Télédétection, 2001, Vol. 2, n° 2, p. 119-127
Des tirés à part sont disponibles auprès de l'éditeur
Droit de photocopie soumis à l'autorisation

© 2001 CONTEMPORARY PUBLISHING INTERNATIONAL
Publié sous l'enseigne *GB Science Publisher*
Imprimé en France

Fusion d'images optique et radar : application à la cartographie du massif granitique de Bambadji (Falémé, Sénégal oriental)

SOULEYE WADE[a*], AMINATA NDOYE[a] et MASSAER MBAYE[b]

[a] *Institut des Sciences de la Terre, Faculté des Sciences et Techniques, Université Cheikh Anta Diop, B.P. 5396 Dakar-Fann (Sénégal). Téléphone : (221) 825 25 30 ; télécopieur : (221) 824 63 18 ; courriel : wsouleye@ucad.sn ou souleye.wade@ird.sn*
[b] *Centre de Suivi Écologique, B.P. 15 532, Dakar-Fann (Sénégal) ; Téléphone : (221) 825 80 66/825 80 67 ; télécopieur : (221) 825 81 68 ; courriel : massaer@cse.sn*

(soumis le 28 avril 2000 ; révisé le 28 juillet 2000 ; accepté le 11 décembre 2000)

Les données satellitales sont une source importante d'information géologique pour la cartographie lithostructurale et la prospection minière. Si les images optiques multispectrales permettent de discriminer différentes lithologies sur la base de leurs signatures spectrales, les images radar, grâce à leur grande sensibilité à la rugosité de surface, sont plutôt appropriées pour la cartographie structurale. Pour produire une image qui combine ces deux types d'information, nous avons testé sur des données optiques TM de Landsat et des données radar du capteur RSO de ERS-1 couvrant le massif granitique de Bambadji au Sénégal, deux techniques de fusion d'images parmi les plus utilisées, soit l'analyse en composantes principales (ACP) et les transformations dans l'espace intensité, teinte, saturation (ITS). Cette dernière technique qui s'est avérée plus performante est présentée ici. Elle donne la possibilité de pondérer la contribution du radar dans l'image résultante. L'interprétation visuelle de l'image de la fusion permet de préciser les contours cartographiques du massif granitique de Bambadji, d'avoir une image plus nette de sa fracturation et de proposer des zones favorables à la prospection du fer et de l'or. Les résultats obtenus montrent qu'il est possible d'optimiser la cartographie lithostructurale et la prospection minière dans des régions de socle à importante couverture latéritique, comme le Sénégal oriental, en complétant les méthodes classiques d'investigation par l'interprétation visuelle d'images de fusion des données TM et du RSO.

Mots-clefs : TM de Landsat, radar à synthèse d'ouverture (RSO) ; fusion d'images ; massif granitique de Bambadji ; cartographie lithostructurale ; prospection minière.

Optic and radar image fusion : application to the mapping of the Bambadji granite massif (Falémé, south-east Sénégal)

Satellite data constitute an important source of information for lithostructural mapping and mineral exploration. If multispectral optical images help in discriminating different lithologies according to their spectral signatures, satellite radar sensors with their great sensitivity to surface roughness, are rather suitable for structural mapping. In order to generate an image where the two types of information are combined, two of the most used image merging techniques namely the principal component analysis (PCA) and the intensity-hue-saturation (IHS) techniques have been tested on Landsat-TM and SAR ERS-1 data covering the Bambadji granite massif. The IHS merging technique which appeared as the most informative is presented in this paper. It allows weighting the radar contribution in the final merged image. The visual interpretation of this image has allowed us to map more precisely the Bambadji granite massif and its fracture pattern. It also has enabled us to propose potential zones for Fe and Au exploration. According to these results, it is possible to optimise lithostructural mapping and mineral exploration in regions characterised by an important lateritic cover, by completing the classical investigation techniques with visual interpretation of merged Landsat-TM and synthetic aperture radar (SAR) ERS images.

Keywords : Landsat-TM ; synthetic aperture radar (SAR) ; image merging technique ; Bambadji granite massif ; lithostructural mapping ; mineral exploration.

1. INTRODUCTION

La cartographie lithologique et structurale constitue un volet important des programmes de prospection minière. Elle est difficile à réaliser dans des régions comme le Sénégal oriental où le substratum rocheux est en grande partie masqué par une importante couverture latéritique et affleure d'une manière discontinue (Bassot, 1966). Dans de tels contextes, la photographie aérienne, la géophysique et la géochimie sont des outils communément utilisés pour une meilleure connaissance de la géologie de surface et de sous-surface. Depuis l'avènement de la télédétection aérospatiale au début des années 1970, les progrès réalisés dans le domaine du traitement

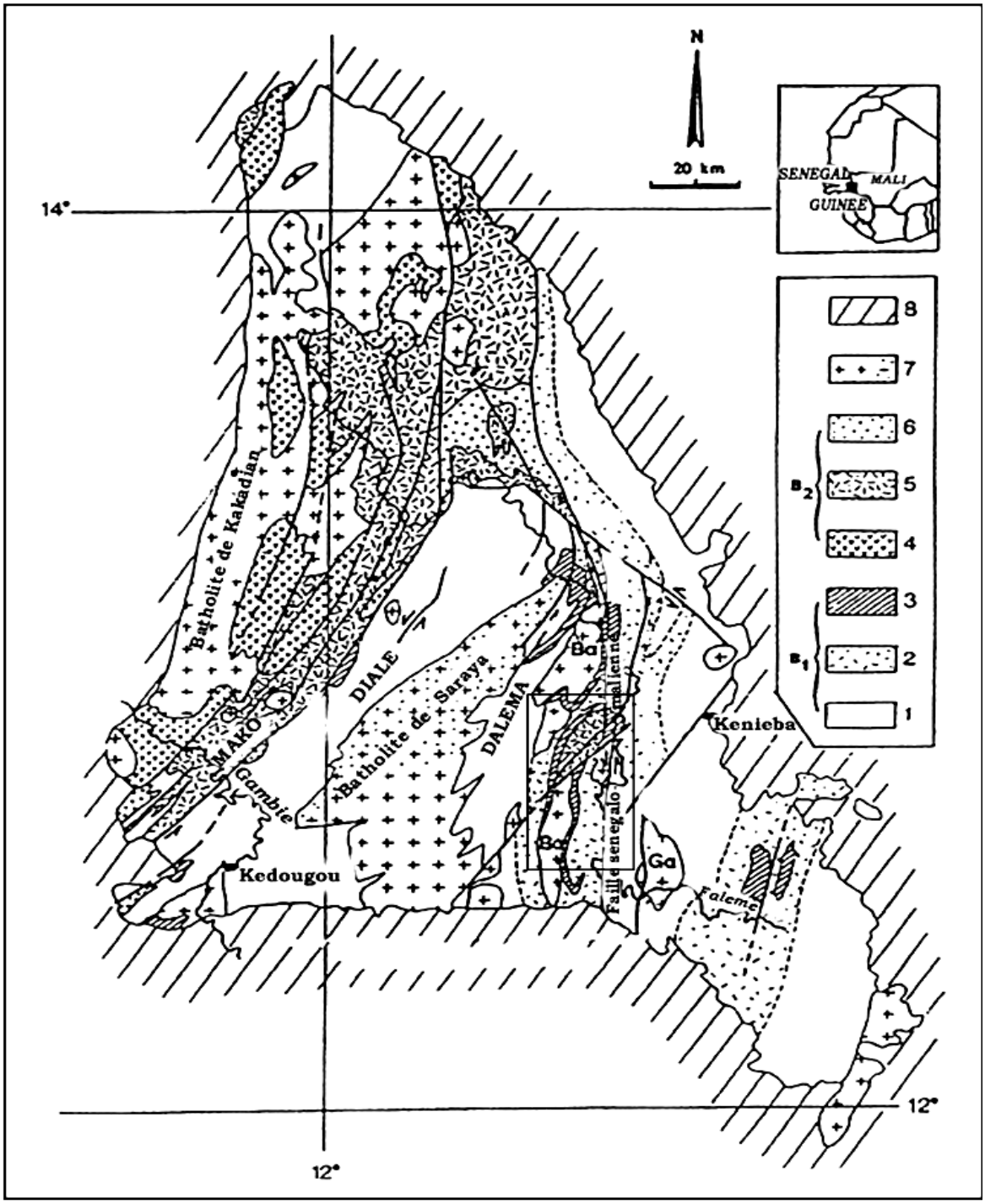
* Correspond principal

numérique des données satellitales ainsi que les possibilités offertes par les systèmes d'information géographique (SIG), les géologues disposent d'un nouvel outil qui complète la panoplie des méthodes d'investigations géologiques disponibles. Le capteur optico-mécanique Thematic Mapper (TM) du satellite Landsat produit des images dans 7 bandes spectrales, notamment 3 bandes du visible : TM1 (0,45-0,52 µm), TM2 (0,52-0,60 µm) et TM3 (0,63-0,69 µm) ; 1 bande du proche infrarouge : TM4 (0,76-0,90 µm) ; 2 bandes du moyen infrarouge : TM5 (1,55-1,75 µm) et TM7 (2,08-2,35 µm) et 1 bande de l'infrarouge thermique : TM6 (10,4-12,5 µm). Grâce à cette vaste fourchette spectrale, les données TM permettent d'accéder à l'information sur les caractéristiques minéralogiques des cibles géologiques. Les données micro-ondes du radar à synthèse d'ouverture (RSO) du satellite ERS-1 sont reconnues comme étant d'un grand potentiel pour les applications géologiques en général et pour la cartographie structurale en particulier. En effet, grâce à leur grande sensibilité aux caractéristiques de surface telles que la rugosité et l'humidité, les données radar sont particulièrement performantes pour la cartographie des structures linéaires indicatrices de failles, de fractures et de contacts lithologiques. La fusion des données de télédétection provenant de différentes régions du spectre électromagnétique est de plus en plus utilisée dans les études géologiques à cause de la complémentarité de l'information à laquelle elle permet d'accéder (Jaskolla *et al.*, 1985 ; Braux *et al.*, 1991 ; Yésou *et al.*, 1993b). Pour extraire et combiner l'information de nature spectrale qui provient du capteur optique TM et l'information de nature texturale qui provient du capteur RSO, la technique de fusion par transformations dans l'espace intensité-teinte-saturation (ITS) a été testée avec succès sur des données couvrant la zone du massif granitique de Bambadji au Sénégal oriental (Wade, 1996 ; NDoye, 1999). L'objectif de cette note est de présenter la technique de fusion par ITS, l'image résultante et les éléments cartographiques nouveaux qu'apporte son interprétation.

2. CONTEXTE GÉOLOGIQUE DU SITE D'ÉTUDE

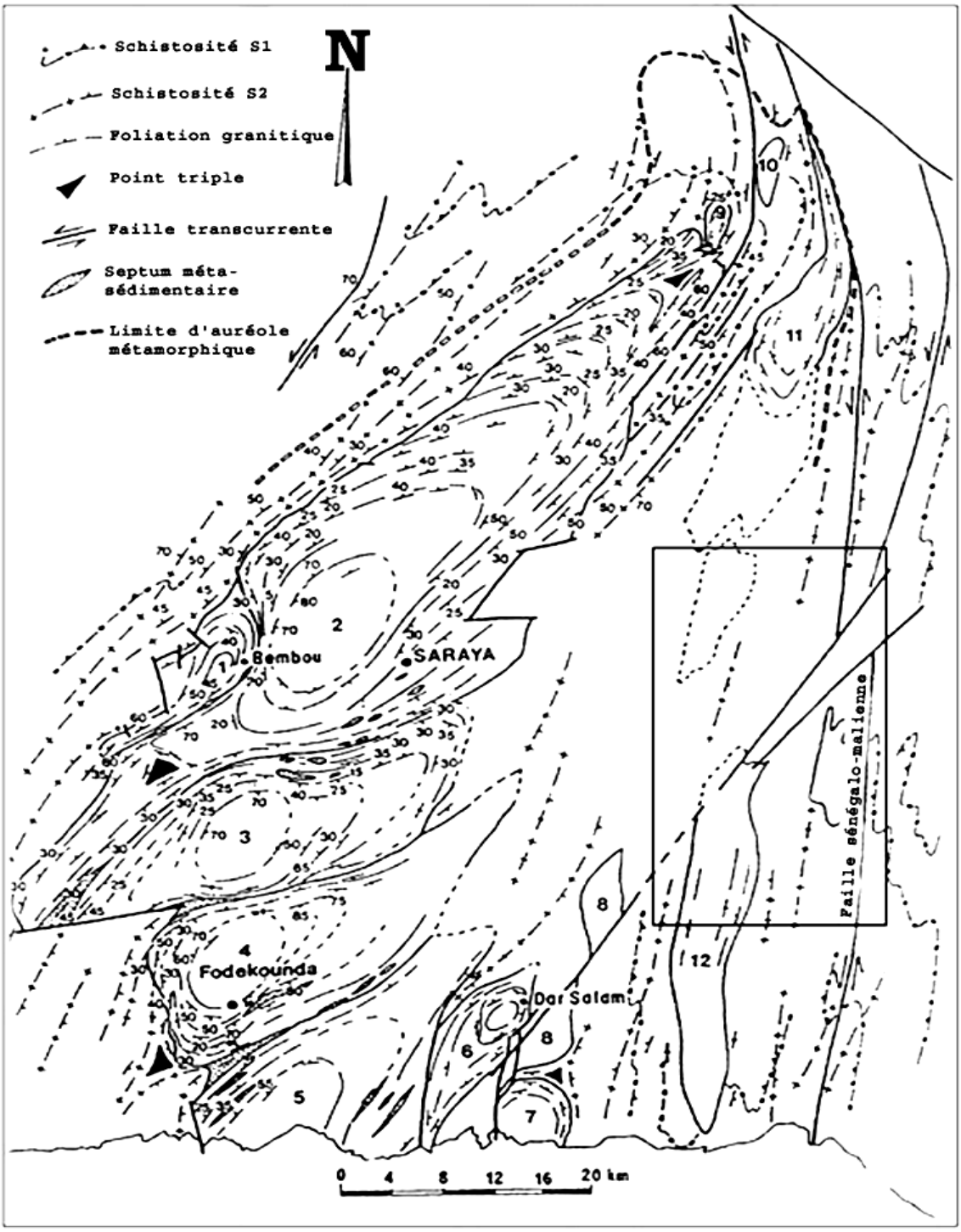
Le batholite de Boboti est un grand massif granodioritique syntectonique, intrusif dans les formations volcaniques et volcano-sédimentaires du Supergroupe de Dialé-Daléma qui, avec le Supergroupe de Mako, constituent les formations du Paléoprotérozoïque de la boutonnière de Kédougou-Kéniéba (figure 1).

Il est allongé approximativement nord-sud et s'étend sur 80 km de longueur et 20 km de largeur. Il était autrefois cartographié comme un seul et unique grand massif situé dans une zone d'intense aplatissement, bordée respectivement à l'ouest et à l'est par des failles cisaillantes majeures, la *Main Transcurrent Zone* (MTZ) et la faille sénégalo-malienne (Ledru *et al.*, 1991 ; Pons *et al.*, 1992). Dans le détail, il est en fait constitué de trois massifs de taille relativement modeste : le massif de Balangouma au nord, le massif de Bambadji au centre et le massif de Boboti au sens strict au sud (N'Diaye, 1994 ; N'Diaye *et al.*, 1997). Au sujet des minéralisations, le domaine d'extension du batholite est caractérisé par l'existence d'importants amas d'hématite et de magnétite qui forment des collines de fer réparties dans l'auréole de contact métamorphique du granite (Wade, 1985). Le minerai primaire profond est constitué de magnétite associée à des sulfures (pyrite, pyrhotine et chalcopyrite) et contenue dans des skarns magnésiens à diopside, trémolite-actinote, phlogopite et serpentine. En surface, dans la zone d'oxydation, il passe à un faciès à hématite (martite), goethite et limonite. Le mur de la minéralisation est toujours constitué par des calcaires métamorphiques ou cipolins. Les réserves s'élèvent à 750 millions de tonnes de fer avec des teneurs moyennes respectives de 60 et 45 % pour le minerai oxydé secondaire et le minerai magnétique primaire. Des indices d'or, associés à des faciès grèso-tufacés à tourmaline et à des filons de quartz contrôlés par des failles transcurrentes, sont également signalés dans le domaine d'extension du batholite de Boboti (Milési *et al.*, 1989 ; N'Diaye, 1994). Une analyse structurale du batholite de Saraya situé plus à l'ouest a été réalisée à partir de données de terrain (figure 2) et un modèle de formation, d'ascension et de mise en place a été proposé (Pons *et al.*, 1992). L'analyse d'images satellitales où l'information géologique est bien rehaussée par des traitements appropriés (Wade, 1996 ; N'Doye, 1999), particulièrement la photo-interprétation de l'image provenant de la fusion des données TM de Landsat et RSO de ERS-1, permet de préciser les contours cartographiques et la fracturation de la partie centrale du batholite de Boboti (massif de Bambadji) et de proposer des zones favorables à la prospection de l'or et du fer.



1-7 : Protérozoïque inférieur ; *8 :* Protérozoïque supérieur ; *1-* Roches volcaniques basiques ; *2-* Andésites, cherts et niveaux graphiteux ; *3-* Flyschs : grès/argilites avec cherts et niveaux conglomératiques ; *4-* Niveaux volcano-clastiques, felsitiques et cherteux ; *5-* Calcaires et roches volcanoclastiques felsitiques ; *6-* Formations fluvio-deltaïques : conglomérats et argilites ; *7-* Granites : Bo-Boboti ; Mo-Moussala ; Ga-Gamaye ; Ds-Dar Salam.Le cadre indique la localisation des images TM et RSO (*cf.* figures 4 et 5). D'après Pons *et al.* (1992).

FIGURE 1 Carte géologique simplifiée de la boutonnière de Kédougou-Kéniéba. *Simplified geological map of the Kedougou Kenieba inlier.*



Massifs plutoniques : *1-* Bembou ; *2-* Saraya ; *3-* Fodékounda 1 ; *4-* Fodékounda 2 ; *5-* Fodékounda 3 ; *6-* Dar salam ; *7-* Diabéri ; *8-* Nafadji ; *9-* Moussala ; *10-* Kéniéko ; *11-* Balangouma ; *12-* Boboti. D'après de Pons *and al.* (1992). Le cadre indique la localisation des images TM et TM/RSO (figures 4 et 5).

FIGURE 2 Carte des trajectoires de foliation du batholite de Saraya et de ses environs. *Map of foliation paths of the Saraya batholite and its surroundings.*

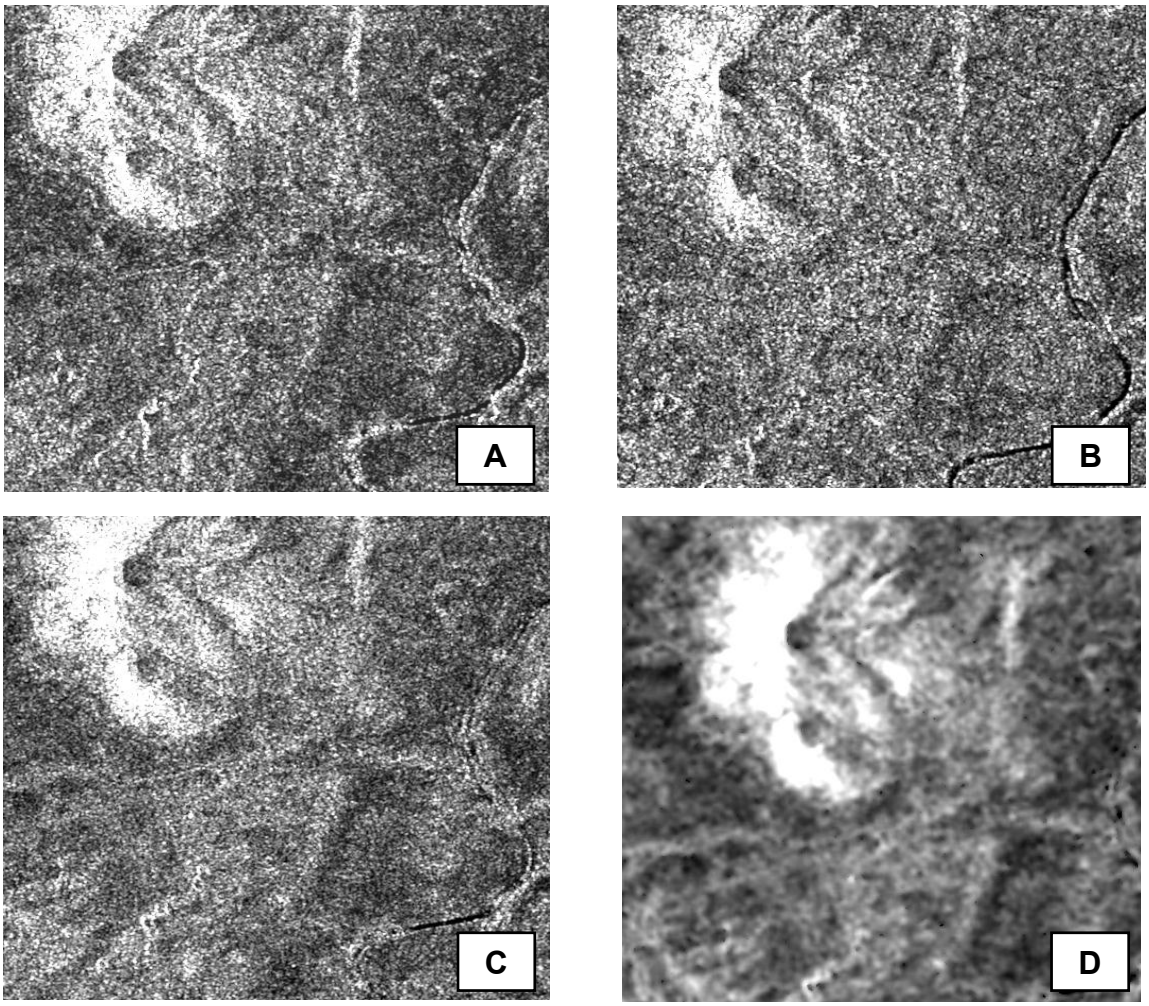
3. TRAITEMENTS DES DONNÉES

3.1. Données satellitales

Les données satellitales suivantes ont été traitées et analysées : *1)* l'image TM 92002005-01 (orbite 202, rangée 51) acquise le 12-01-1986 par le satellite Landsat-5 avec un angle d'élévation solaire de 41° et un azimut solaire de 135° ; *2)* les images 9508243 et 10510243 du RSO, acquises respectivement le 10 mai 1993 et le 19 juillet 1993, dans la bande C, en mode ascendant, à visée vers l'est.

3.2. Prétraitements

L'image TM a été corrigée par rapport aux coordonnées UTM, grâce à des points d'amer établis à partir de la carte topographique du Sénégal au 1 : 200 000 (feuille de Kéniéba). Les deux images RSO, initialement en format 16-bits, ont d'abord été converties en format 8-bits pour en faciliter les traitements, l'archivage et la fusion ultérieure avec les données TM. Elles ont ensuite été recalées l'une par rapport à l'autre puis sommées et moyennées. La réduction du chatoiement, déjà perceptible sur l'image moyenne, a été ensuite améliorée grâce au filtre Lee sigma disponible sur le logiciel Erdas Imagine Version 8.3.1 (figure 3). Enfin, l'image radar résultante a subi une correction géométrique par rapport à l'image TM.



A - Extrait de l'image RSO du 10-05-1993. B- Extrait de l'image RSO du 19-07-1993. C- Résultat de la sommation des deux dates. D- Résultat du filtrage de l'image issue de la sommation. Noter la réduction du chatoiement dans les images C et D. La forte rétrodiffusion (moitié supérieure gauche des images) correspond à la colline de Kouroudiako.

FIGURE 3 Réduction du chatoiement radar par sommation de deux dates et application de filtre. *Radar speckle reduction by summation of the two dates and filtering.*

3.3. Fusion des données TM et radar RSO

Deux méthodes de fusion numérique parmi les plus utilisées ont été testées sur les données prétraitées : la méthode par analyse en composantes principales (ACP) et la méthode par transformation dans l'espace ITS (Toutin and Rivard, 1995 ; Yésou *et al.*, 1997 ; Pohl and Van Genderen, 1998). C'est la méthode ITS qui a donné une image de meilleure qualité visuelle pour la photo-interprétation qui est présentée ici.

3.4. Fusion des données par la méthode ITS

Les transformations ITS permettent de passer des coordonnées couleurs rouge, vert et bleu (RVB) classiques à des coordonnées sphériques où les couleurs sont codées en terme d'intensité (I), de teinte (T) et de saturation (S). La méthode de fusion par transformation ITS est l'une des techniques les plus utilisées pour combiner des données provenant de capteurs différents. Pour réaliser une fusion optimale d'images destinées à l'interprétation géologique, T et S remplacent les données optiques, tandis que le paramètre I est modulé par les données radar. Cette procédure de fusion peut être appliquée directement ou par substitution (Yésou *et al.*, 1993a, b). La technique directe consiste à moduler I, T et S en leur affectant des valeurs avant retour dans l'espace couleur RVB de départ. Lorsqu'il s'agit de fusion d'images de résolutions différentes, les données de plus haute résolution sont affectées au contrôle de I, tandis que les données de plus faible résolution sont affectées au contrôle de T et S (Jaskolla *et al.*, 1985 ; Chavez *et al.*, 1991 ; Yésou *et al.*, 1993b). D'autres auteurs affectent à S une valeur constante, en fusionnant des données multisources et multirésolutions (Harris *et al.*, 1990).

La technique ITS par substitution consiste à calculer les paramètres I, T et S d'une composition colorée (ici TM743 respectivement codés en rouge, vert et bleu) et à remplacer par I ou par S les données radar à fusionner. Cette technique a donné une image de meilleure qualité visuelle pour la photo-interprétation, d'après les tests réalisés sur les données du Sénégal oriental. Cependant l'image de la fusion obtenue en remplaçant le paramètre I par le canal radar brut montre un poids trop important du signal radar, au détriment de l'information provenant du capteur TM. Pour pallier à cet inconvénient, un néocanal du type αRadar + βTM7 + γ est calculé. Dans cette formule α, β et γ sont des facteurs de pondération : $\alpha = 1$ ou 2 ; $\beta = 1$, 1,5, 2 ou 3 et γ = constante. Le canal TM7 a été choisi à cause de l'importance de son contenu en information géologique. Le néocanal issu de cette procédure de pondération remplace le paramètre I avant retour dans l'espace couleur RVB de départ. L'importance relative des contributions des données TM et RSO dans l'image résultante varie en fonction des valeurs affectées aux coefficients de pondération. Le meilleur résultat a été obtenu avec $\alpha = 1$, $\beta = 3$ et $\gamma = 0$, c'est-à-dire en combinant, pour la pondération, 25 % de RSO et 75 % de TM7. L'information morpho-structurale du RSO est bien restituée sans altération du détail spectral apporté par les données TM.

4. INTERPRÉTATION

La comparaison de l'image couleur infrarouge TM432 (figure 4) avec l'image de la fusion TM/RSO (figure 5) permet de constater la nette supériorité de cette dernière, en termes de contenu en information géologique.

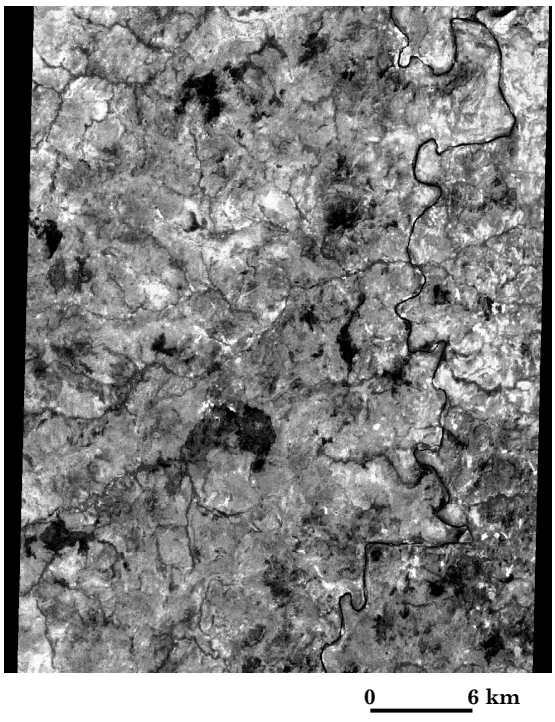


FIGURE 4 Image couleur infrarouge TM432 (codés respectivement en RVB) couvrant le massif granitique de Bambadji (Falémé, Sénégal Oriental). Noter que les collines de fer et les contours du granite ne sont pas bien visibles sur l'image. *Colour infrared image TM432 (coded respectively in RGB) covering the Bambadji granite massif (Faleme, South-East Senegal). Note that iron hills and outlines of the granite are not very visible on the image.* (voir image couleur XII à la fin de la revue).



FIGURE 5 Image de la fusion TM/RSO couvrant le massif granitique de Bambadji (Falémé, Sénégal Oriental). Noter que les contours du granite et les collines de fer sont bien rehaussés grâce à la forte rétrodiffusion du signal radar. *Merged TM/RSO image covering the Bambadji granite massif (Faleme, South-East Senegal). Note that the outlines of the granite and the iron hills are heightened well thanks to the rétrodiffusion strong of the radar signal.* (voir image couleur XIII à la fin de la revue).

En effet, grâce à la grande sensibilité du signal radar à la topographie, les contours du massif granitique de Bambadji, peu nets sur l'image TM, sont bien rehaussés sur l'image de la fusion. Ces contours sont soulignés par l'alignement des collines de fer qui présentent une forte rétrodiffusion du signal radar. La photo-interprétation de l'image de la fusion des données TM et RSO a permis de dresser une carte des discontinuités-images (linéaments rectilignes et curvilignes) où l'on peut distinguer quatre faisceaux de directions majeures : N-S à NNE-SSO, NE-SO, NO-SE et E-O. L'analyse de la signification de ces directions, en rapport avec les données géologiques disponibles, a permis de dresser une esquisse structurale du massif de Bambadji (figure 6). Le faisceau N-S à NNE-SSO est assez fréquent et localisé surtout à l'est, à proximité du cours d'eau de la Falémé. Il correspond à l'accident cisaillant sénégalo-malien. Le faisceau NE-SO est également bien représenté, surtout vers l'ouest avec des directions variant de N35 à N60°O. Il correspond à la direction générale de la lithologie birimienne. Il est composé d'éléments linéaires correspondant à la foliation du batholite granitique et à la schistosité régionale des roches métamorphiques encaissantes. Le faisceau NO-SE est très présent, surtout au niveau de Garébouréa, avec des directions variant de N120° à N145°O. Il contrôle l'indice d'or de Garébouréa. Le faisceau E-O est moins fréquent mais plus franc et très localisé. Il participe aussi du contrôle de la minéralisation aurifère à Garébouréa. Ces faisceaux de failles majeures semblent par ailleurs étroitement contrôler le réseau hydrographique et c'est ce qui explique sans doute l'orientation générale N-S de la Falémé dont les branches N-S et E-O forment un angle droit à quelques 4 km au nord de Garébouréa.

5. CONCLUSION

Cette étude confirme l'intérêt de l'exploitation en synergie de l'imagerie optique et radar en cartographie lithologique et structurale, particulièrement dans des régions de socle à couverture latéritique importante comme les régions birimiennes de l'Afrique de l'Ouest. En effet, la bonne résolution spatiale et les performances spectrales du capteur TM, combinées à la grande capacité du radar à révéler les structures linéaires, permettent de générer des images qui restituent très bien les discontinuités-images indicatrices de limites lithologiques et de fracturation. Ainsi, l'image de la fusion TM/RSO de la Falémé présentée ici permet de préciser les contours cartographiques du massif de Bambadji, d'étudier sa fracturation et de proposer des zones favorables à la prospection du fer et de l'or. La recherche de réserves additionnelles de minerai de fer pourrait cibler les zones de contact non encore prospectées du batholite de Boboti avec l'encaissant, alors que les nœuds de fractures N-S, N-O et E-O pourraient être considérés comme des zones privilégiées pour la recherche de l'or.

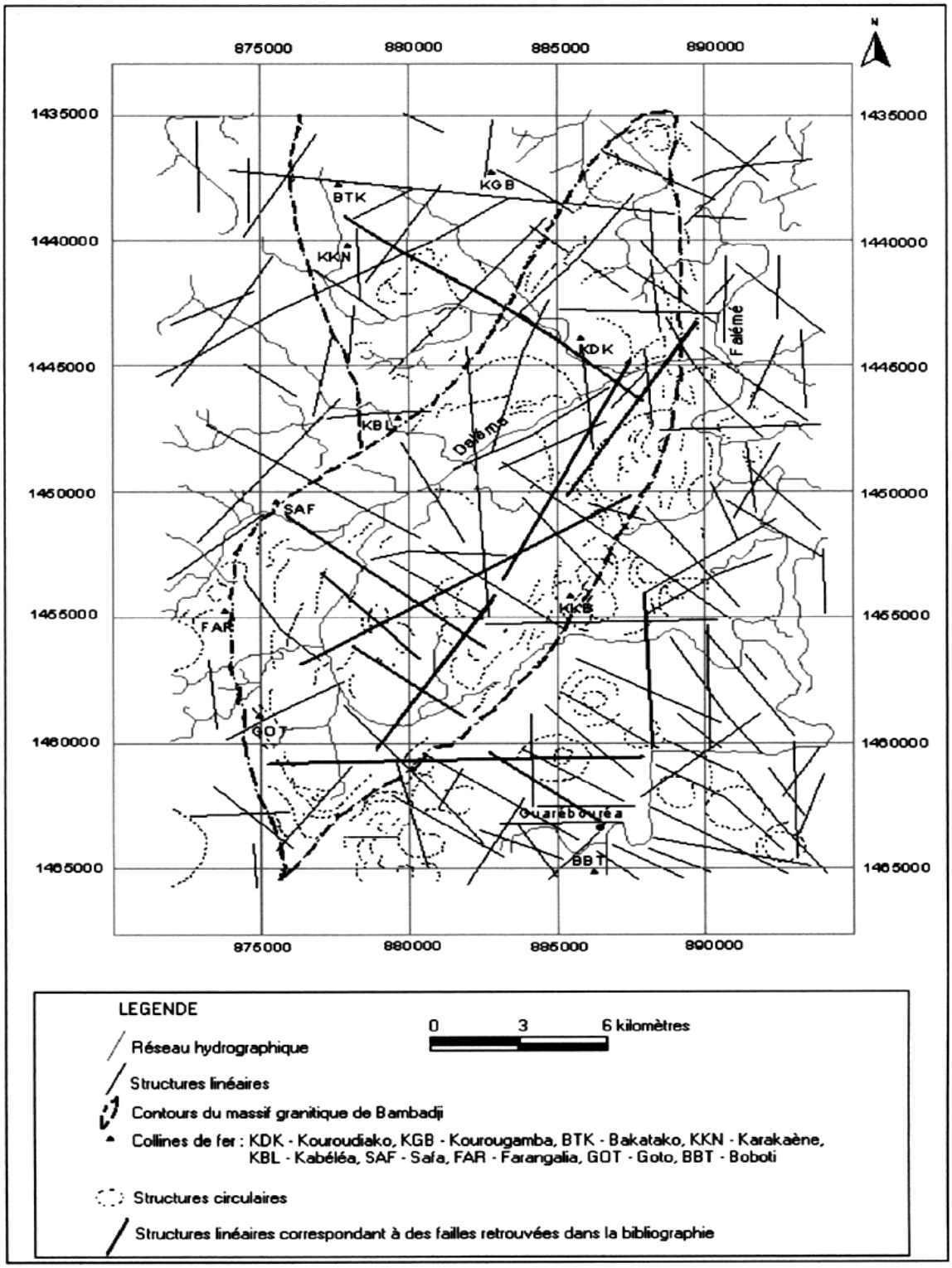


FIGURE 6 Interprétation structurale du massif granitique de Bambadji (Falémé, Sénégal Oriental) à partir de l'image de la fusion TM/RSO. *Structural interpretation of the Bambadji granite massif (Faleme, South-East Senegal) from the merged TM/RSO image.*

Remerciements

Les données TM de Landsat ont été gracieusement fournies par la compagnie EOSAT, lors d'un séjour au CSES (Center for the Study of Earth from Space) de l'University of Colorado at Boulder et au USGS (United States Geological Survey) de Denver, financé par la fondation Fulbright. F. Kruse du CSES et D. Knepper du USGS sont vivement remerciés pour leur encadrement scientifique. Les données RSO de ERS-1 ont été obtenues dans le cadre d'une collaboration scientifique avec le professeur J.P. Rudant de l'Université de Marne-la-Vallée, lors d'un séjour au LSIIT/GRTS (Laboratoire des Sciences de l'Informatique, de l'Image et de la Télédétection/Groupe de Recherche en Télédétection et Spatialisation) de l'Université Louis Pasteur de Strasbourg, financé par une bourse d'excellence de l'AUPELF/UREF. J.C. Pion du GRTS et H. Yésou du SERTIT (Service Régional de Traitement d'Image et de Télédétection) sont particulièrement remerciés pour leurs conseils scientifiques. Une mention spéciale est faite au CSE (Centre de Suivi Écologique) du Sénégal pour son appui technique et scientifique. Enfin les professeurs André Desrochers de l'Université d'Ottawa et Michel Jebrak de l'Université du Québec à Montréal sont vivement remerciés pour leur lecture critique du manuscrit.

Références

Bassot, J.P. (1966) Étude géologique du Sénégal oriental et de ses confins guinéo-maliens. Thèse Université Clermond-Ferrand, France. Mémoire BRGM, France, n° 40, 332 p.

Braux, C., Cassard, D., Delpont, G., Bonnefoy, D., Corpel, J. et Lagny, P. (1991) Identification de secteurs à vocation aurifère dans un couloir tectonique régional par interprétation de données satellitaires, géologiques, géophysiques intégrées dans un système d'information géographique. L'exemple du cisaillement sud-armoricain. Chronique de la Recherche Minière, vol. 505, p. 19-34.

Chavez, P.S., Sides, S.C. and Anderson, J.A. (1991) Comparison of three different methods to merge multiresolution and multispectral data : Landsat TM and SPOT panchromatic. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, vol. 57, nº 3, p. 295-303.

Harris, J., Murray, R. and Hirose, T. (1990) IHS transform for the integration of radar imagery with other remotely sensed data. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, vol. 56, nº 12, p. 1631-1641.

Jaskolla, F., Rast, M., and Bodechtel, J. (1985) The use of SAR system for geological applications. p. 41-50, in Proceedings of the workshop on thematic applications of SAR data, Frascati, september 1985, ESA SP-257.

Ledru, P., Pons, J., Milesi, J.P., Feybesse, J.L. and Johan, V. (1991) Transcurrent tectonics and polycyclic evolution in the Lower Proterozoic of Senegal-Mali. Precambrian Research, vol. 50, p. 337-354.

Milési, J.P., Feybesse, J.L., Ledru, P., Dommanget, A., Ouedrago, M.F., Marcoux, E., Prost, A., Vinchon, C., Sylvain, J.P., Johan, V., Tegyey, M., Calvez, J.Y., Lagny, P., Abouchamy, W., Ankrah, P., Boher, M., Diallo, M., Fabre, R., Heinr, Y C., Lapierre, H., Pons, J., Thiéblemont, D.,Touré, S. et Morel, B. (1989) Les minéralisations aurifères de l'Afrique de l'Ouest. Leurs relations avec l'évolution lithostructurale au Protérozoïque inférieur. Chronique de la recherche minière, n° 497, p. 3-98.

NDiaye, P.M. (1994) Evolution au Protérozoïque inférieur de la région Est-Saraya (Craton de l'Afrique de l'Ouest, Sénégal-Mali). Tourmalinisations, altérations hydrothermales et minéralisations associées. Thèse de doctorat d'état, Faculté des Sciences et Techniques, Université de Dakar, 372 p.

NDiaye, P.M., Dia, A., Vialette, Y., Diallo, D.P., Ngom, P.M., Sylla, M., Wade, S., et Dioh, E. (1997) Données pétrographiques, géochimiques et géochronologiques nouvelles sur les granitoïdes du Paléoprotérozoïque du Supergroupe de Dialé-Daléma (Sénégal Oriental) : implications pétrogénétiques et géodynamiques. Journal of African Earth Sciences, vol. 25, n° 2, p. 193-208.

NDoye, A. (1999) Apport de la Télédétection à la cartographie lithostructurale et à la prospection minière au Sénégal oriental. Cas des zones de Tenkoto et de la Falémé. Mémoire d'Ingénieur Géologue Institut des Sciences de la Terre, Faculté des Sciences et Techniques, Université de Dakar, 105 p.

Pohl, C., and Van Genderen, J.L. (1998) Multiresolution image fusion in remote sensing concepts, methods and applications. International Journal of Remote Sensing, vol. 19, n° 5, p. 823-854.

Pons, J., Oudin, C. and Valero, J. (1992) Kinematics of large syn-orogenic intrusions : example of the Lower Proterozoic Saraya batholith (Eastern Senegal). Geologische Rundschau, nº 81, vol. 2, p. 473-486.

Toutin, T. and Rivard, B. (1995) A new tool for depth perception of multi-source data. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, vol. 54, nº 12, p. 1699-1708.

Wade, S. (1985) Contribution à l'étude des gisements de fer de la Falémé (Sénégal Oriental). Contexte géotectonique, pétrographie, géochimie et métallogenèse. Thèse de Doctorat 3ème cycle, Institut National Polytechnique de Lorraine, Nancy, 251 p.

Wade, S (1996) Traitements des données satellitales Landsat Thematic Mapper et Radar ERS-1 du Sénégal Oriental : apports à la cartographie lithostructurale et à la prospection minière. Rapport de recherches, Université Louis Pasteur de Strasbourg, 96 p.

Yésou, H., Besnus, Y. and Rolet, J. (1993a) Extraction of spectral information from Landsat TM data and merger with SPOT panchromatic imagery – a contribution to the study of geological structures. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, vol. 48, p. 23-36.

Yésou, H., Besnus, Y., Rolet, J. and Pion, J.C. (1993b) Merging SEASAT and SPOT imagery for the study of geologic structures in a temperate agricultural region. Remote Sensing of Environment, vol. 43, p. 265-280.

Yésou, H., Braux, C., Rouzeau, O., Clandillon, S., Rolet, J. and de Fraipont, P. (1997) Assessment of two methodologies of ERS mixing for geological investigations : ERS time series and optical-radar fusion. Proceedings of the 3rd ERS Symposium, Florence 17-21 March 1997.