Télédétection, 2005, Vol. 5, n°(1-2-3), p 123-137

© 2005 CONTEMPORARY PUBLISHING INTERNATIONAL
Publié sous l'enseigne *Éditions Scientifiques GB*

DIAGNOSTIC DE LA DYNAMIQUE DES RESSOURCES HYDRIQUES DE SURFACE ET DES PROCESSUS DE « DÉSERTIFICATION » DU LAC D'ALEG ET DE SON BASSIN VERSANT (BRAKNA, MAURITANIE) PAR TÉLÉDÉTECTION MULTIDAT

AUDE NUSCIA TAÏBI[a,1], JEAN GASSANI[b,2], AHMED VALL ELGHADI[3], AZIZ BALLOUCHE[c,4], GÉRARD MOGUEDET[d,5], MOHAMED LEMINE OULD BABA[c,6] et MOHAMMED OULD JIDDOU[c,7]

[a] *CARTA, UMR Espaces géographiques et sociétés (ESO) 6590 du CNRS, Université d'Angers, Département de géographie, 35, rue de la Barre, 49000 Angers, France. Téléphone : +33 (0)2 41 22 63 43 ; télécopieur : +33 (0)2 41 22 63 60.*

[b] *Laboratoire des sciences de l'environnement et de l'aménagement (LSEA), Université d'Angers, 2, boulevard Lavoisier, 49000 Angers, France.*

[c] *Groupe de recherche sur les zones humides (GREZOH), Université de Nouakchott, Faculté des sciences et techniques, Boîte Postale 5026, Nouakchott, Mauritanie.*

[d] *GEOPHEN/LETG UMR 6554 CNRS, UFR Géographie, Université de Caen - Basse-Normandie, Boîte Postale 5186, F-14032 Caen, cedex, France.*

Courriel [1,2,3,4,5,6,7] : nucia.taibi@univ-angers.fr ; gassani@caramail.com ; elghadi@yahoo.fr ; ballouche@geo.unicaen.fr ; gerard.moguedet@univ-angers.fr ; mohamed.lemine.ould.baba@iucn.org ; jid27@hotmail.com

(soumis : 6 février 2004 ; révisé : 6 avril 2004 ; accepté 21 juin 2004)

Le lac d'Aleg, écosystème fragile localisé, en milieu sahélien, dans la région du Brakna (Mauritanie), a été soumis à des contraintes climatiques et anthropiques croissantes ces dernières décennies, notamment en liaison avec une sécheresse sévère et une sédentarisation induite massive d'anciens nomades. Ces pressions mettent en péril la pérennité de cette zone humide remarquable et les activités qui y sont liées (agriculture de décrue, pâturage des prairies aquatiques, abreuvement du bétail, etc.) ainsi que sa richesse floristique et faunistique remarquable.

Le suivi diachronique sur plus de 45 ans, avec des photographies aériennes de 1954 et des images HRV(P) de 1991, HRV(XS) de 1992 et HRVIR(Xi) de 2000 de SPOT, de cette zone humide et de sa périphérie plus ou moins proche a permis de faire un inventaire des différents systèmes écologiques en présence, de comprendre leur fonctionnement saisonnier et interannuel et de mettre en évidence l'impact respectif des facteurs climatiques et anthropiques dans la dynamique d'évolution.

Si l'action de la sécheresse (1972-1997) a particulièrement affecté le couvert végétal de savane de la ceinture externe et les autres unités paysagères des alentours du lac, la répartition de la végétation au centre de la cuvette lacustre est, elle, relativement indépendante de ces crises climatiques et est fonction des apports hydrologiques dépendants du régime climatique saisonnier.

Ceci étant, le suivi diachronique de la zone lacustre et de sa périphérie avant, pendant et après la sécheresse à partir de la série d'images satellitaires multidates a montré des zones préférentielles de dégradation du couvert végétal et des sols, indiquant le rôle prépondérant de l'humain dans la dégradation du milieu, en corrélation avec la crise climatique. La pérennité, voire l'extension, de certaines auréoles très localisées de dégradation durant la saison sèche, en 2000, qui était pourtant une année humide, alors qu'ailleurs on observe une certaine régénération du couvert végétal, notamment sur les images de 1991, est un autre argument en faveur de la prépondérance du facteur humain dans leur développement devenu indépendant des variations climatiques.

Le suivi de l'évolution du milieu à partir des images satellitaires multidates n'a permis de localiser que les processus de dégradation les plus exacerbés, entraînant une dénudation totale et parfois irréversible du sol. Il existe également une dégradation généralisée plus « diffuse » qui n'apparaît pas à travers les images et le type de traitements utilisés mais qui est réelle, attestée notamment par les travaux de terrain, les témoignages d'éleveurs et l'analyse des photographies aériennes de 1954, qui a servi à établir l'« état initial » du milieu. En effet, la savane sahélienne arborée des années 1950 était beaucoup plus dense et plus riche en biodiversité qu'aujourd'hui. La couverture végétale de la région du lac d'Aleg a connu et connaît encore une forte régression aussi bien sur le plan quantitatif que qualitatif.

Mots-clefs : Processus de dégradation ; suivi diachronique ; SPOT ; Sahel ; zone humide ; lac d'Aleg, Mauritanie.

MONITORING THE DYNAMIC OF SURFACE WATER RESOURCES AND 'DESERTIFICATION' PROCESSES OF ALEG LAKE AND OF IT'S WATERSHED (BRAKNA, MAURITANIA) BY MULTITEMPORAL REMOTE SENSING

The fragile ecosystem of Aleg lake located in the sahelian Brakna region (Mauritania) is submitted to increasing climatic and anthropogenic pressure over the last decades in relation to a strong drought and induced massive sedentarisation of former nomads. These pressure imperil the perenniality of this wetland and consequently the related human activities (recession agriculture, aquatic meadow pasture, watering, etc) and its flora and fauna richness and variety.

A 45 years monitoring, with 1954 aerial photography, and 1991 HRV(P), 1992 HRV(XS) and 2000 HRVIR(Xi) SPOT images, of the wetland and its surroundings led to an inventory of different ecosystems and their seasonal and inter-annual functioning and shows the respective impact of anthropogenic and climatic factors in these evolutions.

As the savanna vegetation located on the external rings and the surroundings of the lake have been greatly disturbed by the last drought (1972-1997), the development of the wetland vegetation is much more independent from this climatic crisis and is more related to hydrological inputs which are linked to seasonal climatic regime.

Multidate NDVI, mineralisation indices and clustering over the drought highlights well located areas of high degradation, showing that these processes are mainly due to human mismanagements in correlation with the drought. This anthropogenic impact is also shown by the permanence or increase of some degradation "patches" in 2000 during the dry season but a wet year, even though we can notice elsewhere a regeneration of the vegetation notably on 1991's panchromatic images. The development of these processes seem to be from now on independent from climate changes.

This change detection analysis only shows the more intense quantitative degradation processes leading to a complete soil striping sometimes irreversible. The region is also submitted to a more diffuse and qualitative degradation which doesn't appear on the images but on 1954's aerial photography and fieldwork and described by shepherds. The Aleg lake 1950's sahelian savanna was denser and floristically richer than today's.

Keywords : Degradation processes ; multitemporal monitoring ; change detection ; SPOT ; Sahel ; wetland ; Aleg lake ; Mauritania.

1. INTRODUCTION

Le bassin-versant du lac d'Aleg, situé en zone sahélienne (figure 1), a été soumis à des sécheresses récurrentes ces dernières décennies, notamment celle qui a commencé dans les années 1970. Parallèlement, la population de cette région a connu durant cette période une très forte croissance, notamment par sédentarisation des anciens nomades. Cette population nouvelle s'est essentiellement concentrée dans la ville d'Aleg et dans de nouveaux villages qui se sont implantés autour du lac (figure 2), espace particulièrement attractif pour son potentiel de mise en valeur agricole ainsi que pour ses ressources en eau et en fourrage pour les troupeaux. Cet afflux de population et de troupeaux fortement cantonnés ainsi que l'accroissement corrélatif de la demande en eau et en produits de consommation ont accru la pression exercée sur ces écosystèmes fragiles et engendré notamment le développement de processus de dégradation plus ou moins localisés de la végétation et des sols. Cette pression met en péril la pérennité de la zone humide, fondamentale pour les activités traditionnelles (agriculture de décrue, pâturage des prairies aquatiques, abreuvement du bétail, *etc.*), sa richesse floristique et faunistique remarquable. Cette transformation des états de surface a modifié le fonctionnement hydrologique dans le bassin versant et donc les modalités de remplissage du lac, ressource essentielle de cet espace sahélien.

Dans ce contexte, l'objectif de ce travail réalisé dans le cadre d'accords entre le Laboratoire des sciences de l'environnement et de l'aménagement (LSEA), de l'Université d'Angers, le Groupe de recherche sur les zones humides (GREZOH), de l'Université de Nouakchott et l'Union mondiale pour la Nature (UICN), était de réaliser, grâce à un suivi diachronique par télédétection sur plus de 45 ans (photographie aérienne de 1954, images HRV(P) de 1991, HRV(XS) de 1992 et HRVIR(Xi) de 2000 de SPOT et des travaux sur le terrain, un inventaire des systèmes écologiques de cette région et de mettre en évidence leur fonctionnement saisonnier et pluriannuel. En effet, les travaux qui y sont consacrés sont encore peu nombreux et se limitent souvent à des expertises très parcellaires (Grauwels *et al.*, 1999 ; Bouland, 1996 ; MDRE, 1998). D'autres travaux ont été réalisés dans le cadre de cette collaboration inter-universitaire et ont en partie servis à la synthèse présentée dans cet article (Glemin et Royer, 2002 ; Gassani, 2003 ; Elghadi, 2003). Au-delà de ces diagnostics, le but était de mettre en lumière l'impact respectif des sociétés humaines et des sécheresses dans le développement des processus de dégradation observés et d'évaluer la résilience de ces écosystèmes fragiles.

La méthodologie mise en œuvre avait également pour but d'extraire une information en terme de systématique de la végétation (espèces végétales) en se basant sur des indicateurs indirects tels que le type de substrat, la physionomie des formations

végétales, *etc*. Cette approche n'apparaît pas dans les nombreux travaux par télédétection dont ont fait l'objet ces zones sahéliennes (Courel, 1984 ; Poncet, 1985 ; Matheson and Ringrose, 1994 ; Couteron et Serpentier, 1995 ; Diouf and Lambin, 2001), en raison de la résolution trop grossière des images satellitaires.

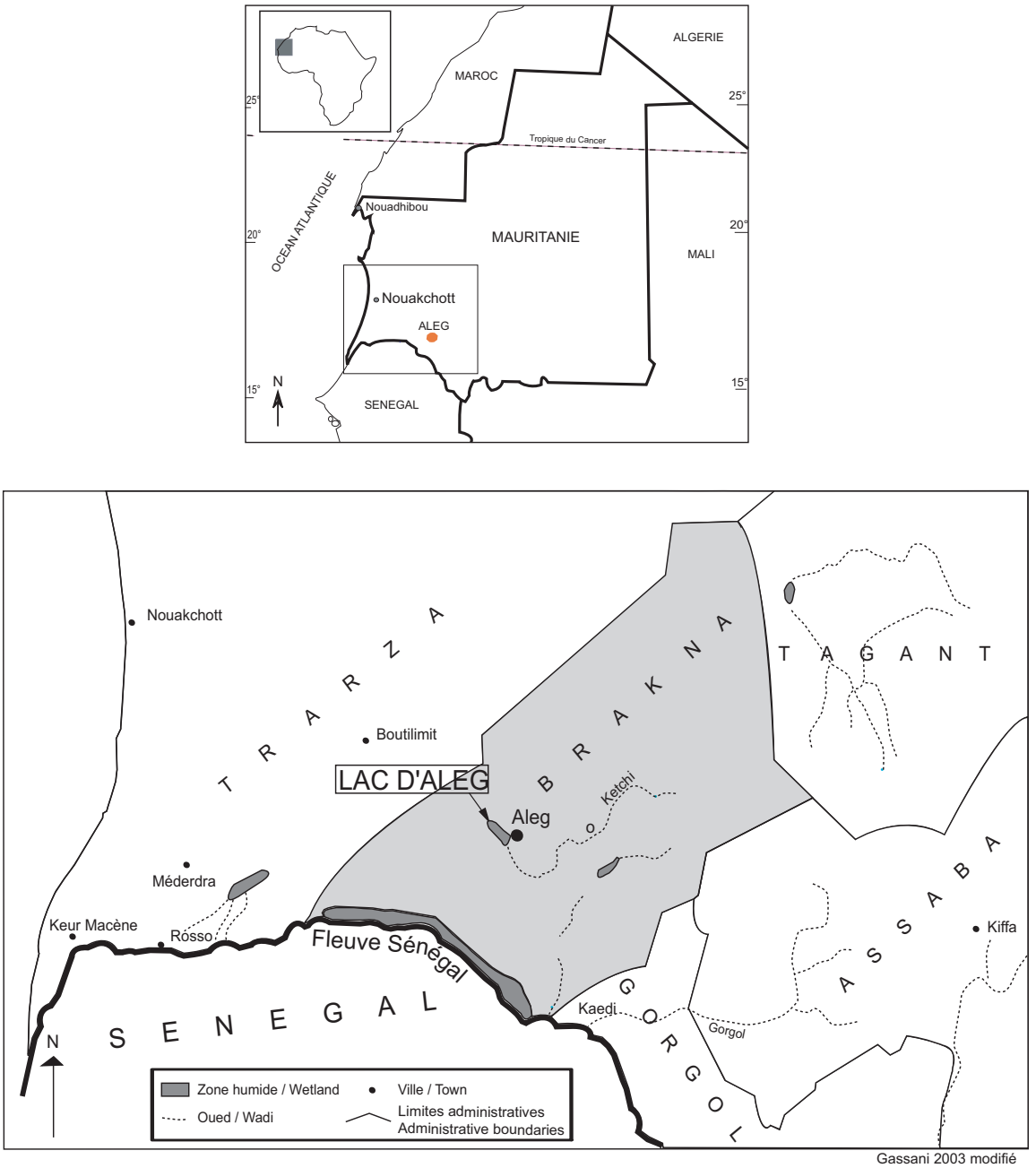


FIGURE 1 Localisation de la zone d'étude. *Location map of the study area.*

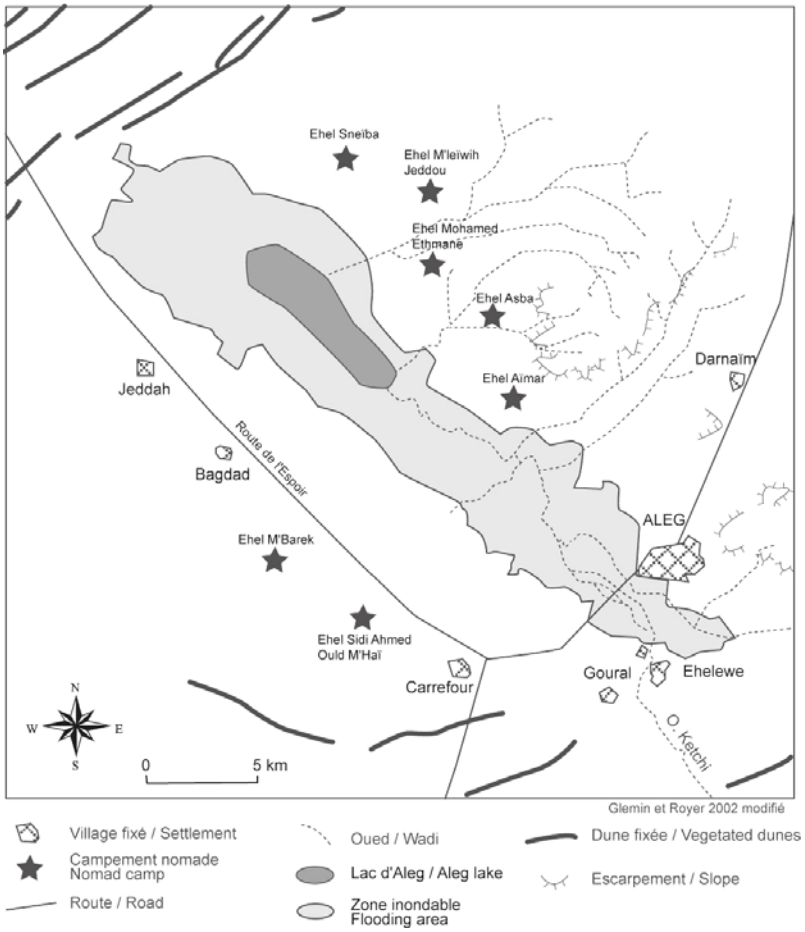


FIGURE 2 Caractéristiques physiques et humaines du lac d'Aleg. *Aleg lake physical and human characteristics.*

2. ZONE D'ÉTUDE

Le lac d'Aleg, situé dans la région du Brakna, au sud-ouest de la Mauritanie (figure 1) est caractérisé par un climat chaud (températures moyennes annuelles supérieures à 35 °C) de type saharo-sahélien avec une saison sèche qui dure 8 mois, de novembre à juin (Ballouche, 2000). L'hivernage, ou saison des pluies, qui lui succède dure généralement quatre mois, avec un pic de pluviométrie en août. La moyenne pluviométrique de 249 mm (1921-2000) masque une forte variabilité interannuelle avec des cycles d'années sèches, 1959-1965 et 1972-1997, caractérisés par des moyennes pluviométriques qui oscillent entre 178 mm et 184 mm par an (figure 3). Depuis 1998 et jusqu'à 2000, on assiste à une bonne reprise des précipitations (Elghadi, 2003).

Le lac d'Aleg se situe à l'extrémité orientale du bassin sénégalo-mauritanien, dans une vaste dépression sous tendue par des grès et des dolomies poreux éocènes recouverts de formations alluvionnaires. Il est bordé, au nord-ouest, par de grandes dunes de sable ogoliennes (Pléistocène supérieur) d'orientation NE-SO et, au sud-est, par un cordon dunaire végétalisé de même orientation (figure 2). Le secteur nord-est du lac est dominé par des collines quartzitiques de 40 m d'altitude (Caruba et Dars, 1991).

La dynamique de remplissage du lac d'Aleg dépend directement pour l'essentiel des écoulements intermittents de l'oued Ketchi, cours d'eau endoréique le plus important de la région du Brakna ; ces écoulements n'ont lieu que pendant la saison des pluies de juillet à octobre. L'eau termine sa course dans le lac, qui est une dépression peu profonde (maximum 3,5 m), dépourvue d'exutoire et d'orientation ONO-ESE. Lorsque les eaux atteignent la cote 29,9 m, qui correspond à la côte maximale la plus fréquente, la superficie en eau du lac est de 6 040 ha et le lac s'étend alors sur 16 km de longueur et une largeur maximale de 4,7 km. Son volume est alors estimé à 66 440 000 m^3 (MDRE, 1998).

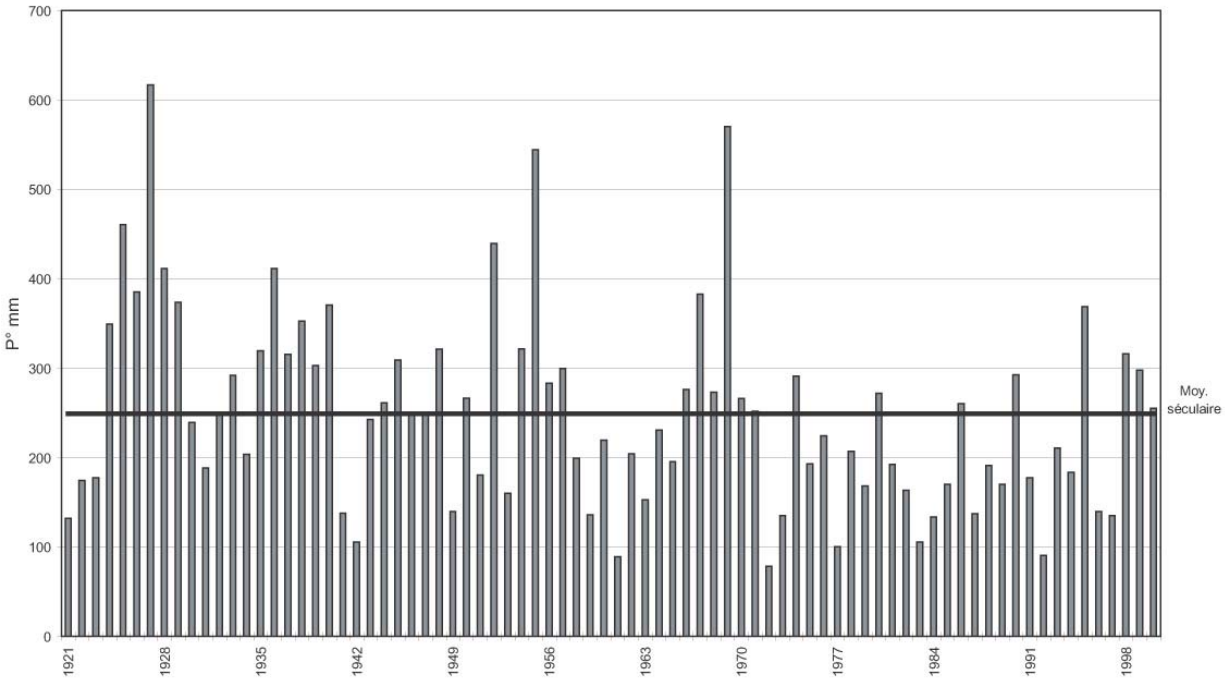


FIGURE 3 Variabilité interannuelle des précipitations (P^o) de la station d'Aleg (1921–2000) par rapport à la moyenne (149,1 mm). *Aleg inter-annual variations of rainfalls (P^o) (1921–2000) from the mean amount (149,1 mm).*

La présence de l'eau en relative abondance et la richesse floristique du milieu expliquent sa double fonction de zone de pâturage et de culture (de décrue dans les zones inondables et pluviale sur les cordons dunaires du sud-est) et la très forte attractivité de cette région. Traditionnellement, le lac et ses pâturages étaient une étape lors des déplacements pendulaires des nomades du nord au sud du pays accompagnant le rythme des pluies. Les troupeaux se concentraient autour du lac en décembre-janvier, au cours de leur descente vers le sud depuis les pâturages raréfiés de l'Adrar ou l'Inchiri. Ils quittaient de nouveau cette zone lacustre vers l'Elatv après la disparition des pâturages en fin de saison sèche jusqu'au mois de juin. Avec le retour des premières pluies et des moustiques, ils reprenaient la route du nord et stationnaient de nouveau momentanément autour du lac d'Aleg entre le début juillet et le début août (Ould Cheikh, 1985).

Depuis, les pratiques d'élevage et les modes de conduite des troupeaux ont connu de profondes mutations dans cette région. Le nomadisme extensif, aujourd'hui en très fort recul, est remplacé par un semi-nomadisme et surtout un élevage familial sédentaire, systèmes beaucoup plus intensifs. Avec la sécheresse de ces dernières décennies et l'appauvrissement corrélatif des pâturages, les éleveurs nomades se sont fixés dans ou à proximité des agglomérations ou points d'eau de la région du lac d'Aleg. Les nomades ne représentent plus que 15,3 % de la population de la moughataa d'Aleg, qui reste un des bastions du nomadisme en Mauritanie (4,8 % de nomades à l'échelle du pays), contre plus de 51 % en 1977 et 30,6 % en 1988 (ONS, 1977, 1988 et 1999). Ce phénomène de sédentarisation, doublé d'un fort taux d'accroissement naturel, a entraîné une forte augmentation de la population de la ville d'Aleg, avec des taux d'accroissement de 3,4 % entre 1977 et 1988 et de 1,33 % entre 1988 et 1999 (ONS 1977, 1988 et 1999). La ville s'est fortement développée durant cette période et de nouvelles zones d'urbanisation sont apparues, anciens campements nomades devenus villages, comme Bagdad et Jeddah dans les années 1990 le long de la route de l'Espoir, Carrefour fixé depuis 1983, Taïba village le plus important avec 1 500 habitants installé en 1974, Ehelewe développé récemment ou Darnaïm avec 1 250 habitants, établi en 1984 (figure 2).

3. MATÉRIEL ET MÉTHODE

L'inventaire des formations végétales du lac et de sa périphérie ainsi que le suivi de leur évolution à différentes échelles temporelles ont été réalisés grâce à divers traitements sur deux images satellitaires multibandes, HRV(XS) de SPOT-2 du 27-09-1992 et HRVIR(Xi) de SPOT-4 du 12–12-2000, acquises dans le cadre du programme ISIS du CNES (dossier n° 0207-350), une image HRV(P) de SPOT de janvier 1991 et des photographies aériennes d'avril 1954 au 1 : 50 000.

L'objectif de ce travail n'était pas de développer de nouvelles méthodes de traitements d'images adaptés à ces milieux ou à la problématique de la désertification, mais de spatialiser et suivre, à l'aide de la télédétection, l'évolution des processus en œuvre. En effet, cet outil est un moyen de création et d'extraction d'informations thématiques nécessaires à la compréhension des modalités de développement de ces phénomènes et de leurs causes. Ces images ont été traitées au moyen du logiciel *Idrisi Kilimandjaro* après recalage géométrique de l'image de 1992 par rapport à celle de 2000. L'image de 1991 n'a été utilisée qu'à titre de comparaison qualitative et n'a donc pas subi de correction géométrique. Aucune correction radiométrique n'a été appliquée en raison d'un risque de perte d'information trop importante, ce qui rend relatifs les résultats du suivi diachronique présentés.

Différentes compositions colorées ont été créées dans une première étape d'amélioration visuelle de ces images et ont facilité leur interprétation thématique. Notamment, elles ont servi de base à des classifications non dirigées mises en œuvre pour chaque date utilisant les mêmes canaux bleu-vert (XS1 et Xi1), rouge (XS2 et Xi2) et proche infrarouge (XS3 et Xi3). La détermination du nombre de classes nécessaires et significatives des unités écologiques a été faite après plusieurs essais. L'identification thématique de ces classes a été réalisée *a posteriori* en se basant sur les caractéristiques spectrales et spatiales (forme, structure, etc.) des objets, ainsi que sur le terrain et d'après d'autres documents cartographiques. Certaines de ces classes, qui présentaient des confusions entre objets ou apportant des précisions thématiquement non significatives, ont été retravaillées. Le principe est basé sur l'utilisation de masques binaires de ces classes (les autres étant mises à zéro) appliqués sur les canaux bruts (par multiplication) et permettant ensuite une itération de classifications sur les pixels non masqués et ayant conservés leur valeur radiométrique (les autres étant mis à zéro dans l'opération de multiplication). Il s'agit alors, en quelque sorte, d'une classification semi dirigée contextuelle.

Des indices thématiques ont également été appliqués pour améliorer la lecture et l'extraction d'informations thématiques des images.

Nous avons utilisé l'indice normalisé de végétation verte NDVI (PIR-R / PIR + R), très efficace pour identifier les formations végétales chlorophylliennes à taux de recouvrement supérieur à 40 % (Bannari *et al.*, 1995), notamment de la zone lacustre et des autres zones humides de la région. Par contre, il est peu intéressant pour les formations de savane de la périphérie du lac. La réponse propre de ces formations végétales à faible densité de recouvrement est largement dominée par celle des sols sous-jacents (Taïbi, 1998). Les tests des indices de végétation type *Soil Adjusted Vegetation Index* (SAVI) ((1+L)(PIR-R)) / (PIR+R+L) où L = 0,5 (Huete, 1988), n'ont pas donné de résultats plus probants.

D'autres indices sont plus appropriés pour étudier ce type d'espace, notamment l'indice de minéralisation (R^2 + PIR^2). Il apporte une information supplémentaire sur les sols nus et donc notamment soumis à dégradation.

La zone inondable des zones humides et les zones exondées environnant le lac d'Aleg ont été étudiées séparément, car elles correspondent à des systèmes écologiques très différents. Ces systèmes sont composés d'une végétation spécifique bien distincte, présent, nettement mise en évidence par l'indice de végétation NDVI et la classification non dirigée. En effet, quel que soit le système écologique, les images ne donnent pas d'indications spécifiques sur les espèces ni même sur les genres ou familles en présence, en raison notamment de la résolution des images qui ne permet de saisir que formations végétales à partir du moment ou leur taux de recouvrement du sol est suffisant comme indiqué pour l'indice de végétation. Ce sont les données fournies par les caractéristiques du milieu (humidité du sol, matière organique, nature du substrat, *etc.*) et par les paramètres physionomiques (taux de recouvrement, saisonnalité, *etc.*) qui ont permis de déduire des informations sur la systématique, c'est-à-dire en terme d'espèce. S'y ajoute un travail de reconnaissance, de localisation et de vérification sur le terrain.

Le suivi diachronique rétrospectif de ces formations repose sur l'ensemble des données des images et des photographies disponibles ainsi que sur une série de campagnes sur le terrain.

La caractérisation des différentes unités physiographiques et de l'état initial, avant sécheresse, des formations végétales de la région d'Aleg est basée sur l'interprétation visuelle des photogra-

phies aériennes de 1954. Les critères d'identification classiques utilisés sont le ton, la texture et la structure ainsi que la taille, la forme et le contexte des objets. La caractérisation actuelle de ces unités et objets se base sur l'image HRVIR(Xi) de 2000, notamment une classification non dirigée (figure 4) à 12 classes sur les trois canaux du bleu-vert, du rouge et du PIR. Bien qu'en saison sèche (décembre), l'année 2000 correspond à une année très humide qui donne un aperçu de l'extension optimale de la végétation par rapport aux autres dates disponibles. Les mêmes traitements ont été appliqués à l'image de 1992 pour permettre une comparaison et mettre en évidence l'évolution de ces espaces. Ceci étant, les résultats cartographiques ainsi obtenus demeurent relatifs. La cartographie permet de mettre en évidence la répartition qualitative de la végétation dans ces espaces et son évolution et elle est notamment utile pour localiser les phénomènes de dégradation quand ils sont exacerbés. Il est en revanche illusoire à ce stade de vouloir quantifier les phénomènes.

La notion de signature spectrale qui sous-tend la plupart des traitements d'images utilisés, bien que très utile, n'est pas parfaite et les confusions entre objets sont impossibles à éliminer totalement. Les variations locales des caractéristiques physiques et bio-chimiques d'objets (humidité, état sanitaire des végétaux, éclairement, *etc.*) entraînent nécessairement des variations spatiales du rapport signal-objet. Ceci étant, même si une validation statistique ne peut être réalisée, nous estimons à l'analyse visuelle des changements et leur confrontation avec les observations de terrain qui les ont confirmées, que la marge d'erreur d'identification reste malgré tout acceptable.

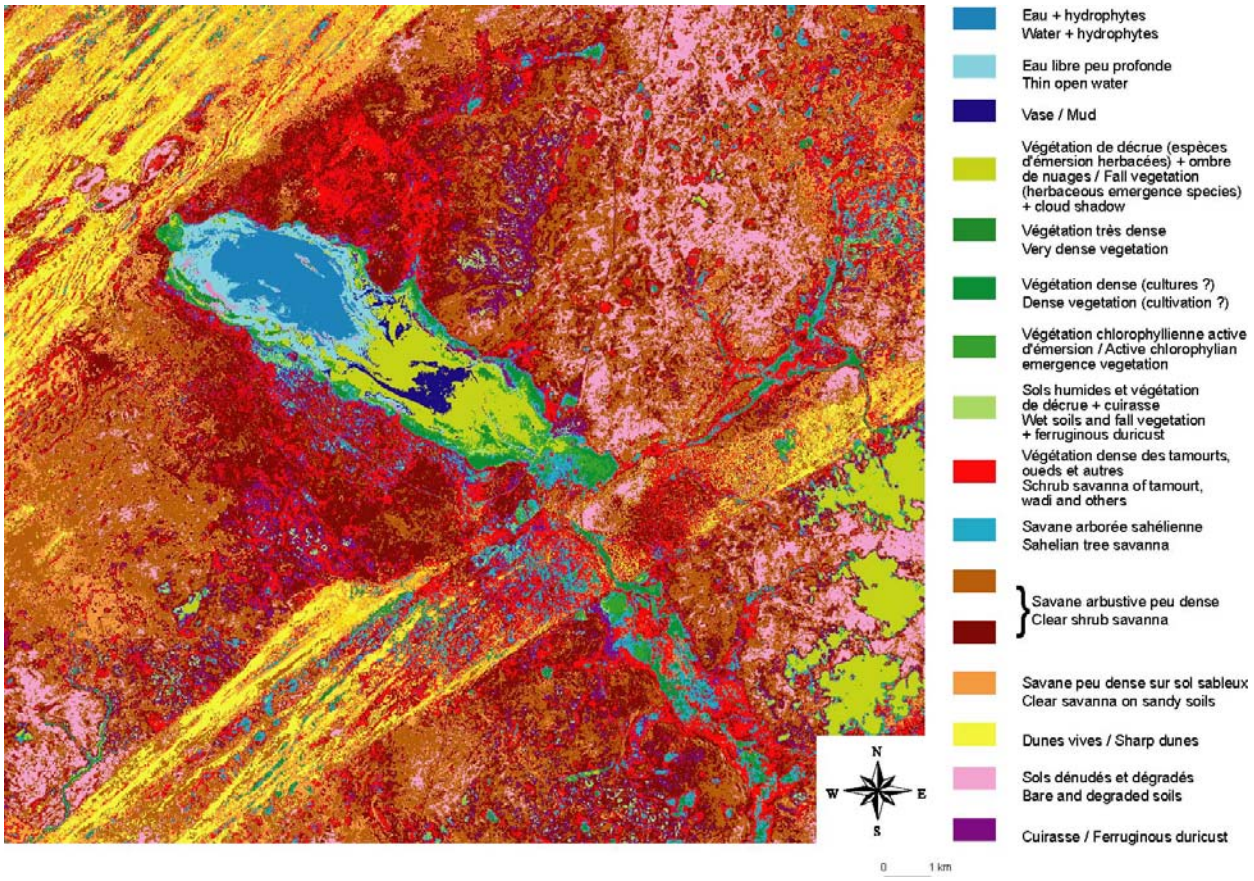


FIGURE 4 Classification non dirigée sur les canaux 1 (BV), 3 (PIR) et 2 (R) de l'image HRVIR(Xi) du 12-12-2000. *Unsupervised clustering on HRVIR(Xi) channels 1 (blue-green), 3 (NIR) and 2 (Red) dated 12-12-2000.*

4. RÉSULTATS ET DISCUSSION

Le suivi diachronique a permis de caractériser les différentes unités écologiques du lac d'Aleg et de sa périphérie (zones lacustre et humides et savane) et de mettre en évidence leurs dynamiques d'évolution saisonnière et pluriannuelle.

4.1. Le système écologique de la zone lacustre et des zones humides périphériques

Durant la saison sèche, le lac demeure la seule surface qui garde plus ou moins des réserves d'eau libre malgré son assèchement progressif. Il renferme donc une végétation spécifique qui se répartit en plusieurs ceintures concentriques internes entourant la zone centrale du lac et d'une ceinture externe.

La végétation des ceintures internes et de la zone centrale dépend essentiellement de la durée de l'inondation et de la hauteur de la lame d'eau. On y distingue trois unités distinctes qui sont fonction de la décrue, de la topographie et de la nature des sols, sableux en périphérie et de plus en plus argileux vers le centre de la dépression.

En 2000, la zone centrale présentait une nappe d'eau libre en périphérie et colonisée par une végétation aquatique au centre (figure 4). Dans les parties les moins profondes se développe une végétation formée essentiellement d'*Ipoméa aquatica,* caractérisée par son importante biomasse verte exploitée comme ressource fourragère. Plus à l'intérieur de la nappe d'eau, là où elle se maintient le plus longtemps, on observe une végétation purement aquatique constituée de *Nymphéa lotus* et de *Echinochloa stagnina*. Cette végétation tribu-taire de la décrue se rétracte pendant l'année en suivant l'eau libre. Si le remplissage annuel du lac a dépassé la cote de 29,9 m, elle peut être présente toute l'année, sinon, le sol arrive à l'émersion à la fin de la saison sèche.

En périphérie de cette zone centrale, le retrait de la nappe d'eau libre fait apparaître une ceinture de décrue argilo-limoneuse qui renferme des espèces végétales d'émersion, plantes annuelles hydrophiles qui apparaissent dès le retrait des eaux. On y rencontre notamment *Sesbania rostrata,* géophyte qui se terre sous forme de rhizome pendant la saison sèche et se développe très rapidement pendant la crue, formant une prairie flottante (zone à moins d'un mètre d'eau). On observe aussi *Cynodon dactylon,* plante vivace qui se reconnaît à ses épis étroits, longs et souples ainsi que *Cyperus erectus*. Ces herbacées hygrophiles une fois exondées, vont être broutées par les troupeaux de décembre à mars, date à laquelle il ne subsiste pratiquement rien. Des zones très humides (vases) non encore colonisées par la végétation persistent au centre de la dépression lacustre.

En périphérie plus lointaine se localise ensuite une deuxième ceinture de décrue située sur des fonds sablo-limoneux en rive du lac. Elle est inondée deux à trois mois par an quand la lame d'eau de crue dépasse la cote de 29,50 m, et elle est caractérisée par une végétation hygrophile. Cette ceinture montre sur la classification non dirigée de 2000, différents degrés d'humidité du sol et de couverture végétale (trois classes différentes) composée de *Bergia suffructicosa*, qui est une plante buissonnante rameuse, accompagnée *d'Alternanthera sessilis* et de *Glinus lotoides.*

La ceinture externe se situe sur des terrains exondés sableux entourant le lac et rarement atteints par les crues annuelles, qui doivent dépasser la cote des 30 m pour l'inonder. Elle est dominée par une savane sahélienne arborée composée d'une strate arborée et arbustive formée de *Balanites aegyptiaca,* de *Capparis decidua* et d'une strate herbacée éphémère composée principalement de *Cenchrus biflorus,* de *Farsetia ramosissima,* de *Dactyloctenium aegyptium* et de *Panicum laetum*. Les acacias, dont les individus sont globalement très épars, peuvent constituer localement des peuplements très denses.

La relative humidité des sols des oueds et des tamourts (dépressions humides inondables), que l'on rencontre autour du lac, favorise le développement de formations végétales constituées principalement d'une strate arborée, formant parfois de véritables forêts-galeries difficilement pénétrables. Le long de l'oued Ketchi, très riche en biodiversité végétale, subsistent des peuplements végétaux denses composés d'*Acacia nilotica,* de *Zizyphus mauritania* et d'*Anogueissus leiocarpus.* Leur forte densité et leur importante activité chlorophyllienne permettent de les identifier aisément au moyen de l'indice de végétation (NDVI).

De la même façon, les tamourts ressortent également très nettement sur les images satelli-taires grâce à la densité de leur peuplement arboré constitué d'*Acacia nilotica,* de *Zizyphus mauritania* et secondairement de *Balanites aegyptica,* qui contraste avec les espaces environnants. Ces espèces sont préservées sélectivement par les populations locales qui exploitent ces espaces (Ballouche, 2000).

4.2. Le système écologique de la savane

Le lac n'a aucune influence sur l'aridité des espaces environnants. Les formations végétales qui s'y développent sont donc directement soumises aux fortes contraintes climatiques de la région. On y rencontre par conséquent une savane plus ou moins dense et arborée selon les milieux.

Les cordons dunaires situés au nord et au sud du lac sont couverts d'une végétation arborée assez clairsemée. Sur les versants poussent quelques rares *Acacia senegal (*gommiers) et surtout de nombreux *Balanites aegyptiaca* mais aussi *Leptadenia pyrotechnica* et *Calotropis procera*, indiquant un fort surpâturage par le bétail. C'est au sud du lac que le cordon dunaire est le plus végétalisé. Pendant la période des pluies, les dunes sont souvent recouvertes d'une végétation herbacée assez dense.

Les plateaux cuirassés, qui sont les milieux les plus contraignants pour le développement de la végétation, sont caractérisés par une dénudation presque totale des sols. On y observe une formation arbustive très dégradée avec une forte présence d'arbres morts. La strate herbacée y est quasiment inexistante même en saison humide. Les arbustes qui arrivent à subsister sont principalement *Boscia senegalensis* et *Maerua crassifolia*.

4.3. La dynamique de la végétation

Le suivi diachronique des images satellitaires et des photographies aériennes ainsi que des travaux sur le terrain ont permis de mettre en évidence deux rythmes d'évolution de la végétation du lac d'Aleg et de sa périphérie : un rythme saisonnier et un rythme pluriannuel. Ils sont tous deux liés aux précipitations et à leurs variations avec les alternances saison sèche/saison humide à échelle annuelle et les cycles de sécheresse à échelle pluriannuelle. Mais, les facteurs anthropiques jouent un rôle majeur à longue échelle et viennent exacerber les conséquences des détériorations climatiques.

4.3.1. Une dynamique saisonnière « naturelle » de la végétation

Les espèces végétales de la ceinture externe sont directement dépendantes du climat tandis que, dans la zone centrale et les ceintures internes du lac, le type et l'état de la végétation dépendent plus de la hauteur de la crue annuelle (Eleyou, 1990).

La végétation de la dépression lacustre est caractérisée par une dynamique saisonnière qui la fait évoluer dans le temps et dans l'espace au cours d'un cycle annuel de la mise en eau du lac (de mi-juillet à début août) jusqu'à son tarissement (mai, juin) (figure 5).

L'évolution de la couverture végétale dans le lac est basée sur la hauteur de la lame d'eau et de ses variations durant l'année. Le remplissage du lac commence entre la mi-juillet et le début d'août. La lame d'eau augmente du fait des précipitations et des apports de la crue de l'oued Ketchi pour atteindre une extension maximale en début octobre. Cet apport d'eau contribue au démarrage de l'activité végétative des plantes hydrophytes à l'intérieur du lac, lesquelles forment ensuite une couverture dense, représentée principalement par *Nymphéa lotus* et par *Ipomea aquatica*. Ces formations végétales créent une prairie aquatique couvrante et en pleine activité à partir d'octobre pendant les hautes eaux. Le maintien de la lame d'eau permet au lac de garder une végétation verte toute l'année.

Au fur et à mesure de la décrue, qui commence dès le mois de novembre, on observe une rétractation de cette prairie vers l'intérieur de la zone humide au profit de deux ceintures décrites précédemment. La première ceinture de décrue composée de plantes d'émersion (*Sesbania rostrata, Cynodon dactylon, Ammania senegalensis*) se déplace en suivant la ligne de décrue. À la fin de mai et en juin, elle subsiste encore autour des derniers points d'eau. Au fur et à mesure du retrait de l'eau, cette ceinture s'assèche et devient une strate d'herbacées sèches. La deuxième ceinture formée de plantes annuelles rarement inondées, se compose de *Bergia suffructicosa,* d'*Alternanthera sessilis* et de *Glinus lotoides*.

Le cycle végétatif annuel de la savane arborée de la ceinture externe exondée du lac, rarement atteinte par les eaux, dépend, elle, si l'on exclut toute intervention anthropique, de l'abondance et de la distribution temporelle des pluies. Un cycle d'années à fort déficit pluviométrique peut provoquer une mortalité élevée des arbres et donc amener un net appauvrissement de cette couverture végétale. Dans une année normale de précipitations, la strate arborée montre un développement foliaire important de juillet à décembre. Puis, pendant la saison sèche, beaucoup d'arbres perdent leurs feuilles excepté *Boscia senegalensis* et *Balanites Aegyptica* qui, même dans des conditions climatiques difficiles, gardent leur feuillage toute l'année.

Les espèces herbacées comme *Cenchrus biflorus*, appelé communément cram-cram, ont un cycle végétatif très étroitement lié aux précipitations. Ces herbacées, très recherchées par les troupeaux, germent, croissent et fructifient en l'espace de deux mois et demi. Elles commencent à pousser à partir des premières pluies du mois de juillet. Ce tapis herbacé vert a une forte activité chlorophyllienne jusqu'au mois d'octobre au moment de la floraison et de la fructification. Puis, il commence à sécher après la fructification et prend alors une teinte jaune pâle au début du mois de décembre. Cette formation herbacée disparaît pratiquement vers avril, à cause du surpâturage et du débroussaillage qui s'effectuent deux mois avant les semis.

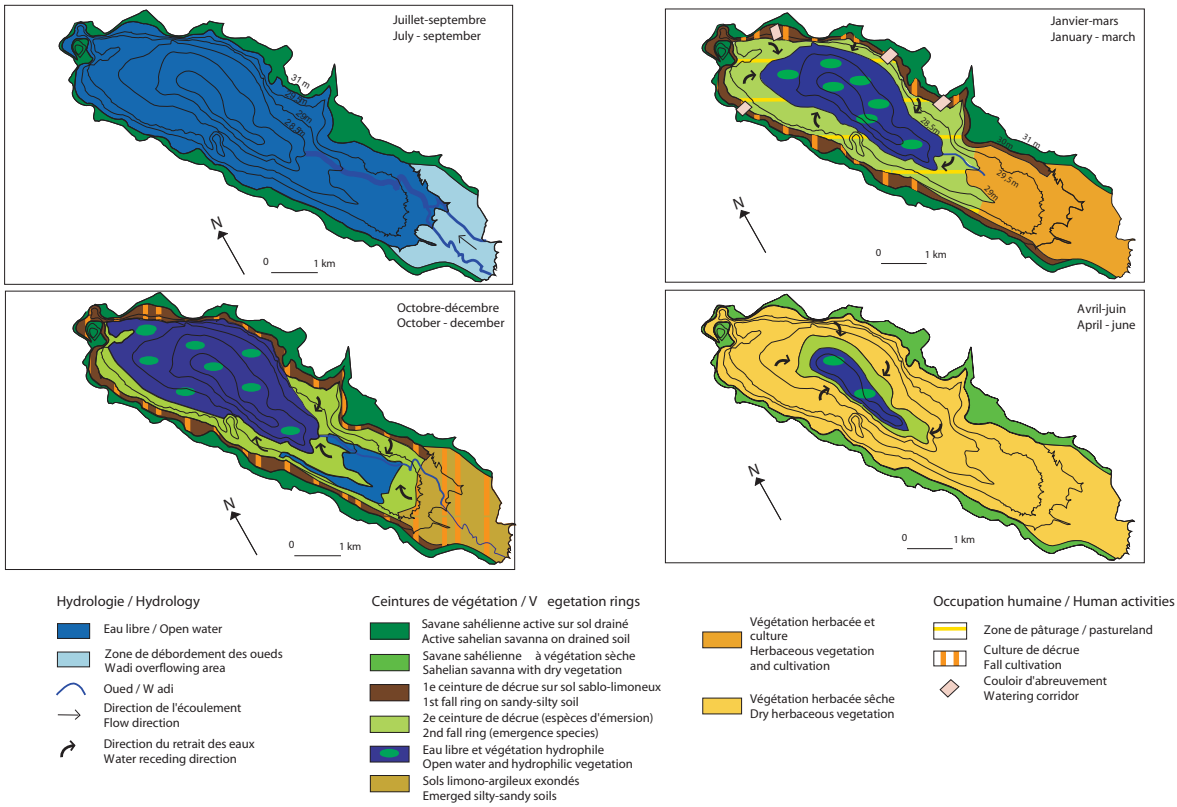


FIGURE 5 Dynamique saisonnière de la nappe d'eau et de la végétation du lac d'Aleg. *Aleg lake water and vegetation seasonal dynamic.*

4.3.2. Une dynamique pluriannuelle de la végétation sous forte contrainte climatique et anthropique : la dégradation du milieu

À l'échelle inter-annuelle, les facteurs influant sur l'évolution des couverts végétaux sont le climat, avec des occurrences de sécheresses plus ou moins sévères sur des pas de temps variés, et les actions anthropiques.

La ceinture externe et les autres unités paysagères des alentours du lac sont particulièrement affectées par l'action de la sécheresse. Les ceintures internes sont, elles, plutôt indépendantes de ces crises climatiques et réagissent par rapport aux apports hydrologiques liés au régime climatique saisonnier.

La comparaison de l'image satellitaire de 2000 avec les photographies aériennes de 1954 à conditions pluviométriques sensiblement similaires ne fait pas apparaître de grand changement concernant la végétation du lac du point de vue quantitatif. Ce constat ne signifie aucunement que cet espace est préservé, mais correspond à un biais technique lié à la résolution des images. Par ailleurs, les dates des images et des photographies aériennes ne sont pas les plus pertinentes pour le suivi sur le long terme de ces zones lacustres internes. Celle de 1992, bien qu'en saison humide, mais correspondant à une année sèche, a été caractérisée par un assèchement beaucoup plus rapide qu'en 2000 et 1954. L'évolution observée, si elle est pertinente pour le fonctionnement saisonnier vu précédemment, ne l'est pas pour l'évolution pluriannuelle.

Les témoignages locaux, confirmés par les observations de terrain, insistent au contraire sur le caractère très dégradé de ces espaces. Les pressions anthropiques exercées sur les formations végétales de la zone lacustre sont fortes. Ces formations sont en effet activement exploitées, directement par pâturage des bovins ou par prélèvement de fourrage à partir des berges au fur et à mesure de la décrue. Avec la sécheresse de ces dernières décennies, le cantonnement du cheptel toute l'année autour du lac et le broutage incessant ont entraîné une diminution de la couverture graminéenne de ces ceintures internes du lac.

Par ailleurs, la coupe abusive de bois de feu et les défrichements pour l'extension des zones cultivées

dans les zones humides ont fortement réduit la strate arborée et fait disparaître de nombreuses espèces d'arbres, notamment *Acacia nilotica*. L'intensification des cultures de décrue et la réduction de la jachère qui en résulte sont un autre facteur d'appauvrissement de ces écosystèmes, caractérisés en outre par un affaiblissement de la fertilité des sols. Par ailleurs, des aménagements transversaux, telles digues et diguettes, ont été mis en place pour retenir les eaux dans la partie amont du bassin versant de l'oued Ketchi. Ils risquent à terme de modifier fortement le régime hydrologique du lac et donc de nuire au développement des hydrophytes et plantes d'émersion.

D'autre part, l'extension de la ville d'Aleg et l'augmentation des rejets d'eaux usées corrélative, pourrait avoir un impact qui n'a pas pu être mis en évidence sur les images satellitaires, en polluant les eaux à proximité des zones de rejet.

La dégradation quantitative des formations végétales de la savane de la périphérie du lac est par contre nettement mise en évidence par le suivi diachronique par télédétection et notamment à partir de l'analyse des indices de minéralisation (figure 6).

La cause initiale de ces processus est la dégradation des conditions climatiques depuis la période de sécheresse de 1972 à 1997. Cette sécheresse a entraîné une forte mortalité et un appauvrissement des espèces ligneuses notamment dans les unités paysagères les plus sensibles, parce que plus sèches, comme les plateaux et sommets de dunes. La strate ligneuse a eu tendance à se concentrer dans les zones les plus favorables comme le lit des oueds, les tamourts et autour de la dépression lacustre. Le déficit pluviométrique a également affecté la couverture d'herbacées éphémères de la ceinture externe du lac et des autres unités paysagères exondées en raccourcissant leur cycle végétatif.

Ceci étant, le suivi diachronique de la zone lacustre et de sa périphérie, sur la période de 9 ans (1991-2000) couverte par les images satellitaires et incluant cette sécheresse sévère et la période plus humide à partir de 1998, a montré des localisations préférentielles de dégradation du couvert végétal et des sols. La position de ces espaces fortement dégradés et leur évolution temporelle indiquent le rôle prépondérant de l'humain dans la dégradation du milieu, en corrélation avec la crise climatique.

Sur l'indice de minéralisation de 1992 (figure 6a), à la fin de la saison humide mais en année sèche, on observe de très larges auréoles plus ou moins concentriques à fort albédo autour et à proximité des nouveaux villages de Taïba et Ehelewe au sud-est du lac d'Aleg et près de ceux de Jeddah et Bagdad le long de la route de l'Espoir, sur les plateaux autour de la ville d'Aleg et également au nord-ouest du lac dans la région des tamourts, toujours à proximité de la route nationale (figure 2). Ces fortes réponses spectrales indiquent une dénudation intense des sols avec élimination ou ouverture très importante du tapis végétal et tassement des sols par piétinement par les troupeaux.

La plupart de ces zones de forte dégradation sont « conjoncturelles », c'est-à-dire liées à la sécheresse particulièrement marquée de cette année-là. En effet, on observe une régénération du couvert végétal de certaines de ces zones sur l'indice de minéralisation de 2000 (figure 6b), en saison sèche mais une année humide. Elles y apparaissent en orangé alors qu'elles sont blanches ou orange clair en 1992, indiquant un fort albédo. Par contre, les auréoles dégradées toujours présentes à cette date sont plus étendues qu'en 1992 et sont significatives d'une dégradation « irréversible » très poussée et indépendante des variations climatiques. Ces espaces de dégradation essentiellement anthropique se localisent à proximité de la ville d'Aleg (NNE), des villages de Taïba et d'Ehelewe (figure 2) et des tamourts du nord-ouest du lac, espaces soumis à une pression de surpâturage intense car quotidienne, bien supérieure à leur capacité de charge.

L'image de 1991, en saison sèche (janvier), met bien en évidence ces zones à dégradation « irréversible », d'autant que la résolution plus fine (10 m) de cette image permet de distinguer certaines structures, notamment les pistes de déplacement quotidien des troupeaux d'Aleg vers les pâturages de périphérie proche. Certaines dunes semblent également mises à vif ces dernières décennies et avoir atteint un stade irréversible de dégradation dans les conditions d'usage actuel.

De manière plus générale, la dégradation de la couverture herbacée et arborée sur les sols à dominante sableuse de la région d'Aleg exposés à des vents violents et fréquents, cause une intense remobilisation du sable. Ce phénomène est observé non seulement au sommet des dunes mais est également plus généralisé et débouche sur une extension considérable des phénomènes d'ensablement.

En revanche, la dégradation du couvert végétal de la partie nord-est du lac est beaucoup moins marquée. Il s'agit, là, de zones de pâturages pauvres sur reg, peu attractifs et d'accès difficile en l'absence de route. La pression anthropique y est donc plus faible.

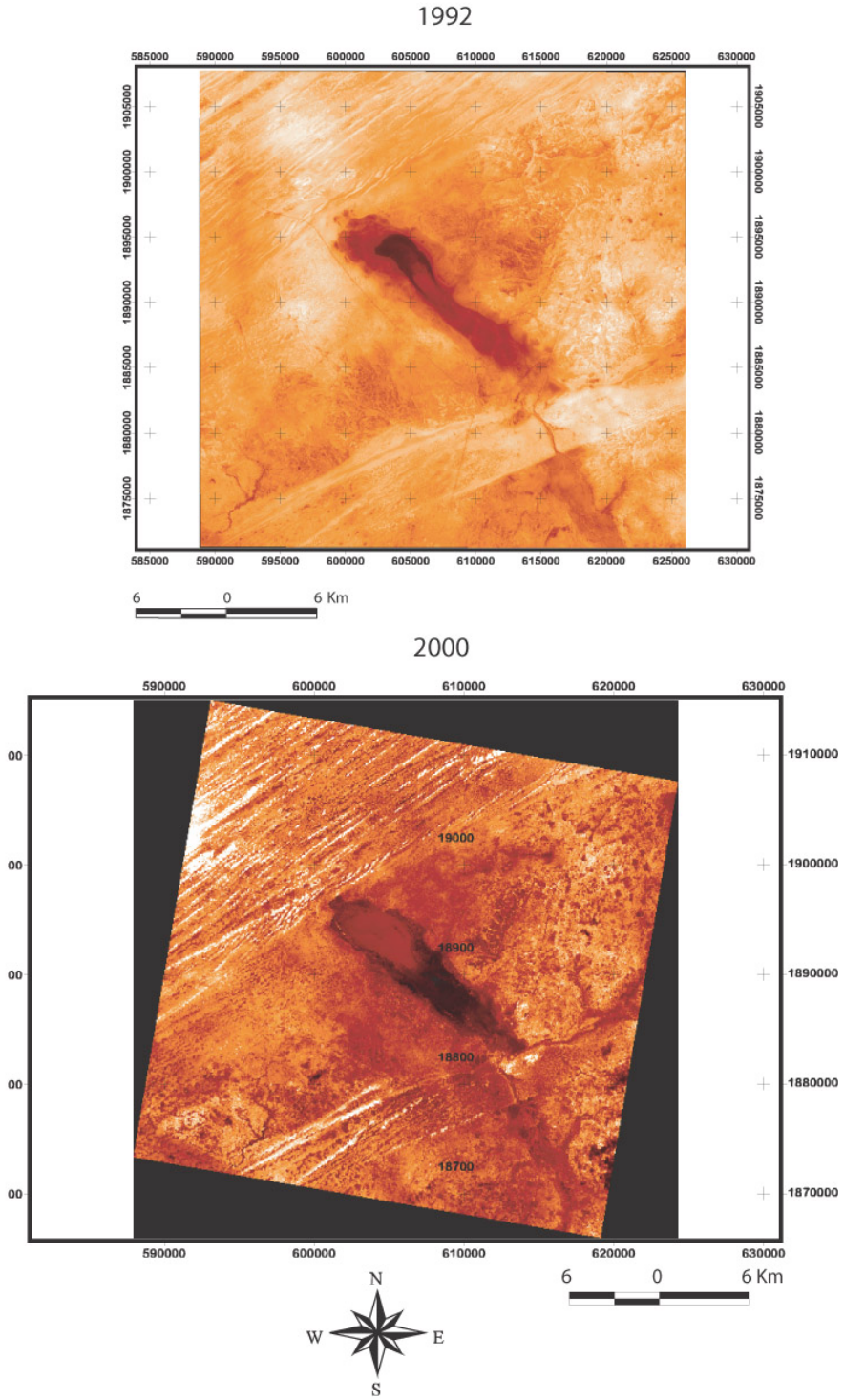


FIGURE 6 Indices de minéralisation (R^2 + PIR^2) des images HRV(XS) du 27-09-1992 et HRVIR(Xi) du 12-12-2000. En blanc, zones de dégradation exacerbée (et nuages). En noir, eau libre ou avec végétation hydrophile (et ombre des nuages). Rouge-orange, plus la teinte est foncée plus la zone est humide et caractérisée par une végétation dense (+ plateau cuirassé). *Mineralisation index (R^2 + NIR^2) of HRV(XS) images dated 27-09-1992 and HRVIR(Xi) dated 12-12-2000. In white, high degradation areas (and clouds). In black, open water or with hydrophilic vegetation (and cloud shadows). Red-orange, the more dark is the colour, the more wet and densely vegetated is the area (+ ferruginous plateau).*

Ce suivi de l'évolution du milieu à partir des images satellitaires multidates n'a permis de localiser que les processus de dégradation les plus exacerbés entraînant une dénudation totale du sol, parfois irréversible. Il existe également une dégradation plus généralisée mais aussi plus diffuse qui n'apparaît pas à travers les images et le type de traitements utilisés mais qui est réelle, attestée notamment par les travaux sur le terrain, les témoignages d'éleveurs et l'analyse des photographies aériennes de 1954. La savane sahélienne arborée des années 1950 était beaucoup plus dense et plus riche en biodiversité qu'aujourd'hui. La zone du lac d'Aleg a connu et connaît encore une forte régression de sa couverture végétale aussi bien sur le plan quantitatif que qualitatif avec, notamment, la disparition d'*Acacia nilotica* (Elghadi Ould, 2003).

La résolution plus fine de l'image HRV(P) de 1991 permet de mettre en évidence des zones à dégradation moins intense, notamment des couloirs étirés sur 5 km entre la zone lacustre et les villages de Bagdad, installés dans les années 1990 le long de la route de l'Espoir avec la sédentarisation des nomades. Ces couloirs correspondent à des zones de passage quotidien des troupeaux venant s'abreuver et pâturer au lac, ce qui occasionne un piétinement et un surpâturage intense. D'autres auréoles similaires apparaissent ainsi le long de la route de l'Espoir. En 2000, ces zones de dégradation n'apparaissent plus, indiquant probablement que les précipitations importantes ont favorisé cette année-là une régénération de la strate herbacée. Ceci étant, il se peut que cela soit simplement lié à la résolution plus grossière des images HRVIR(Xi) de 2000 par rapport aux images HRV(P) de 1991. En effet, les pistes empruntées par le bétail, visibles sur une image de résolution spatiale de 10 m, le sont beaucoup plus difficilement avec une résolution de 20 m.

À côté de cette dégradation quantitative du couvert végétal, il existe également une dégradation qualitative, peu visible sur les images satellitaires, qui se manifeste par la raréfaction voire la disparition de certaines espèces ou, à l'inverse, la colonisation par d'autres espèces. La ceinture externe du lac et les autres unités paysagères entourant la zone humide étaient autrefois occupées par une strate arborée dense et diversifiée qui s'est maintenant raréfiée. Les espèces ligneuses, comme *Acacia senegal* et *Acacia nilotique*, ont quasiment disparu. Il n'en subsiste aujourd'hui que quelques spécimens beaucoup plus éloignés du lac, accompagnés de quelques rares baobabs et de *Zizyphus mauritania*. Certaines herbacées fourragères, comme *Schoenfeldia gracilis*, ont disparu.

Par contre, on observe une prolifération d'autres espèces, comme *Balanites aegyptiaca,* espèce psammophile et *Capparis decidua*, qui auraient bien résisté à la sécheresse et aux pressions exercées à la fois par les humains et les animaux. Elles colonisent à présent la ceinture externe du lac où elles ont remplacé les peuplements d'acacias. Leur dissémination a par ailleurs été favorisée par le bétail qui se nourrit de leurs fruits.

La fréquence de *Leptadenia pyrotechnica* et surtout de *Calotropis procera* dans le paysage, particulièrement à proximité des villages, témoigne du caractère très dégradé de la végétation et d'une colonisation par défaut, car elles ne sont pas consommées par le bétail. Moins frappante mais tout aussi significative de la dégradation, est la dominance locale dans la strate herbacée d'espèces rudérales ou nitrophiles, comme *Tribulus terrestris* ou *Cassia tora*, indicatrices de la concentration des troupeaux (Ballouche, 2000).

5. CONCLUSION

À travers le suivi diachronique, il apparaît donc que les pressions anthropiques exercées sur ces milieux ont exacerbé les conséquences de la sécheresse de 1972-1997, facteur déclencheur à l'amont de l'ensemble des processus de dégradation observés. Ces processus de dégradation quantitatifs et qualitatifs de la couverture végétale et des sols, leur ampleur, pérennité et localisation, sont à relier aux mutations de l'occupation et de l'utilisation de ces milieux, étroitement associés aux phénomènes de sédentarisation que connaît la région depuis le début de la sécheresse dans les années 1970.

Avec le recul du nomadisme et le développement du semi-nomadisme, se sont développées des pratiques d'élevage plus intensives. Les troupeaux, qui ne se déplacent pas au-delà de 50 km autour du lac, sont menés par des bergers et appartiennent à des citadins fonctionnaires ou commerçants pour la plupart. Mais c'est surtout l'élevage familial qui est maintenant beaucoup plus intensif. Dans ce cas, le cheptel est cantonné toute l'année autour du lac, sur des pâturages restreints et faibles en productivité végétale ces dernières décennies à cause de la sécheresse. Les déplacements quotidiens depuis le village ou le campement fixé vers les zones de pâturage et d'abreuvement (essentiellement la zone lacustre) dépassent rarement 5 à 10 km.

Par ailleurs, si le cheptel a été décimé dans les premières années de la sécheresse, il s'est ensuite

rapidement reconstitué, notamment les ovins et les caprins, qui exercent une pression particulièrement intense sur les pâturages. Évalués à 190 000 têtes en 1969 autour du lac, ils avaient chuté jusqu'à 35 700 têtes en 1982, mais étaient de nouveau évalués à 150 000 têtes en début 2000 (Elghadi, 2003). Or, si le développement de la végétation dans le lac et son bassin versant durant l'hivernage permet de supporter des charges de pâturage élevées, il n'en est pas de même pendant la saison sèche. De plus, la pression du bétail sur ces pâturages augmente considérablement au début du mois de novembre avec l'arrivée de troupeaux d'éleveurs nomades qui subsistent et qui séjournent autour du lac jusqu'en juin. Elle est donc forte, notamment au début de l'hivernage, et compromet alors la régénération du couvert végétal car les jeunes pousses sont systématiquement broutées et atteignent difficilement leur maturité.

À cela s'ajoute la réduction des zones de parcours, liée à la reconversion à l'agriculture de décrue d'une partie des anciens nomades sédentarisés ayant perdu leur cheptel ou dans l'obligation de trouver une activité générant des revenus d'appoint. Cette reconversion a également concerné de nombreux agriculteurs qui pratiquaient auparavant l'agriculture pluviale devenue impossible avec la diminution des précipitations. Ces nouvelles terres ont été conquises sur la zone inondable au détriment des pâturages de la zone humide du lac d'Aleg.

Il faut ajouter à ces facteurs de dégradation le prélèvement de bois de feu, le charbonnage commercial ou individuel pratiqué notamment sur *Acacia nilotica* et la production de gomme arabique tirée de l'*Acacia senegal*. La route de l'espoir a favorisé le développement de ces activités en permettant l'exportation du charbon vers la capitale et explique la dégradation beaucoup plus intense du couvert végétal le long de cet axe routier comparativement au nord-est du lac moins intensément affecté.

Sous-jacente à cette crise environnementale apparaît une crise sociale qui a eu un impact sur les modalités de gestion de ces différents écosystèmes. L'accès aux pâturages du lac sont réglementés par la tribu Idjeidjba qui en est légitime propriétaire malgré la remise en cause de ce droit par l'ordonnance du 5 juin 1983 qui prône que « le système de tenure foncière traditionnelle est aboli » (Art. 3) et la loi n° 2000-044 relative au code pastoral qui veut accroître les pouvoirs des administrations locales (Présidence de la République, 2000). Les règles tacites de la collectivité perdurent, assurant le libre accès à tout cheptel mais avec priorité aux troupeaux des Idjeidjbas en cas de fréquentation trop importante. Ces règles strictes d'usage et d'accès ont été définies en raison de la double fonction de cet espace, utilisé à la fois comme zone de pâturage et de culture. En effet, ces usages antagonistes génèrent des conflits potentiels ou effectifs. Ainsi, la partie centrale du lac est strictement réservée au bétail sauf, et ceci à titre exceptionnel, les années de très mauvais remplissage du lac. Ils y accèdent par l'intermédiaire de couloirs aménagés à travers les champs de culture de décrue qui débutent à la cote de 28,5 m et s'étendent jusqu'aux limites de la zone inondée.

Cette maîtrise de la gestion de l'espace par les Idjeidjbas est remise en question ces dernières décennies. Cela apparaît notamment à travers le développement, lié à la sécheresse, des cultures de décrue derrière des barrages dans les oueds alimentant le lac et dans la zone humide même, augurant de futurs conflits d'usage.

Les parcours de périphérie ne sont, eux, pas soumis à des contraintes particulières d'accès, mais uniquement régis par le droit islamique. Seule la fin des récoltes de l'agriculture sèche développée dans un rayon de 10 à 20 km autour du lac est réglementée, fixée par les autorités administratives vers la mi-novembre, pour laisser le champs aux troupeaux (Elghadi Ould, 2003). C'est cette absence de gestion stricte des parcours qui explique l'ampleur et la pérennité des processus de dégradation observés.

Il s'avère que, si l'action de la sécheresse (1972-1997) est réelle, les localisations préférentielles de dégradation du couvert végétal et des sols ainsi que leur évolution indiquent le rôle prépondérant de l'humain dans leur développement devenu indépendant des variations climatiques. Le suivi diachronique a montré que, bien plus que la détérioration climatique, c'est le facteur gestion des milieux qui explique la localisation, l'ampleur et la pérennité des processus de dégradation sur 30 ans et qui n'ont donc rien d'une fatalité.

Il est donc nécessaire dans ces conditions de mettre en place de nouvelles modalités de gestion qui soient adaptées aux fonctionnements variant selon les échelles temporelles et aux conflits d'usages effectifs et potentiels.

Cette étude devrait se poursuivre par des travaux utilisant des données radar (Envisat) pour affiner les résultats concernant notamment l'ensablement et le suivi de la dégradation des formations végétales de savane qui restent insuffisants avec les seules données multibandes.

Remerciements
Les images satellitaires traitées dans le cadre de cette étude ont été acquises dans le cadre du programme ISIS du CNES (dossier n° 0207-350). L'Union Mondiale pour la Nature (UICN) a finan-

cé la plupart des campagnes de terrain réalisées dans le cadre de cette étude.

Nous remercions A. Ozer de l'Université de Liège, Yves Auda et François Blasco de l'Université Paul Sabatier pour leurs suggestions de corrections au texte.

Références

Ballouche, A. (2000) Rapport de mission Mauritanie, 12 février–5 mars 2000. Université d'Angers, 27 p.

Bannari, A., Morin, D., Bonn, F. and Huete, A.R. (1995) A review of vegetation indices. Remote Sensing Reviews, vol. 13, p. 95-120.

Bouland, P. (1996) Étude d'impact environnementale du projet de développement économique de la région du lac d'Aleg. Annexe du rapport d'expertise hydraulique, Hydro R & D, Wavre, 78 p.

Caruba, R. et Dars, R. (1991) Géologie de la Mauritanie. Université de Nice Sophia Antipolis, Institut supérieur scientifique, Nouakchott , 321 p.

Courel, M.F. (1984) Étude de l'évolution récente des milieux sahéliens à partir des mesures fournies par les satellites. Thèse de doctorat d'état, Université de Paris 1, 407 p.

Couteron, P. et Serpentier, G. (1995) Cartographie d'un couvert végétal soudano-sahélien à partir d'images SPOT XS. Exemple du nord Yatenga (Burkina Faso). Photo-interprétation, vol. 33, p. 19-28.

Diouf, A. and Lambin, E.F. (2001) Monitoring land-cover changes in semi-arid regions : remote sensing data and field observations in the Ferlo, Sénégal. Journal of Arid Environments, vol. 48, n° 2, p. 129-148.

Eleyou, M.L. (1990) Les lacs d'Aleg et de Mâl (Mauritanie), intérêt écologique et économique, potentialités aquacoles. Mémoire de DEA, Université de Paris 6, 68 p.

Elghadi Ould, A.V. (2003) Étude de la dynamique récente de la couverture végétale des bassins versants des lacs d'Aleg et de Mâl (Brakna, Mauritanie). Diagnostic et restauration des ressources. Thèse de doctorat, Université d'Angers, 251 p.

Gassani, J. (2003) Apport de la télédétection satellitaire à l'étude de la répartition et de la dynamique de la végétation d'une zone humide en milieu aride. Le lac d'Aleg (Brakna, Mauritanie). Mémoire de maîtrise, Université d'Angers, 103 p.

Glemin, E. et Royer, R. (2002) Du diagnostic à la gestion durable des ressources naturelles d'une zone humide en milieu sahélien, le cas du lac d'Aleg (Brakna, Mauritanie). Mémoire de maîtrise, Université d'Angers, 125 p.

Grauwels, M., Harou, J. et Bouw, P. (1999) Projet de développement économique de la région du lac d'Aleg. Expertise hydraulique, Hydro R & D, Nouakchott, 71 p.

Huete, A.R. (1988) A soil-adjusted vegetation index. Remote Sensing of Environment, vol. 25, p. 295-309.

Matheson, W. and Ringrose, S. (1994) Assessment of degradation features and their development into the post-drought period in the west-central Sahel using Landsat MSS. Journal of Arid Environments, vol. 26, n° 2, p. 181-199.

MDRE (Ministère du développement rural et de l'environnement) (1998) Étude hydrologique du lac d'Aleg. Projet de développement économique de la région du lac d'Aleg, République Islamique de Mauritanie, Nouakchott, 42 p.

ONS (Office national des statistiques) (1977, 1988 et 1999) Recensement général de la population et de l'habitat, années 1977, 1988, 1999. République Islamique de Mauritanie. Nouakchott.

Ould Cheikh, A.W. (1985) Notes sur l'élevage et l'organisation sociale des bidan (Maures) en Mauritanie. Production pastorale et société, n° 17, p. 55-65.

Poncet, Y. (1985) Étude du milieu naturel en zone sahélienne par télédétection spatiale. Éditions ORSTOM, coll. Thèses et documents, Paris, 520 p.

Présidence de la République (2000) Loi n° 2000-044 relative au Code Pastoral en Mauritanie, République Islamique de Mauritanie, Nouakchott, 5 p.

Taïbi, A.N. (1998) Le piémont sud du djebel Amour (Atlas Saharien, Algérie), apport de la télédétection satellitaire à l'étude d'un milieu en dégradation. Thèse de doctorat, Université de Paris 7, Presses universitaires du Septentrion, Lille, 310 p.