



Available online at www.sciencedirect.com



C. R. Geoscience 337 (2005) 719–728



<http://france.elsevier.com/direct/CRAS2A/>

Géophysique externe, climat et environnement

Apport de l'imagerie satellitaire radar pour l'exploration géologique en zones arides

Nicolas Baghdadi ^{a,*}, Gilles Grandjean ^a, Didier Lahondère ^a, Philippe Paillou ^b,
Yannick Lasne ^b

^a Bureau de recherches géologiques et minières (BRGM), « Aménagement et risques naturels », BP 6009, 45060 Orléans, France

^b Observatoire aquitain des sciences de l'Univers, UMR 5804, BP 89, 33270 Floirac, France

Reçu le 13 octobre 2004 ; accepté après révision le 7 mars 2005

Disponible sur Internet le 7 avril 2005

Présenté par Michel Petit

Résumé

Le potentiel de l'imagerie radar pour l'exploration géologique a été étudié sur un site d'étude en Mauritanie (région d'Akjoujt). En comparaison des images optiques, les résultats obtenus montrent l'apport de l'imagerie radar pour la détection des structures géologiques de surface (dykes, filons...), mais aussi pour la cartographie des objets enfouis sous une faible couche de sable (paléochenaux). Il est démontré que le potentiel cartographique est bien meilleur aux grandes longueurs d'onde qu'aux petites (bande L en comparaison des bandes C et X). Quant aux images optiques, leur contribution est, d'une part, bien plus limitée pour la cartographie des structures géologiques de surface et, d'autre part, nulle pour la détection des structures de sub-surface. Nous concluons que la télédétection spatiale permet d'améliorer les cartes géologiques existantes et d'optimiser le levé cartographique. *Pour citer cet article : N. Baghdadi et al., C. R. Geoscience 337 (2005).*

© 2005 Académie des sciences. Publié par Elsevier SAS. Tous droits réservés.

Abstract

The contribution of radar satellite imagery to geological exploration in arid areas. The potential of radar imagery in geological exploration was investigated at a study site in Mauritania (Akjoujt region). Compared with optical images, the results obtained show how radar imagery can help not only in detecting surface geological structures such as dykes and veins, but also mapping subsurface structures beneath a shallow layer of sand (palaeochannels). The mapping potential was found to be much better at long wavelengths than at short ones (L-band, compared with C- and X-band). As for optical images, their contribution is much more limited in the mapping of surface geological structures, and inappropriate for detecting subsurface structures. We conclude that spatial remote sensing enables the improvement of existing geological maps and the optimization of cartographic surveying. *To cite this article: N. Baghdadi et al., C. R. Geoscience 337 (2005).*

© 2005 Académie des sciences. Publié par Elsevier SAS. Tous droits réservés.

* Auteur correspondant.

Adresse e-mail : n.baghdadi@brgm.fr (N. Baghdadi).

Mots-clés : Exploration géologique ; Imagerie radar et optique ; Mauritanie

Keywords : Geological exploration; Radar and optical imagery; Mauritania

Abridged English version

Exploration for natural resources inevitably involves the mapping of geological structures; the extent of the areas to be mapped and the optimization of cartographic surveying thus become significant issues. Satellite imagery allows high-precision coverage of broad areas, while significantly reducing exploration costs. It provides valuable information for geological mapping and mineral exploration, since it brings out structures such as lineaments, faults, lithological contacts, etc., and enables identification of mineral occurrences through analysis of their spectral signatures. In recent years, numerous optical sensors equipped with imaging devices for acquiring a variety of spectral and radiometric information have been launched (SPOT, LANDSAT, ASTER, HYPERION, etc.); this has led to improvements in geological interpretation [12,14]. Similarly, the contribution of SAR (Synthetic Aperture Radar) imagery has proved to be particularly useful. Radar sensors provide valuable information on geological structure and lithology, by giving geologists data that characterize the geomorphological landscape. The use of radar imagery constitutes a very useful complement to optical images, especially as regards structure. In desert areas, radar waves penetrate the dry surface sand layer and highlight concealed geological structures or fossil river systems [6,10,11, 16–18,20,21].

This work was designed to compare the contribution to geological exploration of radar and optical images at a study area in the Akjoujt region of Mauritania. We first drew up an inventory of what one can legitimately expect from radar remote sensing in terms of geological mapping (wavelength and polarization effects). The radar images used in this study are derived from the SIR-C/X-SAR sensors (experimental radar imaging system, 1994 mission), characterized by three wavelengths (3 cm for X-SAR, 6 cm and 23 cm for SIR-C) and three polarizations (HH and HV for SIR-C, VV for X-SAR). The resulting optical images were acquired by the ASTER sensor (experimental radiometer launched at the end of 1999) with 14 wavelengths ranging from visible to thermal in-

frared (September 2000 and March 2001). The Ground Penetrating Radar (GPR) technique was also used to validate the detection of underground structures identified on the radar satellite images. The advantage of this technique, against traditional trenching surveys [21], is that it is possible to compare the SAR and GPR signals in the hope of characterizing the dielectric properties of the medium.

Three representative sites (Fig. 1) were selected in the southwestern part of the Precambrian Reguibat Shield (an autochthonous domain) at the boundary with tectonic units of the Mauritanides chain (an allochthonous domain). At the first site, located at the southern end of the Amsaga area, the Archean basement is composed of migmatitic gneiss and granite belonging to the Rag el Abiod migmatitic complex [2]. This basement is cut by basic dolerite veins belonging to several cycles of various ages (Palaeoproterozoic, Mesoproterozoic, Neoproterozoic, and Mesozoic). The second site is located in sedimentary formations made up of Cambrian–Ordovician units, near an ESE–WNW-trending tectonic contact that corresponds to the boundary between the autochthonous units in the north and the para-autochthonous and allochthonous units in the south. The third site, located some 20 km west of the second, corresponds to a partially sand-covered wadi environment. A field survey of the three sites was carried out in 2003, with the aim of confirming the results of the satellite observations.

Figs. 2–4 illustrate the responses of radar (SIR-C, X-SAR) and optical (ASTER) sensors over the three study sites. For sites 1 and 2, we note a good mapping of surface structures represented by a significant surface roughness (presence of pebbles and micro-relief), with the radar signal increasing strongly with surface roughness. The results confirm the fact that the sensitivity of the radar signal to surface roughness increases with wavelength. For this reason, the results obtained with the SIR-C sensor are better in the L-band (23 cm) than in the C-band (6 cm). The X-band (3 cm) of the X-SAR sensor appears unsuitable, owing to its very weak signal dynamics. Although discrimination is better in HH polarization than in HV polarization, using the C-band, the polarization effect does not seem to be

crucial. Optical imagery offers a low mapping potential when compared with L- or C-band radar images. In fact, the linear dykes are not detected by the optical images. Similarly, the circular structures at the second site are hard to interpret on the optical images.

At site 3, we observe a strong backscattering from the river bed. This strong response is due neither to surface roughness nor to the presence of moisture: in fact, the surface is very smooth, and covered with fine sand. This response may be due to a volume scattering caused by subsurface penetration of the radar wave (into the sand layer). To confirm the volume-related origin of the backscattering, geological radar or GPR (Ground Penetrating Radar) is a useful geophysical tool because it enables the local detection and mapping of structures concealed by the sand. The confirmation technique consists in correlating the reflectivity of the GPR section with the backscattering of the radar image [11]. Fig. 5 compares two parameters calculated from these two types of measurement: the backscattering σ_0 obtained from the LHH-band of the SIR-C image, and the reflected power P_w calculated from the L-band GPR signal. Since their level of correlation is satisfactory, we thereby conclude that the origin of the backscattering lies within the surficial 50 cm, as indicated by the GPR. This information was also confirmed in the field by examining the types of deposit present. Beneath the layer of aeolian sand, a few centimetres thick, the deposits are clayey and contain grains of millimetre size. At the place where the greatest backscattering was observed, the grains reach centimetre size. Therefore, this layer must indeed be responsible for the observed signal.

Thus spatial techniques, and especially radar imagery, have clearly demonstrated their capacity for high-precision detection of geological structures, whether they are vein-type, lithological, or palaeohydrogeological in nature. Their value is evident for arid environments, where outcrops can be distinguished on the basis of their specific roughness, and concealed structures on the basis of the volume and/or subsurface backscattering that they generate. The numerous veins mapped in the Akjoujt region using SAR images (Fig. 6) provide an invaluable contribution to the current geological map. In addition, they allow geological structures seen at specific locations on the ground to be integrated into a comprehensive interpretation.

The L-band ALOS radar sensor, with its launching scheduled for 2005 (Japan), should constitute a useful tool for geological mapping. This sensor no doubt has a better potential than that of other C-band sensors, such as ERS-1/2, RADARSAT-1, ASAR of ENVISAT, and RADARSAT-2 (scheduled for 2006). However, geologists should not hold out too much hope in terms of a mapping aid for the X-band Cosmo-Skymed radar system developed as part of the ORFEO programme and scheduled for launching in 2006.

1. Introduction

La prospection des ressources naturelles passe inévitablement par la cartographie des formations géologiques qui constituent le sous-sol. Cette cartographie implique la reconnaissance et la caractérisation d'un maximum d'affleurements susceptibles d'apporter des renseignements quant à la nature de ces formations. Dans certains contextes géographiques et géomorphologiques, ces affleurements sont parfois peu nombreux et/ou très dispersés, ce qui complique la tâche du géologue en charge de l'établissement de la carte. L'imagerie satellitaire constitue donc pour le géologue un outil très important – et parfois indispensable – pour optimiser le temps passé sur le terrain, tout en améliorant d'une façon très sensible la précision du document cartographique final.

En contexte aride, la télédétection spatiale permet de mettre en évidence la plupart des grandes structures géologiques (linéaments, contacts lithologiques, failles) et d'obtenir de précieuses indications structurales (par exemple trajectoires de schistosité ou de foliation). De nombreuses études ont en effet montré l'intérêt des capteurs radar et optique pour l'exploration géologique et minière [6,12,14,18,19]. Les satellites SPOT et LANDSAT ont joué un rôle catalyseur dans cette application. Depuis quelques années, de nombreux capteurs expérimentaux et commerciaux ont été lancés et l'accès à l'image a été facilité et s'est démocratisé. Ces nouveaux capteurs haute résolution sont équipés d'instruments imageurs riches en informations spectrales et radiométriques (ASTER, HYPERION...), ce qui permet d'améliorer l'interprétation géologique. De même, l'apport de l'imagerie radar s'est révélé particulièrement utile : dans les régions désertiques, l'onde radar pénètre la couche de sable sec et fait apparaître des structures géolo-

giques enfouies et des réseaux hydrographiques fossiles. Cette profondeur de pénétration, qui va de 1 à 2 m, est dépendante de la longueur d'onde et de la constante diélectrique du milieu [10,16,17,20,21]. Les capteurs radar actifs (SAR) génèrent un signal qu'ils émettent en direction de la cible et sont indépendants des sources d'illumination extérieures. Ils sont ainsi opérationnels de jour comme de nuit et quelles que soient les conditions météorologiques, d'où l'appellation « capteurs tout temps ». Les longueurs d'onde utilisées vont de 1 à 70 cm (domaine des hyperfréquences), ce qui rend le signal radar insensible aux perturbations atmosphériques. Quant aux systèmes optiques, et contrairement aux radars, ils sont dépendants d'une source extérieure d'éclairement de la cible (soleil). Cette contrainte les rend utilisable seulement le jour et quand les conditions météorologiques sont bonnes (sans nuages). L'utilisation de l'imagerie radar constitue donc un complément très utile aux images optiques, surtout d'ordre structural.

Les principaux paramètres physiques du milieu qui influencent le signal radar sont la rugosité de surface et la constante diélectrique du milieu [24]. L'influence de la rugosité de surface d'une cible varie avec la configuration du radar. Une même surface apparaît d'autant plus rugueuse qu'elle est imagée avec une petite longueur d'onde, ou suivant un petit angle d'incidence. La réflexion est dite spéculaire quand le signal interagit avec une surface lisse. Dans ce cas, l'essentiel du signal est réfléchi dans une direction opposée à celle du radar et la radiométrie du pixel imagé est donc faible. Quand le signal interagit avec une surface rugueuse, on parle d'une réflexion diffuse. L'énergie du signal est réfléchiée dans toutes les directions, et en particulier dans la direction du radar. Le pixel imagé a donc une forte radiométrie. Enfin, on peut observer des réflexions multiples quand le signal est réfléchi entre plusieurs surfaces. Une grande partie du signal est renvoyée vers le capteur, ce qui correspond à une très forte radiométrie. La réflexion multiple est observée en présence des bâtiments, des reliefs, ou à la lisière des forêts. Le second paramètre physique qui influence le signal radar est la constante diélectrique de la surface, qui est fonction de l'humidité du sol. Dans le cas d'une cible humide, l'onde est atténuée à la surface. La diffusion de volume ne joue alors aucun rôle dans l'amplitude du signal rétrodiffusé, et c'est la diffusion de surface qui est dominante.

Notre étude a pour objectif de comparer les capteurs radar et optique pour l'exploration géologique sur un site d'étude en Mauritanie, dans le cadre d'un projet de levé géologique. Le but est de réaliser un inventaire de ce qu'il est actuellement légitime d'attendre de la télédétection radar (effet de la longueur d'onde et de la polarisation) pour l'exploration géologique en zones arides ou semi-arides. Le contexte géologique sera exposé avant d'étudier en détail trois sites d'étude. Ceux-ci seront analysés grâce à plusieurs types de données satellites, optique et radar. Un radar géologique GPR (*Ground Penetrating Radar*) a également été utilisé pour valider la détection des structures enfouies reconnues sur les images satellitaires radars. L'avantage de cette technique par rapport aux traditionnelles tranchées de reconnaissance [21] est qu'elle permet de comparer deux signaux – SAR et GPR – issus de l'interaction de l'onde radar avec le milieu, et donc de caractériser le comportement diélectrique de ce dernier. Une discussion sur les potentialités de ces données en tant qu'aide à la cartographie des régions arides clôturera ce travail.

2. Contexte géologique régional

Le craton d'Afrique de l'Ouest correspond à un domaine d'environ 4 500 000 km², constitué de terrains archéens et paléoprotozoïques. Au nord, ce craton disparaît sous les sédiments du bassin de Tindouf. À l'ouest, il est limité par les chaînes panafricaines et hercyniennes des Rokelides, des Bassarides et des Mauritanides [22]. Au centre, il est recouvert par les sédiments néoprotozoïques et paléozoïques du bassin de Taoudeni, qui isolent deux dorsales, l'une, au sud, correspondant à la dorsale de Léo, la seconde, au nord, correspondant à la dorsale Rgueibat. La croûte archéenne du craton ouest-africain a été édifiée, déformée et métamorphisée dans des conditions métamorphiques de moyen à haut grade, pendant les cycles pré-léonien (~3500 Ma) [23], léonien (~2900–3000 Ma) et libérien (~2700–2800 Ma) [3,13,23]. Les formations paléoprotozoïques correspondent, pour une large part, à des roches sédimentaires et volcaniques birimiennes affectées vers 2,1 Ga par un événement thermo-tectonique majeur (orogénèse éburnéenne) associé à un épisode de formation de croûte continentale juvénile [1,4,8,9,13,15].

3. Zone d'étude et données disponibles

Une zone d'étude a été choisie dans le Nord de la Mauritanie (région d'Akjoujt) de part et d'autre et au niveau de la limite entre la partie sud-occidentale de la dorsale Rgueïbat (domaine autochtone) et les unités tectoniques de la chaîne des Mauritanides (domaine allochtone). Trois sites ont été sélectionnés pour leur intérêt géologique et cartographique : (1) site de filons avec des effets de surface, (2) site contenant des structures géométriquement complexes avec des effets de surface, et (3) site d'un ancien lit de rivière illustrant des effets de pénétration. La Fig. 1 montre la localisation des trois sites étudiés sur une carte géologique simplifiée de la zone (d'après [5]).

Le site 1 est localisé dans l'extrémité méridionale de l'Amsaga. Le substratum archéen y est constitué par des gneiss migmatitiques et par des granites (Toujennjert, Ioulguend) appartenant au complexe migmatitique du Rag el Abiod [2]. Ce substratum est recoupé par des filons basiques doléritiques susceptibles a priori d'appartenir à un ou plusieurs cycles magmatiques d'âge(s) indéterminé(s) (Paléoprotéro-

zoïque, Mésoprotérozoïque, Néoprotérozoïque, Paléozoïque, Mésozoïque). En Mauritanie, la mise en place des filons basiques les plus récents est classiquement rapportée à l'ouverture de l'Atlantique central au cours du Mésozoïque (~200 Ma) [7]. Ces filons, relativement jeunes, constituent de grands sillons dans les formations sédimentaires du Hank. Les directions principales des filons (NNE–SSW et ENE–WSW) se retrouvent dans la plupart des filons basiques identifiés dans le socle de l'Amsaga, laissant donc supposer pour ces structures un âge Mésozoïque. Cependant, Barrère [2] considère la plupart de ces filons basiques comme antécambriens, car recouverts, du moins localement, par les formations sédimentaires infracambriennes du bassin de Taoudeni [2].

Les unités cambro-ordoviciennes qui constituent dans l'Amsaga la couverture sédimentaire des terrains archéens sont affectées sur leurs bordures sud et ouest par la mise en place des nappes les plus externes de la chaîne des Mauritanides. Le second site étudié est situé au niveau de cette bordure tectonisée, à proximité immédiate d'un contact anormal entre les formations sédimentaires autochtones

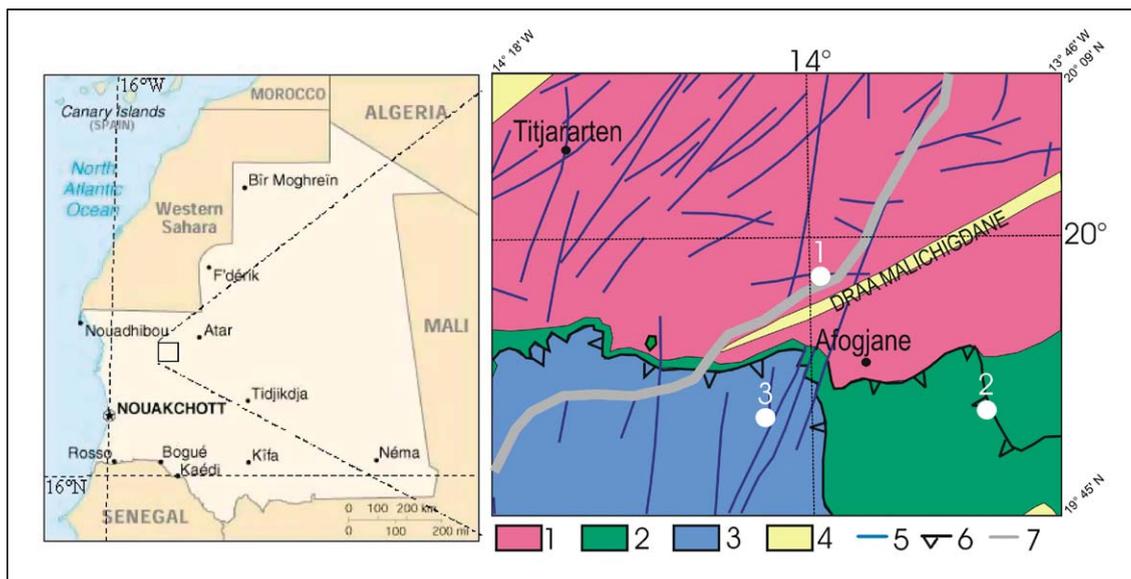


Fig. 1. Localisation des trois sites d'étude (proches d'Akjoujt) sur la carte géologique simplifiée de la zone (d'après [5], modifiée). 1 : Socle archéen de la dorsale Rgueïbat. 2 : Couverture sédimentaire néoprotérozoïque à paléozoïque inférieur (bassin de Taoudeni). 3 : Unités allochtones indifférenciées de la chaîne des Mauritanides. 4 : Cordons dunaires. 5 : Complexe filonien. 6 : Principaux contacts chevauchants. 7 : Route.

Fig. 1. Locations of the three study sites in the vicinity of Akjoujt, on a simplified geological map of the area (after [5], modified). 1: Archean basement of the Reguibat Shield. 2: Neoproterozoic to Early Palaeozoic sedimentary cover (Taoudeni Basin). 3: Undifferentiated allochthonous units of the Mauritanides chain. 4: Dune ridges. 5: Vein complex. 6: Main thrust contacts. 7: Road.

(à l'est) et celles impliquées dans la structuration du domaine le plus externe de la chaîne des Mauritanides (à l'ouest).

Le troisième site est situé à une vingtaine de kilomètres à l'ouest du site 2. Il correspond à un environnement d'oued pro parte ensablé.

Les images satellitaires qui ont été analysées dans cette étude sont issues des capteurs SIR-C/X-SAR (radars imageurs expérimentaux embarqués sur la navette spatiale américaine Endeavour lors de deux missions en 1994), et ASTER (radiomètre installé sur le satellite Terra). Les images radar sont acquises aux trois longueurs d'onde 3 cm (X-SAR), 6 cm (SIR-C) et 23 cm (SIR-C), avec une incidence de 36°. De même, on retrouve les trois polarisations HH (SIR-C), HV (SIR-C) et VV (X-SAR). Les images optiques sont issues du capteur ASTER avec ses 14 longueurs d'onde du visible à l'infrarouge thermique (septembre 2000 et mars 2001). Une campagne de terrain a eu lieu en 2003

sur les trois sites préalablement choisis dans le but de confirmer les informations extraites des observations satellitaires.

Quelques prétraitements ont été réalisés sur les images dans le but de les rendre exploitables pour l'interprétation et l'analyse. Dans un premier temps, les images radar ont été calibrées radiométriquement, en transformant l'amplitude du signal en coefficient de rétrodiffusion (σ_0). Ensuite, les images radar et optique ont été géoréférencées dans le système géodésique UTM à l'aide des cartes topographiques au 1:200 000 disponibles sur la zone d'étude et des points GPS collectés lors de la campagne terrain.

Les données GPR ont été acquises par le système SIR-3000 le long de plusieurs profils en utilisant les antennes 500 et 900 MHz. Le traitement a été effectué grâce à un logiciel développé au BRGM (filtres fréquentiel et spatial, compensation des amplitudes, moyennage, etc.).

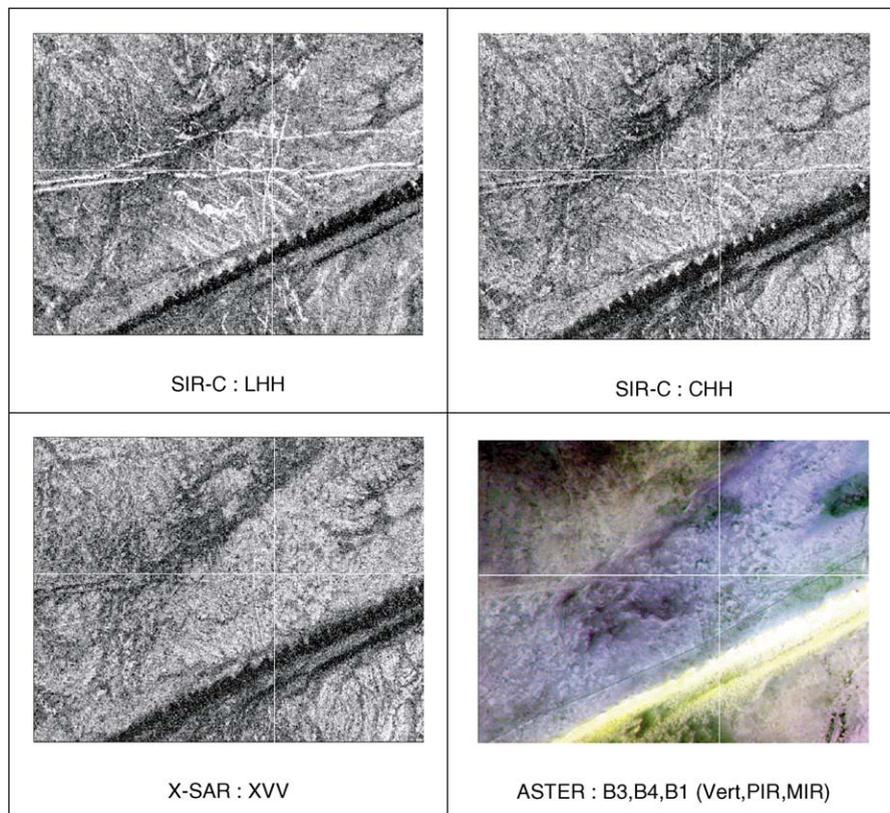


Fig. 2. Comparaison entre images SIR-C, X-SAR et ASTER sur le site 1 caractérisé par des dykes; échelle : \sim 1:200 000.

Fig. 2. Comparison between SIR-C, X-SAR, and ASTER images of Site 1, characterized by dykes; \sim 1:200 000 scale.

4. Apport de l'imagerie radar et comparaison avec l'imagerie optique

Une comparaison de l'apport intrinsèque des bandes radar et des données optiques a été réalisée sur les trois sites tests (Figs. 2–4). Pour les sites 1 et 2, on observe une bonne cartographie des structures de surface, représentées par une rugosité de surface importante (présence de cailloux/microrelief). Le signal radar augmente fortement avec la rugosité de surface. Les résultats confirment le fait que la sensibilité du signal radar vis-à-vis de la rugosité de surface augmente avec la longueur d'onde. De ce fait, les résultats obtenus avec le capteur SIR-C sont meilleurs en bande L qu'en bande C. La bande X du capteur X-SAR ne semble pas appropriée, avec une dynamique du si-

gnal très faible. L'effet de la polarisation ne semble pas être primordial, même si, en bande C, on constate une meilleure discrimination en polarisation HH qu'en polarisation HV. L'imagerie optique montre un faible potentiel de cartographie comparativement aux images radar en bandes L ou C. En effet, les structures linéaires des dykes ne sont pas détectées sur les images ASTER. De même, les structures circulaires du site 2 sont difficilement interprétables sur l'image ASTER.

Sur le site 3, on observe une forte rétrodiffusion au niveau du lit de l'oued, qui doit couler occasionnellement une fois tous les 5 ou 10 ans et après une forte pluie. Cette forte réponse n'est due, ni à une forte rugosité de surface, ni à une surface plus humide. En effet, la surface est très lisse et couverte de sable fin. On explique ce signal par une probable diffusion de

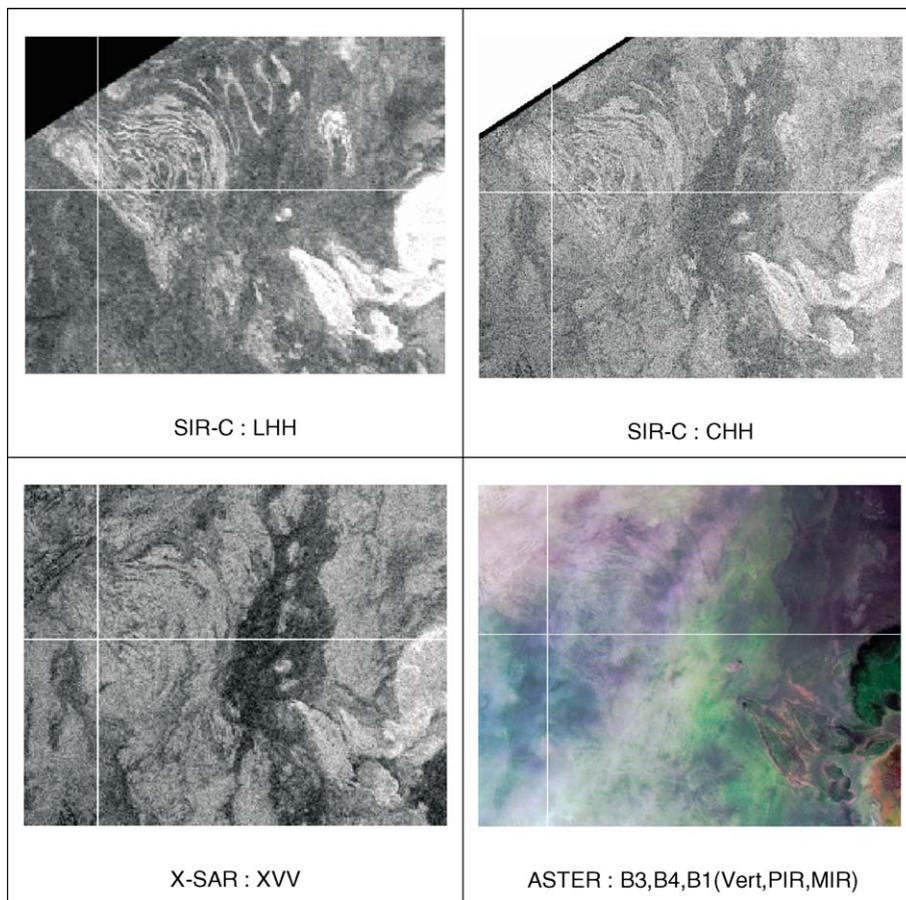


Fig. 3. Comparaison entre images SIR-C, X-SAR et ASTER sur le site 2 caractérisé par des filons circulaires, échelle : $\sim 1:200\,000$.

Fig. 3. Comparison between SIR-C, X-SAR, and ASTER images of Site 2, characterized by circular veins; $\sim 1:200\,000$ scale.

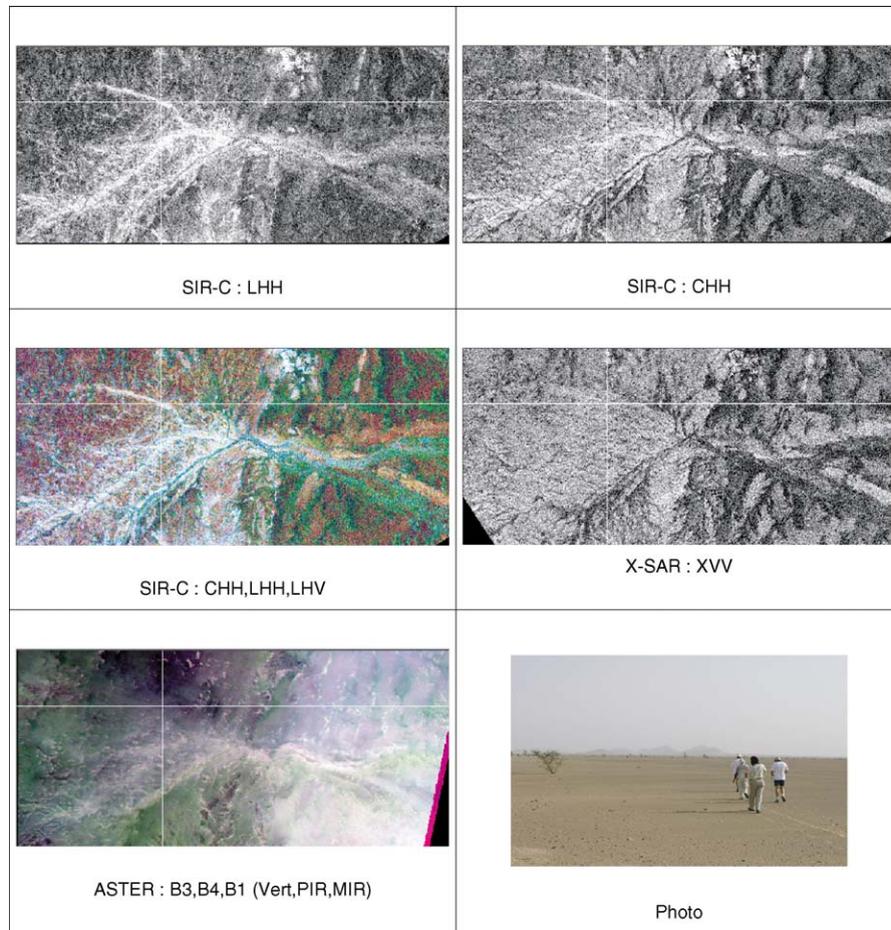


Fig. 4. Comparaison entre images SIR-C, X-SAR, et ASTER sur un ancien lit de rivière (site 3), échelle : $\sim 1:200\,000$.

Fig. 4. Comparison between SIR-C, X-SAR, and ASTER images of an ancient river bed (Site 3); $\sim 1:200\,000$ scale.

volume causée par la pénétration de l'onde radar au sein de la sub-surface (couche de sable). Pour valider l'origine volumique de la rétrodiffusion, le radar géologique GPR (*Ground Penetrating Radar*) est alors un bon moyen géophysique permettant de détecter et de cartographier ces structures enfouies sous le sable. La technique de validation consiste à corrélérer la réflectivité de la section GPR avec la rétrodiffusion de l'image radar [17]. La Fig. 5 compare deux paramètres calculés à partir de ces deux types de mesure, la rétrodiffusion σ_0 issue de l'image SIR-C en bande LHH et la puissance réfléchie P_w calculée à partir du signal GPR en bande L [11]. Leur degré de corrélation étant satisfaisant, on en déduit que l'origine de la rétrodiffusion provient de l'espace 0–50 cm sous la surface,

comme l'a détecté le GPR. Cette information a été aussi localement vérifiée en analysant les types de dépôt présents. Sous la couche de sable éolien, épaisse de quelques centimètres, les dépôts sont argileux et contiennent des grains d'une granulométrie millimétrique. À l'endroit où la rétrodiffusion maximum est observée, la taille de ces grains atteint le centimètre. C'est donc bien cette couche qui est à l'origine du signal observé.

5. Discussion et conclusion

Les données collectées au niveau du site 1 confirment la présence de nombreux corps filoniens (Fig. 6).

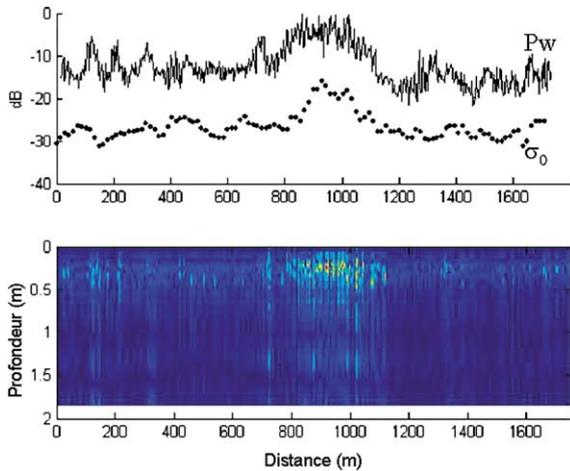


Fig. 5. Comparaison du coefficient de rétrodiffusion σ_0 provenant de l'image radar SIR-C en bande L et en polarisation HH (cf. Fig. 4) et de la puissance réfléchie P_w calculée à partir de la section GPR. Leur forte corrélation relative démontre que la rétrodiffusion a une origine située dans les premiers 50 cm de la subsurface. La profondeur a été calculée pour une vitesse de propagation de $0,12 \text{ m ns}^{-1}$.

Fig. 5. Comparison of the backscattering coefficient σ_0 from an SIR-C radar image in L-band and HH polarization (cf. Fig. 4) and the reflected power P_w calculated from the GPR section. Their strong relative correlation shows that the backscattering originates in the uppermost 50 cm. The depth was calculated for a propagation velocity of 0.12 m ns^{-1} .

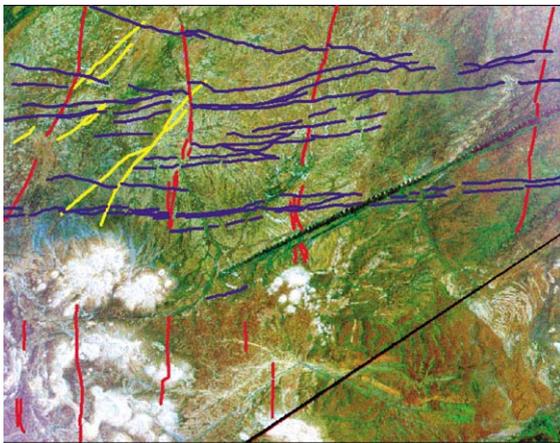


Fig. 6. Carte des principaux filons extraits à partir de l'image radar SIR-C : échelle : $\sim 1:400\,000$.

Fig. 6. Map of the principal veins extracted from the SIR-C radar image; $\sim 1:400\,000$ scale.

Ces filons appartiennent essentiellement à deux familles, orientées est–ouest et nord–sud (à NNE–SSW). Dans ce type d'environnement, l'imagerie radar a per-

mis de déterminer le prolongement de structures filoniennes identifiées uniquement de façon ponctuelle sur le terrain, de dénombrer très précisément ces structures et d'identifier des corps filoniens parfois masqués par des formations superficielles. Les résultats obtenus permettent de se faire une idée extrêmement précise du degré de fracturation du socle archéen et de la densité des filons qui recourent ce socle. Les filons orientés est–ouest sont les plus nombreux. Ils recourent les terrains les plus anciens (domaine archéen de l'Amsaga), mais n'ont pas été identifiés dans les unités allochtones de la chaîne des Mauritanides. Dans le site étudié, les caractéristiques de ces filons est–ouest ne permettent pas de contraindre efficacement l'âge de leur mise en place. Les filons orientés nord–sud sont moins nombreux, mais plus intéressants, car ils recourent le contact de base des unités allochtones. Ce point semble en lui-même être suffisant pour démontrer l'âge Mésozoïque de ces filons. Au niveau du site 2, les formations qui affleurent correspondent à des grès quartzitiques, dans lesquels on reconnaît encore des laminations millimétriques à infra-millimétriques. Ces grès quartzitiques constituent un faciès pétrographique relativement résistant, peu sensible à l'érosion, mais localement affectés par des plis. Sur le site 3, les effets de pénétrations ont été validés par le radar géologique.

Au travers de ces trois exemples, on précise l'intérêt de l'imagerie radar pour la cartographie géologique en zones arides. D'une part, cet outil s'avère efficace dans la localisation a priori des affleurements devant être visités par le géologue, ceci permettant d'optimiser les campagnes terrain. D'autre part, l'imagerie radar offre un moyen rapide et précis de cartographier les structures de surface, caractérisées par une forte rugosité par rapport à leur encaissant. Enfin, cet outil peut aussi être utile dans la détection de structures enfouies sous une faible couche de sable, tels les paléo-chenaux hérités d'une ancienne activité fluviale.

Le lancement prochain (2005) du capteur radar ALOS en bande L (Japon) devra nous fournir un bon outil spatial pour la cartographie géologique. Ce capteur aura sans doute un meilleur potentiel que les capteurs ERS-1/2, RADARSAT-1, ASAR d'ENVISAT, RADARSAT-2 (prévu en 2006), tous en bande C. L'arrivée prochaine du système radar Cosmo-Skymed (prévu en 2006), fonctionnant en bande X et développé dans le cadre du programme franco-italien ORFEO, ne

devrait pas être d'un grand intérêt pour la communauté des géologues.

Remerciements

Cet article a été réalisé dans le cadre d'une étude financée par le BRGM (Bureau de recherches géologiques et minières) et le PNTS (Programme national de télédétection spatiale). Les auteurs remercient MM. Jean Marie Vagneron (BRGM) et Samory Soueidatt (ministère mauritanien des Mines et de l'Industrie) pour leur soutien logistique.

Références

- [1] W. Abouchami, M. Boher, A. Michard, F. Albarède, A major 2.1-Ga-old event of mafic magmatism in West Africa: an early stage of crustal accretion, *J. Geophys. Res.* 95 (B11) 17 (1990) 605–629.
- [2] J. Barrère, Le groupe précambrien de l'Amsaga entre Atar et Akjoujt (Mauritanie), Étude d'un métamorphisme profond et de ses relations avec la migmatisation, *Mém. BRGM n° 42*, 1967, 275 p.
- [3] R.D. Beckinsale, N.H. Gale, R.J. Pankhurst, A. MacFarlane, M.J. Crow, J.W. Arthurs, A.F. Wilkinson, Discordant Rb–Sr and Pb–Pb whole rock isochron ages for the Archean basement of Sierra Leone, *Precambrian Res.* 13 (1980) 63–76.
- [4] M. Boher, W. Abouchami, A. Michard, F. Albarède, N. Arndt, Crustal growth in West Africa at 2.1 Ga, *J. Geophys. Res.* 97 (1992) 345–369.
- [5] BRGM, Carte géologique de la république islamique de Mauritanie, échelle 1:1 000 000, 1968.
- [6] P.A. Davis, C.S. Breed, J.F. McCauley, G.G. Schaber, Surficial geology of the Safsaf region, south-central Egypt, derived from remote-sensing and field data, *Remote Sens. Environ.* 46 (2) (1993) 183–203.
- [7] K. Deckart, G. Féraud, H. Bertrand, Age of Jurassic continental tholeiites of French Guyana, Surinam and Guinea: Implications for the initial opening of the Central Atlantic Ocean, *Earth Planet. Sci. Lett.* 150 (1997) 205–220.
- [8] S. Doumbia, A. Pouclet, A. Kouamelan, J.-J. Peucat, M. Vidal, C. Delor, Petrogenesis of juvenile-type Birimian (Paleo-Proterozoic) granitoids in Central Côte-d'Ivoire, West Africa: geochemistry and geochronology, *Precambrian Res.* 87 (1998) 33–63.
- [9] E. Egal, D. Thiéblemont, D. Lahondère, C. Guerrot, C.A. Costea, D. Iliescu, C. Delor, J.-C. Goujou, J.-M. Lafon, M. Tegye, S. Diaby, P. Kolie, Late Eburnean granitization and tectonics along the western and northwestern margin of the Archean Kénéma-Man domain (Guinea, West African Craton), *Precambrian Res.* 117 (2002) 57–84.
- [10] T.G. Farr, C. Elachi, P. Hartl, K. Chowdhury, Microwave penetration and attenuation in desert soils: a field experiment with the Shuttle imaging radar, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 24 (4) (1986) 590–594.
- [11] G. Grandjean, P. Paillou, D. Dubois, T. August-Benex, N. Baghdadi, J. Achache, Subsurface structures detection by combining L-band polarimetric SAR and GPR data: an example of the Pyla dune (France), *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 39 (6) (2001) 1245–1258.
- [12] B.E. Hubbard, J.K. Crowley, D.R. Zimelman, Comparative alteration mineral mapping using visible to shortwave infrared (0.4–2.4 μm) Hyperion, ALI, and ASTER imagery, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 41 (6) (2003) 1401–1410.
- [13] A.N. Kouamelan, C. Delor, J.-J. Peucat, Geochronological evidence for reworking of Archean terrains during the Early Proterozoic (2.1 Ga) in the western Côte-d'Ivoire (Man Rise, West African Craton), *Precambrian Res.* 86 (1997) 177–199.
- [14] F.A. Kruse, J.W. Boardman, J.F. Huntington, Comparison of airborne hyperspectral data and EO-1 Hyperion for mineral mapping, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 41 (6) (2003) 1388–1400.
- [15] D. Lahondère, D. Thiéblemont, J.-C. Goujou, J. Roger, A. Moussine-Pouchkine, J. Le Métour, A. Cocherie, C. Guerrot, Notice explicative des cartes géologiques et géologiques à 1:200 000 et 1:500 000 du Nord de la Mauritanie, vol. 1, Direction des Mines et de la Géologie, Ministère des Mines et de l'Industrie, Nouakchott, Mauritanie, 2003, 434 p.
- [16] N. Lancaster, G.G. Schaber, J.T. Teller, Orbital radar studies of paleodrainages in the central Namib desert, *Remote Sens. Environ.* 71 (2) (2000) 216–225.
- [17] P. Paillou, G. Grandjean, N. Baghdadi, E. Heggy, T. August-Benex, J. Achache, Subsurface imaging in South-Central Egypt using low-frequency radar: Bir-Safsaf revisited, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 41 (7) (2003) 1672–1684.
- [18] C. Robinson, F. El Baz, V. Singhroy, Subsurface imaging by RADARSAT: Comparison with Landsat TM data and implications for groundwater in the Selima area, Northwestern Sudan, *Can. J. Remote Sens.* 29 (3) (1999) 268–277.
- [19] R. Saint-Jean, V. Singhroy, S.M. Khalifa, Geological interpretation of the integrated SAR images in the Azraq area of Jordan, *Can. J. Remote Sens.* 21 (4) (1996) 511–517.
- [20] G.G. Schaber, J.F. McCauley, C.S. Breed, G.R. Olhoeft, Shuttle imaging radar: physical controls on signal penetration and subsurface scattering in the eastern Sahara, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 24 (4) (1986) 603–623.
- [21] G.G. Schaber, J.F. McCauley, C.S. Breed, The use of multifrequency and polarimetric SIR-C/X-SAR data in geologic studies of Bir-Safsaf, Egypt, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 59 (1997) 337–363.
- [22] J. Sougy, West African fold belt, *Geol. Soc. Am. Bull.* 73 (1962) 871–876.
- [23] D. Thiéblemont, C. Delor, A. Cocherie, J.-M. Lafon, J.-C. Goujou, A. Baldé, M. Bah, H. Sané, C.M. Fanning, A 3.5-Ga granite–gneiss basement in Guinea: further evidence for early Archean accretion within the West African Craton, *Precambrian Res.* 108 (2001) 179–194.
- [24] F.T. Ulaby, P.B. Batlivala, M.C. Dobson, Microwave backscatter dependence on surface roughness, soil moisture and soil texture: Part I – Bare soil, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 16 (1978) 286–295.