Approches par télédétection et cartographie des espaces sahéliens mauritaniens

Adeline Cotonnec, Marie Josée Penven, Isabelle Ganzetti, M.-L. Ould El Hacen, Ahmedou Ould Soule, Ahmed Ismaïl Boumediana

▶ **To cite this version:**

Adeline Cotonnec, Marie Josée Penven, Isabelle Ganzetti, M.-L. Ould El Hacen, Ahmedou Ould Soule, et al.. Approches par télédétection et cartographie des espaces sahéliens mauritaniens. Le Monde des Cartes, 2011, 207, pp.19-32. hal-00697609

HAL Id: hal-00697609
https://hal.science/hal-00697609

Submitted on 15 May 2012

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

APPROCHES PAR TELEDETECTION ET CARTOGRAPHIE DES ESPACES SAHELIENS MAURITANIENS

Par Adeline Cotonnec, Marie-Josée Penven*, Isabelle Ganzetti*, Mohamed Lemine Ould Elhacen**, Ahmedou Ould Soulé***, Ahmed Ismail Boumédiana****

**COSTEL Université Rennes2*
UMR 6554 LETG CNRS
Place du recteur H.Le Moal
35043 Rennes Cedex
Courriel : adeline.cotonnec@univ-rennes2.fr
***Département de Géographie, Université de Nouakchott*
****Ecole Normale Supérieure de Nouakchott*

La période de sécheresse de la fin du 20ème siècle qui a touché les régions sahéliennes a engendré une dégradation du milieu par régression des ressources eau et végétation, ayant pour conséquence une réduction du cheptel et un appauvrissement des populations pastorales. Depuis la fin des années 90, la partie occidentale de ce domaine connaît une amélioration des conditions pluviométriques susceptibles de créer des conditions favorables à la régénération des pâturages. Grâce à une étude diachronique sur une période de 50 ans (1956 - 2005), notre objectif est d'estimer les réponses du milieu au forçage pluviométrique en identifiant l'évolution du rapport entre les aires végétalisées et les aires sableuses. Les études sont centrées sur un secteur de la région sud - ouest du Hodh mauritanien caractérisé par des géosystèmes sableux dominants et façonnés en cordons dunaires plus ou moins vigoureux et une homogénéité du mode d'utilisation de l'espace. La période considérée couvre la fin d'une phase d'années humides, une phase sèche de 1970 à 1999 et la reprise de précipitations plus abondantes depuis 1999, soit deux changements majeurs dans les totaux pluviométriques enregistrés. La démarche utilisée est fondée sur des méthodes et techniques bâties sur l'analyse des données de télédétection spatiale en utilisant une procédure standardisée et validée aux échelles régionale et locale. Elle repose sur une approche systémique permettant de mettre en relation les composantes du milieu à partir de traitements adaptés à l'identification et l'extraction des aires sableuses et végétalisées, au calcul des superficies affectées par la régression végétale et à la mise en relation des différentes organisations biogéomorphologiques. Les études ont été menées à l'aide d'une couverture photographique aérienne (1956, état de référence) et d'images satellite Landsat (1988, 1999, 2001) et Spot (2005) acquises aux périodes les plus favorables à la séparabilité spectrale des objets, complétées par cinq missions terrain effectuées entre 2005 et 2009. Cette démarche nous a conduit à souligner la combinaison complexe de systèmes fonctionnels distincts où les variables d'état et les variables dynamiques interagissent pour engendrer les mécanismes et processus physiques et biologiques. La spatialisation des processus, l'organisation générale et les changements paysagers ont été traduits sous formes cartographiques géoréférencées à l'échelle de la région et des sous-unités fonctionnelles. Les résultats montrent un net ralentissement et une moindre efficacité des processus éoliens laissant plus de place aux processus biologiques favorables à la reconquête des sols sableux par la végétation.

Introduction :

Durant les trente dernières années du 20ième siècle, les espaces sahéliens ont connu un déficit annuel presque constant des précipitations. Cette période sèche a engendré une modification profonde du milieu que certains auteurs ont qualifiée de « désertification » (Loireau *et al.*, 2007 ; Rognon, 2007). Dans ce contexte de déficit prolongé des précipitations, la couverture végétale a subi une importante dégradation qui a atteint sa composition floristique et son extension spatiale. Sa régression a laissé place aux processus éoliens qui ont favorisé le développement de surfaces sableuses dénudées. L'érosion éolienne et la régression des ressources (fourragères et eau) ont entraîné une réduction des cheptels, un appauvrissement des populations pastorales, des modifications de leurs trajectoires de migration, une émigration vers les villes.

Depuis la fin des années 90 et le début des années 2000, la partie occidentale du domaine sahélien connaît une amélioration des conditions pluviométriques susceptibles d'apporter un certain nombre de changements et de créer des conditions favorables à la régénération des pâturages. Si l'utilisation rationnelle des ressources constitue l'assurance d'une reprise de l'activité pastorale et de sa durabilité, une telle gestion conservatoire nécessite, par inventaire et cartographie, une approche des ressources fourragères et en eau et une identification des modes d'exploitation du milieu par les populations locales (Boudet, 1984, *in* Godard, 1991). Cependant, les études demeurent encore largement insuffisantes spécialement aux échelles régionale et locale. De façon générale, les modifications physiques de ces territoires sont identifiées à une petite échelle (Sahel) à l'aide de la télédétection spatiale de faible et moyenne résolution (Achard et Blasco, 1990 ; Bartholomé, 1990 ; Crépeau *et al*., 2003 ; Taïbi et El Hannani, 2004). Toutefois, à ces niveaux d'approche, les modes de développement de la végétation, en lien avec la diversité locale des conditions physiques du milieu ne peuvent être mises en évidence. Plus rares encore sont les études qui, au travers de l'inventaire des composantes à des échelles locales, tentent d'évaluer les tendances évolutives spatialisées de la végétation sur sols sableux (Breman et de Ridder, 1991 ; Godard, 1991,...). L'une des explications tient souvent au fait que, dans les régions sahéliennes, les données existantes sont souvent déficientes. En Mauritanie précisément, Godard (1991), Carrière (1994), Penven et Cotonnec (2008), Penven et *al.,* (2008), Cotonnec et *al*., (2009 et 2010) notent que les recherches sont rares en milieu continental pourtant soumis à une forte vulnérabilité de ses ressources naturelles comme le montrent les récents travaux de ces chercheurs.

Ainsi, à l'échelle de ces territoires sahéliens, les différentes unités spatiales fonctionnelles à divers degrés de conservation ou de dégradation restent à définir géographiquement ainsi que les mécanismes de fonctionnement en jeu afin que les populations et les services de gestion compétents puissent intervenir efficacement. C'est pourquoi il est important de comprendre et de spatialiser les processus de fonctionnement actuels et les tendances évolutives. C'est à l'échelle de systèmes spatiaux fonctionnels définis selon les facteurs propres à chacun d'eux, l'état de leurs composantes et leurs interrelations que les recherches ont été menées. Les espaces à différents degrés d'évolution peuvent être différenciés dans un but de restauration physique et biologique du milieu afin d'offrir des possibilités de reconquête et de reconstitution du couvert végétal et *in fine* de la biodiversité.

Grâce à une étude diachronique sur une période de 50 ans (1956 - 2005), nos objectifs sont de traduire par télédétection et sous forme cartographique les organisations spatiales à l'échelle régionale et d'estimer, à l'échelle d'un système spatial fonctionnel, l'évolution du rapport aires sableuses / aires végétalisées. Les résultats doivent permettrent d'apprécier les interrelations entre les composantes du milieu et d'estimer les vitesses et les rythmes de réponse du milieu au forçage pluviométrique. La période considérée couvre la fin d'une phase d'années humides, la phase sèche de 1970 à 1999 et la reprise de précipitations plus abondantes depuis 1999, soit deux changements majeurs dans les totaux pluviométriques enregistrés.

1 Le secteur d'étude

Notre étude est centrée sur un secteur de la région sud - ouest de Kiffa. Il appartient la grande dépression du Hodh mauritanien située au Sud du 17ème parallèle et bordée à l'Ouest par le talus du plateau de l'Assaba et du Tagant qui culmine à près de 500 mètres (fig.1). Cette région est caractérisée par des altitudes moyennes situées entre 120 et 200 m avec une marqueterie d'affleurements rocheux et de couvertures sableuses façonnées en cordons dunaires plus ou moins vigoureux. Elle constitue une aire de transition entre les milieux aride et semi-aride avec une moyenne annuelle des précipitations de 292 mm, calculée sur une période de 60 ans à partir des données de la station météorologique de Kiffa (fig.2). On observe une forte variabilité interannuelle, avec une longue saison sèche qui s'étend d'octobre à juin, 5 mois d'Harmattan de janvier à mai et une courte saison humide de 3 mois avec environ 25 jours de pluies. Ces conditions sont favorables à l'implantation, sur les couvertures sableuses (fig.3), d'espèces végétales qui composent une steppe arbustive et arborée à *Leptadenia pyrotechnica, Calotropis procera, Balanites aegyptiaca* et Acacias (*tortilis, senegalensis*, etc,…). La strate herbacée est surtout constituée de plantes annuelles où les graminées sont prédominantes (*Cenchrus biflorus, Aristida sp.,* etc,*…).* Des points d'eau sont présents sous forme de puits, mares temporaires ou lacs stratégiques pour les populations qui s'installent à proximité et pour les troupeaux qui viennent s'y abreuver (fig.4).

Cette région est traditionnellement un territoire d'importantes activités pastorales et, plus récemment et dans une moindre mesure, agricoles, faisant vivre des populations nombreuses. Depuis les années 1960, elle

connaît une villagisation accentuée d'une part par les politiques de sédentarisation (Atlas de Mauritanie, 1999), d'autre part par la longue période sèche dont les conséquences ont été, à l'échelle régionale, un recul considérable de la végétation steppique, une dégradation des pâturages en relation avec une pression animale dépassant leur capacité de charge.

Dans la région, les trente années de sécheresse ont entraîné une dénudation conséquente des sables et de leur processus de réactivation dans les secteurs de pâtures (Cotonnec et *al.*, 2010). Cependant, les formes de dégradation, dépendant d'une combinaison de facteurs naturels et anthropiques dont l'activation et le poids sont variables dans le temps et l'espace, sont apparues très multiples. Elles se distinguent selon des modalités de progression différenciées d'un point à un autre et par une forte hétérogénéité spatiale de leur distribution. La fine marqueterie paysagère résultante traduit une multitude de systèmes juxtaposés exprimant chacun des fonctionnements spécifiques et des bilans d'évolution différents donc des potentiels de restauration dissemblables et pose la question de la capacité de rémanence de ce milieu (Penven et *al.*, 2008).

2 Démarche, méthodes et techniques

La démarche utilisée est fondée sur une approche standardisée pluridisciplinaire et multi-scalaire ; elle utilise des méthodes et techniques bâties sur l'analyse des données de télédétection spatiale validée par contrôles terrain aux échelles régionale et locale. Cette approche systémique permet de mettre en relation les composantes du milieu à partir de traitements adaptés à la cartographie des organisations biogéomorphologiques. L'identification, l'extraction et le calcul des superficies des aires sableuses et végétalisées sont effectués aux échelles infra-régionale et locale.

Les documents cartographiques couvrant le territoire d'étude sont limités à une carte topographique au 1/200 000 éditée par l'IGN en 1978 et élaborée à partir d'une mission aérienne de 1956 et à une carte géologique au 1/500 000. Hormis ces documents et l'existence de la couverture photographique au 1/50 000 effectuée par l'IGN en 1956, aucun autre dispositif dédié à l'élaboration de documents cartographiques n'a été entrepris à l'échelle de la région. Par ailleurs, l'utilisation de ces documents fait apparaître des problèmes divers (qualité, échelle, géoréférencement,…) limitant fortement leur exploitation. Toutefois, notre étude a été menée à l'aide de ces clichés aériens noir et blanc acquis dans le domaine du visible et utilisés comme état de référence du milieu. S'y ajoutent des images satellite Landsat TM et ETM+ (1988, 1999, 2001) et Spot3 (2005) acquises aux périodes les plus favorables à la séparabilité spectrale des objets (fig.5). Ces données sont complétées par cinq missions terrain effectuées entre 2005 et 2009. L'approche diachronique est effectuée en utilisant conjointement l'ensemble de ces données de télédétection.

Plusieurs étapes ont été nécessaires (fig.6) dont, dans un premier temps, une approche par télédétection satellitale à l'échelle de la région de Kiffa permettant une première typologie. A l'échelle de l'unité fonctionnelle homogène Assaba (seul secteur sableux de la région), un masquage des surfaces rocheuses du plateau de l'Assaba (à l'Ouest) et de la bordure sud - est du secteur a été effectué. Des procédés de traitement par Analyse en Composantes Principales (ACP) ont été appliqués sur l'ensemble des canaux de chacune des images satellite afin d'obtenir de nouvelles variables décorrélées. Sur ces nouvelles images, les sables se démarquent particulièrement bien de la végétation ; l'application d'un seuillage permet d'affiner l'identification entre les aires sableuses et les aires végétalisées en attribuant une valeur unique à chacun des deux thèmes. A ce niveau, les données spatiales sont géoréférencées en utilisant comme amers de référence des points d'une image Spot5 de 2008 acquise récemment mais correctement géoréférencée dans un système UTM WGS84. Ces opérations fixent le cadre d'étude et permettent d'élaborer les premiers calculs de surfaces des aires sableuses et végétalisées à l'échelle de l'unité Assaba.

Dans un second temps, il s'agit de désigner, au sein de cette unité, des sous-unités représentatives de systèmes fonctionnels spécifiques afin d'y engager, par télédétection et appuis terrain, une analyse approfondie permettant de valider la première typologie régionale et de comprendre les processus en jeu aux différentes échelles. Le choix de ces secteurs a déjà fait l'objet d'articles (Penven et *al.,* 2008 ; Cotonnec et *al.*, 2009 et 2010) et repose sur leurs sensibilité et réactivité face aux modifications pluviométriques : il s'agit du secteur sud - ouest de l'unité Assaba dominé par des cordons de forte amplitude altitudinale et de deux sites anthropisés : les villages de N'Daouda et Soudou, situés respectivement au Sud et au Nord de l'unité et présentant tout deux des aires de dénudation plus ou moins étendues.

En parallèle des traitements apportés aux images satellite, les données de télédétection aéroportées sont examinées à l'échelle de l'unité de Kiffa et montrent le recouvrement total des sables par la végétation en 1956. Six photographies sont sélectionnées puis mosaïquées afin de couvrir le territoire de l'une des sous-unités représentatives, le secteur des grands cordons, au sud – ouest de l'unité. Un travail de photo-interprétation stéréoscopique permet d'établir un état des lieux en 1956 en relevant l'organisation des modelés, la distribution de la végétation, les dynamiques morphogéniques. La numérisation de la carte résultante, puis son géoréférencement à l'aide de l'image Spot5, rend réalisable la superposition de l'ensemble des documents et *in fine*, la comparaison inter-dates du milieu.

A ce stade, la démarche méthodologique conduit à une extraction automatique des aires sableuses et végétalisées et au calcul de leur superficie aux différentes échelles spatiales. Cette procédure, indispensable à l'évaluation de la progression des aires sableuses et végétalisées sur la période considérée constitue une approche dynamique qui doit nous aider à émettre des hypothèses sur les causes de rétraction et expansion des sables ou de la végétation.

3 Résultats

3.1 Les unités à l'échelle de la région

A l'échelle de la région de Kiffa, l'approche combinant analyse par télédétection satellitale et observations terrain conduit à l'établissement d'une première esquisse cartographique régionale des systèmes et sous-systèmes spatiaux et de leurs ressources en eau nécessaire à la compréhension de l'organisation générale du système (fig.7). Il est à noter que la combinaison des composantes du milieu, à l'origine d'une mosaïque paysagère plus ou moins complexe et révélée par les images satellite en composition colorée, sous-entend l'existence d'une diversité de facteurs et de processus biophysiques.

3.1.1 Le réseau hydrographique

L'espace est structuré par un réseau hydrographique à direction méridienne dominante. Au Sud de Kiffa, l'Oued du même nom est alimenté en amont du lac d'Ajar par l'Oued El Mançoûr et rejoint l'oued Kouroudjel pour former l'Oued M'silé. La plaine alluviale est étroite (0,5 à 0,8 km), sa largeur la plus importante étant de 1,2 km en aval du village de Kouroudjel. Le lit majeur, à caractère sableux, occupe très largement le fond de la vallée et un lit mineur, profond de 1 à 4 m et large de quelques dizaines de mètres s'y encaisse. A caractère temporaire, ces cours d'eau présentent en période de hautes eaux une inégale alimentation d'amont en aval et ne sont en eau que sur des temps très courts, en fonction de la répartition des précipitations. Une de leurs caractéristiques est la présence sur leur parcours de lacs temporaires, le lac d'Ajar étant le seul lac permanent de la région. Bordés par une végétation arborescente et arbustive, ces plans d'eau constituent une des principales aires de regroupement et d'alimentation en eau des troupeaux de la région (Ould Diah, 2006). Les affluents de l'ensemble de ces principaux cours d'eau sont peu nombreux, généralement très courts, rarement en eau pour certains ou, à l'inverse pour d'autres, en eau pendant plusieurs mois de l'année permettant ainsi le développement d'oasis exploitées par les populations locales. Le bassin hydrographique dévoile des superficies modestes appartenant à un système exoréique et de larges espaces où prédominent des écoulements temporaires endoréiques favorables à la formation de mares d'une durée d'ennoiement de quelques mois.

Dans ce territoire traversé par deux grands axes d'écoulement, deux principaux types d'unité bien distincts peuvent ainsi être dégagés et définis : les unités à substratum rocheux à couverture végétale sporadique et les unités à substratum sableux végétalisés.

3.1.2 Les unités à substratum rocheux

Particulièrement développées au Nord et à l'Est de la région de Kiffa, elles constituent des unités bordées par d'étroits cordons sableux plus ou moins végétalisés et couronnés de sables vifs. Allongées, et d'une dimension de 10 à 50 km^2 en moyenne, elles se caractérisent par une organisation spatiale interne avec un substratum rocheux dominant, une couverture sableuse fine et discontinue. Cette dernière, plus épaisse dans les micro-dépressions, peut supporter un tapis herbacé clairsemé voire, plus localement, une steppe arborée. Ces unités spatiales se caractérisent également par la présence localisée de cuvettes sédimentaires permettant la concentration des eaux pendant l'hivernage et favorisant de fait le développement d'îlots de végétation dense.

Elles sont très recherchées par les populations pastorales qui peuvent y pratiquer une petite agriculture de subsistance ou venir y faire abreuver le cheptel.

3.1.3 Les unités à substratum sableux

A l'échelle de la région, les dépôts sableux façonnés par les agents éoliens représentent près des ¾ de la surface totale et montrent une diversité de modelés et d'agencement de ces derniers : de grandes plaines sableuses faiblement ondulées, des alignements de cordons dunaires où s'inscrivent des dépressions fermées. Au sein de cette unité sableuse, trois sous-unités se différencient :

- les nappes sableuses végétalisées localisées au Nord et à l'Est du secteur ; peu épaisses (1 à 4 m), elles s'intercalent entre les unités rocheuses et les alignements de cordon. Ces aires diversement recouvertes par la végétation laissent localement affleurer ou les sables ou le substratum. L'eau de surface y est quasiment absente, seuls les forages permettent l'accession à l'eau des aquifères. De fait, les pâturages sont inégalement répartis dans ces espaces ;

- des alignements de cordons serrés dans les sables peu épais constituent de petites unités. D'alignement général nord est – sud ouest, ils sont souvent dissymétriques avec des sommets et des flancs majoritairement végétalisés. Les dépressions inter-cordon, développées sur la roche ou dans des sables peu épais et organisées en chapelet, sont occupées par des mares temporaires et une végétation arborée et arbustive. Les pâturages abondants et la présence de mares temporaires font de ces sous-unités des secteurs d'importance pour les populations et leurs cheptels ;

- enfin, un système de cordons à crête vive situé au Sud ouest du secteur regroupe des formations sableuses épaisses façonnées en grands cordons à sommets de sables vifs, d'une altitude qui peut atteindre 310 mètres. De direction nord nord - est / sud sud - ouest, ils délimitent des inter-cordons où s'échelonnent des dépressions fermées occupées par des mares temporaires permettant le développement d'une végétation arborée. Dans ces secteurs, la couverture végétale est abondante mais l'épaisseur considérable des sables limite l'accès aux eaux de profondeur. Malgré cela, ces espaces sont largement utilisés par les pasteurs comme terres de parcours pastoral.

Les unités sableuses se présentent donc sous la forme de grands espaces occupés ou non par des cordons sableux, recouverts dès la saison des pluies d'un tapis de graminées et où la ressource eau peut être diversement distribuée et accessible.

3.2 Une disparité spatio-temporelle des processus pendant la période sèche

A l'échelle du système nappes sableuses, on peut faire un premier constat : des évolutions rapides sur 50 ans particulièrement marquées dans les secteurs ouest et sud - ouest de l'unité spatiale fonctionnelle Assaba (fig.8). En 1956, les photographies aériennes et la carte géomorphologique issue de leur analyse stéréoscopique montrent le recouvrement total des grands cordons par une végétation steppique herbacée et arbustive et, sur leurs flancs, un réseau dense de ravines traduisant une érosion hydrique intense. Sur les clichés, l'absence d'indicateurs de présence sédentaire de populations (villages, aires de dénudation, parcelles mises en défens) ou de troupeaux (pistes) suppose l'existence d'une activité pastorale nomade. Près de 50 ans plus tard, l'image satellite ETM+ de septembre 2001 en composition colorée montre les sommets de ces mêmes cordons totalement dénudés. Durant la période de sécheresse, le recul de la végétation a donc été particulièrement important. Par ailleurs, on note sur les marges de secteur ouest sud – ouest la présence d'aires de dénudation liées aux concentrations humaines. L'ampleur du phénomène est liée à une réactivation importante des processus éoliens.

L'application des traitements standardisés pour la discrimination des sables et de la végétation permet une estimation des évolutions majeures dans le temps et l'espace.

En 1988, à l'échelle de l'unité Assaba dont la superficie couvre environ 610 km^2, les sables dénudés représentent 12,31% soit 75,12 km^2 du territoire (fig. 9). En 1999, ces mêmes surfaces atteignent 15,05 % soit 91,86 km^2, ce qui atteste de la poursuite du processus de régression du couvert végétal.

Il faut cependant noter une disparité spatiale de l'action des processus ; à l'échelle locale, c'est sur les cordons de forte amplitude altitudinale et sur le pourtour des villages que les effets se localisent préférentiellement

et s'appliquent par des mécanismes de redéploiement ou de régression de la strate herbacée. Plus précisément, on note entre 1988 et 1999 (fig.10) :

- au niveau des cordons à forte amplitude altitudinale peu anthropisés de l'Assaba, un déploiement latéral des principales unités ensablées en 1988 au détriment de la végétation ainsi que la présence d'îlots végétalisés résiduels en sommet de cordons. Les surfaces occupées par les sables réactivés occupent 18,29% en 1988, 36,02% en 1999, soit un doublement des superficies.

- à l'inverse, sur les sites de concentration des activités humaines (pourtour des villages et bordures d'oued), une réduction de la superficie des aires de dénudation s'effectue en faveur du couvert végétal. A N'Daouda, les surfaces de sables vifs passent de 18,86% (19,29 km^2) à 14,23% (11,5 km^2). Une régression est également observée à Soudou avec un passage de 3,19% (15,78 km^2) à 2,18% (10,71 km^2). Cette évolution sur la dernière phase de la période sèche peut s'expliquer par une accélération des migrations des populations villageoises vers les villes et une diminution des troupeaux.

Ces résultats montrent une nette différenciation de l'évolution des superficies dénudées selon les échelles spatiales considérées et entre types de milieux.

3.3. Une reconquête des sables par la végétation

Entre 1999 et 2005 (fig.11), à l'échelle de l'ensemble de l'unité, on enregistre une relative stabilité de ces superficies (régression non significative car inférieure à 2%) avec un arrêt des processus de remobilisation des sables. Sur les grands cordons peu anthropisés de l'Assaba, les sables amorcent une régression (-9,4%) en faveur d'une végétation herbacée. Sur les sites de concentration des activités humaines, le recul des surfaces sableuses se poursuit à Soudou (-13,25%) mais n'est pas significatif à N'Daouda où leur superficie n'est que peu modifiée sur la période 1999 – 2005 (-4,95%). Cependant, l'image satellite de 2005 (fig.12) met en évidence une redistribution de ces aires sableuses le long de l'oued qui fait penser à une réorganisation de ce village où la population semble privilégier une installation à proximité de l'oued. Cela montre aussi que dès que l'emprise humaine sur le milieu s'allège, la végétation se redéploie. Durant les missions terrains de 2005, 2007 et 2009, ces observations ont été confirmées par la visite de ces deux villages. Si Soudou semble se stabiliser, N'Daouda, à l'inverse, s'oriente vers une incontestable sédentarisation de sa population avec une augmentation des campements, la construction de maisons en dur qui se distribuent dorénavant tout le long de l'oued.

De façon générale, depuis 1999, une amélioration des conditions pluviométriques est constatée induisant des situations favorables au développement de la couverture végétale. En 2005, soit 6 ans après la reprise des précipitations, l'arrêt ou la régression des sables est vérifiée toutes échelles confondues.

Conclusion :

En 50 ans, les variations pluviométriques indiquent deux changements majeurs dans le fonctionnement des systèmes : une régression du couvert végétal au profit des masses sableuses et une stabilisation des composantes sableuses et végétales avec un ralentissement et une moindre efficacité des processus éoliens laissant plus de place aux processus biologiques. Si la couverture herbagère n'a pas disparu de cette région au cours de la dernière période sèche et que l'on ne peut en aucun cas parler de «désertification », des transformations majeures se sont opérées dans le paysage. Particulièrement élevées dans la partie ouest et sud - ouest de l'unité alors que plus discrètes ailleurs, elles supposent des modifications dans le fonctionnement des sous-unités et donc des modifications du poids respectifs des différents facteurs d'évolution avec des temps de réponse décalés par rapport aux modifications climatiques.

Actuellement, sans parler d'un retour à un état initial du milieu ou identique à celui de 1956, la question d'une trajectoire installée de reconquête des sables vifs par la végétation se pose dans cet espace steppique. Les processus sont fortement contrôlés par les héritages de la dernière période sèche ; la configuration du milieu, avec des masses sableuses constituant un stock disponible conséquent favorisant l'efficacité d'une redistribution éolienne, semble donc engendrer une forte inertie face à la dynamique de recolonisation végétale. Les différences de réponse constatées en fonction des périodes et des lieux soulignent cependant la combinaison complexe de systèmes fonctionnels distincts où les variables d'état et les variables dynamiques interagissent pour engendrer les mécanismes et processus physiques et biologiques.

Par ailleurs, l'installation récente de populations près des ressources en eau et l'augmentation inhérente du nombre de cheptels posent aujourd'hui la question de la pression anthropique et animale sur le milieu et de son influence, au même titre que les composantes naturelles, sur le temps de réponse du système à l'amélioration des précipitations. Les vitesses et les rythmes de dégradation et de redéploiement du couvert végétal, fonction de contraintes temporelles locales, traduisent ainsi une forte sensibilité du milieu aux activités anthropiques et aux processus éoliens qui interfèrent avec le développement du couvert végétal. L'ensemble de ces paramètres conditionne les trajectoires de reconquête végétale et de restauration de la biodiversité et pose indubitablement la question de la résilience du système.

Démarche et résultats correspondent à une réflexion sur des données, des moyens et des méthodes à l'échelle d'un territoire où la question de la vulnérabilité des ressources naturelles pose les contraintes inhérentes à la région : documents inexistants, fluctuation spatio-temporelle des ressources en eau et végétation, organisation héritée des cordons, difficultés de maîtriser les usages passés et actuels du milieu par les populations, variabilité spatiale de la pression anthropique,.... De sérieuses difficultés ont été rencontrées dans l'acquisition et l'utilisation de l'information géographique notamment l'absence de référents cartographiques classiques, des données satellitales peu disponibles en saison humide, une couverture aérienne (argentique) de qualité médiocre avec des points amers quasiment inexistants, un géoréférencement incorrect des documents satellitaires Landsat et Spot3 avec, pour exemple, un décalage de points d'environ 500 mètres en longitude sur l'image Spot3 de 2005. L'unique donnée de qualité fut l'image Spot5 de 2008 dont les points référents, validés par GPS lors de la mission terrain de 2009, ont été utilisés pour le géoréférencement de l'ensemble des données de télédétection. Une difficulté supplémentaire a été rencontrée au moment de la mise en corrélation de données de nature et de source différentes avec des niveaux d'échelle également différents : observations et mesures effectuées sur le terrain vers les images, validation terrain des résultats de typologies ou d'indices calculés à partir des images.

Cependant, les données de télédétection, pluriscalaires, aéroportées et satellitales, ont permis d'orienter les investigations terrain, de spatialiser les composantes du milieu et les processus dans le temps et l'espace, de les croiser, d'évaluer des transformations majeures sur la période 1956 - 2005 et d'apporter une vision géographique d'ensemble. L'inventaire et la collecte de données terrain a permis d'impliquer les équipes dans le processus de mise en place d'une démarche méthodologique et de définir les données pertinentes à acquérir ainsi qu'une sémantique commune et précise permettant la réalisation des premières cartes à l'échelle de la région d'étude. Dans ces régions sahéliennes, indicatrices de changements biogéographiques majeurs, les perspectives en télédétection sont très nombreuses : suivi des surfaces sableuses et végétalisées, identification spectrale des aires de transition, signatures spectrales des objets (sables, végétation, ravines, roches), extraction des éventails d'aires de déplacement des troupeaux (bovins), extraction des « pistes » menant des aires de pâturage aux points d'eau… En vue d'enrichir la base de données cartographique et d'envisager *in fine* la mise en place d'un véritable « observatoire » des milieux sahéliens, il est donc capital de poursuivre l'acquisition et l'analyse des données du milieu afin de compléter le référentiel cartographique. Seules l'élaboration et l'alimentation d'une base de données géoréférencées, la conception de documents cartographiques peuvent mettre en valeur les différents scenarii des trajectoires potentielles du système. En cela, la télédétection constitue un moyen incontournable.

Remerciements : Les auteurs remercient SpotImage qui a permis l'acquisition de données satellitales dans le cadre d'un programme ISIS. Les images Landsat utilisées sont issues du site du Maryland, Institute for Advanced Computer studies (USA).

Bibliographie

Achard F. et Blasco F., 1990, « Rythmes saisonniers de la végétation en Afrique de l'Ouest par télédétection spatiale », *Télédétection et sécheresse*, Paris, Ed. AUPELF – UREF, John Libbey Eurotext, p.1-14.

Atlas de Mauritanie, 1999, « Migrations et gestion des territoires », Université de Nouakchott / Université de Rouen, Coopération Française, 12 planches, 1 fascicule, 64 p.

Bartholomé E., 1990, « Suivi par télédétection des productions céréalières pluviales en pays sahéliens », *Télédétection et sécheresse*, Ed. AUPELF-UREF, John Libbey Eurotext Paris, p.15-27.

Boudet G., 1984, « Recherche d'un équilibre entre production animale et ressources fourragères au Sahel », *Bulletin de la Société languedocienne de Géographie*, 18, 3-4, p.167-177.

Breman H., De Ridder N., 1991, « *Manuel sur les pâturages des pays sahéliens* », Paris, Ed.Karthala.

Carrière M., 1994, « Les pâturages mauritaniens », dans Les pâturages sahéliens de l'Afrique de l'Ouest, Extrait des atlas « Elevage et potentialités pastorales sahéliennes », p.131-149.

Cotonnec A., Penven M.-J., Ould Elhacen M.-L., 2010, « Evaluation spatiale des réponses d'un milieu sahélien aux variations pluviométriques entre 1956 et 2005 (Hodh Mauritanien), *Photo-interprétation European Journal of Applied Remote Sensing*, n° 2010/2, p.43-52.

Cotonnec A., Penven M.-J., Ould Elhacen M.-L., 2009, « Approche par télédétection des ressources naturelles à l'échelle de la région sahélienne de Kiffa (SE Mauritanie) », *Mosella,* 30,1-4, p.81-92.

Crépeau C., Bennouna T., Bicheron P., Cayrol P., Legros Y., Ganzin N., Diop S., Ka A., Diouf A., Samba A., Bakari D., 2003, « Suivi de la végétation en zone sèche par des produits d'information dérivés de l'imagerie spatiale », *Sécheresse*, vol. 1E, n°1.

Godard V., 1991, « Utilisation conjointe de la télédétection et de l'enquête terrain lors d'inventaires d'occupation du sol. Recherche méthodologique appliquée au Sahel Sud Mauritanien », Thèse de doctorat en Géographie, EHESS.

Hutchinson C.-F., Herrmann S.-M., Maukonen T. et Weber J., 2005, "Introduction : the "Greening" of the Sahel", *Journal of Arid Environments*, Special Issue on the « Greening » of the Sahel, 63, p.535-537.

Loireau M., Sghaier M., Fetoui M., Ba M., Abdelrazik M., d'Herbes J.-M., Desconnets J.-C., Leibovici D., Debard S. et Delaître E., 2007, « Système d'Information sur l'Environnement à l'échelle locale (Siel) pour évaluer le risque de désertification : situations comparées circumsahariennes (réseau Roselt) », *Sécheresse*, 18, 4, p.328-335.

Munier P., 1952, "L'Assaba", Essai monographique, Etudes Mauritanniennes n°3, Centre IFAN, Mauritanie, Saint Louis-Sénégal.

Nicholson S., 2005, "On the question of the "recovery" of the rains in the West african Sahel", *Journal of Arid Environments*, Special Issue on the « Greening » of the Sahel, 63, p.615-641.

Ollson L., Eklundh L. et Ardö J., 2005, « A recent greening of the Sahel – trends, patterns and potential causes", *Journal of Arid Environments*, Special Issue on the « Greening » of the Sahel, 63, p.556-566.

Ould Diah A., 2006, « Les grandes unités paysagères du Lac d'Ajar (Hodh Occidental, Mauritanie) : une approche spatiale et temporelle », UFR Sciences Sociales, Université Rennes 2, 17p.

Ould Mohamed Lemine M.- M. et Ould Elkhalifa B., 2007, « Modes d'exploitation rurale dans la wilaya de l'Assaba. Commune de Kouroudjel », Dpt. de Géographie, Univ.de Nouakchott.

Penven M.-J., Cotonnec A., Ould El Hacen M.-L. et Ould Diah A., 2008, « Fonctionnement géomorphologique des régions nord sahéliennes. Exemple des cordons d'Ajar dans l'Ouest mauritanien », *Norois*, 207, 2, p.55-70.

Penven M.-J. et Cotonnec A., 2008, « Vulnérabilité des espaces sahéliens du Sud mauritanien : une approche pour une restauration des ressources et un développement durable », Rapport final, Réseau de Chercheurs Environnement et Développement Durable, AUF.

Rognon P., 2007, « Quel avenir pour les déserts face aux progrès de la désertification ? », *Sécheresse*, 18, 4, p.349-353.

Taïbi A.-N. et El Hannani M., 2004, « Identification et suivi des processus de la dégradation du milieu dans le bassin de l'Oued Dadès (Maroc) par télédétection satellitaire et aérienne », *Télédétection*, 4, 1, p.63-73.