

MISE EN ÉVIDENCE DE MOUVEMENTS DE SABLE À PARTIR D'IMAGES SATELLITALES ; APPLICATION AU PIÉMONT SUD DE L'ATLAS SAHARIEN (ALGÉRIE)

ABDELLAOUI ABDELKADER¹, MARMI RAMDANE²

La zone d'étude se localise au piémont sud de l'Atlas saharien (Algérie) et concerne le site de la ville de Laghouat et ses environs limitrophes. Les principaux éléments orographiques sont représentés par Djebel Ahmar (883m) au Sud-Ouest, Djebel Oum Deloua (1023m) au Nord-Ouest, formant un synclinal perché, et un peu plus au Nord-Ouest le grand synclinal du Milok, de direction atlasique. Le principal cours d'eau qui traverse la zone Est Oued M'zi d'orientation Nord-Ouest-Sud-Est, empruntant par la suite une direction globale sous-latitudinale, à partir de l'extrémité Sud-Ouest du Djebel Oum Deloua. Son affluent le plus important est Oued Messaad, avec un écoulement Sud-Ouest-Nord-Est.

Cette zone comprend différentes formes et formations sableuses dont la disposition est tributaire des ensembles orographiques, de la topographie de détail et des directions du transport éolien.

La population de Laghouat, ville présaharienne, est passée d'environ 6000 habitants en 1830 à 42800 habitants en 1977 et à 119043 habitants en 2003, soit une variation de 178% (c'est-à-dire une multiplication par un facteur de 2,8 sur une période de 26 ans entre 1977 et 2003). L'extension du bâti, sous la pression des besoins croissants en logements, arrive à l'heure actuelle aux limites des massifs avoisinants (dépôts sableux sur les flancs) et des zones inondables. Le sable constitue ainsi un facteur de risque permanent de plus en plus ressenti pour la santé publique, la qualité de vie, mais également un danger pour les zones de mise en valeur agricole, notamment du Mekhareg à l'Est de Laghouat. Il devient alors pertinent de mettre au point un moyen de localisation et de surveillance de la dynamique des édifices de sable dans la région.

Les traitements conventionnels de l'image satellitale (compositions colorées, indices thématiques) ne permettent pas de différencier correctement le voile sableux du sol, de la roche mère en place ou des carrières de production d'agréats, ni à mettre en évidence facilement les champs de mini dunes. Nous avons alors développé un indice thématique spécifique **IBS** pour lever ces ambiguïtés, localiser la couverture sableuse et suivre son évolution. Cet indice utilise les canaux Bleu, Rouge et proche InfraRouge et fait apparaître « le voile sableux éolien » en blanc et les sables/graviers du lit de l'oued en gris, nuance attribuée à la profondeur de l'oued et du mélange sablo-limoneux. La composition d'images **IBS** obtenues à partir d'acquisitions de différentes dates permet par la suite de suivre la dynamique sableuse.

Mots-clés : Laghouat ; voile sableux ; image satellitale ; champ dunaire ; Algérie ; ETM.

Introduction

Notre étude, fondée sur le traitement et l'interprétation d'images satellitales, vise à localiser les zones d'accumulation sableuse et à suivre les mouvements de sables, notamment par le biais du voile sableux porteur d'informations sur cette dynamique. La zone de travail couvre une agglomération urbaine importante (plus de 100000 habitants), de petites localités périphériques en pleine extension, une zone d'activité industrielle, un aéroport, des zones de culture extensive, la route nationale 1 (principale voie d'accès reliant le Nord et le Sud du pays et se prolongeant par la route de l'unité africaine vers le Niger) et comporte deux petits champs de dunes, dont le plus important (Bled el Hirane), circonscrit par Oued M'Zi et Dj. Ahmar, se situe sur la bordure Nord-Ouest de la ville de Laghouat (chef lieu de département). Toutes ces infrastructures sont menacées, à plus ou moins terme et à des degrés variés, par le phénomène d'ensablement qui pourrait en entraver, ou tout au moins gêner, le développement ou le fonctionnement. Il devient alors pertinent de mettre au point un moyen de localisation et de surveillance de la dynamique des édifices de sable dans la région.

On associe souvent ensablement, désertification, dunes. De nombreux auteurs ont traité du processus de désertification, de l'ensablement des espaces steppiques et de la sécheresse dans les zones arides et semi arides. Ainsi, Marius C. (1995) traite du problème d'ensablement et ses impacts négatifs sur les mangroves du Sénégal ; Callot *et al.* (1996) analyse la géodynamique des sables éoliens dans le nord ouest saharien ; Taibi (1997) utilise des images Landsat MSS de 1977 et TM de 1989 ainsi que des images SAR-ERS de 92 et 93 pour réaliser un suivi diachronique de trois thèmes principaux : la végétation dense et steppique et les formations sableuses sur cinq sites du piémont sud de l'Atlas saharien. Plus récemment, Benmohammadi *et al.* (2000) ont analysé les interrelations anthropiques et naturelles et leurs impacts sur la recrudescence des phénomènes d'ensablement et de désertification au Sud-Est marocain ; Desjardins *et al.* (2005) ont mis en évidence l'avancée des dunes dans plusieurs zones du Sud-Est marocain en utilisant des images civiles et militaires haute résolution spatiale pour

¹ Université Paris Est Créteil Val-de-Marne, GEONAT EA415, Département de Géographie, abdellaouid@univ-paris12.fr

² Université de Constantine, Algérie, Laboratoire de Géologie et Environnement, marmi_ramdane@yahoo.fr

comprendre la progression des édifices dunaires sur une période de quatre années ; plus récemment, Bensaid A. (2006) a utilisé l'imagerie satellitale pour l'étude de l'ensablement dans la wilaya de Naâma (Algérie) en zone aride. Afin de séparer les zones couvertes par le sable (zones de transfert ou d'accumulation), nous avons testé plusieurs algorithmes classiques tels que l'indice de végétation ou l'indice de sol. Aucun de ces algorithmes ne nous a donné pleine satisfaction pour notre zone d'étude ; ce qui était attendu à cause de la proximité thématique des réponses spectrales des thèmes en présence et des objectifs que nous nous sommes fixés, à savoir : i) confirmer (ou infirmer) la direction dominante des vents (et donc du phénomène de transfert de sable) ; ii) délimiter les zones propices d'accumulation ; et iii) pronostiquer les zones à risque.

Nous sommes alors partis d'un indice de bâti élaboré par Abdellaoui *et al.* (1997) que nous avons modifié pour obtenir un indice de la forme suivante :

$$IVS = (b1 + u*b2 + v*b3) / (1 + b1)$$

Dans cette formule : b1, b2, b3 désignent respectivement les canaux Bleu, Rouge et proche IR ; pour TM et ETM⁺ (canaux 1, 3 et 5) nous avons fixé les constantes u et v à 1.5 et 2.5 respectivement. L'image obtenue a l'avantage de mettre en évidence très nettement 4 thèmes bien différenciés sur des gammes de gris séparées ; nous regroupons ces thèmes en deux catégories distinctes ; la première apparaissant sur des nuances sombres et la seconde en blanc avec des valeurs nettement séparées :

- Végétation en noir ; sable consolidé ou humide en gris foncé et bâti en gris plus clair ;
- Sable voile ou en mouvement en blanc très séparé du reste.

Cadre géographique

Le piémont sud de l'Atlas saharien, vaste plateau, constitue une zone de transition entre le domaine atlasique au nord, dont la limite sud est représentée par la flexure sud-atlasique (ou accident sud-atlasique) et la plate-forme saharienne au sud. La région d'étude appartient au domaine de l'Atlas saharien central (*fig. 1*) et intéresse plus particulièrement la ville de Laghouat et ses environs.

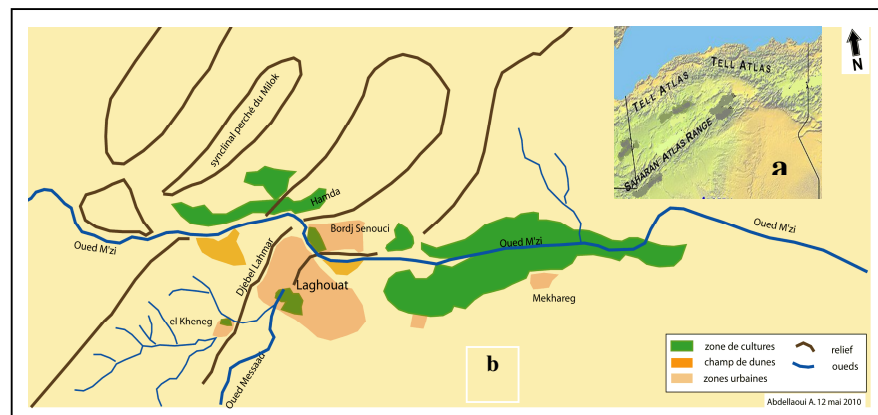


Fig. 1. a – Localisation de la région d'étude ; b – Eléments orographiques

Le relief est représenté par deux zones distinctes : (i) une zone relativement plane, les hamadas, se localise à l'Est de la ville et (ii) une zone montagneuse regroupant quelques djebels, d'orientation atlasique, dont le plus élevé est celui d'Oum Deloua (1023 m). Cette dernière s'étend globalement suivant la direction Sud-Ouest-Nord-Est et constitue en quelque sorte un rempart aux vents du Nord-Ouest qui sont prédominants. Les principaux éléments orographiques sont représentés par Djebel Ahmar (883 m) au Sud-Ouest, Djebel Oum Deloua (1023 m) disposé légèrement au Nord-Ouest et un peu plus au Nord-Ouest le grand synclinal perché du Milok, de direction atlasique (*fig. 1b*).

Orographie

La région d'étude qui comprend la ville de Laghouat et ses environs se localise sur une zone de contact large entre l'Atlas saharien et son piémont sud, en relation avec le dédoublement de l'accident sud-atlasique. Celle-ci se caractérise par un relief contrasté. D'après la carte topographique, le relief est relativement plat au Sud-Est et à l'Est de la ville où se développent des dépressions : Dayet, Sebkha et Chott. Par contre au Sud-Ouest, à l'Ouest et au Nord-Ouest de cette localité s'érigent des chaînons, plus ou moins étendus et étroits, avec une orientation globale Sud-Ouest-Nord-Est dont les altitudes peuvent dépasser les 1000 m. On distingue du Sud-Ouest vers le Nord-Est, et d'Est en Ouest, successivement les djebels Kheneg, Ahmar (883 m) et Dj. Dakhla, à l'Ouest s'observent les Dj. Oum Deloua (1023 m) et Melok.

L'ensemble de ces djebels constitue des obstacles topographiques au transit du matériel sableux, plus particulièrement pour les vents Nord-Ouest. Cependant des seuils (cluses, el kheneg signifiant passage étroit) sont des ouvertures de transit, entaillés dans ces chaînons. Les cluses, de Oued M'zi localisées à l'extrémité Nord-Est du Dj. Oum Deloua, au niveau de la zone de relais entre les djebels Ahmar et Dakhla et au sein du Dj. Kheneg, prolongement Sud-Ouest du Dj. Ahmar, forment des couloirs de passage, plus particulièrement pour la composante au sol du vent.

Aperçu sur le climat

Le piémont sud de l'Atlas saharien se caractérise par un climat aride où les précipitations moyennes annuelles oscillent entre 100 et 200 mm. Malheureusement nous ne disposons pas de données récentes, continues, concernant les précipitations pour suivre l'évolution temporelle de la pluviométrie. En se référant à la station pluviométrique de Laghouat, située à 767 m d'altitude, la moyenne calculée pour la période 1914-1968 est estimée à 170 mm/an. La température moyenne, toujours à la même station, est de 17,2°C/an (J. Dubief, 1963, et A. N. Taïbi, 1997).

La série 1878-1969 est marquée par trois principales périodes de sécheresse (une année est déclarée sèche si la moyenne est inférieure à 170 mm) : 1914-192, 1943-1948 et 1958-1961. Mais la plus longue et récente période sèche est celle de 1970-1986. Selon le climagramme pluvio-thermique du Quotient d'Emberger ($Q = 17$), Laghouat se localise à la limite du climat aride-saharien.

Le réseau hydrographique est représenté par de rares oueds pérennes qui prennent leur source dans l'Atlas saharien avec une activité importante. Dans notre zone d'étude, l'Oued M'zi, constitue le principal oued à écoulement pérenne (*fig. 1b*), en amont il suit la direction Nord-Ouest-Sud-Est. A la convergence des djebels Ahmar-Dakhla, ce qui correspond à sa confluence avec oued Messaad, d'orientation Sud-Ouest-Nord-Est, il emprunte la direction globale Est-Ouest. Il est long d'environ 450km, avec un bassin versant de 1927 km².

Les vents et déplacements de sable

La dynamique éolienne est un élément classiquement invoqué dans les études sur la désertification. Elle présente un facteur potentiel de perte de productivité lors de l'ensablement des zones de culture ou de déflation des sols notamment.

Nous rappelons quelques travaux d'auteurs qui ont traité du processus de désertification, de l'ensablement des espaces steppiques et de la sécheresse dans les zones arides et semi arides. Ainsi, Marius C. (1995) traite du problème d'ensablement et ses impacts négatifs sur les mangroves du Sénégal ; Callot et al. (1996) analyse la dynamique des sables éoliens dans le Nord-Ouest saharien. Plus récemment, Benmohammadi *et al.* (2000) ont analysé les interrelations anthropiques et naturelles et leurs impacts sur la recrudescence des phénomènes d'ensablement et de désertification au Sud-Est marocain. Desjardins *et al.* (2005) ont mis en évidence l'avancée des dunes dans plusieurs zones du Sud-Est marocain en utilisant des images civiles et militaires haute résolution spatiale pour comprendre la progression des édifices dunaires sur une période de quatre années. Bensaid A. (2006) a utilisé l'imagerie satellitale pour l'étude de l'ensablement dans la wilaya de Naâma (Algérie) en zone aride.

Dans le présent travail, nous nous intéressons essentiellement au dépôt du voile sableux (un des indicateurs du mouvement de sable).

Les vents à Laghouat

Les vents les plus fréquents au sol, d'après la station de Laghouat, soufflent essentiellement du Nord-Ouest (Seltzer, 1946, in Taïbi, 1997), globalement pour les 7h, 13h et 18h (représentant 30% de fréquence). Les autres directions des vents représentent respectivement : Nord (15%), Ouest (1%), Sud-Ouest (10%), Nord-Est (10%), Sud (3-8%), Sud-Est (5%) ; les fréquences inférieures à 3% ne sont pas prises en compte (fig. 2).

Directions	Fréquences
NW	30%
W	15%
N	15%
SW	10%
NE	10%
SE	5%
S	3-8%

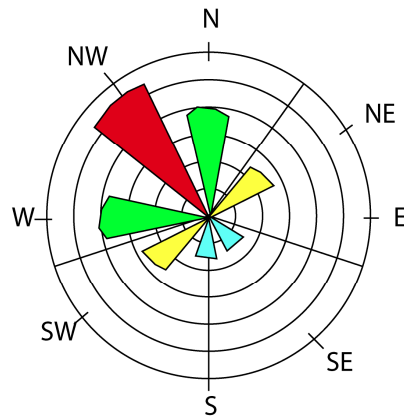


Fig. 2. Les fréquences des vents à Laghouat

Nous considérons l'horaire de 13h, l'heure où le vent est morphologiquement le plus actif et nous résumons, dans ce qui va suivre, les données anémométriques à partir des travaux de Dubief (1963). En analysant les fréquences annuelles des vents, nous remarquons que la période allant de novembre à mars se caractérise par les vents dominants Nord-Ouest. De juin à septembre, la direction Sud-Ouest apparaît nettement au dépend de la direction Nord-Ouest qui s'estampe à son tour. La direction Sud-Est joue probablement un rôle déterminant dans la mise en place des placages de bas de versants Est et Sud-Est des crêtes et de la grande dune. Il s'agit d'une direction préférentielle des vents de sable d'été (Sirocco) plus violents en général qu'en hiver. La période estivale favorise également la déflation des sédiments dans les oueds à sec.

Cependant la fréquence des vents au sol peut être perturbée par les reliefs qui s'organisent suivant la direction Sud-Ouest – Nord-Est. Par conséquent, les seuils que nous avons signalés antérieurement en orographie jouent un rôle prépondérant dans la circulation des vents.



Fig. 3. Accumulations de sables sur les flancs des djebels à l'Ouest de Laghouat

Le volume de sable déplacé par les vents Sud-Ouest et Sud-Est, à la station de Laghouat, est de $20,7 \text{ m}^3/\text{an}$ à travers une ligne de 1 m de long de 1931-194 (Dubief, 2001). La durée moyenne annuelle des vents de sable à Laghouat est de 37,1 heures (dans les 8 directions). La *fig. 3* illustre les dépôts de sable sur les flancs de djebels à l'ouest de Laghouat.

Le nouvel espace bâti est aux pieds des zones d'accumulation de sable sans ouvrage de protection (écran de végétation, par exemple). Les hamadas sont souvent couvertes d'une pellicule rousse de sable à forte teneur en quartz (66% en moyenne) pour la fraction grossière. L'analyse sur un échantillon de la fraction fine, réalisée par Coude-Goussen et Rognon (1995) lui fournit les minéraux suivants, en plus du quartz : illite (33%), palygorskite (20%), smectite (16%), Halite et gypse (teneur inférieure à 10% pour les deux derniers minéraux). D'après cette composition minéralogique, il conclut que la pellicule rousse dérive plus des roches tertiaires continentales que des formations alluviales des grands oueds. Vu le cortège minéral identifié dans la fraction fine de cette pellicule, nous favorisons plutôt une source nourricière se rapportant aux dayet, sebkhas ou chotts, situés au Sud et Sud-Est de Laghouat. La présence des minéraux : palygorskite, halite et gypse militent en faveur de sédiments de milieux salés (Marmi, 1995). La palygorskite est un argument qui corrobore notre hypothèse.

Morphologie des corps sableux

La disposition géométrique des corps sableux et des formations éoliennes renseignent sur la direction globale des vents et des mouvements de sable. Par exemple, les barkhanes sont indicatrices d'un vent monodirectionnel et progressent dans le sens de ce vent (Taïbi, 1997).

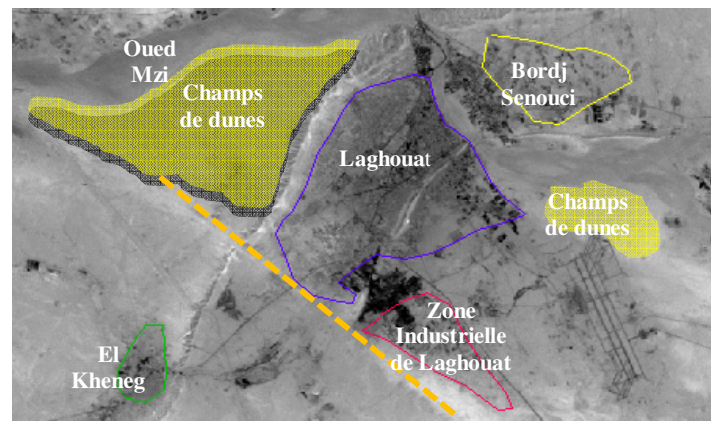


Fig. 4. Localisation des champs de dunes

Cet auteur note que la direction Nord-Ouest des vents est responsable de la mise en place du champ de dunes de Laghouat (*fig. 4*).

Les formations géologiques

Les formations géologiques dominantes dans la zone d'étude sont représentées par les dépôts continentaux du Tertiaires. Les séries anciennes affleurantes, du Secondaire, appartiennent au Kimméridgien à sédiments calcaro-gréseux et le Portlandien-Berriasien avec des barres calcaires basculées à la verticale. Les marnes, calcaires/dolomies albiennes s'observent au Dj. Kheneg et le Sénonien apparaît au Dj. Oum Deloua. Les corniches de calcaire massif du Turonien se distinguent nettement dans le relief. L'Eocène inférieur/moyen renferme des faciès argilo-sableux, incluant des niveaux gypseux et des lentilles de calcaires lacustres. Il repose en discordance sur la série crétacée. L'Eocène sup-Oligocène est constitué de grès grossiers. Les formations argilo-sableuses du Mio-Pliocène, sont très remarquables par leur couleur rouge. Le Quaternaire renferme : des dépôts de pente, des glacis emboîtés, des terrasses alluviales et des croûtes calcaires.

Population et développement urbain

La population de Laghouat est passée de 42800 habitants en 1977 à 119043 habitants en 2003 (estimation) soit une variation de 178% (c'est-à-dire une multiplication par un facteur de 2,8) en 26 ans induisant des besoins de plus en plus importants en consommations de toutes natures et une mutation profonde de l'espace (*fig. 5*).

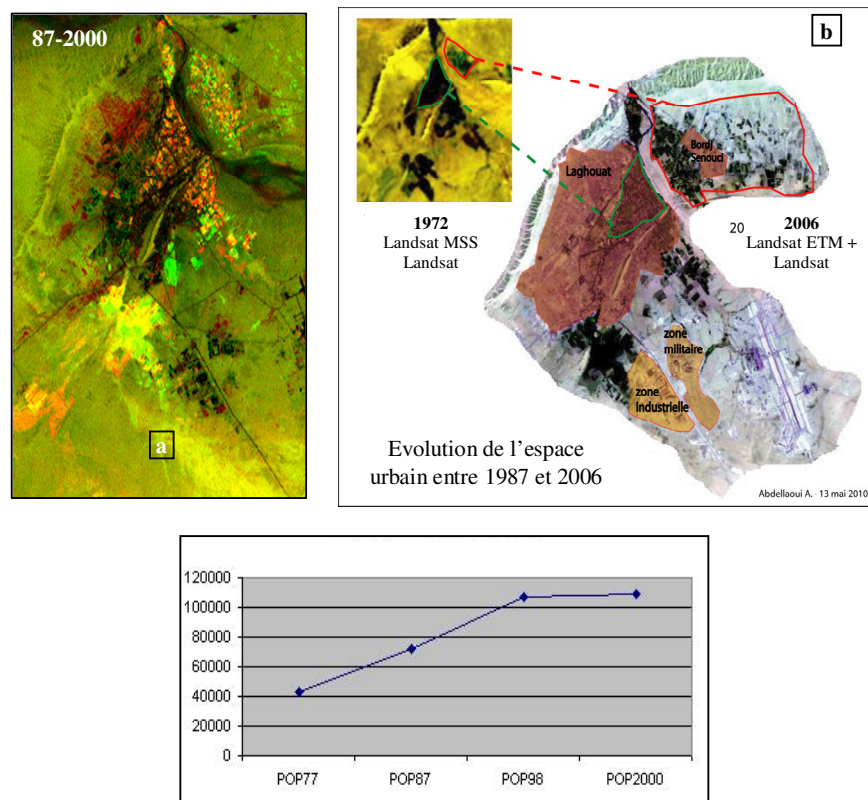


Fig. 5. Évolution de la population et de l'espace urbain. Sur l'image (a), l'extension urbaine entre 1987 et 2000 est représentée en rouge ; on notera : l'extension significative à l'Ouest

et les nouvelles constructions à l'intérieur des zones de végétation

L'extension du bâti, sous la pression des besoins croissants en logements, arrive à l'heure actuelle au bas des versants des djebels (*fig. 3 et 5*). Le sable constitue ainsi un facteur de risque permanent de plus en plus ressenti aussi bien pour la santé publique, la qualité de vie, mais également un danger pour les zones de mise en valeur agricole, notamment du Mekhareg à l'Est de Laghouat. Il devient alors pertinent de mettre au point un moyen de localisation et de surveillance de la dynamique des édifices de sable dans la zone.

L'ensablement constitue l'une des manifestations les plus spectaculaires de la désertification. Mais les matières solides en suspension dans l'air constituent une autre source de danger pour la santé publique. Par jour de vent de sable en milieu saharien, l'atmosphère est si chargée de matière solide que l'on se croirait au crépuscule.

L'indice du voile sableux

Pour le présent travail nous avons utilisé plusieurs images satellitaires à différentes résolutions spatiales : une image Landsat MSS d'avril 1972 à 80 mètres de résolution et plusieurs images Landsat TM à 30 mètres de 1987, 2000 et 2006. Nous souhaitons répondre à trois questions particulières conduisant à préciser: i) la localisation des formations sableuses ; ii) la pérennité des directions dominantes des transports éoliens et iii) l'activité du phénomène de transport de matériaux solides. Pour ces trois questions, nous nous appuyons sur la présence du voile sableux.

Les traitements conventionnels de l'image satellitaire (compositions colorées, indices thématiques) ne permettent pas de différencier correctement le voile sableux du sol, de la roche mère en place ou des carrières de production d'agrégats, ni à mettre en évidence facilement les champs de mini dunes. Nous avons alors développé un indice thématique spécifique *IVS* pour lever ces ambiguïtés et localiser la couverture sableuse. Cet indice utilise les canaux Bleu, Rouge et proche InfraRouge et fait apparaître « le voile sableux éolien » en blanc et les sables/graviers du lit de l'oued en gris, nuance attribuée à la profondeur de l'oued et du mélange sablo-limoneux (*fig. 6*).

$$IVS = (tm1 + a*tm3 + b*tm5) / (1 + tm1)$$

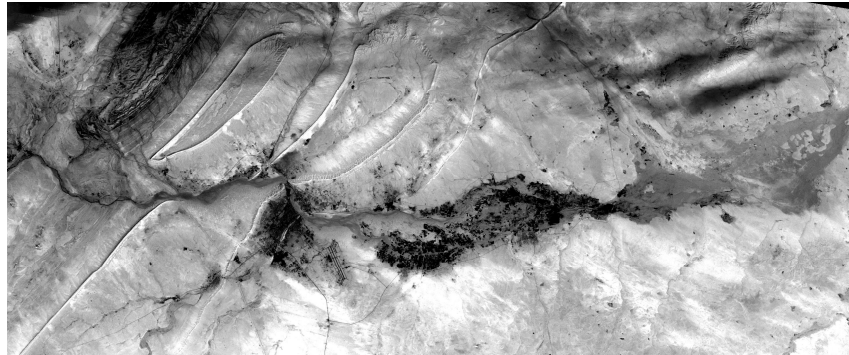


Fig. 6. Indice du voile sableux sur image Landsat ETM+ du 7 avril 2006

Cet indice a été validé sur plusieurs images de résolution et de dates d'acquisition différentes. Le voile sableux y apparaît toujours avec des valeurs très fortes, affichées en blanc ; l'indice est donc stable aux niveaux des types d'images (Landsat, Aster) et de la date d'acquisition. Nous l'avons également appliqué à des scènes Landsat entières pour tester la variabilité spatiale et le temps de calculs ; sur ces deux niveaux, nous obtenons des résultats tout à fait corrects. La *fig. 7* montre le résultat du traitement de la scène Landsat ETM + 195-037 du 7 avril 2006.

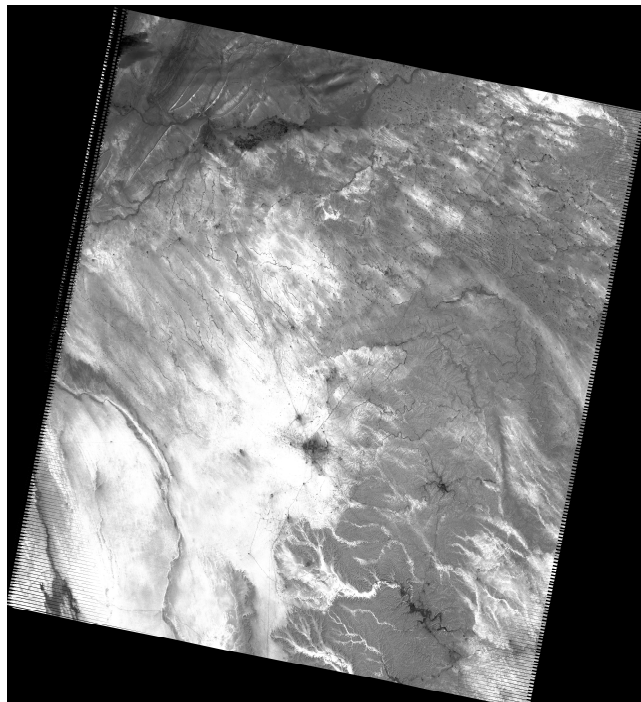


Fig. 7. IVS appliquée à une scène entière ETM + du 7 avril 2006

Nous devons également signaler une différence importante par rapport aux indices conventionnels (NDVI, par exemple) dont le résultat est toujours un nouveau canal dont les pixels prennent des valeurs obtenues calculées au moyen d'une fonction dont les opérandes sont les canaux origines à combiner. L'indice *IVS*, au contraire, a pour effet d'accentuer les valeurs des pixels considérés « voile sableux » et d'atténuer les valeurs des autres pixels sans les éliminer. On garde ainsi une vision du paysage et un « repérage » géographique sur l'image.

Les principaux resultats

Analyse de l'image du 7 avril 2006

L'application de l'indice du voile sableux à l'image du 7 avril 2006 (*fig. 8*) permet d'aboutir aux résultats suivants :

- La présence de la flèche sableuse signalée par Taibi (1997) ;
- La route nationale 1 et la route de l'aéroport sont couvertes par endroits ; si nous nous reportons à la figure 8 (scène entière), nous remarquons que la RN1 est couverte sur un grand tronçon en direction de Ghardaïa ;
- La grande zone d'activité agricole est largement menacée par le Sud-Sud-Est ;
- La direction Nord-Ouest-Sud-Est des vents dominants et donc des transports éoliens (voile sableux indicateur du mouvement de sable) semble se confirmer par la morphologie des surfaces couvertes par le voile sableux.

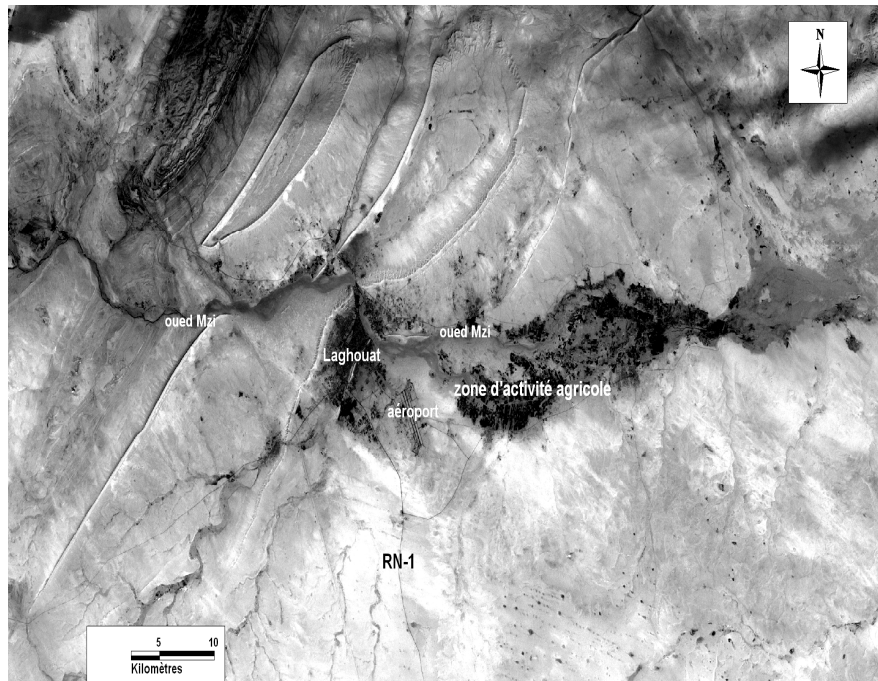


Fig. 8. Le voile sableux sur la zone de Laghouat, le 7 avril 2006

Dynamique de la couverture sableuse

Pour observer la dynamique de la couverture sableuse sur le paysage, nous avons combiné les images « Indice du Voile Sableux » du 11 avril 1987 et du 6 avril 2000 ; pour cette combinaison, nous avons affecté le rouge à l'image de 2000 et le vert à l'image de 1987 ; le bleu a été affecté à une valeur fictive 0. La fig. 9 montre ce résultat et permet de faire les observations suivantes :

- Stabilité relative de la flèche sableuse confirmée également par l'image de 2006 ;
- Présence d'une surface de voile sableux plus importante en 2000 au Sud-Est de la zone d'activité agricole ; par contre, le voile sableux au Nord-Ouest de cette zone semble avoir disparu ; ceci peut s'expliquer par un développement plus important de l'activité agricole et la formation d'écran empêchant le voile sableux de passer vers le Nord-Ouest ;

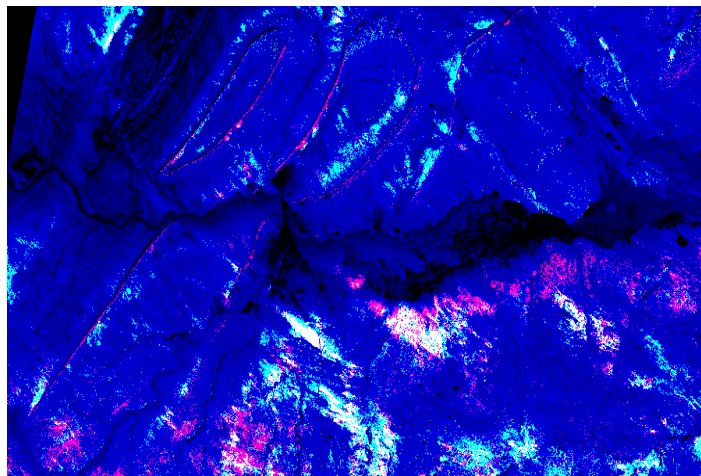
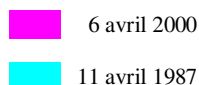


Fig. 9. Combinaison des indices de 1987 et 2000



- Apparition d'une surface de dépôt de voile sableux entre la zone d'activité agricole et l'aéroport sur l'image de 2000 (qui n'existait pas en 1987 et qui pourrait contribuer à la dynamique du mini champ de dunes au Sud-Est de l'Oued Mzi) ; ce phénomène est également présent sur l'image de 2006.

Conclusion

Les mouvements de sable sont tributaires des différentes directions des vents cependant les accumulations aux alentours de l'agglomération de Laghouat semblent être privilégiés par la direction Sud-Ouest. Les résultats que nous avons obtenus mettent en évidence un mouvement dont la source nourricière des apports serait localisée au Sud-Est de la ville. La zone productrice correspond aux surfaces occupées généralement par les sebkha, daya et hamada qui se localisent au SE car la composition minérale corrobore cette conception.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ABDELLAOUI, A., ROUGAB, A. (1997), „Caractérisation du bâti en zone de transition montagne-plaine : cas de l'agglomération blidéenne (Algérie)”, *Téledétection des milieux urbains et périurbains*, AUPELF/UREF Ed., pp 75-83.
- ABDELLAOUI, A. (2009), „Potentialité de l'imagerie satellitale moyenne résolution pour le suivi du transport de sable en milieu urbain pré-saharien”, *Séminaire International : „Dynamiques des paysages et Téledétection”*, Tunis, 9-13 juin 2009.
- BENMOHAMMADI, A., BENMOHAMMADI, L., BALLAIS, J.-L., RISER, J. (2000), *Analyse des interrelations anthropiques et naturelles : leur impact sur la recrudescence des phénomènes d'ensablement et de désertification au sud est du Maroc (vallée du Drâa et vallée de Ziz)*, Sécheresse, Paris, vol. 11, no 4, pp. 297-308.
- BENSAID, A. (2006), „Sig et téledétection pour l'étude de l'ensablement dans une zone aride : le cas de Naâma (Algérie)”, *Thèse de Doctorat* soutenue à l'Université J. Fourier de Grenoble, mai 2006.
- COUDE-GOUSSEN, G., ROGNON, P. (1995), *Désertification et aménagement au Maghreb*, Paris, Edition l'Harmattan, 313 p.
- DESJARDINS, R., ROGON, P., BENALLA, M., ALEM, E. (2005), *Progrès importants des études sur l'évolution des dunes grâce à l'utilisation combinée des satellites civils et militaires : l'exemple du Tafilelt (Maroc)*, Sécheresse, Paris, vol. 16, no 3, pp. 153-164.
- DUBIEF, J. (1963), „Le climat du Sahara”, t. II, fascicule I, *Mémoire* (hors série), Université d'Alger, Institut de recherche saharienne, 267 p.
- DUBIEF, J. (2001), *Données météorologiques du Nord de l'Afrique à l'équateur*, Paris, Edition Karthala, 274 p.
- MARIUS, C. (1995), *Effets de la sécheresse sur l'évolution des mangroves du Sénégal et de la Gambie*, Sécheresse, Paris, vol. 6, no 3, pp. 123-125.
- MARMI, R. (1995), „Les bassins continentaux du sud constantinois (Algérie nord-orientale) : études stratigraphique, structurale, sédimentaire et géochimique”, *Thèse de Doctorat* de l'Université Henri Poincaré, Nancy I, France, 253 p.
- TAIBI, A. N. (1997), „Le piémont sud du Djebel Amour (Atlas saharien, Algérie), apport de la téledétection satellitaire à l'étude d'un milieu en dégradation”, *Thèse de Doctorat*, Université de Paris VI, 310 p.