



Utilisation de l'image radar à synthèse d'ouverture (RSO) du satellite ERS2 pour la cartographie géologique et structurale du bassin versant du Kô (Ouest de la Côte d'Ivoire).

The use of Radar image on synthesis opening (RSO) of the ERS2 satellite for the geological and structural cartography of the Kô basin (Western of Ivory Coast)

Assiè Emile ASSEMIAN ^{*a}, Kan Emile KOFFI ^a, Lou Irié Délima SEMI ^a, Jean BIEMI ^b, Razack MOUMTAZ ^b & René THERRIEN ^c

Abstract : This work which comes within the framework of project « Radar-water », initiated by the CURAT, has for objective to cartography lithologic units and geologic structures of Kô basin, situated in west of Côte d'Ivoire. This semi-mountainous zone formed of two greats geologic set: the granulitic domain in the north and the migmatitic domain in the south. Those rocks are difficult to hit because of the presence of forest and soil. Although the aerial photography proposes a solution, she is expensive and note allow to dread overall territory. For to reach our objective, we have recourse to farming radar image. The specifics treatments such as using filter noise of chatoiement and texture analysis by the cooccurrence method (using "mean" parameter) have allowed to discriminate and improve enhancement lithologic units and geologic structures. The cartography of those formations was realised according their same texture and topographic and validated by geochemistry works realized on the ground. Extraction of fracture was done by manual method. In total, 1220 fractures have been cartographed with a cumulative length around 2300 Km for a surface of 1643 Km². The statistical analysis of fracture network shows three majors directions: N0-N10, N30-N40 and N160-N170. Fractures in magmatic zone are more important than granulitic zone after all existence greatness faults. The structural map give an interest in hydrogeologic because, the trace of fracture are porous zone and form a network of transitivity and serve the driving of ground water.

Key words: radar image RSO d'ERS2, geologic and structural cartographic, Côte d'Ivoire

Résumé : Ce travail qui s'inscrit dans le projet RADAR-EAU, initié par le CURAT, a pour but de cartographier les unités litho-structurales du bassin versant du Kô, situé à l'ouest de la Côte d'Ivoire. Cette zone semi montagneuse est formée de deux grands ensembles géologiques : le domaine des gneiss granulitiques au nord et le domaine migmatitique au sud. Le substratum géologique est inaccessible à cause de la présence d'une forêt dense. Bien que la photographie aérienne propose une voie de solution, elle est coûteuse et ne permet pas d'appréhender globalement le territoire. Pour atteindre nos objectifs, nous avons eu recours à l'exploitation des images radar RSO d'ERS2. L'utilisation des capteurs radar RSO a été très prometteuse grâce à sa forte résolution spatiale et à sa sensibilité à la rugosité du terrain. Les traitements particuliers tels que : le filtrage du chatoiement et l'analyse de texture par la méthode de cooccurrence (application du paramètre 'moyenne') ont permis d'améliorer la discrimination des unités lithologiques et les structures géologiques de la zone d'étude. La cartographie de ces formations est réalisée selon les critères texturaux et topographiques des formations géologiques, et validée par des travaux de prospection géochimiques et pétrographiques réalisés sur le terrain. L'extraction des fractures est effectuée de manière dirigée. Au total, 1220 fractures ont été cartographiées avec une longueur cumulée d'environ 2300 km pour une superficie de 1643 km².

^aUniversité Alassane Ouattara, UFR CMS, Département de Géographie, Laboratoire de géographie physique. Adresse : 01 BP V 18 Bouaké 01, Téléphone : +225 06770010 assmilea2@yahoo.com / assmilea@gmail.com

^bUnité de Formation et de Recherche des Sciences de la Terre et des Ressources Minières (UFR- STRM) de l'université de Félix Houphouët Boigny d'Abidjan ;

Centre Universitaire de Recherche et d'Application en Télédétection (CURAT) ;
Ecole de Doctorale Africaine de Télédétection (EDAT).

Adresse : 22 BP 801 Abidjan 22 ; Tél / Téléphone: +225 04 45 20 / 07 90 42 21, Fax : +225 22 44 35 00 / 22 44 52 82.

^a Université de Poitiers, Faculté des Sciences Fondamentales et Appliquées (SFA), UMR CNRS 6532 HYDRASA 40, Avenue du Recteur Pineau
Adresse : 86022 Poitiers CEDEX, France, Téléphone : (33) (0) 54945 3681, Fax : (33) (0) 54945 4241, portable : 06 84119143.

^c Université Laval, Département de Géologie et de Génie géologique
Adresse : Pavillon Poulliot, Université Laval, Québec, Canada, G1K7P4
Tél : (418) 656-5400, Fax : (418) 656-7339.

Auteur correspondant : Assemian Assiè Emile

E-mail : assmilea2@yahoo.com / assmilea@gmail.com

L'analyse statistique du champ de fracture, montre trois directions d'orientation majeures qui sont : N0-N10, N30-N40 et N160-N170. Le domaine migmatitique est plus fracturé que le domaine granulitique malgré l'existence de grandes failles. La carte structurale est d'intérêt en hydrogéologie, car les traces de fracture sont des zones de perméabilité, de transmissivité et servent de conduit aux eaux souterraines.

Mots clés : Image radar RSO d'ERS2, Cartographie géologique et structurale, Côte d'Ivoire

INTRODUCTION

L'évaluation des ressources en eau souterraine des aquifères discontinus en milieu de socle cristallophyllien fissuré, a mis l'accent sur l'importance de la cartographie structurale (CASTAING *et al*, 1998, BIEMI *et al*, 1998). La recherche sur le terrain d'indicateurs directs de présence de structures géologiques et de contacts lithologiques présente pour le chercheur, des difficultés à surmonter. En effet, dans un environnement à forte densité forestière comme cela se présente dans certains milieux des zones tropicales humides, les boisés denses, les fortes pentes et les rivières constituent des obstacles de taille. L'utilisation de la photographie aérienne peut s'avérer être un procédé intéressant. Cependant, nous avons souvent besoin de plusieurs photographies pour couvrir le territoire, ce qui est coûteux. L'image satellitaire permet de combler cette lacune tout en conservant cette facilité à détecter individuellement les linéaments structuraux qui la composent.

Les cartographies lithostructurales menées dans le degré carré de Man à l'échelle 1/ 200.000 par KOUAMÉ (1999) et SALEY (2003), à l'aide des images optiques (Landsat TM et SPOT) et la Pseudo image MNT, n'ont pas fourni de résultats très détaillés sur le bassin versant du Kô. Sans doute, en raison de l'échelle d'observation qui est très réduite, l'incapacité des capteurs optiques à détecter le substratum géologique masqué par la forêt dense et la pseudo image MNT qui ne rehausse que les mégafractures. Pour surmonter toutes ces difficultés, le CURAT a initié le projet RADAR-EAU. Il s'agit d'exploiter les potentiels de l'imagerie radar pour la cartographie hydrogéologique de la région semi- montagneuse de Man. L'étude lithostructurale du bassin versant du Kô s'inscrit dans ce vaste projet qui bénéficie d'une subvention de l'AUF.

L'objectif essentiel de cette recherche est de cartographier les unités lithologiques et structurales du bassin versant du Kô, par l'utilisation des images radar à synthèse d'ouverture (RSO) du satellite ERS2. Peu importe l'échelle et l'environnement, les satellites radar présentent des atouts dans la détection des fractures et des contacts lithologiques des milieux fissurés où le substratum géologique est masqué par la forêt dense et le sol (DEROIN & SCANVIC, 1995). Les capteurs optiques, du fait de leur vaste fourchette spectrale, permettent aussi d'avoir des informations sur les caractéristiques minéralogiques des cibles géologiques. Mais, ceux-ci sont moins efficaces en zone pluvieuse où les nuages et la forêt empêchent les ondes d'atteindre le socle. Il était donc spécifiquement question de réaliser des traitements particuliers (filtrage du chatolement, analyse de texture par la méthode de co-occurrence) pour rehausser les discontinuités morphostructurales de la zone d'étude. En effet, les travaux géochimique, pétrographique et géochronologie réalisés antérieurement par CAMIL (1984) et KOUAMÉLAN (1996) montrent que certaines formations géologiques de la zone d'étude sont issues des processus endogènes (magma...) et des processus exogènes (altération, métamorphisme...). Elles peuvent se distinguer par leur contraste géomorphologique et textural, facilement détectable par les capteurs radar.

CADRE GÉOGRAPHIQUE ET GÉOLOGIQUE DE LA ZONE D'ÉTUDE

La zone étudiée est le bassin versant du Kô, situé à l'ouest de la Côte d'Ivoire, dans le domaine archéen de la dorsale de Man, en zone semi-montagneuse, précisément entre les latitudes 7° 00' et 7° 35' nord et les longitudes 7° 18' et 7° 45' ouest (figure 1). Cette région bénéficie d'un climat tropical humide avec une pluviométrie moyenne annuelle d'environ 1500 mm. Le relief se répartit entre deux ensembles morphologiques et géologiques d'extension inégale :

- un premier ensemble, au nord, de morphologie montagneuse d'altitude dépassant parfois 1000 m, à paysage granulitique, issu du prolongement oriental de la chaîne du Fouta Djallon, selon une bande sensiblement NE-SO où la végétation est moins dense (photo 1) ;
- un deuxième ensemble, au sud, de morphologie de plateau, à paysage migmatitique dont les altitudes ne dépassent pas 400 m (photo 2).

Le réseau hydrographique est plus dense au sud dans la zone de plateau par rapport à la zone montagneuse. C'est donc une zone semi-montagneuse, avec la présence de forêt dense, de jachère et de plantations.

Ce domaine archéen a subi deux principaux stades tectono-métamorphique : le Léonien (3500-3000 Ma) et ensuite le Libérien (2900-2500 Ma). Ce sont les études géologiques effectuées par CAMIL (1984) et

KOUAMÉLAN (1996) à l'ouest, qui ont permis de distinguer ces deux ensembles lithologiques, séparés par la faille de Man-Danané.

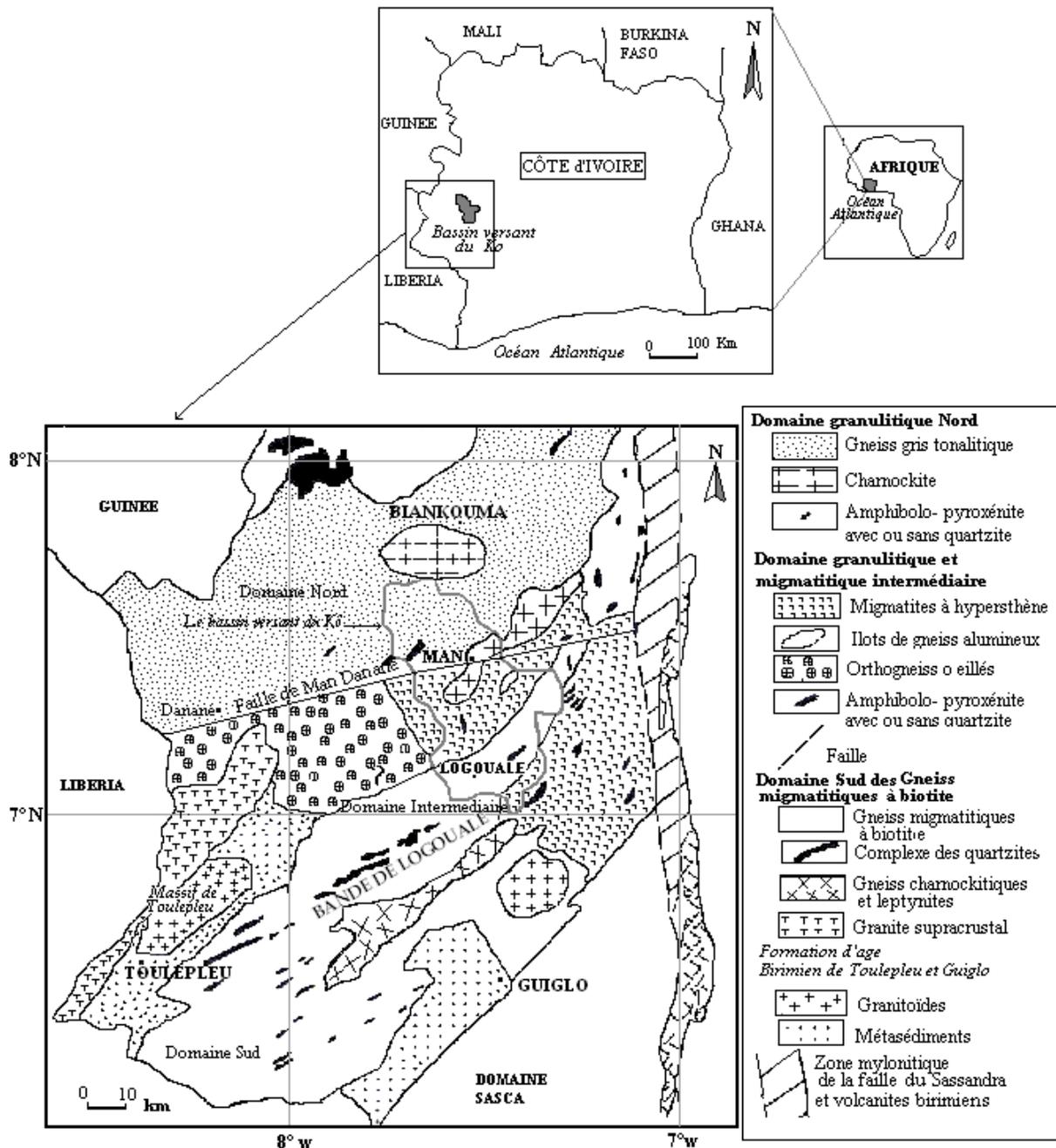


Figure 1 : Localisation géographique et esquisse géologique du bassin versant du Kô
Source Kouamélan, 1996)

Description des unités lithologiques

Domaine granulitique du nord

Gneiss gris rubanés et granulites roses ou gneiss gris tonalitique

Ils apparaissent comme un ensemble rubané formé de bancs de puissance variable : gris, clair et sombre. Ces roches exhibent un rubanement qui a un caractère magmatique dans le vieux socle. Ces bandes correspondent à des variations de chimisme allant d'un pôle basique à un pôle acide (KOUAMÉLAN 1996). Ce

sont des formations quartzo-feldspathiques à clinopyroxène et orthopyroxène dominants de couleur gris sombre. Les minéraux dominants sont le quartz, le feldspath, les pyroxènes de type hypersthène de couleur gris sombre.



Photo 1 : Un aspect du paysage montagneuse et granulitique du nord du bassin versant du Kô
(Photos Assemian, 2017)

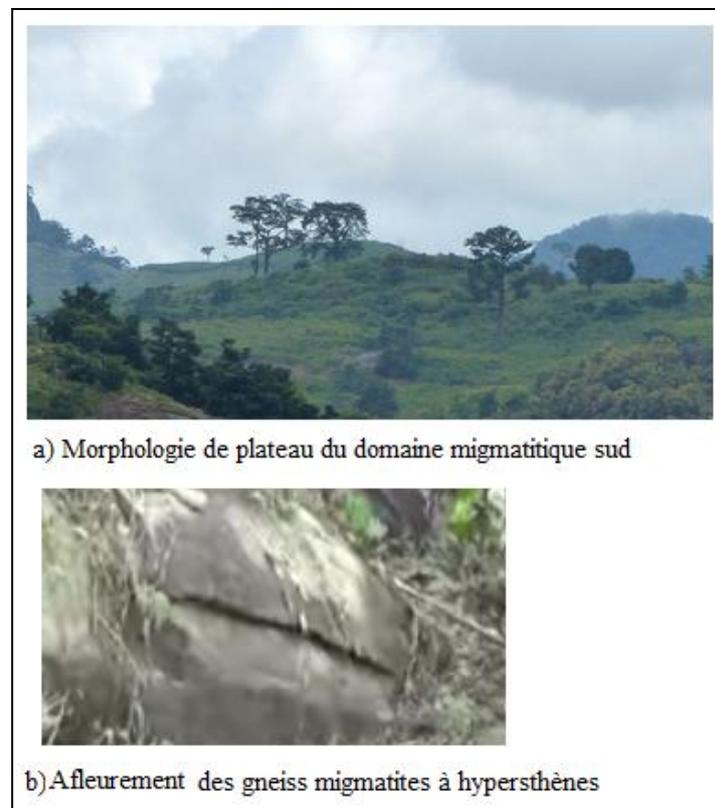


Photo 2 : Un aspect du paysage de plateau migmatitique sud du bassin versant du Kô
(Photos Assemian, 2017)

Charnockite intrusive

La texture de la roche est porphyroïde, avec des grains pouvant atteindre 2 à 3 cm. Elle a une couleur gris vert bronzé. La structure est granoblastique polygonale. La roche est essentiellement quartzo-feldspathique avec pour prédominance des feldspaths potassiques de type mésoperthitique (KOUAMÉLAN, 1996). Les principaux minéraux ferromagnésiens sont les pyroxènes. Les opaques moulent essentiellement les quartzs et les feldspaths. Les minéraux accessoires sont la biotite, le zircon, la monazite.

Domaine migmatitique du sud

Migmatites à hypersthène

Ce domaine est situé au sud de l'accident de Man-Danané et se subdivise en deux parties séparées par la bande de Logoualé. Les roches sont très déformées et prennent un aspect lité. Il s'agit essentiellement *des migmatites à hypersthène*. Elles sont composées de bancs clairs et sombres. Les principaux minéraux sont le quartz, les feldspaths et les pyroxènes. Ses formations sont de composition tonalitique et donc issues du métamorphisme des gneiss granulitiques (CAMIL, 1984).

Les gneiss migmatite à biotite

Ce sont des roches, assez homogènes, composées de bancs clairs et sombres millimétriques, rarement centimétriques. La foliation est bien marquée avec une direction N.70. L'absence de quartz enfumé est une caractéristique des gneiss migmatiques à biotites. Selon KOUAMÉLAN, (1996), la structure est granoblastique lobée avec la présence de microfractures. La biotite a pour couleur le vert brun, couleur caractéristique des migmatites à biotite.

Les unités de quartzites à magnétite

Ce sont des formations supracrustales de la région de Man. Ils se présentent comme des lentilles dont les plus grandes font en moyenne 10 km de long. Ils sont abondants dans le domaine migmatitique, principalement dans la bande de Logoualé. Ils forment un complexe constitué de quartzite à magnétite et de roche basique et ultrabasique. CAMIL (1984), dans sa synthèse sur le processus de formation des quartzites à magnétite de Man, a précisé que, ces roches sont issues d'une sédimentation fine en milieu calme. Cette situation est due à l'atmosphère réductrice du pré-Cambrien qui a permis au fer provenant de l'altération du substratum de rester à l'état ferreux et d'être drainé sous forme de complexes solubles dans les bassins. L'oxygène libéré par photosynthèse grâce à des organismes, va être piégé par le fer sous forme d'hydroxyde ferrique insoluble qui précipite.

Les gneiss sillimanites

Les gneiss sillimanites appartiennent à des unités que CAMIL (1984) décrit comme des îlots au sein des gneiss migmatites à hypersthène. Selon KOUAMÉLAN (1996), la minéralisation se compose de quartz qui cristallise en bandes allongées de 1 à 2 mm de large suivant la foliation. Le feldspath est essentiellement plagioclase souvent cataclastique. La sillimanite est abondante en grands cristaux prismatique. Les minéraux accessoires sont par ordre d'abondance la pyrite, la monazite et le zircon.

Chronologie de mise en place des roches de la zone d'étude

L'histoire chronologique de l'Archéen (région de Man) est connue depuis les travaux pétrographiques de CAMIL (1984). Grâce aux nouvelles approches pétrologique, géochronologique et géochimique de KOUAMÉLAN (1996) et de DJRO (1998), les connaissances sur ce domaine ont été améliorées. Selon KOUAMÉLAN (1996), les roches les plus anciennes sont les gneiss gris tonalitiques ou gneiss gris rubanés et granulites roses dont les zircons contiennent parfois des cœurs témoins d'un magmatisme mis en place au Léonien (3048 ± 8 Ma). La granulation de ces formations s'est produite au Libérien et les charnockites se sont mis en place (2808 ± 4 Ma). Les domaines migmatiques et granulitiques ont sensiblement une origine commune. Les migmatites à hypersthène, selon KOUAMÉLAN (1996), sont issues du métamorphisme granulitique pendant ou après leur mise en place. L'influence de l'orogénèse éburnéenne a entraîné la fusion partielle des sédiments archéens et la formation des gneiss migmatitiques à biotite. Cette fusion est liée au magmatisme juvénile qui se met en place au Protérozoïque inférieur.

MÉTHODOLOGIE

Données utilisées

Deux scènes radar RSO d'ERS2 sont utilisées dans cette étude (orbite 38124 et de frame 3447 du 14 octobre 2002). La bande est C=5,6 cm, avec une polarisation VV. La résolution spatiale est de 12,5 cm. Selon POLIDIRI (1996), les données micro-ondes du radar à synthèse d'ouverture, du satellite ERS2, sont reconnues

comme étant d'un grand potentiel pour les applications géologiques en général et en particulier, pour la cartographie structurale. Les principaux atouts du radar, sont sa possibilité de pénétrer la végétation ou le sol et sa grande sensibilité au relief, la rugosité du terrain, la lithologie et le suivi des phénomènes de déformation. Cependant, comme la plupart des images radar, les images RSO d'ERS2 sont riches en bruits granulaires appelés « chatoiements » issus de la forte retro-diffusion. Elles doivent donc subir des traitements particuliers afin d'être exploitables. Les données cartographiques utilisées sont : les cartes géologiques de la région de Man (KOUAMÉLAN, 1996), les cartes photo-géologiques du degré carré de Man et la carte topographique (échelle 1/50000). Une étude géochimique et pétrographique sur le terrain a permis d'avoir des échantillons de roche pour analyse et validation des cartes. Les logiciels utilisés sont : Envi 4.7, Mapinfo 11.2, Surfer 5, Linwin et Excel.

Méthodes

Prétraitement des images RSO d'ERS2

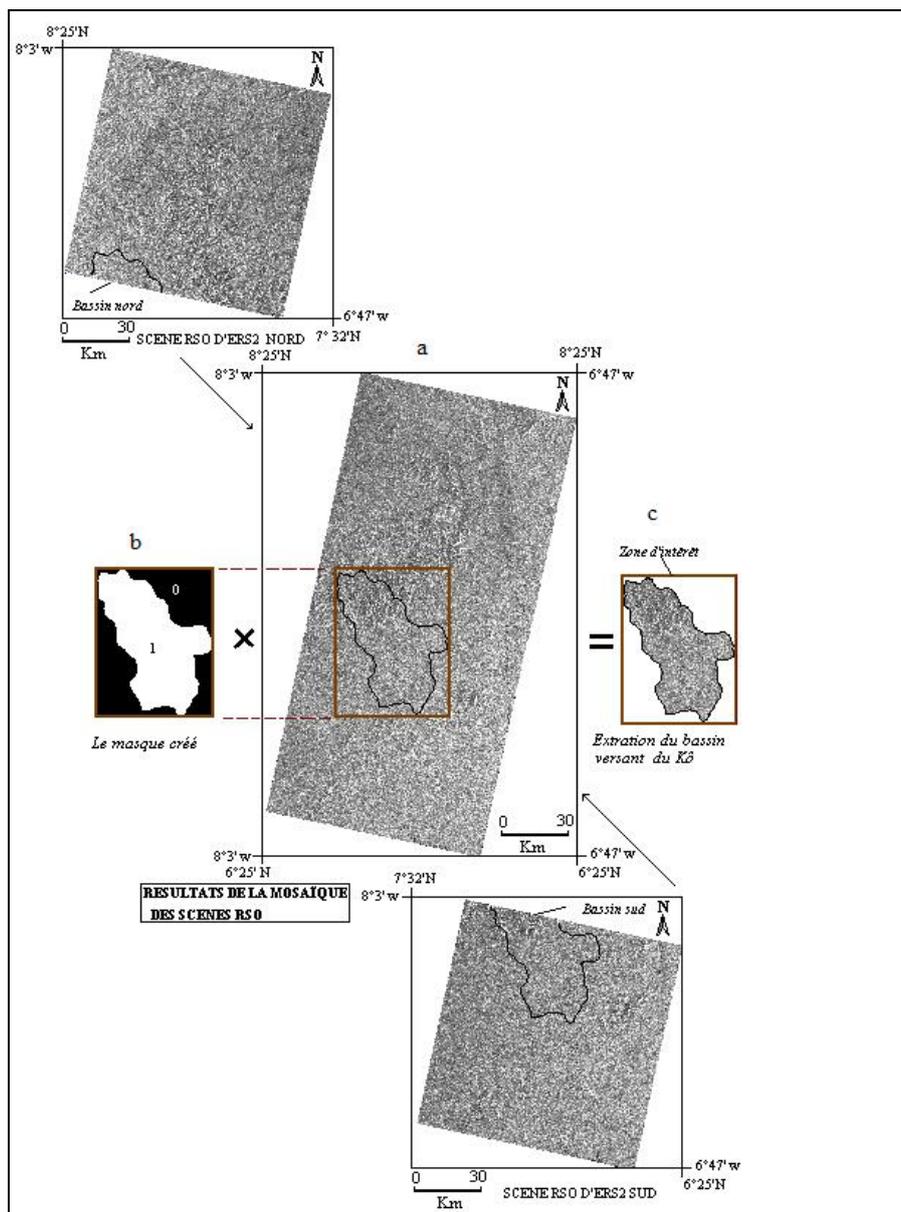


Figure 2: Etapes du prétraitement

a) Mosaïque des deux scènes RSO d'ERS2 ; b) Création de masque, c) Extraction du secteur d'intérêt par utilisation de masque

Cette phase préliminaire a consisté à rendre les deux scènes exploitables thématiquement. Les différentes étapes du prétraitement réalisées sont : la correction géométrique, la mosaïque des deux scènes RSO et l'extraction de la zone d'étude (figure 2).

La correction géométrique a permis de géoréférencer les deux images dans le même système de référence WGS 84. La restauration géométrique fut effectuée par la saisie au clavier des coordonnées des points de calage connus sur les images. Les coordonnées de ces points sont relevées sur la carte topographique du degré carré de Man. La fonction de transfert H qui traduit mathématiquement les relations entre l'image non corrigée et les mesures saisies au clavier est un polynôme de premier degré. Cette correction géométrique fut réalisée à l'aide du logiciel Envi 4.7. Les erreurs de précision sont inférieures au demi-pixel. Le rééchantillonnage utilisé est la méthode de convolution cubique. La mosaïque des scènes RSO d'ERS2 est une étape qui s'impose, car la zone d'étude est à cheval sur les deux scènes RSO d'ERS2. La mosaïque réalisée, a consisté à juxtaposer les deux images pour obtenir une image unique reconstituant la zone d'étude (figure 2 a). L'extraction de la zone d'étude est réalisé par l'utilisation des masques (figure 2.b. c).

Traitement de l'image RSO d'ERS2

Le filtrage du chatoiement de l'image RSO d'ERS2 fut effectué à l'aide du filtre adaptatif de LEE (1980). La procédure consiste à calculer la moyenne, la variance, l'écart-type du bruit et l'écart-type à priori de la fenêtre n (n=5 et n=9), ensuite comparer ces deux écart-type, et en déduire la valeur de niveau de gris du pixel filtré (TONYÉ *et al.*, 1999). L'efficacité de la réduction du bruit du chatoiement dépend donc des choix de la matrice ou la fenêtre n, et du nombre d'itérations imposées au cours du traitement sur Envi 4.7. La méthode d'analyse de texture appliquée, est celle développée par HARALICK (1979). Cette méthode statistique utilise la matrice de cooccurrence des niveaux de gris pour déterminer les relations entre un pixel donné et son voisinage. Les algorithmes basés sur la matrice de co-occurrence sont essentiellement utilisés pour des tâches de classification. Son application sur l'image RSO d'ERS2 permet de générer 14 paramètres texturaux. Parmi ceux-ci, les paramètres testés sont la **moyenne, la variance, l'homogénéité, le contraste, la dissimilarité, le second moment, l'entropie et la corrélation**. Seule la moyenne nous a permis de conserver et rehausser d'avantage les discontinuités morphostruturales de la zone d'étude. Avec le logiciel Envi 4.7, l'algorithme du paramètre "moyenne" appliqué dans cette étude, est illustré par la formule ci-dessous :

$$\text{Moyenne (m)} \quad m = \sum_{i=0}^{L-1} i.P(i) \quad \text{avec : } P(i)=N(i)/M,$$

ou

M est le nombre de pixels de la fenêtre n,

N(i) le nombre de pixels ayant le niveau de gris i dans la fenêtre n.

L est le nombre maximal de niveaux de gris possibles.

L'information fournie par la texture permet de distinguer différentes régions d'une image. Ces méthodes sont le plus souvent opérées pour la classification ou la segmentation (KOUAMÉ, 1999). Dans notre cas, l'analyse de texture doit constituer un support à la caractérisation des unités lithologiques et structurale de la zone d'étude. Elle a permis de raffiner l'image en affectant au centre de la matrice ou la fenêtre n, la valeur moyenne (m) calculée statistiquement. C'est un paramètre très efficace pour rehausser les micros-structures géologiques, les alternances de textures sans altérer les valeurs radiométriques de l'image.

Cartographie lithologique

La cartographie géologique a toujours été difficile à cause de l'importance logistique et le coût élevé que requièrent les campagnes de terrain. De plus, ces campagnes doivent couvrir un énorme territoire pour une courte durée.

La télédétection est un outil particulièrement intéressant, car elle permet, la production de cartes régionales qui peuvent servir à planifier des futures campagnes de terrain, en réduisant le coût et le temps pour accomplir le projet. Elle apporte à partir de trois principaux descripteurs (le spectre, la texture et la morphologie) des réponses que l'on peut décoder pour identifier la nature lithologique du terrain (BONN, 1996).

En abordant les mêmes principes que EMRAN (1988), RIOPEL *et al.* (2001), PHILIP (1989), FORD (1996), la cartographie lithologique du bassin versant du Kô, s'est appuyée sur les variations de la texture (la rugosité du terrain et la teinte) et les contrastes morphologiques observées sur les images radar RSO issues de l'analyse de texture. La carte géologique réalisée à partir des travaux géochronologiques et pétrographiques de KOUAMÉLAN (1996) et les campagnes géochimiques de terrain ont servi à la validation des résultats issus des images radar traitées. La morphologie d'un paysage résulte de l'interaction des processus endogènes (le magma)

et des processus exogènes (l'érosion). Les différentes sortes de roches réagissent différemment aux mêmes agents d'érosion, créant différents types de relief caractérisés chacun par une unité géologique (BONN, 1996). La cartographie lithologique par l'approche topographique sera très prometteuse, si les formations se distinguent des unes des autres par la spécificité de leur relief. Pour rendre compte de cette réalité, nous avons utilisé la fonction «3D surfaceView» du logiciel Envi 4.7 pour modéliser en trois dimensions l'image radar RSO traitée. Par ailleurs, dans les régions où le relief est important, les teintes et les rugosités présentes dans une image radar résultent majoritairement des variations topographiques (FORD, 1998). Ces variations topographiques du terrain subissent les effets du repliement dans l'image radar. Ce repliement est responsable des teintes claires adoptées par les pentes orientées face à la direction de visée et des teintes sombres de celles opposées à la direction de visée (RANEY, 1998). Dans la région d'étude, les différentes successions géologiques qui présentent un relief modéré à important, adoptent des textures et des teintes radar caractéristiques suite aux effets de repliement et d'ombrage plus ou moins prononcés. La méthode adoptée dans cette cartographie lithologique, consiste à regrouper les régions de l'image RSO d'ERS2 traitée par la méthode de cooccurrence (moyenne), possédant un arrangement textural et une teinte commune. Ainsi, les reliefs forts montrant des arêtes riométriques vives se retrouveront dans la même classe et les reliefs faibles de textures fines sur l'image, seront regroupés dans la même classe. La répartition spatiale des différentes classes texturales sera confrontée à la carte géologique de KOUAMÉLAN (1996) et à la carte photo géologique, afin de pouvoir associer les contrastes de texture avec les unités lithologiques. Une prospection géochimique et pétrographique réalisée sur le terrain a permis de délimiter avec exactitude les unités géologiques du bassin versant de Kô.

Cartographie structurale

Les rugosités sur une image radar sont généralement d'origine structurale. Elles se présentent au sol comme des accidents ou des ruptures du terrain visible (KOUAMÉ, 1999). Ces accidents ou discontinuités structurales caractérisent la fracturation du milieu. L'extraction manuelle consiste à représenter, par des segments de droite, les discontinuités de nature structurale observées sur les images radar RSO traitées. L'échelle de lever utilisée est 1/50.000. Elle permet d'extraire des linéaments structuraux de taille décimétrique, hectométrique et kilométrique. Cette opération qui offre un résultat bien détaillé reste bien entendu, tributaire de l'effet de l'échelle, de l'expérience et de la subjectivité du photointerprète. La carte linéamentaire obtenue est validée à partir de la carte photogéologique et des études structurales réalisées sur le terrain. Les différentes procédures de traitement d'images radar RSO d'ERS2 aboutissant à la cartographie lithostructurale sont illustrées par l'organigramme de la figure 3.

Analyse statistique du champ de fracture

En hydrogéologie, la caractérisation des aquifères de fissure commence par une étude statistique de champ de fractures. En effet, selon FRANCISS (1970), la fracturation conditionne la répartition spatiale des zones de fortes potentialités hydrauliques. Une roche saine non fissurée est imperméable à l'eau et n'offre aucun intérêt en hydrogéologie, car sa capacité en hydraulique et en hydrodynamique est faible. L'analyse statistique du champ de fractures est nécessaire, car elle a pour objectif, la quantification et la localisation des régions à fortes et à faibles densités de fractures ou structures, en vue de déterminer les variabilités du potentiel hydrique de l'aquifère. Cette étude fut effectuée à l'aide du logiciel Linwin. Le traitement statistique des données relatives à la fracturation, permet de définir certains paramètres tels que l'orientation et la longueur des fractures (RAZACK, 1981).

RÉSULTATS

Le résultat du filtrage du chatoiement (bruits granulaires) est illustré par la figure 4. Les discontinuités morphostructurales sont bien rehaussées (figure 4 b). Le choix de la fenêtre n et le nombre d'itération pour éliminer totalement les bruits sont très importants. Une connaissance préalable de l'intensité du bruit doit être évaluée au préalable avant de programmer le nombre d'itérations.

L'analyse de texture (paramètre moyen, fenêtre $n = 3$) appliquée a permis de rehausser d'avantage les discontinuités lithologiques et structurales de la zone d'étude (figure 5). Ici, les grandes formations géologiques sont bien discriminées. On voit bien leurs limites, ce qui nous permet de cartographier avec exactitude, chaque unité lithologique. Par ailleurs, la modélisation en trois dimensions de l'image radar traitée par analyse de texture, montre que les grandes unités géologiques de la zone d'étude ont une topographie différente (figure 6). Le domaine granulitique au nord, a un relief plus accidenté (zone montagneuse), plus de 1000 m d'altitude. Le domaine migmatitique au sud occupe la zone de bas plateau. Les unités de quartzites se distinguent parfaitement des migmatites par leur regroupement en îlots dans la bande de Logoualé.

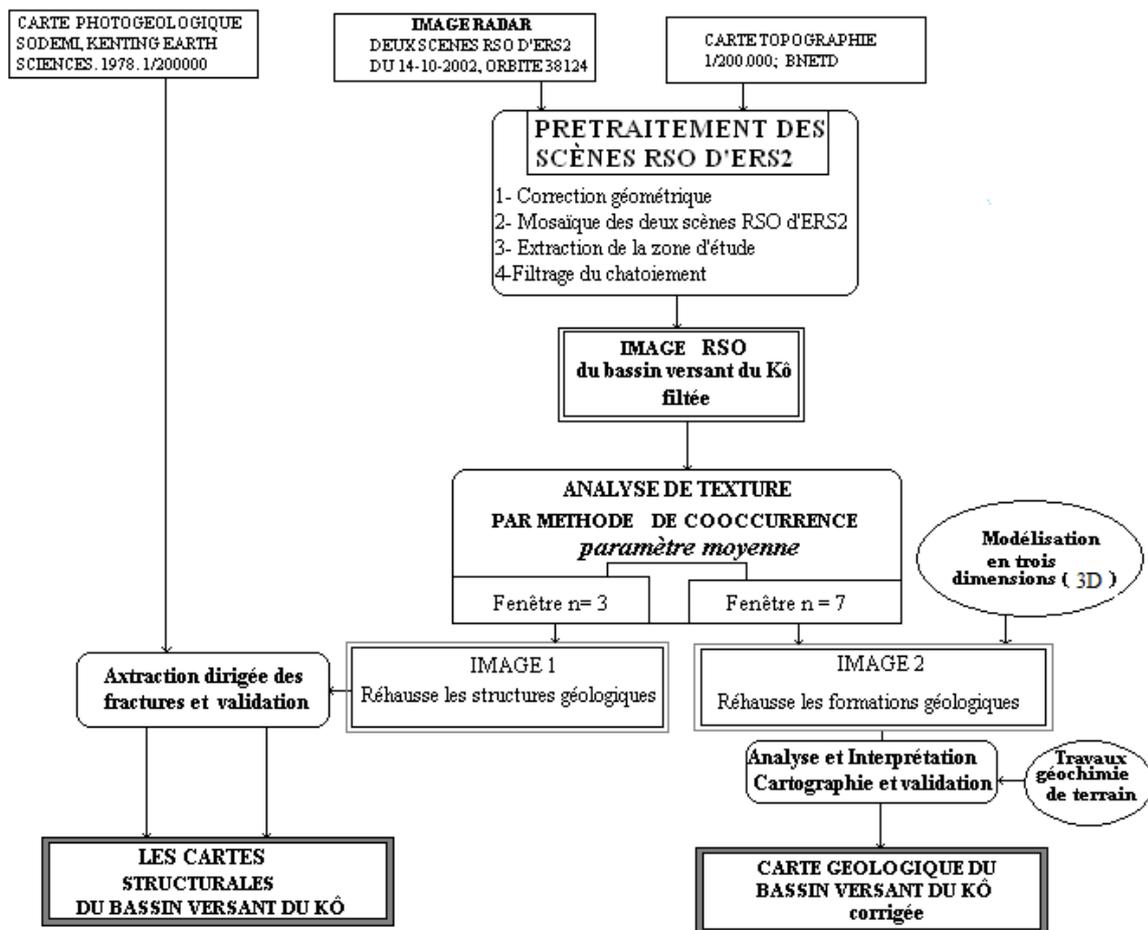


Figure 3: Organigramme récapitulatif des traitements effectués.

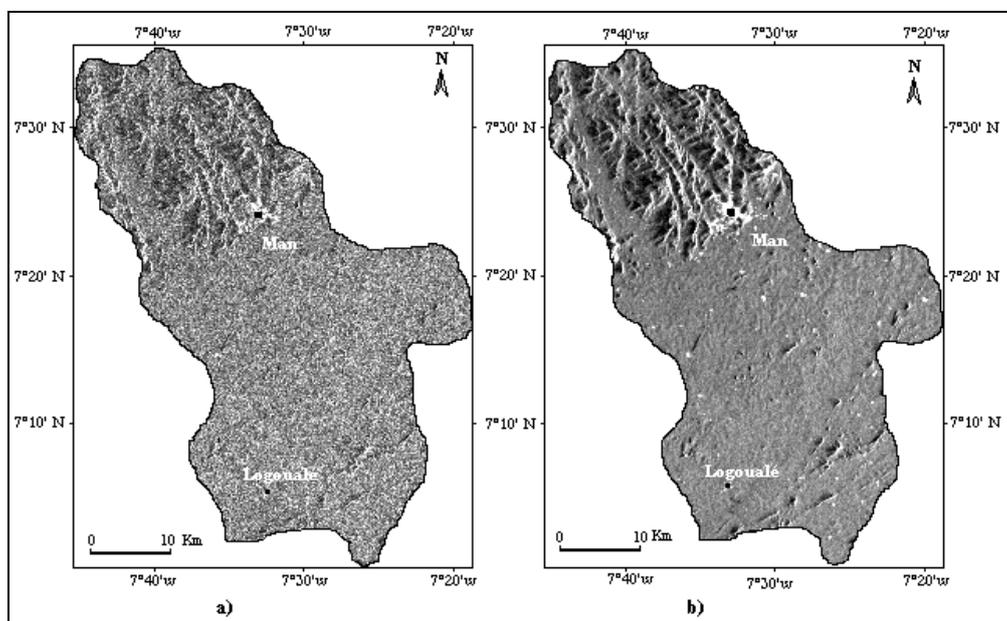


Figure 4: a) Image RSO du bassin versant du Kô avec du chatoiem. b) Résultat du filtre adaptatif de LEE réduisant le chatoiem et rehaussant les structures géologiques.

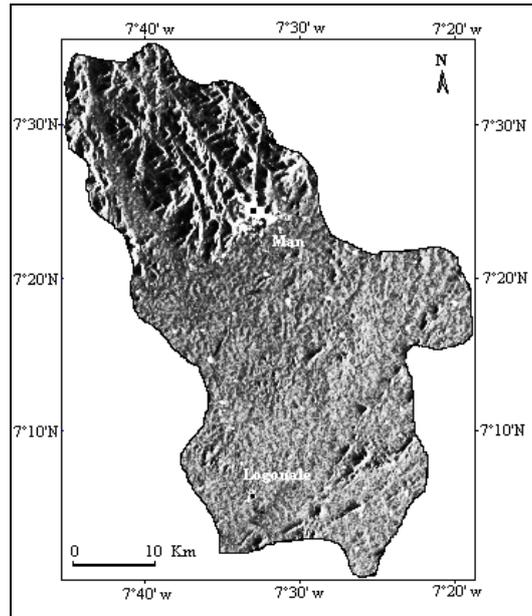


Figure 5: Rehaussement des structures géologiques par analyse de texture, méthode de cooccurrence (paramètre : « moyenne » ; fenêtre : n=3)

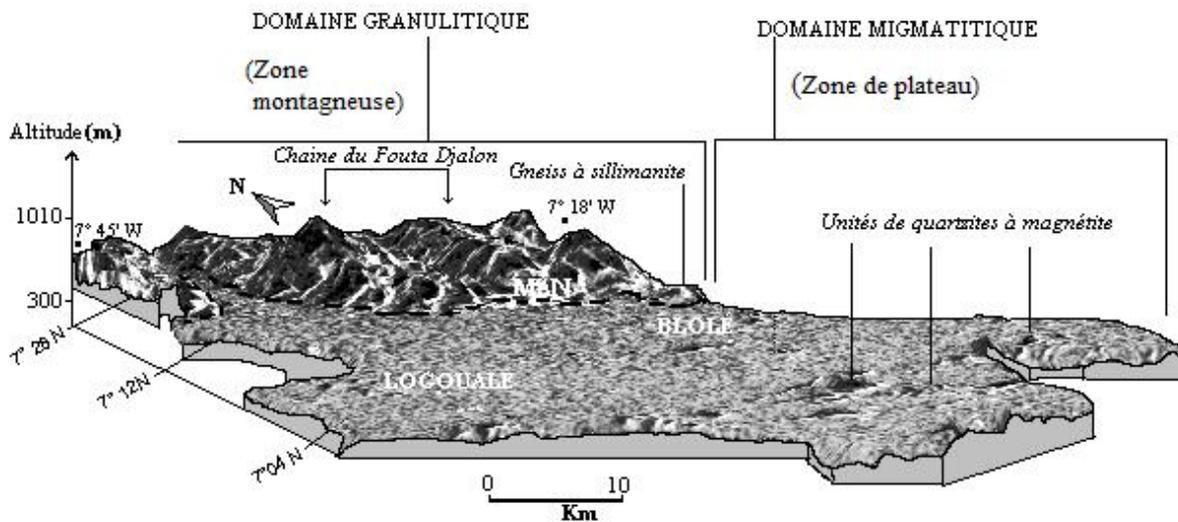


Figure 6 : Présentation de la vue en trois dimensions (3D) de l'image RSO : chaque domaine géologique est caractérisé par un relief spécifique.

Les résultats de l'analyse de texture par méthode de cooccurrence utilisant la moyenne et la fenêtre $n=7$, montre une bonne corrélation entre la texture des contrastes spectraux et les grandes unités lithologiques. En effet, sur la figure 7, le domaine granulitique des gneiss gris tonalitique (Gg) au nord, caractérisé par un relief local plus accentué, adopte une teinte sombre et une texture très rugueuse. Les migmatites à hypersthène (Mh) ont une texture moins rugueuse et sombre. Les migmatites à biotites (Mb) se distinguent des autres formations par leur teinte claire et leur texture lisse. Les unités de quartzites à magnétite (Uq) sont reconstituées en îlots dans le domaine migmatitique. Grâce à ces deux approches, les travaux de prospection géochimique, pétrographique réalisés sur le terrain et les cartes photogéologiques, nous avons délimité avec précision les unités lithologiques de la zone d'étude. La correction de la carte géologique du bassin versant du Kô, est ainsi illustrée par la figure 8.

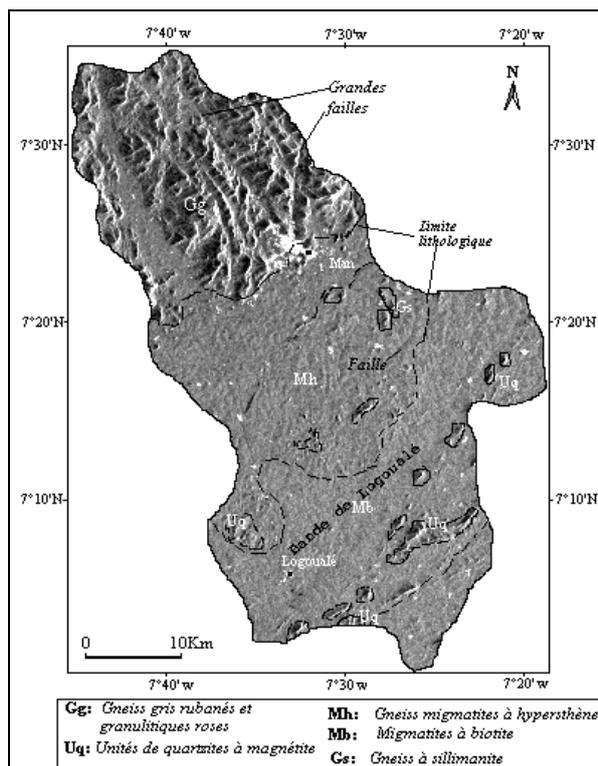


Figure 7: Résultat de l'analyse de texture par méthode de cooccurrence (paramètre moyenne, fenêtre n=7), discrimine les unités lithologiques par alternance de texture.

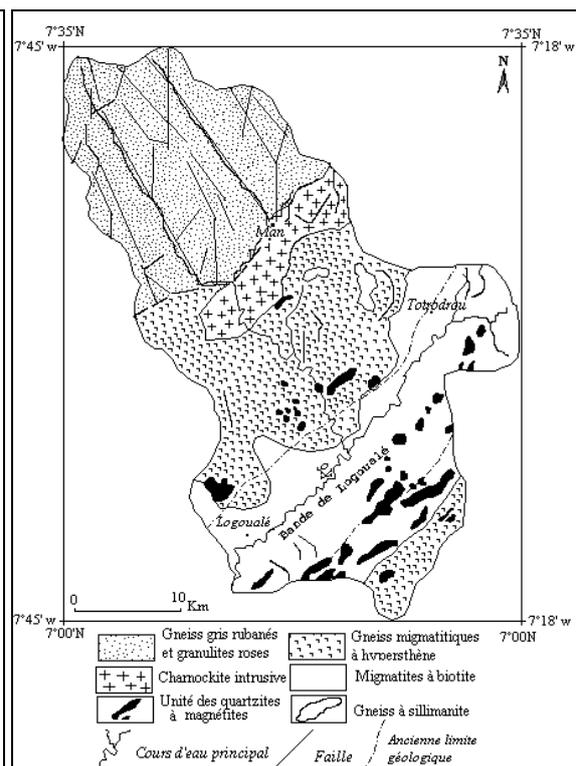


Figure 8: Carte géologique du bassin versant du Kô corrigée

D'autre part, le relevé manuel à l'écran des structures géologiques, mis en évidence par les différents traitements sur l'image RSO d'ERS2, donne un aperçu des accidents qui ont affecté le socle archéen du bassin versant du Kô. Pour confirmer l'origine tectonique ou structurale sur les images, des missions de terrain avec l'appui de la carte photogéologique sont employées pour valider la carte structurale. Il a été ainsi noté que, sur le bassin versant du Kô, toutes les structures extraites sur la carte photogéologique dans la zone d'étude, ont été aussi cartographiées sur l'image radar. Ces structures concernent les failles, les fractures, les directions de diaclases, les schistosités, les contacts progressifs, etc... Le report de ces fractures sur une rose, montre que les directions N0-N10 (17%), N160-N170 (9%) et N20-N30 (8%) sont respectivement les plus fréquentes.

L'étude comparative des deux cartes structurales (structure issue des images RSO ERS2 et structure issue de la carte photogéologique) montre des distributions directionnelles quelques peu différentes sur l'ensemble de la zone d'étude (figure 9). L'on observe cependant un pic directionnel commun, (N0-N10) pour les fréquences en nombre de fractures. La différence entre les densités de fractures au niveau des deux champs (182 fractures pour la photogéologie et 1220 fractures pour l'image radar RSO ERS2) peut expliquer cette configuration des roses. Dans le cas de la photogéologie, les fractures d'extension modestes, souvent plus nombreuses et jouant un rôle très important dans la définition des directions majeures de fracturation n'ont pu être cartographiées. Les résultats de l'image radar RSO ERS2 traitée, permettent d'obtenir une carte de fracturation plus détaillée, car elle met en évidence toutes les discontinuités structurales de la zone d'étude. D'un point de vue général, le bassin versant du Kô est très fracturé. Les ensembles à très forte densité de fractures apparaissent dans les zones migmatitiques. La zone granulitique est moins fissurée. Cependant, elle concentre la totalité des grandes failles.

DISCUSSION

Les résultats obtenus après l'analyse de texture par méthode de cooccurrence, montre la nécessité d'utiliser les images radar pour réussir une étude lithostructurale en milieu tropical humide, où les conditions météorologiques et la forte couverture végétale empêchent les rayonnements solaires d'atteindre le substratum rocheux (DEROIN & SCANVIC, 1995 ; FORD, 1996 ; RANEY, 1998). Le radar, grâce à sa forte sensibilité à la rugosité de surface est plutôt utile à la cartographie structurale (RIOPEL, 2001). Il peut être utilisé avec succès si les formations se distinguent par leur relief (RANEY, 1998). Il apporte à partir de trois principaux descripteurs (le spectre, la texture et la morphologie) des réponses que l'on peut décoder pour identifier la nature lithologique

du terrain (BONN, 1996). Les approches texturales et topographiques appliquées dans cette étude ont permis de distinguer les formations géologiques. La carte structurale issue de l'image radar révèle que le domaine migmatitique est plus fracturé que le domaine granulitique malgré la présence de grande faille. En plus, les orientations des drains coïncident avec celles des fractures. Le pic commun N0-N10 indique la direction des grandes failles et le sens des écoulements d'eau de la Côte d'Ivoire. Les cours d'eau du bassin versant empruntent, pour la plupart, le réseau de fracturation.

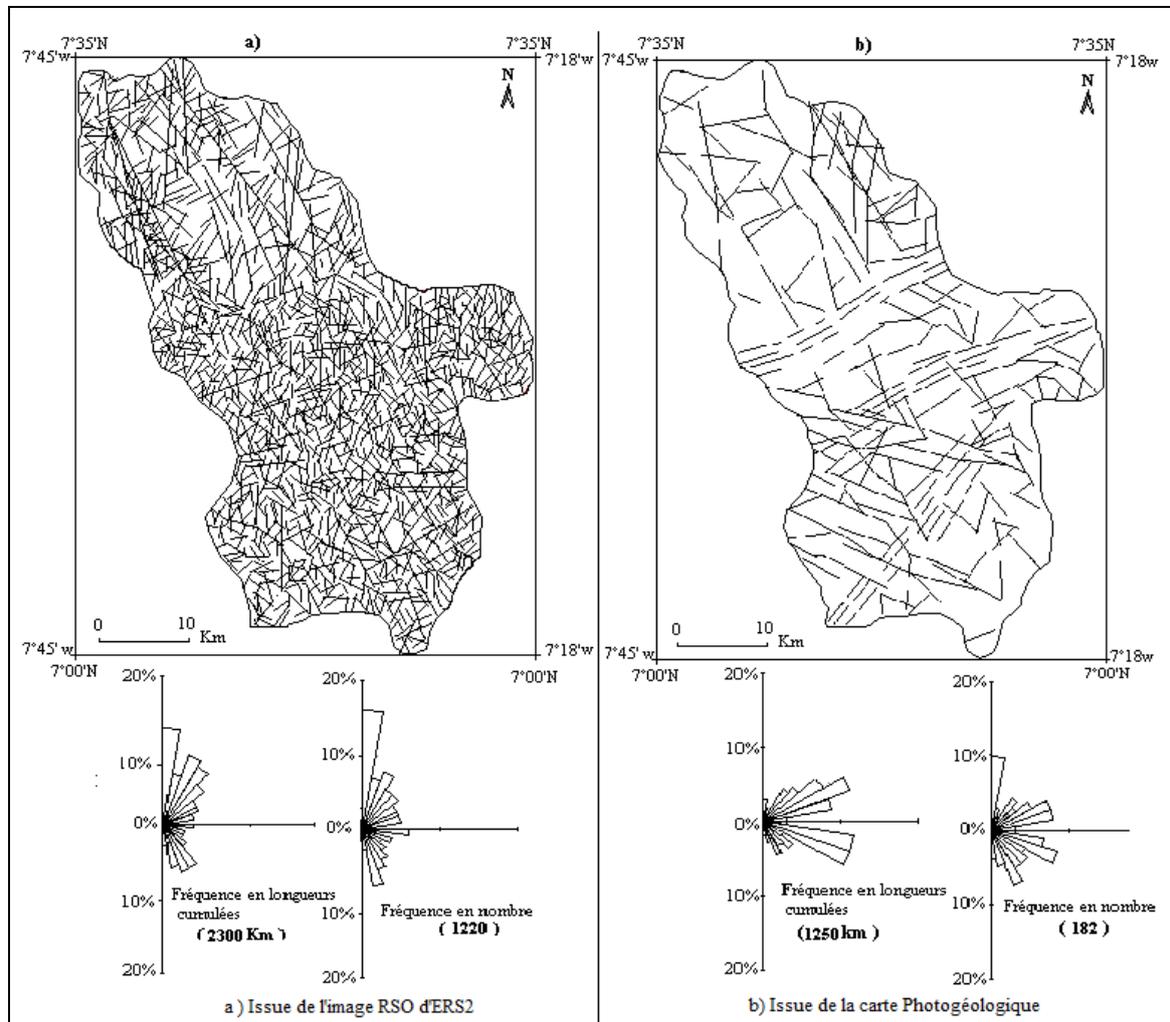


Figure 9: a) Carte structurale issue de l'image RSO d'ERS2 avec les rosaces directionnelles b) Carte structurale issue de la carte photogéologique avec les rosaces directionnelles

CONCLUSION

La cartographie géologique et structurale constitue des volets importants des programmes de prospection minière et d'évaluation des potentiels hydriques des milieux fissurés. Cette étude a démontré que le capteur RSO d'ERS2 est un outil de choix dans cet environnement où le socle géologique est difficilement accessible à cause de la forte couverture végétale. Les traitements spécifiques comme le filtrage du chatouement par le filtre adaptatif de LEE et l'analyse de texture par la méthode de cooccurrence utilisant le paramètre « moyenne », ont permis de rehausser les discontinuités morphostructurales de la zone d'étude. Ils ont, en plus, amélioré la discrimination des unités lithologiques : les gneiss gris tonalitique, les migmatites à hypersthène, les migmatites à biotite et les complexes des quartzites, du bassin versant de Kô, ont été identifiés, selon l'alternance de texture (teinte et rugosité) et de relief observés sur l'image radar traitée. La cartographie lithologique à consister à regrouper les régions des images possédant un arrangement textural et topographique commun. Les résultats validés par les cartes géologique et photogéologique existantes, et les travaux géochimiques et pétrographiques

de terrain, ont permis de corriger et de dresser les vraies limites des formations géologiques du bassin versant du Kô. L'extraction des structures géologiques fut réalisée de manière dirigée. Les résultats obtenus, après analyse statistique du champ de fracturation montre que les directions structurales majeures sont N0-N10, N30-N40 et N160-N170. Au total, 1220 fractures ont été cartographiées grâce à l'apport de l'imagerie radar. La connaissance des paramètres structuraux est nécessaire à la caractérisation de l'aquifère du bassin versant du Kô.

REMERCIEMENT

Les auteurs remercient l'Agence Universitaire pour la Francophonie d'avoir pu bénéficier du soutien de l'allocation du fonds francophone de la recherche

RÉFÉRENCES

- BIEMI, J., P. GIAN, K. AFFIAN, J.P. JOURDA et KOUAMÉ F, 1998, Système d'information hydrogéologique pour une évaluation du potentiel hydrique en milieu cristallophyllien fissuré : la région de Biankouma-Man (Ouest de la Côte d'Ivoire). p. 261-270, *In* : P. J.-M.M. Dubois, M. Bernier, J.-P. Fortin et BOIVIN (dir). La réalité de terrain en télédétection : pratique et méthodes. Série d'actualité scientifique, AUPELF-UREF, Montréal, 356 p.
- BONN F, 1996, Précis de télédétection. *vol. 2. Application thématique*. Presses de l'Université du Québec et AUPELF, Sainte Foy. 485p.
- BONN, F et ROCHON G, 1992, Précis de télédétection. Vol. 1. Principe et méthodes. Presses de l'université de Québec et AUPELF, Sainte Foy, 485p.
- CALOZ R. et COLLET C, 2001, Précis de télédétection. Vol :3. Traitement numériques d'images de télédétection. Presses de l'Université du Québec, Sainte Foy. 386p.
- CAMIL, J, 1984, Prétrographie, chronologique des ensembles granulitiques archéens et formations associées de la région de Man (Côte d'Ivoire). Implications pour l'histoire géologique du craton Ouest africain. Thèse d'État. Univ. Côte d'Ivoire 306p.
- CASTAING, C., P. DUTARTRE, J.F. OUYET, P. LOISEAU, P. MARTIN, POINTET T, 1998, Etude pluridisciplinaire d'un réseau de discontinuités image SPOT en milieu granitique couvert. Implications en hydrologie des milieux fissurés. Bulletin Société française de photogrammétrie et télédétection, 113, 1 : 13-23.
- DEROIN, J. P. et SCANVIC J.Y, 1989, Apport de l'imagerie radar à la cartographie géologique. Billetun de la société Française de photogrammétrie et de télédétection, 138 : 96-109.
- DJRO, S.C, 1998, Evolution tectono-métamorphiques des gneiss granulitiques archéens de Biankouma-Touba, nord-ouest de la Côte d'Ivoire. Thèse de Doctorat. Es Sc. Naturelle / Université de Cocody 171 P
- EMRAN, A., J. CHOWICZ, N. CERVELLE, TAMAIN G, 1988, Cartographie géologique et analyse de la fracturation du sud de l'Anti-Atlas Central (Maroc) à partir d'une imagerie Landsat MSS. pp. 23-40.
- FORD, J.P, 1996, Radar geology, chapter 10, *In* : R.A. Ryerson Principles and application of imaging radar manual of remote sensing. John Wiley and Sons INC. Third edition, 2 : 511-566.
- FRANCISS F.O, 1970, Contribution à l'étude du mouvement d'eau à travers les milieux fissurés. Thèse Doct. Ing., Univ. Grenoble I, 108p.
- HARALICK R. M, 1979, Statistical and structural approaches to texture. Proc. IEEE, 67, 5 : 786-804.
- JOLY, G, 1986, Traitements de fichiers-images. Télédétection satellitaire 3, Paradigme, 137p
- KOUAMÉ K.F, 1999, Hydrogéologie des aquifères discontinus de la région semi- montagneuse de Man-danané (ouest de la Côte d'Ivoire). Apport des données des images satellitaires et des méthodes statistique et fractale à l'élaboration d'un système d'information hydrogéologique à référence spatiale. Thèse de Doctorat 3^{ième} cycle, Univ. Cocody. 200 p.
- KOUAMÉLAN A.N, 1996, Géochronologie et géochimie des formations archéennes et protérozoïques de la dorsale de man en Côte d'Ivoire. Implications pour la transition archéen-protérozoïque. Thèse de Doctorat de l'Université de Rennes 1, 277 p.
- LAKE, L.A, 1991, Analyse des méthodes texturales appliquées au traitement des images. Essai. Département de géographie et Télédétection. Université de Sherbooke, 38p
- LEE J.S, 1980, Digital image enhancement and noise filtering by use of local statistics. IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence 2 (2).
- PHILIP, A, 1989, Rock description in the complex geologic environment of Jabal Salma, Saudi Arabia, using Landsat Thematic Mapper Data. 55, 8 : 613-642 Département of geography, Northern Arizona University.
- POLIDIRI, L, 1996, Cartographie radar. Vol. 1. Univers de la télédétection Département de géographie et télédétection. Univ. de Sherbrooke, Québec. 287 p.
- RANEY, R.K, 1998, Radar fundamentals. Technical perspective, chapter 2. *In* : R.A. Ryerson (ed). Principles and applications of imaging radar-manual of remote sensing. Third edition. Vol. 2 : 9-130.

RAZACK, M, 1981, Contribution à l'étude de la structure des aquifères en roche fissurées. Numérisation et analyse quantitative de la fracturation relevée sur clichés aériens. Bull. Rech. Géol. Min. (2). 3 : 257-262.

RIOPEL, S, 2001, Cartographie géologique à l'aide du capteur RSO de Radarsat-1 : cas de l'île Axel Heiberg, Arctique Canadien. Télédétection, 2, 2 : 103-117.

SALEY M.B, 2003, Système d'information hydrogéologique à référence spatiale, discontinuités pseudo-images et cartographies thématiques des ressources en eau de la région semi-montagneuse de Man (ouest de la Côte d'Ivoire). Thèse unique Université de Cocody-Abidjan. 211 p.

TONYE, E. , A. AKONO, A. et A. NDI NYOUGUI, A, 1999, Le traitement des images par exemples de télédétection par exemples. Unv de Yaoundé1, Ecole nationale supérieure polytechnique de Yaoundé. 252 p.