-	Entier codé sur 8 bits	-	0 - 256	HDF
Kxx	Coefficients k0, k1, k2 utilisés pour la fonction de correction de la BDC	1km	-	Entier codé sur 8 bits	-	0 - 256	HDF
QL	Quick look	32 km	-	-	-	-	TIF

II.1.3. Les données Landsat ETM+

II.1.3.1. Le système Landsat ETM+

Le capteur ETM+ est embarqué sur le satellite Landsat 7, lancé en avril 1999. Il évolue sur une orbite héliosynchrone à 705 km d'altitude. Il lui faut 98 minutes et 52 secondes pour faire le tour de la terre, si bien qu'il décrit 14,5 révolutions par jour. Un cycle orbital complet dure 16 jours.

Le capteur ETM+ dispose d'un champ d'observation total (ou "fauchée") de 185 km de large. Il fournit la meilleure qualité des images Landsat avec une résolution spatiale de 30 m dans 7 canaux du visible et 15 m dans le panchromatique.



II.1.3.2. Les images Landsat ETM+ Orthorectifiées

Les données Landsat ETM+ Orthorectifiées sont des données de bonne qualité, relativement dépourvues de nuages. Ces images sont produites par le programme commercial de télédétection de la NASA qui a pour objectif de mettre à disposition des utilisateurs des images à haute résolution de qualité. Les images sont corrigées géométriquement en prenant en compte le relief. Cette technique améliore considérablement la qualité du géoréférencement.

Nom	Résolution spatiale	Largeur spectrale (nm)	Format
Canal Bleu - B10	28.5 m	0.45-0.52	Géotiff
Canal Vert - B20	28.5 m	0.53-0.61	Géotiff
Canal Rouge - B30	28.5 m	0.63-0.69	Géotiff
Canal PIR - B40	28.5 m	0.78-0.90	Géotiff
Canal MIR - B50	28.5 m	1.55-1.75	Géotiff
Canal IRT _h low gain - B61	28.5 m	10.40-12.50	Géotiff
Canal IRT _h high gain - B62	28.5 m		Géotiff
Canal IR lointain - B70	28.5 m	2.09-2.35	Géotiff
Canal panchro - B80	15	.52-.90	Géotiff
Appercu grand (browse)	-	-	Jpg
Appercu miniature (preview)	-	-	Jpg
Metadonnées (met)	-	-	met

Tableau 4: Détails des paramètres contenus dans un fichier zip "Landsat ETM+ Orthorectifiée"

II.2. Acquisition et préparation des images satellite

Les possibilités d'acquérir sur Internet des images satellites gratuites sont multiples. Mais selon les sites proposant ces solutions, l'acquisition des images est plus ou moins complexe.

Les critères établis pour le choix des sites de téléchargement ont été les suivants :

- **disponibilité des données:** les produits sélectionnés pour chaque type de capteur (ex: Spot VGT D10) doivent être disponibles sur une période de 2 ans environ entre janvier 2000 et 2006.

- **facilité d'acquisition:** l'interface d'accès aux données doit être compréhensible et facile à utiliser

- **Format, projection et extension spatiale:** pour l'utilisation et l'intégration des données dans un SIG, les images doivent être en UTM WGS84 Zone 28N, projection utilisée pour le Sénégal, avoir une extension spatiale couvrant au moins le Sénégal et être dans un format exploitable facilement, type géotiff ou envi. Nous avons donc choisi les sites proposant soit la transformation des images dans ces paramètres avant téléchargement, soit la mise à disposition d'un outil de transformation utilisable après acquisition des images.

Le choix des différents sites de téléchargement et les paramètres d'acquisition sont présentés dans le tableau 5.

	Synthèse temporelle	Résolution spatiale	Adresse de téléchargement	Format de téléchargement	Projection de téléchargement	Canaux téléchargés							Dates téléchargées (nombre d'images)	Outil de conversion utilisé	Format après conversion	Projection après conversion	Extension spatiale après conversion	Autres traitements		
						B	V	R	P	M	H	E							Qualité	
Spot végétation D10 1km	10 jours	982,14 m	http://free.vgt.vito.be/	HDF-EOS	Goode Homolosine	x		x	x	x	x			x	Du 01/03/2004 au 21/02/2006	VGExtract	ENVI (pb avec géotiff)	Géographique Lat/Lon WGS84		<ul style="list-style-type: none"> Changements des coordonnées des coins supérieurs gauche dans les fichiers entêtes car pb avec VGExtract Assemblage des canaux (Layer Stacking dans ENVI) Reprojection en UTM WGS84 Zone 28N
Modis Vegetation Indices 16 j 250 m	16 jours	231,65 m	http://edcimswww.cr.usgs.gov/pub/imswelcome/	HDF-EOS	Sinusoidale	x		x	x	x	x			x	Du 21/03/2004 au 22/03/2005 (23 images)	MRT (Modis Reprojection Tool)	Géotiff	UTM WGS84 Zone 28 N		<ul style="list-style-type: none"> Redimensionnement avec comme image de référence une image Modis Vegetation Indice issue du Data Pool Assemblage des canaux (Layer Stacking dans ENVI)
	16 jours	231,65 m	http://pdaac.usgs.gov/datapool/datapool.asp	Géotiff	UTM WGS84 Zone 28 N	x		x	x	x	x			x	Du 07/04/2005 au 06/03/2006 (23 images)	Aucun	Géotiff	UTM WGS84 Zone 28 N		<ul style="list-style-type: none"> Assemblage des canaux (Layer Stacking dans ENVI)
Landsat Orthorectified ETM+ 30m	-	28,50 m	http://glovis.usgs.gov/	Géotiff	UTM WGS84 Zone 28 N	x	x	x	x	x					12 images Septembre, Octobre, Novembre 1999, 2000 et 2001	Aucun	Géotiff	UTM WGS84 Zone 28 N		<ul style="list-style-type: none"> Création du NDVI pour chaque image Assemblage des canaux (Layer Stacking dans ENVI)

Tableau 5 : Sites et paramètres de téléchargement

II.2.1. Acquisition, reprojection, reformatage et redimensionnement

- Quarante six synthèses temporelles d'indices de végétation Modis ont été acquises gratuitement sur Internet, ce qui correspond à une période de 2 ans allant du **21/03/2004 au 06/03/2006** (cf. tableau 5)

Pour des raisons de disponibilité des données, les images ont été téléchargées sur deux sites Internet différents :

- <http://edcimswww.cr.usgs.gov/pub/imswelcome/>
- <http://lpdaac.usgs.gov/datapool/datapool.asp>

Afin de pouvoir lire le format natif des données MODIS et de les projeter dans une projection standard telle que UTM WGS84 Zone 28N (projection utilisée pour le Sénégal), le logiciel MODIS Reprojection Tool (MRT), disponible gratuitement sur le site du lpdaac, a été utilisé. Cet outil a aussi permis de découper spatialement les images Modis.

Toutes les étapes du téléchargement et de l'utilisation du MRT sont détaillées dans le cahier annexe A " Note sur le téléchargement et l'utilisation d'images basse résolution gratuite : Modis / Terra et Spot Végétation ".

- Soixante douze images décennales Spot Végétation ont été acquises, soit l'équivalent d'une période de 2 ans, **du 01/03/2004 au 21/02/2006** (cf. tableau 5). Elles ont été téléchargées gratuitement à partir du site <http://free.vgt.vito.be/>.

La préparation des données tel que le reformatage, la reprojection, la sélection des canaux ou encore la création d'une région d'intérêt s'est réalisée avec l'outil VGTEExtract qui est un outil gratuit créé par VITO, spécialement pour les données VEGETATION. Cet outil est disponible à l'adresse suivante : <http://www.vgt4africa.org/VGTEExtract.do>

Les différentes étapes du téléchargement et de la préparation des données sont détaillés dans le cahier annexe A " Note sur le téléchargement et l'utilisation d'images basse résolution gratuite : Modis / Terra et Spot Végétation ".

- Douze images Landsat ETM+ Orthorectified ont été téléchargées pour couvrir entièrement le Sénégal. Elles ont été téléchargées directement en géotiff dans la projection UTM WGS84 Zone 28N sur le site <http://glovis.usgs.gov/> . Aucune conversion de format ou de projection n'a donc été nécessaire. Leurs dates de prise de vue sont septembre, octobre, novembre 1999, 2000 et 2001.

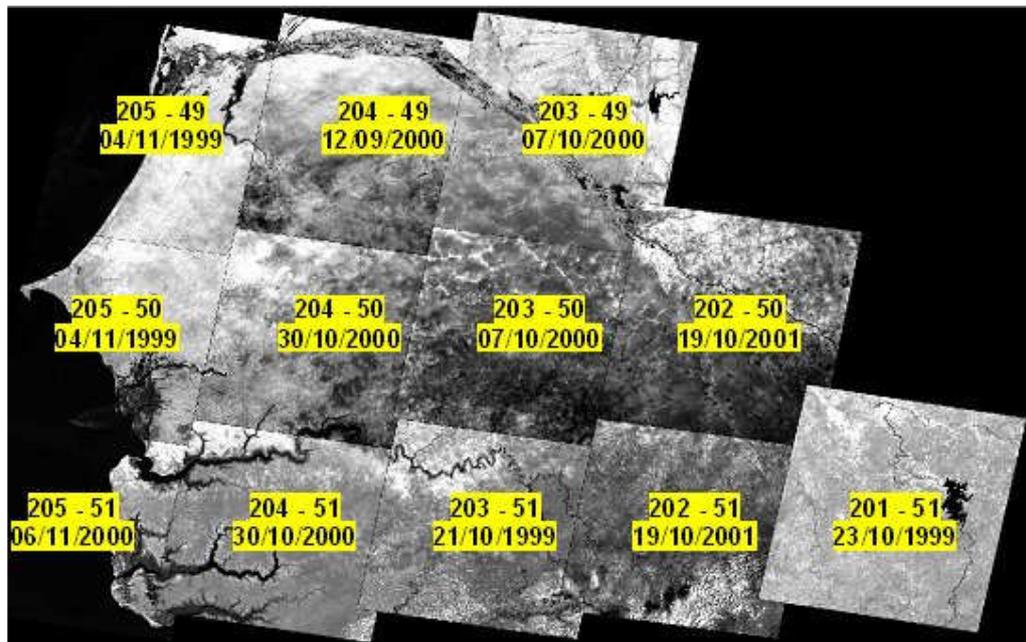


Figure 7 : Les images Landsat ETM+ Orthorectifiées

II.2.2. Création de séries temporelles

A ce niveau de l'étude, nous disposons donc de 46 images Modis à 7 canaux (B, R, PIR, MIR, NDVI, EVI, NDVI quality), 72 images Spot VGT D10 à 6 canaux (B, R, PIR, MIR, NDVI, BDC Status). Pour notre étude, nous avons besoin des canaux NDVI et qualités (NDVI quality et BDC Status Map). Pour faciliter l'utilisation de ces données, il est nécessaire de constituer des séries temporelles.

Typiquement, un fichier multibande est un fichier qui contient plusieurs images de la même scène à des longueurs d'onde différentes acquises à la même date.

Mais, il est possible d'utiliser ce type de fichier dans une optique différente, pour créer des séries temporelles. Pour un domaine spectral donné (NDVI par exemple), chaque bande du fichier est une synthèse temporelle de la même scène à une date différente.

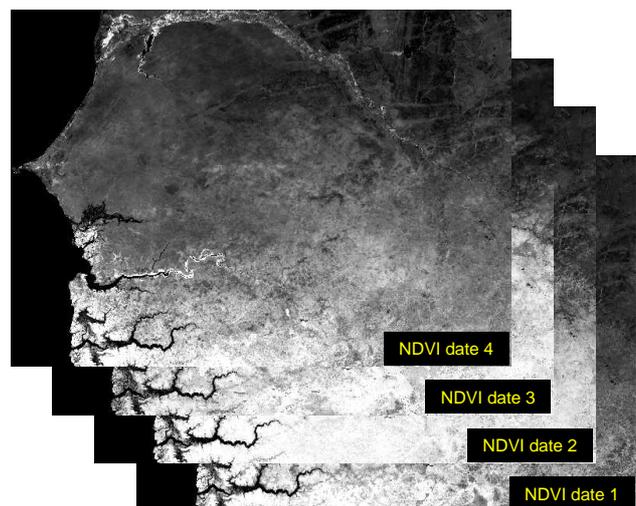


Figure 8 : Architecture d'un fichier multitemporal

C'est l'outil "Layer Stacking" du logiciel ENVI qui a été utilisé pour réaliser ces séries temporelles. Il permet de compiler, par exemple, les 72 canaux NDVI provenant des 72 images Spot Végétation dans une seule image en attribuant une date à chaque bande. Le problème, c'est

que cet outil compile les canaux dans l'ordre inverse de l'ordre chronologique, c'est à dire de la date la plus récente à la plus ancienne. Or pour pouvoir créer des profils temporels corrects, nous avons besoin d'une série temporelle avec les dates dans un ordre chronologique. Sous ENVI, il est possible de réordonner les bandes d'un fichier manuellement, mais lorsque celles ci sont nombreuses la démarche est fastidieuse. C'est pourquoi, un outil pour ENVI permettant d'inverser l'ordre des bandes a été développé sous IDL (Interactive Data Language). Le fonctionnement et les avantages de ce langage de programmation seront détaillés ultérieurement. Le code source du programme "inverse_bande" est disponible dans le cahier annexe B " Glossaire des fonctions IDL utilisée & Codes et fonctionnement des outils IDL pour ENVI ".

Pour les images "Modis/Terra Vegetation Indices 16-Day L3 Global 250m SIN Grid" nous avons donc créés 4 séries temporelles :

- une série temporelle de NDVI sur 2 ans
- une série temporelle de NDVI sur l'année 2004 (du 21/03/2004 au 06/03/2005)
- une série temporelle de NDVI sur l'année 2005 (du 22/03/2005 au 06/03/2006)
- une série temporelle de NDVI quality sur 2 ans

Pour les images "Spot VGT-D10" deux séries temporelles ont été créés :

- une série temporelle de NDVI sur 2 ans
- une série temporelle de MIR sur 2 ans

Les séries temporelles permettent alors la visualisation de profils temporels. Sous ENVI, l'outil "z profil" permet d'observer sur un profil les comptes numériques d'un pixel sur toutes les bandes, et donc pour toutes les dates, c'est ce que l'on appelle un **profil temporel** (cf. figure 9).

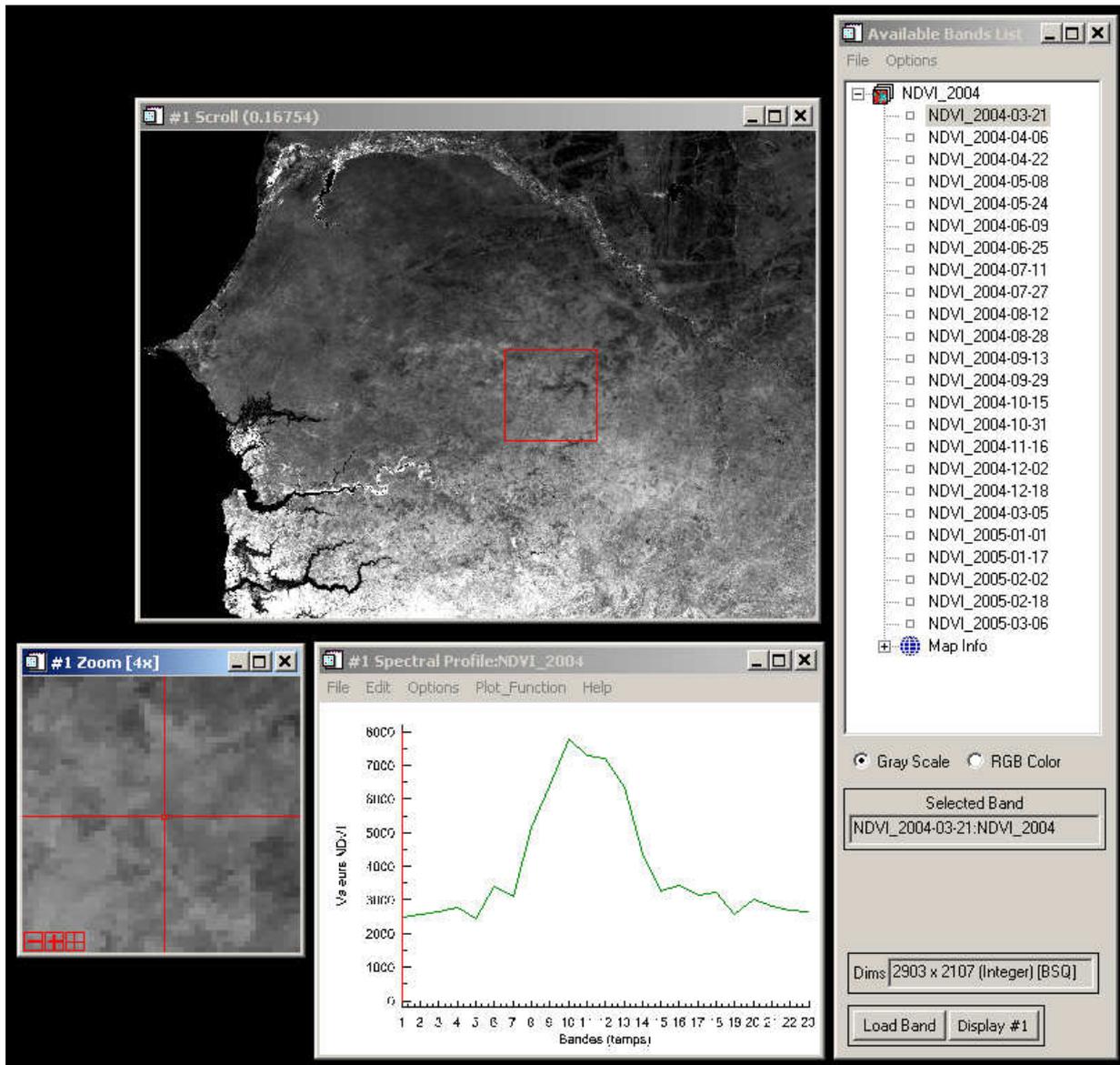


Figure 9 : Visualisation du profil temporel de NDVI du pixel 1765/1145 (centre croix) - Série temporelle Modis NDVI 2004

II.2.3. Corrections radiométriques

Bien que les images Spot Végétation et Modis aient déjà subi à la base des corrections radiométriques, notamment atmosphériques, on constate sur ces images certains défauts ou bruits dégradant ainsi leurs qualités. Ces défauts se traduisent sur les profils temporels de NDVI par des chutes anormales de NDVI créant ainsi de nombreuses dents de scie sur les courbes. Ce bruitage est d'origine très variée : conditions atmosphériques, géométrie de visée ou variation effective du NDVI.

La façon dont la qualité de production et d'utilisation est évaluée est donnée en annexe 4. Pour les images Spot Végétation, seuls les pixels 0, 3, 4, 5, 6 et 7 seront utilisés.

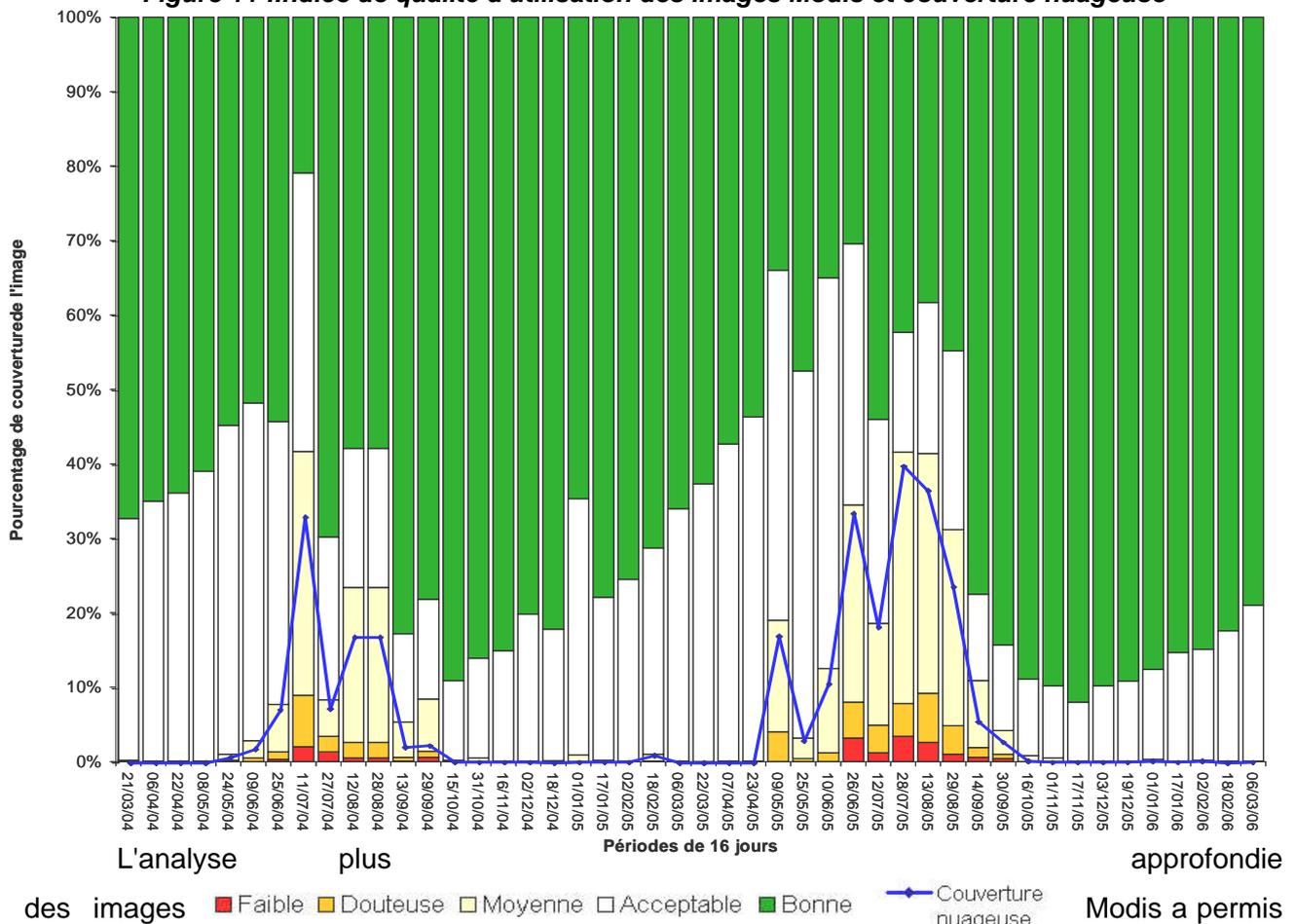
Pour avoir une vue d'ensemble des images Modis et de leurs qualités, un cahier de "présentation des images Modis et évaluation de leurs qualité" a été créé. (cf. cahier annexe C). Pour chaque synthèse temporelle de 16 jours, est présentée :

- une spatio-carte présentant la composition colorée RGB: NDVI/NIR/MIR
- 1 graphique et 1 carte présentant la qualité de production du NDVI
- 1 graphique et 1 carte présentant l'indice de qualité pour l'utilisation

L'évaluation de la qualité des images Modis a révélée :

- un taux de couverture nuageuse important entre le 25 juin et le 29 septembre 2004 et entre le 9 mai et le 30 septembre 2006. Ce taux peut atteindre 40% en pleine saison de pluies (juillet, août). Les nuages se concentrent essentiellement dans le sud et l'ouest du pays.
- une corrélation importante entre la couverture nuageuse et les indices de qualité d'utilisation moyens, douteux et faibles. Cela confirme le fait que les conditions atmosphériques sont un paramètre important dans l'évaluation de la qualité d'utilisation (cf. annexe 4).

Figure 11 : Indice de qualité d'utilisation des images Modis et couverture nuageuse



Modis a permis de constater que la présence de zones nuageuses se traduit sur les profils temporels de NDVI par

une chute anormale de NDVI, conférant à la courbe un aspect en dents de scies. (ex. figure 12)

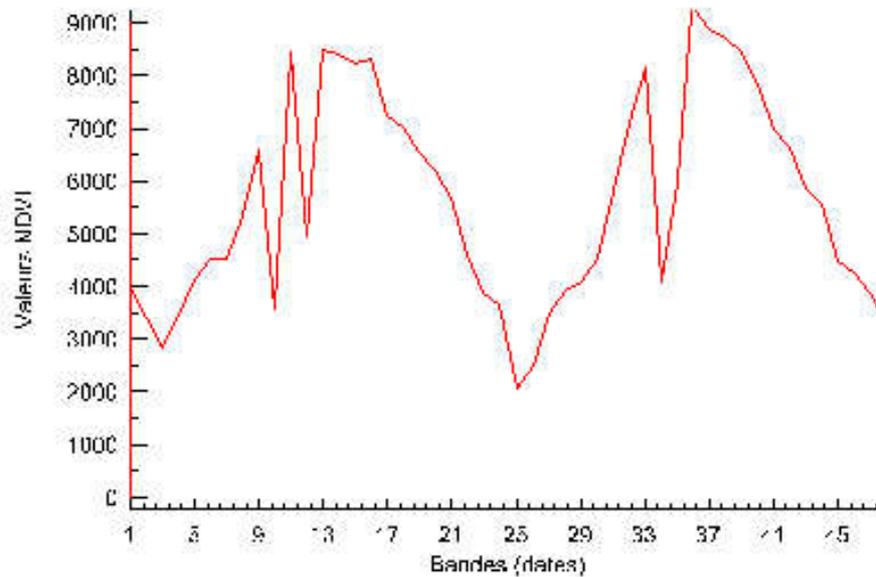
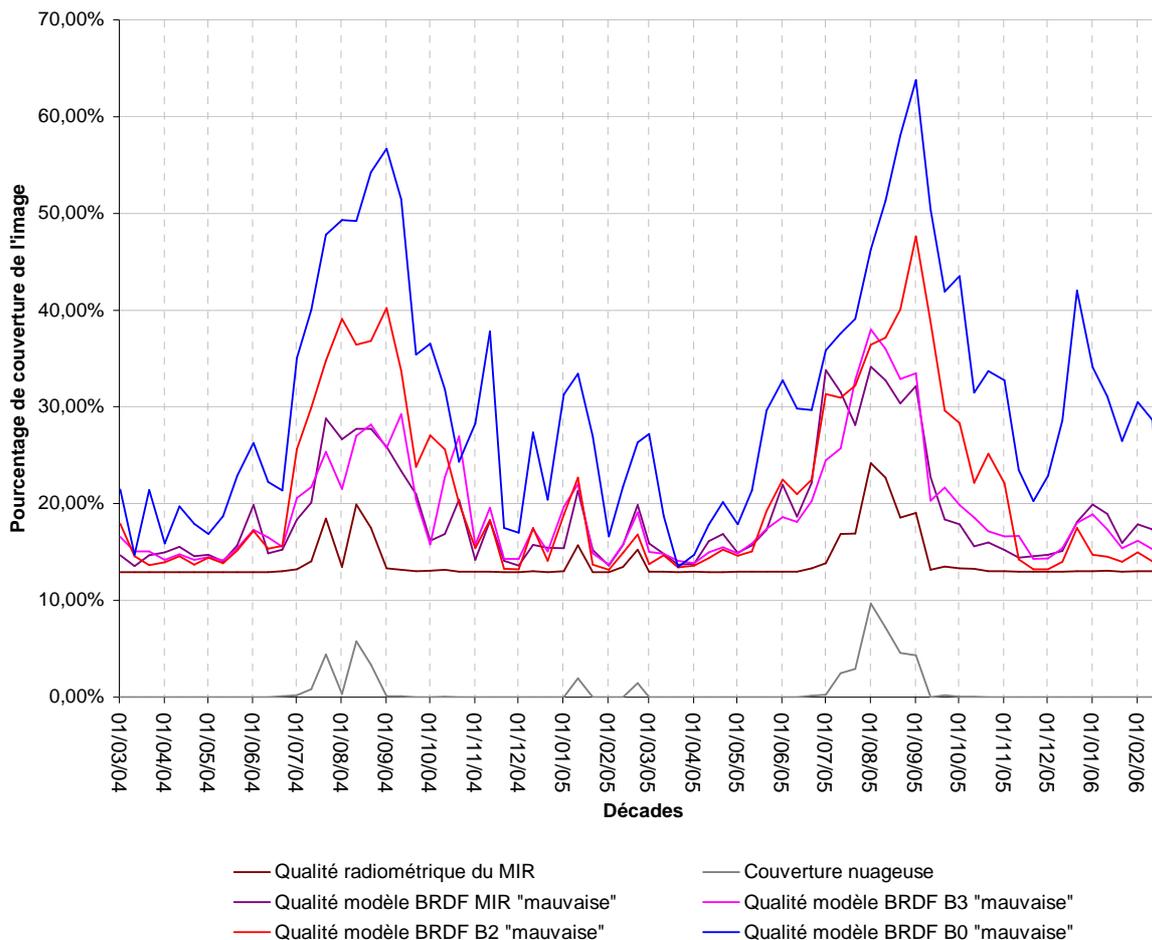


Figure 12 : Profil temporel de NDVI du pixel 1730/1784

Par contre, le taux de couverture nuageuse des images Spot Végétation est très faible par rapport aux images Modis (cf. figure 13). Il atteint un maximum de 10% pour la décade du 01/08/2005. Comme pour les images Modis, ce taux augmente lors de la saison des pluies, entre début juillet et début septembre. Comme on peut le constater sur la figure 13, le taux de couverture nuageuse influe principalement sur la qualité radiométrique du MIR. Les taux de pixels concernés par des qualités du modèle de correction BRDF "mauvaises", sont très importants, surtout sur la bande bleu très sensible aux conditions atmosphériques, et semblent suivre la dynamique de couverture nuageuse.

L'analyse des profils temporels de NDVI de ces différents types de pixels, a montré que seuls les pixels contaminés par les nuages présentaient des chutes anormales de NDVI. La faible qualité des modèles de correction BRDF ne semble pas influencer les profils temporels.

Figure 13 : Couverture nuageuse et qualité du modèle BRDF des images Spot Végétation

Suite à ces évaluations, il est apparu nécessaire de limiter le bruitage excessif des profils temporels pour faciliter leur analyse et interprétation : c'est l'objet de la reconstitution des données anormales par interpolation.

II.2.3.2. Reconstitution des données manquantes par interpolation

- **Le principe**

Cette démarche se justifie par l'impossibilité de travailler avec des données trop parasitées qui entraînent des erreurs dans la caractérisation des différents stades d'évolution. Les pixels contaminés par les nuages à la même date, présentent des profils temporels similaires avec une chute anormale du NDVI à la même période. Lors de la classification, cela se traduit par le regroupement au sein d'une même classe de ces pixels "perturbés". Les différentes formations végétales dans cette classe ne peuvent donc pas être distinguées.

En fait, deux solutions étaient possibles pour remédier à ce problème.

La première était simplement de masquer les pixels "anormaux". Seulement si un pixel devait être masqué sur une date alors il devait aussi l'être sur toutes les autres dates, sinon le

profil temporel de ce pixel aurait été entrecoupé de "vides". Cette solution n'a pas été retenue car elle engendrait une perte d'informations trop importante : quasiment la moitié de la série temporelle Modis aurait été masquée.

La deuxième possibilité est celle qui a été retenue. Elle consiste à reconstituer les données considérées comme anormales (ou manquantes).

La première étape est d'identifier les pixels "anormaux". Pour cela, on utilise le canal "NDVI quality" pour les images Modis et le canal " BDC Status Map" pour les images Spot Végétation. L'évaluation de la qualité des images Modis et Spot Végétation nous a permis de reconnaître les pixels anormaux comme ceux codant l'information :

- qualité d'utilisation "moyenne" (Modis)
 - qualité d'utilisation "douteuse" (Modis)
 - qualité d'utilisation "faible" (Modis)
 - qualité de production "nuages" (Modis)
 - qualité de production "non produit car mauvaise qualité" (Modis)
- et
- présence de nuages (Spot VGT)

La deuxième étape consiste à créer une nouvelle valeur pour les pixels identifiés comme anormaux. Il s'agit de faire une interpolation linéaire multi-dates.

Le principe est le suivant :

- Pour la première date, pour tout les pixels identifiés comme anormaux, on prend les 2 premières valeurs considérées comme correctes du même pixel, sur les dates supérieures et on fait une interpolation linéaire suivant la formule :

$$y = (y_2 \cdot (x_3 - x_2) + (y_3 - y_2) \cdot (x - x_2)) / (x_3 - x_2)$$

où

y est la valeur du pixel anormal

y₂ est la valeur du même pixel correct sur la première date supérieure

y₃ est la valeur du même pixel correct sur la deuxième date supérieure

x est la date (ou n° de bande) du pixel anormal

x₂ est la date (ou n° de bande) du pixel correct sur la première date supérieure

y₃ la date (ou n° de bande) du pixel correct sur la deuxième date supérieure

- De la deuxième date à l'avant dernière, pour tout les pixels identifiés comme anormaux, on prend la valeur du même pixel sur la date juste inférieure et la première valeur correcte sur une date supérieure et on fait une interpolation linéaire suivant la même formule que précédemment.

- Pour la dernière date, pour tous les pixels identifiés comme anormaux, on prend les valeurs du pixel équivalent sur les 2 dates juste inférieures et on fait l'interpolation comme précédemment.

Interpolation

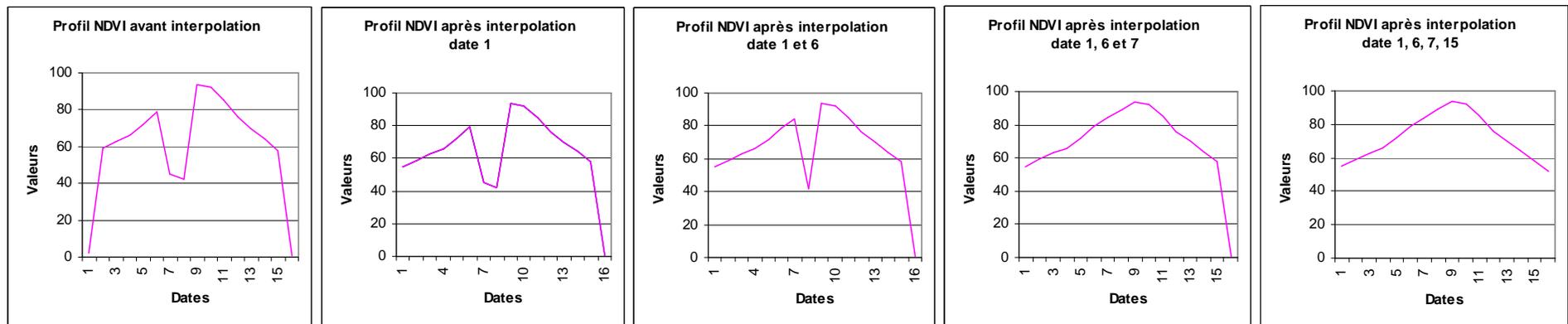
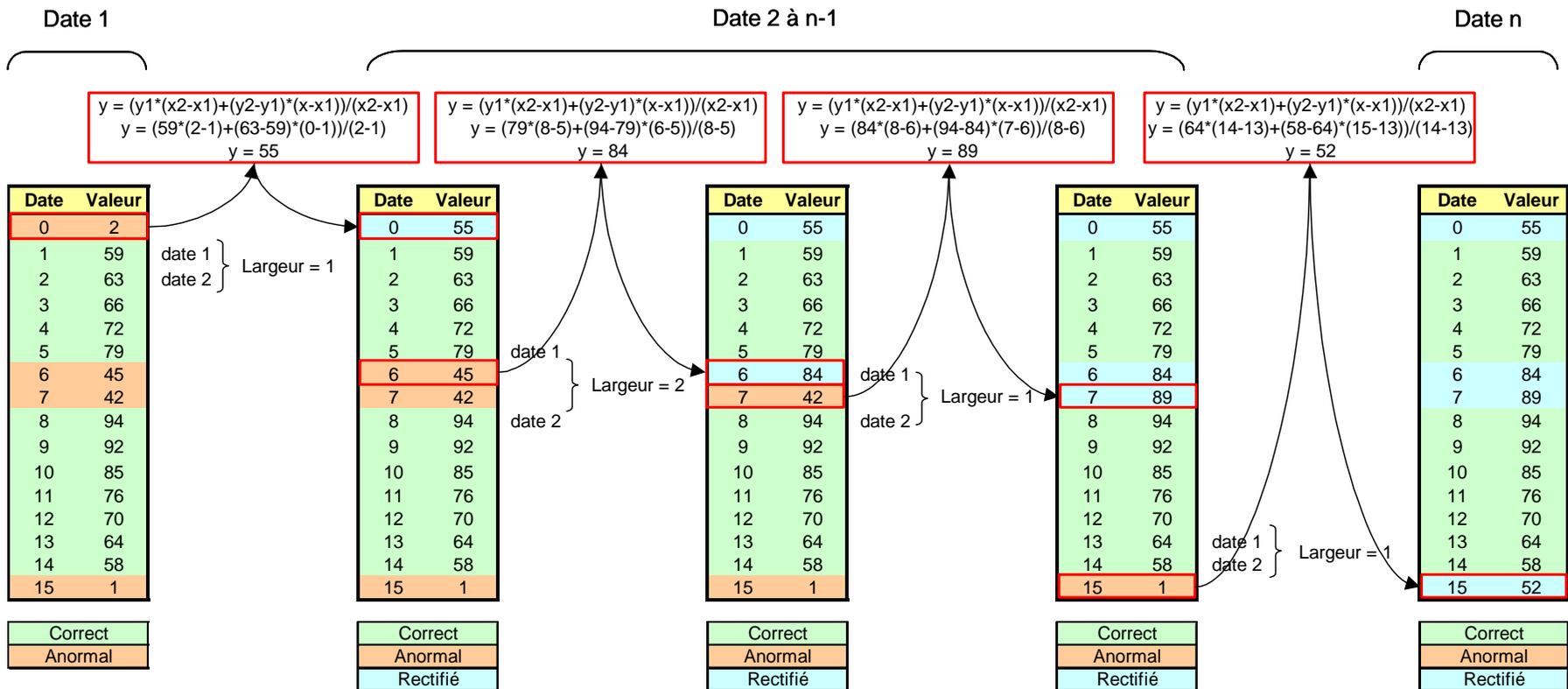


Figure 14 : Méthode pour l'interpolation linéaire multi-temporelle

- **Les outils**

Pour réaliser la reconstitution de données manquantes, plusieurs outils ont été réalisés avec IDL (Interactive Data Language) qui est un langage de programmation scientifique spécialisé dans l'analyse des données. C'est un langage à partir duquel a été développé ENVI. L'intérêt de l'utilisation de ce langage est double. D'une part les performances sont très intéressantes en comparaison avec d'autres langages matriciels, notamment sur des traitements en boucle de matrices. D'autre part les routines implémentées dans ENVI sont réutilisables (ENVI...). IDL permet ainsi un interfaçage très efficace, soit en mode interactif, soit en mode Batch.

Pour ce travail, où les images sont nombreuses (72 spot végétation et 66 Modis), IDL se révèle être un outil très efficace car il permet l'analyse et le traitement simultané d'un gros jeu de données et donc l'automatisation des traitements.

Les différents outils créés pour l'interpolation des données manquantes ont été intégrés dans le menu ENVI et se divisent en 2 groupes : les outils pour l'interpolation des données Modis et ceux pour l'interpolation des données Spot Végétation. Le fonctionnement de ces outils, ainsi que leur code source sont détaillé dans le cahier annexe B « Glossaire des fonctions IDL utilisée & Codes et fonctionnement des outils IDL pour ENVI ».

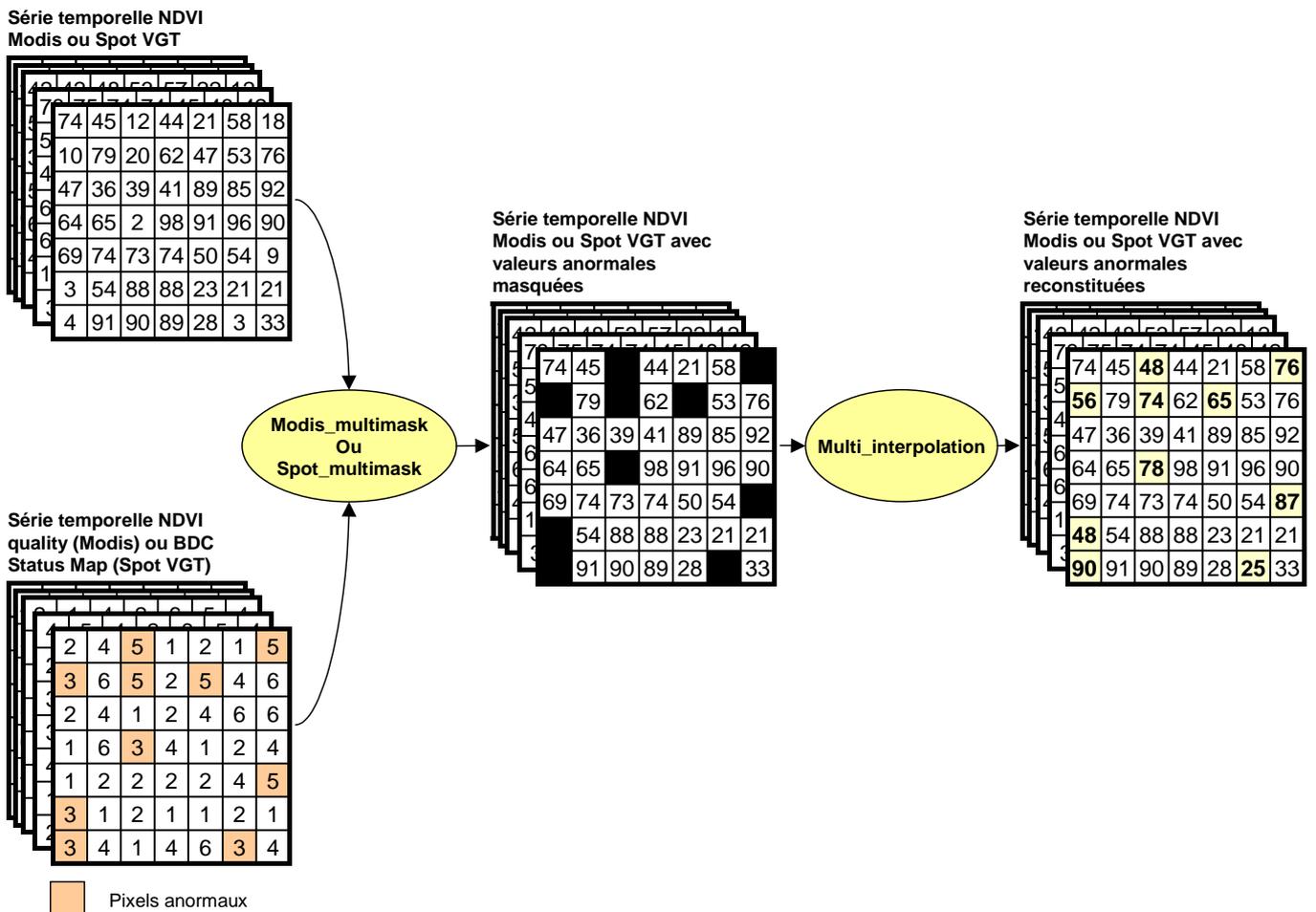


Figure 15 : Outils IDL utilisés pour la reconstitution des données manquantes par interpolation linéaire multi-temporelle

Pour réaliser la première étape de l'interpolation qui consiste à masquer les pixels "anormaux", il faut utiliser les outils "modis_multimask" ou "Spot_multimask" suivant le type de données que l'on veut corriger. Cet outil, dont l'utilité n'est pas strictement réservée à cette application, permet de masquer, pour chaque bande (ou date), les pixels ayant comme valeurs dans le canal qualité, les valeurs choisies par l'utilisateur parmi une liste. Pour ce travail d'interpolation, les valeurs qui seront masquées sont celles ayant pour valeurs dans le canal qualité :

- qualité d'utilisation "moyenne" (Modis)
 - qualité d'utilisation "douteuse" (Modis)
 - qualité d'utilisation "faible" (Modis)
 - qualité de production "nuages" (Modis)
 - qualité de production "non produit car mauvaise qualité" (Modis)
- et
- présence de nuages (Spot VGT)

Une fois la série temporelle NDVI masquée, on utilise l'outil "multi_interpolation" qui applique pour chacun des pixels masqués, la méthode d'interpolation linéaire multi-temporelle exposée page 36 et 37.

• Les résultats de l'interpolation

Comme le montre l'exemple du pixel 1335/1691 de la série temporelle Modis (cf. figure 16), la reconstitution de données manquantes par interpolation améliore considérablement les profils temporels. Les anomalies sont éliminées et les profils s'en trouvent lissés.

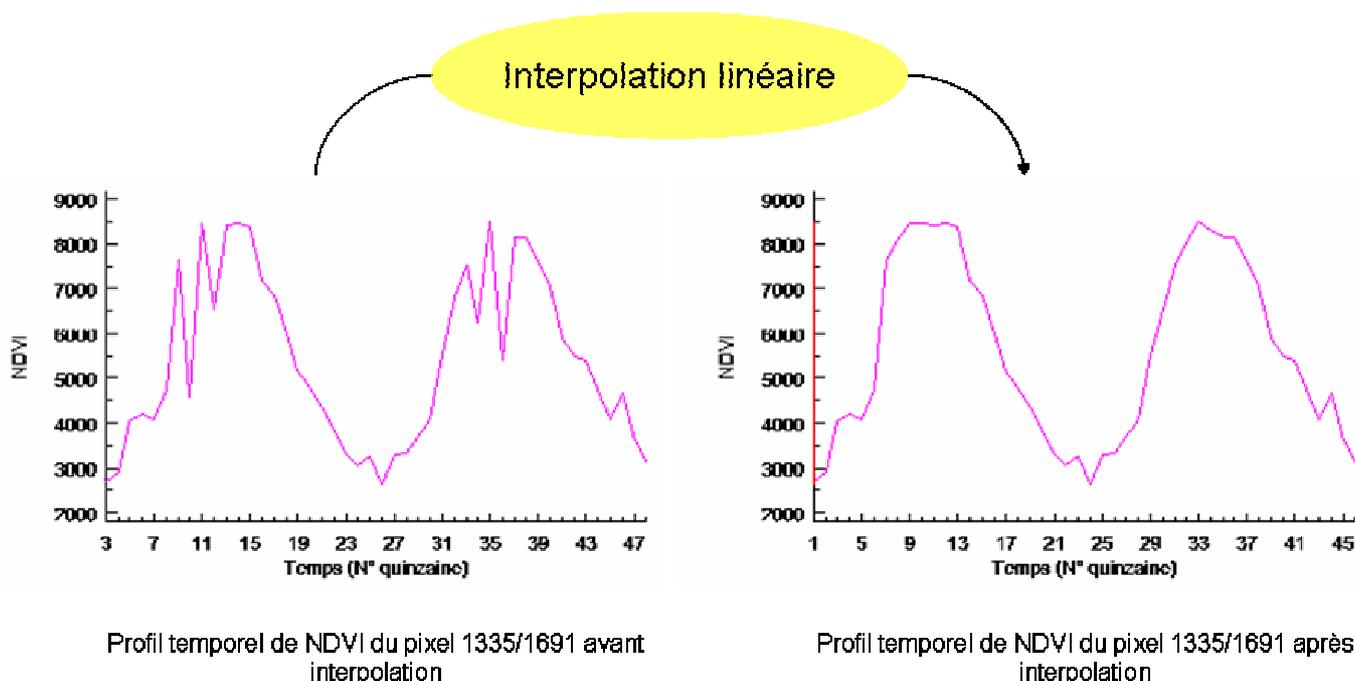


Figure 16 : Interpolation linéaire temporelle du pixel 1335/1691

Les données ainsi préparées et corrigées peuvent être traitées et analysées. Il s'agit maintenant d'extraire un maximum d'informations de ces profils temporels corrigés et d'essayer de comprendre leur signification. De l'information phénologique spatialisée, issue des profils temporels, il faudra alors passer à une information "thématique" spatialisée, c'est à dire associer aux classes temporelles Modis et Spot VGT un type d'occupation du sol, en tentant d'en identifier une ou plusieurs qui correspondraient aux cultures.

Rapport-Gratuit.com

Chapitre 2 : Identification du domaine cultivé

L'identification précise et régulière du domaine cultivé à une échelle régionale est particulièrement importante dans les pays aride et semi-aride où la variabilité spatiale et temporelle des précipitations provoque de fortes fluctuations dans la production primaire et donc un risque important de famines (Maselli F., Rembold F., 2001)

Les nouvelles techniques en télédétection qui permettent d'observer de larges territoires avec une fréquence temporelle accrue s'adaptent tout à fait à cette situation environnementale et aux besoins cartographiques de ces pays.

Mais, l'identification du domaine cultivé sur un large territoire à partir de données satellites basse résolution est complexe et délicate. Deux problèmes essentiels vont gêner l'identification du domaine cultivé. Le premier tient du fait que le territoire Sénégalais est vaste et très hétérogène. Il devra donc être stratifié en zones agro-écologiques homogènes afin d'adapter les classifications. Le deuxième est lié à la résolution spatiale des données Modis et à la variabilité des milieux naturels. En effet, les surfaces cultivées sont souvent mélangées à d'autres types de végétation qui ont une phénologie différente et qui perturbent donc les profils temporels de NDVI.

Il s'agit donc dans cette partie de résoudre au mieux ces difficultés afin d'identifier le plus précisément possible le domaine cultivé du Sénégal.

I. Stratification post classifications

Pour identifier le domaine cultivé à l'échelle nationale, il sera fait appel aux classifications spatio-temporelles. Or, de nombreuses études ont montré que les classifications réalisées sur un milieu très hétérogène conduisaient à de nombreuses confusions entre les différents milieux naturels. Une stratification du territoire post classification semble alors nécessaire pour réduire les confusions spectrales et temporelles entre les différents types d'occupation du sol. Une classification pourra ensuite être appliquée à l'intérieur de chacune des régions stratifiées et les résultats seront combinés pour l'ensemble de la région d'étude. Cette méthode que l'on appellera « stratification post classification » améliore la précision des classifications.

Il s'agit donc dans cette partie d'identifier des zones agro-écologiques homogènes. Pour cela, une méthodologie permettant le retour sur traitements et l'affinement successif de la stratification sera appliquée (cf. figure 17). Il s'agit d'abord d'utiliser les cartes thématiques (pédologie, végétation, climatologie...) pour effectuer un premier découpage en fonction de critères qui seront détaillés dans le paragraphe suivant. Ce découpage sera ensuite affiné à l'aide des profils temporels de NDVI issus des images Modis et à l'aide des images haute résolution Landsat ETM+ et Google Earth®. Puis, les classifications spatio-temporelles seront appliquées à chacune des régions agro-écologiques et en fonction des résultats et des confusions possibles dans les classes, la stratification pourra être réajustée.

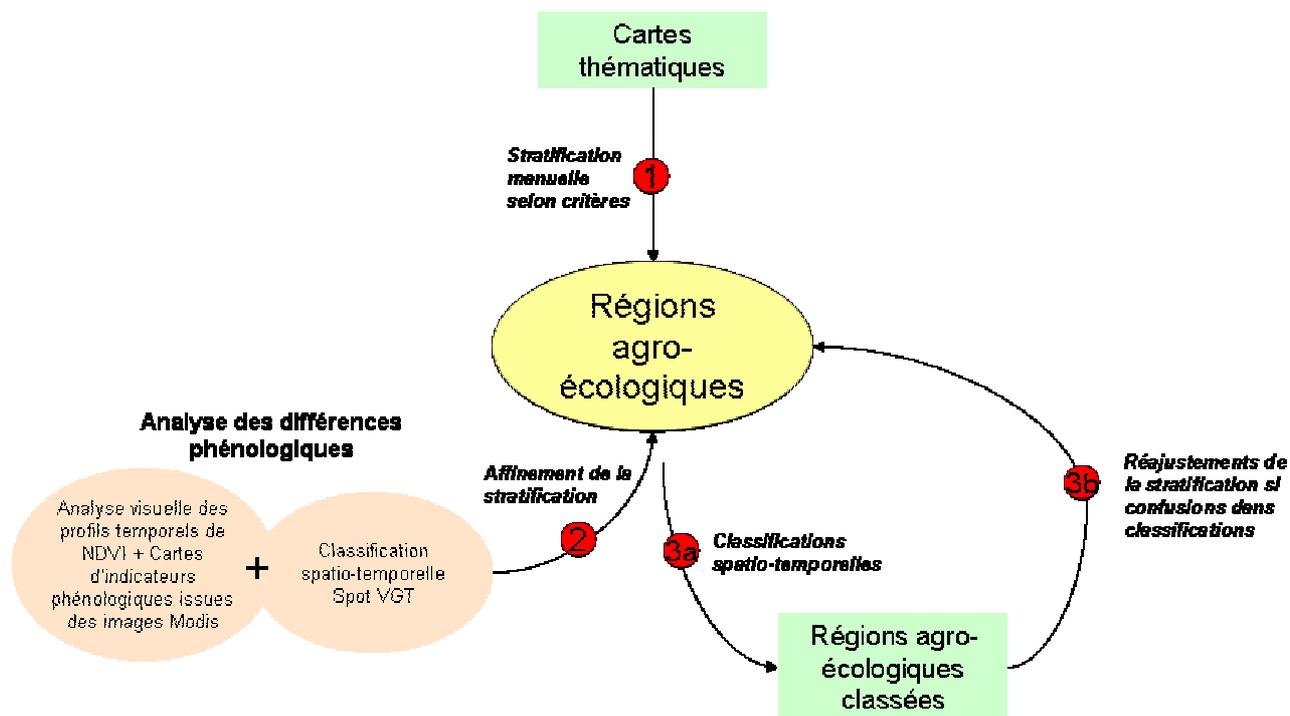


Figure 17 : Modèle de traitements pour la segmentation en zone agro-écologiques

I.1. Stratification à partir des cartes thématiques

La première étape de la stratification consiste donc à découper globalement le territoire sénégalais en plusieurs zones présentant des critères agro-écologiques similaires. Pour déterminer ces zones, la méthodologie adoptée est celle de la superposition des couches d'information et de l'analyse croisée. Deux méthodes sont possibles pour réaliser cette analyse croisée. La première consiste à définir un certain nombre de critères, à leur attribuer un certain poids dans la stratification et à effectuer les calculs à l'aide de requête SQL dans un SIG. Cette méthode rigoureuse est intéressante mais est difficilement applicable dans cette étude, du fait de la grande hétérogénéité des cartes thématiques d'un point de vue des sources, des échelles et des dates de production. De plus, certaines cartes intéressantes pour la stratification, comme la carte des ethnies, ne sont disponibles qu'au format papier et ne peuvent donc pas être intégrées au calcul. C'est donc la deuxième solution, qui consiste à effectuer l'analyse croisée visuellement qui a été retenue. Comme pour la méthode précédente, des critères agro-écologiques ont été définis et hiérarchisés en fonction de leur importance. Puis les cartes thématiques papiers ou numériques ont été analysées visuellement afin de déterminer des zones homogènes en fonction des critères établis.

Cette méthode est critiquable du fait de sa nature subjective et donc de sa reproductibilité incertaine, mais elle permet l'introduction de sources et de critères complexes non calculables par des fonctions SIG.

- **le relief** : il est l'un des facteurs discriminants les plus importants en ce sens qu'il détermine les différentes situations culturelles (plateau, plaine, bas-fond).

- **la géologie et le sol** : Les substrats géologiques et les différents types de sols déterminent les orientations culturelles et conditionnent la productivité agricole. De plus, le signal enregistré par le satellite intègre les réflectances de la végétation et du sol sous-jacent. Lorsque la couverture végétale est faible, situation fréquente dans le domaine sahélien, le signal reçu proviendra principalement du sol. Or, la réflectance des sols varie en fonction de leur couleur, de leur degré d'humidité et de leur rugosité. Une culture d'arachide sur sol brun rouge n'aura pas la même réponse spectrale qu'une culture d'arachide sur sol sableux.

- **la végétation** : étroitement liée aux deux précédents, elle est indicatrice du niveau de dégradation des sols et donne des informations sur le climat.

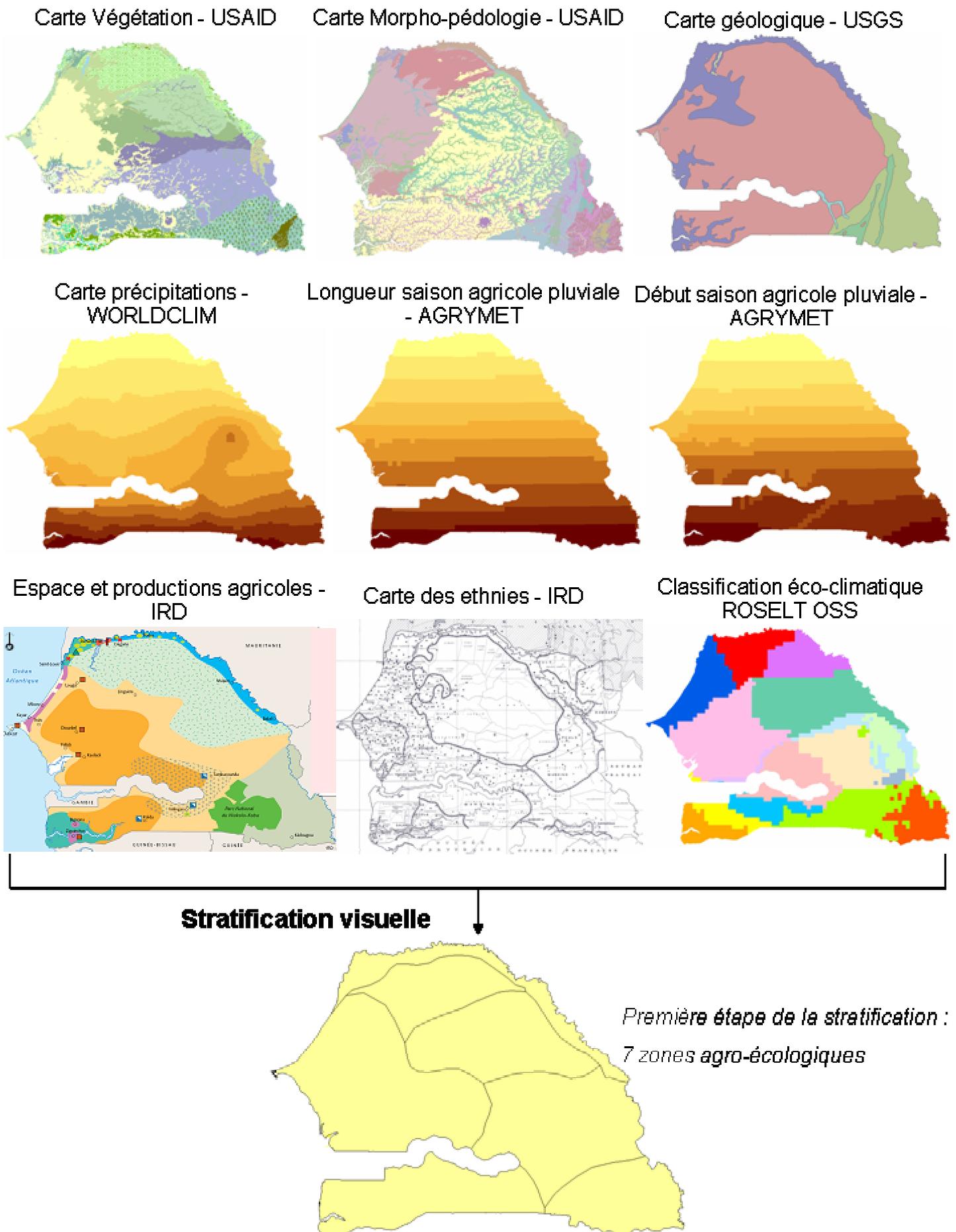
- **la durée des saisons, la durée de la période végétative et la pluviométrie** : de ces facteurs dépend le choix des cultures et des variétés à cultiver. Elles déterminent également la période de réalisation des opérations culturelles : semis, récoltes ...

- **les groupes ethniques et la densité de population** : ils définissent les méthodes d'exploitation et de gestion des terres et, avec les traditions alimentaires, les types de spéculation dominantes dans un espace donné. Aussi, la distribution spatiale de la population induit des comportements et des règles dans l'exploitation et la gestion des ressources en terre.

- **les productions agricoles et animales** : l'importance d'une culture se traduit par des retombées socio-économiques et détermine le niveau de technicité de la production agricole (cultures de rente, équipement permettant un développement de la traction animale...).

Le croisement de ces critères a permis de définir 7 zones agro-écologiques (cf. figure 18). Cependant, la radiométrie et l'évolution temporelle du NDVI, critères qui serviront de base aux classifications, n'ont pas encore été pris en compte dans la stratification. Or, pour minimiser les erreurs de confusion lors des classifications, il faut que les zones agro-écologiques soient radiométriquement et spatio-temporellement homogènes. Il s'agit donc d'affiner cette première stratification en analysant les profils temporels de NDVI issus des images Modis, la classification spatio-temporelle de l'image Spot VGT et les images haute résolution Landsat ETM+ et Google Earth© .

Figure 18 : Première étape de la stratification "stratification visuelle à partir des cartes thématiques"



I.2. Amélioration de la stratification à partir des caractéristiques phénologiques des cultures

La faible résolution spatiale des images Modis ne permet pas de distinguer visuellement les zones de cultures car le parcellaire n'est pas discernable. Or, pour analyser les profils temporels de NDVI des cultures, il faut avant tout les localiser. Les images haute résolution Landsat ETM+ et quickbird de GoogleEarth© ont permis d'identifier les zones de cultures, et par simple lien géographique, il a ensuite été possible de visualiser les profils temporels de NDVI des zones correspondantes sur les images Modis.

L'observation des profils temporels de NDVI issus des images Modis a permis de mettre en évidence des différences de comportement phénologique des cultures suivant les zones. Au nord ouest, celles ci semblent avoir un cycle végétatif assez court (centaine de jours) avec des valeurs de NDVI plutôt faibles (autour de 0.5). Plus au sud, les cultures présentent une saison agricole plus longue, avec un début de croissance qui se situe entre fin mai et début juin et une fin de sénescence autour de décembre. En période de maturité végétale, les indices de végétation atteignent des valeurs beaucoup plus élevées : entre 0.6 et 0.8.

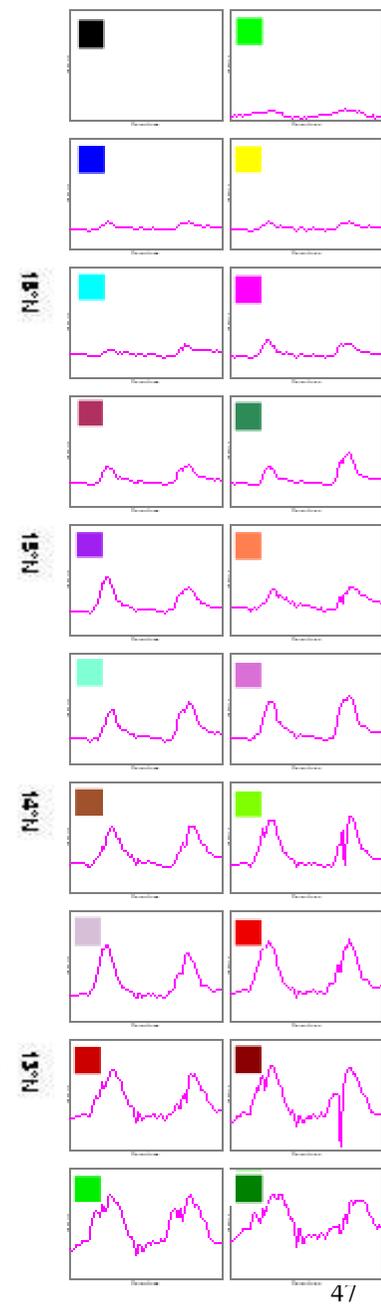
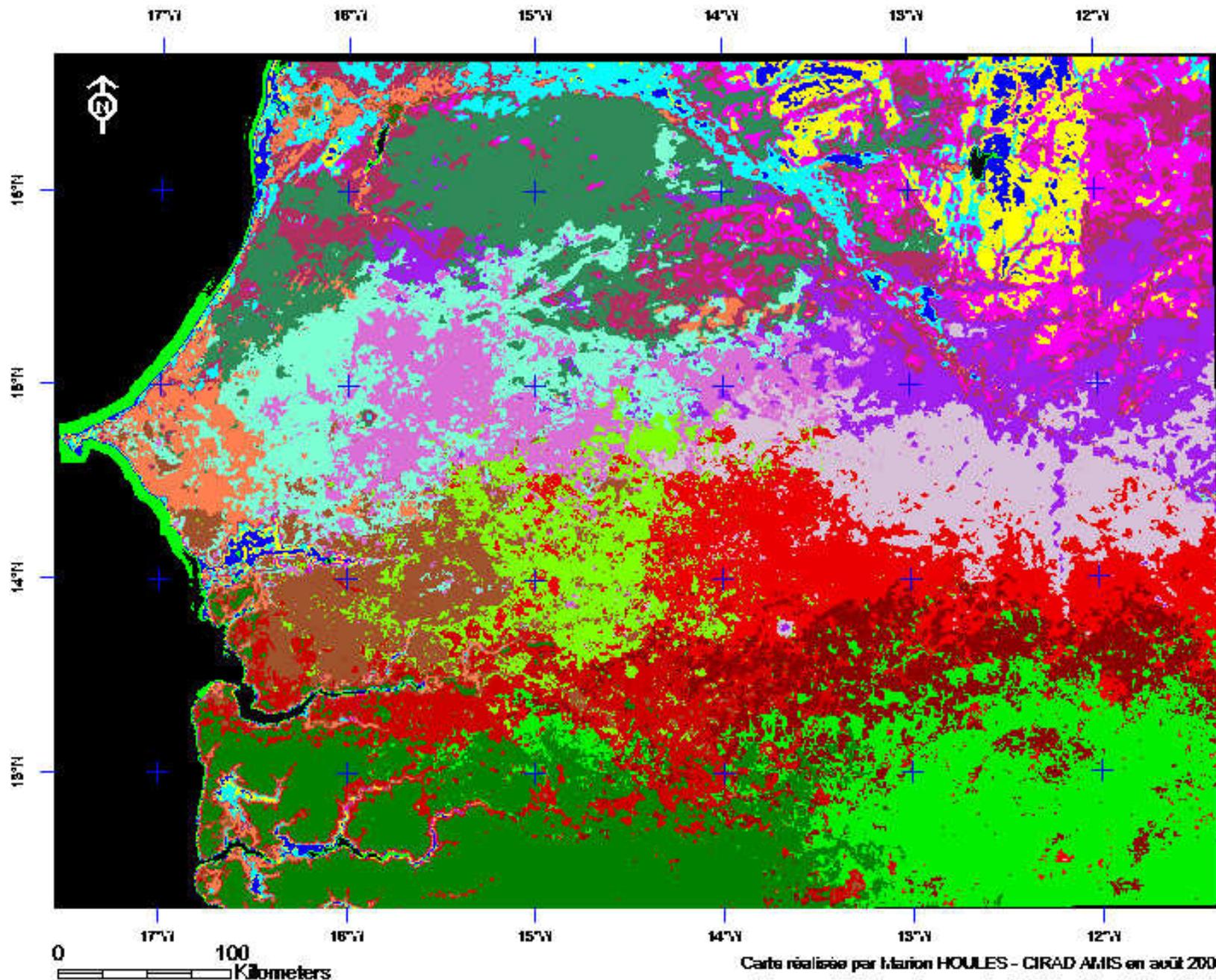
Il est donc apparu indispensable d'analyser plus précisément ces différences de cycle végétal et de prendre en considération ces paramètres phénologiques dans la stratification du Sénégal.

Mais, l'analyse visuelle du cycle végétal des cultures zone par zone est longue et fastidieuse et la délimitation de zones homogènes en fonction de la phénologie s'avère difficile. Pour faciliter ce travail, il est donc apparu nécessaire de décomposer et spatialiser l'information phénologique en créant des cartes d'indicateurs phénologiques et en réalisant une classification spatio-temporelle de l'image Spot VGT sur le pays entier.

II.2.1. Classification spatio-temporelle Spot VGT

Une classification non supervisée par nuées dynamiques (méthode présentée dans la partie III.1) a été réalisée sur la série temporelle de NDVI Spot VGT corrigée. Vingt classes ont été créées. Pour chacune d'elle, le profil de NDVI moyen a été établi. Cette classification permet d'avoir un aperçu des différences phénologiques entre les différentes régions du Sénégal. Elle sera donc d'une aide précieuse pour l'affinement de la stratification.

Classification spatio-temporelle réalisée à partir de la série temporelle de NDVI 2004-2005 Spot Vegetation



II.2.1. Définition des paramètres phénologiques

Pour réaliser les cartes d'indicateurs phénologiques à partir de la série temporelle NDVI Modis, il faut avant tout définir les différents paramètres phénologiques qui seront cartographiés et déterminer une façon de les mesurer. En effet, il convient de définir des indicateurs appliqués aux courbes de NDVI, qui permettent de déterminer la valeur des paramètres, de façon à mener une analyse comparative à partir de références communes :

- **le début du cycle d'activité chlorophyllienne** : Visuellement, il est souvent facile à identifier. Il correspond à une augmentation brutale du NDVI suivie d'une période de croissance régulière et importante jusqu'à son maximum. Mais quelques fois, des variations importantes de NDVI s'effectuent avant le début du cycle, pendant la saison sèche, mais elles ne correspondent pas au début du cycle d'activité chlorophyllienne. Il est donc difficile de donner des indicateurs précis à la machine lui permettant d'identifier le début du cycle végétal. Par exemple, si on détermine le début du cycle de l'activité chlorophyllienne comme étant la première quinzaine dont le NDVI entre elle et la quinzaine suivante, croît de plus de 15%, la machine déterminera pour le profil suivant, la quinzaine n°3 comme début du cycle. Or, visuellement, on s'identifierait plutôt de début à la quinzaine n°7.

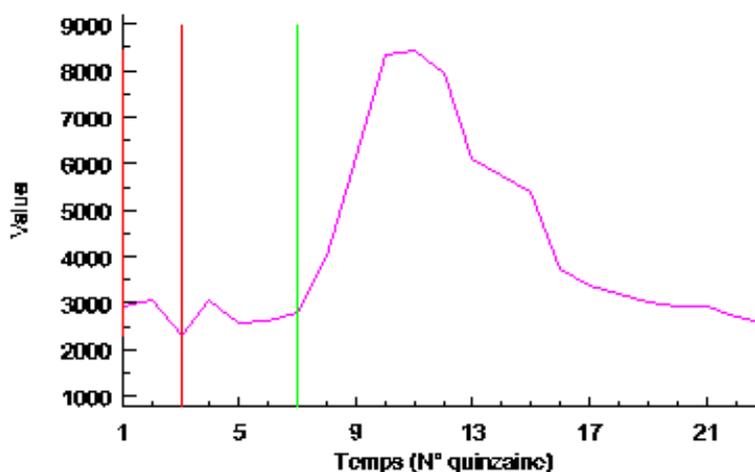


Figure 19 : Profil temporel de NDVI du pixel 987/1224

Il faut donc ajouter à l'indicateur de croissance un indicateur de continuité de croissance.

Le début du cycle de croissance sera donc déterminé de la façon suivante : c'est la première quinzaine dont le NDVI entre elle et la quinzaine suivante, croît de plus de x % et dont la moyenne du taux de croissance sur les 3 quinzaine suivantes est supérieure à x %. x sera déterminé par l'utilisateur après avoir analysé ses données et le taux moyen de croissance qui détermine le départ. Pour les données Modis, x est compris entre 10 et 15%. Les résultats les plus satisfaisants, ont été obtenus avec un taux de 13%. Si, le programme n'identifie aucune date qui réponde à ses conditions, le taux de croissance déterminé par l'utilisateur, soit x , sera diminué de 1 point, jusqu'à ce que le début du cycle soit identifié.

- **la fin du cycle d'activité chlorophyllienne** : La fin du cycle est précédé par une décroissance régulière et importante du NDVI depuis son maximum et est suivi d'une période de décroissance très lente, voir de stabilité. Il sera donc calculé de la même façon que le début du cycle mais en partant de la dernière quinzaine.

C'est donc la première quinzaine, en partant de la dernière, dont le NDVI entre elle et la quinzaine précédente, diminue de plus de x% et dont la moyenne du taux de décroissance sur les 3 quinzaines précédentes est supérieure à x %. Nous prendrons le même x que celui déterminé pour le calcul du début du cycle de croissance, soit 13% pour les données Modis.

- **date et valeur du maximum de NDVI** : Ces deux paramètres sont très facile à calculer. La valeur maximum de NDVI correspond à la plus grande valeur de NDVI enregistrée pour le pixel sur l'année. Il suffit ensuite de déterminer à quelle date ce maximum a été atteint.

- **longueur de la période de croissance et d'augmentation en biomasse verte**, exprimée par la partie ascendante de la courbe de NDVI : C'est la différence entre la date où le maximum de NDVI a été atteint, et la date du début du cycle d'activité chlorophyllienne.

- **longueur de la période de décroissance, sénescence de la biomasse**, exprimée par la partie descendante de la courbe de NDVI : C'est la différence entre la date de fin du cycle d'activité chlorophyllienne et la date où le maximum de NDVI a été atteint.

- **rapport croissance / décroissance** : C'est la longueur de la période de croissance divisée par la longueur de la période de décroissance. Si ce rapport est compris entre 0 et 1, la période de croissance est plus courte que la période de décroissance, et inversement si le rapport est supérieure à 1. Cet indicateur peut être important dans l'identification des cultures car celles-ci présentent généralement une phase de croissance plus longue que leur sénescence.

- **durée totale du cycle (croissance, maturité, sénescence)** : C'est la différence entre la date de fin du cycle et celle du début du cycle d'activité chlorophyllienne.

II.2.2. Cartes d'indicateurs phénologiques

Pour mesurer ces différents indicateurs phénologiques et créer les cartes correspondantes, des outils IDL pour ENVI ont été spécialement créés. Leur code source et leur fonctionnement sont détaillés dans le cahier annexe B.

Au final, huit cartes par année ont été réalisées. Elles ont permis de mettre en évidence des différences spatiales importantes et de réajuster la stratification en fonction de celles-ci. Après cette deuxième étape de la stratification, 13 régions agro-écologiques ont été identifiées (cf. figure 20).

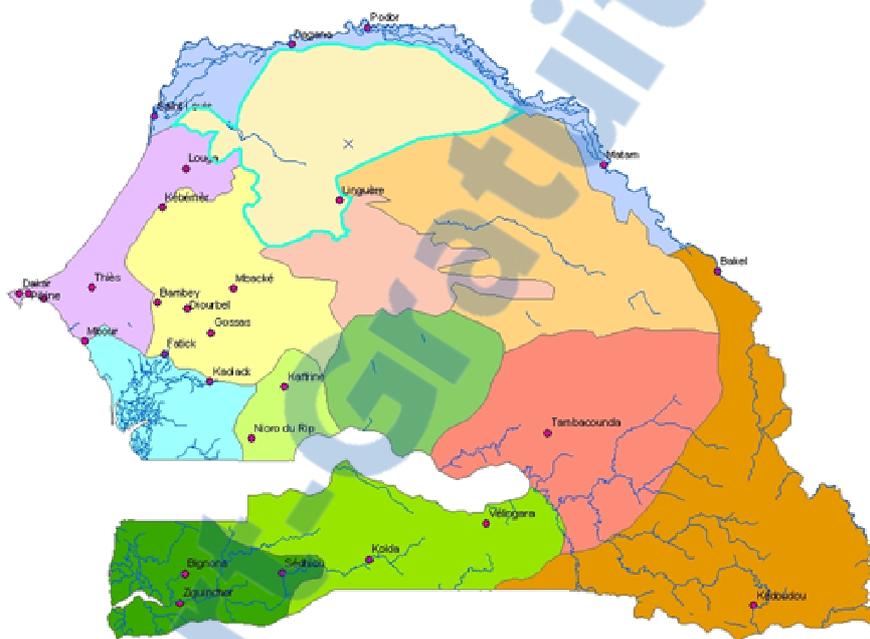
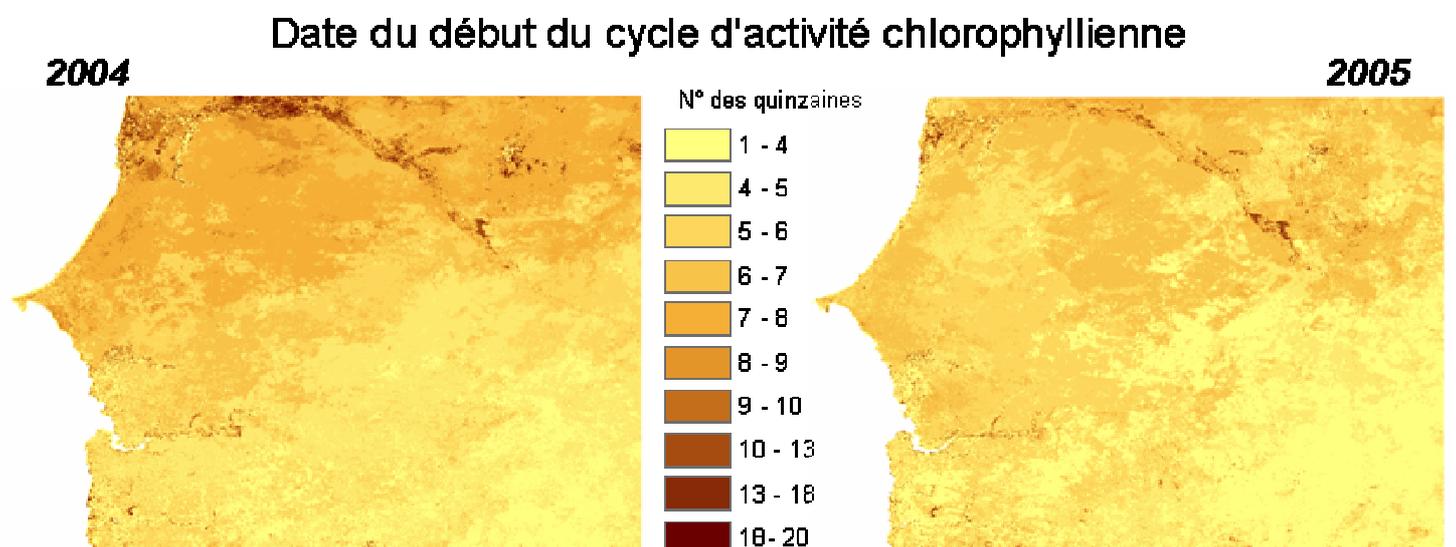
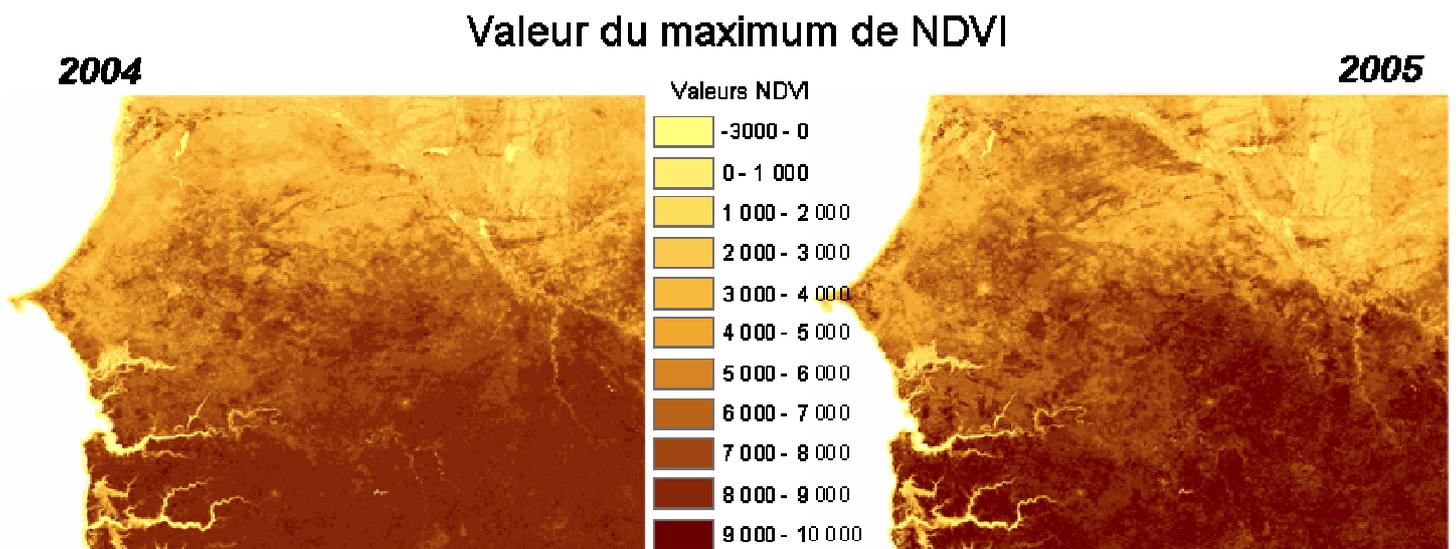
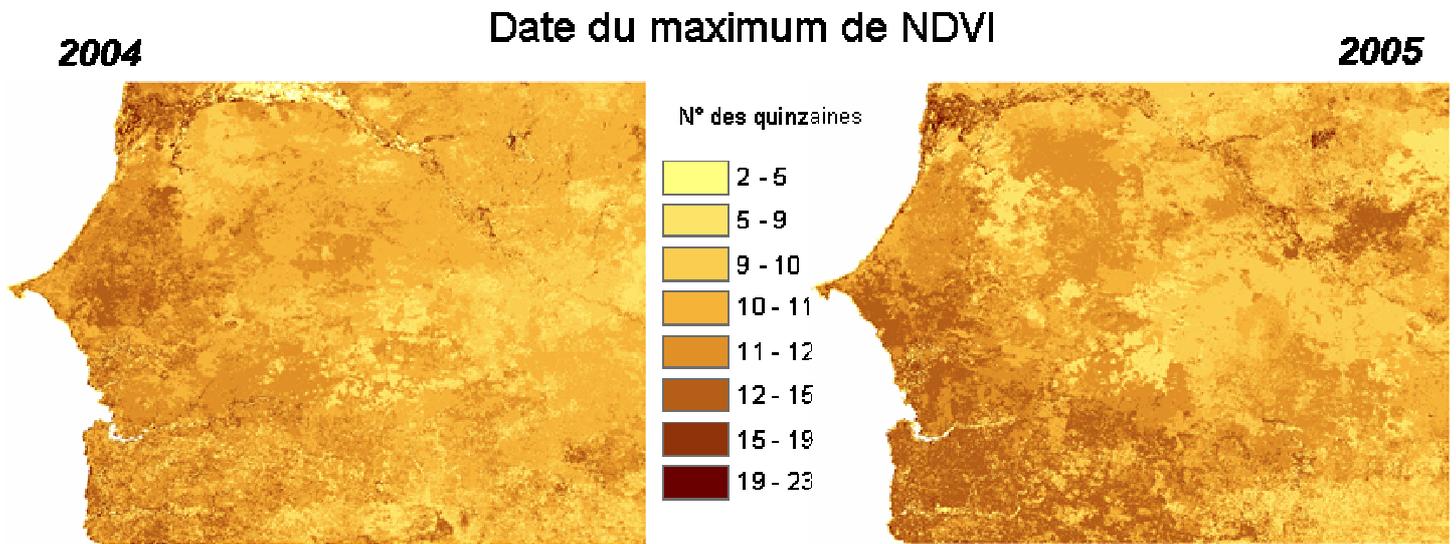


Figure 20 : Résultat de la stratification après la deuxième étape

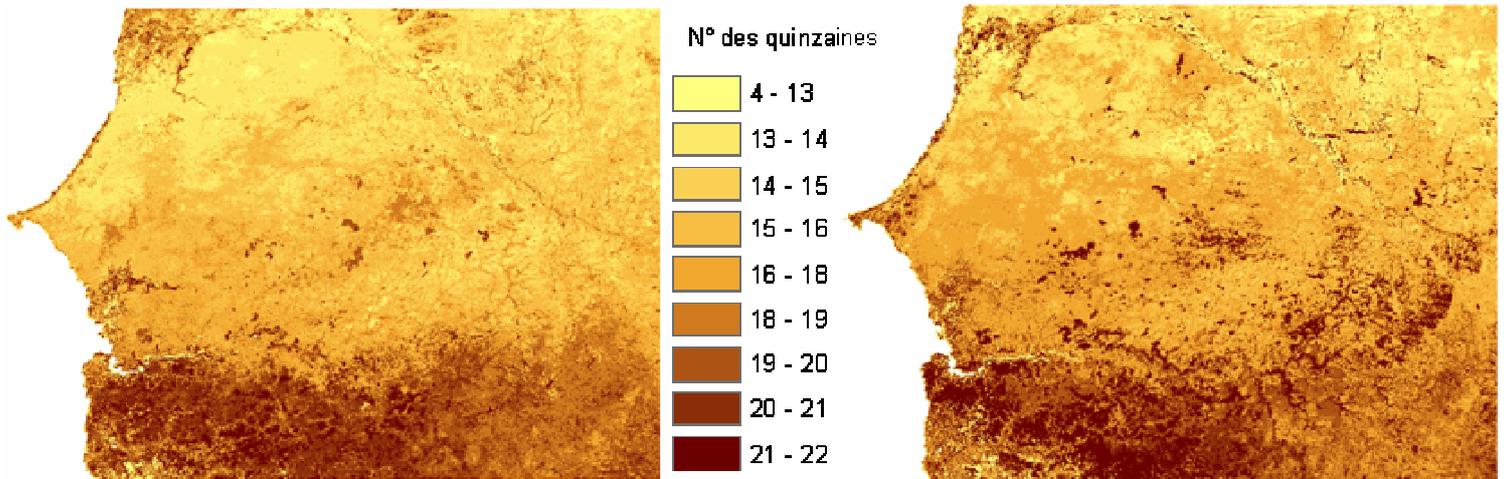
Paramètres phénologiques des courbes temporelles NDVI des images Modis Végétation



2004

Date de la fin du cycle d'activité chlorophyllienne

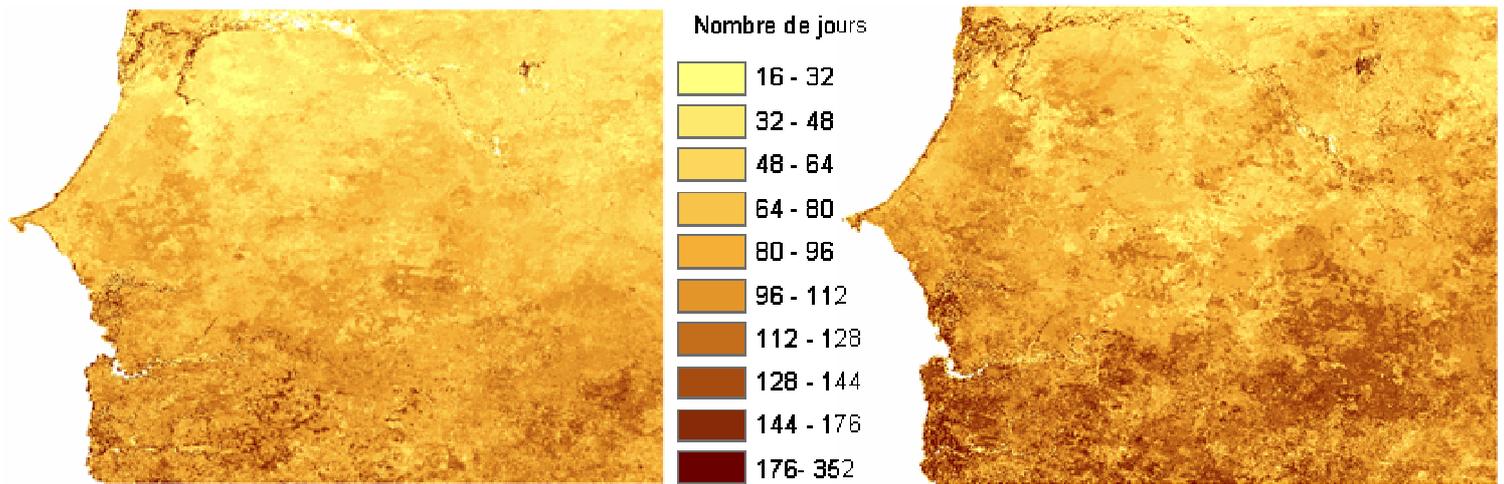
2005



2004

Longueur de la période de croissance, augmentation en biomasse verte

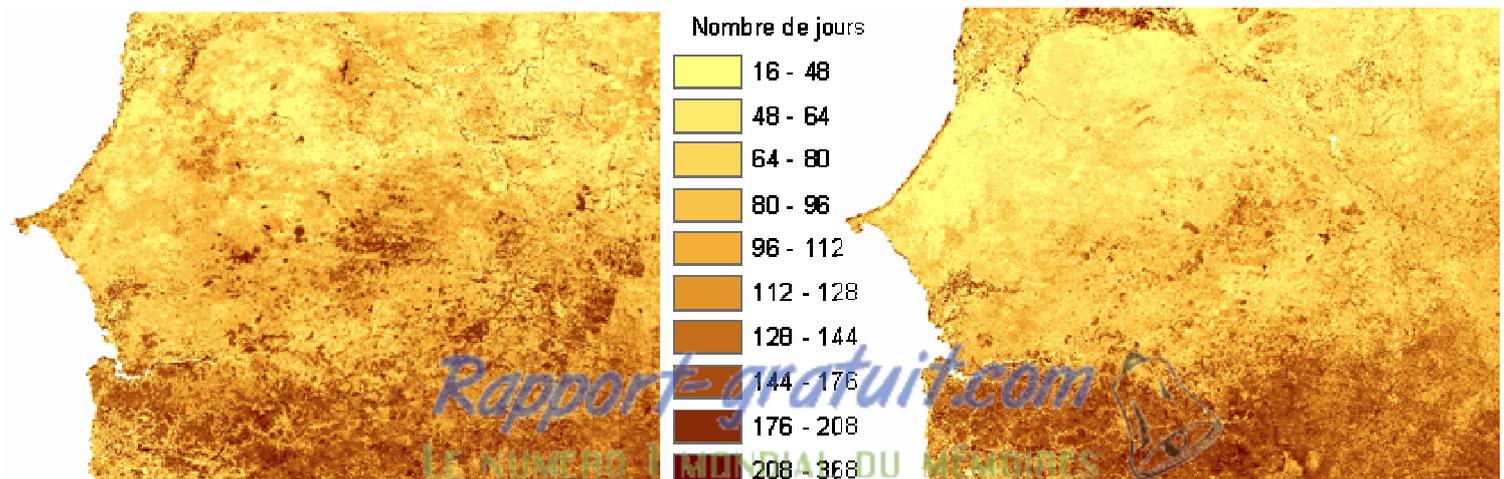
2005



2004

Longueur de la période de sénescence, diminution en biomasse verte

2005

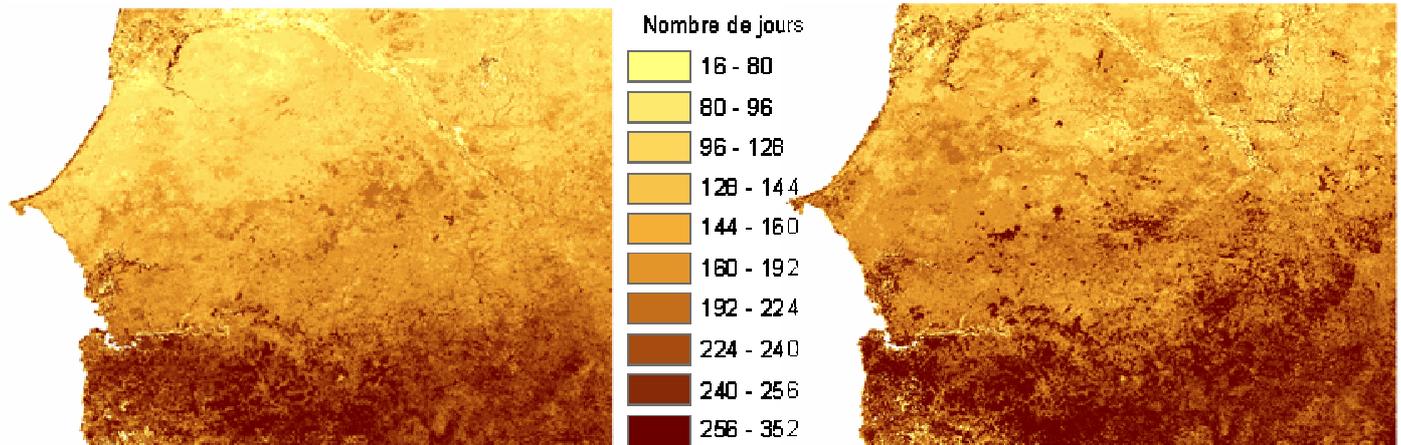


Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MEMOIRE

durée totale du cycle d'activité chlorophyllienne (croissance, maturité, sénescence)

2004

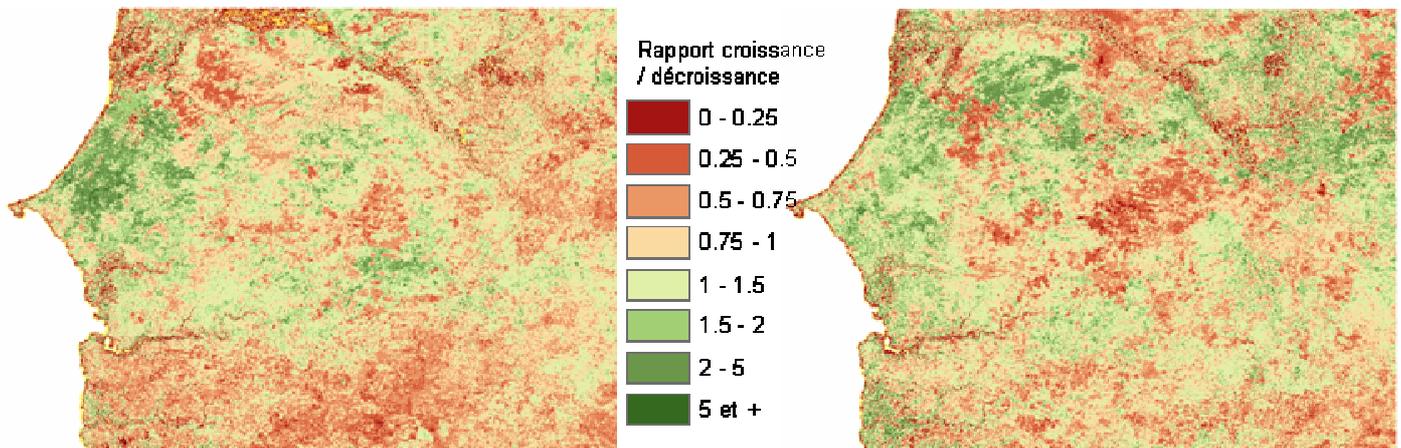
2005



Rapport croissance / décroissance

2004

2005



Tableaux de correspondance entre n° de quinzaine et date

	N° quinzaine	Date début quinzaine		N° quinzaine	Date début quinzaine
2004	1	21/03/04	2005	1	22/03/05
	2	06/04/04		2	07/04/05
	3	22/04/04		3	23/04/05
	4	08/05/04		4	09/05/05
	5	24/05/04		5	25/05/05
	6	09/06/04		6	10/06/05
	7	25/06/04		7	25/06/05
	8	11/07/04		8	12/07/05
	9	27/07/04		9	28/07/05
	10	12/08/04		10	13/08/05
	11	28/08/04		11	29/08/05
	12	13/09/04		12	14/09/05
	13	29/09/04		13	30/09/05
	14	15/10/04		14	16/10/05
	15	31/10/04		15	01/11/05
	16	16/11/04		16	17/11/05
	17	02/12/04		17	03/12/05
	18	18/12/04		18	19/12/05
	19	01/01/05		19	01/01/06
	20	17/01/05		20	17/01/06
	21	02/02/05		21	02/02/06
	22	18/02/05		22	18/02/06
	23	06/03/05		23	06/03/06

II.2.3. Analyse des différences phénologiques

L'observation des profils temporels de NDVI et l'analyse des cartes ont révélé des informations importantes pour la suite de l'étude :

- Dans le Nord-Ouest du pays, l'activité végétale, traduite par les valeurs de NDVI, a été beaucoup plus faible en 2004 qu'en 2005. Les profils temporels de NDVI en 2004 dans certaine zone sont « écrasés » (cf. figure 21). Mbaye Diop, chercheur à l'Institut Sénégalais de Recherches en Agronomie (ISRA) au Laboratoire d'Etudes et de Recherches en Géomatique (LERG), en visite au CIRAD, a expliqué cette particularité par l'invasion de criquets qui a eu lieu pendant la saison agricole 2004. Cette information est importante pour la suite des traitements car les données de 2004 ne pourront pas être utilisées dans certaines zones.

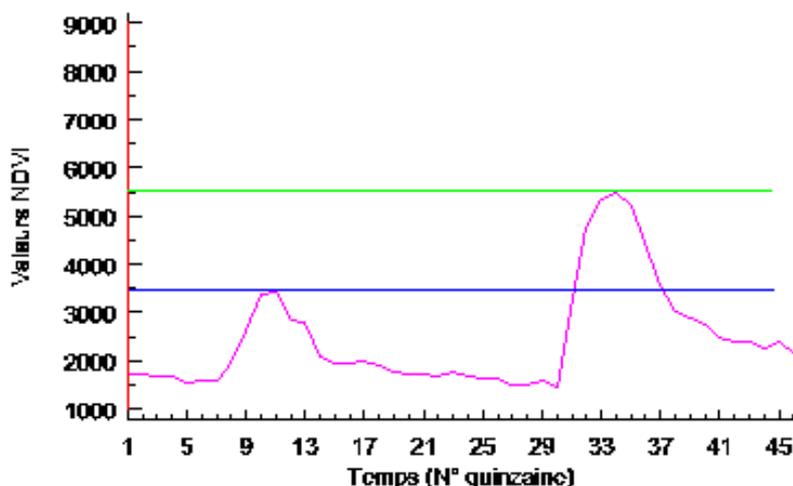


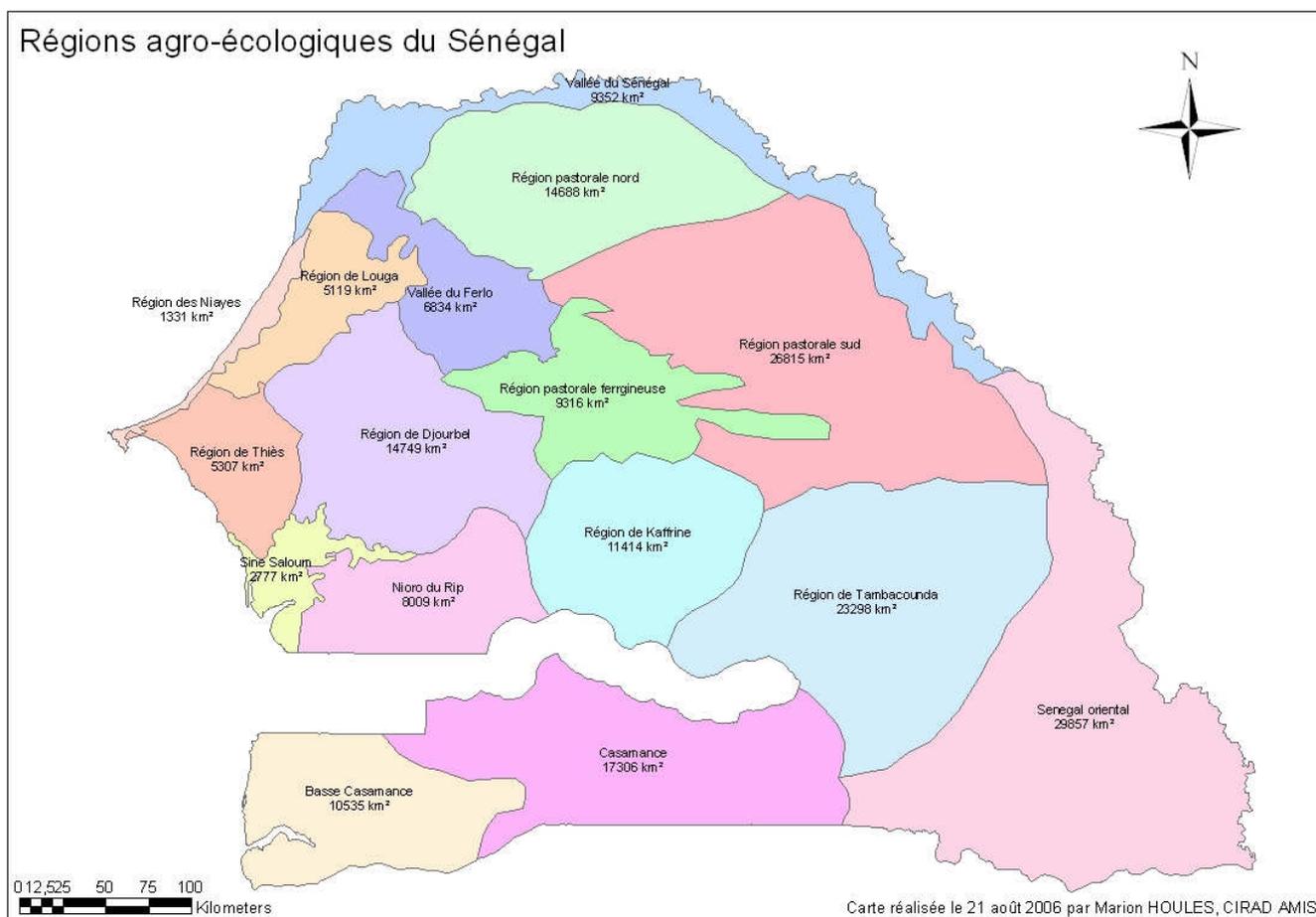
Figure 21 : Profil temporel de NDVI d'un pixel touché par l'invasion acridienne en 2004

- L'activité végétale, en terme de production chlorophyllienne traduite par la valeur maximale de NDVI et en terme de longueur du cycle d'activité, est plus importante au Sud. Ce gradient Nord / Sud semble corrélé parfaitement aux isohyètes.
- La maturité végétale, traduite par la date où le maximum de NDVI a été atteint, est plus précoce à l'est qu'à l'ouest.
- Les zones de cultures, notamment le bassin arachidier oriental et les fonds de vallons, présentent une période de croissance plus longue que leur période de sénescence, exprimé par des rapports croissance / décroissance supérieurs à 1 et le plus souvent supérieurs à 1,5.

I.3. Classifications et réajustements de la stratification

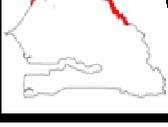
Pour chacune des zones agro-écologiques obtenues par la stratification, une classification spatio-temporelle sur les images Modis a été réalisée. La classification spatio-temporelle permet de regrouper au sein d'une même classe les pixels présentant un comportement temporel similaire. La méthode de classification sera présentée dans la partie III.1.

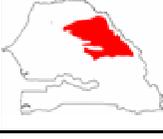
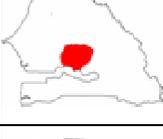
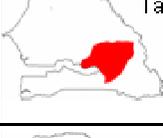
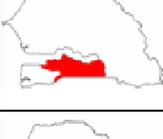
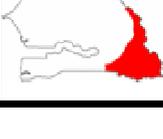
Chaque classification a ensuite été analysée brièvement pour détecter les éventuelles confusions entre les formations végétales dues à l'hétérogénéité du milieu. Suivant le degré de confusion, la délimitation de la zone agro-écologique a été modifiée pour améliorer son homogénéisation. C'est donc cet aller retour permanent entre stratification et classifications qui a permis d'aboutir à une stratification définitive du territoire Sénégalais en 16 zones agro-écologiques homogènes (cf. carte 4 et tableau 6).



Carte 4 : Régions agro-écologiques du Sénégal

Tableau 6 : Caractéristiques biophysiques des régions agro-écologiques du Sénégal

Eco-régions	Climat / Pluviométrie	Géomorphologie	Sols prédominants	Végétation prédominante	Activités humaines dominantes	Caractéristiques phénologiques des cultures
 Les Niayes	Climat : Sahelo-soudanien côtier Pluviométrie : 200-400 mm	géomorphologie littorale avec dunes et dépressions inter-dunaires, appelées niayes	Sols sableux ferrugineux tropicaux. Sols peu développés	Savane arbustive	Quelques cultures horticoles	-
 Thiès	Climat : Sahelo-soudanien côtier Pluviométrie : 300-500 mm	Formations littorales et éoliennes sur la côte et plateaux, dépressions dans les terres	sols ferrugineux tropicaux non ou peu lessivés, sols calcimorphes	Cultures et savanes arbustives	Agriculture : arachide et mil	Max NDVI : 0,4 Début saison : Début juillet Fin saison : Mi décembre Longueur saison : 160 jours Croissance / décroissance : 1,3
 Louga	Climat : Sahelo-soudanien côtier Pluviométrie : 200-400 mm	Formations éoliennes issues d'un erg récent	sols brun rouge subarides et sols ferrugineux tropicaux non ou peu lessivés	Cultures	Agriculture : arachide et mil	Max NDVI : 0,45 Début saison : Fin juin Fin saison : Début décembre Longueur saison : 160 jours Croissance / décroissance : 1,2
 Djourbel	Climat : Sahelo-soudanien continental Pluviométrie : 300-600 mm	Formations éoliennes : dunes de l'intérieure	Sols ferrugineux tropicaux non ou peu lessivés	Cultures	Agriculture : arachide et mil	Max NDVI : 0,5 Début saison : Fin juin Fin saison : mi novembre Longueur saison : 140 jours Croissance / décroissance : 1,1
 Sine-Saloum	Climat : Soudanien côtier Pluviométrie : 700-900 mm	Basse plaine deltaïque avec un importants réseau de drainage. Vasières anclennes et récentes	sols hydromorphes organiques et sols halomorphes salins	Savanes arbustives, tannes et mangroves	Économie faible : production de sel, d'arachide, pêche et tourisme	Max NDVI : 0,6 Début saison : Début juin Fin saison : Début janvier Longueur saison : 200 jours Croissance / décroissance : 1
 Nioro du Rip	Climat : Soudanien côtier Pluviométrie : 600-700 mm	Basses plaines et cuvettes issues d'un ancien système dunaire du bassin sédimentaire continental.	Sols ferrugineux tropicaux lessivés et sols ferralitiques; sables sablon-mameux	Cultures et savanes boisées	Agriculture : arachide	Max NDVI : 0,7 Début saison : Fin juin Fin saison : Début décembre Longueur saison : 160 jours Croissance / décroissance : 1
 Vallée du Ferlo	Climat : Sahelo-soudanien Pluviométrie : 200-400 mm	Formations éoliennes : dunes de l'intérieur et de la côte	Sols brun rouge subarides intergrades ferrugineux et sols ferrugineux tropicaux non ou peu lessivés	Steppes arbustives et arborées	Pastoralisme – Quelques cultures	Max NDVI : 0,5 Début saison : Début juin Fin saison : Mi décembre Longueur saison : 190 jours Croissance / décroissance : 1
 Vallée du Sénégal	Climat : Sahélien continental Pluviométrie : 200-500 mm	Large vallée alluviale avec un système de digues, plaines et dépressions inondables.	Sols hydromorphes et vertiques avec une texture de limon argileux sableux.	Steppes ouvertes, steppes arbustives, forêts d'acacia	agriculture de subsistance, hydro-agriculture : riz, canne à sucre. Cultures de décrue et irriguées	Pas de caractéristiques types car nombreuses cultures différentes

Eco-régions	Climat / Pluviométrie	Géomorphologie	Sols prédominants	Végétation prédominante	Activités humaines dominantes	Caractéristiques phénologiques des cultures
 Région sylvo-pastorale Nord	Climat : Sahélien continental Pluviométrie : 150-300 mm	Formations éoliennes pénéplanées issues d'un ancien erg formé durant le milieu du quaternaire.	Sols bruns rouges et ferrugineux tropicaux	Steppes arbustives ouvertes et prairies	Pastoralisme. Très peu de cultures	-
 Région sylvo-pastorale ferrugineuse	Climat : Sahélien continental et sahelo-soudanien Pluviométrie : 300-600 mm	Plateaux gréseux du bassin sédimentaire continental, disséqués par des vallées d'un ancien réseau de drainage	Les sols peu épais et souvent gravillonnaires sur latérite (roche rouge ou brune issue de l'altération des roches).	Savane arbustive et arborée	Pastoralisme. Très peu de cultures	-
 Région sylvo-pastorale Sud	Climat : Sahelo-soudanien continental Pluviométrie : 300-500 mm	Formations éoliennes pénéplanées issues d'un ancien erg formé durant le milieu du quaternaire	Lithosols sur cuirasse	Savane arbustive et arborée	Pastoralisme. Très peu de cultures	-
 Kafrine	Climat : Soudanien continental et soudano-guinéen Pluviométrie : 600 - 1100 mm	Plateaux, buttes, versants, glacis issus du « Continental terminal »	Sols ferrugineux tropicaux lessivés, régosols. Matériaux gravillonnaires, sableux et alluviaux	Savanes arborées et boisées. Cultures sur versants, pentes et glacis	Agriculture (arachide, coton)	Max NDVI : 0,65 Début saison : Début juin Fin saison : Mi décembre Longueur saison : 190 jours Croissance / décroissance : 0,9
 Tambacounda	Climat : Soudanien continental Pluviométrie : 500 - 800 mm	Important réseau de bas fonds qui dissèque les plateaux gréseux du bassin sédimentaire continental	lithosols sur cuirasse et régosols sur matériau gravillonnaire sur plateaux et sols ferrugineux tropicaux dans vallées et terrasses	Savanes boisées et arborées. Quelques zones de cultures en fond de vallées	Agriculture sur terrasses colluvio-alluviales et versants.	Max NDVI : 0,75 Début saison : Mi mai Fin saison : Mi décembre Longueur saison : 220 jours Croissance / décroissance : 1
 Basse Casamance	Climat : Soudano-guinéen côtier Pluviométrie : 900 - 1400 mm	Zone estuarienne et plateaux du bassin sédimentaire continental disséqués par de larges vallées	Sols hydromorphes, sols faiblement ferrallitiques et sols ferrugineux tropicaux lessivés. Sols peu évolués	Mangroves, savanes boisées, forêts claires et cultures	Riziculture, arachide et d'autres céréales (ml, maïs), tubercules (manioc, patates douces) et cultures fruitières.	Max NDVI : 0,75 Début saison : Début mai Fin saison : Mi février Longueur saison : 290 jours Croissance / décroissance : 1
 Casamance	Climat : Soudano-guinéen continental Pluviométrie : 900 - 1300 mm	Plateaux et buttes résiduels du bassin sédimentaire continental disséqués par de larges vallées	Sols faiblement ferrallitiques; sols ferrugineux tropicaux lessivés; sols peu évolués et sols hydromorphes	Savanes arborées et boisées, forêts claires sèches et cultures	Riziculture, arachide et d'autres céréales (ml, maïs), tubercules (manioc, patates douces) et cultures fruitières.	Max NDVI : 0,8 Début saison : Début juin Fin saison : Mi janvier Longueur saison : 230 jours Croissance / décroissance : 1
 Sénégal Oriental	Climat : Soudanien continental Pluviométrie : 600 - 1200 mm	Formations sur roches primaires ou volcano-sédimentaire ancienne Plateaux, collines, terrasses issues de l'érosion du bouclier précambrien..	Lithosols sur cuirasse et régosols sur matériaux gravillonnaires	Forêt dense semi-sèche (savane arborée). Quelques cultures vivrière (maïs, sorgho, arachide, riz)	Tourisme (parc national du Niokolo-Koba)	-

III. Spatialisation, interprétation et signification des classes Modis

Au cours de la dernière étape de stratification, les classifications spatio-temporelles ont été réalisées pour permettre le réajustement du découpage en fonction du degré de confusion. La méthode utilisée pour classer les pixels temporels est la classification par nuée dynamique. Cette technique permet de regrouper les pixels ayant un même comportement temporel caractéristique de l'activité chlorophyllienne. De cette information phénologique spatialisée, il faut alors passer à une information « thématique » spatialisée, c'est-à-dire associer aux classes temporelles un type de formation végétale et tenter d'identifier les classes représentatives du domaine cultivé.

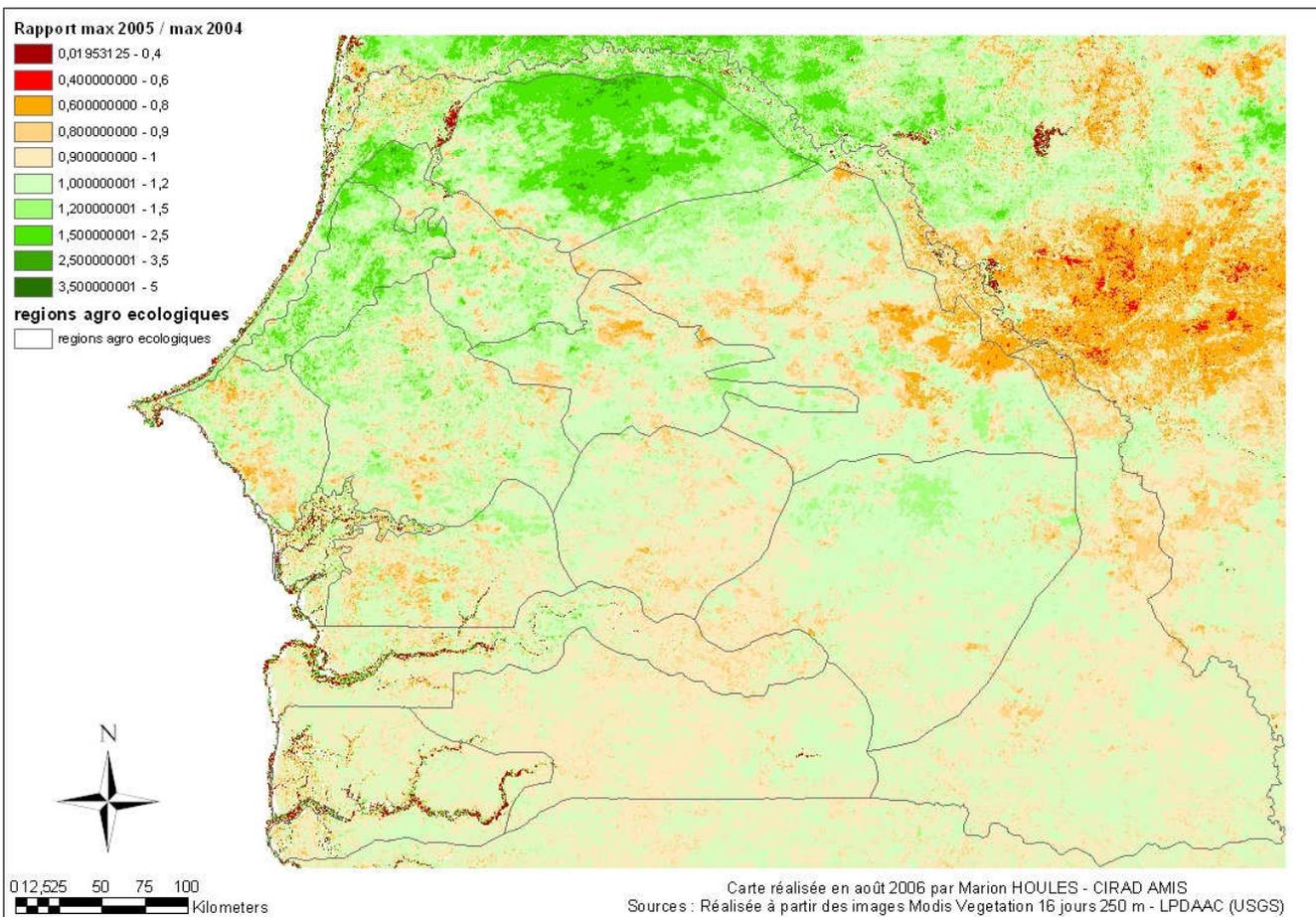
III.1. Classifications par nuées dynamiques

Le jeu de données Modis correspond à une collection de « pixels temporels » caractérisés par leur profil temporel propre. Il s'agit alors de procéder à un classement de ces pixels et d'en donner une représentation spatiale, qui exprime l'évolution phénologique des différents types de couverts végétaux. La procédure choisie pour classer les « pixels temporels » est la classification par nuées dynamiques mise au point par Viovy N., (1990). C'est une classification entièrement automatique qui ne nécessite aucune information extérieure.

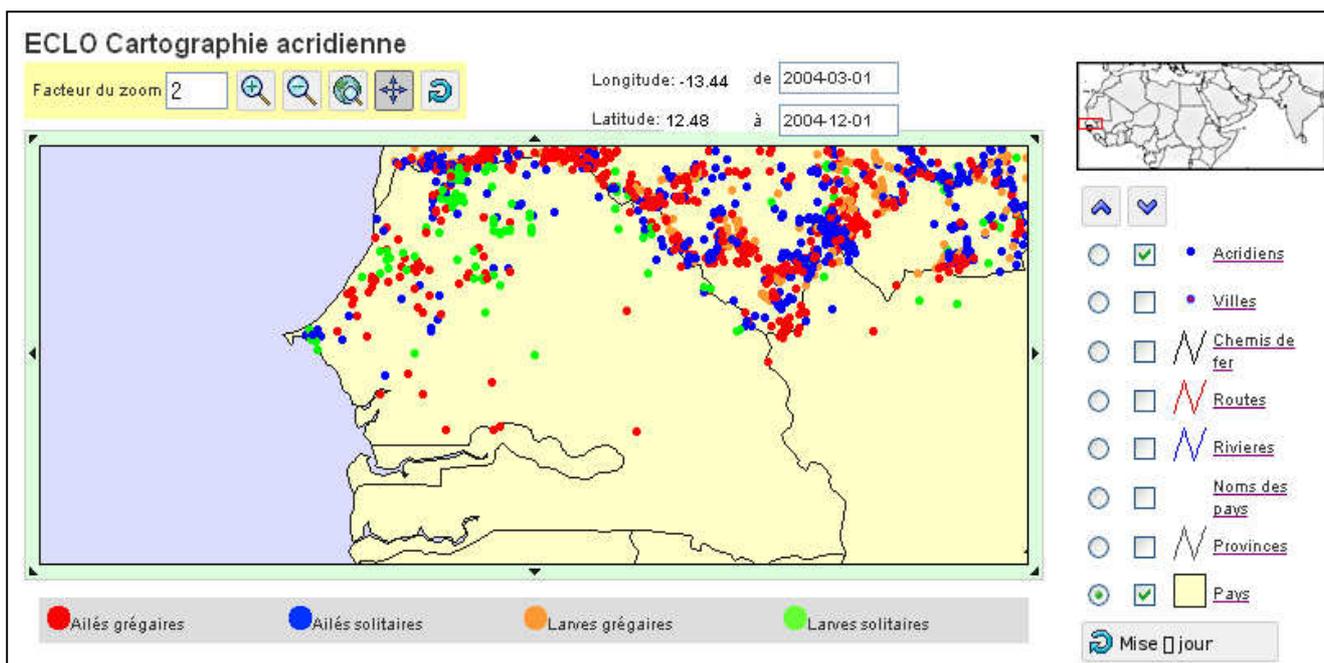
Cette méthode permet de délimiter des groupes de pixels ayant des comportements temporels homogènes. Mise au point pour classer les données multitemporelles, la méthode consiste à projeter chaque pixel dans autant de dimensions qu'il y a d'acquisitions temporelles. Il en résulte un nuage vectoriel de points. L'algorithme calcule ensuite le centre de gravité du nuage, puis une séparation dichotomique est appliquée dans la direction d'allongement maximale. Le nuage de points se trouve alors scindé en deux. Un nouveau calcul des centres de gravité des deux nouveaux nuages est opéré. Puis de nouveau, une séparation de chacun des nuages est effectuée et ainsi de suite. Plusieurs itérations du modèle sont nécessaires pour bien délimiter les groupes homogènes (Gond, 1995)

En général, les classifications spatio-temporelles ont été réalisées sur une période de 2 ans, mais pour certaines régions agro-écologiques la classification a été effectuée uniquement sur l'année 2005. En effet, comme cela a été constaté lors de l'analyse des différents paramètres phénologiques, certaines zones ont été touchées en 2004 par une invasion acridienne qui a dévasté le milieu naturel. Les profils temporels de l'année 2004 des pixels touchés par cette invasion sont inutilisables pour les classifications. La carte du rapport « valeur maximum de NDVI en 2005 sur valeur maximum de NDVI 2004 » (cf. carte 5) ajoutée à la carte d'invasion acridienne (cf. carte 6) de l'observatoire acridien de la FAO (Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture) permet de rendre compte de la situation acridienne en 2004 et d'identifier les zones touchées. Cinq régions agro-écologiques ont ainsi été identifiées comme infestées par les criquets en 2004 : la région des Niayes, de Louga, de Djourbel, la vallée du Ferlo et la région sylvo-pastorale Nord. Pour

ces régions, la classification spatio-temporelle s'est donc effectuée uniquement sur les données de 2005



Carte 5 : Carte du rapport entre la valeur maximum enregistrée en 2005 et celle enregistrée en 2004



Carte 6 : Carte d'invasion acridienne au Sénégal en 2004 - Observatoire acridien de la FAO

Le nombre de classes pour chaque région agro-écologique a varié selon le degré d'hétérogénéité du milieu. Pour une région agro-écologique relativement homogène où les parcelles agricoles sont rassemblées, une vingtaine de classes a été réalisée. Par contre, si la région agro-écologique présente de nombreux milieux naturels ou si les parcelles agricoles sont éparées et se mélangent à de la végétation naturelle, le nombre de classe est doublé, soit une quarantaine de classes. Cela permet de discriminer un plus grand nombre d'éléments.

A chaque classe correspond un profil temporel de NDVI moyen. C'est à partir de ces profils moyens et des images haute résolution que les classes correspondant au domaine cultivé seront identifiées (cf. cahier annexe D « Classifications des régions agro-écologiques et profils temporels »).

III.2. Interprétations des classifications

A ce stade de l'étude, 16 classifications spatio-temporelles correspondant aux 16 régions agro-écologiques ont été réalisées. Il s'agit maintenant d'interpréter thématiquement les classes et d'identifier celles qui représentent le domaine cultivé. Mais, cette interprétation est extrêmement délicate, en raison de la nature même des données Modis. En effet, la résolution spatiale des images Modis est de 250 m, c'est-à-dire qu'il n'est pas possible d'identifier des objets ayant une superficie inférieure à $250 \text{ m} \times 250 \text{ m}$, soit 62500 m^2 . Or, les parcelles agricoles au Sénégal sont généralement inférieures à 0,5 ha (5000 m^2). Il faut donc une douzaine de parcelles regroupées pour composer un pixel de culture « pur ». La plupart du temps, les parcelles se regroupent en îlots autour des villages ou dans les fonds de vallons. Mais, elles se mélangent souvent à de la végétation naturelle ou même à des terres en jachères. Les pixels en résultant sont des pixels mixtes, ou mixels.

Il a donc été décidé de trier les classes selon trois catégories : classes de « cultures », classes de « cultures mélangées à la végétation naturelle » et classes « autres ». Sera considéré comme « cultures » toutes les classes constituées de plus de 80% de cultures. A partir de ce taux, on considère que la végétation naturelle n'a que très peu d'influence sur le profil temporel de NDVI moyen. Les classes « cultures mélangées à la végétation naturelle » représentent les espaces composés de + de 50% et – de 80% de cultures. Le reste est représenté par de la végétation naturelle. Les classes « autres » regroupent tous les autres types d'occupation du sol.

L'arrangement de chaque classe dans l'une des catégories a nécessité une comparaison visuelle des classifications avec les images haute résolution et une analyse des courbes temporelles de chaque classe.

III.2.1. Identification par photo-interprétation des classes représentatives du domaine cultivé

Dans un premier temps, la méthode utilisée pour l'identification des classes Modis représentative du domaine cultivé a été l'analyse comparative des classifications spatio-temporelles et des images haute résolution Landsat ETM+ et quickbird.

En réalité, deux possibilités ont été envisageables pour dégager des relations entre les classes Modis et les images haute résolution, l'analyse comparative visuelle et l'analyse comparative automatique des deux plans cartographiques.

L'analyse comparative automatique consiste à effectuer des classifications spatiales sur les images Landsat, puis à déterminer la répartition des classes Landsat dans les classes Modis. Cette méthode permet d'obtenir des indicateurs d'homogénéité pour les classes Modis et ainsi d'identifier leur contenu. Il est par exemple possible de dégager des informations du type : la classe 3 Modis est constituée de 82% de classes 6 Landsat, soit 82% de cultures. Malheureusement, faute de temps cette méthode très intéressante n'a pas pu être testée. En effet, il aurait fallu réaliser plus d'une trentaine de classifications spatiales sur les images Landsat, résultat du croisement des seize régions agro-écologiques et des douze images Landsat. En effet, ces dernières étant acquises à des dates différentes et donc dans des conditions différentes, il était nécessaire de réaliser une classification par image et par région agro-écologique, soit 32 classifications.

Cette analyse comparative s'est donc effectuée visuellement, par photo-interprétation. La photo-interprétation est un procédé qui consiste à identifier des objets à partir de l'analyse de leurs caractéristiques tels que la forme, la couleur, la texture, la structure, la taille ou encore l'environnement. La photo-interprétation manuelle, telle qu'elle a été réalisée dans cette étude, permet l'introduction de déductions logiques possibles grâce à l'expérience de l'interprète. Par exemple, dans les zones sahéliennes comme le Sénégal, il est possible de localiser des îlots de cultures à partir de l'emplacement des villages. En effet, les cultures forment généralement des îlots circulaires autour des villages.

Le procédé utilisé pour attribuer à chaque classe spatio-temporelle une catégorie (cultures, cultures + végétation ou autres) s'est donc basé sur un simple lien géographique entre les classifications Modis et les images haute résolution Landsat ETM+. Par photo-interprétation, il a donc été possible de déterminer le milieu naturel dominant dans chaque classe.

III.2.1.1. Les critères pour l'identification des cultures

Que ce soit sur les plateaux, sur les formations dunaires, ou sur les pentes et glacis, le parcellaire agricole se distingue généralement bien sur les images haute résolution. Il est donc possible d'identifier les cultures à partir de leur **forme**.

Le critère de l'**environnement spatial** est aussi très important pour identifier les cultures. Comme cela a été précisé précédemment, les cultures se regroupent le plus souvent autour des

villages et il est souvent possible d'apercevoir un réseau de chemins en étoile partant du village (cf. figure 22). En Casamance et dans les régions de Kaffrine et Tambacounda, les cultures se concentrent sur les pentes et glacis d'épandage, le long des réseaux hydrographiques (cf. figure 23).

Les images haute résolution Landsat ETM+ et quickbird de GoogleEarth© ont été prises en fin de saison des pluies et début de saison sèche. Les cultures sont alors en fin de sénescence et le sol est quasiment dénudé de végétation. Le sol, généralement très réfléchissant intervient donc considérablement dans la signature spectrale des cultures, celles-ci présentent alors une **couleur** plutôt clair sur les images haute résolution quickbird. Sur une composition colorée RGB Landsat PIR / R / V, composition utilisée pour la photo-interprétation, elles arborent une teinte cyan clair tendant vers le rose pâle (cf. figure 25). Dans les régions plus arrosées, où la saison agricole est plus longue, elles sont encore en activité végétale est présente plutôt une couleur rosé.

Si le plus souvent, les cultures présentent une **texture** plutôt lisse, on peut cependant quelque fois apercevoir des stries ou rayures qui correspondent aux résidus des récoltes. (cf. figure 23)

La taille des parcelles agricoles est très variable et dépend du type de culture et du mode d'exploitation (production familiale, exploitation de marabout, production commerciale). Mais, la taille moyenne des parcelles est de 0,5 ha.

Enfin, un autre moyen, plus archaïque, d'identifier les cultures est l'élimination des autres types de formations végétales souvent plus facile à distinguer. Les savanes boisées et arborées, à la texture granuleuse, sont facilement reconnaissables par leur couleur rouge vif sur les compositions colorées Landsat PIR/R/V. Souvent, la végétation herbacée naturelle se distingue des cultures par la présence de termitières qui forment des auréoles blanches sur les images (cf. figure 28 et 29).

C'est donc cet ensemble de critères ajouté à la connaissance de l'organisation agricole du Sénégal qui a permis d'identifier les zones de cultures et d'attribuer aux classes Modis une des trois catégories : « cultures », « cultures mélangées à de la végétation naturelle » ou « autres »

III.2.1.2. Les difficultés rencontrés lors de la photo-interprétation

La photo-interprétation est un travail long et fastidieux qui nécessite une certaine connaissance du terrain pour comprendre et identifier ce qui ressort visuellement des images satellites. Un apprentissage du « Sénégal », les systèmes culturels, les traditions, l'organisation communautaire et autres modes de vie a donc été nécessaire avant et pendant l'interprétation. Cet apprentissage s'est déroulé au travers de documents, de discussions ou encore de photographies.

La photo-interprétation n'a pas toujours été aisée et certaines difficultés sont venues gêner l'interprétation des classes Modis. Dans le bassin arachidier central, autour de Djourbel, les cultures sous pluies telle que l'arachide sont couvertes d'Acacia. Suivant le taux de recouvrement, plus ou moins dense, le parcellaire agricole a du mal à se distinguer et il n'est pas toujours évident de différencier cultures et végétation naturelle (cf. figure 26 et 27).

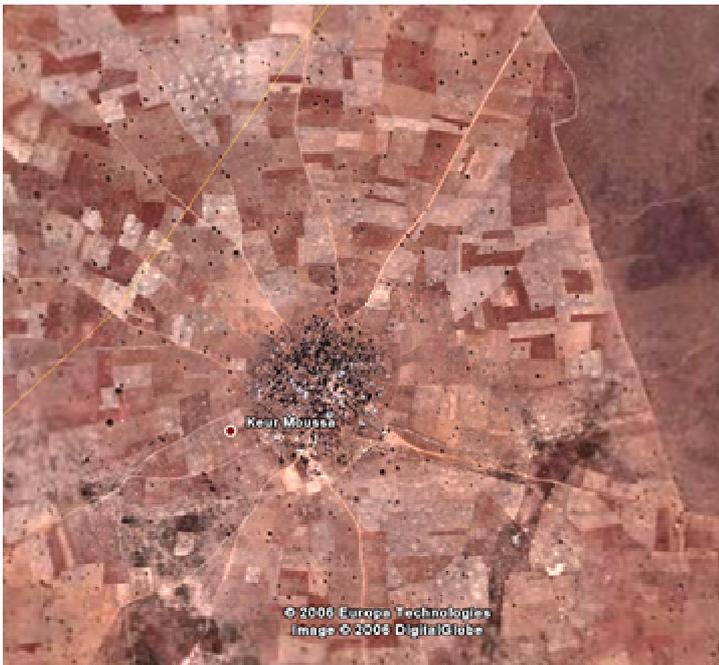


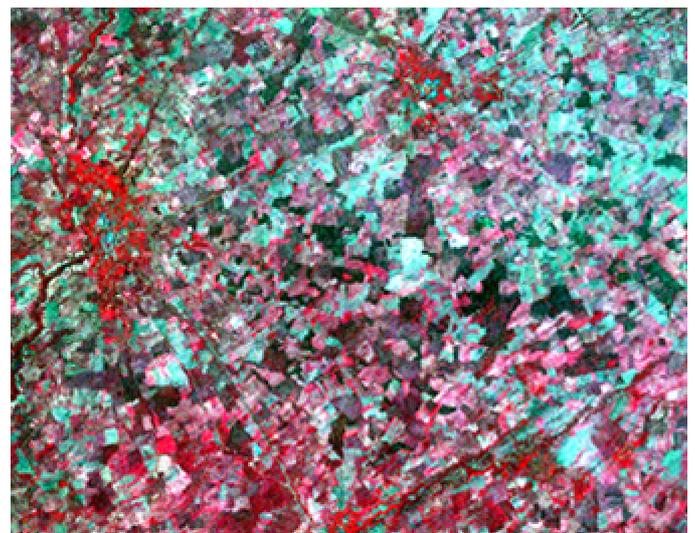
Figure 22 : Cultures et réseau de chemin en étoile autour du village de Keur Moussa



Figure 23 : Cultures le long du réseau hydrographique en Casamance



Figure 24 : Résidus de récoltes dans la région du Nioro du Rip



**Figure 25 : Cultures sur composition colorée
RGB : PIR / R / V**



Figure 26 et 27: Cultures pluviales sous parc arboré d'Acacia

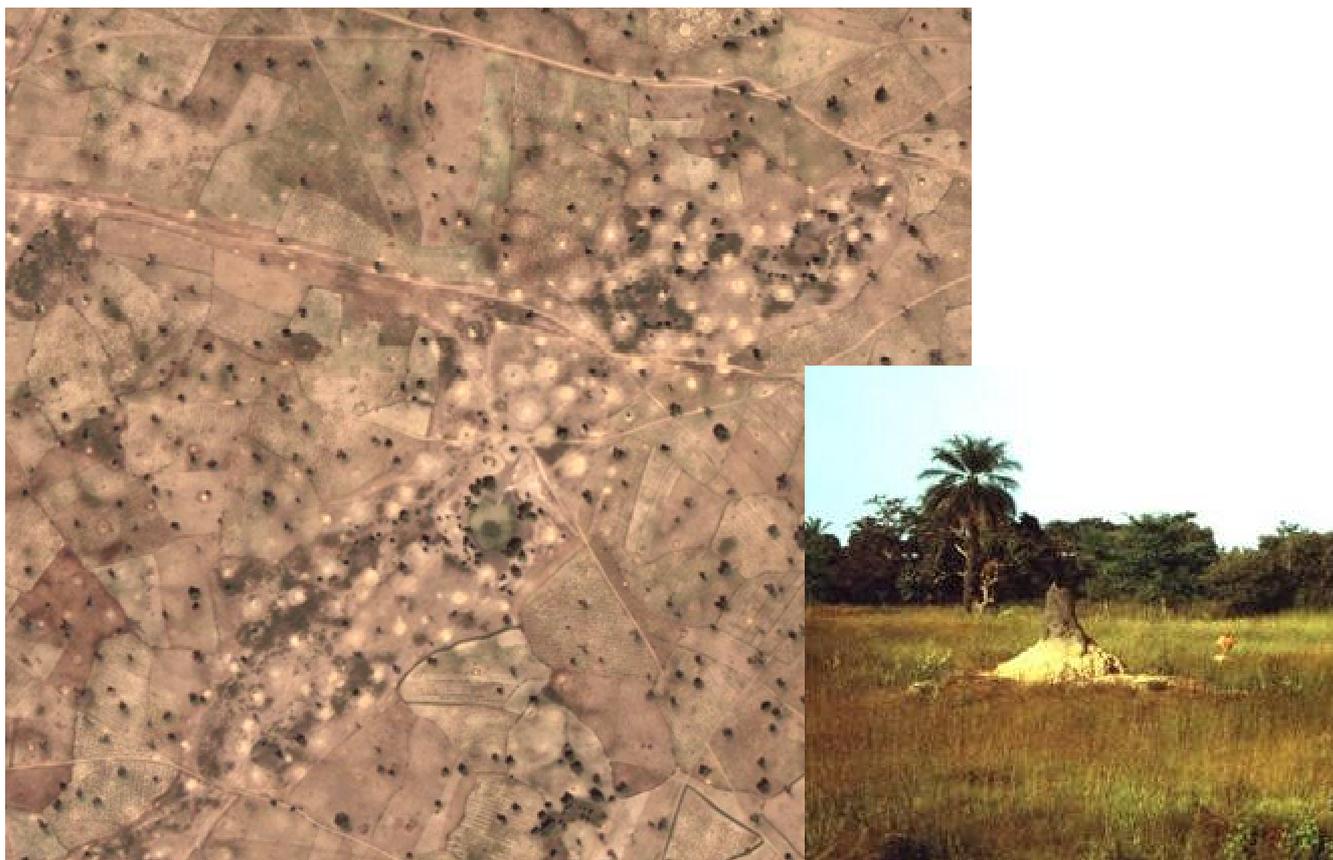


Figure 28 et 29: Cultures et termitières sur végétation naturelle

III.2.2. Analyse discriminante des courbes de comportement temporel

Parallèlement à l'analyse comparative par photo-interprétation, une analyse des profils temporels de NDVI de chaque classe a été réalisée. Cette analyse a permis dans certain cas de lever des doutes ou d'en d'autres de raviser un jugement établi lors de la photo-interprétation.

La première étape de l'analyse a été de comprendre le comportement phénologique des cultures pour tenter d'identifier les profils temporels pouvant correspondre à ce comportement ou éliminer ceux qui s'en éloignent. Bien évidemment l'évolution phénologique sera différente selon le type de culture et l'on ne peut pas dégager un profil type pour toutes les cultures du Sénégal. La riziculture, culture semi aquatique, présente par exemple un comportement phénologique bien particulier puisque elle est la moitié du temps sous l'eau. Cependant, on s'est tout de même intéressé au comportement phénologique des cultures sous pluie qui dominent largement au Sénégal.

Au Sénégal, comme dans tous les pays du Sahel, le développement végétatif des cultures est tributaire des précipitations. Une pluie supérieure à 20 mm est suffisante pour permettre la germination des semis des cultures pluviales (mil, sorgho, arachide, niébé, etc.). Si la période immédiate après le semis est favorable, bonne humidité du sol, alors la culture peut commencer sa croissance. (Soumaré P.B., Martini M.,). Du fait que les cultures doivent emmagasiner une plus

grande quantité d'énergie pour germer, le début de leur croissance végétale est généralement plus lent que celui de la végétation naturelle environnante. Puis, la période de croissance qui suit est généralement régulière avant d'atteindre leur stade de maturité où la production végétale sature. A partir de ce moment là, les récoltes commencent et l'activité végétale chute donc brutalement. La végétation restante après récolte décline alors lentement.

Selon ces informations, on peut penser que les cultures pluviales présentent un profil temporel de NDVI ressemblant au profil type ci-dessous (cf. figure 30) : une première partie ascendante plutôt concave dû à une croissance d'abord lente puis plus rapide, puis une deuxième partie régulière, une troisième phase légèrement convexe due au ralentissement de la croissance en période de maturité, puis une première phase descendante assez rapide après la récolte et enfin une dernière phase de décroissance lente et régulière.

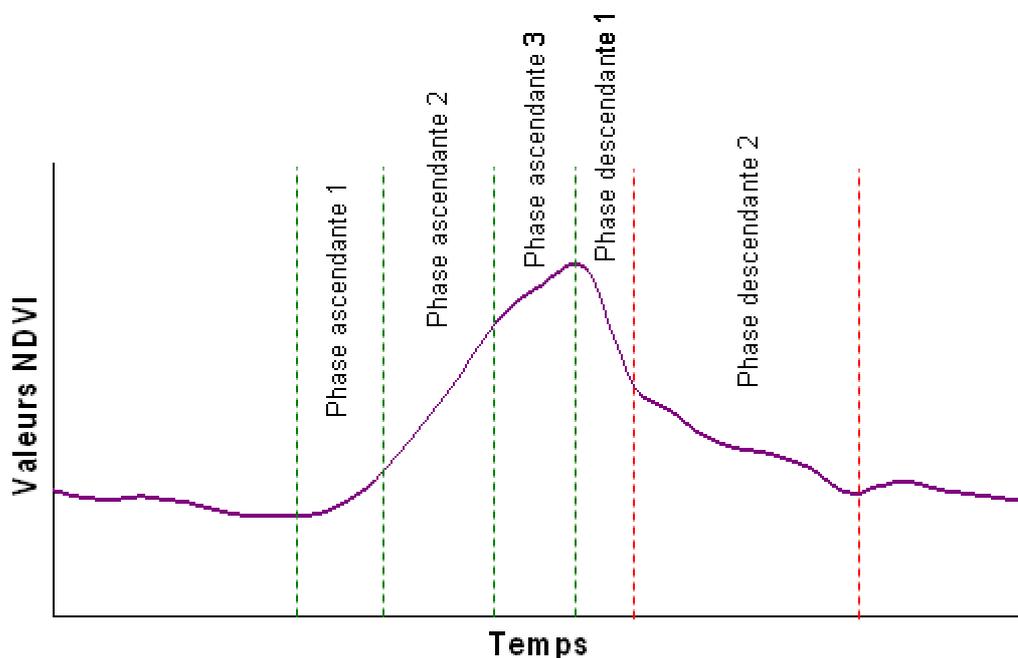


Figure 30 : Profil temporel de NDVI type d'une culture sous pluie

A partir de ce profil type, il a été possible d'éliminer toutes les classes représentées par des courbes temporelles totalement éloignées de celle-ci. Des précautions ont été prises pour les régions à cultures irriguées ou de décrue qui peuvent présenter des profils différents. La difficulté principale de cette analyse discriminante a été l'examen des profils temporels des classes de cultures dites « mixtes » ou mélangées à la végétation naturelle. C'est donc l'analyse parallèle par photo-interprétation et des profils temporels qui a permis l'identification des classes de cultures et de cultures mélangées.

IV. Analyse et validation des résultats

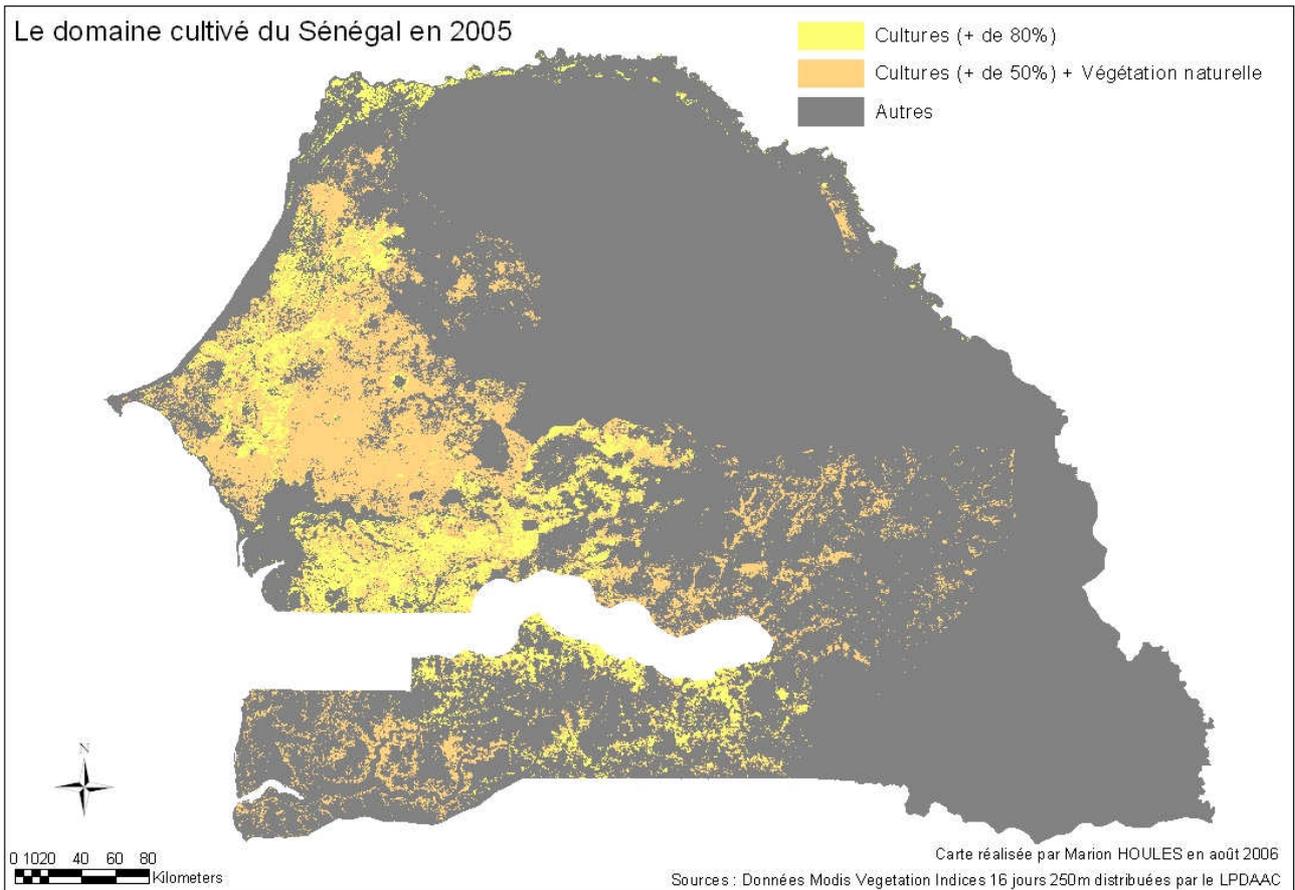
L'identification des classes « cultures » et « cultures mélangées à la végétation naturelle » a permis la réalisation de la carte du domaine cultivé en 2005. (cf. carte 7).

Malheureusement, faute de temps la validation de la méthode et des résultats n'a pas pu encore être effectuée. Cette validation doit de faire dans les prochains jours à partir d'images haute résolution quickbird et de statistiques agricoles dont dispose le CIRAD AMIS sur deux sites test du Sénégal : Djourbel et Tambacounda.

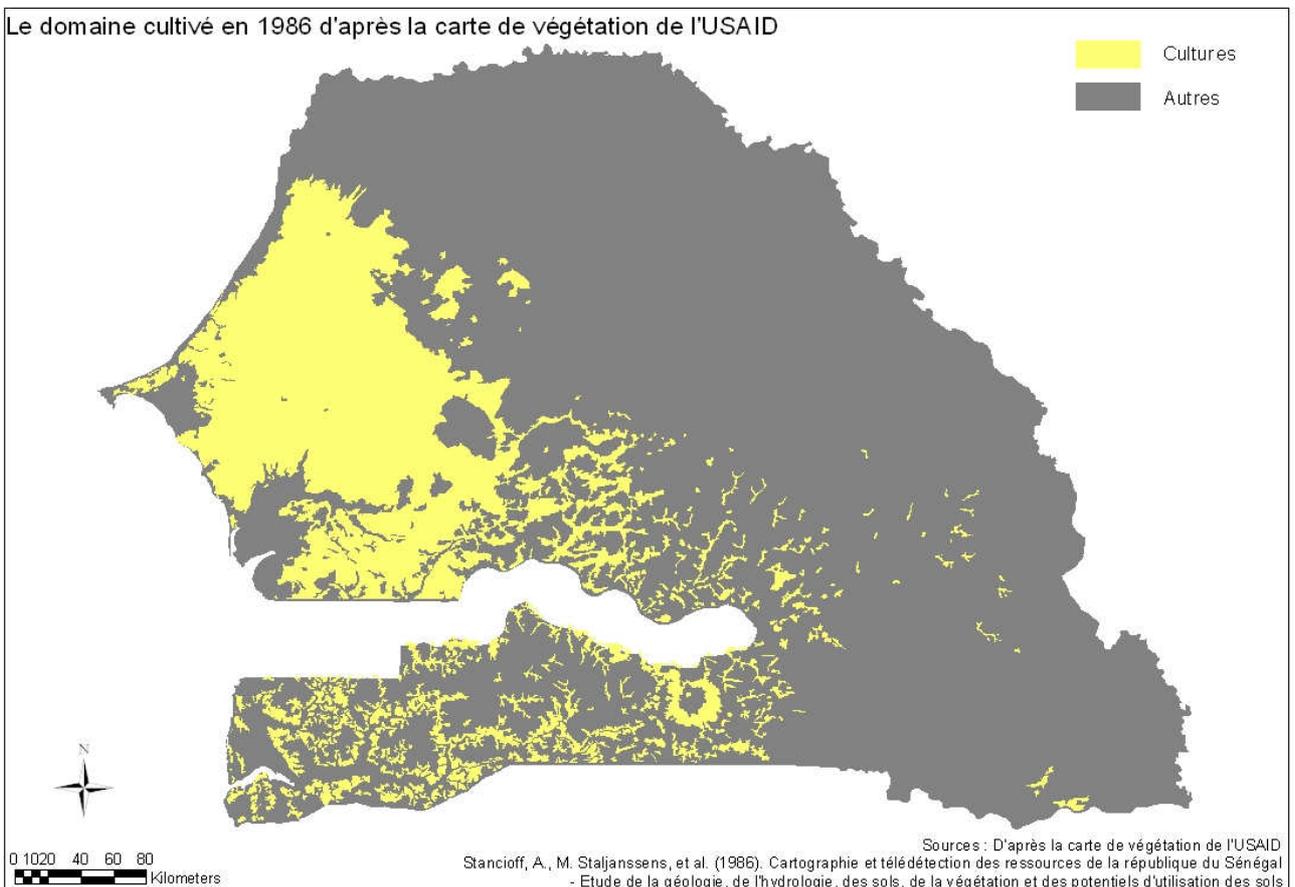
Mais, l'étape de photo-interprétation a permis un premier constat sur les possibilités des images basse résolution pour l'identification du domaine cultivé. Dans l'ensemble, les résultats sont très satisfaisants à l'échelle du pays. Par contre, on a pu constater que les résultats étaient plus ou moins bons suivant les zones. La méthode semble effectivement bien adaptée dans les régions où les cultures présentent de grandes différences phénologiques avec les milieux naturels environnants. Exemple, en Casamance, les cultures se concentrent dans les fonds de vallons et sont cernées par des savanes boisées et arborées dont le comportement phénologique est extrêmement différent de celui des cultures (cf. cahier annexe D « Classifications des régions agro-écologiques et profils temporels»). Dans ce type de région, l'identification des cultures se fait étonnamment bien. Par contre, dans les zones pastorales où les îlots de cultures sont peu nombreux et épars au milieu des steppes et prairies herbacées dont le comportement phénologique est proche de celui des cultures, les résultats sont peu convaincants. Mais, la faible superficie des cultures dans ces zones font qu'à l'échelle nationale, leur non distinction n'a pas trop de conséquences.

Malheureusement, la seule carte du domaine cultivé à l'échelle de pays que nous possédons a été réalisée en 1986. Elle ne permet donc pas une bonne comparaison des résultats obtenus. Mais on peut tout de même constater qu'à l'échelle du pays les similitudes sont grandes en ce qui concerne la répartition des cultures. Par contre, si l'on analyse plus en détail les deux cartes, à l'échelle régionale, et qu'on les confronte aux images haute résolution, on peut remarquer une précision beaucoup plus importante pour la carte réalisée dans la présente étude.

Carte 7 : Le domaine cultivé du Sénégal en 2005 d'après les classifications spatio-temporelles issues des images Modis



Carte 8 : Le domaine cultivé en 1986 d'après la carte de végétation de l'USAID



Bilan et perspectives

I. Bilan du stage

L'utilisation de données satellite basse résolution pour caractériser l'occupation du sol à petite échelle est une technique assez récente dont j'ai pu apprécier l'efficacité et les potentialités. C'est une technique qui est encore en plein développement et qui ne cesse de dévoiler toutes ses possibilités.

La difficulté principale de ce travail a été de partir de « rien », aucune donnée, aucune connaissance dans l'utilisation de série temporelle et une zone d'étude dont j'ignorais quasiment tout. La phase de documentation et d'apprentissage a donc été importante mais m'a finalement permis d'atteindre les principaux objectifs que l'on m'avait confiés.

Les premiers résultats obtenus sont très satisfaisants. Le domaine cultivé semble bien se distinguer des autres types d'occupation du sol à partir de son comportement temporel. La phase de validation prévue dans les prochaines semaines devrait permettre de le confirmer. Cela constituera alors un progrès satisfaisant dans la cartographie du domaine cultivé : une mise à jour annuelle et à moindre coût sera alors possible.

Malheureusement, l'acquisition et la préparation des données basse résolution est une étape longue et fastidieuse. Le temps m'a ainsi manqué pour tester tous les indicateurs et les méthodes qui se présentaient à moi au cours de l'avancement de l'étude. Il a en effet fallu mettre au point et développer des traitements de préparation et de correction particuliers à partir de procédures IDL. Cette étape de préparation a été plus longue que prévu et a largement empiété sur le temps imparti pour les traitements et l'analyse des résultats. Le point positif de cette « perte de temps » est la réutilisation possible des outils créés et donc un « gain de temps » pour les utilisateurs futurs, dont certains ont déjà profité.

Les données SPOT Végétation acquises n'ont malheureusement pas pu être exploitées comme prévu. Elles devaient faire l'objet d'une analyse préalable à la stratification plus poussée. Mais, comme pour les images Modis, les méthodes d'acquisition et de traitements testées ont été explicitées dans une note d'utilisation qui sera mis à la disposition des autres utilisateurs.

II. Perspectives et évolutions

Le sujet de ce stage est tellement riche que les perspectives sont nombreuses et qu'il mérite comme cela a déjà été envisagé d'être poursuivi en thèse. En attendant, je peux proposer quelques évolutions pour la suite des travaux.

D'abord, il semblerait intéressant de tester d'autres indices, comme l'EVI pour comparer ou améliorer les résultats obtenus avec le NDVI ou encore comme le NDWI qui permet d'évaluer le stress hydrique de la plante. Il est possible de constituer des séries temporelles avec tout type de

canaux ou d'indices et il semble donc intéressant d'en tester un maximum pour évaluer leur potentialités.

Le comportement phénologique des cultures étant étroitement lié à la pluviométrie, des données climatiques précises aurait été d'une aide précieuse pour comprendre et identifier les profils temporels de NDVI représentatifs des cultures. Il semblerait donc intéressant de mettre en relation les données pluviométriques temporelles avec les séries temporelles de NDVI. De plus, cela permettrait, par exemple, d'affiner considérablement l'identification du démarrage du cycle végétal puisque celui-ci est en rapport avec la quantité d'eau tombée.

D'autre part, la compréhension des données multi-temporelles à basse résolution spatiale à travers leurs relations avec les images à haute résolution spatiale mérite d'être améliorée. En effet, nous avons utilisé pour cette étude une analyse comparative visuelle, mais il paraît intéressant d'exploiter une méthode plus informatisée en mesurant, par exemple, le degré d'homogénéité des pixels basse résolution en terme de proportions de classes d'images haute résolution.

Enfin, il faut garder à l'esprit que bientôt arriveront sur le marché des images haute résolution temporelle avec des résolutions spatiales se rapprochant de celle des images haute résolution. Les données alors disponibles faciliteront à coup sûr l'approfondissement des recherches sur la structure et la dynamique du domaine cultivé et, de façon générale, l'ensemble des études sur l'évolution des couvertures végétales. Il est donc nécessaire de continuer à exploiter ces nouvelles techniques et d'instaurer de nouveaux indicateurs spatiaux et temporels.

III. Bilan personnel

Ce stage fut très enrichissant sur de nombreux points de vue. Il m'a beaucoup apporté que ce soit en termes professionnel, relationnel ou humain et m'a conforté dans mon orientation professionnelle.

Il m'a permis d'approfondir mes connaissances en traitement d'images et en télédétection et de découvrir de nouvelles techniques telles que l'utilisation de séries temporelles. J'ai également acquis de réelles compétences en programmation IDL.

Je me suis impliquée dans un projet complet, des étapes préalables de bibliographie, jusqu'aux étapes d'identification du domaine cultivé, en passant par la recherche, l'acquisition et la préparation des données. Cela m'a permis de développer mon sens de l'organisation et ma rigueur dans mon travail. La confiance et l'autonomie que l'on m'a accordé m'a obligée à trouver les solutions et à contourner les difficultés par moi-même. Responsable de mon travail, j'étais libre, au quotidien, d'organiser les tâches dans le but d'atteindre les objectifs fixés initialement.

J'ai appris quelque chose d'essentiel concernant le milieu de la recherche, celle-ci ne consiste pas uniquement à chercher à atteindre des objectifs mais aussi à chercher des objectifs à atteindre. En effet, je me suis vite confrontée à un problème majeur, je devais partir d'un point A pour arriver à un point B, mais je ne connaissais pas le meilleur chemin pour y aller. C'est donc en

« tâtonnant », en testant diverses solutions, et surtout en trouvant des objectifs intermédiaires que j'ai pu mener à bien ce projet.

La recherche est un domaine professionnel qui m'a beaucoup plu car elle laisse une part importante à l'imagination. Il faut sans arrêt remettre en question son travail et trouver de nouvelles idées qui permettraient de l'améliorer.

Rapport-Gratuit.com

Bibliographie

Bertrand, R., Killian, J., Raunet, M., Guillobez, S. et Bourgeon, G..

La connaissance des systèmes de paysages naturels, un préalable à la protection du milieu. L'approche morphopédologique.

(1985) Bull. Rech. Agro. Gembloux, 20(3/4), pp 545-559.

DOCUMENT TYPE: Colloque

Bertrand, R., Saint Macary, H.

Organisations morphopédologiques du milieu naturel et recherches agronomiques

(1990) Agronomie et ressources naturelles en régions tropicales. Actes des journées de la DRN, Montpellier : CIRAD-IRAT

DOCUMENT TYPE: Communication

Bruneau, M., Kilian, J.

L'apport des données satellitaires dans l'établissement de cartes utilisées par le développement rural (1986) CNES SPOT Image, Colloque international Spot 1

DOCUMENT TYPE: Colloque

Boles, S.H., Xiao, X., Liu, J., Zhang, Q., Munkhtuya, S., Chen, S., Ojima, D.

Land cover characterization of Temperate East Asia using multi-temporal VEGETATION sensor data (2004) Remote Sensing of Environment 90 (4), pp. 477-489. Cited 7 times.

<http://www.scopus.com/scopus/inward/record.url?eid=2-s2.0-2342630687&partner=40&rel=R4.0.0>

DOCUMENT TYPE: Article

SOURCE: Scopus

Brun, J.

Etude du potentiel des indices de végétation de l'imagerie MODIS pour l'observation de l'évolution intra- et inter-annuelle de la couverture du sol. Application à la région genevoise (zone urbaine et périurbaine)

(2004) Certificat de spécialisation en géomatique, Université de Genève

DOCUMENT TYPE: Rapport

Caloz, R. et C. Collet

Précis de Télédétection : Traitements Numériques d'images de télédétection

(2001) AUF, Presses de l'Université du Québec, vol. 3

DOCUMENT TYPE: Ouvrage

CNRS/INSU, IRD, Météo-France, Ifremer, CNES

Mobilisation internationale pour la mousson africaine

Conférence de Presse, Vendredi 18 février 2005, Paris

DOCUMENT TYPE: Communiqué de presse

CNRS/INSU, IRD, Météo-France, Ifremer, CNES

Premier bilan pour le programme AMMA sur la mousson africaine

1ère conférence internationale AMMA, 28 novembre au 2 décembre 2005, Dakar

Communiqué de presse, le 23 novembre 2005

DOCUMENT TYPE: Communiqué de presse

DE WISPELAERE G., FORGIARINI G., ROY F.

Synthèse cartographique régionale de l'occupation du sol des zones cotonnières (Burkina Faso, Côte-d'Ivoire, Mali). Etude thématique.

(1992) Maisons-Alfort, CIRAD-EMVT, 90 p.

DOCUMENT TYPE : Rapport

Duchemin, B., Maisongrande, P., Dedieu, G., Leroy, M.
10-Days compositing method accounting for bidirectional effects
(2000) International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS) 5, pp. 2155-2157.
<http://www.scopus.com/scopus/inward/record.url?eid=2-s2.0-0034544099&partner=40&rel=R4.0.0>
DOCUMENT TYPE: Rapport de Conférence

Fenoglio, J.
Les scientifiques s'unissent pour comprendre la disparition de la mousson africaine
Article Le Monde, 20 Février 2005
DOCUMENT TYPE : Article

Girard M.C., Girard C.M.
Traitement des données de télédétection
(1999) Dunod, 527 p
DOCUMENT TYPE : Ouvrage

Gond, V
Contribution des données NOAA-AVHRR à la caractérisation des savanes africaines : approche locale, approche continentale.
(1995) Centre d'Etudes Spatiales sur la Biosphère, CESBIO, Toulouse, France, 151 page
<http://kourou.cirad.fr/umr/perso/gond/index.htm>
DOCUMENT TYPE: Thèse

Gond, V., Fontès, J., Loudjani, P.
Dynamique des biomes africains par l'analyse de séries temporelles satellitaires
(1997) Comptes Rendus de l'Académie des Sciences, Sciences de la vie / Life Sciences, pp 320: 179-188.
<http://kourou.cirad.fr/umr/perso/gond/index.htm>
DOCUMENT TYPE: Article

Guo, J.K., Liu, J.Y., Huang, G.M., Zhuang, D.F., Gao, Z.Q., Yan, H.M.
Cropland change detection with SPOT-4 VEGETATION imagery in Inner Mongolia, China
(2004) Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering 5544, pp. 438-447.
<http://www.scopus.com/scopus/inward/record.url?eid=2-s2.0-15844383111&partner=40&rel=R4.0.0>
DOCUMENT TYPE: Conference Paper
SOURCE: Scopus

Guo, J.K., Liu, J.Y., Huang, G.M., Zhuang, D.F., Yan, H.M.
Cropland identification in inner Mongolia, China with SPOT-4 VEGETATION imagery
(2004) International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS) 6, pp. 3988-3991.
<http://www.scopus.com/scopus/inward/record.url?eid=2-s2.0-15944407146&partner=40&rel=R4.0.0>
DOCUMENT TYPE : Rapport de Conférence

Hanrion, C., Mercky, P., Chauvel, A.
Projet pilote des terres neuves - Etude pédologique du périmètre sud koumpentoum
(1971) ORSTOM de Dakar-Hann
DOCUMENT TYPE: Rapport + carte

Huete, A.R., H.Q. Liu, K. Batchily et W. Van Leeuwen
A Comparison of Vegetation Indices over a Global Set of TM Images for EOS-MODIS. (1997),
Remote Sensing of the Environment 59(3), pp. 440-451.
DOCUMENT TYPE : Article

Jakubauskas, M.E., Legates, D.R., Kastens, J.H.
Crop identification using harmonic analysis of time-series AVHRR NDVI data
(2003) Computers and Electronics in Agriculture 37 (1-3), pp. 127-139. Cited 5 times.
<http://www.scopus.com/scopus/inward/record.url?eid=2-s2.0-2242426277&partner=40&rel=R4.0.0>
DOCUMENT TYPE: Article

Lecerf, R., Dubreuil, V., Hubert-Moy, L.

Suivi de l'occupation hivernale des sols par télédétection basse résolution en paysage fragmenté : comparaison de séries temporelles de ndvi NOAA/AVHRR, SPOT/VEGETATION et EOS/MODIS.

Anais XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Goiânia, Brasil, 16-21 abril 2005, INPE, p. 3093-3095

DOCUMENT TYPE : Article

Maselli, F., Gilabert, M.A., Conese, C.

Integration of high and low resolution NDVI data for monitoring vegetation in Mediterranean environments

(1998) Remote Sensing of Environment 63 (3), pp. 208-218. Cited 18 times.

<http://www.scopus.com/scopus/inward/record.url?eid=2-s2.0-0032010497&partner=40&rel=R4.0.0>

DOCUMENT TYPE: Article

Maselli, F., Rembold, F.

Analysis of GAC NDVI data for cropland identification and yield forecasting in Mediterranean African countries

(2001) Photogrammetric Engineering and Remote Sensing 67 (5), pp. 593-602. Cited 6 times.

<http://www.scopus.com/scopus/inward/record.url?eid=2-s2.0-0035004435&partner=40&rel=R4.0.0>

DOCUMENT TYPE: Article

Mayaux, P., Bartholomé, E., Fritz, S., Belward, A.

A new land-cover map of Africa for the year 2000

(2004) Journal of Biogeography 31 (6), pp. 861-877. Cited 14 times.

<http://www.scopus.com/scopus/inward/record.url?eid=2-s2.0-2542446633&partner=40&rel=R4.0.0>

DOCUMENT TYPE: Article

Mayaux, P., Gond, V., Bartholome, E.

A near-real time forest-cover map of Madagascar derived from SPOT-4 VEGETATION data

(2000) International Journal of Remote Sensing 21 (16), pp. 3139-3144. Cited 12 times.

<http://www.scopus.com/scopus/inward/record.url?eid=2-s2.0-0033771332&partner=40&rel=R4.0.0>

DOCUMENT TYPE: Article

Moody, A., Johnson, D.M.

Land-surface phenologies from AVHRR using the discrete fourier transform

(2001) Remote Sensing of Environment 75 (3), pp. 305-323. Cited 17 times.

<http://www.scopus.com/scopus/inward/record.url?eid=2-s2.0-0035740632&partner=40&rel=R4.0.0>

DOCUMENT TYPE: Article

Poidevin, D.

La carte, moyen d'action. Guide pratique pour la conception et la réalisation de cartes.

(1999), ellipses, Paris, 191p.

DOCUMENT TYPE : Ouvrage

Sakamoto, T., Yokozawa, M., Toritani, H., Shibayama, M., Ishitsuka, N., and Oho, H.

(2005). A crop phenology detection method using time-series MODIS data.

Remote Sens. Environ., 96, pp. 366-374.

DOCUMENT TYPE: Article

Saux Picart, S.

Synthèse de données VEGETATION-SPOT 4 pour l'extraction de paramètres de sols en zones arides et semi-arides

(2003), Mémoire de diplôme d'ingénieur E.S.G.T

DOCUMENT TYPE: Mémoire

Soumaré, P.B., Martini, M.

La Veille environnementale au Centre de suivi écologique (CSE). Utilisation des images d'estimation des pluies dans le suivi de la campagne agricole.

DOCUMENT TYPE: Rapport

Tappan G.C., Sall M., Wood E.C., Cushing M.
Ecoregions and land cover trends in Senegal.
(Nov 2004), Journal of Arid Environments Vol 59 No 3, pp. 427-462.
DOCUMENT TYPE: Article

Mediagraphie

❖ Concernant les images satellites :

Modis :

<http://lpdaac.usgs.gov/main.asp> : Téléchargement et informations sur les données
<http://glcfapp.umiacs.umd.edu:8080/esdi/index.jsp> : Téléchargement des données

Spot :

<http://www.spot-vegetation.com/vegetationprogramme/Pages/TheVegetationSystem/userguide/userguide.htm> :
Guide d'utilisation des images Spot
<http://www.vgt.vito.be/> : Informations, FAQ sur les données
<http://free.vgt.vito.be/> : Téléchargement des données

Landsat :

<http://glcfapp.umiacs.umd.edu:8080/esdi/index.jsp> : Téléchargement des données
<http://glovis.usgs.gov/> : Téléchargement des données

❖ Concernant le Sénégal :

<http://www.senegalaisement.com/> : Informations diverses sur le Sénégal
<http://www.au-senegal.com> : Informations diverses sur le Sénégal
<http://www.roselt-oss.org/coord/index.php?la=fra> : Catalogue de données Roselt/oss – Données SIG sur le Sénégal
http://medias.obs-mip.fr/sud_sahel/ : Données sur le Sahel
<http://www.ibimet.cnr.it/Case/ap3a/> : Projet Alerte Précoce et Prévision des Productions Agricoles du centre AGRYMET – Données SIG Sénégal
<http://www.cse.sn/> : Centre de suivi écologique du Sénégal
<http://www.fao.org/> : Site officiel de la FAO (Food And Agriculture Organization Of The United Nations)
<http://www.fao.org/giews/workstation/page.jsp> : SIG en ligne de la FAO
<http://www.cartographie.ird.fr/SenegalFIG/index.html> : Cartes IRD sur le Sénégal

Table des figures

Figure 1 : Organisation du CIRAD et de la Maison de la télédétection.....	8
Figure 2 : Planigramme du stage.....	11
Figure 3: Schéma des traitements.....	12
Figure 4: Le satellite TERRA	18
Figure 5 : Algorithme pour la constitution des synthèse temporelle MODIS Vegetation Indices	22
Figure 6 : Le satellite Spot 5	23
Figure 7 : Les images Landsat ETM+ Orthorectifiées	29
Figure 8 : Architecture d'un fichier multitemporel.....	29
Figure 9 : Visualisation du profil temporel de NDVI du pixel 1765/1145 (centre croix) -.....	31
Figure 10 : Codage de la qualité du NDVI des images Modis	32
Figure 11 : Indice de qualité d'utilisation des images Modis et couverture nuageuse	33
Figure 12 : Profil temporel de NDVI du pixel 1730/1784.....	34
Figure 13 : Couverture nuageuse et qualité du modèle BRDF des images Spot Végétation	35
Figure 14 : Méthode pour l'interpolation linéaire multi-temporelle	37
Figure 15 : Outils IDL utilisés pour la reconstitution des données manquantes par interpolation linéaire multi-temporelle.....	38
Figure 16 : Interpolation linéaire temporelle du pixel 1335/1691	39
Figure 17 : Modèle de traitements pour la segmentation en zone agro-écologiques	42
Figure 18 : Première étape de la stratification "stratification visuelle à partir des cartes thématiques"	44
Figure 19 : Profil temporel de NDVI du pixel 987/1224.....	48
Figure 20 : Résultat de la stratification après la deuxième étape	50
Figure 21 : Profil temporel de NDVI d'un pixel touché par l'invasion acridienne en 2004.....	54
Figure 22 : Cultures et réseau de chemin en étoile autour du village de Keur Moussa.....	61
Figure 23 : Cultures le long du réseau hydrographique en Casamance.....	61
Figure 24 : Résidus de récoltes dans la région du Nioro du Rip.....	61
Figure 25 : Cultures sur composition colorée RGB : PIR / R / V.....	61
Figure 26 et 27 : Cultures pluviales sous parc arboré d'Acacia.....	61
Figure 28 et 29 : Cultures et termitières sur végétation naturelle	62
Figure 30 : Profil temporel de NDVI type d'une culture sous pluie	62

Table des cartes

Carte 1 : Le Sénégal et le Sahel.....	13
Carte 2 : Relief et pluviométrie du Sénégal	14
Carte 3 : Espace agricole du Sénégal	14
Carte 4 : Régions agro-écologiques du Sénégal	55
Carte 5 : Carte du rapport valeur maximum 2005 / valeur maximum 2004	59
Carte 6 : Carte d'invasion acridienne au Sénégal en 2004 - Observatoire acridien de la FAO	59
Carte 7 : Le domaine cultivé du Sénégal en 2005.....	67
Carte 8 : Le domaine cultivé en 1986 d'après la carte de végétation de l'USAID.....	67

Table des tableaux

Tableau 1 : Caractéristiques du produit.....	19
Tableau 2 : Détail des paramètres contenus dans un fichier HDF "Vegetation Indices 16-Day L3 Global 250m SIN Grid"	20
Tableau 3 : Détails des paramètres contenus dans un fichier zip "Spot VGT-D10"	25
Tableau 4: Détails des paramètres contenus dans un fichier zip "Landsat ETM+ Orthorectified"	26
Tableau 5 : Sites et paramètres de téléchargement.....	27
Tableau 6 : Caractéristiques biophysiques des régions agro-écologiques du Sénégal.....	56

Table des acronymes

AMMA : Analyse Multidisciplinaire de la Mousson Africaine

CNES : Centre National d'Etudes spatiales

CV-MVC : Constraint-View angle Maximum Value Composite

EVI (Enhanced Vegetation Index

HDF-EOS : Hierarchical Data Format - Earth Observing System

HRVIR : Haute Résolution dans le Visible et l'Infrarouge

IDL : Interactive Data Language

MODIS : Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer

MRT : MODIS Reprojection Tool

MVC : Maximum Value Composite

NDVI : Normalized Difference Vegetation Index

ANNEXES

Sommaire des annexes

Annexe 1 : Organisation des couches d'information dans ArcCatalog	79
Annexe 2 : Création des métadonnées avec Export MDWEB	80
Annexe 3 : Liste des différents produits du capteur MODIS embarqué sur TERRA	82
Annexe 4 : Descriptions du canal NDVI quality de Modis Vegetation Indices.....	84



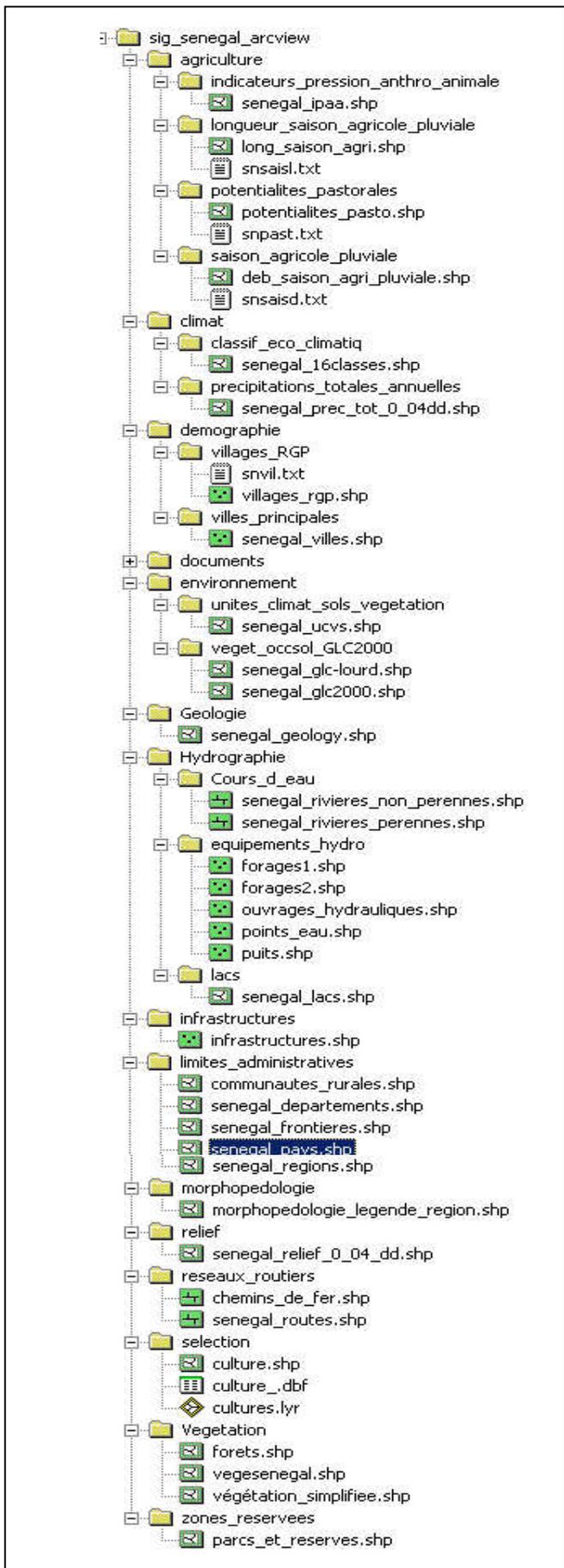
Cahier annexe A : Note sur le téléchargement et l'utilisation d'images basse résolution gratuites : Modis / Terra et Spot Végétation

Cahier annexe B : Glossaire des fonctions IDL utilisées – Codes et fonctionnement des outils IDL pour ENVI

Cahier annexe C : Images Modis / Terra Vegetation Indices 16 jours 250 m – Présentation des images et de leur qualité

Cahier annexe D : Classifications des régions agro-écologiques et profils temporels

Annexe 1 : Organisation des couches d'information dans ArcCatalog



Annexe 2 : Création des métadonnées avec Export MDWEB

	<p style="text-align: center;">senegal_prec_tot_0_04dd.shp</p> <p>Résumé: Ce thème donne les précipitations totales annuelles au Sénégal.</p> <p>Mots-clés: climatprécipitations</p> <p>Emprise : N : 16,6758129858582° W : -17,5095557064806° S : 12,2958365253554° E : -11,2872850856355°</p>
---	---

Métadonnées ISO 19115 :

- [Informations sur les métadonnées](#)
- [Informations sur l'identification de la ressource](#)
- [Informations sur la représentation spatiale](#)
- [Informations sur le système de référence](#)
- [Informations sur la qualité des données](#)
- [Informations sur la distribution de la ressource](#)
- [Fichiers attachés binaires](#)

Informations sur les métadonnées ;

Identifiant de la fiche de métadonnées : ArcGis_SEN_FO_senegal_prec_tot_0_04dd.shp_45

Langue des métadonnées : Français

Nom de la norme de métadonnées utilisée : ISO 19115 - FDIS 2003

Version de la norme sur les métadonnées : ROSELT - couche Vecteur

Dernière mise à jour : 28-04-06

Adresse web à laquelle la ressource est rattachée : http://www.roselt-oss.org/coord/ressources/COR_RE_41.zip

Informations sur l'organisme de gestion des métadonnées :

Nom de l'organisation : CIRAD AMIS - Maison de la télédétection

Rôle du contact : gestionnaire

Adresse postale : 500 rue Jean-François Breton

Ville : Montpellier

Pays : France

adresse e-mail : pdegenne@teledetection.fr

URL : <http://www.teledetection.fr>

[Retour au début](#)

Informations d'identification de la ressource:

Langue du jeu de données : Français

Jeu de caractères du jeu de données : 8859part1 - latin-1, Europe occidentale

Crédits : Berkeley, University of California (WORLDCLIM)

Thèmes Roselt couverts par la ressource : structure du paysage usages, pratiques d'exploitation

Thèmes ou catégories de la ressource : informations géo-scientifiques Ressources et gestion de l'environnement

Résumé : Ce thème donne les précipitations totales annuelles au Sénégal.

Type de représentation spatiale : vecteur

Mots-clés :

Mots-clés libres : climat

Mots-clés :

Mots-clés libres : précipitations

Titre : senegal_prec_tot_0_04dd.shp

Format : Couche vecteur

Informations sur l'organisme de gestion de la ressource :

Rôle du contact : propriétaire

Pays : France

Date de référence :

Date : 01-01-2000

Résolution spatiale :

Dénominateur d'échelle : 2.5 minutes

Informations sur l'extension spatiale et temporelle :**Emprise géographique :**

Longitude Ouest : -17,5095557064806

Longitude Est : -11,2872850856355

Latitude Nord : 16,6758129858582

Latitude Sud : 12,2958365253554

Éléments temporel :**Format de la ressource :**

Nom du format : Shapefile - Application ArcGis - shp

Version du format : 8.3

[Retour au début](#)

Représentation spatiale - Vecteur :

Niveau de topologie pour ce jeu de données : géométrie uniquement

Objets géométriques :

Type d'objet : polygone

Nombre d'objets : 1135

[Retour au début](#)

Informations sur le système de référence :

Système de coordonnées : WGS_1984_UTM_Zone_28N

[Retour au début](#)

Informations sur la qualité des données :**Informations sur la portée de la ressource :**

Niveau de description des données : jeu de données

Informations sur la généalogie de la ressource :

Description sommaire de l'élaboration de la ressource : A partir des données Worldclim mondiale à une résolution 2.5 minutes au format .bil : création d'une grille grâce à l'outil "fishnet" d'ArcMap qui recouvre le Sénégal (résolution : 0.08 degrés décimaux). Traitement par macro en croisant cette grille avec la carte mondiale Worldclim.

[Retour au début](#)

Informations sur la distribution de la ressource :**Informations sur le distributeur:**

Rôle du contact : distributeur

Pays : France

Informations pour le transfert de la ressource :**Informations sur le support de distribution :**

Nom du médium : aucun

Format d'écriture du support : aucun

URL : http://www.roselt-oss.org/coord/ressources/COR_RE_41.zip

Taille du transfert : 0,843589782714844

[Retour au début](#)

Fichier attaché :

Type de fichier : Image (jpg)



[Retour au début](#)

Annexe 3 : Liste des différents produits du capteur MODIS embarqué sur TERRA

Surface Reflectance

- Surface Reflectance Daily L3 Global 0.05Deg CMG
- Surface Reflectance 8-Day L3 Global 500m
- Surface Reflectance Daily L2G Global 500m
- Surface Reflectance Daily L2G Global 250m
- Surface Reflectance Quality Daily L2G Global 1km
- Surface Reflectance 8-Day L3 Global 250m

Land Surface Temperature and Emissivity

- Land Surface Temperature/Emissivity 5-Min L2 Swath 1km
- Land Surface Temperature/Emissivity Daily L3 Global 1km
- Land Surface Temperature/Emissivity 8-Day L3 Global 1km
- Land Surface Temperature/Emissivity Daily L3 Global 5km
- Land Surface Temperature/Emissivity Daily L3 Global 0.05Deg CMG
- Land Surface Temperature/Emissivity 8-Day L3 Global 0.05Deg CMG
- Land Surface Temperature/Emissivity Monthly L3 Global 0.05Deg CMG

Land Cover/Change

- Land Cover Type 96-Day L3 Global 0.05Deg CMG
- Land Cover Change 96-Day L3 Global 0.05Deg CMG
- Land Cover Type 96-Day L3 Global 1km
- Land Cover Dynamics Yearly L3 Global 1km

Net Primary Vegetation Production

- Evaporative Fraction 8-Day L4 Global 1km
- Net Photosynthesis 8-Day L4 Global 1km
- Net Primary Production Yearly L4 Global 1km
- Net Photosynthesis 32-Day L4 Global 0.05Deg CMG
- Net Primary Production Yearly L4 Global 0.05Deg CMG

Thermal Anomalies/Fire

- Thermal Anomalies/Fire 5-Min L2 Swath 1km
- Thermal Anomalies/Fire Daily L3 Global 1km
- Thermal Anomalies/Fire 8-Day L3 Global 1km
- Thermal Anomalies/Fire 32-Day L3 Global 0.05Deg CMG
- Burn Scars 16-Day L3 Global 500m

Leaf Area Index/Fraction of Photosynthetically Active Radiation (LAI/FPAR)

- Leaf Area Index/FPAR 8-Day L4 Global 1km
- Leaf Area Index/FPAR 32-Day L4 Global 0.05Deg CMG

Vegetation Indices

- Vegetation Indices 16-Day L3 Global 500m



- Vegetation Indices 16-Day L3 Global 1km
- Vegetation Indices Monthly L3 Global 1km
- Vegetation Indices 16-Day L3 Global 0.05Deg CMG
- Vegetation Indices Monthly L3 Global 0.05Deg CMG
- Vegetation Indices 16-Day L3 Global 250m

Bidirectional Reflectance Distribution Function / Albedo

- BRDF/Albedo Model-1 16-Day L3 Global 1km
- Albedo 16-Day L3 Global 1km
- Nadir BRDF-Adjusted Reflectance 16-Day L3 Global 1km M
- Albedo 16-Day L3 Global 0.25/0.05Deg CMG
- BRDF/Albedo Parameters 16-Day L3 Global 0.25/0.05Deg CMG
- Nadir BRDF-Adjusted Reflectance 16-Day L3 Global 0.05Deg CMG

Vegetation Conversion/Continuous Fields

- Vegetation Cover Conversion 32-Day L3 Global 250m
- Vegetation Continuous Fields Yearly L3 Global 500m

Geolocation Angles

- Geolocation Angles Daily L2G Global 1km Day

Pointer Files

- Observation Pointers Daily L2G Global 1km Day
- Observation Pointers Daily L2G Global 500m
- Observation Pointers Daily L2G Global 250m
- *CMG = Climate Model Grid 0.05 Lat/Lon = 5600 m

Annexe 4 : Descriptions du canal NDVI quality de Modis Vegetation Indices

N° bit	Nom du paramètre	Valeur	Description
0-1	VI Quality (MODLAND Mandatory QA Bits)	00	VI produced with good quality
		01	VI produced but with unreliable quality and thus examination of other QA bits recommended
		10	VI produced but contaminated with clouds
		11	VI not produced due to bad quality
2-5	VI Usefulness Index	0000	Perfect quality (equal to VI quality = 00: VI produced with good quality)
		0001	High quality
		0010	Good quality
		0011	Acceptable quality
		0100	Fair quality
		0101	Intermediate quality
		0110	Below intermediate quality
		0111	Average quality
		1000	Below average quality
		1001	Questionable quality
		1010	Above marginal quality
		1011	Marginal quality
		1100	Low quality
		1101	No atmospheric correction performed
		1110	Quality too low to be useful
		1111	Not useful for other reasons (equal to VI quality = 11: VI not produced due to bad quality)
6-7	Aerosol Quantity	00	Climatology used for atmospheric correction
		01	Low
		10	Intermediate
		11	High
8	Atmosphere Adjacency Correction	0	(No) No adjacency correction performed
		1	(Yes) Adjacency correction performed
9	Atmosphere BRDF Correction	0	(No) No atmosphere-surface BRDF coupled correction performed
		1	(Yes) Atmosphere-surface BRDF coupled correction performed
10	Mixed Clouds	0	(No) No mixed clouds
		1	(Yes) Possible existence of mixed clouds
11-12	Land/Water Mask	00	Ocean/inland water ? Shallow ocean ? Moderate and continental ocean ? Deep ocean ? Deep inland water
		01	Coastal region ? Ocean coastlines and lake shorelines ? Shallow inland water
		10	Wetland ? Ephemeral water
		11	Land
13	Snow/Ice	0	(No) No snow/ice
		1	(Yes) Possible existence of snow/ice
14	Shadow	0	(No) No shadow
		1	(Yes) Possible existence of shadow
15	Compositing Method	0	BRDF composite method used for compositing
		1	Constraint view angle MVC (CV-MVC) method used for compositing

L'indice d'utilisation (usefulness index) est un indicateur qui permet de déterminer la fiabilité d'utilisation de chaque pixel de la synthèse temporelle. La valeur de l'indice de chaque pixel est déterminée suivant diverses conditions telles que : la quantité d'aérosol, les corrections atmosphériques, la couverture nuageuse, la présence d'ombre portée et la géométrie des angles de visée et solaires. Un score est attribué à chaque condition et la somme de tous les scores permet d'obtenir la valeur de l'indice d'utilisation pour le pixel. Un indice de 0000 correspond à la meilleure qualité, tandis que la moins bonne a pour valeur 1100.

Parameter Name	Condition	Score
Aerosol Quantity	If aerosol climatology was used for atmospheric correction (00)	2
	If aerosol quantity was high (11)	3
Atmosphere Adjacency Correction	If no adjacency correction was performed (0)	1
Atmosphere BRDF Correction	If no atmosphere-surface BRDF coupled correction was performed (0)	2
Mixed Clouds	If there possibly existed mixed clouds (1)	3
Shadow	If there possibly existed shadow (1)	2
View zenith angle (q_v)	If $q_v > 40^\circ$	1
Sun zenith angle (q_s)	If $q_s > 60^\circ$	1