

SUIVI DE L'ACTIVITÉ DES DUNES AU NIGER AU MOYEN DE LA COHÉRENCE INTERFÉROMÉTRIQUE ERS 1/2

Catherine Bodart ^{1*}, André Ozer ², Dominique Derauw ³

(1) Joint Research Centre of the European Commission, TP 440, I-21027 Ispra (VA), Italie

(2) Laboratoire de Géomorphologie et Télédétection, Université de Liège, Allée du 6 Août, 2, B4000, Liège, Belgique

(3) Centre Spatial de Liège (CSL), Avenue du Pré Aily, B4031 Angleur, Belgique

*Auteur correspondant. E-mail: catherine.bodart@jrc.ec.europa.eu

Résumé

Le sud-est nigérien est menacé par la réactivation de dunes anciennes autrefois fixées par la végétation. Cette remise en mouvement des sables est expliquée par la raréfaction de la couverture végétale des sols suite aux effets conjugués des sécheresses et des actions anthropiques. L'information de cohérence interférométrique SAR (Synthetic Aperture Radar) offre une mesure originale et unique de la dynamique et des changements de surface qui ont lieu entre deux acquisitions SAR. La mission ERS 1/2 tandem permet l'acquisition de paires à seulement 24 heures d'intervalle. Grâce à cette base temporelle exceptionnelle, les images de cohérence tandem combinées avec les images d'amplitude ont permis de détecter les zones de sable actives sur 24 heures ainsi que les zones de végétation oasienne et certains chemins et villages. Sept couples d'images ERS 1/2 ont été acquis avec 1 jour d'intervalle, tous en saison sèche, sur la zone d'étude : deux sur la région de Gouré en décembre 1995 et avril 1996, deux à Goudoumaria en avril 1996 et novembre 1998 et trois à Maïné-Soroa en décembre 1995, avril 1996 et février 1999. Sur chacune de ces zones, l'analyse temporelle de la cohérence tandem a pu mettre en évidence l'extension des zones sableuses actives au cours du temps et la migration de dunes. La cohérence tandem semble donc un très bon outil pour la cartographie de l'activité dunaire, ainsi que pour le suivi des mouvements de dunes et l'ensablement.

Mots-clés

Interférométrie radar, images ERS 1/2, migration de dunes, Niger

Abstract

SE Niger is threatened by the reactivation of dunes formerly fixed by vegetation. The sand remobilization results from a decreased soil cover by the vegetation following repeated droughts and human interventions. The SAR (Synthetic Aperture Radar) interferometric coherence provides a unique measure of the surface changes and dynamics between two SAR acquisitions. The 1/2 tandem ERS mission allows a pair of images to be obtained at only 24 hours interval, so that the combination of tandem coherence and amplitude images enables the detection of active sand areas, oasis vegetation, and even villages and some cattle tracks. Seven pairs of ERS 1/2 images at one day interval during the dry season have been processed: two in the Gouré area in December 1995 and April 1996, two at Goudoumaria in April 1996 and November 1998, and three at Maïné-Soroa in December 1995, April 1996 and February 1999. The temporal analysis of the tandem coherence identified the active sand areas and migrating dunes in all sub-areas. The SAR tandem coherence thus proves to be an effective tool for mapping the dune activity and for monitoring the sand displacements.

Keywords

Radar interferometry, ERS 1/2 images, dune migration, Niger

1. INTRODUCTION

La désertification menace de vastes territoires sur tous les continents. La convention des Nations Unies sur la lutte contre la désertification (UNCCD) définit cette dernière comme le phénomène de «dégradation des terres dans les zones arides, semi-arides et subhumides sèches, par suite de divers facteurs, parmi lesquels les variations climatiques et les activités humaines». En Afrique de l'Ouest, la désertification est un problème de grande ampleur qui engendre une situation

d'extrême sécheresse édaphique et de pauvreté. A la fin des années 1960, à l'instar de l'ensemble du Sahel, le Niger a été affecté par une terrible sécheresse. Durant les années 1970 et 1980, cette détérioration climatique, accompagnée de la pression de l'homme, a généré de sérieux changements environnementaux et notamment la réactivation d'anciennes dunes autrefois fixées par la végétation (Ozer 2000; Bodart 2004). Actuellement, aux limites du Sahara, de nombreuses dunes menacent l'existence de terres de culture, d'infrastructures, de routes et de points d'eau. Pour lutter efficacement

contre l'ensablement et assurer la réussite et la durabilité des projets pour le développement du pays, une bonne compréhension des mécanismes à travers une approche intégrée incluant la cartographie et le suivi des zones sensibles est nécessaire.

L'imagerie radar et l'interférométrie radar ont prouvé leur utilité dans de nombreux domaines d'observation de la terre en région sahélienne (Kwarteng *et al.* 2000; Liu *et al.* 2001; Bodart *et al.* 2005; Blumberg 2006; Bodart et Ozer 2007). L'objectif de ce travail est d'évaluer le potentiel d'utilisation de l'interférométrie SAR dans l'étude des processus éoliens actuellement actifs dans le sud-est du Niger. Nous montrerons comment l'image de cohérence interférométrique à un jour d'intervalle peut être utilisée pour détecter et cartographier les zones de sable en mouvement. Nous envisagerons

une technique de suivi des zones sableuses actives et de détection du changement au moyen d'images de cohérence tandem multi-temporelles.

2. ZONE D'ÉTUDE ET PROBLÉMATIQUE

2.1. Zone d'étude

La zone d'étude correspond à l'ensemble des cuvettes oasiennes du sud-est nigérien. Elle se situe dans la région du Manga au nord-ouest du bassin du Lac Tchad. La zone s'étend approximativement entre 13° et 14° de latitude nord et 10° et 13° de longitude est. Elle couvre une partie des régions de Zinder et Diffa et plus particulièrement les départements de Gouré, Maïné-Soroa et Diffa. La figure 1 situe la zone d'étude sur deux images Landsat ETM+ acquises en novembre 2000.

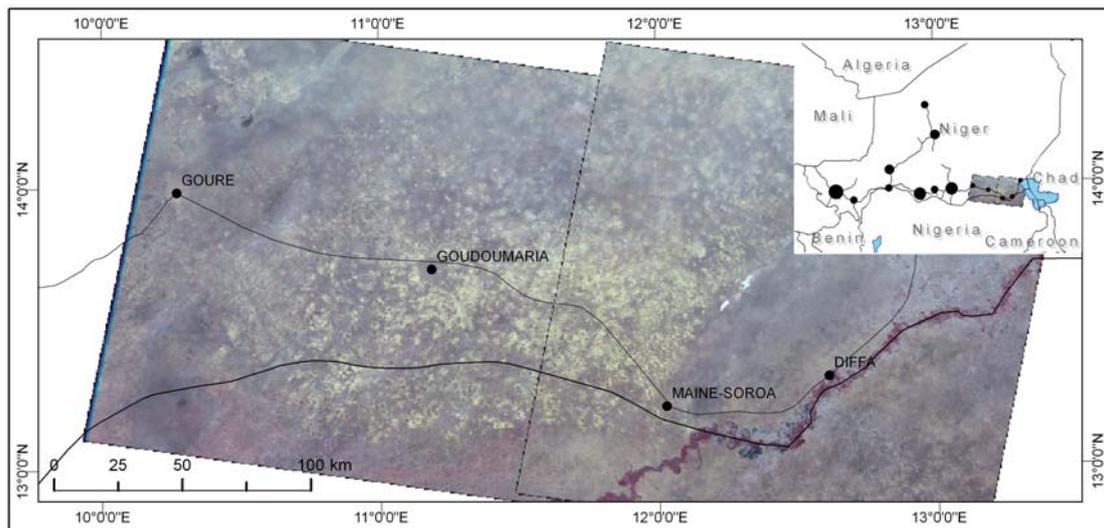


Figure 1. Localisation de la zone d'étude (images Landsat 7 ETM+ du 11 et 17 novembre 2000, fausse couleur infrarouge bandes 432 en RGB).

La zone du Manga correspond à un vaste plateau sableux dont l'altitude varie de 300 à 400 mètres. Ses parties hautes sont les sommets d'anciennes dunes transversales. Ce plateau est constellé de petites dépressions assez profondes et plus ou moins circulaires – les cuvettes – et de bas-fonds allongés. Ces dépressions auraient pour origine le réseau d'écoulement des nombreux cours d'eau temporaires qui devaient fonctionner il y a 30 000 à 40 000 ans BP (période pluviale responsable de l'extension du lac Tchad) et entre 9 500 et 6 500 ans BP (maximum pluvial dénommé le Ni-géro-Tchadien) (Jahiel 1998; Sabljak 1998). Sur le plan climatique cette région se caractérise par un climat de type sahélien *sensu stricto* avec une pluviosité annuelle comprise entre 200 et 400 mm. Le climat est marqué par une longue saison sèche (9 à 10 mois/an), suivie d'une saison des pluies aux précipitations courtes et violentes essentiellement durant les mois de juillet et août. Le système agricole actuellement en place combine agriculture pluviale (mil, sorgho, niébé), très sen-

sible aux fluctuations de la pluviométrie, et agriculture de cuvette où l'on peut produire, grâce à la présence d'une nappe peu profonde, voire affleurante en son centre, divers produits agricoles. Ce sont des cultures irriguées de contre-saison ou cultures de diversification comme la tomate, l'oignon, la patate douce, le poivron ou encore le blé, le manioc, la canne à sucre, les dattes. Ces produits maraîchers constituent une source importante de revenus durant la période de soudure (période entre deux récoltes où la nourriture et l'eau viennent à manquer).

A l'instar des autres pays du Sahel, le Niger a été durement frappé par la crise climatique qui a débuté à la fin des années 1960. A partir des données pluviométriques quotidiennes entre 1936 et 2003 de la station de Gouré, Ozer *et al.* (2005) ont mis en évidence trois périodes d'anomalies pluviométriques par l'application du test non-paramétrique de Pettitt (fig. 2). Ces travaux révèlent, entre autres, que la «grande sécheresse» qui a débuté à la fin des années 1960 a pris fin à la fin des an-

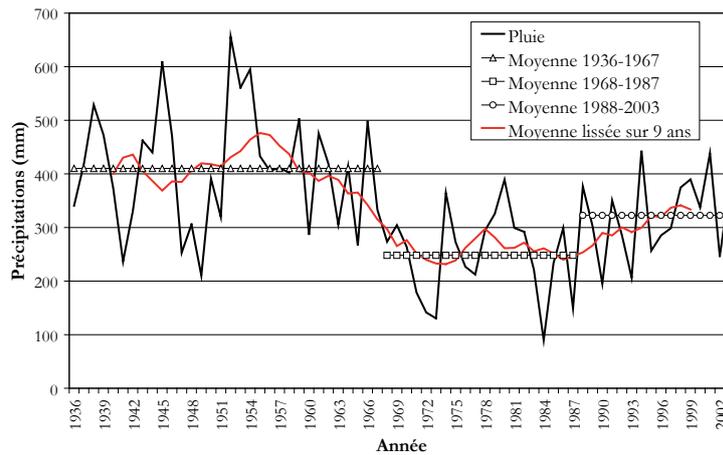


Figure 2. Précipitations annuelles et moyenne des sous-séries pluviométriques au cours des trois périodes «humide», de «sécheresse» et «actuelle». (Ozer *et al.* 2005).

nées 1980. Cependant, ce retour à des conditions plus humides ne se serait pas accompagné d'une amélioration significative de la longueur de la saison des pluies. De plus, de récentes études sur cette région (Karimoune 1994; Jahiel 1998; Ozer 2000; Bodart 2004) montrent que le retour à des conditions pluviométriques plus normales ne s'est pas accompagné d'une amélioration générale des conditions environnementales. La pression anthropique croissante semble être actuellement le principal facteur de dégradation de terres fragilisées par les sécheresses récurrentes.

2.2. La remise en mouvement du sable dunaire – indicateur de désertification

Le sud-est nigérien est caractérisé par la présence de dunes anciennes mises en place durant les phases arides du Quaternaire supérieur (époque ogolienne - 20 000 à 12 500 BP) (Rognon 1991). Ces dunes pléistocènes sont fixées par la végétation depuis l'Holocène. La limite naturelle entre les dunes vives et les dunes fixes correspond approximativement à l'isohyète de 150 mm (Grove 1958; Mainguet *et al.* 1979; Petit-Maire 1992). Mais depuis les années 1980, il apparaît que nombre de ces dunes autrefois fixées par la végétation sont actuellement réactivées. Cette remise en mouvement des sables dunaires est expliquée par la baisse de la couverture végétale des sols suite aux effets conjugués des sécheresses et des actions anthropiques (déboisement, surpâturage, augmentation des surfaces cultivées). Dans les régions des cuvettes de Gouré et Maïné-Soroa, elle est à l'origine de l'ensablement d'infrastructures, de routes et de très nombreuses cuvettes, sources d'eau et de production agricole dans ces régions à potentialités très réduites. Ces processus entraînent donc une profonde modification de l'économie agropastorale dans le sud-est du Niger.

Par conséquent, dans cette région du Sahel, malgré la reprise de la pluviométrie, les processus de désertifi-

cation se manifestent plus que jamais par la remise en mouvement massive des dunes qui la composent.

3. INTERFÉROMÉTRIE RADAR

L'image radar SAR (Synthetic Aperture Radar) est une image radar à haute résolution obtenue au moyen d'un radar à ouverture de synthèse. Le SAR est un système actif imageur; la même antenne sert alternativement à l'émission et à la réception de micro-ondes.

L'image radar SAR en mode SLC (Single Look Complex) est une image complexe avec une information d'amplitude et une information de phase du signal rétrodiffusé. L'amplitude dépend de la réflectivité et de la géométrie de la surface, elle dépend donc de la rugosité mais aussi de la nature physico-chimique des cibles qui composent le pixel au sol. La phase contient deux termes: l'un est relatif au chemin optique parcouru par l'onde radar entre le capteur et la cible, c'est la phase de transport du signal. L'autre concerne la rétrodiffusion: c'est la phase de reconstruction résultant des réponses de chacun des diffuseurs au sein du pixel considéré.

La phasimétrie SAR regroupe toutes les techniques de mesure basées sur l'information de la phase du signal radar dans les images SAR. L'interférométrie SAR constitue une technique relativement récente de génération de Modèles Numériques de Terrain (premières applications au début des années '70 (Graham, 1974)). Elle consiste à mesurer des différences relatives de chemin optique entre deux fronts d'onde, afin d'obtenir l'altitude de la zone considérée. Pour ce faire, l'interférométrie réunit les signaux rétrodiffusés d'une même zone prise selon deux points de vue légèrement différents et en analyse les corrélations complexes. Pour acquérir ces images, deux approches sont possibles:

- Acquisition des images simultanément par deux antennes séparées spatialement observant la scène sous deux angles proches (interférométrie SAR aéroportée ou spatioportée, telle la mission SRTM).

- Acquisition des images par une seule antenne qui effectue deux passages assez proches au-dessus de la même scène (interférométrie SAR spatioportée); les images ne sont donc plus simultanées mais consécutives.

C'est de la dernière approche dont il s'agit quand on utilise les images ASAR de Envisat à 35 jours d'intervalle ainsi que les paires tandem fournies par les satellites ERS-1 et ERS-2 prises à 24 heures d'intervalle. En effet, le satellite ERS-1 mis en orbite en juillet 1991 ne devait fonctionner que quatre ans jusqu'à la mise en orbite du satellite ERS-2 en avril 1995. Cependant, la longévité exceptionnelle de ERS-1 a permis l'exploitation en tandem des deux satellites, évoluant l'un derrière l'autre sur la même orbite à un jour d'intervalle. Le satellite ERS 1 a été mis en veille en juin 1996; il a pu ensuite être réactivé mensuellement jusqu'à son arrêt définitif en mars 2000. Quant au satellite ERS-2, il a été mis en veille en janvier 2001 et connaît des défaillances depuis juin 2003.

La distance séparant les deux antennes dans le plan perpendiculaire à l'orbite est appelée « base interférométrique » et sa projection perpendiculaire suivant la portée est la base perpendiculaire (fig. 3). La base temporelle est l'intervalle de temps séparant les deux acquisitions.

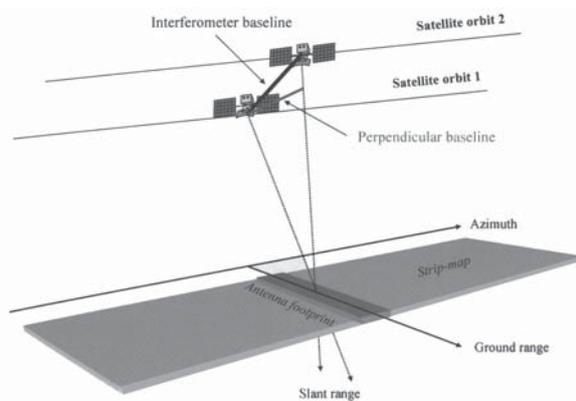


Figure 3. Géométrie de prise de vue d'une paire interférométrique (ESA 2007).

3.1. L'image de cohérence

La cohérence est déterminée par la différence entre les phases de reconstruction d'une image à l'autre, elle-même générée par une différence de la distribution relative des cibles élémentaires ou un changement des propriétés diélectriques au sein d'un pixel. Les pertes de cohérence déterminent la variance du signal de phase. La décorrélation peut être utilisée pour estimer le bruit qui contamine la phase interférométrique et donc la déviation standard des valeurs du MNT (Derauw 1999; Abdelfattah et Nicolas 2004). Mais la cohérence est aussi une source d'information précieuse et unique qui nous renseigne sur les processus de surface et de volume apparaissant entre les deux passages du

satellite et affectant la stabilité de la scène à l'échelle de la longueur d'onde. Elle peut être utilisée comme pseudo-canal lors de classifications ou comme indice de détection du changement. Divers travaux ont utilisé la cohérence à partir d'images ERS 1/2 pour détecter et classifier la végétation ou le changement d'humidité (Blaes et Defourny 2003; Santoro *et al.* 2007). D'autres auteurs ont également testé l'utilisation de la cohérence interférométrique pour la cartographie de zones sableuses (Kwarteng *et al.* 2000; Liu *et al.* 2001; Bodart *et al.* 2005).

L'information de cohérence entre deux paires qui ont différentes bases temporelles permet aussi de détecter des occupations du sol différentes. Par exemple, des zones de végétation éparses ainsi que des champs cultivés montrent généralement une forte cohérence à 1 jour d'intervalle et une cohérence beaucoup plus faible après 35 jours.

Les valeurs de la cohérence varient entre 0 et 1. Lorsque la cohérence est égale à 1, les signaux sont parfaitement cohérents (absence complète de bruit, les cibles élémentaires à l'intérieur d'un pixel contribuent de la même façon dans chacune des deux images). Par contre, lorsqu'elle est nulle, les signaux sont complètement décorrélés, il n'y a pas d'interférence (la phase interférométrique est totalement bruitée).

La position relative des cibles au sein du pixel peut être altérée par différents facteurs qui sont autant de sources possibles de décorrélation. En généralisant, la cohérence peut s'exprimer par le produit de ces différentes sources (Zebker et Villasenor 1992).

$$\gamma_{\text{totale}} = \gamma_{\text{spatiale}} \times \gamma_{\text{temporelle}} \times \gamma_{\text{thermique}} \quad (1)$$

On distingue ainsi la décorrélation temporelle $\gamma_{\text{temporelle}}$ qui est celle due aux changements réels des cibles, des autres changements induits par le senseur et sa géométrie tels que la décorrélation spatiale γ_{spatiale} (voir ci-dessous) et le bruit thermique $\gamma_{\text{thermique}}$ qui est dû aux caractéristiques du système.

La décorrélation spatiale ou géométrique est induite par la géométrie de prise de vue et par le changement d'angle d'incidence entre les deux prises de vue. Ce changement d'angle d'incidence induit un changement des positions relatives des diffuseurs au sein d'un même pixel. Même en l'absence de tout autre changement, les diffuseurs ne donnent donc pas identiquement la même réponse de phase entre l'une et l'autre acquisition. Il y a donc perte de cohérence. Pour un sol plan, cette décorrélation peut ainsi être exprimée en termes de base perpendiculaire. Comme l'indique la formule suivante, plus la base est importante, plus la cohérence diminue (Zebker et Villasenor 1992).

$$\gamma_{\text{spatiale}} = 1 - \frac{2|B|R_y \cos^2\theta}{\lambda r} \quad (2)$$

où R_y est la résolution au sol dans la direction de la portée, θ l'angle de vue au centre de la bande balayée, r la distance du senseur au centre d'un pixel et λ la longueur d'onde du radar. Il existe, ainsi, une base in-

terférométrique critique au-dessus de laquelle la phase interférométrique est totalement bruitée et inutilisable (cohérence nulle).

$$B_c = \frac{\lambda r}{2R_y \cos^2 \theta} \quad (3)$$

La base critique pour les satellites ERS 1/2 est de l'ordre du kilomètre sur terrain plat ($r=780$ km, $\theta=23^\circ$, $R_y=25$ m, $\lambda=5,6$ cm). Etant donné cette base critique et pour une base perpendiculaire donnée inférieure à cette base critique, on peut en déduire la cohérence théorique simplifiée:

$$\gamma_{\text{spatiale}} = \begin{cases} \frac{B_c - B}{B_c} & \text{si } B \leq B_c \\ 0 & \text{si } B > B_c \end{cases} \quad (4)$$

La décorrélation temporelle est celle que l'on cherche à mettre en évidence. Elle est source d'information sur les caractéristiques physiques de la surface qui ont changé entre les deux observations mais ne nous donne aucune information directe sur la nature de ces changements. Il peut s'agir d'un changement d'humidité du sol ou du couvert végétal, un changement de la rugosité de la

surface comme la chute des feuilles des arbres, la croissance des végétaux, le souffle du vent dans les feuilles ou sur l'eau, une pluie ou une chute de neige... En bref, tout changement à l'échelle de la longueur d'onde pouvant entraîner des variations des positions relatives des diffuseurs au sein du pixel ou un changement des caractéristiques électriques. La mise en mouvement du sable pourrait donc être un de ces paramètres physiques responsables de la perte de cohérence entre deux images. Seules des zones rocheuses ou urbanisées sans végétation conservent leur stabilité même sur plusieurs années (cohérence élevée). Par contre, des forêts ou des plans d'eau montrent souvent une très faible cohérence même à un jour d'intervalle.

3.2. Choix des données et traitements

La zone d'étude est couverte par trois pistes ou *tracks* différents (pistes 451, 179 et 408) ; trois images ERS 1/2 ou Envisat ASAR sont donc nécessaires pour couvrir l'ensemble de notre zone d'étude (fig. 4).

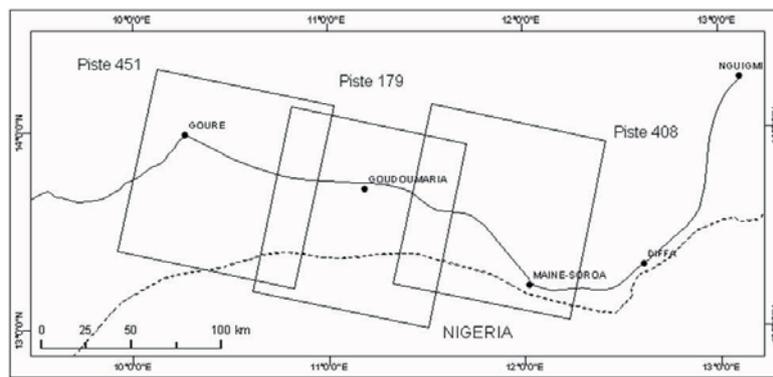


Figure 4. Pistes couvrant la zone d'étude.

3.2.1. Choix des données

Dans un premier temps, nous avons sélectionné l'ensemble des images SLC (Single Look Complex) acquises par les satellites ERS 1/2 sur chacune des pistes, soit vingt-trois images au total (toutes acquises en orbite descendante). Ensuite, pour chaque couple d'images possible, nous avons estimé la base interférométrique afin d'identifier les couples utiles pour le traitement. Tout couple d'images dont la base spatiale est supérieure à 500 mètres a été exclu étant donné une trop forte diminution de la cohérence lorsque la base se rapproche de cette valeur (diminution de presque 50 %). Plus de la moitié des couples ont ainsi été écartés.

Sept couples d'images ERS 1/2 ont été acquis avec 1 jour d'intervalle, tous en saison sèche, deux sur la région de Gouré (piste 451) en décembre 1995 (7-8) et avril 1996 (25-26), deux à Goudoumaria (piste 179) en avril 1996 (6-7) et novembre 1998 (7-8) et trois à Maïné-Soroa (piste 408) en décembre 1995 (4-5), avril 1996 (22-23) et février 1999 (1-2).

Par conséquent, seule une date d'acquisition (avril 1996) est commune aux trois pistes. Pour faciliter l'écriture, nous appelons les images de cohérence pour une date et une piste déterminées « coh », par exemple « coh96 » pour la piste 451 correspond à l'image de cohérence réalisée à partir de la paire tandem du 25 et 26 avril 1996. De même, pour les images en module, « mod96₁ » pour la piste 451 correspondra à l'image en module de la première image composant la paire interférométrique soit le 25 avril 1996 dans ce cas-ci.

Des images Landsat 7 ETM+ (30 mètres de résolution) et SPOT 5 panchromatique (2,5 mètres de résolution) ont également été utilisées à des fins de comparaison avec les données radar, nous permettant ainsi d'évaluer leur utilité pour la cartographie des zones sableuses.

3.2.2. Les traitements

Tous les traitements interférométriques ont été réalisés au moyen du processeur du Centre Spatial de Liège (CSL).

Chaque point dans l'image radar SAR en mode SCL (*Single Look Complex*) est codé sous la forme d'un nombre complexe avec une information d'amplitude et une information de phase du signal rétrodiffusé. Les différentes lignes de l'image sont associées à différentes positions en azimut alors que les différentes colonnes sont associées à différentes positions en portée ou en *range*. Afin d'obtenir les images d'amplitude, le module des images a été calculé pour chaque image complexe. Les images d'amplitude ont été moyennées sur 2 pixels dans la direction de la portée et 10 pixels dans la direction de l'azimut. En terrain plat à mi-portée, on obtient ainsi des pixels approximativement carré de 40X40 mètres.

Lors de la co-registation, nous avons considéré trois ensembles d'images qui correspondent aux trois pistes. Pour une piste donnée, chacune des images (images esclaves) a été co-registree à la première image de la liste (image maîtresse) soit l'image du 7-dec-95 pour la piste 451, celle du 6-avr-96 pour la piste 179 et celle du 4-dec-95 pour la piste 408. Ainsi, pour une même piste, les produits interférométriques sont de même taille et parfaitement superposables.

Etant donné l'écart temporel parfois important séparant les images d'une même piste, cette première co-registation a porté uniquement sur une co-registation d'images en module (localisation des événements terrain similaires sur chacune des deux images sur base de leur coefficient de rétrodiffusion), contrairement à la co-registation entre deux images tandem qui est réalisée par une co-registation d'images en module suivie d'une maximisation locale du coefficient de cohérence sur un très grand nombre de points d'ancrage. Sur base des points d'ancrage correctement co-registrés, on détermine par moindres carrés la transformation affine à deux dimensions qui doit être appliquée à l'image esclave pour la rendre superposable à l'image maîtresse.

Cette transformation de l'image esclave est effectuée par interpolation. La précision de la co-registation est inférieure au pixel, ce qui est suffisant pour la plupart des techniques d'interférométrie.

L'image de cohérence a été estimée sur une fenêtre de 2 pixels dans la direction de la portée et 10 pixels dans la direction de l'azimut. Cette taille de la fenêtre d'estimation correspond à un bon compromis entre une estimation relativement peu biaisée de la cohérence et une résolution spatiale de l'image de cohérence finale suffisamment fine (approximativement 40 mètres).

Les images en module et les images de cohérence ont été projetées dans le système de référence UTM-WGS84, en utilisant un logiciel développé spécifiquement pour l'interférométrie SAR par le CSL. Chacune de ces images a ensuite été importée dans le logiciel Erdas Imagine pour la visualisation et l'interprétation des résultats.

Aucun filtre spécifique aux images radar n'a été appliqué sur les images en modules. On a plutôt appliqué un filtre passe-bas puisqu'un point dans l'image finale géoprojetée est obtenu par une moyenne pondérée de points dans l'image non géoprojetée (portée - azimut). Cette dernière est elle-même obtenue en moyennant 2 pixels en portée par 10 pixels en azimut. La taille du pixel en sortie des différents produits interférométriques est donc de 40X40 mètres sur un terrain plat. Par ailleurs, les images d'amplitude n'ont pas été calibrées.

4. RÉSULTATS ET INTERPRÉTATIONS

4.1. Visualisation des images de cohérence tandem ERS 1/2 et interprétation

Sur une période de 24 heures, les facteurs susceptibles de causer un changement de la géométrie de surface sur notre zone d'étude sont principalement les mou-

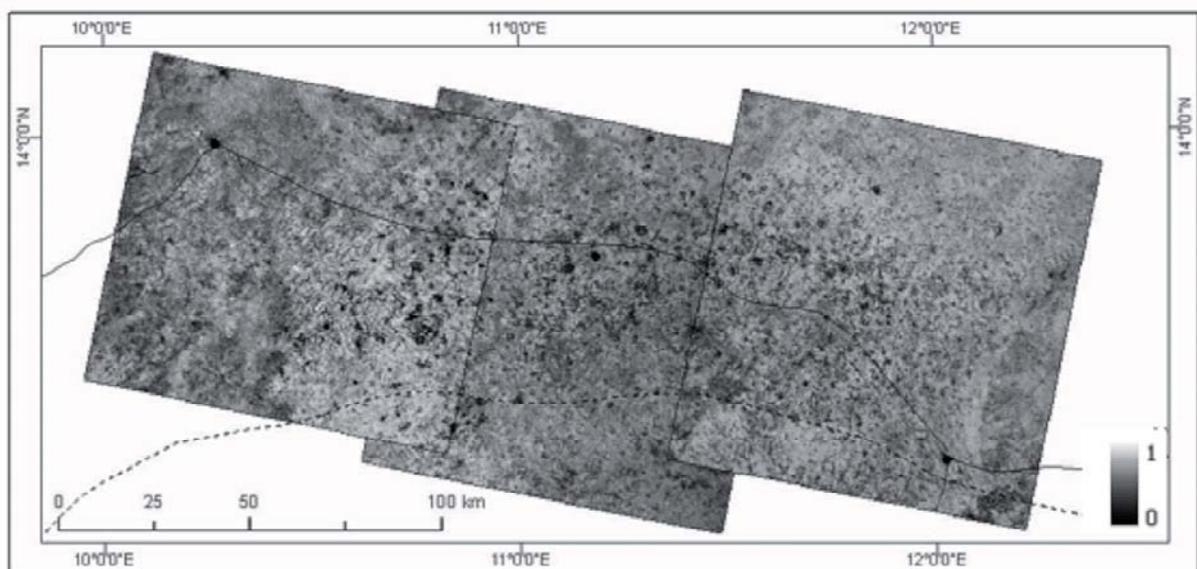


Figure 5. Coh96 ERS 1/2 pour les pistes 451, 179 et 408.

vements de sable et de végétation intra-dunaire ainsi que les activités humaines tels que le passage du bétail. Ces changements provoquent une perte de cohérence et correspondent à des zones noires bien définies sur les images de cohérence tandem. La figure 5 présente les images de cohérence obtenues à partir des paires tandem ERS 1/2 d'avril 1996 pour les trois pistes. Nous pouvons déjà constater que la majorité de la superficie est caractérisée par une bonne cohérence puisque plus de 50% des pixels ont une cohérence supérieure à 0,6. Pour pouvoir interpréter et différencier rapidement les types de changements, nous avons exploité également l'information d'amplitude en réalisant une composition colorée à partir de l'image de cohérence et des modules

des images ERS 1 et ERS 2 auxquels nous attribuons respectivement la couleur rouge, verte et bleue. Cette technique a déjà été utilisée avec succès sur notre région d'étude mais également au Maroc et en Mauritanie (Bodart *et al.* 2005; Bodart et Ozer 2007). De cette façon, une simple analyse visuelle est efficace pour interpréter la nature des changements. Cette superposition d'images est rendue possible grâce à la co-registation sub-pixelique de toutes les images d'une même piste. Le tableau 1 présente une clé d'interprétation sommaire des couleurs visibles sur la composition colorée et la figure 6 montre les trois compositions colorées obtenues à partir des paires tandem d'avril 1996 ainsi que la localisation des figures qui seront analysées par la suite.

Tableau 1. Clé d'interprétation de la composition colorée de l'image de cohérence et des modules des image 1 et 2 en RGB.

	Niveau de cohérence	Niveau d'amplitude	Interprétation
Noir	Faible	Faible	Changement de surface en 24 heures, faible rugosité ou pénétration de l'onde radar dans un milieu sec
Bleu	Faible	Elevé	Changement de surface en 24 heures, forte rugosité
Vert	Faible	Elevé	Changement de surface en 24 heures, forte rugosité
Rouge	Elevé	Faible	Surface stable sur 24 heures, faible rugosité ou pénétration de l'onde radar dans un milieu sec
Blanc	Elevé	Elevé	Surface stable sur 24 heures, forte rugosité

Les cuvettes interdunaires présentent un coefficient de rétrodiffusion élevé dû à la présence de végétation oasienne abondante en leur centre tandis que les zones sableuses actives sont caractérisées par un très faible coefficient de rétrodiffusion. Celui-ci peut être expliqué par la très faible rugosité due à l'absence totale de végétation sur ces dunes actives ou encore à des phénomènes de réflexion spéculaire. L'absorption de l'onde radar dans un milieu hyperaride pourrait également

expliquer cette faible rétrodiffusion aux niveaux des dunes actives (Blumberg 1998). Cependant, cette éventuelle pénétration de l'onde radar nous semble la raison la moins probable du phénomène car dans cette région la nappe phréatique est en général très proche du sol. Sur la composition colorée, les zones de sable actives en seulement 24 heures apparaissent donc en noir car elles présentent une très faible cohérence et une faible intensité de rétrodiffusion les deux jours (fig. 7)

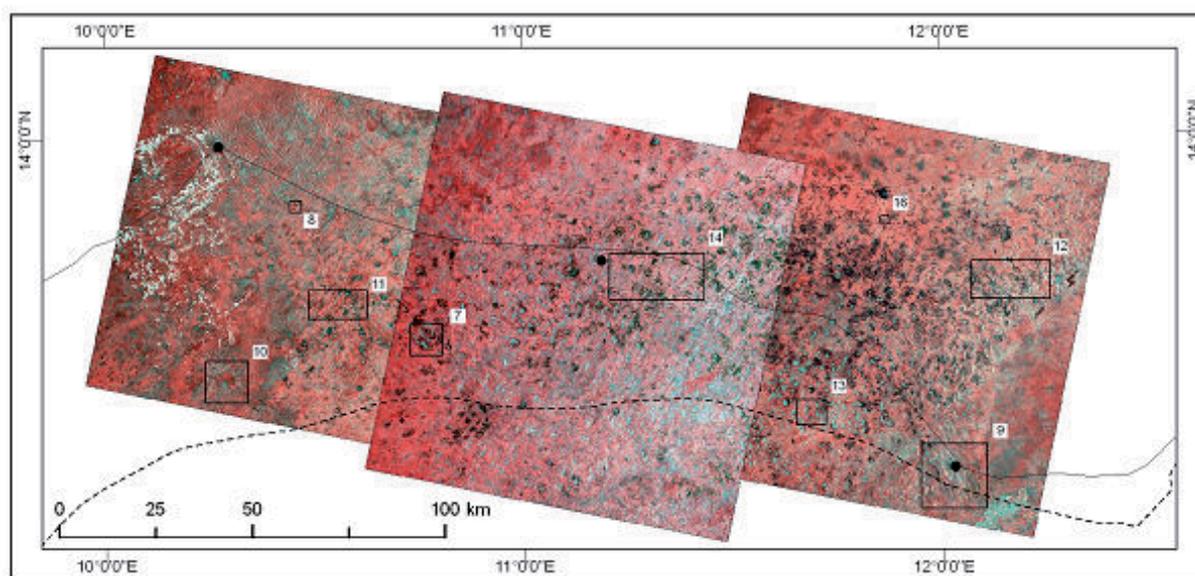


Figure 6. Composition colorée de coh96, mod96₁ et mod96₂ en RGB (piste 451, 408 et 179) et localisation des figures 7-14 et 16.

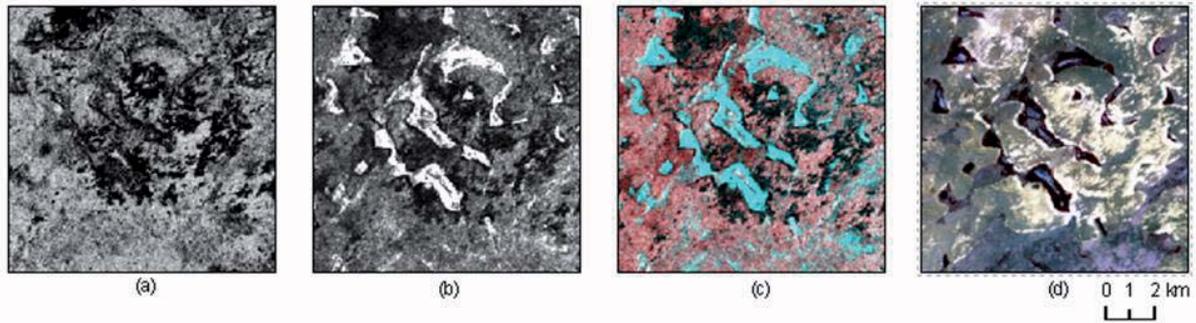


Figure 7. Différenciation entre dune active et végétation interdunaire. (a) Coh96 (b) mod96₁ (c) Composition colorée de coh96, mod96₁ et mod96₂ en RGB (piste 179) (d) image Landsat 7 du 8 novembre 2000 (bandes 432 en RGB).

contrairement aux zones de végétation oasienne et certains chemins et villages, qui apparaissent en bleu-vert car très peu cohérents mais avec une forte intensité un des deux jours.

La cohérence tandem permet donc de détecter la mobilité du sable sur une très courte période. En effet, sur seulement 24 heures de temps, un changement aléatoire de la géométrie des cibles au sein d'un pixel provoque une forte perte de cohérence. Pour une zone sableuse, cette perte de cohérence devrait s'expliquer par un épisode venteux provoquant un mouvement du sable bien que la dune dans son ensemble puisse rester statique. Par chance, nous disposons des données de visibilité et de temps présent enregistrées à la station synoptique de Gouré durant l'année 1996. Ces données révèlent que des brumes de poussière et chasse-sable ont été effectivement signalées tout au long du mois d'avril 1996. Ainsi, l'image de cohérence fournit une information originale et unique par rapport aux images satellitaires traditionnelles optiques et radar. Une image optique telle que l'image Landsat permet généralement d'identifier la structure des dunes mais elle ne donne aucune information sur la dynamique des surfaces et n'identifie pas les limites des dunes actives et les voiles sableux mobiles surtout si les propriétés du sol sont très similaires (Liu *et al.* 2001). Quant à l'image radar, elle nous renseigne sur la rugosité et les propriétés physiques du sol mais pas sur la mobilité du sable. La cohérence semble donc un très bon outil pour la cartographie de l'activité dunaire, ainsi que pour le suivi des mouvements de dunes et l'ensablement. Notons toutefois que toutes les zones de sable vif dont l'extension est inférieure à la résolution du pixel (40 mètres) ne sont pas détectées sur nos images. Souvent les taches noires visibles sur la composition ne correspondent pas à une dune mais à un ensemble de petites dunes de 20 à 30 mètres suffisamment proches les unes des autres pour être visibles à l'intérieur d'un pixel de 40 mètres. La figure 8 donne un aperçu à très haute résolution de dunes détectées sur l'image de cohérence (images SPOT 5 panchromatique à 2,5 m de résolution). L'image de cohérence tandem permet également d'identifier la végétation intradunaire des cuvettes oasiennes ainsi que des villages et chemins peu visibles ou invisibles sur les images radar et optique. Par exemple, la

ville de Mainé-Soroa et ses alentours apparaissent clairement sur l'image de cohérence alors que la ville est difficile à identifier sur l'image en module et l'image Landsat (fig. 9).

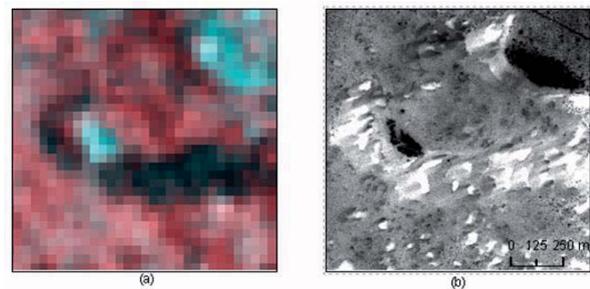


Figure 8. Exemple d'ensembles de petites barchanes détectées sur (a) la composition colorée de coh96, mod96₁ et mod96₂ en RGB (piste 451) et (b) l'image SPOT 5 panchromatique à 2,5 m de résolution du 11/03/2004.

De plus, une ligne de faible cohérence qui part de la ville délimite parfaitement un chemin. Or celui-ci est absent sur l'image d'amplitude. Remarquons que l'interprétation des images n'est pas toujours facile et qu'une connaissance du terrain est toujours nécessaire pour valider ces analyses. Par exemple, au sud de Gouré, la structure ramifiée en surbrillance sur l'image d'amplitude n'est pas celle d'un village comme on pourrait l'interpréter mais bien du lieu de rencontre de bétail autour d'un puits (fig. 10). Sur cette figure, on constate aussi que les chemins détectés dans l'une et l'autre images ne sont pas tous identiques, d'où la complémentarité évidente entre les différentes images. Ces exemples montrent donc l'utilité de l'image de cohérence pour la détection et le suivi de l'impact des activités anthropiques en milieu sahélien.

4.2. Suivi des zones en mouvement et détection des changements

4.2.1. Evaluation de la cohérence tandem ERS 1/2

Rappelons que la décorrélation est due aux facteurs temporels mais aussi aux facteurs géométriques dont la principale source est la base interférométrique. En effet, une augmentation de la base peut entraîner une forte

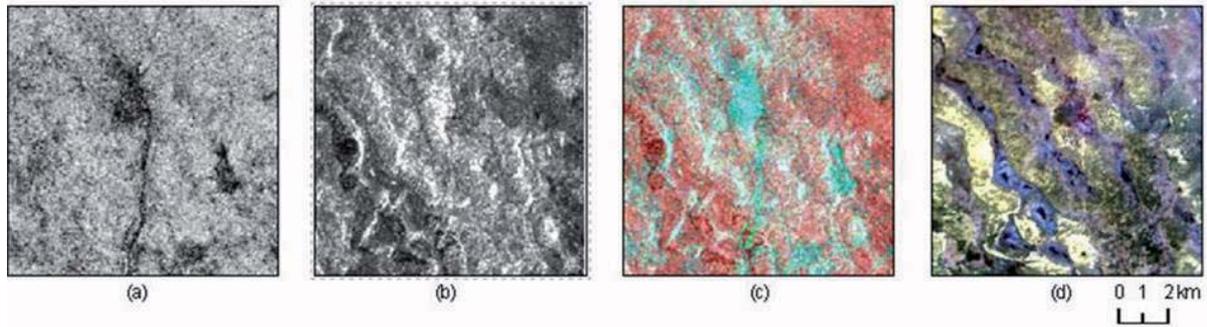


Figure 9. Ville de Maïné-Soroa. (a) Coh96 (b) mod96₁ (c) Composition colorée de coh96, mod96₁ et mod96₂ en RGB (piste 408) (d) image Landsat 7 du 17 novembre 2000 (bandes 432 en RGB).

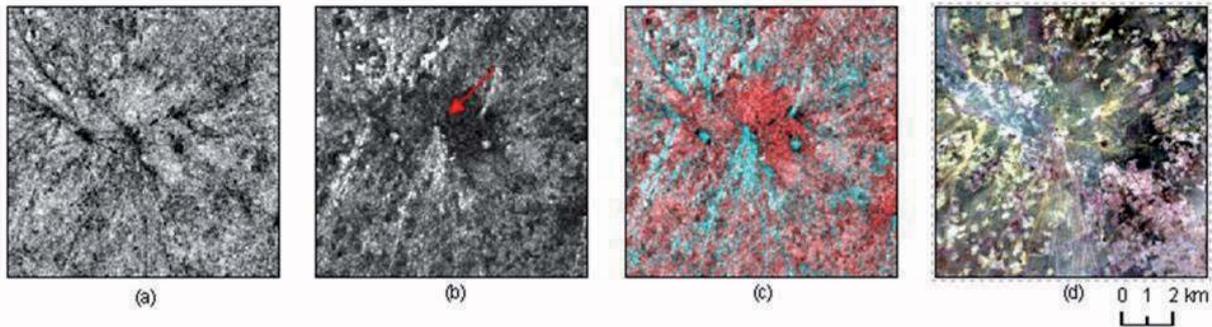


Figure 10. Lieu de rencontre du bétail dans la région de Gouré. (a) Coh96 (b) mod96₁ (c) Composition colorée de coh96, mod96₁ et mod96₂ en RGB (piste 451) (d) image Landsat 7 du 8 novembre 2000 (bandes 432 en RGB).

diminution de la cohérence bien qu'aucun changement de surface ne soit survenu entre les deux dates (équ. 2). Pour détecter des changements au moyen de la cohérence, il est donc préférable de choisir des couples avec une petite base.

Pour chaque couple d'images tandem, nous avons calculé la cohérence théorique au départ de l'équation 4. Il s'agit donc de la décorrélation induite uniquement par la base interférométrique. Le tableau 2 présente pour chaque couple les bases interférométriques, la cohérence théorique ainsi que la cohérence moyenne mesurée de toute l'image.

Nous observons une diminution de la cohérence moyenne par rapport à la cohérence théorique pour tous les couples car notre zone est caractérisée par une faible cohérence temporelle au niveau des dunes mobiles qui

composent une grande partie de la scène.

Le rapport entre la cohérence moyenne et la cohérence théorique a également été calculé. Il permet d'évaluer la relation existant entre la base, les changements temporels et le niveau de cohérence (Liu *et al.* 2001).

On remarque que pour la piste 451 le rapport minimum est observé pour la paire d'avril 96 alors que la cohérence moyenne estimée en avril 96 est supérieure à celle de décembre 95. Toutefois, la cohérence théorique est de façon encore plus marquée meilleure en avril 96 qu'en décembre 95. Le rapport plus faible en avril 96 résulte donc d'une cohérence temporelle nettement plus faible à cette date qu'en décembre 95. On voit ainsi qu'il est capital de prendre en compte l'effet de la décorrélation spatiale pour comparer correctement les résultats. Cette diminution du rapport de décembre 95 à avril 96 est

Tableau 2. Statistiques relatives aux images de cohérence tandem ERS 1/2.

Date	Piste	Base (m)	$\gamma_{\text{théorique}}$	γ_{moyenne}	$\gamma_{\text{moyenne}} / \gamma_{\text{théorique}}$
7/8-déc-95	451	215	0.769	0.604	0.785
25/26-avril-96	451	100	0.893	0.648	0.726
6/7-avril-96	179	119	0.873	0.643	0.737
7/8-nov-98	179	326	0.650	0.462	0.710
4/5-déc-95	408	150	0.839	0.658	0.784
22/23-avril-96	408	125	0.866	0.591	0.683
1/2-février-99	408	235	0.748	0.647	0.865

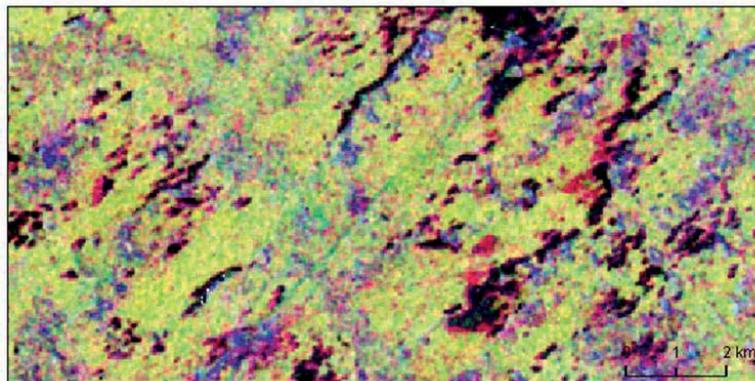


Figure 11. Progression du sable de décembre 95 à avril 96. Composition colorée de coh95, coh96 et mod951 en RGB (piste 451).

encore plus marquée pour la piste 408. L'analyse des histogrammes met également en évidence une augmentation de décembre 95 à avril 96 de la proportion des pixels de faible cohérence (de moins de 1% à plus de 10 % pour les pixels de $\gamma < 0,4$). A l'opposé, sur la piste 179, on observe une diminution du rapport d'avril 96 à novembre 98.

Cette diminution de la cohérence temporelle en avril 96 sur les pistes 451 et 408 peut être interprétée comme le résultat d'un mouvement de dune plus important à

cette date. Malheureusement, nous ne disposons pas de données de vent complètes et fiables pour le sud-est du Niger. D'autres travaux sur le Niger (Ozer, 2000) ont pu mettre en évidence une proportion maximum des vents efficaces à la fin de la saison sèche (mars-avril). L'augmentation de l'activité éolienne observée au mois d'avril correspond donc aux analyses climatiques.

Enfin, la région de Diffa (paire 408) avec le rapport minimum observé semble la plus affectée par les mouvements de dunes en avril 1996. Cependant, cette même

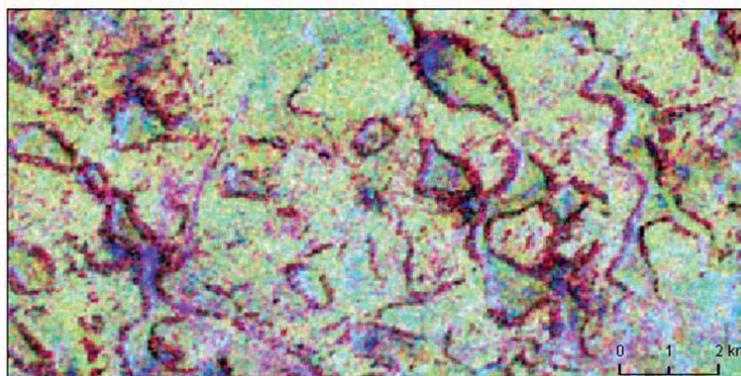


Figure 12. Progression du sable de décembre 95 à avril 96. Composition colorée de coh95, coh96 et mod951 en RGB (piste 408).

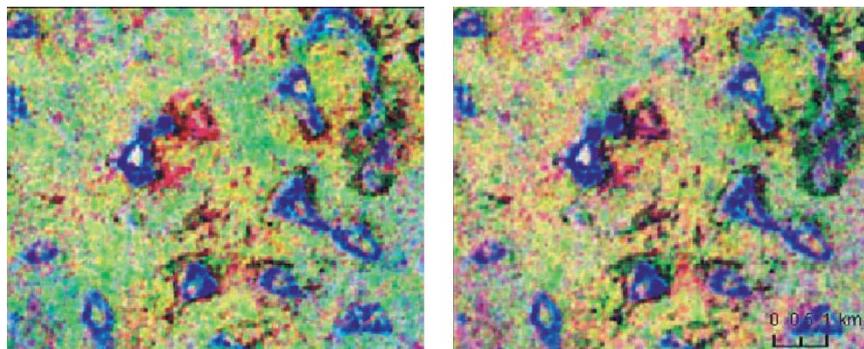


Figure 13. Comparaison avec la cohérence tandem de février 1999 (a) Composition colorée de coh95, coh99 et mod951 en RGB (b) Composition colorée de coh96, coh99 et mod951 en RGB (piste 408).

piste présente en février 1999 le rapport maximum calculé sur la série, elle serait donc caractérisée par moins de changement temporel en février 99 par rapport à avril 96 et décembre 95, et par rapport aux autres pistes.

4.2.2. Combinaison RGB

Chaque image de cohérence nous donne la position des dunes actives. La superposition au moyen d'une composition colorée de deux images de cohérence tandem acquises à différentes dates pourrait donc illustrer une éventuelle migration des dunes dans l'intervalle séparant ces deux dates.

C'est ainsi que, pour les pistes 451 et 408, la composition colorée de l'image de coh95 en rouge, coh96 en vert et du mod95₁ en bleu nous permet de détecter en vert ce qui est en mouvement en décembre 95 mais pas en avril 96, en rouge ce qui est en mouvement en avril 96 mais pas en décembre 95, en noir ce qui est en mouvement aux deux dates, en bleu les zones de faible cohérence mais qui ne correspondent pas à du sable et, enfin, en jaune les zones de forte cohérence mais de faible amplitude. La migration d'une barkhane par exemple devrait apparaître sous forme d'une tache noire avec une limite au vent en vert et une limite sous

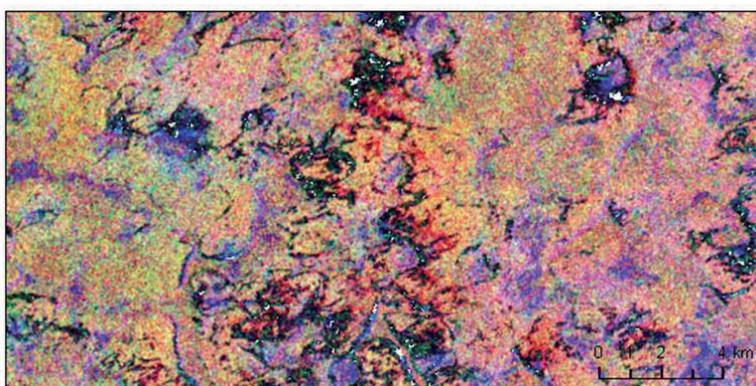


Figure 14. Progression du sable d'avril 96 à novembre 98. Composition colorée de coh96, coh98 et mod96₁ en RGB (piste 179).

le vent en rouge.

La figure 11 présente un extrait de cette composition pour la piste 451, où on réussit à observer la progression du sable de décembre à avril. De plus, le sens de progression semble correspondre à la direction de l'harmattan qui souffle en saison sèche du nord-est au sud-ouest. En effet, en avril, de nouvelles zones de faible cohérence (en rouge sur la composition) apparaissent au sud-ouest de zones déjà présentes en décembre. Des zones absentes en décembre apparaissent également en de nouveaux endroits. Notons qu'il ne s'agit pas ici de migration à proprement parler car on n'observe pas une dune qui change de position au cours du temps mais bien une zone de sable actif qui s'étend vers le sud-ouest d'une date à l'autre.

Pour la piste 408, la même composition colorée fait apparaître de nombreuses nouvelles zones en avril 1996 par rapport à décembre 1995 (fig. 12). Mais la progression du sable est moins claire que sur la piste 451.

Sur cette piste, on dispose également d'une autre paire tandem datant de février 1999. La combinaison de coh95 en rouge, coh99 en vert, mod95₁ en bleu révèle une cohérence générale plus faible en décembre 1995 mais également de nouvelles taches rouges en février 1999 bien définies en certains endroits (fig. 13). La même évolution est observée en comparant coh96 et coh99.

Sur la piste 179, la composition de coh96 en rouge,

coh98 en vert et du mod96₁ en bleu fait apparaître de nouvelles taches rouges en novembre 98 mais cette fois-ci le sens de la progression d'avril 96 à novembre 98 semble correspondre au sens inverse de l'harmattan (fig. 14).

Dans cette région du Niger, la principale composante de la direction des vents est E-NE (avec 49% des vents) ; elle souligne la longue présence de l'harmat-

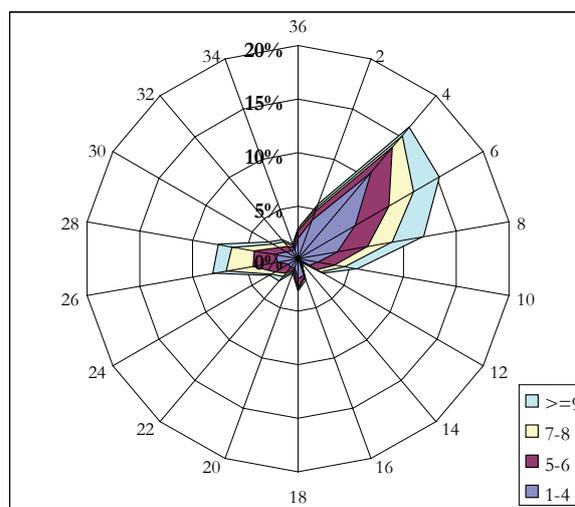


Figure 15. Fréquence de la direction des vents en fonction de différentes classes de vitesse (en m/s) à la station de Gouré en 1984. (Ozer *et al.* 2005).

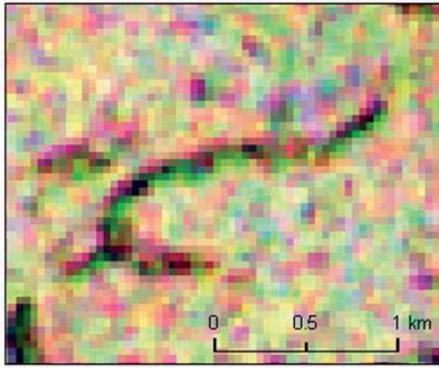


Figure 16. Migration d'un ensemble dunaire entre avril 96 et février 99. Composition colorée de coh96, coh99 et mod961 en RGB (piste 408).

tan (fig. 15). A l'opposé, les vents représentatifs de la saison des pluies (de juillet à septembre) soufflent du secteur O-SO et ne représentent que 21% des vents. Le sens de progression observé sur la figure 14 semble correspondre à la direction des vents de mousson bien que ceux-ci soient moins fréquents et moins forts. En effet, seulement 25 % des vents dont la vitesse est supérieure ou égale à 9 m/s soufflent du secteur O-SO contre 60 % dans la direction opposée (E-NE). (Ozer *et al.* 2005)

La migration des dunes est difficile à mettre en évidence. En considérant l'écart temporel maximum dont nous disposons, soit presque 3 ans pour la piste 408, il faudrait qu'une dune ou un ensemble dunaire détectable sur les deux images de cohérence migre de plus de 40 mètres en 3 ans, soit plus au moins 12 mètres par an. Sur la composition de coh96 en rouge, coh99 en vert et du mod96₁ en bleu, certaines zones pourraient illustrer ce cas de figure mais l'interprétation reste tout de même délicate (fig. 16).

5. DISCUSSION ET CONCLUSIONS

L'information de cohérence interférométrique est originale et unique par rapport aux données satellitaires traditionnelles. En offrant une mesure de la dynamique et des changements de surface qui ont lieu entre les deux acquisitions de la paire interférométrique, elle apporte une tout autre dimension. Combinées avec les images d'amplitude, les images de cohérence tandem obtenues à partir des images ERS 1/2 à un jour d'intervalle disponibles sur le sud-est du Niger ont permis de détecter les sables mobiles sur toute la zone d'étude. Remarquons, cependant, que les petites dunes individuelles n'ont pas pu être discernées à cause de la résolution spatiale des produits interférométriques, 3 ou 4 fois supérieure à la taille moyenne des dunes de la région.

Ensuite, l'analyse temporelle de la cohérence tandem a pu mettre en évidence l'extension de zones sableuses actives au cours du temps. Ces premiers résultats visuels sont déjà innovants. En effet, les seuls travaux utilisant les images de cohérence dans une zone aride (Liu *et al.* 2001) ont échoué dans leur tentative de détection

de migration des dunes. Ces auteurs ont utilisé des images de cohérence multi-temporelles ERS 1/2 de 35, 350 et 385 jours pour détecter les changements dans une zone aride du Sahara en Algérie. La comparaison des images leur a permis de mettre en évidence des chaînes de dunes sur l'image à 35 jours et également des voiles sableux interdunaires visibles sur l'image à 350 jours.

Nous avons également testé la cohérence à plus d'un jour d'intervalle au moyen d'images Envisat-ASAR. Le capteur ASAR de Envisat mis en orbite en mars 2002 a pour objectif de prendre le relais sur les missions ERS. Il se caractérise par le même cycle orbital de 35 jours et des trajectoires d'orbite semblables. Malheureusement, notre région d'étude diffère fortement du Sahara algérien où le sol est composé de surface rocheuse dénudée de végétation et conserve une bonne cohérence à 35, 350 et 385 jours. Dans le sud-est nigérien, les dunes vives ainsi que la végétation des dunes fixes et des cuvettes perdent presque toute cohérence à plus d'un jour d'intervalle. Les résultats obtenus à plus d'un jour d'intervalle ne sont pas encourageants. Les images Envisat-ASAR à 35 jours d'intervalle et plus semblent donc peu intéressantes pour la cartographie et l'étude de la dynamique des sables dunaires par cohérence interférométrique.

La mission ERS tandem offre des paires à seulement 24 heures d'intervalle. Cette base temporelle exceptionnelle nous a permis de calculer des valeurs de cohérence dont la grande utilité pour la cartographie dunaire a été démontrée. Cependant, pour le suivi temporel, nous avons été fortement limités par la très faible quantité de paires tandem acquises dans ces régions. L'arrivée des données du satellite TerraSAR-X à 1 mètre de résolution permettra certainement de nouvelles interprétations. Les longueurs d'onde courtes de la bande X pénètrent moins la surface qu'en bande C. De plus, la résolution et l'échelle de rugosité étant beaucoup plus fines, ces données sont plus sensibles aux petites ondulations et conservent également une meilleure cohérence. Elles pourraient donc donner une meilleure information sur l'état des caractéristiques de surface dans des régions sableuses et hyperarides (Blumberg 2006). Ces images à un mètre de résolution seraient également beaucoup plus adaptées à l'étude des petites dunes présentes dans notre région. De plus, la répétitivité de TerraSAR-X est de 11 jours mais sa capacité à observer des deux côtés de sa trajectoire lui permet d'acquérir n'importe quel point de la Terre tous les 4,5 jours. Des paires interférométriques séparées d'approximativement 4 ou 5 jours d'intervalle offriraient de très grandes possibilités pour le suivi des zones sableuses en mouvement.

Remerciements

Ces recherches font partie de travaux de thèse de doctorat financés par le Fonds National de la Recherche Scientifique et s'inscrivent dans le projet FADA (Fight Against Desertification in West Africa), accepté par

l'ESA, qui nous permet d'acquérir des images ENVI-SAT ASAR ainsi que des images ERS 1/2 couvrant la zone d'étude. De plus, le programme OASIS (Optimising Access to Spot Infrastructure for Science) nous a également permis d'acquérir une image SPOT à haute résolution. Nos recherches s'intègrent également dans un projet d'initiative propre d'institutions universitaires en matière de coopération au développement, subsidié par la C.U.D. (Coopération Universitaire pour le Développement) de Belgique. Ce Projet Interuniversitaire Ciblé (PIC) rassemble diverses compétences d'universités belges (ULG, UCL et FUSAGx) et nigérienne (Université de Niamey). Il vise à mieux comprendre les processus qui sont à la base des apports éoliens responsables de l'ensablement des cuvettes dans le sud du Niger et à protéger celles-ci.

Bibliographie

- Abdelfattah, R. et Nicolas, J.-M., 2004. Estimation de la cohérence interférométrique pour la génération des modèles d'altitude à haute précision. *Télétection*, 4(1), 531-542.
- Blaes, X. et Defourny, P., 2003. Retrieving crop parameters based on tandem ERS 1/2 interferometric coherence images. *Remote Sensing of Environment*, 88, 374-385.
- Blumberg, D. G., 1998. Remote sensing of desert dune forms by polarimetric synthetic aperture radar (SAR). *Remote Sensing of Environment*, 65, 204-216.
- Blumberg, D. G., 2006. Analysis of large aeolian (wind-blown) bedforms using the Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) digital elevation data. *Remote Sensing of Environment*, 100, 179-189.
- Bodart C., 2004. Etude de l'ensablement dans la région de Gouré (sud-est du Niger): processus et apport de la télédétection. Faculté des Sciences, Liège, Université de Liège, Mémoire de licence en Sciences Géographiques, 149p.
- Bodart, C., Gassani, J., Salmon, M. et Ozer, A., 2005. Contribution of SAR interferometry (from ERS1/2) in the study of aeolian transport processes: the cases of Niger, Mauritania and Morocco. FRINGE 2005 Workshop, European Space Agency, Frascati, 6p.
- Bodart, C. et Ozer, A., 2007. The use of SAR interferometric coherence images to study sandy desertification in southeast Niger: preliminary results. *ESA Symposium 2007*, Montreux, Suisse, ESA, 6p.
- Derauw, D., 1999. Phasimétrie par Radar à Synthèse d'Ouverture ; théorie et applications. Faculté des Sciences, Liège, Université de Liège, Thèse de doctorat en Sciences Physiques, 126p.
- ESA, 2007. InSAR principles: Guidelines for SAR interferometry processing and interpretation. Noordwijk, The Netherlands, ESA Publication, ESTEC, 232p.
- Graham, L. C., 1974. Synthetic Interferometer Radar for Topographic Mapping. *Proceedings of the IEEE*, 62(2), 763-768.
- Grove, A. T., 1958. The ancient erg of Hausaland and similar formations on the south side of the Sahara. *The Geographical Journal*, 124, 526-533.
- Jahiel, M., 1998. Rôle du palmier dattier dans la sécurisation foncière et alimentaire au sud-est du Niger. *Sécheresse*, 2(9), 167-174.
- Karimoune, S., 1994. Géomorphologie de la région de Zinder (Niger). *Damagaram et plateau du Koutous. GEO-ECO-TROP*, 18 (1-4), 218 p.
- Kwarteng, A., Touzi, R. et Al-Jassar, H., 2000. Utilization of satellite SAR imagery for mapping sand dunes in Kuwait. *I.E.E.E. Transactions on Geosciences and Remote Sensing*, 5, 1960-1962.
- Liu, J. G., Black, A., Lee, H., Hanaizumi, H. et Moore, J. M., 2001. Land surface change detection in a desert area in Algeria using multi-temporal ERS SAR coherence images. *International Journal of Remote Sensing*, 22(13), 2463-2477.
- Mainguet, M., Canon-Cossus, L. et Chemin, M. C., 1979. Dégénération dans les régions centrales de la République du Niger : Degré de responsabilité de la nature du milieu, de la dynamique externe et de la mise en valeur par l'homme. *Travaux de l'Institut de Géographie de Reims*, 39-40, 61-73.
- Ozer, P., 2000. Les lithométéores en région sahélienne. *GEO-ECO-TROP*, 1-4(24), 317p.
- Ozer, P., Bodart, C. et Tychon, B., 2005. Analyse climatique de la région de Gouré, Niger oriental : récentes modifications et impacts environnementaux. *Cybergeo : European Journal of Geography*, 308, 24p.
- Petit-Maire, N., 1992. Les variations climatiques au Sahara: du passé au futur. *GEO-ECO-TROP*, 16 (1-4), 149-166.
- Rognon, P., 1991. Les sécheresses au Sahel replacées dans l'évolution climatique des vingt derniers millénaires. *Sécheresse*, 2(3), 199-210.
- Sabljak, S., 1998. Hydrochimie et hydrodynamique de la nappe phréatique au Niger sud oriental. DEA, ORSTOM, Université Paris Sud, 78p.
- Santoro, M., Shvidenko, A., McCallum, I., Askne, J. et Schmullius, C., 2007. Properties of ERS 1/2 in the Siberian boreal forest and implications for stem volume retrieval. *Remote Sensing of Environment*, 106, 154-172.
- Zebker, H. A. et Villasenor, J., 1992. Decorrelation in interferometric radar echoes. *I.E.E.E. Transactions on Geosciences and Remote Sensing*, 30(5), 950-959.

