

21

Essai de caractérisation géométrique des différentes unités d'un erg actif à l'aide des données satellitaires panchromatiques SPOT, application à l'erg Akchar (Mauritanie occidentale)

JEAN-CLAUDE PION*, YVES BESNUS**, HERVÉ YESOU** et MAX
DEYNOUX***

*ORSTOM/GSTS, **CNRS/GSTS, ***CNRS, Institut de géologie, 1, rue Blessig,
67084 Strasbourg cedex, France

Résumé

L'étude de la terminaison nord-est de l'erg Akchar (Mauritanie) s'intègre dans un vaste programme international de recherches sur les migrations d'ergs. La finalité des recherches est l'étude dynamique des formations dunaires pour l'application à la sédimentologie des formations éoliennes anciennes et pour l'aide au développement routier du pays.

L'erg Akchar a été sélectionné à partir de l'inventaire des déserts réalisé grâce aux images Landsat MSS et aux photographies Skylab. Une esquisse cartographique de plusieurs zones-tests a été dressée au 1:10 000 à l'aide d'une image SPOT panchromatique, puis vérifiée sur le terrain en 1989.

Les thèmes caractéristiques du paysage dunaire de l'erg Akchar sont mis en évidence par téledétection à haute résolution. D'une part, les unités thématiques ont une géométrie particulière accessible par une résolution spatiale de 10 mètres. D'autre part, l'étalement dynamique des luminances apparentes est suffisant pour permettre une distinction de la plupart des principaux thèmes. La forme bimodale des histogrammes des fréquences des zones-tests a permis de traiter les images en deux groupes, séparant les thèmes de haute et de basse luminance apparente.

Un seuillage de chacun des groupes de luminance a été réalisé, soit à l'aide du logiciel «ERDAS», soit du logiciel «Planètes». Des images fausses couleurs ont été produites. Chaque teinte, représentant un thème particulier, correspond à une faible variation de luminance, de 1 à 2 niveaux de quantification tout au plus.

Une étude des données spectrales des mêmes zones est en cours à l'aide d'une image Landsat TM. La cartographie est confirmée, mais de nouvelles distinctions apparaissent dans les formations dunaires et interdunaires.

1 Cadre géomorphologique et évolution de l'erg Akchar

L'erg Akchar est l'erg actif le plus au sud du Sahara occidental. Il se situe au nord-ouest de la Mauritanie dans la zone de transition entre le Sahara où les dunes sont actives, et le Sahel mauritanien, où elles sont fixées (fig. 1). L'erg Akchar s'étend depuis les falaises de l'Adrar jusqu'à l'océan Atlantique sur une distance de 400 km. Il est orienté N 55 E, parallèlement aux ergs sahéliens situés plus au sud. Atteignant plus de 60 km de large dans sa partie septentrionale, il se rétrécit vers la mer. La terminaison nord de l'erg est marquée au vent par une séparation en bras multiples. Ceux-ci sont posés sur le socle cristallin qui apparaît ainsi masqué par des voiles sableux s'étendant jusqu'au pied de la falaise de l'Adrar. Les formations dunaires de l'erg Akchar sont constituées de dunes linéaires en cordons complexes avec très souvent des barkhanes, ou dunes en croissant, surimposées.

La plupart des formations dunaires mauritaniennes se sont constituées durant l'Ogolien, 20 000 à 13 000 ans AA, lors de la dernière glaciation. Le développement maximal a eu lieu vers 18 000 ans AA, alors que le niveau marin était très bas, entre -200 m et -100 m par rapport au niveau actuel. Le climat était froid, très venteux, avec de faibles précipitations (Fryberger, 1980; Talbot, 1980; Hebrard, 1983; Sarthein *et al.*, 1981).

Au cours du Tchadien, 12 000 à 8000 ans AA, les conditions climatiques changent. Le niveau des mers remonte, atteignant -15 m à la fin du Tchadien. Cette période humide est marquée par la formation de lacs interdunaires et de bassins endoreïques, et par le développement de terrasses alluviales (Servant, 1983). Les édifices dunaires vont être partiellement décapés et découpés par la mise en place d'un réseau hydrographique. Ces conditions climatiques permettent le développement d'un couvert végétal contribuant ainsi à la stabilisation des dunes. Elles provoquent également la formation d'un sol rouge-brun correspondant à une pédogenèse plus humide (Hebrard, 1973; Michel, 1980). À la fin du Tchadien, à un court épisode régressif, correspond une réactivation du système dunaire et un changement de sédimentation dans les lacs.

Pendant le Nouakchottien, 6 000 à 4 000 ans AA, la mer envahit localement les zones basses interdunaires. Sous ces conditions humides, la végétation est fortement développée sur les dunes, et la pédogenèse commencée au Tchadien se poursuit (Faure et Hebrard, 1977; Elouard, 1968).

Le Tafolien, 4000 à 2000 ans AA, est marqué par le retour à un climat aride, provoquant l'isolement en lagunes des baies ennoyées. Les sebkhas se forment alors par assèchement des zones humides. Les derniers dépôts lacustres nord-mauritaniens sont datés de 3 000 ans AA (Delibrias *et al.*, 1976). Depuis cette époque, les conditions climatiques sont hyper-arides. La réactivation des dunes est alors liée à des conditions de sécheresse amplifiées localement par l'action anthropogénique.

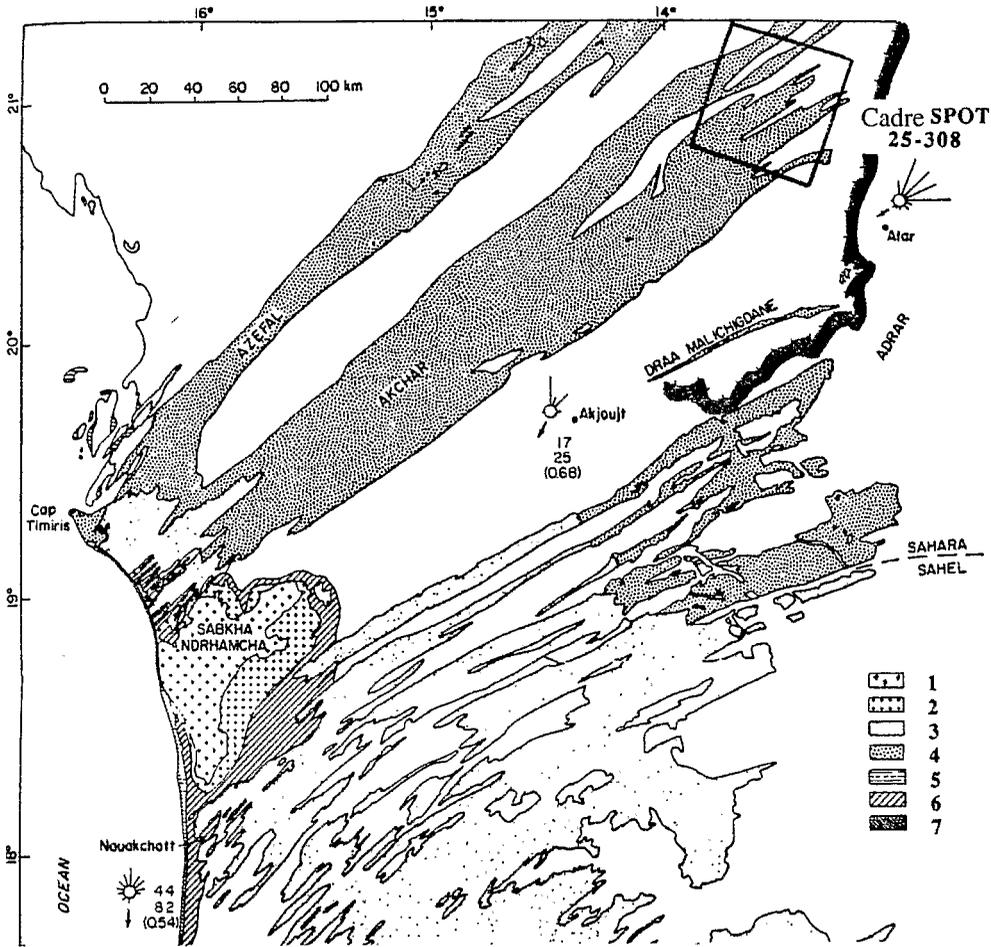


Figure 1. Carte de situation de l'erg Akchar (d'après Breed *et al.*, 1979); (1) sebkha active, (2) sebkha relictuelle, (3) dunes ogoliennes stabilisées, (4) dunes ogoliennes réactivées, (5) dunes côtières et littorales actives, (6) sédiments littoraux nouakchottiens, (7) escarpement

2 Analyse des images

2.1 Image du cadre SPOT 25-308

Pour réaliser cette étude, nous disposons d'une bande magnétique de l'image SPOT 25-308. Il s'agit d'une image de niveau 1B en mode panchromatique, ayant donc une résolution spatiale de 10 m par 10 m. L'acquisition a été réalisée à l'aide du capteur HRV1, le 11 janvier 1988 à 11h35, avec un angle d'incidence R de $2^{\circ} 3'$. Cette image couvre une zone de 60 km par 60 km au nord-ouest d'Atar correspondant à la terminaison de l'erg Akchar. Plus précisément, le centre de l'image se situe à $21^{\circ} 00' 47''$ de latitude nord et $13^{\circ} 31' 08''$ de longitude ouest (fig. 1).

Les luminances apparentes ont des valeurs comprises entre les niveaux de quantification 29 et 200. L'histogramme des fréquences (fig. 2) montre une répartition quadrimodale des pixels avec trois modes principaux. Les luminances apparentes les plus élevées correspondent aux cordons dunaires, les plus faibles aux interdunaires et aux affleurements isolés ou guelbs. Les modes sont centrés sur les niveaux de quantification 101, 107, 124 et 135. L'écart type est de 17,49.

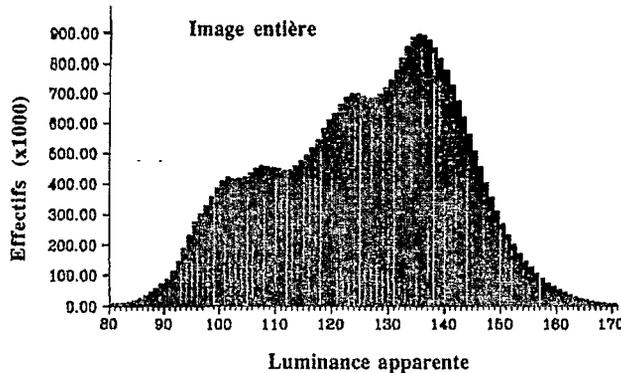


Figure 2. Histogramme des fréquences de l'image 25-308 du 11/01/88

Sur l'image totale (fig. 3), le contraste est bien marqué entre les formations dunaires et les dépressions interdunaires. Les affleurements de socle apparaissent également, soulignés par une jupe sableuse située sous leurs vents. L'orientation NE-SO des cordons dunaires est générale avec parfois des directions flexueuses et obliques des alignements, signalant ainsi les reprises et remises en mouvement de l'erg Akchar. Les zones interdunaires sombres apparaissent en gris. Très souvent, des structures linéaires correspondant au socle sont visibles à travers un mince recouvrement sableux ou à travers les regs, surface plus ou moins plane recouverte de cailloutis. Les guelbs, marqués par la patine désertique très sombre, apparaissent en noir. On distingue nettement, dans le coin nord-ouest de l'image, la trace de la voie ferrée servant à l'évacuation du minerai de fer de Zouérate.

2.2 Analyse de la zone 1

La zone 1, d'une superficie de 4,8 km par 4 km, se situe au nord du cordon central de l'erg Akchar, derrière un guelb en fer à cheval nommé «Touama ez Zeghlane». Il s'agit d'une cuvette interdunaire ayant contenu un petit lac quaternaire. Une formation calcaire croûteuse apparaît de façon discontinue au centre de la dépression.

Les luminances apparentes (fig. 4) ont des valeurs comprises entre les niveaux de quantification 42 et 175. L'histogramme des fréquences est bimodal avec des modes centrés respectivement sur 113 et 131 correspondant aux zones sombres et aux cordons dunaires environnants.

L'image réalisée à partir du seuillage des luminances basses permet de mettre en évidence les différents thèmes de la cuvette interdunaire (fig. 4). On distingue au NE le guelb en fer à cheval (1) et sa jupe de sable vif très allongée (2) avec une crête acérée et une zone d'ombre. La partie alluviale, sous le vent, est très peu marquée (3) et l'on passe rapidement au socle cristallin dans lequel des directions structurales sont visibles (4). Au centre de la cuvette, on

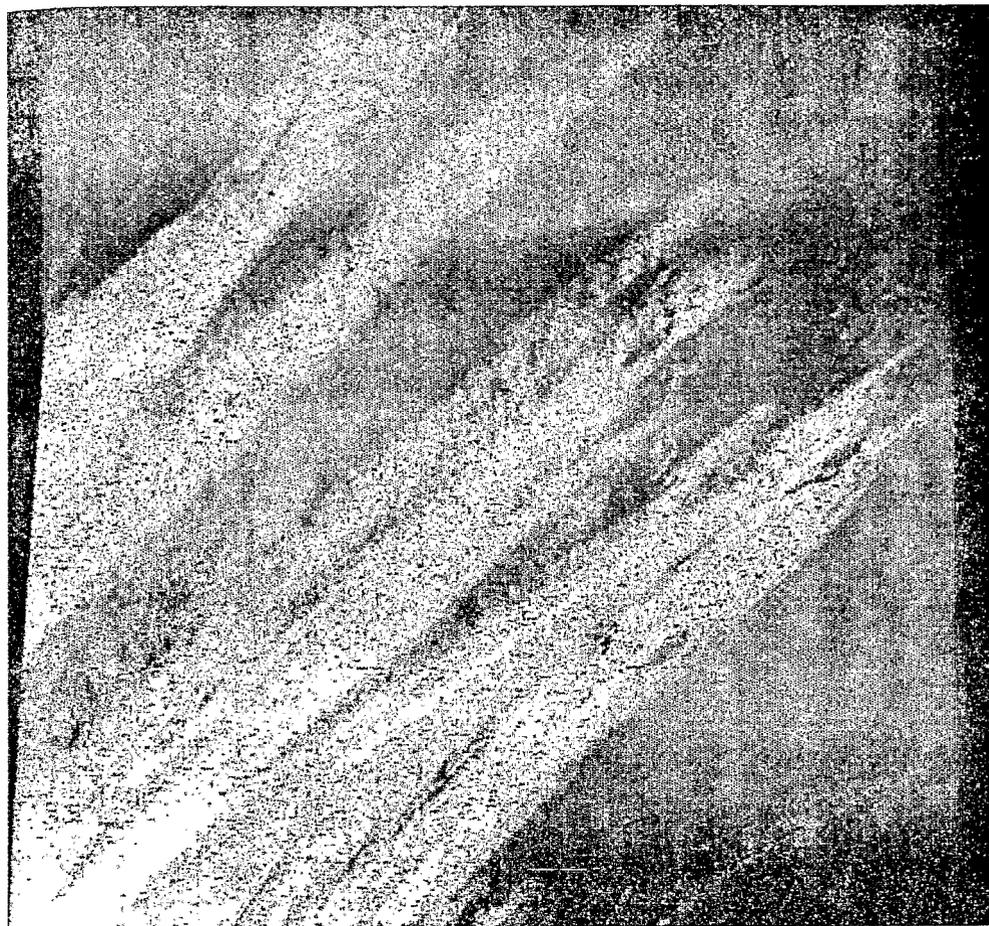


Figure 3. Terminaison nord-est de l'erg Akchar sur l'image 25-308 du 11/01/88

distingue une dalle calcaire lacustre discontinue qui marque une bordure parallèle au paléorivage d'un lac nouakchottien (5). Le flanc sud de la cuvette, plus sombre, est formé de regs noirs et d'affleurements du socle non séparables par seuillage (6). Des sols gris argileux marquent la terminaison sud de la cuvette (7). On remarque très bien une barkhane isolée sur le versant nord de la cuvette (8).

2.3 Analyse de la zone 2

La zone 2, d'une superficie de 4,8 par 4 km, se situe dans l'axe du cordon central de l'erg Akchar, dans une région à gros guelbs nommée «Ez Zeghalâne el Akhdar». La proportion de cuvettes interdunaires est grande et les cordons dunaires actifs sont peu nombreux, avec quelques alignements de barkhanes isolées et quelques traînées sableuses sous le vent des affleurements.

Les luminances apparentes sont comprises entre les niveaux de quantification 38 et 170. L'histogramme des fréquences montre une répartition à tendance bimodale dissymétrique,

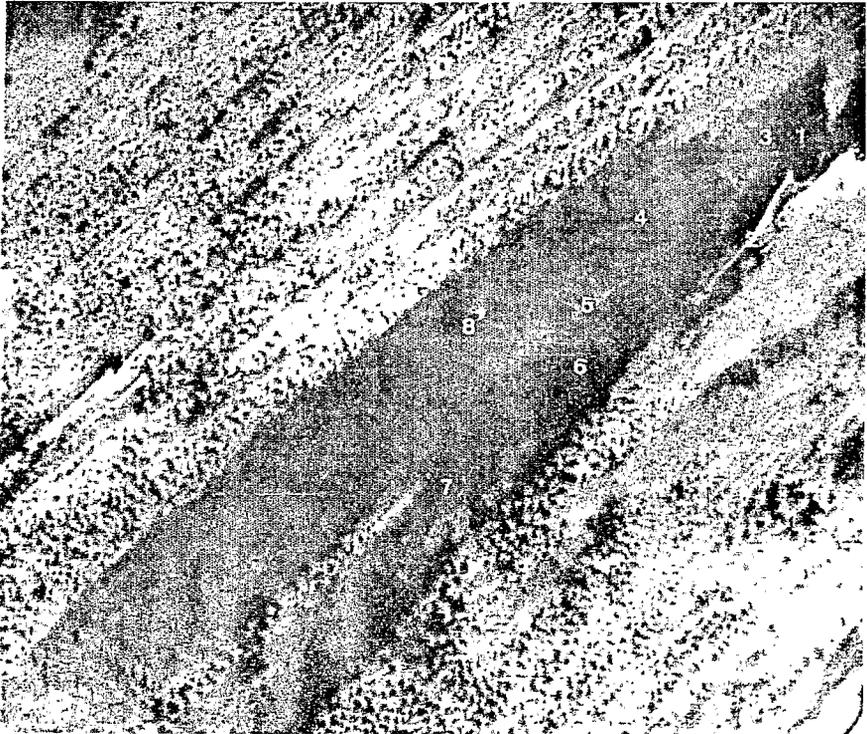
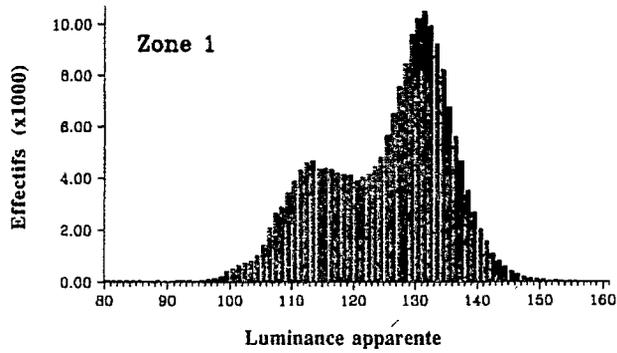


Figure 4. Histogramme des fréquences et image de la zone 1; (1) guelb en fer à cheval, (2) jupe de sable vif très allongée et zone d'ombre, (3) auréole alluviale peu marquée, (4) socle cristallin dans lequel des directions structurales sont visibles, (5) dalle calcaire lacustre discontinue, (6) regs noirs, (7) sols gris argileux, (8) barkhane isolée

les faibles valeurs étant les plus nombreuses, avec un mode principal à 107 et un épaulement faiblement marqué à 121 (fig. 5). Les luminances les plus basses correspondent aux zones sombres des guelbs et des regs noirs.

L'image réalisée à partir du seuillage des luminances basses (fig. 5) permet de mettre en évidence une organisation circulaire autour du pied du guelb principal (1) et une organisation auréolaire centrée sur un reg principal noir (2). Une coupe réalisée sur le terrain entre les deux zones (ABC) a permis de différencier deux séquences (fig. 5). Une séquence ébouleuse et

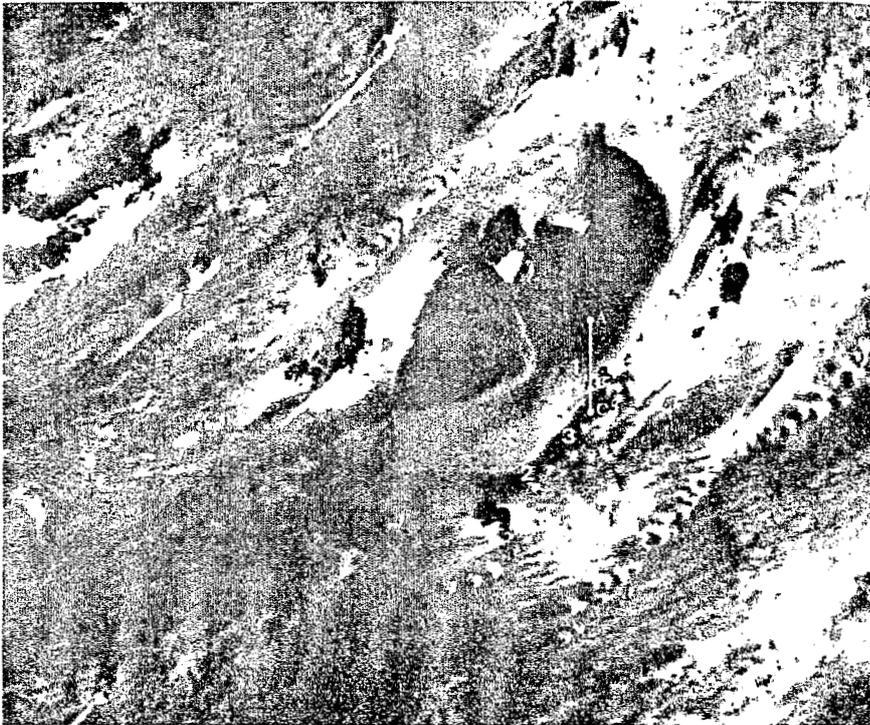
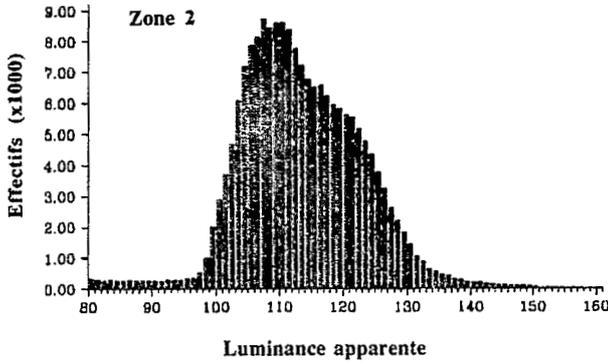


Figure 5. Histogramme des fréquences et image de la zone 2; (1) organisation circulaire autour du pied du guelb principal, (2) organisation auréolaire centrée sur un reg noir, (3) zone axiale sombre correspondant à une forte densité des grains à patine désertique, (4) éparpillement des grains et ensablement du reg, (ABC) coupe réalisée sur le terrain

alluviale depuis le flanc du guelb jusqu'au sable vif (AB). Les tons gris de plus en plus clairs indiquent un épandage de blocs et de débris de plus en plus fins lorsqu'on s'éloigne du guelb. Une seconde séquence (BC) montre que le reg noir allongé correspond en fait à un ancien cordon dunaire ogolien fortement aplani, légèrement bombé, recouvert d'une pellicule de grains millimétriques jointifs sombres. Cette pellicule donne à l'ensemble une luminosité faible. Ce reg est formé sur le versant nord de l'ancien cordon ogolien. Une zone axiale sombre (3) correspond à la plus grande densité des grains à patine désertique, les bordures

plus claires, à un éparpillement des grains et à un ensablement du reg (4). On distingue, sur ce cordon aplani, quelques barkhanes isolées de sables vifs.

Il est difficile de séparer, uniquement par télédétection, les séquences ébouliteuses et alluviales les plus grossières et la séquence de recouvrement granuleuse du reg noir. La position morphologique, qui correspond à une topographie très caractéristique, permet de différencier ces deux thèmes. Les alluvions et colluvions auréolent les guelbs. Les regs noirs suivent la direction des cordons dunaires ogoliens orientés N 55 E.

2.4 Analyse de la zone 3

La zone 3, d'une superficie de 5 km par 4 km, se situe dans la partie sud du cordon principal de l'erg Akchar, au nord-est d'une zone de guelbs, nommée «Bou Aleika». Elle représente le démarrage du cordon dunaire avec des voiles sableux peu épais et des dépressions interdunaires légèrement ensablées.

Les luminances apparentes sont comprises entre les niveaux de quantification 45 et 179. L'histogramme des fréquences montre également une répartition bimodale, avec une dissymétrie inverse de celle de la zone 2, un épaulement faiblement marqué à 110 et un mode principal à 124 (fig. 6).

L'image de la figure 6 permet de mettre en évidence les thèmes principaux de la zone en déflation à l'amont du cordon dunaire. On distingue, au nord-est de l'image, les deux bordures calcaires (1 et 2) d'une formation lacustre interdunaire. Ces croûtes calcaires sont mieux individualisées que dans la zone 1. Elles marquent probablement des lignes parallèles aux paléo-rivages de l'ancien lac. Les sols argilo-sableux apparaissent en gris noir au centre de la dépression (3). Les voiles sableux représentent une mince pellicule et s'organisent en panaches suivant une direction proche d'est-ouest (4). Un début d'organisation en dunes transverses barkhanoïdes est visible sur le rebord nord de l'interdunaire (5). Ces reprises actives des cordons s'organisent en réticules complexes de faible épaisseur sous lesquels on peut distinguer des directions structurales du socle cristallin (6).

3 Discussion des résultats

Nous avons réalisé lors de cette étude des images fausses couleurs et noir et blanc à partir d'un simple seuillage des différents modes de l'histogramme des fréquences. Les résultats obtenus sont intéressants non seulement sur le plan géométrique, mais également sur le plan spectral.

3.1 Caractérisation géométrique des unités thématiques

La précision des données panchromatiques SPOT permet très facilement de dresser une esquisse cartographique au 1:10 000. Le pixel de 10 m par 10 m est alors visible, taille de 1 mm par 1mm, mais ne gêne absolument pas le repérage d'amers, ni la délimitation des principaux thèmes.

L'organisation spatiale des ergs et des interdunaires est très régulière. Les grands cordons ogoliens montrent une direction N 55 E. Ils sont recouverts par des faisceaux de dunes barkhanoïdes, orientés N 40 E. Cette direction, oblique sur l'Ogolien, se marque en début de cordons ou sur le flanc SE des formations dunaires. Les jupes de sables vifs, localisées en queue de guelbs, ont des directions variables comprises entre N 40 E et N 55 E. Ces

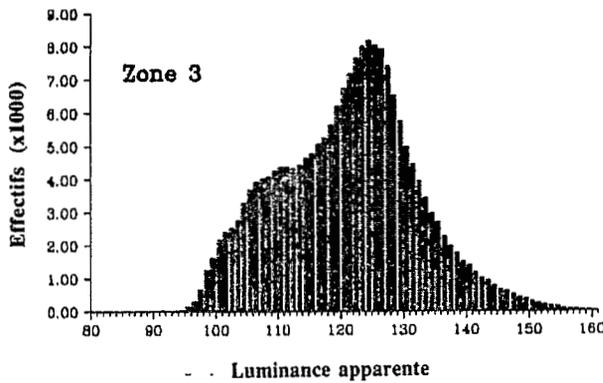


Figure 6. Histogramme des fréquences et image de la zone 3; (1) et (2) bordures calcaires, (3) sols argilo-sableux, (4) voiles sableux organisés en panaches, (5) début d'organisation en dunes transverses barkhanoïdes, (6) réseau complexe de barkhanes

orientations semblent fonction de la taille et de la forme du guelb. Pour les petits guebbs, la direction moyenne s'établit à N 45 E.

La limite des unités thématiques, définie à partir de l'imagerie SPOT, correspond sur le terrain à des variations topographiques. Les unités interdunaires sont en creux et les cordons dunaires en relief. Les guebbs forment des chicots, aussi bien dans les creux que sur les dunes. Pour les guebbs et les barkhanes à fort relief, des zones d'ombre sont mises en évidence.

Une comparaison des photographies aériennes au 1:50 000 (Mission IGN, AO-NF-28-XI, 1955) et de l'image SPOT de 1988 permet d'évaluer la dynamique actuelle des formations dunaires. Les positions des limites entre les principales unités, guelbs, dunes et interdunes, sont peu ou très peu déplacées à l'échelle d'observation du panchromatique. Sur l'image SPOT, en particulier, les creux interdunaires, les anciennes zones lacustres et les flancs NO des cordons ogoliens ne présentent pas d'ensablement actuel notable. Le sable remobilisé à forte luminance est surtout visible sur les sommets des cordons dunaires ogoliens et sur leurs flancs SE.

3.2 Caractérisation spectrale des unités thématiques

La définition spectrale des thèmes a été rendue possible grâce à la dynamique importante des luminances apparentes. L'histogramme des fréquences est bimodal ou quadrimodal ce qui permet de traiter l'image en groupes séparant les thèmes de faible et de forte luminance.

Le premier groupe comprend les thèmes dunaires très réfléchissants : barkhanes, dunes linéaires, jupes sableuses en queue de guelb et croûtes calcaires. Le second ensemble concerne les thèmes sombres. Il comprend : les sols argilo-sableux des zones interdunaires, les regs plus ou moins noirs, le substratum cristallin et les massifs rocheux des guelbs.

Certaines unités sont faciles à définir. Pour d'autres, en raison de l'utilisation d'une seule et large bande spectrale, 0,48 à 0,76 μm , l'identification s'avère difficile et même impossible. Il est nécessaire dans ce dernier cas d'utiliser des données multispectrales. Une image Landsat TM est actuellement en cours de traitement.

3.2.1 Thèmes d'identification aisée

On reconnaît facilement, pour le groupe à luminance élevée, les unités de dunes vives, les barkhanes et les jupes sableuses. Dans le groupe de basse luminance, les guelbs, le substratum et les zones interdunaires ne présentent pas de problème d'identification.

3.2.2 Thèmes d'identification délicate

Parmi les thèmes difficiles à cartographier, deux présentent une répartition spatiale qui facilite leur différenciation. Il s'agit des croûtes calcaires et des regs noirs.

Les regs noirs sont constitués d'une pellicule de grains millimétriques jointifs à patine noire. Ils correspondent à un résidu de déflation et marquent la position des dunes ogoliennes, 18 000 ans AA. Ils sont répartis sur les versants NO des cordons dunaires ogoliens. Les regs noirs se distinguent des zones alluviales et colluviales par leur orientation N 55 E.

Les croûtes calcaires correspondent à des dépôts lacustres dans certaines dépressions interdunaires. Leur luminance élevée est très voisine de celle des voiles sableux. Elles se distinguent de ces derniers par leur localisation interdunaire, ressortant en clair dans un environnement assez sombre.

3.2.3 Thèmes d'identification impossible

Plusieurs thèmes, identifiés sur le terrain, n'ont pas été reconnus sur l'image panchromatique SPOT. Il s'agit en particulier des différents sols gypseux et argilo-sableux clairs cartographiés dans les zones interdunaires. Une classification des sols effectuée à partir de données multispectrales devrait permettre leur mise en évidence.

De même, l'identification des différents regs de la région étudiée n'est possible que si la mince pellicule gravillonnaire qui les constitue est assez dense pour donner une luminance faible. Dans le cas de regs légèrement ensablés, il y a une indétermination totale sur la nature de l'unité. Il peut alors s'agir de regs ou de sols. Des données sur la granulométrie serait alors nécessaire pour permettre une identification fiable du thème.

4 Conclusion

L'utilisation des données SPOT panchromatiques est un excellent moyen de réaliser une étude préliminaire d'un erg actif, tel l'erg Akchar. Cette étude doit être poursuivie à l'aide de données multispectrales afin de définir et de cartographier l'ensemble des unités thématiques existantes.

Les enseignements principaux sont les suivants.

- Les interdunaires ogoliens et les dépôts lacustres nouakchottiens qui en occupent les zones médianes ne sont pas recouverts par des formations sableuses actuelles.

- Les regs noirs, marquant la surface de déflation d'une partie des anciens cordons ogoliens, ne sont pas recouverts sur les flancs NO au vent des formations dunaires.

- Les dépôts alluviaux-colluviaux sont très limités. Ils se localisent sous forme d'étroite auréole autour des grands guebbs. Il n'y a pas de recouvrement sableux visible à l'amont NE de l'erg Akchar.

- Il existe une réactivation des édifices dunaires. Elle est marquée par le développement de barkhanes et de jupes sableuses au sommet des cordons ainsi que sur les flancs SE, correspondant au versant sous le vent.

On peut conclure qu'il existe bien une réactivation post-ogolienne de l'erg Akchar, à partir de la détérioration climatique vers 2000 à 3000 ans AA. Cette réactivation s'est accélérée depuis une quarantaine d'années comme le montre la comparaison avec les photographies aériennes. Cependant, elle est limitée et correspond à une remobilisation sur place des sables ogoliens. L'extension actuelle des sables vifs n'a ni remobilisé, ni réactivé l'ensemble des formations anciennes ogoliennes.

5 Références

- BREED, C. S., S. G. FRYBERGER, S. ANDREWS, C. MC CAULEY, F. LENNARTZ, D. GEBEL et K. HORSTMAN, 1979. Regional studies of sand seas using Landsat (ERTS) imagery. —in E.D. Mc Kee (éd.). *Global Sand Sea*. U. S. Geological Survey Prof. Pap. 1052, p. 305-397.
- DELIBRIAS, G., L. ORTLIEB et N. PETIT-MAIRE, 1976. New C14 dates for the Atlantic Sahara. Tentative interpretations. —*J. Human Evol.*, vol. 5, p. 535-546.
- ELOUARD, P., 1968. Le Nouakchottien, étage quaternaire de Mauritanie. —*Ann. Fac. Sci., Dakar*, vol. 22, p. 121-137.
- FAURE, H. et L. HEBRARD, 1977. Variations des lignes de rivage au Sénégal et en Mauritanie au cours de l'Holocène. —*Studia Geologica Polonica*, 52, p. 143-157.
- FRYBERGER, S. G., 1980. Dune forms and wind regime, Mauritania, West Africa : implications for past climate. —in M. Sarthein, E. Seibold et P. Rognon (éd.). *Palaeoecology of Africa*. Balkema, Rotterdam, p. 79-96.

- HEBRARD, L., 1973. Contribution à l'étude géologique du Quaternaire du littoral mauritanien entre Nouakchott et Nouadhibou, 18°-21° latitude nord. —Laboratoire de géologie, Université de Dakar, 483 p.
- HEBRARD, L., 1983. La synthèse stratigraphique du Quaternaire du littoral mauritanien entre Nouakchott et Nouadhibou. —*in* J. Fabre (éd.). *Lexique stratigraphique international, Afrique de l'Ouest*. Pergamon Press, 1, p. 158-170.
- MICHEL, P., 1980. The Southwestern Sahara margin : sediments and climatic changes during the recent Quaternary. —*in* M. Sarthein, E. Seibold et P. Rognon (éd.). *Palaeoecology of Africa*. Balkema, Rotterdam, vol. 12, p. 293-253.
- SARTHEIN, M., G. TETZLAFF, B. KOOPMANN, K. WOLTER et U. PFLAUMANN, 1981. Glacial and interglacial wind régimes over the eastern subtropical Atlantic and north-west Africa. — *Nature*, 293, p. 193-196.
- SERVANT, M., 1983. Séquences continentales et variations climatiques; évolution du bassin du Tchad au Cénozoïque supérieur. —*Travaux et documents, ORSTOM, Paris*, vol. 159, 573 p.
- TALBOT, M. R., 1980. Environmental responses to climatic change in the West African Sahel over the past 20 000 years. —*in* M. A. J. Williams et H. Faure (éd.). *The Sahara and the Nile*. Balkema, Rotterdam, p. 37-62.