

Apports de la télédétection dans l'étude de la remise en mouvement du sable dunaire dans la région de Gouré (sud-est du Niger)

Contribution of remote sensing in the study of the wind erosion processes in the Gouré region (southeast Niger)

BODART, C.^{1&2} & OZER, A.²

Abstract: In this paper, we discuss the problems caused by moving dunes and the environmental degradation in the region of Gouré (southeast Niger) by means of diachronic analysis of remote sensing data. This project highlights the benefits of complementary data (aerial photos, optical and radar images, climatic analysis, field observation) to study sand dune encroachment.

The diachronic analysis by remote sensing allows us to estimate the landscape dynamic and the process of dune reactivation over a period of about 50 years. This analysis shows that a wide range of problems dominate the Gouré region. The climatic deterioration of the 1970s to 1990s and the increasing anthropogenic pressure are the main drivers for the reduction of the vegetation cover and for various processes of sand dune movement. In the Gouré area, reactivated sands threaten the existence of several villages, farmlands and many inter-dune basins. However, in our study area, the migration of sand is not an irreversible process. We can still fight in an efficient manner the sand encroachment of arable lands and oasis. The damages mainly occur around villages and farmlands. Elsewhere, a better control of land use and natural resources can allow a future regeneration of the vegetation cover. Increasing rainfall observed during the last decade allowed a vegetation recovery in some zones that have not yet been intensively affected by human activity. In this study, we also compare different techniques and satellite data in order to identify and monitor the dune reactivation process and to suggest an indicator of desertification. In that way, in collaboration with the Space Centre of Liege, we evaluate the potential of radar interferometry for the study of sandy desertification. The value of the ERS ^{1/2} interferometric coherence images appears as a very useful and original source of information on sand mobility. They can be interpreted in terms of sand dune activity and allow us to detect and locate small sand dune movements that occurred only within twenty-four hours.

Key-words : Desertification, wind erosion, remote sensing, interferometry

Résumé: L'étude consiste en une approche de la problématique de la remise en mouvement du sable dunaire et de la dégradation du milieu dans la région de Gouré (sud-est du Niger) au moyen, notamment, de l'analyse diachronique de la zone d'étude par télédétection. L'originalité est l'utilisation complémentaire de différentes sources de données (photographies aériennes, images satellitaires optiques et radar, données climatiques, vérité-terrain) dans l'analyse du processus d'ensablement. L'analyse diachronique par télédétection permet d'appréhender l'évolution du milieu et du processus d'ensablement sur une période d'un peu plus de 50 ans. Il ressort de cette analyse qu'un problème de grande ampleur sévit dans la région de Gouré. Les péjorations climatiques des années 70-90 et la pression anthropique croissante sont majoritairement responsables de la réduction de la couverture végétale et de la diversité des espèces ainsi que de nombreux processus de remaniement du sable dunaire. Les dunes réactivées menacent actuellement l'existence de certaines cuvettes interdunaires, de certains villages et de nombreuses terres de culture de la région de Gouré. Cependant, la reprise d'une pluviométrie tendant vers la normale observée durant les dix dernières années ainsi qu'une meilleure gestion des territoires devraient permettre une régénération future du couvert végétal, telle qu'elle est déjà amorcée dans certaines zones non affectées par l'activité de l'homme. Au cours de ces recherches, nous comparons également différentes techniques et données satellitaires nous permettant de quantifier et de suivre le phénomène de réactivation des dunes dans le but de proposer un

¹ Aspirant FNRS, Email: cbodart@ulg.ac.be

² Laboratoire de Géomorphologie et Télédétection, Unité de Géographie Physique, Université de Liège, Allée du 6 août, 2 - (B11) 4000 Liège, Email: aozer@ulg.ac.be

indicateur de désertification. Dans cette optique, nous avons testé, en collaboration avec le Centre Spatial de Liège, l'utilisation de l'interférométrie radar. Les images de cohérence obtenues à partir de paires tandem ERS ^{1/2} apparaissent comme un très bon complément d'information sur la mobilité du sable.

En effet, elles peuvent être interprétées en terme de mouvement de sable dunaire et permettent de détecter et de localiser de légers mouvements de dunes, c'est-à-dire, des mouvements qui se sont manifestés en seulement vingt-quatre heures.

Mots-clés : Désertification, érosion éolienne, télédétection, interférométrie

INTRODUCTION

La désertification menace de vastes territoires sur tous les continents. La convention des Nations Unies sur la Lutte Contre la Désertification (UNCCD) la définit 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"(<http://www.unccd.int>). En Afrique de l'Ouest, la désertification est un problème de grande ampleur qui engendre une situation d'extrême sécheresse et de pauvreté. A la fin des années 1960, à l'instar 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 ; TIDJANI ALOU 2006 ; OZER et OZER 2005). 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'analyse diachronique par télédétection permet d'appréhender l'évolution du milieu et du processus d'ensablement sur une période d'un peu plus de 50 ans. L'objectif de nos recherches est de montrer comment la confrontation d'anciennes photographies aériennes et d'images satellitaires récentes permet d'évaluer l'ampleur des changements survenus depuis les années 50 (dégradation de la végétation dunaire et interdunaire, vitesse et direction de la remise en mouvement du sable,...) et leurs conséquences sur la vie des habitants de la région de Gouré, de proposer des hypothèses sur les causes et le développement du phénomène et enfin de localiser les zones les plus touchées et les plus menacées par le processus d'ensablement et donc les zones où il faudrait agir en priorité.

Au cours de ces recherches, nous comparons également différentes techniques et données satellitaires nous permettant de quantifier et de suivre le phénomène de réactivation des dunes dans le but de proposer un indicateur de désertification. Dans cette optique, nous montrerons comment l'image de cohérence interférométrique obtenue à partir de paires tandem ERS à un jour d'intervalle peut être utilisée pour détecter et cartographier les zones de sable en mouvement.

Ces recherches font partie de travaux de thèse 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 ENVISAT ASAR ainsi que des images ERS couvrant la zone d'étude. De plus, le programme OASIS (Optimising Access to Spot Infrastructure for Science, projet numéro 18) nous a également permis d'acquérir des images SPOT 5 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 les protéger.

ZONE D'ETUDE

Localisation et description de la zone d'étude

La zone d'étude est située au sud-est du Niger, dans la partie orientale du Département de Zinder (entre 10° et 10°40' de longitude est et 13°50' et 14° de latitude nord) (Fig. 1). Il s'agit d'un vaste plateau sableux dont l'altitude varie de 300 à 400 mètres. Ses parties hautes correspondent aux sommets des anciennes dunes transversales. Ce plateau est constellé de petites dépressions assez profondes et plus ou moins circulaires - les cuvettes - et de bas-fonds allongés. A noter également la présence de massifs de granite (massif annulaire du Mounio).

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 s'y caractérise par une longue saison sèche (9 à 10 mois/an), suivie d'une saison des pluies aux précipitations courtes et violentes.

Le système agricole actuellement en place combine agriculture pluviale (mil, sorgho, niébé) avec une 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 (manioc, maïs, patate douce, oignons, canne à sucre, dattes, blé). Ces produits constituent une source de revenus importante moins sensible aux fluctuations de la pluviométrie que les cultures pluviales.

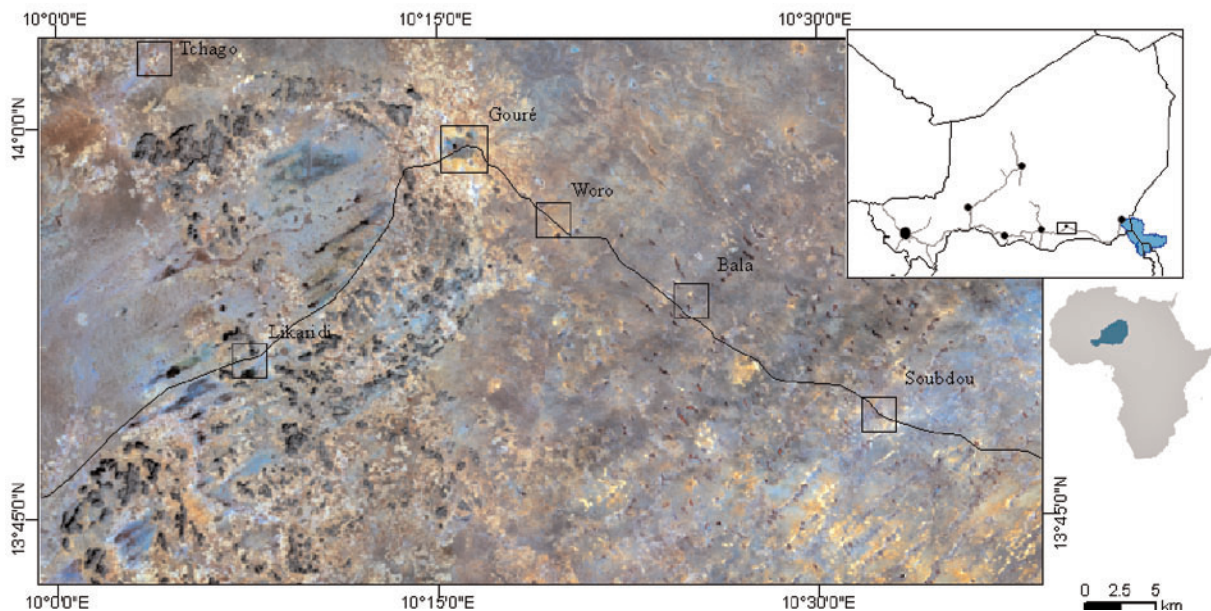


Figure 1. Localisation des sites étudiés (Image Landsat 02/11/2001)

Remise en mouvement du sable dunaire

Depuis la fin des années 1960, la région sahélienne est touchée par une terrible sécheresse. Il apparaît que la région de Gouré est sortie de la « grande sécheresse » à la fin des années 1980 (OZER *et al.* 2005). Cependant, les conséquences de ce retour à des conditions plus humides ne se seraient pas accompagnées d'une amélioration générale du paysage. En effet, dans le sud-est du Niger, les anciennes dunes sont actuellement réactivées en certains endroits et menacent d'ensablement de nombreuses cuvettes interdunaires (JAHIEL 1998). Ces dunes anciennes dites ogoliennes (dunes mises en place durant les phases arides du Quaternaire supérieur 18.000 BP) sont fixées par la végétation depuis l'Holocène (PETIT-MAIRE 1992). Cependant, les effets conjugués des sécheresses et des actions anthropiques (coupe du bois, surpâturage, augmentation des surfaces cultivées,...) entraînent la remobilisation des dépôts sableux suite à une baisse de la couverture végétale des sols. Ces sédiments éoliens facilement remaniés par le vent sont à l'origine de l'ensablement des

cuvettes, source principale de production et de diversification agricole dans ces régions à potentialités agricoles très réduites (Fig. 2). Ces processus entraînent donc une profonde modification de l'économie agropastorale dans l'est du Niger.



Figure 2 : Cultures maraîchères, abreuvement du bétail et ensablement des cuvettes dans la région de Gouré (Auteurs des clichés : Bodart 2004 et Salmon 2003)

ANALYSE DIACHRONIQUE

L'analyse multi-temporelle par télédétection au moyen de photographies aériennes de 1957-58 (IGN-France), 1975 et 1996 (IGN-Niger) et d'images satellitaires à très haute résolution (QUICKBIRD, IKONOS, SPOT5) confrontée avec les observations de terrain nous a permis d'évaluer l'ampleur des changements du paysage survenus depuis la fin des années 50 dans la région de Gouré.

De la situation initiale, en 1957, à celle observée en 2004, la superficie occupée par la ville de Gouré et les villages environnants (Woro, Bala et Soubdou) n'a cessé d'augmenter, traduisant un accroissement important de la population dans la région de Gouré. Ce constat concorde avec les résultats avancés par MEUNIER (1998) dans son analyse de l'évolution urbaine de Zinder et de Mirria, deux villes localisées dans le Département de Zinder à l'ouest de Gouré. Suite à cette pression anthropique, nous avons pu observer une extension continue des secteurs dénudés et des auréoles de sable remanié autour des villes et villages. La figure 3 illustre l'accroissement de la ville de Gouré de 1957 à 2002 (élargissement de la tache urbaine et densification de l'habitat traduisant l'accroissement de la démographie) au travers notamment de la superposition des deux images au moyen d'une composition multi-temporelle RGB.

La végétation arbustive et arborée fixant les sables dunaires s'est fortement dégradée de 1957 à 1975 suite à la grande sécheresse du début des années 70. Cependant, dès le retour d'une pluviométrie plus normale (début des années 90), dans les secteurs où aucune activité anthropique n'est venue amplifier le processus de dégradation des terres, le couvert végétal a pu réapparaître en restant toutefois moins important qu'en 1957. Cette évolution de la végétation depuis les années 50 est bien observable dans la région de Woro (Fig. 4).

Les cuvettes interdunaires ont connu, dans l'ensemble, un net recul de la végétation et l'assèchement de nombreuses étendues d'eau de 1957 à 1975. Actuellement, la situation ne semble pas s'améliorer, à l'exception de quelques cuvettes éparses qui ont bénéficié d'opérations locales de mise en défens ou de plantations. L'exploitation de ces cuvettes (cultures maraîchères, abreuvement du bétail, prélèvement de bois,...) qui a débuté dans les années 80 en réponse aux changements climatiques, n'a fait qu'amplifier la détérioration du sol.

Enfin, une quantité importante de cas de déflation et de remise en mouvement du sable dunaire a été mise en évidence (principalement à partir de 1996). Sous réserve de la validité des données relevées à Gouré, nous pouvons en déduire la même explication dans la majorité des cas rencontrés : une réactivation des dunes due à la pression anthropique exercée sur les terres, c'est-à-dire :

- Extension ou déménagement des zones habitées
- Lieu de pâturage ou de passage des animaux
- Mise en culture des terres
- Défrichement.

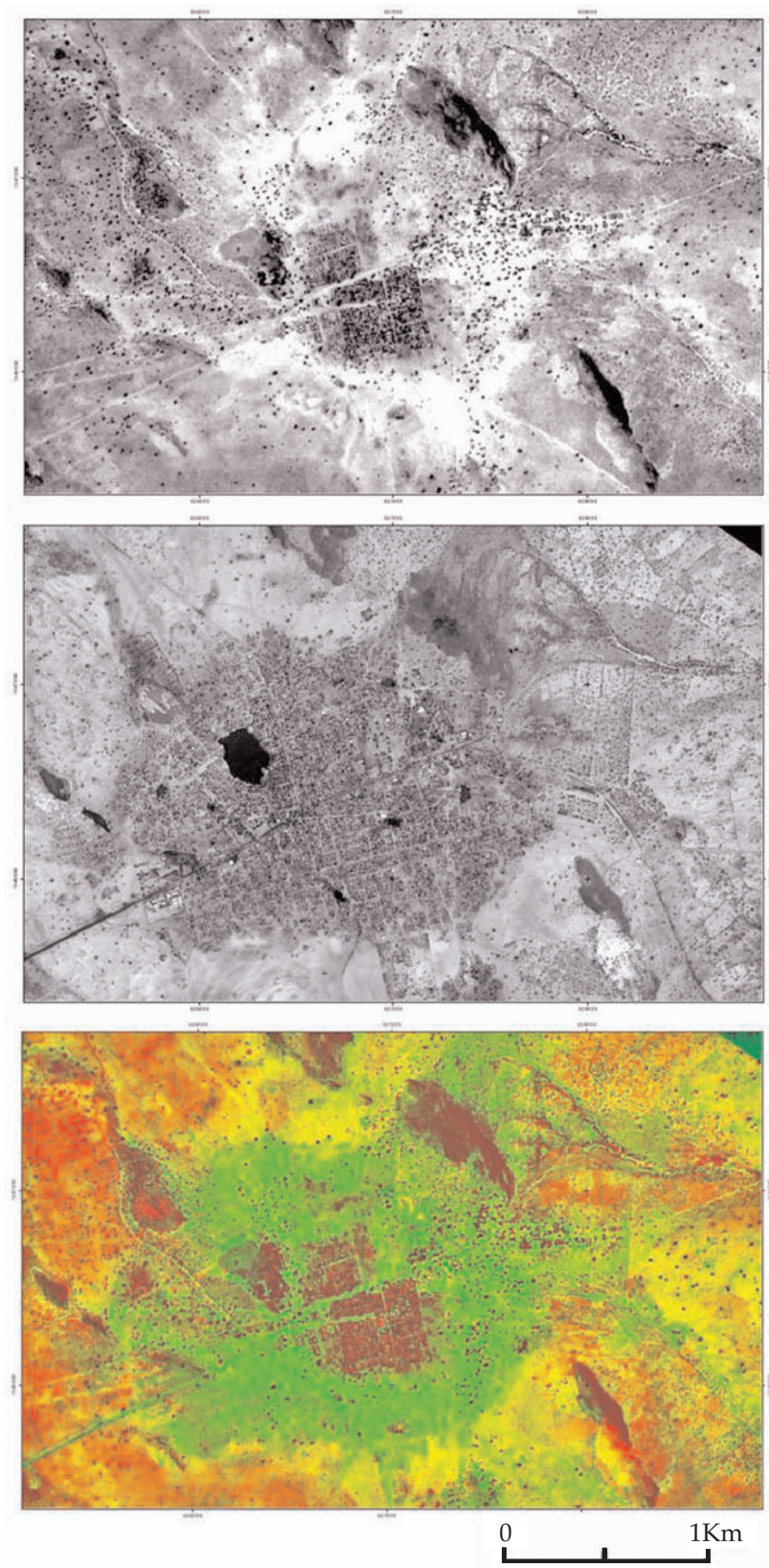


Figure 3. Accroissement de la ville de Gouré; de haut en bas : Photo aérienne IGN France (1957), Image QUICKBIRD (12/08/2002), composition multi-temporelle sur base de la photo de 1957 (vert: extension de la ville en 2002)

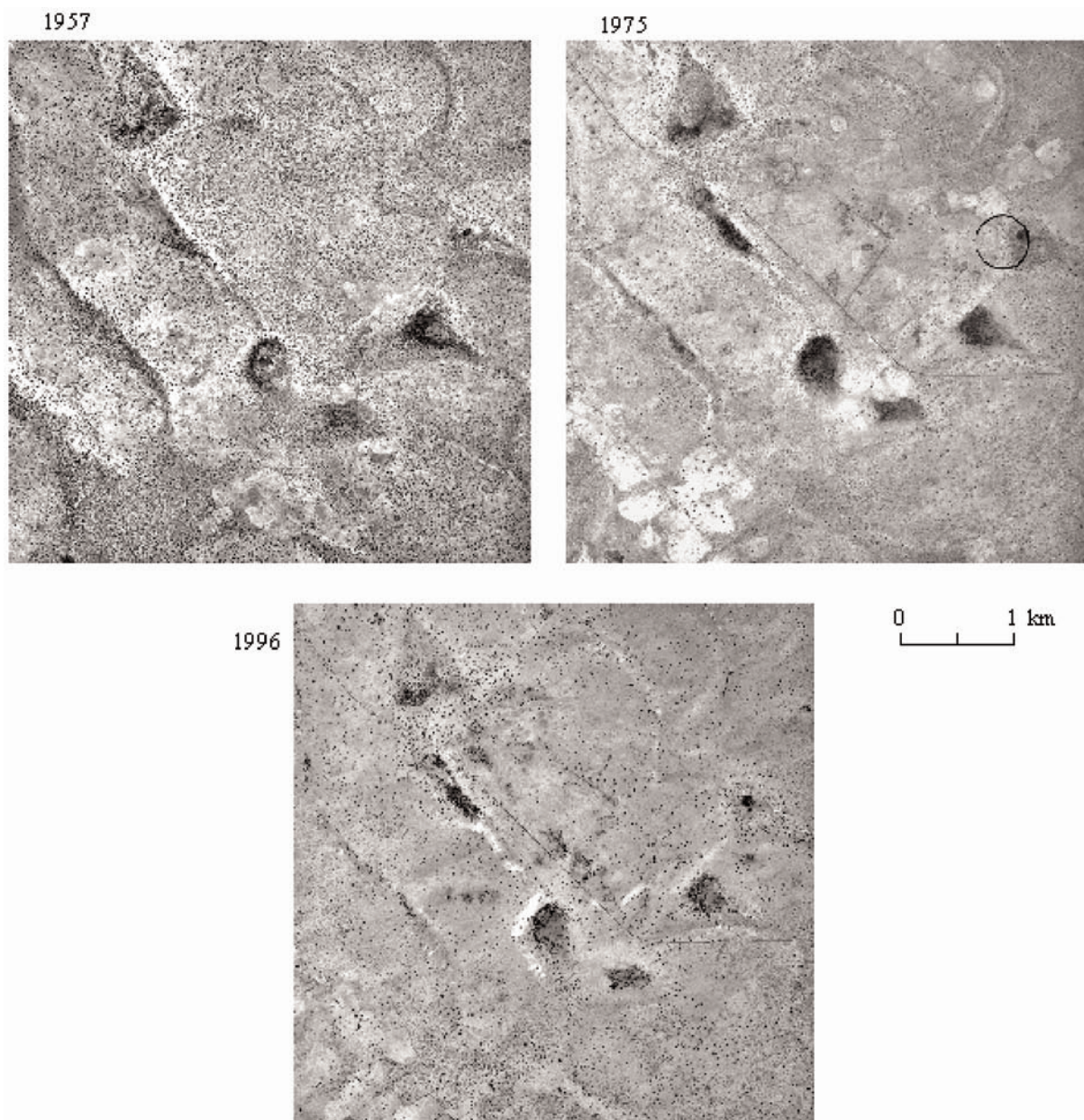


Figure 4 : Analyse diachronique de la région de Woro (Photos aériennes IGN France et IGN Niger)

La péjoration climatique n'aurait donc été qu'un déclencheur dans le processus de dégradation des terres. Le sable dunaire dénudé de couvert végétal et fragilisé par l'activité de l'homme aurait été rapidement remanié par les vents (même légers).

Le secteur de Soubdou, qui est le plus méridional, semble le plus touché par le phénomène (Fig.5). En 1975, le village a rejoint la route construite en 1968. L'ancien village de Soubdou n'apparaît plus sur la photo de 1996. Quant à l'actuel village, il s'est largement étendu par rapport à 1975. Le changement majeur survenu dans le paysage de 1996 est l'apparition de nombreux secteurs de sable vif. Beaucoup de ces secteurs s'alignent parfaitement sur les traces de pistes que nous observons sur la photo de 1975. Dès lors, le passage fréquent pourrait avoir dégradé la couverture végétale, causant une perte de rugosité et la remise en mouvement du sable. Une grande partie de ces taches de sable vif prend l'aspect de petites barkhanes orientées face à l'Harmattan. Ces dunes de faible dimension se déplacent très vite et sont, par conséquent, les plus dangereuses en terme d'ensablement. En comparant la photo aérienne de 1996 avec l'image Spot de 2004, on note un déplacement notable des barkhanes vers le sud-ouest, donc dans la direction de progression de l'Harmattan.

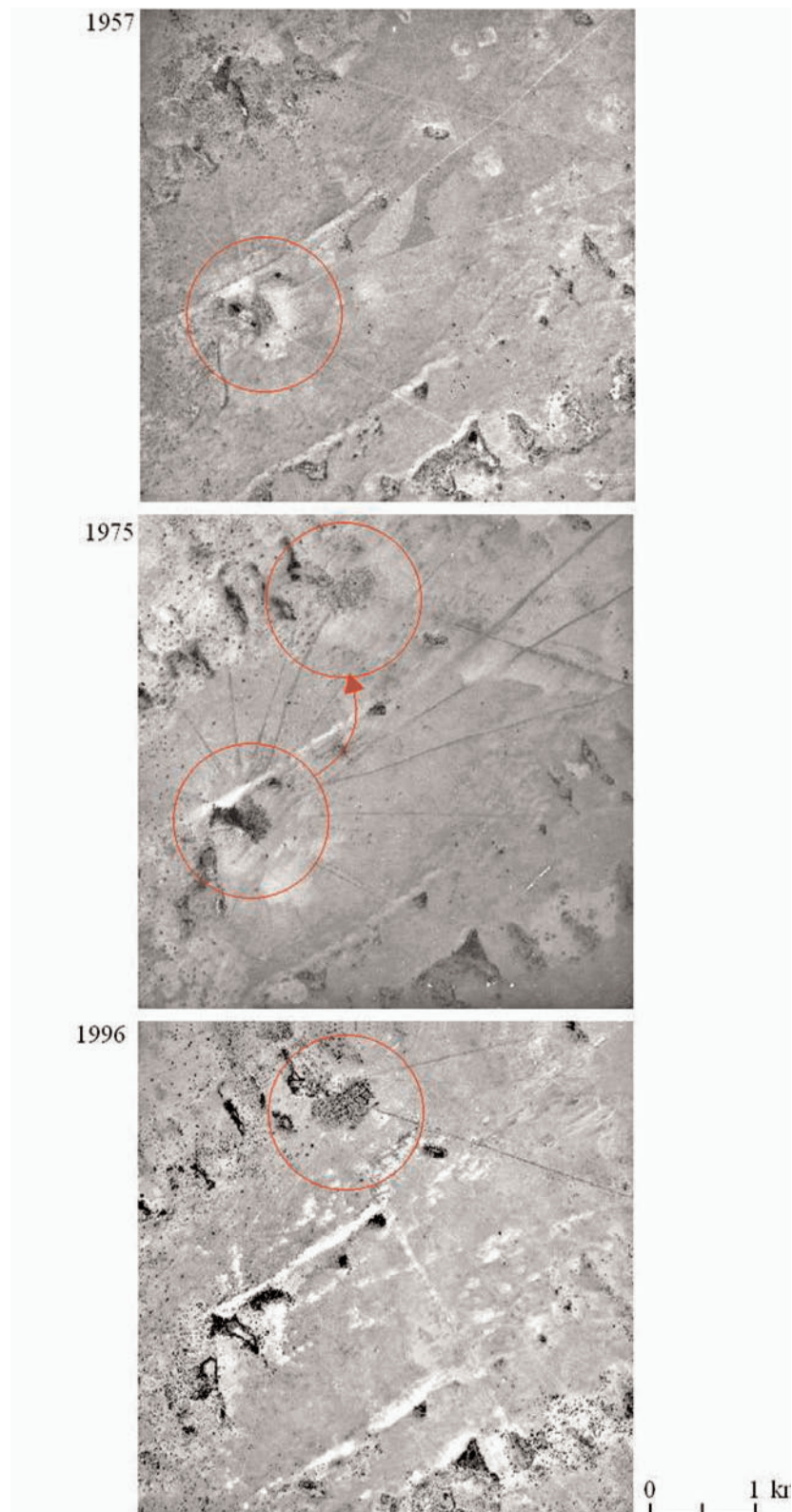


Figure 5. Analyse diachronique de la région de Soubdou (Photos aériennes IGN France et IGN Niger) ; déplacement du village de 1957 à 1996

Ces mouvements sont de l'ordre de 1 à 3 mètres par an. Cette observation concorde avec les résultats obtenus par la FAO (1994) dans le département de Zinder et Diffa (vitesse de 2 à 6 m/an). Notons également que les cuvettes de Woro et le village de Bala sont également menacés d'ensablement à court terme.

TRAITEMENTS INTERFEROMETRIQUES

L'interférométrie radar consiste à étudier les corrélations complexes entre les signaux radar d'une même zone prise selon deux points de vue légèrement différents. Cette technique permet ainsi de créer des Modèles Numériques de Terrain (premières applications au début des années 70). Les traitements interférométriques ont été réalisés au moyen du processeur du Centre Spatial de Liège. (DERAUW 1999)

Dans un premier temps, les Modèles Numériques de Terrain générés par interférométrie radar sur les paires tandem ERS $1/2$ (paires d'images acquises à un jour d'intervalle) nous donnent des informations sur le modelé éolien de la région et sur la distribution spatiale des formations sableuses. On reconnaît à l'ouest le massif du Mounio de Gouré (Fig.6). Les couvertures sableuses de grande épaisseur occupent toute la partie orientale du secteur d'étude. Le reste de l'étendue sableuse est soit discontinue, soit de faible épaisseur. Ces sables ont été façonnés en dunes transversales perpendiculaires à la direction de l'Harmattan qui souffle du nord-est au sud-ouest. Les cuvettes sont localisées dans les dépressions intercalées entre les dunes transversales (points bas de la topographie).

En superposant sur le MNT la carte topographique de la zone d'étude, on observe que les lignes structurales renseignées sur la carte correspondent relativement bien au relief donné par le MNT interférométrique obtenu à partir du couple tandem ERS $1/2$ de décembre 1995 (Fig.6).

L'image de cohérence interférométrique s'avère également être un très bon outil permettant de déterminer automatiquement les zones sableuses en mouvement. La cohérence nous renseigne sur les processus de surface et de volume qui apparaissent entre les deux passages du satellite et qui affectent la stabilité de la scène. 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 mouvements de sable et de végétation intradunaire 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. 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. Pour une zone d'étendue restreinte située au sud-est de Soubdou, la figure 7 compare l'image de cohérence, l'image du module et la composition colorée. L'image Landsat 7 ETM+ (30 mètres de résolution) a également été utilisée à des fins de comparaison avec les données radar, nous permettant ainsi d'évaluer leur utilité pour la cartographie des zones sableuses.

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 ; BODART 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.

Les cuvettes interdunaires présentent un coefficient de rétrodiffusion élevé du 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.

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. Au contraire, les zones de végétation oasiennes et certains chemins et villages apparaissent en bleu-vert car très peu cohérents mais avec une forte intensité un des deux jours.

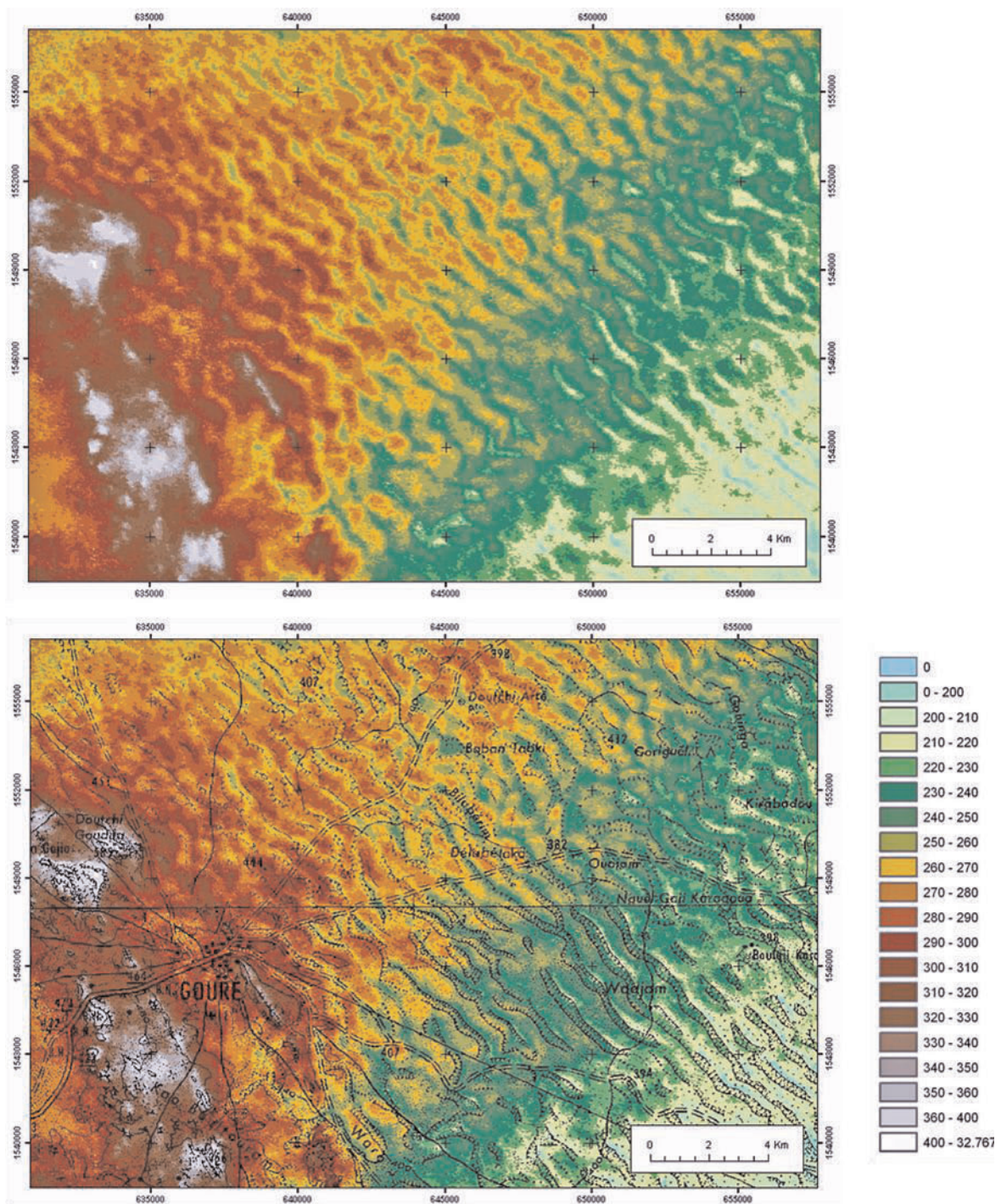


Figure 6. haut: Modèle Numérique de Terrain (MNT) généré par interférométrie radar sur les paires tandem ERS ^{1/2} (25-26 avril 1996)
bas: MNT superposé par la carte topographique de la région au 1/200.000.

CONCLUSIONS

Dans la région de Gouré, les péjorations climatiques des années 70-90 et la pression anthropique croissante sont majoritairement responsables de la réduction de la couverture végétale ainsi que du remaniement du sable dunaire. Les dunes réactivées menacent actuellement certaines cuvettes, des villages et de nombreuses terres de culture ainsi que l'unique route nationale.

Cependant, la reprise d'une pluviométrie plus normale observée durant les dix dernières années ainsi qu'une meilleure gestion des territoires devraient permettre une

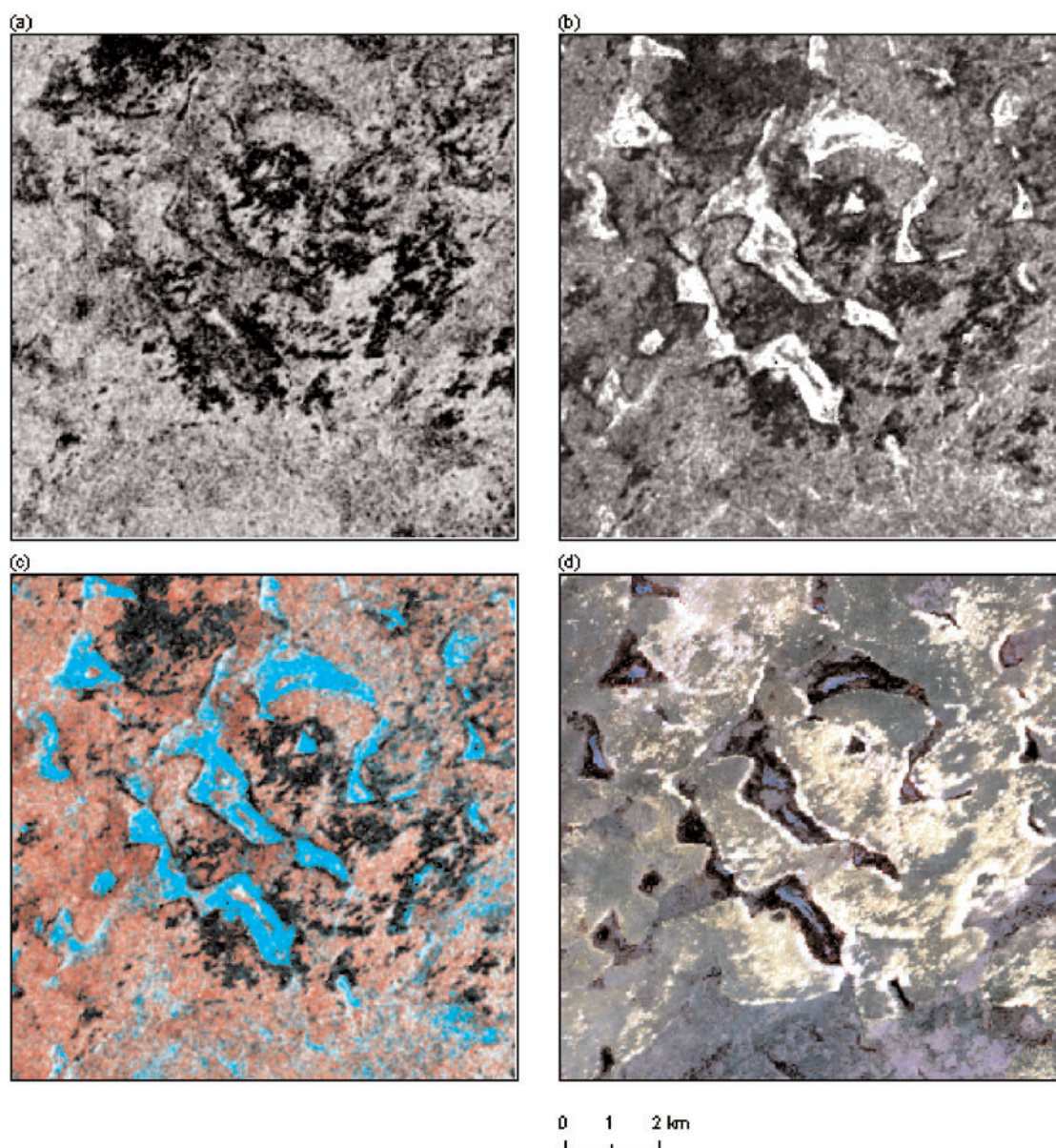


Figure 7. (a) Image de cohérence obtenue à partir du couple tandem ERS du 25 et 26 avril 1996 (coh96)
 (b) Module de l'image ERS1 du 25 avril 1996 (mod961)
 (c) Composition colorée de coh96,mod961 et mod962 en RGB
 (d) Image Landsat 7 du 8 novembre 2000 (bandes 432 en RGB)

régénération future du couvert végétal, telle qu'elle est déjà amorcée dans certaines zones non affectées par l'activité de l'homme.

L'analyse multi-temporelle par télédétection au moyen de photographies aériennes de 1957-58 (IGN-France), 1975 et 1996 (IGN-Niger) et d'images satellitaires à très haute résolution (QUICKBIRD, IKONOS, SPOT5) confrontée avec les observations de terrain nous a permis :

- d'évaluer l'ampleur des changements du paysage survenus depuis la fin des années 50 (dégradation de la végétation dunaire et interdunaire, croissance des zones urbaines,...),
- de déterminer la vitesse et la direction de la remise en mouvement du sable,
- d'évaluer les conséquences sur la vie des habitants de la région de Gouré,
- de proposer des hypothèses sur les causes et le développement du phénomène,
- et enfin, de localiser les zones les plus touchées et les plus menacées par le processus d'ensablement et donc les zones où il faudrait agir en priorité.

Enfin, 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.

REMERCIEMENTS

Cette étude a bénéficié du programme OASIS (Optimising Access to Spot Infrastructure for Science) pour l'acquisition des images SPOT et bénéficie du projet FADA (Fight Against Desertification in West Africa) accepté par l'ESA pour l'acquisition des images ERS et Envisat.

BIBLIOGRAPHIE

- 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., 2007. "Apport de l'interférométrie radar dans l'étude des mouvements de sable (sud-est du Niger)" Faculté des Sciences. Liège, Université de Liège. Rapport du diplôme d'études approfondies en Sciences : 44p.
- BODART, C., GASSANI, J., SALMON, M. & 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. & 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.
- FAO, 1994. Lutte contre l'ensablement des terres de cultures dans les départements de Zinder et de Diffa. Projet FAO NER/89/004, <http://www.fao.org/docrep/V3436F/V3436F00.htm>, consultation en mars 2008.
- JAHIEL, M., 1998. "Rôle du palmier dattier dans la sécurisation foncière et alimentaire au sud-est du Niger." *Sécheresse*, 2, 9: 167-174.
- MEUNIER, C. 1998. Gestion des régions de Zinder et de Mirria (sud-Niger) soumises à la désertification : apport des relevés statistiques et de la télédétection. Travail de fin d'études. Faculté d'Economie, de Gestion et de Sciences Sociales, Université de Liège. 80 p.
- OZER, A. & OZER, P., 2005. "Désertification au Sahel: crise climatique ou anthropique?" Bulletin des séances / *Académie royale des sciences d'Outre-Mer*, 51: 395-423.
- OZER, P., 2000. "Les lithométéores en région sahélienne." *Geo-Eco-Trop*, 24, 1-4: 317p.
- OZER, P., BODART, C. & 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.
- TIDJANI ALOU, A., 2006. "Apports de la télédétection dans l'étude de la dynamique environnementale de la région de Tchago (nord-ouest de Gouré, Niger)." Faculté des Sciences. Liège, Université de Liège. Rapport du diplôme d'études approfondies en Sciences : 88p.
- <http://www.unccd.int/convention/text/convention.php> (partie 1, introduction) (consulté en mars 2008)

