

Réalisation d'une image pseudo-panchromatique RSO de Radarsat-1 pour la cartographie lithostructurale du socle précambrien dans la région de Korhogo (Nord de la Côte d'Ivoire)

[Performing a pseudo-panchromatic SAR image of Radarsat-1 for lithostructural mapping of the Precambrian basement in Korhogo region (North of Côte d'Ivoire)]

Kouamé Koffi¹, Adja Miessan Germain², Saley Mahaman Bachir¹, and Jourda Jean Patrice Roger³

¹Centre Universitaire de Recherche et d'Application en Télédétection,
Université Félix Houphouët Boigny,
Abidjan, Côte d'Ivoire

²Département des Sciences et Technologies,
Ecole Normale Supérieure,
Abidjan, Côte d'Ivoire

³Laboratoire de Télédétection et d'Analyse Spatiale Appliquée à l'Hydrogéologie,
Université Félix Houphouët Boigny,
Abidjan, Côte d'Ivoire

Copyright © 2013 ISSR Journals. This is an open access article distributed under the ***Creative Commons Attribution License***, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

ABSTRACT: This study shows the potential for discrimination of lithological units of the Precambrian basement with a monoband RADARSAT-1 low spatial resolution (50 m) image. The methodological approach was to produce and exploit a pseudo-panchromatic (15 m) SAR image. SAR image was first denoised then georeferenced using the panchromatic band of Landsat ETM+. The wavelet fusion and multi-resolution analysis technique has been used to produce a pseudo-panchromatic SAR image (15 m) marked "PR". The "Wallis" adaptive filter, synthetic colors transformation and texture parameters calculation were applied to "PR" to enhance the lithological units contours. Primary analysis associated with the interpretation of images deriving from the directional weighted 7x7 Sobel filters, revealed image discontinuities similar to geological fractures. The use of images derived treatments applied to "PR" has allowed bringing out lithostructural various information. According to tone and texture variations, four major geological ensembles consist of mafic and intrapaléozoïques Birimian formations were distinguished from six images facies that characterize the region's geology. These are Baoulé type granite of craton forming the Korhogo massif, Baoulé type granite of geosynclines forming the Ferké massif, sedimentary facies Birimian series forming the Dioula and Haut-Bandama series. The lineaments and major fractures study gave the main structural directions with SW-NE as the dominant orientation. Similarly, extensions of some fractures, not apparent on existing maps, have been revealed. Synthesis of this information gave a new lithostructural map. Comparing it with previous works showing that the geological contours mapped are the same with those references. However, the Niellé massif and Dioula volcano-sedimentary series could not be differentiated. Similarly, simulated image was ineffective at detailed mapping.

KEYWORDS: Pseudo-panchromatic Radarsat image, wavelet transform fusion, lithostructural mapping, Precambrian basement, Korhogo, Côte d'Ivoire.

RESUME: Cette étude montre les potentialités de discrimination des unités lithologiques du socle précambrien à l'aide d'une image monobande RSO de RADARSAT-1 de faible résolution spatiale (50 m). La démarche méthodologique a consisté à produire une image Radarsat pseudo-panchromatique (15 m) à l'aide de la fusion par transformée en ondelettes avec la bande panchromatique (15m) ETM+ de Landsat 7. Les discontinuités images ont été rehaussées par filtrage directionnel au

Sobel 7x7 pondérés. L'étude linéamentaire et des fractures majeures a permis de relever les principales directions structurales (N0-10, N110-120 et N150-160). De même, les prolongements de certaines fractures, non apparents sur les cartes existantes, ont été révélés. L'interprétation de l'image simulée à 15 m, des produits du calcul paramétrique de texture et de la convolution au filtre adaptatif de Wallis a permis, suivant les variations de ton et de texture, de proposer une nouvelle esquisse lithostructurale à partir de six faciès images caractéristiques de la géologie de la région.

MOTS-CLEFS: Pseudo-image panchromatique Radarsat, fusion par transformée en ondelettes, cartographie lithostructurale, socle précambrien, Korhogo, Côte d'Ivoire.

1 INTRODUCTION

Cette étude propose une méthodologie pour rehausser et discriminer le contenu informatif géologique d'une image Radarsat de faible résolution spatiale (50). Le but est d'évaluer son potentiel pour la cartographie des unités lithostructurales du socle précambrien dans la région de Korhogo.

La région de Korhogo appartient au secteur des savanes subsoudanaises. Ces savanes sont très variées et comportent différents types de paysages ; à savoir, des savanes boisées, arborées, arbustives et herbeuses. S'y rencontre aussi des steppes arborées-arbustives et herbacées, des forêts claires et des forêts galeries. Toutes ces formations végétales constituent un obstacle à l'identification de l'information géologique sous-jacente. La sensibilité du capteur radar à synthèse d'ouverture (RSO) de Radarsat-1 aux variations topographiques, de rugosités de surface et d'humidité permet une bonne reconnaissance des éléments géologiques d'une région [1]. L'imagerie radar qui peut être utilisée de jour comme de nuit semble être bien indiquée pour optimiser la cartographie des unités lithostructurales du socle précambrien de l'Afrique de l'Ouest [2].

La présente étude s'intègre dans la problématique générale de l'Applicabilité des Techniques de Télédétection en Afrique de l'Ouest (ATTAO), axe de recherche développé au CURAT. Elle aborde également la pertinence de l'utilisation en cartographie géologique de l'image radar dont le contenu informatif, selon [3], est de bien plus faible qualité qu'une image dans le domaine optique tant du point de vue de la résolution spatiale que spectrale. L'image monobande RSO de Radarsat-1 utilisée (bande C de 50 m de résolution) a été affinée par la méthode de fusion par transformée en ondelettes avec une image panchromatique ETM+ (15 m de résolution). La pseudo-panchromatique image Radarsat résultante a fait l'objet de traitements spécifiques de filtrages spatiaux et directionnels destinés à améliorer la perceptibilité des unités structurales et géologiques et faciliter leur cartographie. Partant de ces travaux, la région de Korhogo, objet d'intenses explorations minières ayant abouti à la découverte du plus important gisement d'or de Côte d'Ivoire, celui de Tongon [4], disposera de données géologiques plus actualisées et affinées. En outre, la vulgarisation de la méthodologie permettra d'optimiser l'étude géologique de toutes les régions de socle.

1.1 LOCALISATION ET CARACTERISTIQUES PHYSIQUES DE LA ZONE D'ETUDE

La zone d'étude est le Degré Carré de Korhogo. Il est compris entre les latitudes 9° et 10° Nord et les longitudes 5° et 6° Ouest (fig. 1). Il est localisé dans la région des savanes au Nord de la Côte d'Ivoire, en Afrique de l'Ouest. La région est soumise à un climat tropical de type soudano-sahélien et la végétation appartient au domaine soudanais, très hétérogène [5]. Le paysage dans son ensemble est un vaste plateau mollement ondulé. L'altitude moyenne varie entre 300 et 400 mètres et la majorité des pentes entre 2 et 4 %. Reposant sur un substratum granitique ou schisteux, les sols de la région de Korhogo sont essentiellement ferrallitiques et ferrugineux tropicaux étroitement imbriqués [6].

1.2 CONTEXTE GEOLOGIQUE DU DEGRE CARRE DE KORHOGO

Sur le plan géologique, les formations rocheuses d'âge protérozoïque [7]-[9], appartenant au complexe éburnéen, (fig. 2) font partie du domaine Baoulé-Mossi affecté par l'orogénèse éburnéenne (1800 à 2000 Ma). Cette région se caractérise par une succession de bandes de roches schisteuses, migmatitiques et plutoniques d'orientation NNE – SSO [7]. Ainsi, s'observent d'Ouest en Est : une bande de granites à biotite formant le massif de Niéllé ; une zone de métasillites dominant sur méta-arénites avec par endroits des roches basiques, des granites indifférenciées et à deux micas formant la série de Dioula ; une bande de granite à biotite (type baoulé de craton) bordée à l'Est et au Sud-Est de granodiorite (type koffisouka) et de granite à deux micas formant le massif de Korhogo. Une nouvelle bande de formations sédimentaires métamorphisées constituées de métasillites dominants sur méta-arénites et de méta-arénites dominants sur métasillites forme la série du haut Bandama ; une bande de granite à deux micas (type Ferkessédougou) désignée par le massif de Ferké.

Sur le plan structural les zones nord et nord-est présentent une prédominance des fractures orientées ONO ; sur le reste du Degré Carré, le système ENE est presque aussi fréquent [10]. Sur les granites à deux micas et à biotite, un réseau de fractures d'orientations diverses forme une maille structurale d'ordre kilométrique. Les migmatites post-birimiennes et anciennes montrent des directions structurales visibles de même que les schistes grâce à leur schistosité. Le style tectonique de la région est marqué de plusieurs déformations [11] : des plis d'aplatissement à l'origine de foliation dans les schistes et les migmatites, des cisaillements ductiles caractérisés par un ensemble de couloirs de direction et de sens variés essentiellement liés à la migmatisation et la granitisation, des cisaillements cassants ou fractures. Les directions de fracturation sont calquées sur celles de la déformation cisailante.

2 MATERIEL ET METHODE

2.1 MATERIEL

L'étude lithostructurale téléalalytique du Degré Carré de Korhogo a été menée avec une image monobande RSO de Radarsat-1 acquise le 21 septembre 1999 dans la bande C avec une polarisation HH et 50 m de résolution spatiale et trois scènes ETM+ de Landsat 7 prise en saison sèche (198-53 du 21 décembre 1999, 197-53 et 197-54 prises le 31 janvier 2000).

Des cartes existantes du Degré Carré de Korhogo ont été utilisées comme données de référence à différentes étapes de l'étude. Il s'agit : des cartes géologiques de Korhogo au 1/200 000 [9] et de Katiola au 1/500 000 [7] et de la Côte d'Ivoire 1/4000000 [8]; des cartes topographiques du Degré Carré de Korhogo (la feuille NC-30-VII au 1/200 000 et 16 coupures : 1a-1d, 2a-2d, 3a-3d et 4a-4d au 1/50 000)[12] ; et d'un extrait de la carte des indices miniers à 1/500 000 [4].

2.2 METHODE

La méthodologie employée dans cette étude comprend quatre grandes sections : débruitage ou réduction du chatoiement dans l'image RSO de Radarsat, géoréférencement des images et affinage de la résolution spatiale de l'image RSO de Radarsat-1. A l'image pseudo-panchromatique RSO de Radarsat-1 résultante sont appliquées des techniques de filtrages et de rehaussement du contenu informatif. Les différents produits dérivés ont été utilisés pour la cartographie lithologique et structurale de la région d'étude.

2.2.1 DEBRUITAGE OU FILTRAGE DU CHATOIEMENT DE L'IMAGE RADARSAT

Les images radars sont obtenues par illumination de la scène d'un faisceau d'ondes cohérentes. Quand ce faisceau se réfléchit sur des surfaces diffusantes, celles-ci présentent un aspect granulaire que l'on nomme speckle ou chatoiement. Le speckle est un bruit multiplicatif qui complique l'interprétation et le traitement des images radar [2], [13], [14]. Plusieurs filtres ont été explorés pour la réduction du speckle dans l'image monobande RSO de Radarsat-1. Il s'agit des filtres adaptatifs moyen, médian, de Lee, Gamma, de Frost et local sigma [15], [16]. Leur efficacité a été évaluée par le calcul du contraste (C) dans des zones homogènes [14] par la relation de l'équation 1 :

$$C = \frac{\sigma}{m} \quad (1)$$

où σ et m l'écart type et la moyenne de la distribution de la zone homogène.

Plus la valeur de C est faible, plus le filtrage est efficace. Ce contraste a été calculé dans deux parcelles homogènes (PH1 et PH2), encadrées en rouge sur les portions d'image Radarsat (a) et (b) de la figure 3, aussi bien pour l'image bruitée que pour l'image filtrée résultante des différents filtres listés ci-dessus. L'analyse des valeurs résultantes complétées avec l'analyse visuelle ont permis d'identifier l'image la mieux débruitée pour la suite des traitements.

2.2.2 CORRECTION GEOMETRIQUE ET GEOREFERENCMENT DES IMAGES

La méthode de modélisation mathématique polynomiale a été appliquée pour le géoréférencement des images car les projections associent les coordonnées géographiques (sur la sphère ou l'ellipsoïde) et les coordonnées planes (projetées) par le biais de fonctions mathématiques trigonométriques et/ou logarithmiques. Nous avons procédé d'abord à la correction géométrique des images ETM+. Les points d'appui ont été choisies à partir d'une mosaïque de six (6) cartes topographiques à 1/50 000 (Korhogo 1c, 1d, 3a, 3b, 3c, 3d) [12] numérisées au préalable. Les trois scènes géoréférencées ont été assemblées en une mosaïque après un calibrage radiométrique qui a permis de réajuster la moyenne et l'écart type entre les différentes

scènes. Cette mosaïque ETM+ de Landsat a été utilisée comme image de référence pour la correction géométrique de l'image Radarsat dont la résolution spatiale a été ramenée après rééchantillonnage par convolution cubique à 30 m. La figure 4 résume l'ensemble des traitements effectués.

Les erreurs résiduelles présentées dans le tableau 1 étant inférieures au demi-pixel (15m pour les bandes ETM+), la correction est dite satisfaisante.

2.2.3 REALISATION D'UNE PSEUDO- IMAGE PANCHROMATIQUE RSO DE RADARSAT-1

Cette opération, résumée par la figure 5, a été réalisée avec le module « **Wavelet Resolution Merge** » du logiciel ERDAS Imagine 8.7. Ce module permet d'améliorer la résolution spatiale relativement faible des images multispectrales en utilisant une image panchromatique co-registree de haute résolution [16].

Au terme des prétraitements (débruitage, correction géométrique et rééchantillonnage) une image Radarsat de 30 m de résolution spatiale co-registree à l'image ETM+ est générée. La suite des traitements se décompose alors en deux étapes ; la première consiste à isoler les structures de détail comprises entre les résolutions 15 et 30 m de l'image panchromatique. Ces structures de détails sont isolées dans trois images de coefficients d'ondelettes couramment associées aux détails de l'image selon trois directions : verticale, horizontale et diagonale. La décomposition produit également une image dégradée appelée coefficient d'approximation.

L'algorithme du traitement automatisé sous ERDAS Imagine 8.7 est inspiré des travaux de [17]. Basé sur l'ondelette spline biorthogonale, il commence par l'égalisation de l'histogramme de l'image Radarsat débruitée avec celui de la bande panchromatique (ETM P). Celle-ci est décomposée par Transformée en Ondelettes Discrètes (TOD) en quatre composantes possédant une résolution de 30 m : l'image dégradée à 30 m (A), les composantes extraites dans les directions horizontale (h), verticale (v) et diagonale (d). La deuxième étape consiste à injecter le coefficient d'approximation (A) et les détails à l'intérieur de l'image Radarsat grâce à la Transformée en Ondelettes Discrètes Inverses (TODI). L'image Radarsat simulée à 15 m de résolution spatiale nommée image pseudo-panchromatique RSO de Radarsat-1 (PR) est ainsi obtenue. Elle conserve les qualités spectrales de l'image Radarsat d'origine.

2.2.4 REHAUSSEMENT DU CONTENU INFORMATIF DE L'IMAGE PSEUDO- PANCHROMATIQUE RSO DE RADARSAT-1 (PR)

La figure 6 résume les étapes du rehaussement du contenu informatif lithostructural de l'image PR. A l'image PR, ont été appliqués les filtres de « wallis » et directionnels de Sobel 7x7. L'interprétation visuelle des néo-canaux radars produits a permis de dresser une carte lithostructurale télanalytique qui a été validée à l'aide des travaux antérieurs et des données de terrain.

2.2.4.1 DISCRIMINATION DES UNITES LITHOLOGIQUES

La discrimination des unités lithologiques est rendue possible grâce à l'application des filtrages de « wallis », de la transformation en couleurs synthétiques et du calcul de cooccurrences à l'image PR.

Le filtre adaptatif « Wallis » permet d'ajuster l'étalement de contraste d'une image en utilisant les valeurs locales d'une zone (définie par la taille de la fenêtre). Trois possibilités d'implémentation de cette technique sont disponibles sous ERDAS Imagine 8.5 : « Bandwise », IHS et Composante Principale. L'image radar disponible pour notre étude étant une monobande, l'opération « Bandwise » dans laquelle le filtre adaptatif est appliqué de façon séquentielle sur chaque bande a été choisie.

La transformation en couleur synthétique permet, à partir d'une image en niveau de gris, de produire une image synthétique couleur. Cette transformation est souvent appliquée aux images radar pour améliorer l'affichage d'objets subtiles à grande échelle tout en maintenant les détails fins [18].

L'extraction de l'information contenue dans les images résultant des différents traitements s'est faite uniquement par interprétation visuelle. Dans cette approche, l'information interne de l'image (luminance spectrale et positionnement relatif ou voisinage) est décrite à travers l'analyse de différents paramètres ; notamment le ton, la couleur et la texture.

2.2.4.2 CARTOGRAPHIE DES ELEMENTS STRUCTURAUX

D'une manière générale, cette cartographie s'est faite à des échelles de 1/650 000 offrant une vue synoptique à un maximum de 1/200 000. Au-delà, les pixels deviennent illisibles, ce qui rend quasi-impossible la discrimination des objets structuraux dans l'image. La meilleure cartographie est obtenue à partir d'une échelle de 1/250 000.

Pour faciliter les opérations d'interprétation et mieux discerner les éléments d'analyse structurale, l'analyse primaire et le filtrage directionnel des images ont été exploités.

L'Analyse primaire consiste à l'extraction de linéaments sans application d'aucun filtre directionnel, ni de rehaussement sur l'image et par interprétation visuelle de l'image.

Les filtres directionnels sont utilisés pour rehausser les caractéristiques linéaires comme les routes ou limites des champs dans une image. Ils sont aussi conçus pour rehausser des caractéristiques ayant une certaine orientation dans l'image. Dans le cas des applications en géologie, ces filtres servent à détecter les fractures ayant de grandes fréquences spatiales [19].

Les filtres utilisés sont les filtres de Sobel 7x7 (fig. 7) calculés par [11], [20] avec l'affectation d'un poids (fig. 8) plus élevé que celui utilisé jusqu'à présent dans les travaux antérieurs en Côte d'Ivoire. La valeur du poids de la matrice a une importance au niveau du filtre pour mieux discrétiser les discontinuités-images [21]. Par ailleurs, les travaux antérieurs [11], [20], [22]-[23] révèlent que la fenêtre 7x7 fait mieux ressortir les informations structurales. Les linéaments sont plus visibles et les risques de confusion moins grands.

Sur les images filtrées, les variations brusques d'intensité soulignent les hautes fréquences spatiales et permettent de rehausser les discontinuités-images. L'interprétation des discontinuités-images permet de cartographier les linéaments.

Dans cette étude, le terme « linéament » décrit toute structure ayant un tracé rectiligne ou curviligne [24], [25] et dont l'interprétation a une signification géologique. Les linéaments géologiques ont des descripteurs directs (failles, joints, contacts lithologiques, dykes, etc.) ou indirects (escarpements, talwegs, contrôle structural du tracé des cours d'eau, etc.) en rapport avec le modelé du relief [26]. Ils sont parfois associés à des alignements d'indices biologiques (alignement de termitières ou de certaines espèces végétales) ou à des discontinuités géomorphologiques (variations minéralogiques dans les cuirasses ou les sols) [27].

2.2.4.3 VALIDATION DU CONTENU INFORMATIF DES IMAGES ET VERITE TERRAIN

Les diverses informations thématiques extraites des images traitées ont été validées par comparaison avec les données exogènes. Ces cartes numérisées et géoréférencées ont été superposées aux cartes téléanalytiques à l'aide du logiciel Arcview GIS 3.2 pour relever les similitudes et divergences entre ces cartes. Ainsi, la carte de synthèse géologique téléanalytique a été superposée aux cartes suivantes :

- cartes géologiques de référence [6], [8], [9];
- cartes des affleurements visités et dont des échantillons de roches ont été décrites en lame [11] ;
- carte du réseau hydrographique de la zone d'étude.

A la suite de ces comparaisons, des contrôles de terrain ont ensuite été effectués pour corriger les incohérences. Sur le plan structural, la phase de contrôle et de validation des accidents géologiques extraits du traitement numérique des images ETM+ est indispensable pour juger de la pertinence de la méthode utilisée. Les structures identifiées à partir des images satellitaires ont fait l'objet d'une analyse fréquentielle. Les directions principales ont été comparées à celles des cassures de l'ensemble de la Côte d'Ivoire [28] et des accidents majeurs relevés en imageries satellitaires optiques dans la région de Korhogo [11].

3 RESULTATS ET DISCUSSION

3.1 RESULTATS

3.1.1 ANALYSE DE L'EFFICACITE DU FILTRAGE DE L'IMAGE RADARSAT

La figure 9 montre les produits de convolution des différents filtres testés pour le débruitage. L'examen visuel de ces images filtrées ne montre aucune différence notable avec l'image Radarsat brute initiale.

Les valeurs de contraste ont donc été analysées, ainsi que les moyennes et les écart-types (tableaux 2, 3 et 4). Il ressort que :

- dans la première zone homogène (zone de très faibles réflectances ayant des niveaux de gris autour de 2), les valeurs de contraste varient entre 1,51 et 2,23 (tableau 2). C'est le filtre moyen qui présente le contraste le plus faible. Son filtrage est par conséquent le plus efficace dans cette zone tandis que le filtre local sigma présente le filtrage le moins efficace;

- dans la deuxième zone homogène (zone caractérisée par de fortes réflectances avec des moyennes de niveau de gris autour de 254,9 très proche de la valeur maximale, 255), les valeurs de contraste sont quasi nulles (tableau 3). Il faut aller jusqu'au $1/1000^e$ pour percevoir une relative différence. Dès lors, trois niveaux d'efficacité sont distingués. Le filtre médian avec une valeur nulle est de loin le meilleur. Les filtres de Kuan, Lee et moyen ont le même niveau d'efficacité avec la même valeur de contraste (0,00244) ;
- l'image originale (tableau 4) présente toujours les contrastes les plus élevés par rapport aux images filtrées. Cela atteste que l'image nécessitait effectivement un débruitage.

L'analyse comparée des contrastes révèle que le filtrage demeure toujours plus efficace avec les filtres de Lee et moyen dans les trois images. Cependant, les filtres répondant le mieux aux contraintes liées au speckle sont les filtres adaptatifs basés sur le filtrage de Kalman ou prenant en compte les statistiques locales. L'image filtrée avec le filtre de Lee (5 x 5) a donc été retenue pour la suite des traitements.

3.1.2 UNITES LITHOLOGIQUES DU SOCLE PRECAMBRIEN DANS LE DEGRE CARRE DE KORHOGO

A la suite des traitements spécifiques effectués, les images dont le contraste offre une bonne interprétation visuelle sont l'image Radarsat simulée à 15 m, les images dérivées du calcul de cooccurrence (paramètre moyenne) et l'application du filtre adaptatif de Wallis. L'analyse de ces images permet de distinguer, suivant la variation du ton et de la texture, six (06) faciès-images (fig. 10) qui se rapportent à certains ensembles lithologiques connus.

Le faciès de la figure 10a se retrouve au centre de l'image en une forme circulaire centrée sur la ville de Korhogo avec un rayon d'environ 34 Km. Il se reconnaît aisément à première vue par les plages blanches relativement plus larges sur un fond noir. Ses limites se confondent avec la portion centrale du massif de Korhogo ou « granite circonscrit de Korhogo ». Au-dessus du granite de Korhogo, au Nord-Est de la zone d'étude, s'observe le faciès de la figure 10b. Il se distingue du précédent par de fines particules blanches. Situé dans le prolongement du massif de Korhogo, il est assimilable aux granitoïdes de Ouangolodougou. Au-dessous du granite de Korhogo, dans le Sud-Ouest de la zone d'étude, un autre ensemble homogène a été délimité (fig. 10c). C'est le secteur de Dikodougou. Il se distingue des autres faciès par de particules blanches de plus en plus fines.

Dans le secteur Est, s'observe le faciès de la figure 10d. Cette texture avec un ton relativement plus blanc couvre toute la zone du massif de Ferké. Le lit du Bandama, dont le faciès est celui de la figure 10f, avec un ton fortement noir et une texture lisse, s'intercale entre les faciès caractéristiques du granite de Korhogo et du massif de Ferké. Dans sa partie médiane, ces particularités sont masquées par la plantation et les installations industrielles du complexe sucrier de Ferkessédougou. Le faciès de la figure 10e occupe l'ensemble Ouest de l'image. Dans cette zone, se trouvent normalement une petite partie du massif de Niéllé (dans l'extrême Nord-Ouest) et la série volcano-sédimentaire de Dioula. Ces deux ensembles n'ont pu être dissociés avec l'imagerie Radarsat.

3.1.3 CARACTERISTIQUES STRUCTURALES DU SOCLE PRECAMBRIEN DANS LE DEGRE CARRE DE KORHOGO

Trois (03) néo-canaux issus des différents traitements appliqués à l'image brute ont permis de relever les accidents majeurs sur l'image Radarsat. Il s'agit principalement de l'image Radarsat débruitée et rééchantillonnée à 15 m de résolution spatiale et des paramètres homogénéité et second moment du calcul de cooccurrence. Ces paramètres ont permis de relever quelques éléments accidents. L'exploitation de ces images est rendue difficile par la présence de bandes horizontales (bruits) masquant l'essentiel de l'information structurale. La cartographie des accidents majeurs a été optimisée avec l'image Radarsat débruitée simulée à 15 m de résolution spatiale (fig. 11).

L'ensemble des accidents téléanalytiques majeurs relevés à partir de l'interprétation des néo-canaux Radarsat est présenté à la figure 12.

L'examen de la rosace de distribution par classe d'orientation du nombre des accidents (fig. 13), obtenue par traitement de ces accidents sous le logiciel Linwin, met en évidence trois (03) directions majoritaires que sont N0-10, N110-120, N150-160. A ces trois directions majoritaires sont associées quatre (04) directions secondaires qui sont N100-120, N20-30, N30-40, N140-150.

3.1.4 ESQUISSE LITHOSTRUCTURALE DU DEGRE CARRE DE KORHOGO

La synthèse du contenu informatif des différentes images satellitaires a permis de dresser une carte lithostructurale téléanalytique Radarsat du degré carré de Korhogo (fig. 14). Elle fait ressortir quatre (04) grands ensembles géologiques. Il s'agit de l'Ouest à l'Est de :

- la série de Dioula ;
- le massif de Korhogo avec dans sa partie médiane, le granite circonscrit de Korhogo ;
- la série du Haut Bandama ;
- et le massif de Ferké.

Ces ensembles sont constituées de roches basiques intrapaléozoïques (intrusion de gabbro en forme de noyau de mangue à l'Ouest de la ville de Korhogo) et de formations birimiennes. Ces dernières sont composées de:

- granites type baoulé de craton (granite à biotite) qui forment le massif de Korhogo ;
- granites type baoulé de géosynclinaux (granite à deux micas (type Ferké)) qui forment le massif de Ferké avec un lambeau au-dessus de l'intrusion de gabbro à l'Ouest de la ville de Korhogo ;
- séries à faciès Birimien d'origine sédimentaire (schiste indifférencié, séricitoschiste, chloritoschiste et calcschiste) qui forment les séries de Dioula et du Haut Bandama.

Sur le plan structural, quelques accidents (failles) ont été cartographiés avec une orientation dominante SO-NE.

3.2 DISCUSSION

3.2.1 QUALITE SPECTRALE ET RESOLUTION SPATIALE DE L'IMAGE RSO DE RADARSAT-1

La contrainte majeure de l'exploitation de l'image Radarsat est son aspect granulaire. Le chatoiement est essentiellement une sorte de bruit qui dégrade la qualité de l'image et peut rendre l'interprétation (visuelle ou numérique) plus difficile [2]. L'application d'un filtrage approprié a permis de réduire de façon significative cette perturbation. Le problème consiste à estimer le bruit à partir du signal observé et de le supprimer en préservant la radiométrie et les informations texturales de l'image. Le filtre de Lee appliqué à l'image RSO Radarsat-1 de cette étude est classé parmi les filtres adaptatifs répondant le mieux à ces contraintes [13], [14]. L'analyse comparée de contrastes des produits de l'application de différents filtres confirme ce résultat.

La deuxième contrainte liée à l'image RSO de Radarsat-1 est sa très faible résolution spatiale (50 m) et spectrale (monobande). Selon la référence [29], le potentiel de discrimination des images de télédétection peut être présenté en fonction des trois types de résolution : spectrale, temporelle et spatiale. L'utilisation du multispectral augmente les capacités de discrimination des différents thèmes d'occupation du sol. En termes de résolution temporelle, plusieurs images prises à des dates différentes améliorent en général la discrimination entre les différents types d'occupation du sol. Au niveau spatial, les évolutions récentes vont vers l'amélioration des résolutions civiles, désormais métriques.

L'échelle de restitution dépend directement de la résolution de l'instrument utilisé. La précision graphique d'un document cartographique est de l'ordre de 0,2 mm (pouvoir séparateur de l'œil humain), ce qui correspond pour des échelles allant de 1/25 000 au 1/200 000 à une précision réelle de 5 m à 40 m. Ceci implique que la taille du pixel soit du même ordre de grandeur. On assurera ainsi une qualité graphique compatible avec la résolution du capteur pour une précision théorique (hors erreur graphique) sur la carte finale de 0,2 mm [30].

Il ressort de tout ceci la nécessité d'améliorer la résolution de notre image monobande pour augmenter sa capacité de discrimination. La technique utilisée est intégrée au logiciel ERDAS Imagine à partir de la version 8.7. Le module « **Wavelet Resolution Merge** » de ce logiciel est conçu pour améliorer la résolution spatiale relativement faible des images multispectrales en utilisant une image panchromatique co-registrée de haute résolution [16]. Son algorithme est une modification des travaux de King et Wang [17] complétés par ceux de Lemeshevsky [31]. L'image pseudo-panchromatique résultante a été exploitée fructueusement pour effectuer la cartographie lithologique de la région de Korhogo.

3.2.2 UNITES LITHOLOGIQUES MISES EN EVIDENCE

Sur le plan lithologique, ces contraintes notamment spatiale et spectrale, se sont traduites par une cartographie assez bonne des grands ensembles. Outre quelques différences, les contours géologiques cartographiés concordent avec les cartes de références et les travaux antérieurs [7], [9], [11], [20], [28]. Le granite circonscrit de Korhogo cartographié pour la première fois par [11] apparaît distinctement. C'est au niveau de la cartographie détaillée que l'image pseudo-panchromatique s'est révélée inefficace. Seulement deux intrusions bien connues, notamment la colline de gabbro, ont pu être ressorties comme le montre la figure 15 qui présente la corrélation entre la carte géologique télanalytique Radarsat, la carte géologique provisoire [9] et la vérité terrain.

3.2.3 ACCIDENTS ET PRINCIPALES DIRECTIONS STRUCTURALES CARTOGRAPHIQUES

La figure 16 montre la relation entre les accidents ou fractures majeurs issus des images Radarsat et ceux des cartes géologique [9] et des indices miniers [4]. De nombreuses fractures téléalalytiques sont situés soit dans le prolongement de fractures des anciennes cartes soit se superposent parfaitement à celles-ci.

L'accident téléalalytique Kombolokoro-Ogari (N30) est entre deux fractures de la carte géologique et est parallèle à l'accident tectonique qui passe par Kafiplé (au Nord de Guimbé) et Nethio-Boloba. La fracture Satiara –Netho-Boloba – Karafigué de la carte géologique est prolongée dans sa partie supérieure (au dessus de Karafigué) par l'accident téléalalytique Tallé – Kassoumbarga – Kawara de direction N30. Cette direction est celle du couloir de Niéllé – Dianra, prolongement du couloir de Kani [11].

L'accident téléalalytique Sédakaha – Kalaha (N50) apparait également comme le prolongement de la fracture géologique Satiara – Néthio-Boloba. Il correspond à l'accident de Koni cartographié par [11] comme le prolongement de la bordure supérieure du couloir de Gbominasso [22] cité par [11].

Il apparait également que l'accident téléalalytique Kombolokoura – Kawara (SO-NE) est dans le prolongement de l'accident magnétique qui part de la région de Taoura au Nord au voisinage de Kapékaha en se superposant parfaitement à deux petits accidents tectoniques bien alignés. Enfin l'accident téléalalytique Tiongofolokaha – Naniéfongo (N60) et la petite fracture géologique au-dessus de Namiefongo se superposent parfaitement.

La comparaison des rosaces directionnelles (fig. 17) montre que l'imagerie Radarsat a révélé les contacts majeurs entre les différentes unités suivant une direction NNE et les trois directions majoritaires du pays (N0-10, N110-120 et N150-160).

4 TABLEAUX ET FIGURES

4.1 TABLEAUX

Tableau 1. Erreurs résiduelles suivants les pixels et les lignes obtenues dans la correction des images

Scène	Nombre de point de contrôle	Erreurs résiduelles	
		X (pixel)	Y (ligne)
197-53	9	0,18	0,19
197-54	13	0,12	0,12
198-53	9	0,09	0,08
RSO de Radarsat-1	14	0,2	0,2

Tableau 2. Ecart type, moyenne et contraste de la première zone homogène dans l'image Radarsat

	Original	Frost	Gamma	Kuan	Lee	Local Sigma	Médian	Moyen
Ecart type	5,53	3,91	4,33	4,33	4,37	5,47	4,40	3,85
Moyenne	2,47	1,99	2,01	2,45	2,28	2,45	1,98	2,55
Contraste	2,237	1,961	2,148	1,770	1,918	2,230	2,227	1,512

Tableau 3. Ecart type, moyenne et contraste de la deuxième zone homogène dans l'image Radarsat

	Original	Frost	Gamma	Kuan	Lee	Local Sigma	Médian	Moyen
Ecart type	1,18	0,73	1,17	0,62	0,62	1,18	0	0,62
Moyenne	254,92	254,90	254,83	254,92	254,92	254,92	255	254,92
Contraste	0,005	0,003	0,005	0,002	0,002	0,005	0	0,002

Tableau 4. Ecart type, moyenne et contraste dans l'image Radarsat du Degré Carré de Korhogo

	Original	Frost	Gamma	Kuan	Lee	Local Sigma	Médian	Moyen
Ecart type	53,96	49,61	49,60	50,69	49,61	53,63	51,22	48,99
Moyenne	89,16	88,78	87,70	88,81	88,78	89,14	88,74	89,16
Contraste	0,605	0,561	0,566	0,571	0,559	0,602	0,577	0,549

4.2 FIGURES

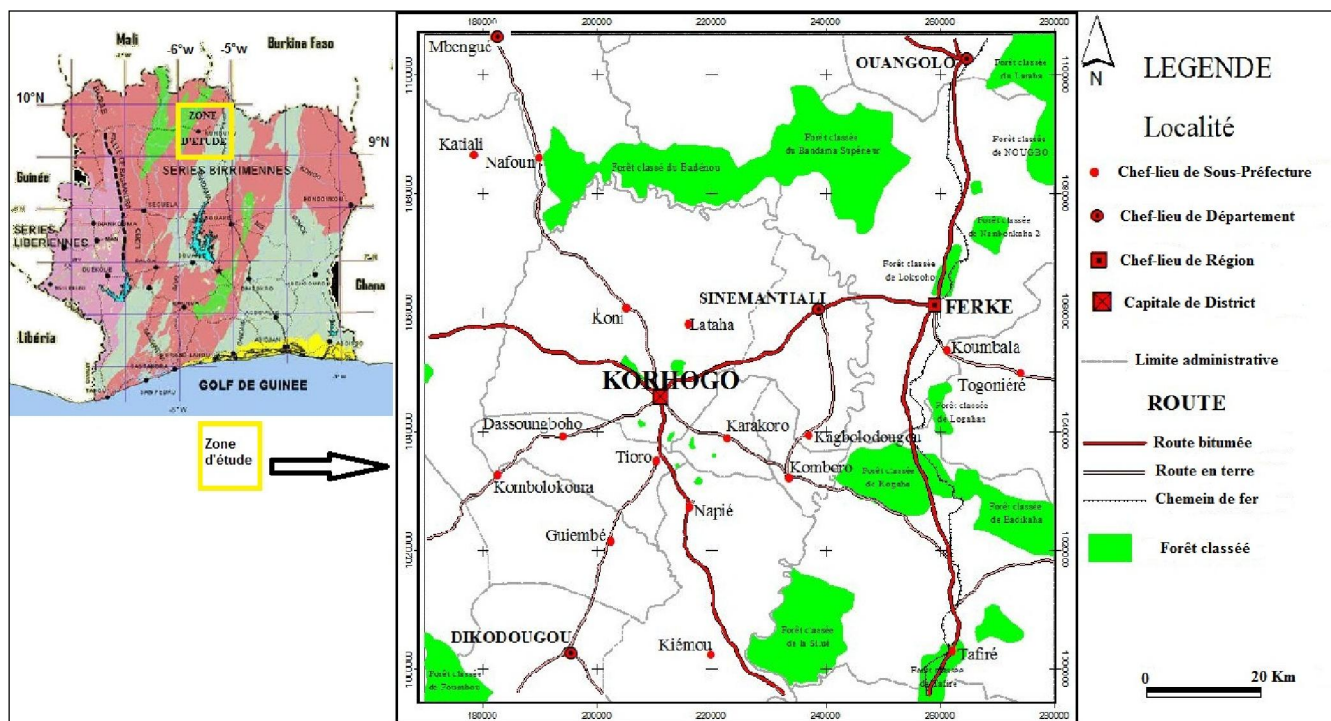


Fig. 1. Localisation de la zone d'étude

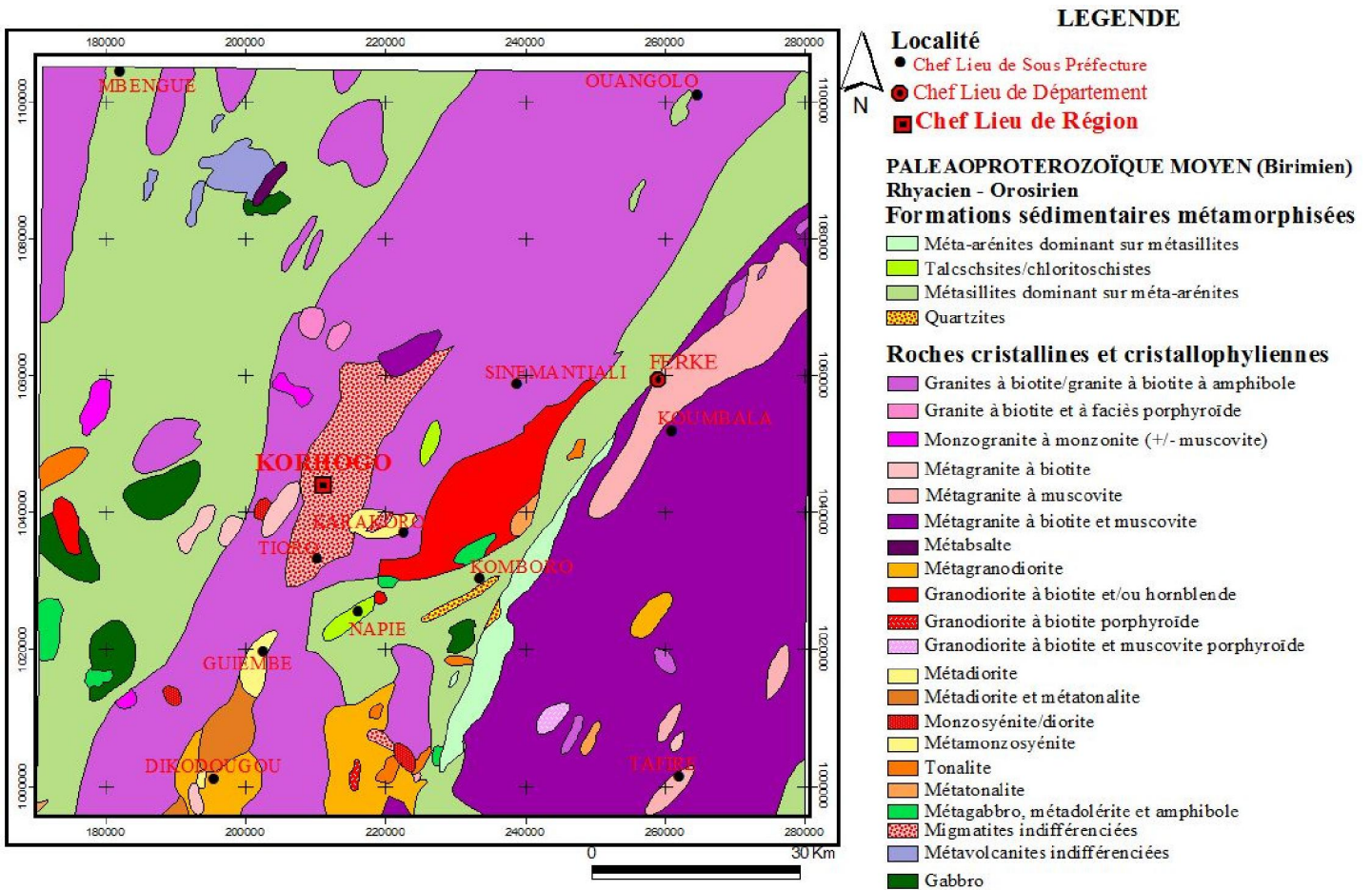
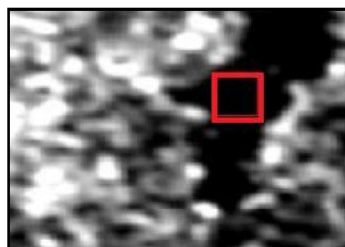


Fig. 2. Carte des principales formations géologiques du Degré Carré de Korhogo [9]



(a) Première parcelle homogène (PH1)



(b) Deuxième parcelle homogène (PH2)

Fig. 3. Exemples de parcelles homogènes (encadrées en rouge) utilisées pour le calcul du contraste des images Radarsat originale et filtrées

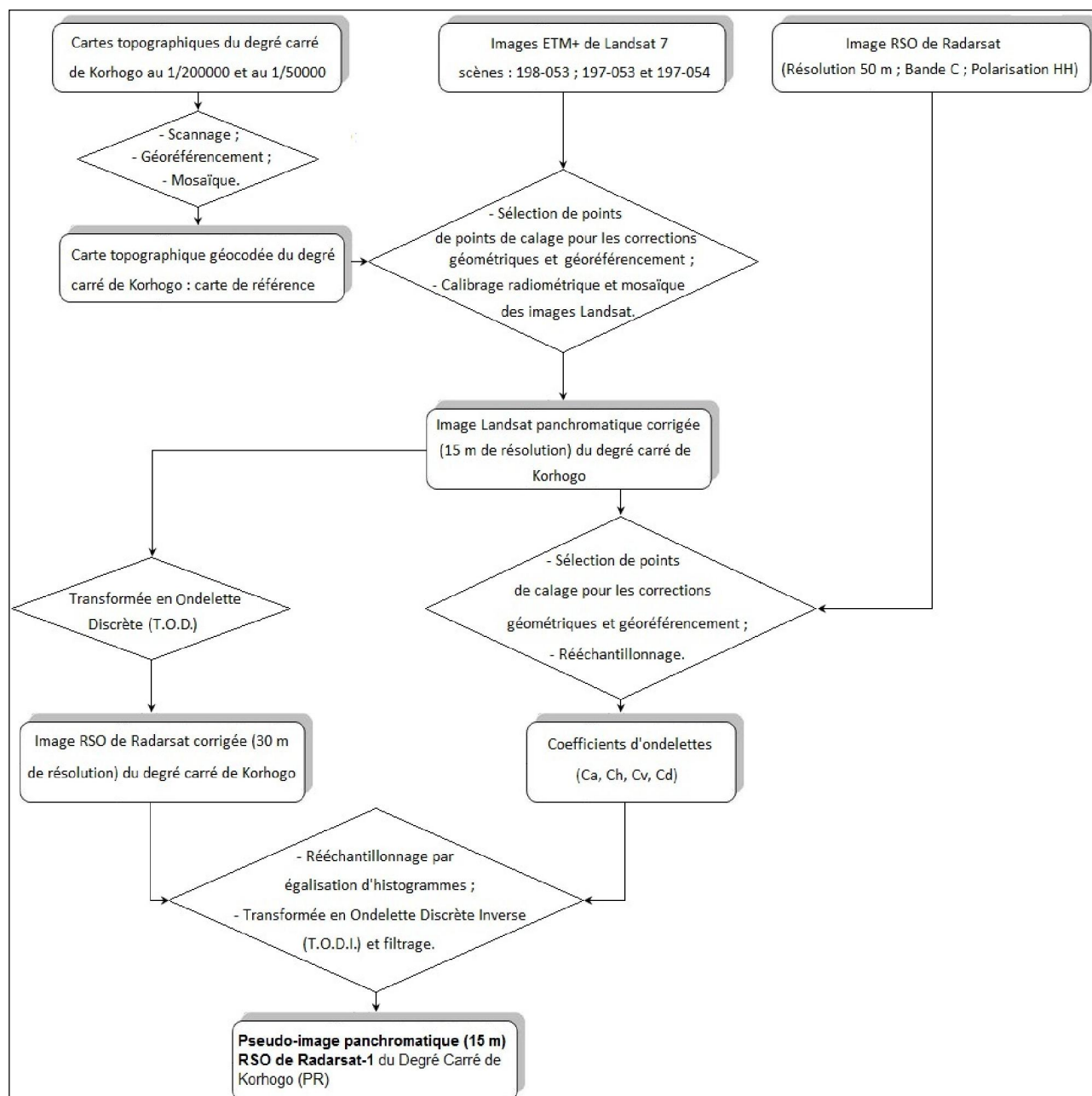


Fig. 4. Méthodologie de la création de l'image pseudo-panchromatique RSO de Radarsat-1

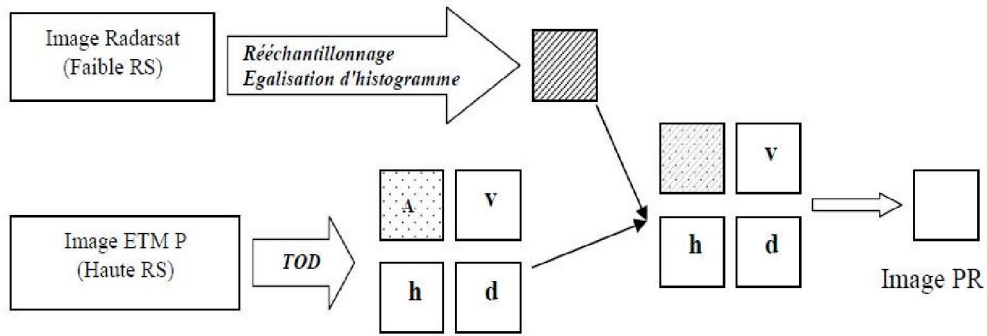


Fig. 5. Procédé de fusion par transformée en ondelettes pour l'amélioration de la résolution spatiale de l'image Radarsat ([16] modifié)

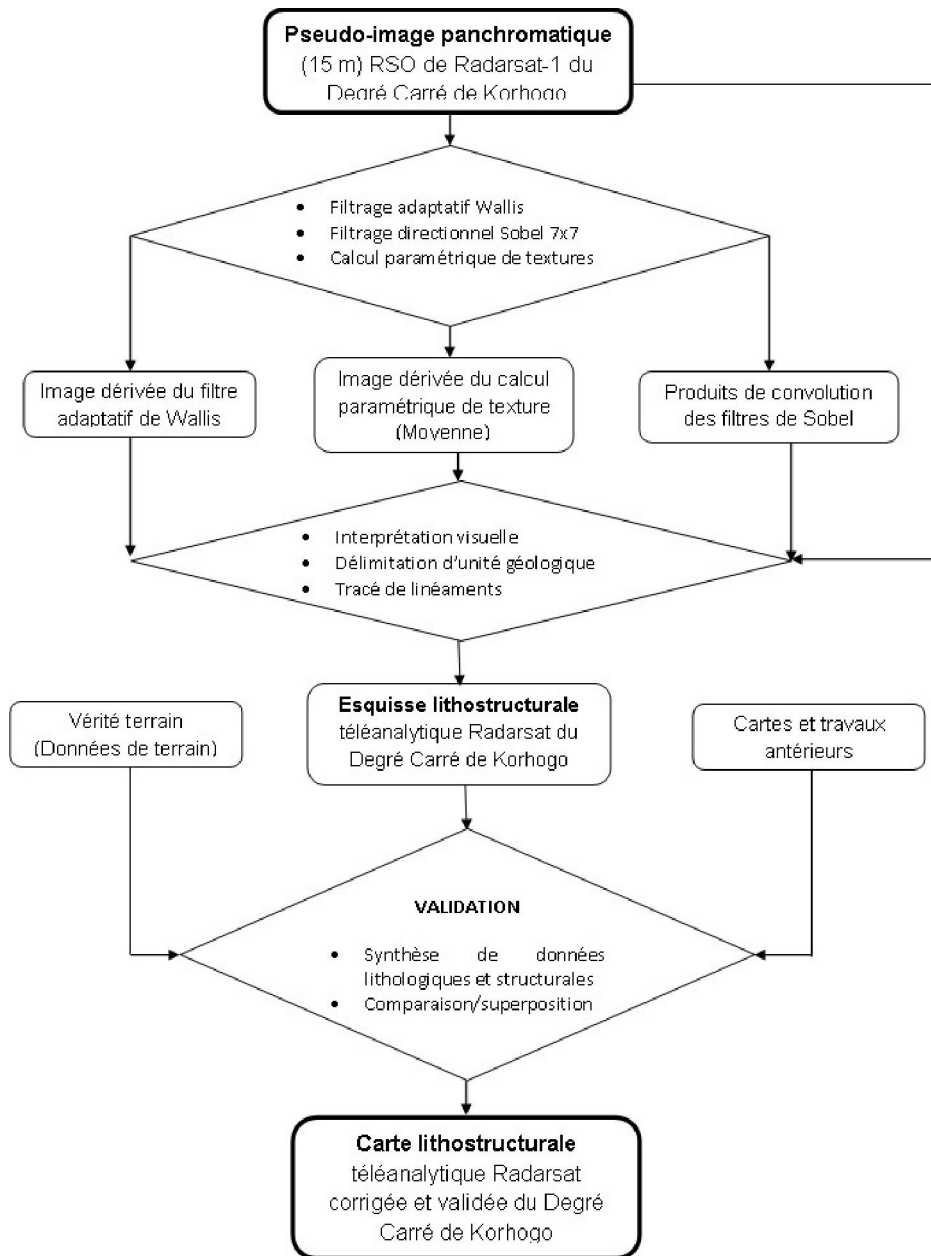


Fig. 6. Rehaussement de l'information géologique et élaboration de la carte lithostructurale téléanalytique Radarsat du Degré Carré de Korhogo

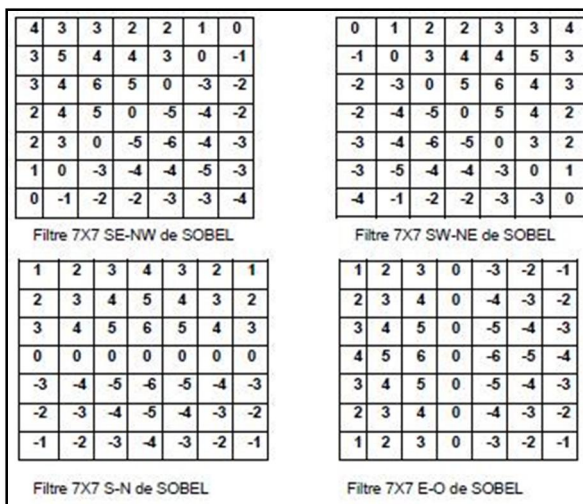


Fig. 7. Matrice de filtres de Sobel utilisés pour l'extraction des linéaments des images satellitaires de Korhogo [11], [20]

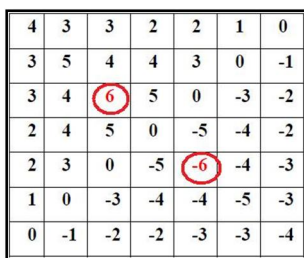


Fig. 8. Exemple de filtre de Sobel 7x7 définis avec un poids de 6 (en rouge) au niveau de la matrice [11], [20]

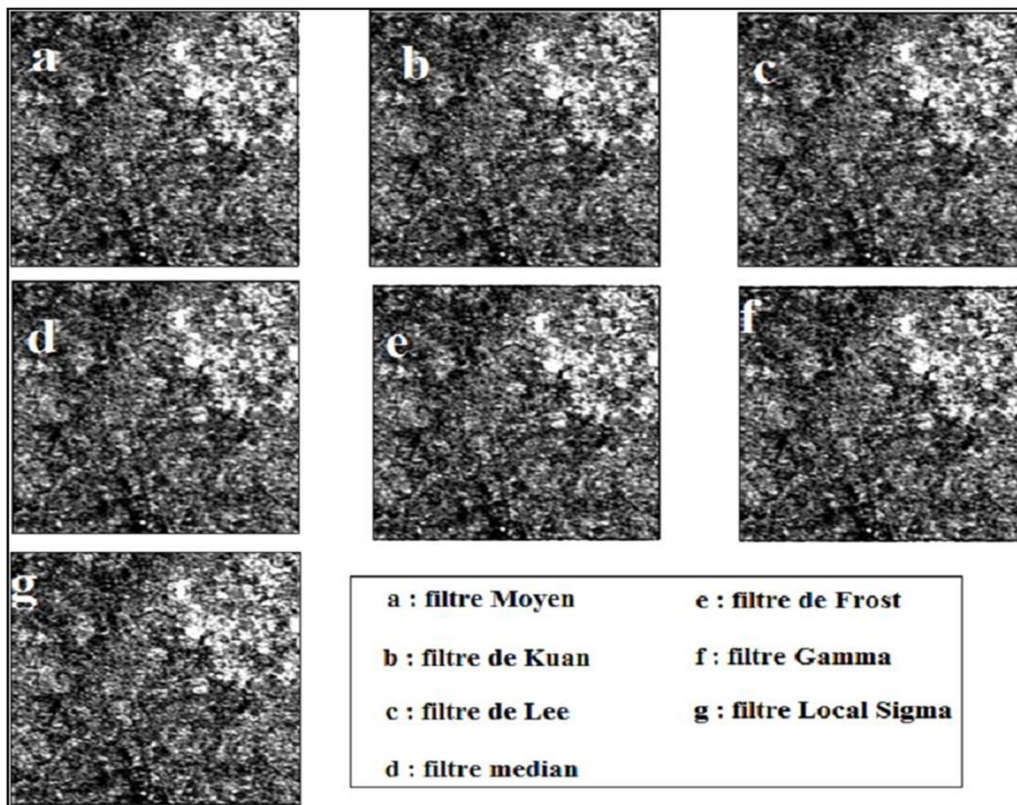


Fig. 9. Résultats de l'application des filtres de réduction du speckle dans l'image RSO de Radarsat du Degré Carré de Korhogo

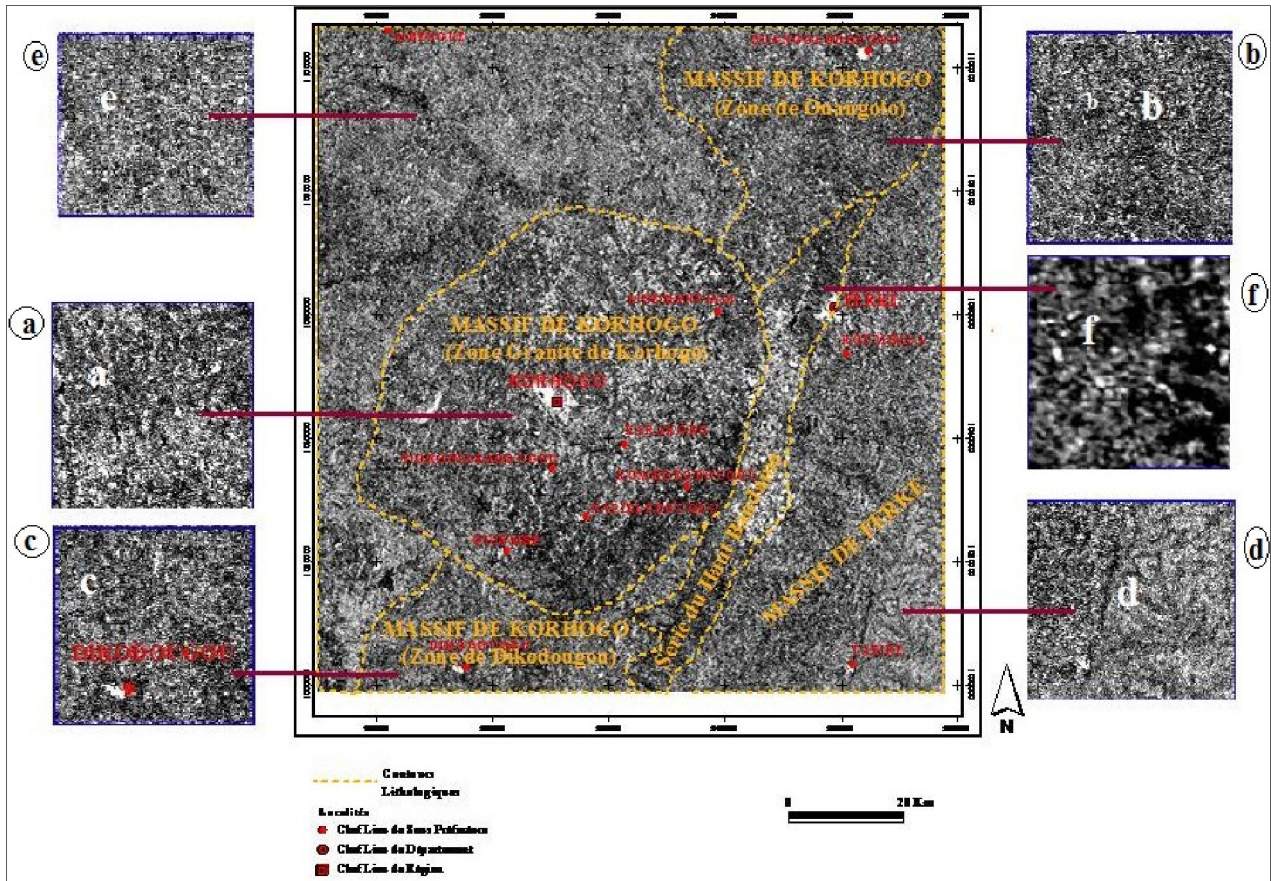


Fig. 10. Faciès-images caractéristiques des ensembles lithologiques de l'image Radarsat débruitée simulée à 15 m du degré Carré de Korhogo

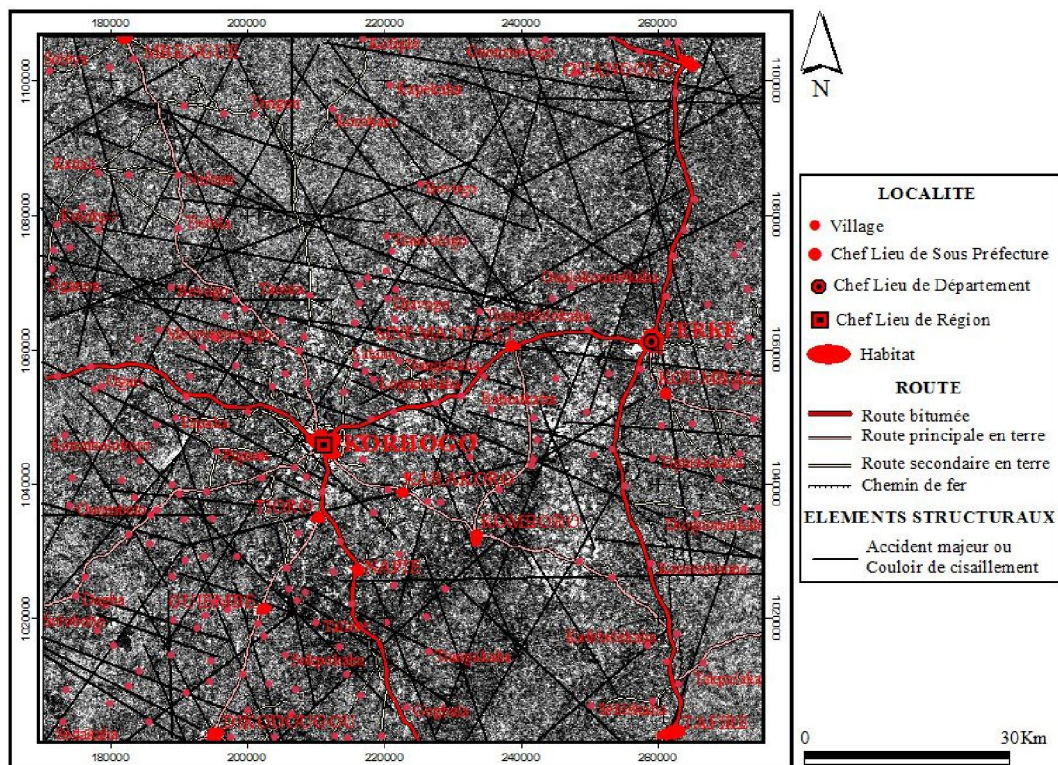


Fig. 11. Accidents majeurs sur l'image pseudo-panchromatique (15 m) Radarsat débruitée

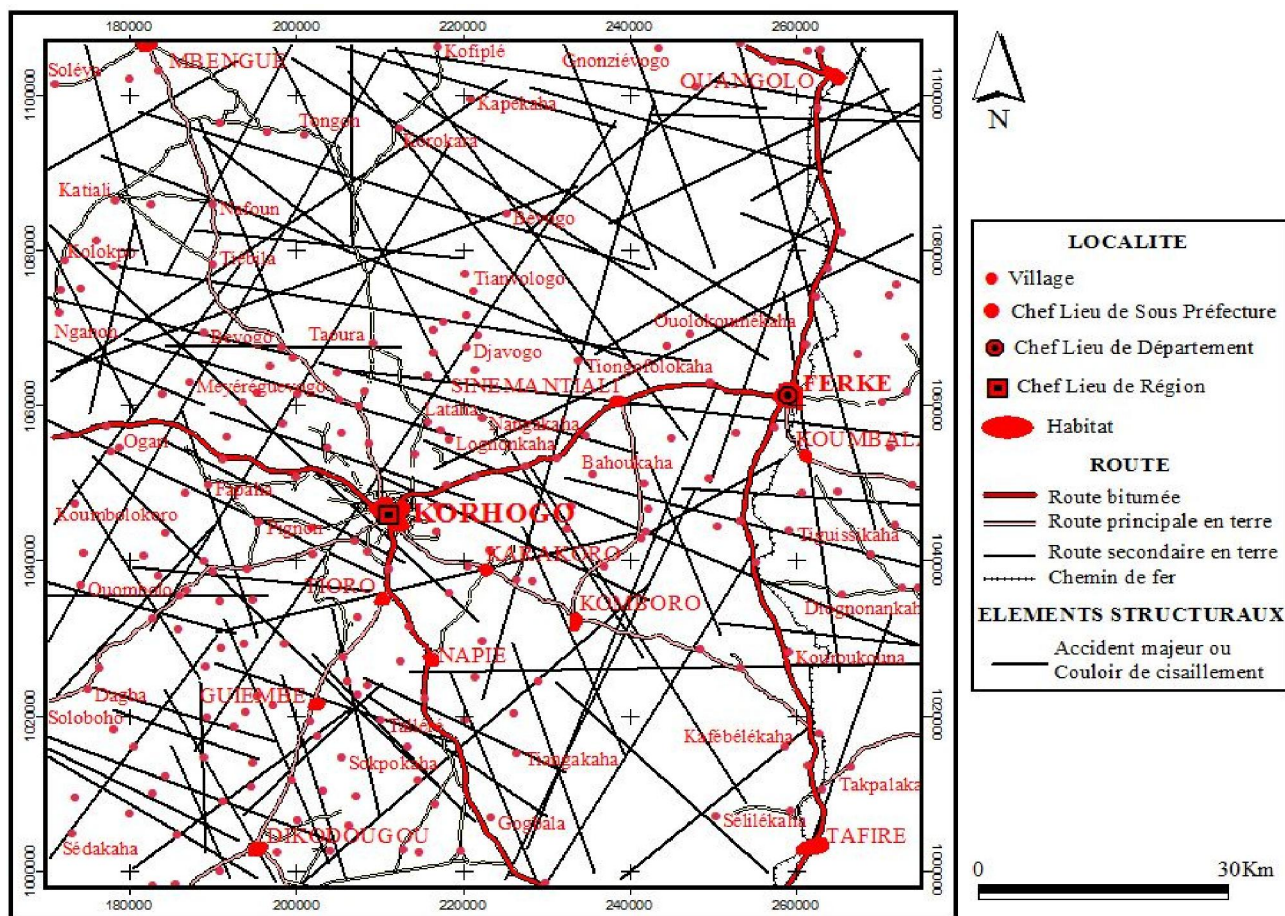


Fig. 12. Carte des accidents majeurs télanalytiques Radarsat

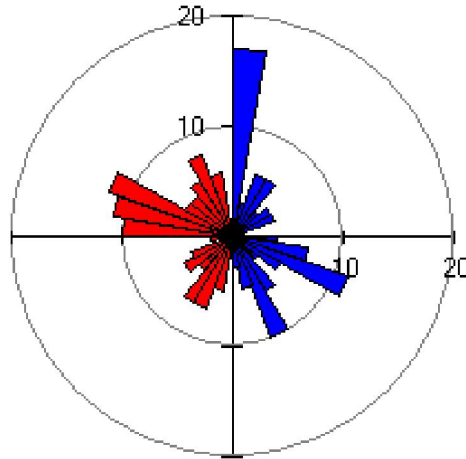


Fig. 13. Rosace de distribution par classe d'orientation du nombre des accidents majeurs relevés sur l'imagerie Radarsat du degré carré de Korhogo (N=97)

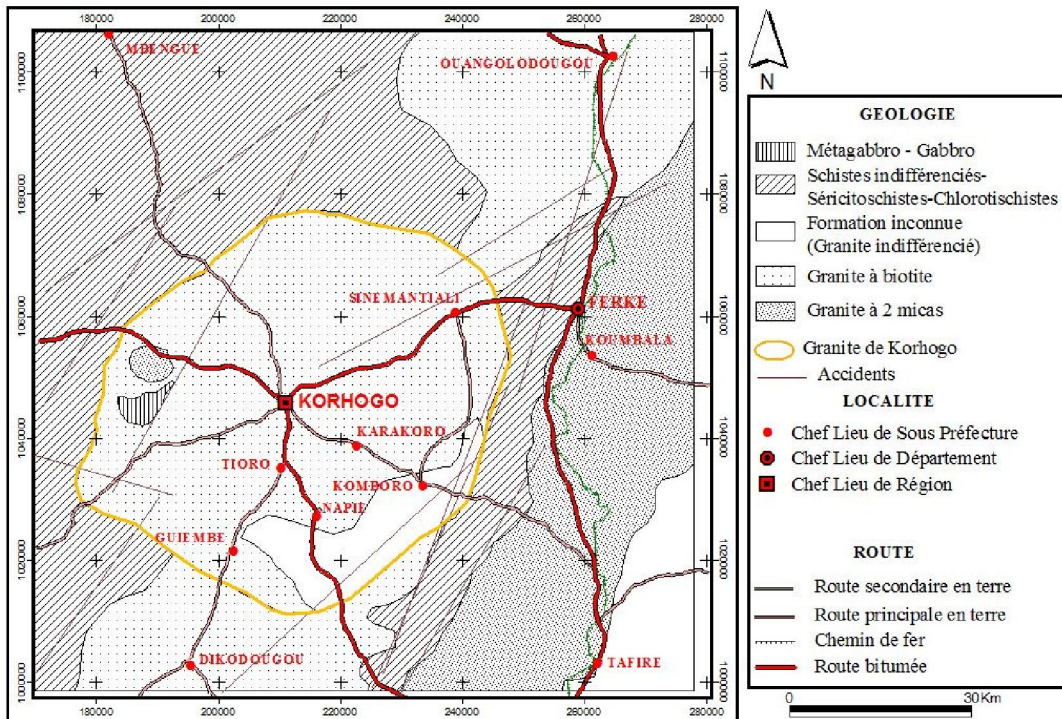


Fig. 14. Esquisse lithostructurale téléanalytique Radarsat

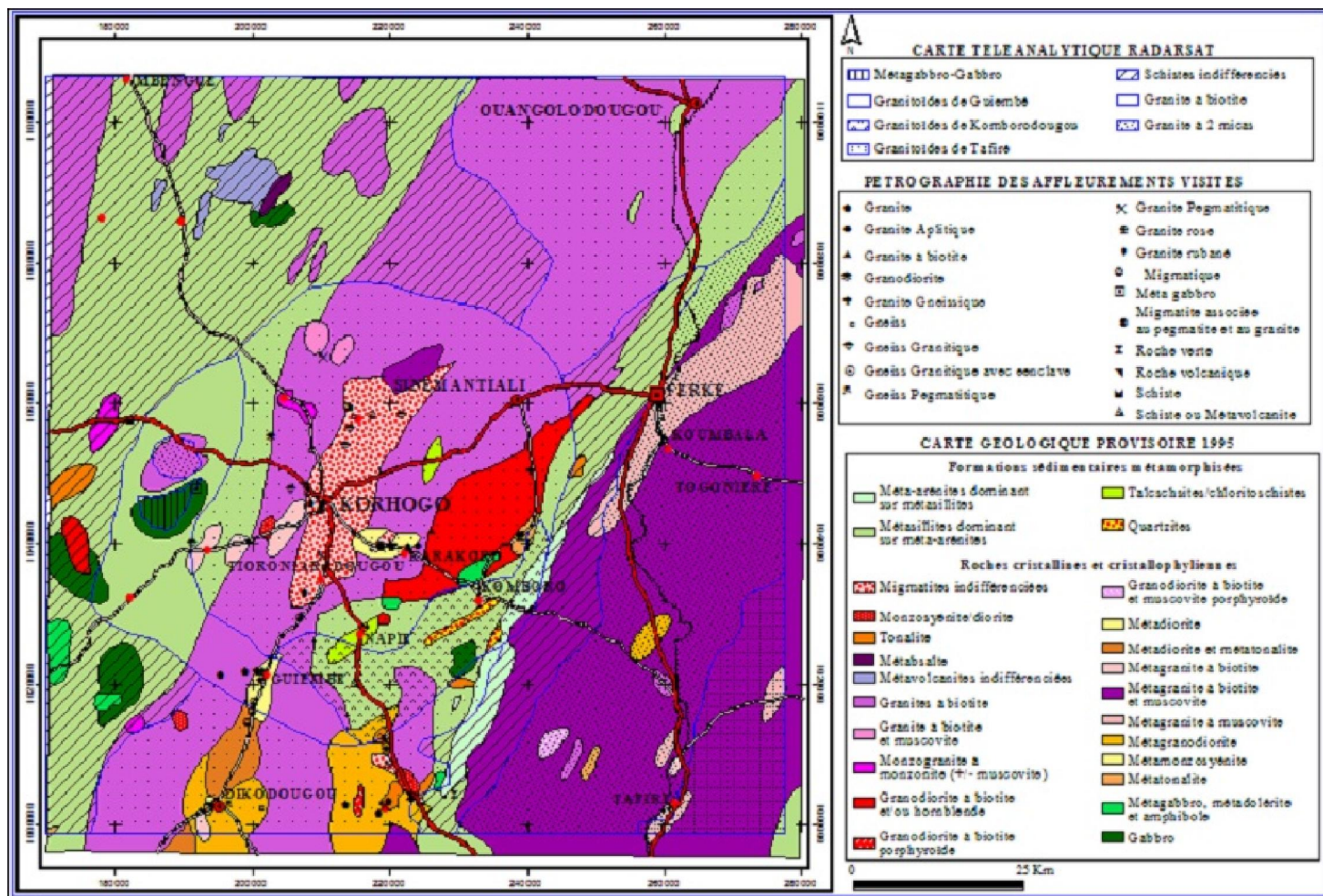


Fig. 15. Essai de corrélation de la carte géologique téléanalytique Radarsat avec la carte géologique provisoire [9] et la vérité terrain

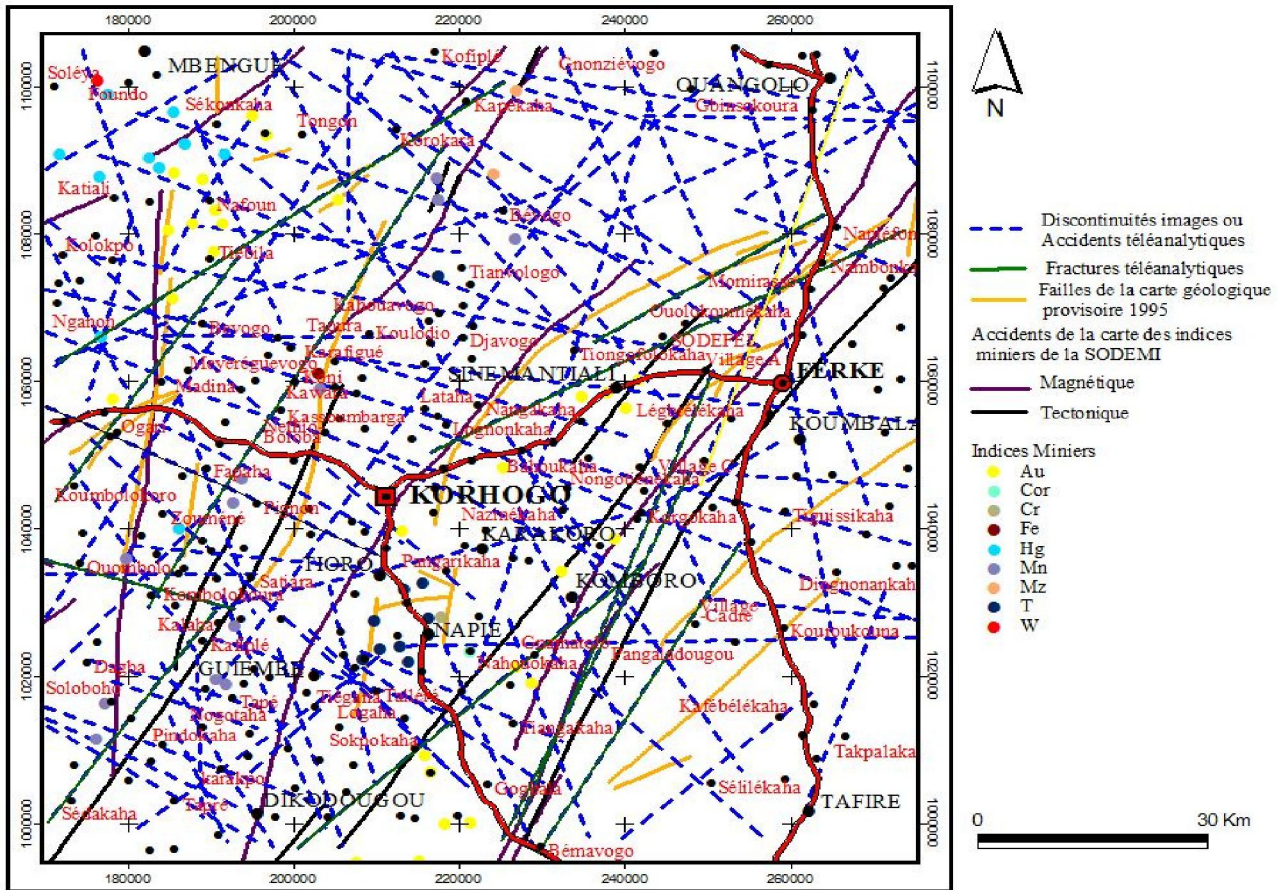


Fig. 16. Relation entre les accidents majeurs relevés sur les images Radarsat et les fractures issues des cartes géologique [9] et des indices miniers [4]

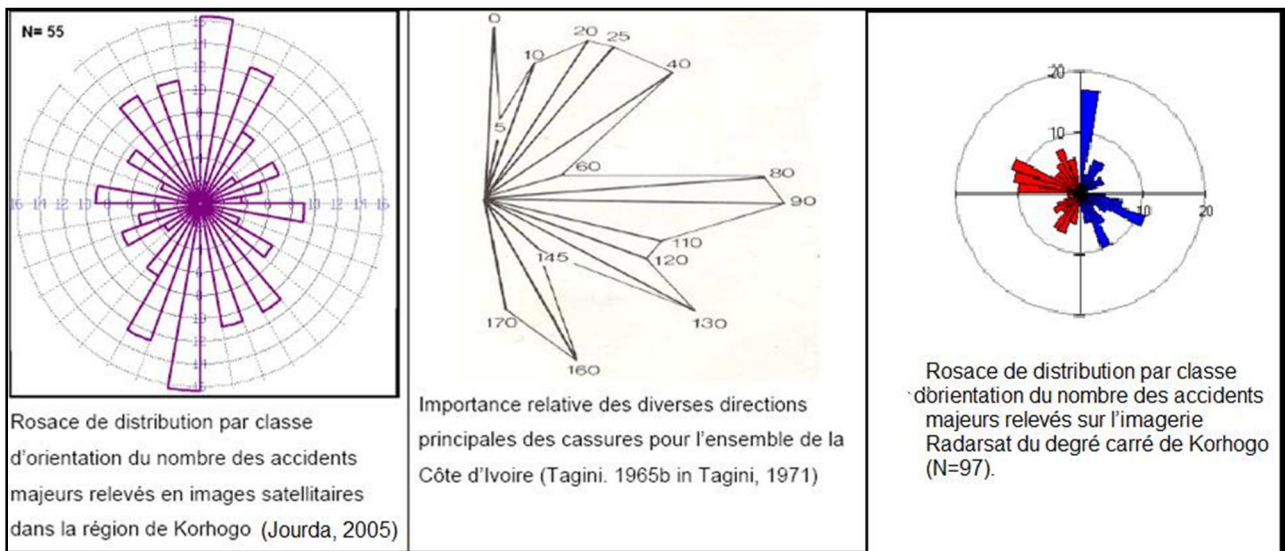


Fig. 17. Analyse comparée de la Rosace de distribution par classe d'orientation des accidents majeurs de l'image Radarsat avec ceux de [11] sur l'imagerie ETM+ Landsat 7 et [28], [32]

5 CONCLUSION

La cartographie lithostructurale à partir d'une image monobande RSO de Radarsat-1 de 50 m de résolution a été explorée dans cette étude. Une image pseudo-panchromatique Radarsat (15 m) a été produite à partir de la fusion par transformée en ondelette de cette image monobande RSO de Radarsat-1 avec une image panchromatique ETM+ de Landsat 7. Les traitements appliqués (réduction de speckle, géoréférencement, calcul de paramètres de textures, filtrage directionnel, etc.) à l'image pseudo-panchromatique Radarsat ont permis d'en améliorer le contraste et la perception du contenu informatif géologique.

L'interprétation visuelle des images dérivées a permis de discriminer six (06) faciès images caractéristiques des grands ensembles géologiques du socle précambrien dans la région :

- le faciès nord-ouest ou à faciès birimien constitué principalement de roches vertes et de schistes ;
- le faciès Korhogo, typique du dôme granitique de Korhogo, s'intercale entre les formes des faciès Dikodougou (au sud) et Ouangolodougou (au nord). Ils forment, tous les trois (03), le grand massif de Korhogo constitué de granite type baoulé de craton ;
- le faciès ferké, qui occupe la quasi-totalité de la partie est du degré carré, caractérise le massif de Ferké constitué de granite à deux micas (granite type baoulé de géosynclinal) ;
- enfin le faciès haut Bandama, intercalé entre les massifs de Korhogo et de Ferké, occupe le lit principal du Haut Bandama constitué de schistes.

Sur le plan structural, l'imagerie Radarsat a révélé les contacts majeurs entre les différentes unités suivant une direction NNE et trois directions majoritaires N0-10, N110-120 et N150-160. Les prolongements ou portions non apparents sur les cartes existantes de certaines fractures ont été révélés. Il s'agit entre autres de :

- la fracture Satiara-Netho Boloba-Karafigué prolongée dans sa partie supérieure par l'accident téléanalytique Tallé-Kassoumbarga de direction N30 (direction du couloir de Niéllé-Dianra, prolongement du couloir de Kani) ;
- l'accident téléanalytique Kombolokoura-Kawara (N50), prolongement de la fracture Taoura-Kapékaha.

La cartographie détaillée moins fructueuse, a permis de circonscrire uniquement deux intrusions granitiques (la colline de gabbro et le granite intrusif type Bondoukou) noyées dans les formations schisteuses, à l'ouest de la ville de Korhogo. L'étude linéamentaire révèle une densité de fracturation relativement faible par rapport aux données optiques et hybrides. La synthèse de toutes ces informations a permis de dresser une esquisse lithostructurale téléanalytique RSO Radarsat du degré carré de Korhogo sur laquelle se retrouve l'essentiel du bâti lithostructural du socle précambrien dans cette partie de l'Afrique de l'Ouest.

REFERENCES

- [1] S Riopel, A. Desrochers, M. D'Iorio, P. Budkewitsch, et B. Beauchamp, "Cartographie géologique à l'aide du capteur RSO de RADARSAT-1 : cas de l'île Axel Heiberg, Arctique canadien," *Revue de Télédétection*. Vol. 2, n° 2, pp. 103-117, 2001.
- [2] Centre Canadien de Télédétection, "Notions fondamentales de télédétection", *Cours tutoriel du Centre Canadien de Télédétection*, 226 p. Notice mise en ligne le 20/08/2002 et mise à jour le 19/08/2007 (http://www.ccrs.nrcan.gc.ca/resource/tutor/fundam/index_f.php.) Consulté en octobre 2009.
- [3] R. Caloz, J. Pouliot et C. Blumer, "Images de télédétection et SIRS : une intégration encore attendue. La télédétection optique et radar et la géomatique pour la gestion des problèmes environnementaux", *Colloque International, Université d'Ottawa, 10 au 12 mai 1999*. Edition A. Bannari, pp. 17-25, 1999.
- [4] Société pour le Développement Minier, "Géologie et potentiel minier de la Côte d'Ivoire", *Note d'information n° 1*, 12p, 1996.
- [5] M. Koné (2004) : "Etude de la variabilité de la couverture ligneuse en milieu de savane à partir de l'imagerie satellitaire à haute résolution : Cas du Nord de la Côte d'Ivoire (Région de Korhogo)", *Thèse 3^e Cycle, Université de Cocody*, 135p, 2004.
- [6] Société d'Etudes pour le Développement Economique et Social, "Région de Korhogo : Etude de développement socio-économique", *Rapport pédologique*. Vol. 4, pp. 10-20, 1965.
- [7] M. Arnould, "Carte géologique de reconnaissance à l'échelle du 1/500.000", *Feuille de Katiola (couleur)*, BRGM (France), 1963
- [8] B. Tagini, "Carte géologique de la Côte d'Ivoire", *Atlas de Côte d'Ivoire*, 1972.

- [9] C. Délor, D. B. Yao, I. Diaby, G. Gadou, L. Zahari, Y. Siméon, J. P. Déroin et M. Adou, "Carte géologique provisoire de la Côte d'Ivoire à 1/200 000", *Feuille de Korhogo*, 1995.
- [10] Géomines, "Inventaire hydrogéologique appliqué à l'hydraulique villageoise", *Annexe 1, carte de Korhogo*, cahier numéro 6, pp. 2-10, 1982.
- [11] J. P. R. Jourda, "Méthodologie d'application des techniques de télédétection et des systèmes d'information géographique à l'étude des aquifères fissurés d'Afrique de l'Ouest. Concept de l'hydrotechniquespatiale : cas des zones tests de la Côte d'Ivoire", *Thèse de Doctorat Ès Sciences Naturelles, Université de Cocody – Abidjan, Côte d'Ivoire*, 402p, 2005.
- [12] Institut Géographique National de France, "Cartes topographiques de Côte d'Ivoire", 1/50000, 1979.
- [13] J. S. Lee, "Speckle suppression and analysis for synthetic aperture radar images", *Optical Engineering*, N° 25, pp. 636-643, 1986.
- [14] T. Ranchin, "Applications de la transformée en ondelettes et de l'analyse multirésolution au traitement des images de télédétection", *Thèse de Doctorat. Université de Nice-Sophia Antipolis. Ecole doctorale Sciences pour l'Ingénieur*, 110p, 1993.
- [15] E. Tonyé, A. Akono et N. A. N'Di, "Le traitement des images de télédétection par l'exemple", *LETS – ENSP – Université de Yaoundé 1*, 252p, 1999.
- [16] G. Leica, "ERDAS Field Guide™", 705 p, november 2005.
- [17] R. L. King et J. Wang, "A Wavelet based algorithm for pan sharpening Landsat 7 imagery", *Geoscience and Remote Sensing Symposium, IGARSS'01. IEEE International*, Vol. 2, pp. 849 -851, 2001.
- [18] Envi, "ENVI User's Guide : Interactive Displays", 2004.
- [19] F. Bonn et G. Rochon, "Précis de télédétection : Principes et méthodes", *Presse universitaire de l'Université du Québec – AUPELF UREF*. Vol. 1, 485p, 1992.
- [20] J.P. Jourda, E. V. Djagoua, K. Kouamé, M.B. Saley, C. Gronayes, J-J Achy, J. Biemi et M. Razack, "Identification et cartographie des unités lithologiques et des accidents structuraux majeurs du Département de Korhogo (Nord de la Côte d'Ivoire) : Apport de l'imagerie ETM+ de Landsat", *Télédétection*, Vol. 6, n°2, pp. 123-142, 2006.
- [21] S. Deslandes et Q. H. J. Gwyn, "Evaluation de SPOT et SEASAT pour la cartographie des linéaments : comparaison basée sur l'analyse de spectres de fourier", *In journal canadien de télédétection*, volume 17, No. 2, pp. 97-107, avril 1992.
- [22] J. Biémi, "Contribution à l'étude géologique, hydrogéologique et par télédétection des bassins versants sub-sahéliens du socle précambrien d'Afrique de l'Ouest: Hydrostructurale, hydrodynamique, hydrochimie et isotopie des aquifères discontinus de sillons et aires granitiques de la Haute Marahoué (Côte d' Ivoire)", *Thèse de Doctorat. ès Sc. Nat., Univ. Abidjan*, 493p, 1992.
- [23] K. Kouamé, "Méthodologie de la fusion des images SPOT panchromatiques et Landsat TM : application à la zone test de Lataha dans la région de Korhogo", *DEA, Univ. de Cocody*, 74p, 2000.
- [24] W. H. Hobbs, "Lineaments of the Atlantic border region", *Geological Society of America Bulletin*, Vol. 15, pp. 483-506, 1904.
- [25] D. W. O'leary, J.D. Friedman et H.A. Pohn, "Lineaments, linear, lineations: some standards for old terms", *Geological Society of American Bulletin*, vol. 87, pp. 1463-1469, 1976.
- [26] K.F. Kouamé, M.J. Penven, B.H. Kouadio, M.B. Saley et C.C. Gronayes, "Contribution des images d'Aster de Terra et d'un Modèle Numérique d'Altitude à la cartographie morphostructurale du massif des Toura (Ouest de la Côte d'Ivoire)", *Télédétection*, Vol. 6, n°2, pp. 103-121, 2006.
- [27] Y. Koussoubé, "Hydrogéologie en milieu du socle cristallin du Burkina Faso : Cas du bassin versant du bas-fond de Bidi (Province du Yatenga). *Thèse de doctorat, Université Cheick Anta Diop Dakar*, 238p, 1996.
- [28] B. Tagini, "Esquisse structurale de la Côte d'Ivoire : Essai de géotectonique régionale", *SODEMI – Abidjan*. 303p, 1971.
- [29] C. Puech, D. Raclot, J.S. Bailly, M.J. Alquier, D. Chorda et M. Maubourguet, "Expertise sur l'utilisation des données spatiales dans le domaine de l'hydrologie : Apport des Modèles Numériques de Terrain à « la liaison hydrologie – hydraulique – images satellitales » dans le transfert sur les bassins versants et champs d'inondations. Valorisation de l'information issue de l'observation de la terre dans l'établissement des cartes d'aléa extrême", *Convention « risques d'inondations » n° 01008*. 48 p, Novembre 2004.
- [30] M. Ougrine, "Contribution des images ETM+ de Landsat7 à la mise à jour Cartographique à 1/200 000 : Cas de la feuille de M'SILA (Hauts plateaux, Algérie)", *Mémoire de formation au Centre Régional Africain des Sciences et Technologies de l'Espace en Langue Française*, 92p, 2003.
- [31] G. P. Lemeshefsky, "Multispectral image sharpening using a shift-invariant Wavelet Transform and Adaptive Processing of Multiresolution Edges", *in Visual Information Processing XI, Z. Rahman and R.A. Schowengerdt, Eds., Proc SPIE*, v. 4736, pp. 189-200, 2002.
- [32] B. Tagini, "Esquisse géotechnique de la Côte d'Ivoire", *Rapp. SODEMI Abidjan*, n°107, 93p, 1965.