
Application de la télédétection spatiale pour l'évaluation de la dégradation des terres dans la région de Kaolack

Les technologies spatiales, et de façon plus particulière les systèmes d'observation de la Terre, constituent désormais des outils incontournables dans la problématique du Développement Durable. A cet égard, il est important de mettre l'accent sur leur utilisation pour améliorer les processus décisionnels dans différents domaines, notamment la gestion des ressources naturelles et de mettre un terme à la dilapidation des ressources naturelles particulièrement dans les pays sous-développés.

3.1. Objectifs de l'étude

3.1.1. Objectif global

L'objectif global de l'étude est de développer une **approche d'évaluation qualitative intégrée et de cartographie** de la dégradation des terres dans le temps et dans l'espace en se basant sur les outils de la Télédétection aérospatiale.

3.1.2. Objectifs spécifiques

Les objectifs spécifiques de l'étude sont :

- Contribuer à l'élargissement des applications de la télédétection aérospatiale et à une utilisation plus vaste des données satellitaires pour l'évaluation, le suivi et la mise en œuvre d'actions de lutte contre la dégradation des ressources naturelles ;
- Mettre en place une approche intégrée d'évaluation de la dégradation des terres, de son degré et de son étendue, basée sur la technologie spatiale ;
- Fournir aux services techniques locaux, aux projets, aux acteurs et décideurs impliqués dans la lutte contre la dégradation des terres une approche et des cartes supplémentaires d'appréciation de la dégradation des sols et de son évolution;
- Renforcer les capacités des institutions, des services techniques et de tous les acteurs en matière d'évaluation de la dégradation des terres à l'aide des images satellitaires.

3.2. Résultats attendus

Les résultats attendus dans le cadre de ce mémoire sont :

- Une cartographie générale de la dégradation des terres dans la région de Kaolack en 1996, 2000 et 2010;
- Une cartographie de la dynamique de la dégradation de 1996 à 2010 ;
- Une identification des zones prioritaires où les mesures contre la dégradation devront être mises en œuvre ;
- Une carte de la vitesse moyenne de dégradation des terres entre 1996 et les années 2000 et des années 2000 à 2010 et
- Un SIG sur la dégradation des terres dans la région de Kaolack.

3.3. Aperçu général sur la région de Kaolack

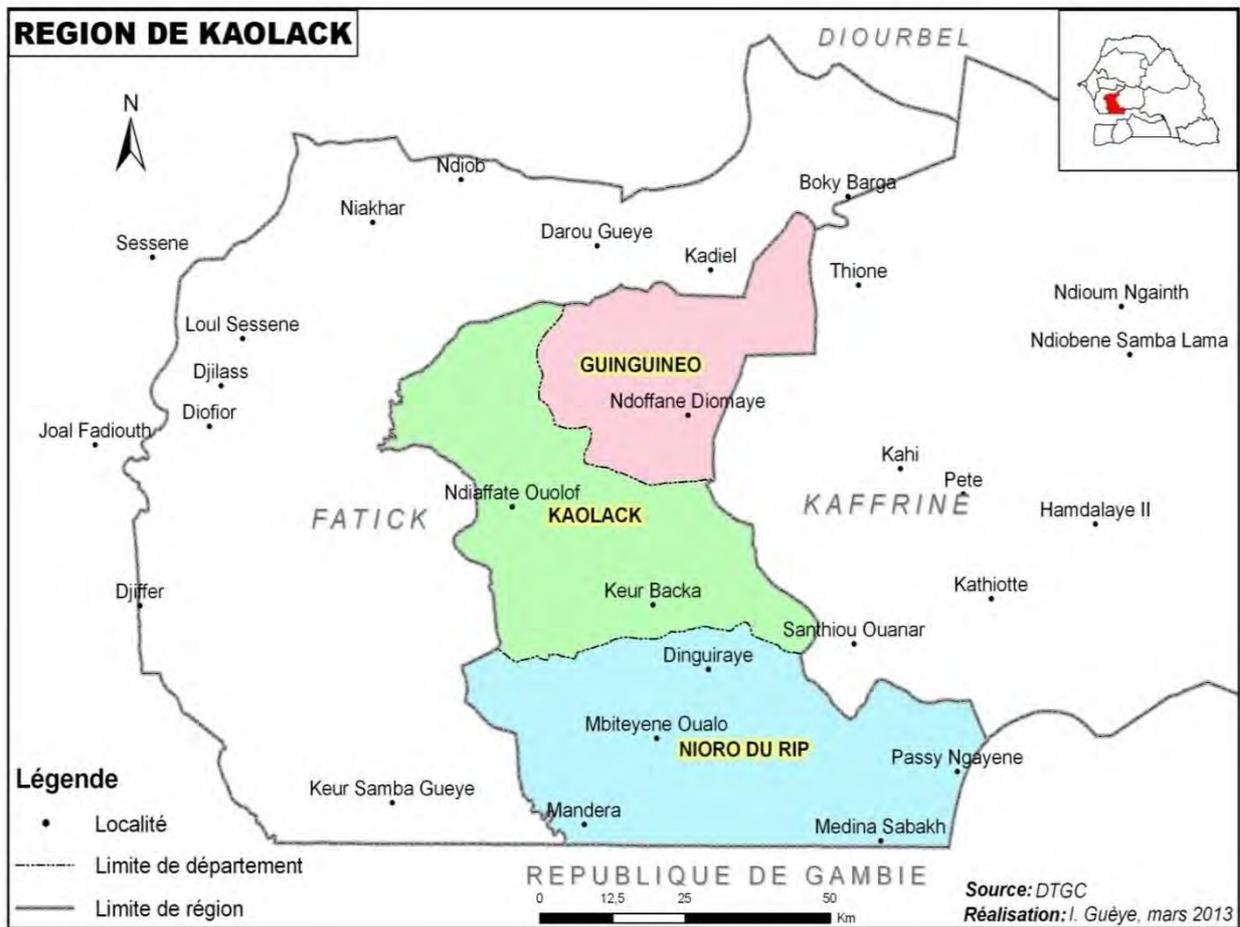
3.3.1. Localisation et limites géographiques

La région de Kaolack couvre une superficie de 4 927 km². Elle se situe entre 14°30' et 16°30' de longitude Ouest et 13°30' et 14°30' de latitude Nord. De ce fait, Kaolack est à cheval sur les zones sahélienne Sud et soudanienne Nord. Cette position lui procure des conditions climatiques relativement favorables à la diversité des écosystèmes naturels.

Localisée dans la zone éco-géographique du bassin arachidier¹⁷, la région de Kaolack est limitée:

- au Nord et à l'Ouest par la région de Fatick (départements de Foundiougne, Fatick et Gossas),
- à l'Est par la région de Kaffrine,
- au Sud par la République de Gambie

¹⁷ Le bassin arachidier comprend les régions administratives de Louga (départements de Louga et de Kébémér), de Thiès, de Diourbel, de Fatick, de Kaolack et de Tambacounda (département de Koumpentoum). Il recouvre les plaines du centre-ouest du Sénégal jusqu'aux bordures du Ferlo (Sénégal Oriental) à l'Est et jusqu'à la Gambie au Sud.



Carte 3 : Région de Kaolack

A la suite des réformes administratives intervenues en 2008, la région de Kaolack est subdivisée en:

- 3 départements: Kaolack, Nioro du Rip, Guinguinéo
- 8 arrondissements qui sont ainsi répartis:
 - Kaolack: 3 arrondissements (Koumbal, Ndiédieng, Sibassor)
 - Nioro du Rip: 3 arrondissements (Paoscoto, Médina Sabakh et Wack Ngouna)
 - Guinguinéo: 2 arrondissements (Guinguinéo, Nguelou)
- 7 communes: Kaolack, Nioro du Rip, Gandiaye, Ndoffane, Kahone, Keur Madiabel, et Guinguinéo.
- 27 communautés rurales: Mbadakhone (07), Kaolack (9) et Nioro du Rip (11).

Tableau 5 : Découpage administratif des départements de Kaolack de Nioro du Rip et de Guinguinéo

Département	Arrondissement	Commune, communauté rurale
Kaolack		GANDIAYE
Kaolack		KAHONE
Kaolack		KAOLACK
Kaolack		NDOFFANE
Kaolack	Koumbal	Keur Maka
Kaolack	Koumbal	Latmingué
Kaolack	Koumbal	Thiaré
Kaolack	Ndiédieng	Keur Socé Sago
Kaolack	Ndiédieng	Ndiaffate
Kaolack	Ndiédieng	Ndiédieng
Kaolack	Sibassor	Dya
Kaolack	Sibassor	Ndiébel
Kaolack	Sibassor	Thiomby
Nioro du Rip		NIORO DU RIP
Nioro du Rip		KEUR MADIABEL
Nioro du Rip	Médina Sabakh	Kayemor
Nioro du Rip	Médina Sabakh	Médina Sabakh
Nioro du Rip	Médina Sabakh	Ngayène
Nioro du Rip	Paoscoto	Gainthe Kaye
Nioro du Rip	Paoscoto	Paoscoto
Nioro du Rip	Paoscoto	Prokhane
Nioro du Rip	Paoscoto	Taïba Niassène
Nioro du Rip	Wack Ngouna	Keur Maba Diakhou
Nioro du Rip	Wack Ngouna	Keur Madiabel
Nioro du Rip	Wack Ngouna	Ndramé Escale
Nioro du Rip	Wack Ngouna	Wack Ngouna
Guinguinéo		GUINGUINÉO
Guinguinéo	Guinguinéo	Khelcom Birane
Guinguinéo	Guinguinéo	Mbadakhoune
Guinguinéo	Guinguinéo	Ndiago
Guinguinéo	Guinguinéo	Ngathié Naoudé
Guinguinéo	Nguelou	Gagnick
Guinguinéo	Nguelou	Mboss
Guinguinéo	Nguelou	Ourour

Décret du 10 septembre 2008, République du Sénégal portant Découpage administratif

3.3.2. Climat

3.3.2.1. Généralités

Le climat est de type soudano-sahélien avec une saison des pluies de courte durée allant de juin – juillet à octobre et une saison sèche longue de 8 à 9 mois.

3.3.2.2. Pluviométrie

Elle connaît une variabilité inter-annuelle. La moyenne est depuis plusieurs années en deçà de l'isohyète 800 mm. De fortes précipitations ont été enregistrées pendant l'hivernage de 1999.

Les déficits sont liés à une faible translation de la mousson en latitude, occasionnant une pluviométrie réduite dans une bonne partie de la région.

Les précipitations varient généralement de 300 mm au Nord à 800 mm au Sud. Elles ont des répercussions sur la production agricole, les ressources hydriques et végétales.

3.3.2.3. Températures et humidités relatives

La région de Kaolack est caractérisée par des températures moyennes élevées d'avril à juillet (15/18° à 35-40° C).avec des variations importantes: l'amplitude thermique diurne peut atteindre 20 degrés.

Ces températures élevées entraînent une forte évapotranspiration qui a des répercussions sur le bilan hydrique.

3.3.2.4. L'évaporation

L'évapotranspiration est marquée par une forte amplitude. Les valeurs Piche sont estimées à environ 2300 mm par an, avec des moyennes comprises entre 60 mm (septembre) et près de 300 mm (mars- avril).

3.3.2.5. Les vents

La circulation générale dans la région est caractérisée par deux types de vents dominants:

- L'alizé continental ou harmattan, vent d'Est qui souffle généralement de février à mai. Il est surtout connu de par ses facultés érosives et sa capacité de transport de litho météores au moment où le sol est presque à nu.
- La mousson, vent du sud-ouest dont l'arrivée annonce le début de la saison pluvieuse (mai-juin). Elle est accompagnée en début d'hivernage de pluies orageuses qui occasionnent une érosion hydrique souvent intense.

3.3.3. L'hydrologie

Le système hydrographique de la région est caractérisé par deux cours d'eaux principaux:

- le prolongement Nord du « Saloum », cours d'eau salé pérenne qui s'étend sur 50 km environ dans le département de Kaolack
- le Baobolong, défluent du fleuve Gambie s'assèche dans sa partie aval en milieu de saison sèche. Douces en saison des pluies, les eaux deviennent salées en saison sèche. La vallée du Baobolong s'étend du Sud-ouest de Nioro jusqu'à Maka–Yopp soit une longueur de 150 km. Sur sa rive gauche dans le département de Nioro, elle prend un affluent le Miniminyang Bolong qui se prolonge sur 26 km vers le Nord.

La région est également parsemée de mares temporaires approvisionnées par les eaux de pluies. Elles servent à l'abreuvement du bétail et à des activités de pêche en certains endroits.

3.3.4. L'hydrogéologie

On distingue plusieurs nappes logées à différents niveaux géologiques:

- la nappe phréatique dont l'importance est liée à la pluviométrie est captée par les puits villageois. Elle est altérée en certains endroits par le "Saloum" à l'Ouest et le Baobolong au Sud.
- la nappe des sables du continental terminal dans les départements de Nioro et Kaffrine. Sa profondeur varie de 80 m à 160 m. L'eau est de bonne qualité chimique et les débits satisfaisants ($25 \text{ m}^3/\text{h}$),
- la nappe des calcaires éocènes s'étend dans toute la région mais prédomine au Nord. Sa profondeur est de 50 à 150 m. Au Sud les débits sont faibles et l'eau est impropre à la consommation.
- la nappe des calcaires paléocènes sous-jacente à la nappe des calcaires marneux de l'éocène s'étend de l'estuaire du Saloum vers le Nord. Les débits des forages sont surtout faibles à cause de la faible épaisseur et de la nappe qui est semi-artésienne avec des niveaux statiques peu profonds. La qualité de l'eau est moyenne.
- la nappe des sables du Maestrichtien est captée dans la presque totalité des forages réalisés dans la région. Elle se situe entre 250 et 450 m avec des débits assez intéressants ($50 \text{ m}^3/\text{h}$), mais un taux de fluor parfois excessif (entre 4 et 5 mg/l). Il en est de même des extraits secs qui peuvent atteindre 1.100 mg/l à Kaolack. Le taux de fluor peut être faible, voire acceptable si la nappe est captée en profondeur (forages de Kaolack de 1946 et 1991).

3.3.5. Physiographie

3.3.5.1. Géologie

La géologie de cette zone est caractérisée par la présence de roches sédimentaires qui se sont constituées en milieu marin.

Elles appartiennent également à des formations détritiques du Continental terminal, d'âge fin Tertiaire à début Quaternaire.

On y observe les calcaires, les marnes, les marno-calcaires et les argiles. Les affleurements reconnus appartiennent au Paléocène, à l'Éocène inférieur (Yprésien) et à Éocène moyen (Lutétien).

Le Paléocène est constitué par une assise de calcaires francs riches en fossiles.

L'Éocène inférieur est caractérisé par la présence de marnes argileuses et de silex vers la base (affleurement de pointe Sarène) et des marno-calcaires.

Dans l'Éocène moyen on note la présence de calcaires dits calcaires de Khombole.

L'Éocène supérieur ne connaît pas de dépôt marin étendu, la région est soumise à un régime continental qui correspond à la formation des premiers phosphates de chaux de Thiès.

3.3.5.2. Géomorphologie

La géomorphologie du Sine Saloum, façonnée par les différentes transgressions et régressions marines, est caractérisée par la présence de vasières (bas-fonds), de terrasses fluvio-alluviales correspondant à des tannes, et des dunes.

Les **zones de vasière et de tannes** sont la partie sous influence successive des inondations et des retraits des eaux de la mer. Une concentration abondante de sels en surface se manifeste dans ces zones en fonction de l'évaporation.

Les **vasières** à mangrove sont caractérisées par leur salinisation et leur acidification. Au niveau de la mangrove les racines à palétuvier contribuent à la fixation des vases marines.

Les tannes du Sine Saloum constituent l'espace le plus complexe du domaine fluviomarín sénégalais. Cela tient à la diversité des unités géomorphologiques héritées des différents épisodes morphogénétiques qui ont façonné le paysage au Quaternaire, à la variation du climat du nord au sud et à la forte densité du réseau hydrographique.

Les tannes se situent en arrière des vasières où ils s'étendent entre les mangroves et les barrières sableuses. Très développés au Nord du Saloum, ils diminuent peu à peu vers le Sud et n'occupent plus qu'une superficie restreinte par rapport aux vasières et aux barrières sableuses.

Parmi les tannes, on distingue les tannes nus, les tannes herbacés et les tannes arbustifs.

- les tannes nus sont de forme dénudée avec des efflorescences salines. Ils occupent les terrasses basses ;
- les tannes vifs, inondés seulement en partie en période de vives eaux.

En saison sèche, la surface des tannes vifs légèrement durcie forme une croûte qui se craquelle suivant des contours polygonaux. Lorsque la dessiccation se poursuit, les bords des polygones se relèvent et découvrent un horizon gris blanchâtre, poudreux riche en cristaux de sel :

- les tannes herbus ou herbacés qui occupent la terrasse moyenne et qui correspondent au «schorre». Ils sont isolés de l'influence des marées et sont séparés des tannes nus par une petite pente. Le schorre est réduit à des plages périphériques de plantes halophiles, formant une pelouse ou une prairie basse (*Prosopis sp*, *Tamarix senegalensis*, *Balanites aegyptiaca* etc.).
- les tannes arbustifs occupent les terrasses hautes colonisées par des espèces arbustives tolérantes au sel (*Combretum acuelatum*, *Balanites aegyptiaca*, *Boerhavia sp*, *Acacia seyal*, *Acacia nilotica*, *Eucalyptus sp* etc.).

Les dunes datent de l'époque Ogolienne (21 000 à 13 000 ans BP), période aride de régression marine. Il en subsiste encore d'innombrables témoins et vestiges sur les plateaux.

Bien qu'ils soient relativement estompés dans cette région, ces plateaux surplombent les vallées avec un glacis de raccordement bien nettement remarquable. Il en résulte un paysage à allure générale ondulée mais peu marquée.

La région de Kaolack fait partie intégrante du sous système sud du bassin arachidier. Cette zone particulièrement stratégique est devenue vulnérable aux phénomènes de désertification dont les symptômes sont nettement visibles au niveau des différents écosystèmes fragilisés. En effet, les sols devenus moins protégés suite à la réduction du couvert végétal (parc arboré) et la disparition précoce des résidus de culture ont permis l'installation d'une érosion éolienne. En plus, certains terroirs présentent des problèmes de salinisation importants et de dégradation hydrique.

3.3.6. La végétation

Les types de formations forestières dominantes vont de la savane arbustive au Nord à la savane au faciès boisé vers le Sud, avec toutefois quelques particularités caractérisant la diversité floristique de la région de Kaolack.

Aussi distingue-t-on:

–la savane arbustive qui couvre le Nord du département de Kaffrine et le Nord du département de Kaolack. Elle regroupe des espèces typiques de la zone sahélienne. Il s'agit principalement du *Guiera senegalensis* (nguer), *Combretum sp* (ratt, quinquéliba, taap, etc.), *Balanites aegyptiaca* (soump), *Lannea acida* (sone), *Bauhinia rufescens* (rande), *Adansonia digitata* (gouye), *Anogeissus léocarpus* (nguédiane), d'acacias divers (épineux), *Tamarix senegalensis* (mbourndou), *Acacia seya* (ndomb). Le tapis herbacé est composé essentiellement d'espèces très appréciées.

–la savane arborée du Sud et Sud-est du département de Kaffrine jusqu'au département de Nioro qui présente une plus grande diversité floristique. Elle est constituée généralement d'espèces de type soudanien pouvant atteindre 12 à 20 m de hauteur dont *Cordyla pinnata* (dimb), *Pterocarpus erinaceus* (vène), *Daniella oliveri* (santan), *Parkia biglobosa* (nété), *Tamarindus indica* (dakhar), *Prosopis africana* (irre), *Stercuiia setigera* (mbépp), *Parinari macrophylla* (new), etc. Dans le sous-bois, on rencontre des combrétacées et un tapis herbacé très riche.

–la mangrove dans le département de Nioro et le Sud-ouest du département de Kaolack occupe les écosystèmes humides des berges du Baobolong et du Miniminiyang. Elle est constituée d'espèces comme le *Rhizophora racemosa* et d'*Avicennia africana* (mangles).

Certaines espèces fertilisantes comme l'*Acacia albida* (kadd) et le *Cordyla pinnata* (dimb) sont répandues dans les terres de culture.

Les espèces exotiques, généralement rencontrées dans les zones d'habitations sont l'*Azadirachta indica* (neem), l'*Eucalyptus*, le *Prosopis*, le *Leuceana*.

3.4. Méthodologie d'évaluation de la dégradation des terres et établissement de cartes thématiques

La méthodologie employée pour l'évaluation de la dégradation des terres dans la région de Kaolack repose sur les principes et connaissances énoncées précédemment dans le chapitre sur la Télédétection aérospatiale. Elle décrit une procédure de cartographie de la dégradation basée sur l'extraction d'information à partir d'images satellitaires. Un indice synthétique par combinaison d'indices radiométriques qui reflète l'état de la végétation et du sol sert à établir

Chapitre 3 : Application de la télédétection spatiale pour l'évaluation de la dégradation des terres dans la région de Kaolack

une carte de la dégradation des terres et la répartition des superficies selon les niveaux de dégradation dans toute la zone d'étude.

Elle s'appuie également sur d'autres approches et résultats d'études similaires réalisées dans le domaine de la télédétection appliquée à l'évaluation de la dégradation des terres

L'organisation du travail s'articule autour de quatre (04) grandes phases, s'établissant comme suit :

- la revue documentaire ;
- l'établissement des cartes thématiques ;
- le calcul de la dynamique de la dégradation et
- l'analyse des résultats et discussions.

3.4.1. Phase 1 : La revue documentaire

Au Sénégal, le développement de la Télédétection est encore timide. Une des premières applications date d'avec l'étude de Cartographie et Télédétection des Ressources de la République du Sénégal, de la Géologie, de l'hydrologie, des sols, de la végétation et des potentiels d'utilisation des sols (PNAT, 1985).

Aujourd'hui quelques structures, avec des moyens et des ressources plus ou moins importants¹⁸ tentent tant bien que mal de contribuer à son développement. Il existe aussi quelques chercheurs bien que peu nombreux qui s'activent dans ce domaine.

De récentes applications ont eu lieu à travers des études notamment dans le domaine du **suivi environnemental** (Wade S. *et al.*, 2006), de la **gestion des risques et catastrophes naturelles** (Dia A. M. *et al.*, 2006), dans la **mise à jour de données** (KOUME J., 2006) et la **gestion des ressources en eau** (Wade S. *et al.*, 2006).

Parmi les principales études basées sur la technologie spatiale au Sénégal réalisées dans le domaine de l'évaluation de la dégradation des terres on peut citer : (i) l'étude **Établissement des cartes thématiques dans le cadre du projet de lutte contre la dégradation des terres (Idevic/Projet CODEVAL, 2011)**, (ii) l'étude **Land Degradation Assessment in Drylands project**

¹⁸ Centre de Suivi Ecologique (CSE), Laboratoire de Télédétection Appliquée (LTA)

(CSE/LADA, 2010) (iii) l'étude de *Cartographie et Télédétection des Ressources de la République du Sénégal, de la Géologie, de l'hydrologie, des sols, de la végétation et des potentiels d'utilisation des sols*_(PNAT, 1986) et (iv) la *Cartographie des tannes de Fimela* (Dieng B., 2010).

Une méthode d'évaluation de la dégradation des terres liée aux activités humaines a été proposée par Brabant P. (2010).

La Cartographie des tannes de Fimela

Elle est réalisée par Dieng B., Ingénieur des Eaux et Forêts en Juillet 2010.

La méthodologie suivante a été adoptée

1) Commande d'images satellitaires récentes couvrant toute la zone d'étude.

L'image qui a été utilisée dans le cadre de cette étude est Landsat ETM+ prise en 2008. L'intérêt de cette donnée primaire est de pouvoir visualiser à grande échelle les zones de tanne de chaque communauté rurale, ce qui a permis d'évaluer à priori le travail de terrain.

2) Extraction de l'information géographique

Cette étape s'est limitée à cartographier les zones de tanne identifiées dans l'image. Ceci a permis de concevoir et produire un premier document cartographique de base.

3) Cartographie de terrain

Elle a consisté à descendre sur le terrain et délimiter à l'aide du GPS les zones de tannes, conformément aux indications des Présidents de conseil rural ou de leurs représentants.

4) Conception et production des cartes des Blocs.

Elle s'est résumée à combiner les données de terrain à celles extraites des images. Autrement dit la descente de terrain a permis de valider et de compléter le travail préalable de bureau basé sur l'interprétation des données images.

5) Conception et création d'une base de données

Elle a consisté à évaluer quantitativement chaque unité d'occupation du sol. Toutes ces informations sont confinées dans des tableaux récapitulatifs.

Cette méthodologie privilégie les observations directes de classification supervisée numérisation de zones.

Établissement des cartes thématiques dans le cadre du projet de lutte contre la dégradation des terres (Projet de Renforcement des Capacités pour le Contrôle de la Dégradation des Terres et la Promotion de leur Valorisation dans les Zones Dégradées

L'objectif principal de l'étude était d'appuyer les agents forestiers dans les régions de Kaolack et Fatick en établissant les cartes d'occupation des sols, de répartition des terres dégradées, en analysant l'évolution de la dégradation des terres sur une période de 10 ans et en identifiant les zones prioritaires où le Projet devait mettre en œuvre des activités de luttés contre la dégradation des terres .

La zone d'étude couvrait les départements de Foundiougne et de Fatick de la région de Fatick et les départements de Nioro du Rip et de Kaolack de la région de Kaolack.

Des images satellitaires couvrant deux périodes d'observations : 1996-2000 et 2000-2010, ont été utilisées.

L'Indice de Végétation par Différence (DVI, *Difference Vegetation Index*) a été l'unique paramètre physique utilisé et qui a servi à établir les cartes de dégradation.

1) Calcul de l'indice de dégradation

A partir des résultats de la localisation des dégradations des sols et d'une typologie basée sur le niveau de dégradation et le type morphogénique, il a été calculé la superficie de chaque communauté rurale selon le type et le niveau de dégradation sur une échelle de 1 à 5. Puis, les surfaces des zones dégradées exprimées en pourcentage de la surface totale de chaque communauté rurale sont déterminées afin de pouvoir comparer l'intensité de la dégradation entre communautés rurales.

2) Calcul d'un indice global

Afin de rendre compte de l'intensité et de la densité de la dégradation à l'échelle communauté rurale, il a été calculé un indice global par pondération. Ainsi, à partir des surfaces obtenues précédemment, il a été appliqué une pondération proportionnelle à chaque niveau de dégradation déterminé.

La pondération s'applique par une multiplication des surfaces de chaque niveau de dégradation exprimées en pourcentage par le poids correspondant. La somme des produits des 5 niveaux est finalement divisée par la somme des poids, soit 15. On obtient ainsi un indice global de dégradation.

3) Calcul d'indices spécifiques

Pour calculer la dégradation par types, le même calcul a été appliqué au pourcentage de la surface de la communauté rurale touchée par le type de dégradation et selon les 5 niveaux de dégradation. Ainsi, pour chaque communauté rurale, un indice spécifique est obtenu à chaque catégorie de dégradation

Différentes cartes ont été produites :

- Carte d'occupation des sols, Fatick/ Kaolack en 2010 ;
 - Carte de la dégradation des sols, Fatick/ Kaolack en 1996 ;
 - Carte de la dégradation des sols, Fatick/ Kaolack en 2010 ;
 - Carte de dynamique de la dégradation de 1996 à 2010 ;
 - Carte de localisation et niveau de dégradation selon les différents types de dégradation ;
 - Carte de dégradation éolienne en 2010 ;
 - Carte de dégradation saline en 2010 ;
 - Carte de dégradation hydrique en 2010 ;
 - Carte de dégradation globale en 2010 et
- Carte des zones à forte dégradation en fonction des grands ensembles pédologiques des régions de Fatick et de Kaolack.

Evaluation de la Dégradation des Terres dans les zones arides (LADA)

L'absence de données fiables (globale, régionale ou locale) sur les types, les étendues, les tendances et les coûts de la Dégradation des Terres (DT), [du fait de l'irrationalité des démarches souvent utilisées] fait que les parties de la Convention des Nations Unies pour la Lutte contre la Désertification (CNULCD) ont souvent des difficultés pour évaluer et produire des rapports d'avancement dans la mise en œuvre/atteinte des objectifs de ladite Convention. C'est pourquoi la FAO, le PNUE et le FEM, ont initié le projet « Evaluation de la dégradation des terres dans les zones arides » (LADA - Land Degradation Assessment in Drylands project). Ce projet avait pour objectif le développement d'un cadre méthodologique et d'outils pour l'évaluation de la dégradation/gestion durable des terres à l'échelle globale, à l'échelle nationale et à l'échelle locale. La FAO a travaillé à cela en collaboration avec 6 pays pilotes : l'Afrique du Sud, le Sénégal, la Tunisie, Cuba, l'Argentine et la Chine.

Le principe sur lequel s'appuie le projet est que le niveau de dégradation ou de gestion durable d'une terre dépend largement des besoins et objectifs de l'exploitant, des itinéraires techniques, des moyens de production employés (main-d'œuvre, capital) et des niveaux de production atteints. Tout cela se structure à travers les systèmes de production qui ne sont rien d'autre qu' « un ensemble structuré de moyens de production (travail, terre, équipement) combinés entre eux pour assurer une production végétale et/ou animale en vue de satisfaire les objectifs de l'exploitant (ou du chef de l'unité de production) et de sa famille » (Jouve, 1992)

Dès lors, la définition et la cartographie de différents systèmes de production représentent une des activités de base pour la mise en œuvre de l'approche toute entière. Et le préalable à cette cartographie est l'identification – à travers un processus de stratification – d'aires

géographiques similaires selon un certain nombre de caractéristiques déterminantes aussi bien dans la survenue des dégradations que dans les interventions de réhabilitation.

L'approche utilisée pour cette stratification est le FCAM: Framework for Characterization And Mapping of agricultural land use.

Le projet LADA –Sénégal, exécuté par le CSE en collaboration avec les services techniques concernés par la question, a débuté en 2006 et s'est achevé en 2010.

Parmi les principales activités réalisées figurent:

- la caractérisation et la cartographie des principaux systèmes de production agricoles au Sénégal ;
- l'évaluation nationale de la dégradation/gestion durable des terres ;
- l'évaluation locale de la dégradation des terres,
- l'organisation d'une formation régionale sur les outils et approches LADA ;
- la documentation des meilleures pratiques de gestion durables des terres ; et
- la réalisation d'une étude sur les outils de gestion durable des terres au Sénégal.

1) L'évaluation nationale de l'état des terres

L'objectif principal de l'évaluation nationale était l'identification, pour les systèmes de production dominants, des principales dégradations/mesures de gestion durable et de leurs caractéristiques.

Cette identification est basée **sur la perception des services techniques locaux, des producteurs et de personnes ressources locales**. L'outil utilisé est le QM (questionnaire pour la cartographie de dégradation des terres) développé en collaboration entre LADA et le Panorama Mondial des Approches et Technologies de Conservation (WOCAT). **L'unité d'évaluation est une combinaison des systèmes de production et des départements du Sénégal.**

L'évaluation a mis l'accent sur la situation actuelle, avec une perspective historique sur les dix dernières années, l'information ne devant pas refléter les situations attendues, recommandées ou modélisées. Elle a couvert toute l'étendue du territoire national et a permis l'identification des principaux types de dégradations, de leurs étendues, de leurs degrés, de leurs taux, de leurs causes et de leurs impacts sur les services des écosystèmes. Elle a aussi permis d'identifier les principales mesures de gestion durable mises en œuvre, leur étendue, leur efficacité et de leurs impacts sur les services et écosystèmes.

Ces paramètres, rattachés à l'unité d'évaluation (intersection entre les unités administratives et les systèmes de production), ont été cartographiés¹⁹.

2) L'évaluation locale

L'évaluation locale avait pour objectif de produire une compréhension intégrée :

- des causes des dégradations et de leurs impacts biophysiques et socioéconomiques ;
- des mesures de gestion qui préviennent la dégradation des terres ; et
- des mesures institutionnelles, économiques et politiques les plus importantes à mettre en place pour promouvoir l'adoption des pratiques de gestion durable des terres.

La démarche utilisée a été une approche intégrée développée par l'équipe du projet LADA au niveau de la FAO en partenariat avec les pays pilotes, l'Université d'East Anglia (UEA), et plusieurs experts internationaux.

L'évaluation a porté sur 3 aires géographiques d'évaluation (GAA) : le département de Nioro du Rip, la zone sylvopastorale et la zone des Niayes.

Les données collectées ont porté sur :

✧ l'environnement socio-économique :

- les catégories d'utilisateurs des terres ;
- les types d'utilisation des terres ;
- l'histoire du territoire et de son peuplement ;
- les dégradations/mesures de gestion durable et leurs impacts sur les conditions de vie et sur les services des écosystèmes ;
- le niveau relatif d'aisance ;
- et les faits sociaux/institutionnels (accès à l'éducation, aux voies de communication, aux marchés, aux soins de santé, à l'eau, aux intrants, aux subventions, etc.).

✧ l'environnement biophysique :

- pente
- propriétés du sol (texture, structure, couleur, carbone labile)
- présence de la microfaune du sol (vers de terre)
- érosion (état, type, sévérité)
- croûtes
- régénération naturelle, mesures de houppier, circonférence, hauteur
- structure du peuplement végétal
- état physiologique de la végétation

¹⁹ L'unité cartographique n'est pas une délimitation précise de la zone dégradée (ou sous gestion durable) mais l'unité d'évaluation à laquelle la valeur est affectée dans son ensemble.

- espèces indicatrices
- présence de souches
- biodiversité
- conductivité et pH de l'eau

Les données collectées ont été exploitées et analysées en utilisant le cadre d'analyse FPEIR (Forces motrices, Pressions, Etats, Impacts et Réponses) pour faire le lien entre toutes les parties de l'évaluation et orienter la synthèse et l'analyse.

Certaines composantes du cadre d'analyse des services des écosystèmes (SE) et de l'approche des moyens de subsistance durables (MSD) ont aussi été utilisées pour la prise en compte de la catégorisation des impacts de DT/GDT.

L'outil utilisé pour l'analyse des moyens de subsistance durable est le pentagone des actifs ou biens capitaux (capital physique, capital humain, capital financier, capital social et capital nature).

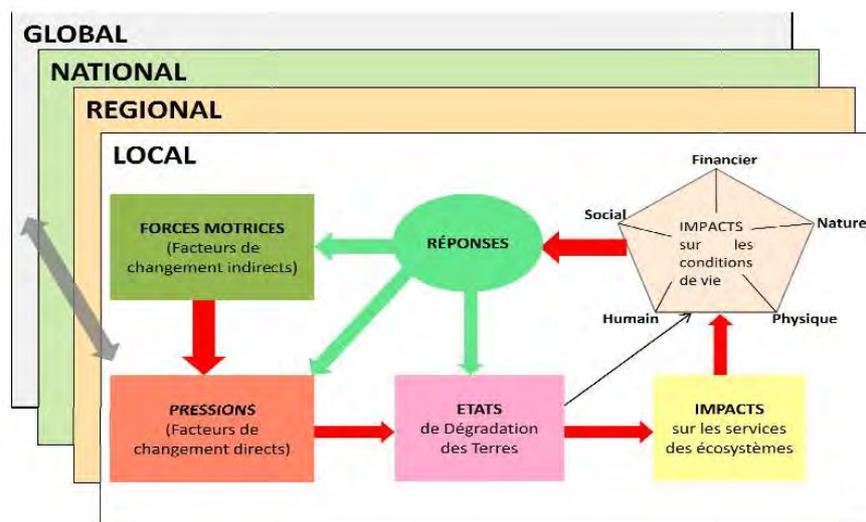


Figure 4 : Cadre d'analyse des résultats de l'évaluation locale

Source : Projet LADA-Sénégal, CSE, 2010

Les principaux outils développés et testés sont :

- le questionnaire WOCAT-LADA pour la cartographie de la dégradation des terres (QM) ;
- le manuel LADA-L (Partie 1 & Partie 2) pour l'évaluation locale de la dégradation des terres.

🚧 Cartographie et Télédétection des Ressources de la République du Sénégal, Etude de la Géologie, de l'hydrologie, des sols, de la végétation et des potentiels d'utilisation des sols.

Cette étude visait l'inventaire des ressources naturelles du Sénégal pour établir les données de base pour le Plan National de l'Aménagement du Territoire (PNAT). Elle a été effectuée entre 1982 et 1985 avec la préparation et la diffusion de cartes et de rapports décrivant les ressources du Sénégal.

La recherche pédologique est un des aspects les plus importants des études réalisées dans le cadre du projet "Cartographie et Télédétection".

Les critères de classification appliqués pour la production des cartes pédologiques dérivées (carte d'aptitude des sols, carte de la dégradation des sols) sont ceux développés par RSI tout au long de son expérience internationale et sont largement inspirés des recommandations du United States Department of Agriculture, Soil Survey Manual, et de l'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture, FAO.

Plusieurs types de cartes ont été réalisées et fournies aux agences gouvernementales sénégalaises et aux agences internationales :

- **Carte hydrogéologique** montrant les unités géologiques et hydrogéologiques du Sénégal.
- **Carte pédologique** montrant les unités morphologiques
- **Carte de la végétation** montrant les unités phytogéographiques
- **Carte de l'utilisation des sols** montrant les utilisations en cours soit les principales cultures, les forêts, les pâtures.
- **Carte des puits et de la nappe phréatique** montrant la profondeur de la nappe et des puits.
- **Carte d'aptitude des sols et des terres** montrant les potentiels pour l'agriculture, la sylviculture et le pâturage
- **Carte tectonique** montrant les principales unités structurales en relation avec les potentiels en minerais et en eau.
- **Carte de la dégradation des sols** montrant les zones d'érosion due au vent ou à l'eau, les zones d'incursion de l'eau salée et les zones soumises à une pression écologique du fait des dégradations d'origine humaine.
- **Carte de dégradation de la végétation** montrant la pression sur les unités phytogéographiques résultant du manque d'eau et/ou de la dégradation des sols, etc.
- **Carte de l'eau et des minerais du Sénégal** montrant les zones à fortes potentialités en eau, la profondeur de l'eau et le potentiel minéral du Sénégal.

La carte de la dégradation des sols

La carte de la dégradation des sols est en fait une carte d'interprétation de la carte morphopédologique. Le procédé rassemble et généralise au 1 000 000^e les unités morphopédologiques présentant des similitudes sur base de critères propres à cerner les effets de la dégradation des sols :

Quatre types de dégradation ont été envisagés et sont résumés ci-dessous.

A. Dégradation hydrique, surfaces résiduelles d'érosion : dans ce cas l'érosion hydrique ou la dégradation physique est prédominante.

Les sols sont caractérisés par une profondeur utile très faible, une forte proportion d'affleurements, une charge en éléments grossiers importante à très importante.

B. Dégradation éolienne

C. Dégradation due à la salinité : bien que l'échelle n'autorise pas une représentation détaillée de ces problèmes, les paramètres salinité et sodicité permettent de figurer les zones affectées par la présence de sels ou sodium, la présence probable d'efflorescences salines en surface.

D. Dégradation induite par l'activité humaine :

L'accent a été porté sur l'appauvrissement des sols par l'exploitation agricole et la régression des mangroves quoique la quantité d'imagerie disponible soit plutôt limitée pour effectuer ce genre d'interprétation.

✚ La méthode d'évaluation de la dégradation des terres liée aux activités humaines proposée par Pierre Brabant P.

Cette méthode a permis d'évaluer et de cartographier l'état actuel ainsi que les causes de la dégradation des terres. Elle s'applique à différentes échelles : depuis l'exploitation agricole jusqu'à un pays tout entier. La procédure est surtout applicable en zone tropicale et subtropicale. Elle a été utilisée avec succès en Afrique et en Asie, à l'échelle nationale (Togo) et provinciale (Vietnam).

Le résultat est constitué d'une représentation cartographique de l'état de dégradation des sols. Cette carte est basée sur un seul indice synthétique d'état de dégradation.

La méthode consiste en trois étapes :

- Au laboratoire il a été procédé à l'exploitation des données existantes sur le milieu naturel et le contexte socio-économique (cartes, archives, statistiques, données de terrain...). Ces données ont permis de délimiter des unités physiographiques au sein de la zone d'étude qui constituent des polygones quand elles sont retranscrites sur une carte topographique. Chaque unité a pu ainsi être constituée d'un ou plusieurs polygones dispersés sur le terrain. L'exploitation d'images aériennes et satellitaires a permis d'affiner ce découpage selon l'utilisation et l'occupation des terres. Cette étape

s'est conclue avec l'élaboration d'une carte provisoire de la zone à étudier divisée en polygones.

- Sur le terrain il a été procédé à l'identification de trois indicateurs dans des sites tests préalablement sélectionnés au sein des polygones. Ces indicateurs sont : le **type de dégradation**, **son extension** et **son intensité**. Six variables complémentaires sont déterminées : **vitesse de dégradation**, **tendance**, **historique**, **causes**, **vulnérabilité des sols**, **effets hors site**. Chaque polygone défini dans l'étape 1 est ainsi caractérisé par ces trois indicateurs en plus de ses caractéristiques physiques, socio-économiques et modes d'exploitation des terres.
- Au laboratoire il a été effectué un calcul de l'indice synthétique de dégradation des terres pour chacun des polygones à partir des trois indicateurs principaux. Cet indice est reporté dans chaque polygone de la carte provisoire et a permis d'établir la carte définitive. Le résultat est une carte montrant un zonage du terrain. Chaque zone, représentée par un polygone, est caractérisée par un indice (indice synthétique) visualisé par un gradient de couleur selon l'intensité de la dégradation (allant de 1 à 5).

Construction de l'indice synthétique d'état de dégradation des terres

- Indicateur 1 : les différents types de dégradation sont représentés par un symbole compréhensible au niveau international (p. ex. Ws pour Water sheet erosion : érosion en nappe).
- Indicateur 2 : l'extension de la dégradation s'exprime en pourcentage de la superficie affectée par le type de dégradation dans la zone de terrain concernée. Cinq classes d'extension sont définies.
- Indicateur 3 : le degré de dégradation (ou stade de gravité) est défini selon cinq classes et un seuil lié aux possibilités de restauration des terres selon chaque type de dégradation.

La méthode est accompagnée de fiches proposant des indicateurs pour identifier sur le terrain 36 types de dégradation, leur extension et degré.

L'indice synthétique est constitué de deux indicateurs qualitatifs (type et degré) et d'un indicateur quantitatif (extension). Indice = classe de l'extension (1 à 5) + classe du degré (1 à 5)

Le tableau suivant montre les forces et faiblesses des études susmentionnées.

Tableau 6 : Forces et faiblesses des études sur la dégradation des terres

Etude	Forces	Faiblesses
<i>Établissement des cartes thématiques dans le cadre du projet de lutte contre la dégradation des terres</i>	<ul style="list-style-type: none"> - images récentes de très bonne résolution - images multi datées - utilisation d'indice de végétation (Indice de Végétation par Différence) 	<ul style="list-style-type: none"> - dates de prises de vue différentes pour une même année et pour des zones identiques d'une année à une autre - utilisation d'un seul indice de végétation (DVI)
<i>Land Degradation Assessment in Drylands project</i>	<ul style="list-style-type: none"> - approche intégrée - approche peu onéreuse - identification des principaux types de dégradation, leurs étendues, degrés et impacts sur les services des écosystèmes et les mesures de gestion durables mises en œuvre 	<ul style="list-style-type: none"> - généralisation (évaluation au niveau national basée sur la perception des services techniques locaux, des producteurs et de personnes ressources locales. Les unités cartographiques définies sont différentes des délimitations précises de la zone dégradée, elles correspondent aux unités auxquelles la valeur de dégradation est affectée dans son ensemble) L'unité d'évaluation est une combinaison des systèmes de production et des départements du Sénégal. au niveau local, l'évaluation est faite dans des placettes situées dans quatre sites appartenant à des aires écogéographiques ; la taille de l'échantillon est très réduite)
<i>Cartographie et Télédétection des Ressources de la République du Sénégal, de la Géologie, de l'hydrologie, des sols, de la végétation et des potentiels d'utilisation des sols</i>	<ul style="list-style-type: none"> - approche intégrée (interdisciplinaire) - mosaiquage, traitement du signal spectral, interprétation d'images satellitaires (Landsat) et de photographies aériennes - sondages - définition d'unités morphopédologiques - analyse multi datée - définition d'unités morphopédologiques- analyse multi datée 	<ul style="list-style-type: none"> - qualité des images médiocre - petite échelle (1 000 000e) - généralisation - données anciennes
<i>Cartographie des tannes de Fimela</i>	<ul style="list-style-type: none"> - traitement du signal spectral, interprétation et cartographie zonale - vérification terrain 	<ul style="list-style-type: none"> - absence de traitement d'indices radiométriques - faible résolution des images - absence de sondage
Méthode d'évaluation de la dégradation des terres liée aux activités humaines proposée par Pierre Brabant P.	<ul style="list-style-type: none"> - utilisation de fonds cartographiques - traitement du signal spectral - vérification terrain 	<ul style="list-style-type: none"> - absence de traitement d'indices radiométriques - généralisation (Unités cartographiques).

3.4.2. Phase 2 : Etablissement des cartes de dégradation

La procédure de cartographie de la dégradation est basée d'une part sur un choix judicieux des données et d'autre part sur l'extraction et la combinaison d'indices spectraux pertinents pour produire des cartes de dégradation des terres.

3.4.2.1. Choix des données

Les données utilisées dans le cadre de cette étude sont essentiellement des images satellitaires. D'autres types de données sont utilisés pour compléter les informations sur les cartes.

3.4.2.1.1. Les images satellitaires

Les images satellitaires permettent d'étudier tous les phénomènes visibles à la surface de la terre, et donc en particulier la surface des sols nus ainsi que les diverses occupations du sol selon la saison ou l'année. Il est possible de tenter une analyse spatiale ou structuration de l'espace à partir de ces documents en se basant sur des disciplines combinées telles que la télédétection, la pédologie, la statistique, la foresterie, l'agronomie, la cartographie etc.

Les images en couleur infra-rouge sont sensibles aux radiations du spectre visible et du proche infra-rouge. La végétation en cours de croissance absorbe les radiations situées dans le bleu et le rouge et réfléchit les radiations situées dans le vert et le proche infra-rouge.

Les images obtenues à partir de la composition de certaines bandes de systèmes SPOT et Alos ont permis d'établir les cartes de la dégradation à différentes périodes par-comparaison de teintes.

Les images utilisées dans le cadre de ce travail sont de deux types :

- ALOS, 10 mètres de résolution, datant de 2010,
- SPOT, 20 mètres de résolution, datant des années 1996 et 2000.

Ces images satellitaires qui couvrent complètement la région de Kaolack proviennent du projet CODEVAL. Elles couvrent une période d'observation allant de 1996 à 2010 soit 15 ans.

Elles utilisent différents capteurs satellitaires : SPOT-4 et ALOS-AVNIR2. Les caractéristiques techniques de ces deux capteurs offrent une bonne résolution spatiale et une acquisition multi spectrale couvrant les spectres optiques du visible et du proche infrarouge (Cf. Tableau 7)

Tableau 7 : Caractéristiques techniques des images Spot 4 et Alos Avnir

	Spot 4	Alos AVNIR-2
Radiométrie	<ul style="list-style-type: none"> • Bande 1 : Vert (0,50 - 0,59 µm) ▪ Bande 2 : Rouge (0,61 - 0,68 µM) ▪ Bande 3 : Proche infrarouge (0,78 - 0,89 µm) ▪ Bande 4 : Moyen infrarouge (MIR) (1,58 - 1,75 µm) 	Bande 1 : 0.42 - 0.50 µm Bande 2 : 0.52 - 0.60 µm Bande 3 : 0.61 - 0.69 µm Bande 4 : 0.76 - 0.89 µm (proche infrarouge)
Résolution spatiale	20 m x 20 m	10 m x 10 m
Période	1996	2007/2010

Tableau 8 : Description des scènes SPOT et ALOS

Nom de scène	Description	SPOT	Catégories
SPOT 4 – 1995-1997			
xs021-322_13021996_UTM	13 février 1996 - zone Sibassor	SPOT4	Image TIFF
xs021-322_13021996_UTM	13 février 1996 – zone Ouadiour	SPOT4	Image TIFF
xs022-322_17011995_UTM	17 janvier 1995- zone Tiombi	SPOT4	Image TIFF
xs022-322_13021996_UTM	13 février 1996 – Keur Saloum Diarié	SPOT4	Image TIFF
xs022-322_24021996_UTM	24 février 1996 – Guinguinéo	SPOT4	Image TIFF
xs022-322_24021996_UTM	24 février 1996 – Wack Ngouna	SPOT4	Image TIFF
xs022-322_18031997_UTM	18 mars 1997 – Médina Sabakh	SPOT4	Image TIFF
SPOT 4 – 1999-2002			
xs024-322_13021996_UTM	20 janvier 1999 – zone Wack Ngouna	SPOT4	Image TIFF
xs024-322_17011995_UTM	08 mars 1999 - zone Koumbal	SPOT4	Image TIFF
xs024-322_13021996_UTM	23 décembre 2000 Nioro du Rip, Médina Sabakh	SPOT4	Image TIFF
xs024-322_13021996_UTM	01 janvier 2002 – zone Diakaho	SPOT4	Image TIFF
xs024-322_17011995_UTM	01 janvier 2002 - zone Djilor	SPOT4	Image TIFF
xs024-322_17011995_UTM	05 avril 2002 - zone Nguéiélou, Ouadiour	SPOT4	Image TIFF
Alos - Avnir 2010			
ALAV2A213613330	27 janvier 2010-zone Médina Sabakh	Alos Avnir	Image TIFF
ALAV2A216093300	27 janvier 2010-zone Passi Ngayène	Alos Avnir	Image TIFF
ALAV2A216093330	13 février 2010, zone Wack Ngouna	Alos Avnir	Image TIFF
ALAV2A216093320	15 janvier 2010-zone Paoskoto	Alos Avnir	Image TIFF
ALAV2A216093310	13 février 2010, zone Guinguinéo	Alos Avnir	Image TIFF
ALAV2A211863320	15 janvier 2010-zone Ndiedieng	Alos Avnir	Image TIFF
ALAV2A211863310	15 janvier 2010-zone Sibassor	Alos Avnir	Image TIFF

Encadré 6 : Quels sont les avantages et les inconvénients des images satellitaires ?

Le tableau ci-dessous montre les avantages et les inconvénients des images satellitaires

Tableau 9 : Avantages et inconvénients des images satellitaires

CRITERES	AVANTAGES	INCONVENIENTS
<i>Les modes d'acquisition</i>	<i>Adaptés pour l'acquisition de petites zones, n'importe où sur le globe</i>	<i>Délais d'acquisition augmentés par l'orbitographie Impossibilité d'agir sur le satellite (trajectographie, programmation d'acquisition)</i>
<i>Les conditions météorologiques</i>	<i>Peu soumis aux aléas climatiques (rotations systématiques)</i>	–
<i>Le contexte géopolitique</i>	<i>Impossibilité de survol de certaines régions du globe (guerre, terrorisme)</i>	<i>Les militaires peuvent interdire la diffusion de certaines images (cas des zones considérées sensibles comme les bases militaires ou les centrales nucléaires p.ex.)</i>
<i>Le secret militaire</i>	–	<i>Restriction des possibilités en termes de taille de pixel sol, Priorité des militaires dans la programmation des acquisitions Impossibilité d'accéder à certaines caractéristiques (focale) Impossibilité d'accéder à certains produits (HRS de Spot-5) Obligation pour certains programmes de fournir le nom du client définitif aux distributeurs (perte de confidentialité). Exemple les produits 3D de Spot-5.</i>
<i>Les autorisations de survol</i>	<i>Liberté de survoler la planète (acquisition des images n'importe où dans le monde)</i>	–
<i>Les différences de luminosité</i>	<i>Héliosynchronisme (permet de repasser au-dessus d'un même point avec les mêmes conditions d'éclairage solaire)</i>	<i>Des problèmes d'artéfacts et/ou d'ombres peuvent apparaître s'il y a trop de délai entre deux images (problème lié à la période de revisite pour le cas des satellites équipés de stéréoscopie latérale).</i>
<i>Les difficultés d'accéder à l'information</i>	–	<i>Données classées confidentielles (secret industriel) Recherche difficile d'images satellitaires sur catalogue en ligne</i>
<i>Les tailles de pixel sol</i>	–	<i>Limite actuelle 40 cm (cas du satellite WoldView-1) Avec GCP, possibilité d'obtenir des précisions de localisation proche de l'aérien</i>
<i>Les précisions de localisation</i>	<i>Certains satellites disposent d'une bonne précision de localisation absolue (une dizaine de mètres pour l'ensemble de la planète)</i>	<i>Sans GCP, pas mieux que la dizaine de mètres Avec GCP, possibilité d'obtenir des précisions de localisation proche de la photographie aérienne</i>

Source : Didier M. V. (2008)

Remarque : Toutes les images utilisées sont déjà géoréférencées et ont subi un traitement jusqu'au niveau 2²⁰; c'est-à-dire que les images sont radiométriquement et géométriquement corrigées et sont rectifiées dans une projection cartographique (UTM WGS 84)

Il reste cependant le niveau 3 : où les images de niveau 2 sont orthorectifiées c'est-à-dire calées à partir de points de contrôle ou *GCP (Ground Control Point)*.

3.4.2.1.2. Autres types de données

Les autres types de données utilisés sont des cartes, des images, des statistiques agricoles, des données pédologiques et des shapefiles.

Tableau 10 : *Autres types de données*

Données	Description	Format	Source	Date
Carte des sols du Sine Saloum	Feuille Mbour (une partie de Mbour Kaolack et Fatick)	Image TIFF	Centre de Recherche Agronomique de Bambey	1963
Carte PCS 200	Feuille géoréférencée couvrant les régions de Kaolack et de Fatick	Carte TIFF	DTGC	2005
Image LANDSAT ETM	Multispectrale traitée et géoréférencée	Image TIFF		2005
Limites de département, des Cr, localités et réseau hydrographique de la région de Kaolack	Données administratives et hydrographie	Shape	PCS 200DTGC	2005
CR d'occupation du sol Cr Ndiob	1/25000, IMAGE SPOT P+XI 1999 et Enquêtes de terrain	Windows metafile (wmf)	CSE	1999
Carte morpho pédologique	1/500 000°	En papier	USAID	1985
Carte d'aptitude des terres du Sénégal	1/500 000°	En papier	USAID	1985
Carte de la dégradation des sols du Sénégal	1/1 000 000°	En papier	USAID	1985
Carte du couvert végétal du Sénégal	1/1 000 000°	En papier	USAID	1985
Statistiques agricoles de la région de Kaolack		xls	DAPS	1998 à 2008
Points de contrôle pédologique	07 profils		ISRA, CNRA de Bambey	2011

²⁰ Les images satellites sont conçues pour être retravaillées. Elles nécessitent donc souvent des retraitements

3.4.2.2. Travaux de terrain

Les travaux de terrain organisés dans le cadre de l'étude du CODEVAL dans les régions de Fatick et de Kaolack, et auxquels nous avons pris part, nous ont permis d'obtenir des points de mesure pédologiques.

Au cours de ces travaux, nous avons participé à plusieurs rencontres avec les différents acteurs concernés par la dégradation des terres dans la région de Kaolack et de disposer d'une importante documentation portant sur la classification des sols et la réhabilitation des terres de la zone de l'étude (voir en annexe la liste bibliographique).

Les échanges avec les acteurs ont permis de cibler les principales unités de sols devant faire l'objet de sondages en vue des analyses de laboratoire.

Les travaux de sondage ont été menés du 06 au 10 septembre 2011. Ils ont principalement consisté à mener des observations pédologiques comportant :

- la réalisation et la description de sondages à la tarière sur les différentes unités pédologiques ciblées ;
- les mesures in situ du pH et de la conductivité électrique (CE) des eaux stagnantes et/ou de la nappe lorsque celle-ci est atteinte ;
- le repérage au GPS des sites d'observation.

Ces travaux de terrain ont permis de réaliser 12 sondages à la tarière uniformément répartis sur les différentes unités pédomorphologiques identifiées dans les 2 régions concernées. Les prélèvements effectués ont concerné 36 échantillons, comprenant en moyenne 3 horizons par profil.

Parmi ces sondages six (06) concernent la région de Kaolack.

3.4.2.3. Travaux de laboratoire

Les travaux de laboratoire ont été réalisés au laboratoire des sols du CNRA de Bambey. Les analyses ont concerné la granulométrie (3 fractions avec les éléments: argile, limon, sables), carbone total, azote total, pH et la conductivité électrique.

L'essentiel des résultats des études de sol sont repris dans ce rapport.

3.4.2.4. Extraction des niveaux de dégradation : calcul des indices spectraux

En télédétection, les indices font partie des méthodes de traitement que l'on appelle les transformations multispectrales. Ils consistent à convertir les luminances mesurées au niveau du capteur satellitaire en grandeurs ayant une signification dans le domaine de l'environnement.

Basés sur le caractère multispectral des données satellitaires, ils permettent de décrire l'état d'un phénomène.

Tous les indices, que ce soit les indices de végétation, les indices des sols, les indices relatifs à la colonne d'eau, etc., reposent sur une approche empirique basée sur des données expérimentales. Les indices de végétation sont très utilisés pour identifier et suivre la dynamique de la végétation, mais aussi pour estimer certains paramètres biophysiques caractéristiques des couverts végétaux, comme la biomasse, l'indice de surface foliaire, la fraction de rayonnement photosynthétique actif, etc.

L'extraction de l'information par le calcul des indices spectraux par des combinaisons arithmétiques d'images multi spectrales a pour objectif de réaliser des néo-canaux (canaux de synthèse) qui maximisent l'information recherchée.

Les paramètres utilisés ici pour l'étude de la dégradation des terres par interprétation d'images satellitaires sont de deux sortes : végétale et pédologique. Nous avons utilisé deux paramètres végétaux, l'indice de végétation par différence normalisée (NDVI) et l'Indice de Végétation Transformé (TNDVI) et un paramètre pédologique, l'Indice de brillance (IB).

3.4.2.4.1. Détermination des indices unitaires

a. Le NDVI (Normalised Difference Vegetation Index)

L'indicateur le plus important en matière de végétation est l'indice de végétation qui donne des informations sur la végétation verte contenue dans l'image.

De très nombreux indices de végétation ont été construits et utilisés depuis maintenant une quarantaine d'années (Bannari *et al.*, 1995). Ils prennent la forme soit d'expressions très basiques (simple différence ou simple ratio), soit de formules beaucoup plus complexes. On a l'habitude de les classer en familles d'indices selon qu'ils prennent ou non en compte les facteurs externes aux couverts végétaux, tels que l'influence de l'atmosphère, la contribution spectrale des sols, la teneur en eau des végétaux (indices de sécheresse), etc.

L'indice de végétation le plus connu et le plus utilisé est l'indice de végétation par différence normalisée ou indice de Tucker (NDVI en anglais) (Rouse and Haas, 1973 ; Tucker, 1979).

Les raisons de son utilisation fréquente tiennent principalement à sa simplicité de calcul, à son caractère normalisé et à sa réputation de moindre sensibilité vis à vis de facteurs externes tels que les propriétés optiques du sol, la géométrie de l'éclairement ou les effets atmosphériques.

Le NDVI se calcule avec les bandes Rouge et Proche Infra Rouge selon la formule $(PIR-R)/(PIR+R)$. Pour les images Spot c'est la bande 2 (rouge) et la bande 3 (proche infrarouge). Pour les images Alos c'est la bande 3 (rouge) et la bande 4 (proche infrarouge).

Son expression est la suivante :

$$NDVI = \frac{\rho_{PIR} - \rho_R}{\rho_{PIR} + \rho_R}$$

La normalisation par la somme des deux bandes (au dénominateur) permet de réduire les effets d'éclairement. Le NDVI conserve une valeur constante quel que soit l'éclairement global, contrairement à la simple différence qui est très sensible aux variations d'éclairement.

Pour les sols nus, les réflectances étant à peu près du même ordre de grandeur dans le rouge et le proche infrarouge, le NDVI présente des valeurs proches de 0. Les formations végétales quant à elles, ont des valeurs plus élevées.

b. L'Indice de Végétation Transformé (TNDVI)

L'Indice de Végétation Transformé ou Transformed Normalized Difference Vegetation Index (TNDVI) (Deering *et al.*, 1975)

Il se calcule avec les bandes Rouge et Proche Infra Rouge selon la formule $\text{Sqrt}((\text{Bande PIR} - \text{Bande R}) / (\text{Bande PIR} + \text{Bande R}) + 0.5)$.

C'est un Indice semblable au NDVI qui permet d'étudier la biomasse.

La transformation a un double but :

Éliminer les valeurs négatives et stabiliser la variance du rapport (grâce à la racine).

c. L'Indice de Brilliance (IB)

C'est un indicateur de la teinte des sols nus et des roches.

Son expression est la suivante:

$$IB = \sqrt{PIR^2 + R^2}$$

L'IB met en évidence :

- l'humidité des sols ;

- les rugosités de surface ;
- la couleur des sols ;

Pour plus de détails sur les indices spectraux voir l'annexe 2.

3.4.2.4.2. Normalisation ou égalisation d'histogramme

Notre approche étant qualitative, les valeurs de contraste des pixels obtenus lors des calculs des indices qui sont comprises dans des intervalles de valeurs différentes sont normalisées pour pouvoir les combiner et procéder à une classification.

L'objectif de la normalisation des contrastes est de permettre l'intercomparaison des données acquises à différentes dates et différents lieux géographiques, et par différents instruments d'observation.

Nous avons utilisé la méthode de la transformation linéaire. Elle consiste en un étirement ou étalement des valeurs de tous les indices obtenus sur les nouveaux minimum (en général 0) et maximum (en général 255).

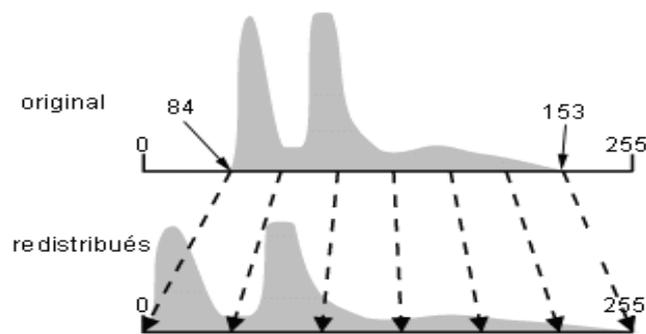


Figure 5: Transformation linéaire des contrastes

3.4.2.4.3. Combinaison des indices

Nous avons ensuite combiné les différents indices spectraux pour obtenir un indice synthétique sur une image permettant d'apprécier les niveaux de dégradation.

Cette méthode permet de lever les ambiguïtés des uns (indices) par l'utilisation des autres.

Par exemple, l'IB mélange les espaces très humides de végétation avec les surfaces en eau alors que certains types de végétation très réfléchissants peuvent se confondre avec les espaces construits.

La formule qui a été utilisée est la moyenne de la somme des différents indices pour les différentes années.

3.4.2.4.4. Rehaussement du contraste local, le filtrage d'image

Après l'étape de combinaison des indices, pour chaque image résultante, nous avons amélioré les limites par filtrage.

Le filtrage d'image est simplement une modification des fréquences spatiales (contrastes locaux) où l'on transforme la valeur radiométrique d'un pixel considéré par rapport à ses voisins pour faire ressortir ou pour supprimer des détails de l'image.

Le but du filtrage d'image est essentiellement de supprimer, d'atténuer ou d'accentuer les fréquences spatiales en vue de rendre plus nets les thèmes linéaires ou les contenus de deux ou plusieurs thèmes contigus pour une bonne interprétabilité de l'image.

Cette amélioration locale se fait à l'aide des filtres dont la base est la convolution.

Une convolution est un traitement d'une matrice par une autre appelée matrice de convolution ou « noyau ».

Un filtre (ou masque de convolution ou boîte de filtre) unidirectionnel dans une fenêtre 3 * 3 est utilisé

Le filtre étudie successivement chacun des pixels de l'image. Pour chaque pixel, que nous appellerons « pixel initial », il multiplie la valeur de ce pixel et de chacun des 8 pixels qui l'entourent par la valeur correspondante dans le noyau. Il additionne l'ensemble des résultats et le pixel initial prend alors la valeur du résultat final.

3.4.2.4.5. Classification selon la valeur de l'indice

Les valeurs de l'indice résultant des opérations précédentes sont réparties en 5 classes de 1 à 5 dans une composition colorée correspondant à cinq (05) niveaux d'intensité de dégradation.

Tableau 11 : Classification des niveaux de dégradation

Classe des réflectances	degré de dégradation	Limites des classes (niveau de gris)
1	Très faible	0 à environ 55
2	Faible	55 à environ 100
3	Moyenne	100 à environ 150
4	Forte	150 à environ 200
5	Très forte	200 à 255

3.4.2.4.6. Réalisation des cartes images thématiques proprement dite

Cette étape a d'abord comporté un important travail de traitement des données et de rédaction cartographique.

A ce niveau, la base de données cartographiques de l'étude Cartographie et Télédétection des Ressources de la République du Sénégal, Etude de la Géologie, de l'hydrologie, des sols de la végétation et des potentiels d'utilisation des sols et celle de la DTGC ont constitué une importante source d'informations.

Elles ont permis de disposer d'une part d'informations (administrative, physiographique, occupation du sol) pour compléter les cartes thématiques et d'autre part d'éléments de comparaison (limite, intensité de la dégradation) dans le temps et dans l'espace de la dégradation des terres.

Au total, quatre (04) types de cartes de synthèse ont été produits :

- une carte de la dégradation des terres en 1996, 2000 et 2010 ;
- une carte de la dynamique de la dégradation de 1996-2000, 2000-2010 et 1996-2010 ;
- une carte de la vitesse de la dégradation des terres de 1996-2000, 2000-2010 ;
- une carte de la variation de la vitesse de la dégradation des terres de 1996-2000, 2000-2010.