

APPORT DES IMAGES LANDSAT-7 ETM+ A L'ETUDE STRUCTURALE DU SOCLE ARCHEEN DE SANGMELIMA (SUD CAMEROUN).

Joseph Martial Akame¹, Joseph Mvondo Ondo¹, William Assatse Teikeu², Sébastien Owona³, Jean Bosco Olinga⁴, Eric José Messi Ottou¹, Sylvestre Ntomba¹

1 : Département des Sciences de la Terre, Faculté des Sciences, Université de Yaoundé-1, BP 812, Yaoundé, Cameroun – akamejosephmartial@yahoo.fr

2 : Département de physique, Faculté des Sciences, Université de Yaoundé-1, BP 812, Yaoundé, Cameroun

3 : Département des Sciences de la Terre, Faculté des Sciences, Université de Douala, BP 24157 Douala Cameroun

4 : Institut de Recherche Géologique et Minière (IRGM), BP 4110 Yaoundé, Cameroun

Résumé

La région de Sangmélîma est une portion du Complexe du Ntem, la terminaison septentrionale du craton du Congo d'âge archéen. Elle est située entre 2°45' et 3°02' N et 11°55' et 12°15' E. L'étude morphotectonique réalisée dans cette zone est fondée sur les techniques de traitement des images ETM+ de landsat-7 et les méthodes classiques de prospection géologique croisées à travers un système d'information géographique (SIG). L'objectif est d'évaluer l'apport de ces images dans la cartographie structurale. Les résultats obtenus mettent en évidence une déformation polyphasée D_1 - D_4 où D_1 est soulignée par une foliation S_1 globalement orientée E-W à NW-SE dans l'encaissant. D_2 est représenté par les foliations $S_1/2$ transposées dans l'encaissant et foliation S_2 dans les plutonites. L'ensemble est repris par un épisode décrochant et transpressif conjugué D_3 caractérisé par un cisaillement N-S à NE-SW. A cette D_3 fait suite un épisode de déformation cassante D_4 , induite par une double compression conjuguée NNW-SSE et NNE-SSW. L'extension de la télédétection à l'ensemble du domaine archéen du sud Cameroun dont l'apport s'est avéré conséquent dans la région de Sangmélîma, devrait améliorer la cartographie géologique de cette région.

Mots clés : Image ETM+, linéaments, cartographie structurale, géostatistique, Sangmélîma.

Abstract

The Sangmalima region is found at the northern end of the Congo craton and belongs to the Ntem complex which dates Archean. It is located between 2°45' and 3°02' N and 11°55' et 12°15' E. The morphotectonic studies realized in this area has been based on techniques and processing of satellite imagery (landsat ETM+) and on classical field methods. This has been with the help of a geographic information system (GIS). The main aim of the study is to evaluate the importance of these satellite images in structural cartography. The results obtained has lead to a conclusion that this area is affected by a polyphase deformation ; D_1 - D_4 where : D_1 is characterized by a foliation S_1 in the country rock which is generally orientated E-W to NW-SE, D_2 is represented by a tranpositional foliation $S_1/2$ in the country rock and another foliation S_2 mostly seen in plutonites. The D_1 and the D_2 sets are further affected by a conjugate- transpressive -transcurrent episode D_3 which is characterized by a N-S to NE-SW shearing. This D_3 phase is followed a brittle tectonic deformation phase D_4 resulting from a double conjugate compression orientated NNW-SSE to NNE-SSW. The application of remote sensing techniques in the Archean domain of south Cameroon and particularly in the Sangmalima region is therefore mainly to ameliorate the geologic mapping in this area.

Keywords : Image ETM+, lineament, structural cartography, geostatistics, Sangmelima.

1. Introduction

La cartographie et l'analyse des linéaments structuraux représentent une composante essentielle pour la compréhension de la tectonique régionale et dans les programmes de prospection minière. Les linéaments sont des structures linéaires ou curvilignes souvent associées à des éléments géomorphologiques et / ou à des structures tectoniques variées (El Hadani, 1997). La cartographie structurale est difficile à réaliser au Sud-

Cameroun, à cause d'un épais profil pédovégétal et la rareté des affleurements (Owona et al., 2012). L'expérience a prouvé l'intérêt des données de télédétection pour la cartographie des linéaments et l'identification des structures géologiques (Scanvic, 1983 ; Deroin et al., 1991 ; Himyari et al., 2002 ; Gomez et al., 2004 ; Jourda et al., 2006). Cependant, tous les linéaments ne correspondent pas automatiquement à des structures géologiques. En effet, les routes, lignes et chemins de fer et autres ouvrages humains sont aussi enregistrés

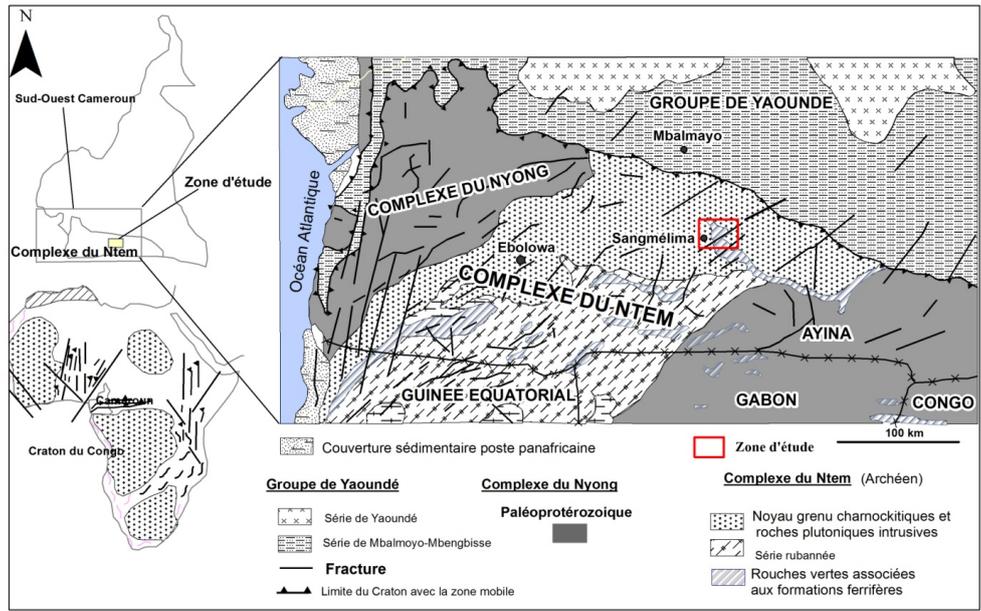


FIGURE 1 : Localisation de la zone d'étude sur la carte géologique du SW-Cameroun5 (d'après (Maurizot et al., 1986)).

comme des linéaments. Le rôle du photo-interprète est déterminant pour discriminer ces objets et leur donner une signification géologique à l'aide d'un SIG et des données de terrain. D'autre part, l'extraction des linéaments sans l'application de filtres directionnels ne fait pas ressortir tout le réseau linéamentaire, mais elle reste une étape importante de pré-analyse dans la cartographie structurale.

L'objectif de cette étude est la détection de toutes les structures linéamentaires pouvant influencer de façon significative l'ensemble des géostructures de la zone d'étude. En précisant les traits structuraux du secteur de Sangmélima, la présente étude améliore la connaissance géologique de l'ensemble du domaine archéen du Sud Cameroun. La méthodologie utilisée ainsi que les données de cartographie structurale dérivées constituent des outils de base importants en géologie appliquée, notamment pour une réévaluation des potentialités minières et la gestion durable des eaux souterraines du domaine exploré.

2. Description de la zone d'étude et contexte géologique

Le secteur de Sangmélima est situé entre les latitudes 2°45' et 3°02' Nord et les longitudes 11°55' et 12°15' Est dans le sud Cameroun (Figure 1). Le relief peu marqué présente une altitude moyenne de 700 m (Figure 2). Le chevelu hydrographique est dense et très lobé (Figure3) ; seuls quelques cours d'eau ont leur tracé contrôlé par les fractures du sous-sol (Owona et al., 2013). Tous coulent dans des marécages, remblayés

par des sédiments fins d'épaisseur inférieure à 7 m (Maurizot et al., 1986). Dans cette région, la plupart des traits morphologiques primaires du substratum ont été gommés par l'érosion et fondus dans un processus de latérisation. Seules quelques formations plus résistantes font saillie dans le paysage : quartzites ferrifères (940m à Mezesse), TTG charnockitiques ou non et granitoïdes tardifs par exemple (Figure 3). La couche latéritique superficielle atteint couramment 10 m d'épaisseur (Nguetnkam et al., 2006).

Sur le plan géologique, le secteur d'étude appartient au complexe du Ntem d'âge Archéen du Sud-Cameroun(Figure 1). Ce complexe correspond à la partie septentrionale du craton du Congo (Lassere et Soba, 1976 ; Maurizot et al., 1986 ; Nédélec et al., 1990 ; Nsifa et Riou, 1990 ; Toteu et al, 1994 ; Tchaméni, 1997 ; Shang et al., 2001 ; 2004 ; 2007 et 2010). Il est constitué de charnockites, granitoïdes potassiques, tonalites, trondhjemitites, granodiorites, syénites, Banded Iron Formations (BIF), roches vertes, migmatites et gneiss. Les charnockites et TTG forment une suite dont la mise en place s'est faite entre 3300–2700 Ma ; les granitoïdes potassiques d'origine crustale se sont mis en place entre 2660–2550 Ma (U/Pb sur zircon, Caen-Vachette, 1988 ; Toteu et al., 1994 ; Tchameni et al., 2000, 2001 ; Shang et al., 2004, 2010 ; Pb/Pb zircon, Owona et al., 2012a). Les roches vertes d'âge archéen inférieur sont des amphibolites et granulites interprétées comme des restes de roches supracrustales (Tchameni et al., 2004). Leur composition chimique renvoie aux termes tholéiitiques et calco-alcalins. Les dolérites pré-panafricaines qui recoupent les ceintures de roches vertes ont été rattachées

à une phase distensive pré-panafricaine à l'origine de l'ouverture des fossés néoprotérozoïques au sein du craton du Congo (Vicat et al., 1996).

Sur le plan structural et métamorphique, le complexe du Ntem porte l'empreinte de deux principales phases de déformation syn-métamorphique D1 et D2, tandis que la troisième phase D3 s'observe uniquement dans la zone de contact avec le groupe de Yaoundé (Tchaméni, 1997). La phase D1 (3300–2500 Ma) s'exprime par des plis isoclinaux P1 de directions et de plongements axiaux variables, une foliation S1 à pendage sub-vertical, orientée E-W ou NW-SE dans les charnockites et les métavolcanites, et N-S dans les granitoïdes potassiques (Shang, 2001 ; Tchameni et al., 2001 ; Owona et al., 2011). La phase D1 s'accompagne d'un métamorphisme évolué du faciès des granulites à celui des amphibolites. La phase D2 s'exprime dans l'ensemble de l'unité du Ntem par des couloirs de cisaillement sénestres de direction N-S à NE-SW et des traces de fusion partielle des roches (Maurizot et al., 1986 ; Tchameni et al., 2000). La foliation S2 est orientée NE-SW ou N-S avec un pendage fort à moyen. Des boudins décalés par les plans de cisaillements et des plis P2 déversés vers le Sud sont régulièrement observés (Shang, 2001, Tchameni et al., 2001 ; Owona et al., 2011). La phase D2 s'accompagne d'un métamorphisme du faciès des amphibolites. La phase discrète D3 s'étend au-delà des formations de Mbalmayo appartenant au groupe de Yaoundé d'âge néoprotérozoïque ; affectant le groupe du Ntem sur une distance d'environ dix kilomètres (Tchaméni, 1997). Cette phase essentiellement tangentielle se caractérise par des cisaillements plats qui déplacent le compartiment supérieur vers le Sud. Elle est responsable de la structure actuelle du groupe de Yaoundé chevauchant le groupe du Ntem (Tchameni, 1997).

3. Matériels et méthodes

3.1. Données utilisées

La scène 213-906 acquise par le satellite Landsat 7 ETM+ de Path 185 et Row 058 en date du 18 mars 2001 dans des conditions climatiques (saison sèche) favorables à la visualisation des éléments géologiques au sol (absence de nuages, couvert végétal relativement peu abondant) a été utilisée pour les travaux de cartographie par télédétection présentés ici. Cette scène correspond à une surface de 185 km×185 km et couvre l'ensemble de la zone d'étude entre le sud du Cameroun et le nord Gabon. Elle correspond à la zone 32 Nord de la projection cartographique Universal Transverse Mercator (UTM, zone 32N) et utilise le système géodésique de référence WGS 84. Elle est préalablement ortho-rectifiée (rectification des distorsions de l'image brute) et peut être directement intégrée sous forme d'image géoréférencée dans les logiciels de type SIG (Système d'Information Géographique) en utilisant des interfaces d'importation appropriées. A ces images s'ajoute une base de données cartographique constituée de la carte géologique du

secteur à l'échelle 1/500 000 (Maurizot et al., 1986) et des cartes topographiques à échelle 1/200 000 couvrant le secteur d'étude.

Les observations pétrographiques et les mesures structurales recueillies au cours des missions de terrain ont permis d'interpréter et de valider les structures géologiques décelées à l'aide de l'imagerie satellitaire. L'analyse croisée des différentes cartes thématiques a été réalisée grâce au logiciel ArcGIS.

3.2. Traitement des images pour la cartographie des linéaments

La cartographie des structures linéamentaires a été rendue possible grâce aux traitements numériques effectués sur les canaux ETM+ 1, 2, 3, 4, 5, et 7 qui ont été sélectionnés pour leurs caractéristiques spectrales et spatiales (30m). L'analyse en composantes principales (ACP) des canaux prétraités a donné des canaux dérivés dont seule la première composante apporte des résultats satisfaisants. En effet, les géostructures linéaires sont mieux visibles sur la première composante principale (APC1) que sur l'image multispectrale.

L'application des filtres directionnels 7×7 de type Sobel dans les directions N-S, E-W, NE-SW et NW-SE et du filtre gradient de Yésou et al. (1993) aux canaux ETM+5, ETM+7, ETM+5/ETM+4 et APC1 dont les matrices sont présentées au tableau 1, permet de rehausser les discontinuités-images correspondant aux linéaments. Seuls les linéaments d'origine structurale ont un intérêt dans cette étude. La synthèse d'informations à travers un SIG, les linéarités d'origine anthropique préalablement vectorisées (routes bitumées, pistes, ligne de haute tension, layons de délimitation de forêt et surfaces cultivées) ont été identifiées dans l'ensemble des linéaments et éliminées. Les linéaments géologiques relevés au cours des travaux antérieurs de cartographie (Maurizot et al., 1986 ; Shang, 2001), peu nombreux mais fondés sur des photographies aériennes et des observations de terrain, ont été retrouvés dans notre réseau de linéaments. Cette capacité de la méthode, fondée sur l'interprétation des images satellitaires à retrouver des fractures réelles déjà connues, et pas seulement parmi les plus grandes, valide notre méthode d'extraction. Les linéaments identifiés à partir des images satellitaires font l'objet d'une analyse fréquentielle permettant de ressortir les directions principales pouvant ensuite être comparées à celles des accidents relevés sur le terrain.

3.3. Technique de l'analyse géostatistique

L'approche géostatistique est basée sur l'analyse variographique. Pour cette étude, la théorie des variables régionalisées a été réalisée grâce au programme Autogrig développé par le laboratoire de géophysique de l'université de Yaoundé I dans une interface Matlab. Elle permet de quantifier la variabilité spatiale du phénomène étudié à partir des valeurs observées aux différents sites ponctuels de mesure et en fonction de la distance qui les

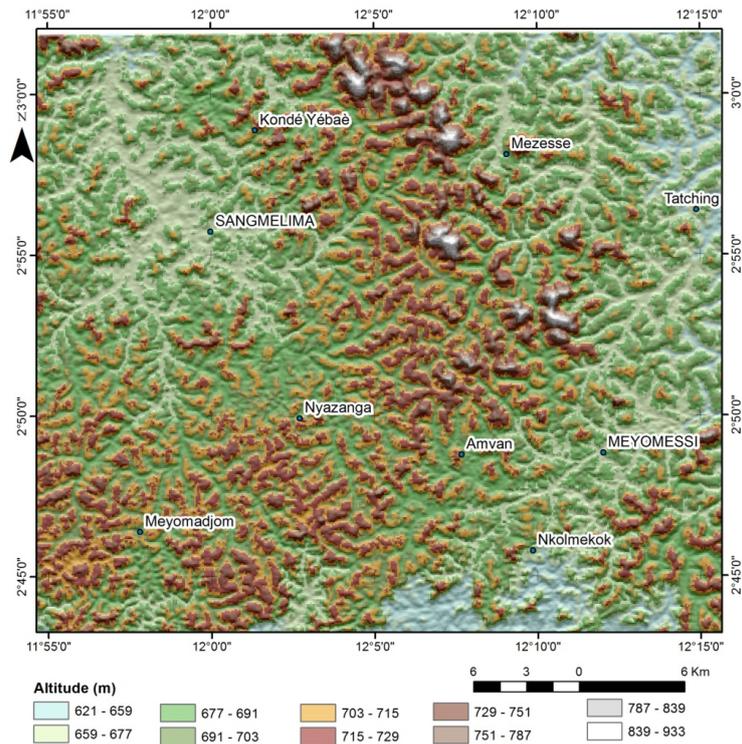


FIGURE 2 : Modèle Numérique de Terrain (MNT) de la région de Sangmelima.

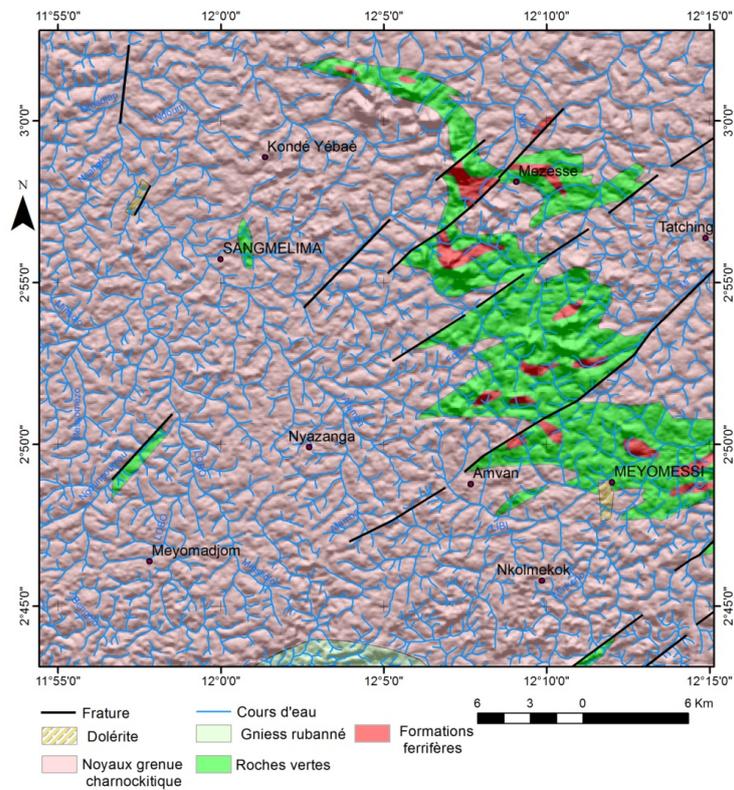


FIGURE 3 : Carte géologique du SW-Cameroun du secteur d'étude superposée au MNT (SRTM) et au réseau de drainage (modifiée d'après (Maurizot et al., 1986)).

0	1	1	1	1	1	2
-1	0	2	2	2	3	1
-1	-2	0	3	4	2	1
-1	-2	-3	0	3	2	1
-1	-2	-4	-3	0	2	1
-1	-3	-2	-2	-2	0	1
-2	-1	-1	-1	-1	0	0

Filtre 7 x 7 NE-SW de SOBEL

4	3	3	2	2	1	0
-3	5	4	4	3	0	-1
3	4	6	5	0	-3	-2
2	4	5	0	-5	-4	-2
-2	3	0	-5	-6	-4	-3
1	0	-3	-4	-4	-5	-3
0	-1	-2	-2	-3	-3	-4

Filtre 7 x 7 NW-SE de SOBEL

1	2	3	4	3	2	1
2	3	4	5	4	3	2
3	4	5	6	5	4	3
0	0	0	0	0	0	0
-3	-4	-5	-6	-5	-4	-3
-2	-3	-4	-5	-4	-3	-2
-1	-2	-3	-4	-3	-2	-1

Filtre 7 x 7 N-S de SOBEL

1	2	3	0	-3	-2	-1
2	3	4	0	-4	-3	-2
3	4	5	0	-5	-4	-3
4	5	6	0	-6	-5	-4
3	4	5	0	-5	-4	-3
2	3	4	0	-4	-3	-2
1	2	3	0	-3	-2	-1

Filtre 7 x 7 E-W de SOBEL

1	1	1	1	1	1	1
1	1	1	1	1	1	1
1	1	1	1	1	1	1
0	0	0	0	0	0	-1
-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1

Filtre de Yésou et al. (1993)

TABLEAU 1 : Matrices de filtres Sobel et gradient (d'après (Yésou et al., 1993)).

sépare. Expérimentalement, son outil mathématique est le variogramme $\gamma_e(h)$ estimé à partir de la relation 1.

$$\gamma_e(h) = \frac{1}{N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2 \quad (1)$$

Où $N(h)$ est le nombre de paires dont les points sont espacées de h .

Idéalement, afin qu'un point du variogramme expérimental soit jugé représentatif, il est nécessaire que $N(h) \geq 30$. A ces valeurs ponctuelles on ajuste un modèle théorique de variogramme admissible. Les principaux modèles admissibles sont le linéaire, le sphérique, l'exponentiel, le cubique, le gaussien et le logarithmique. La description de ces modèles repose sur la quantification de plusieurs paramètres, lesquels sont identifiés à la figure 4. La portée a correspond à la distance où la corrélation entre les observations devient nulle. A cette distance, le variogramme atteint le palier σ^2 qui correspond à la somme de l'effet pépité C_0 et de la variance C de la variable aléatoire.

Des sommes de modèles, seul le modèle sphérique a été jugé comme modèle admissible (Tableau 2) donc l'expression générale est donnée par l'équation ci-dessous :

$$\gamma_e(h) = C_0 + C \left[1,5 \frac{h}{a} - 0,5 \frac{h^3}{a^3} \right] \quad (2)$$

4. Analyse des résultats et discussion

4.1. Cartographie des linéaments

L'analyse en composantes principales (ACP), les combinaisons d'images et le filtrage spatial directionnel ont été appliqués pour le rehaussement des images. Sur ces images, les linéaments sont matérialisés par les limites formées par les zones sombres et claires. Elles peuvent parfois s'étendre sur plusieurs kilomètres. Les différents résultats présentés à la figure 5 rehaussent d'une manière plus ou moins nette les linéaments du secteur. La carte détaillée des linéaments (Figure 6a)

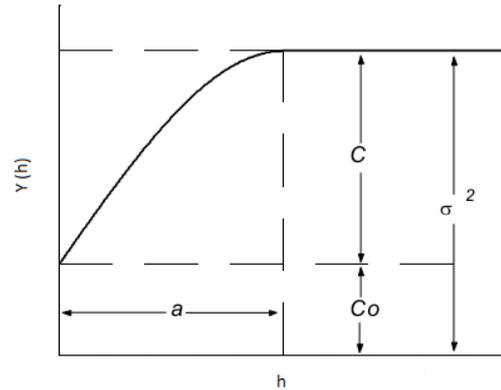


FIGURE 4 : Représentation graphique du variogramme.

a été réalisée grâce à une interprétation des images dérivées des différentes techniques de traitements. Cette carte présente une importante densité de linéaments de tailles variables allant de quelques centaines de mètres à plusieurs kilomètres.

4.2. Analyse statistique des linéaments

4.2.1. Distribution des longueurs des linéaments

La carte détaillée des linéaments de la figure 6a compte 1600 éléments structuraux de taille variable, compris entre 0,41 km et 23,78 km, avec une longueur moyenne de 2,66 km et de longueur totale de 4269,32 km. Les tailles des linéaments s'échelonnent donc sur plusieurs ordres de grandeur indiquant ainsi l'hétérogénéité géologique. L'histogramme de fréquence des linéaments de la figure 7a montre que plus de 95% des linéaments ont une taille inférieure à 7 km. Dans ce travail, la loi de puissance apparaît comme un bon modèle pour représenter les distributions de longueurs d'un grand nombre de réseaux de linéaments (Figure 7b). La dite loi de puissance est définie ici par la fonction suivante (3) :

$$f(x) = 1660,2 \cdot x^{-2,356} \quad (3)$$

avec un coefficient de corrélation $R^2 = 0,9108$ (R^2 étant calculé pour les $x \geq 1,82$ km) et l'exposant caractéristique de la loi de puissance $\lambda=2,356$. Ces valeurs indiquent que la fracturation a atteint un stade de développement avancé. Cette valeur est compatible avec les données de la littérature comprises généralement entre 1 et 3, qui peuvent varier d'un réseau de linéaments à un autre (Darcel, 2002). Rappelons que la puissance λ fixe la proportion de grands linéaments ($x \geq 1,82$ km) par rapport aux petits ($x < 1,82$ km) et les différents stades de développement ou de maturité des réseaux fractures (Dreuzy, 2000 ; Lasm, 2008 ; Darcel, 2002 ; Youan Ta et al., 2008 ; Yao et al., 2012). Il apparaît donc ici que la fracturation a atteint un stade de développement avancé. La distribution directionnelle des linéaments (Figure 6b) fait ressortir que la famille de direction N30°- N60° constitue la direction majeure de la trame linéamentaire. Les

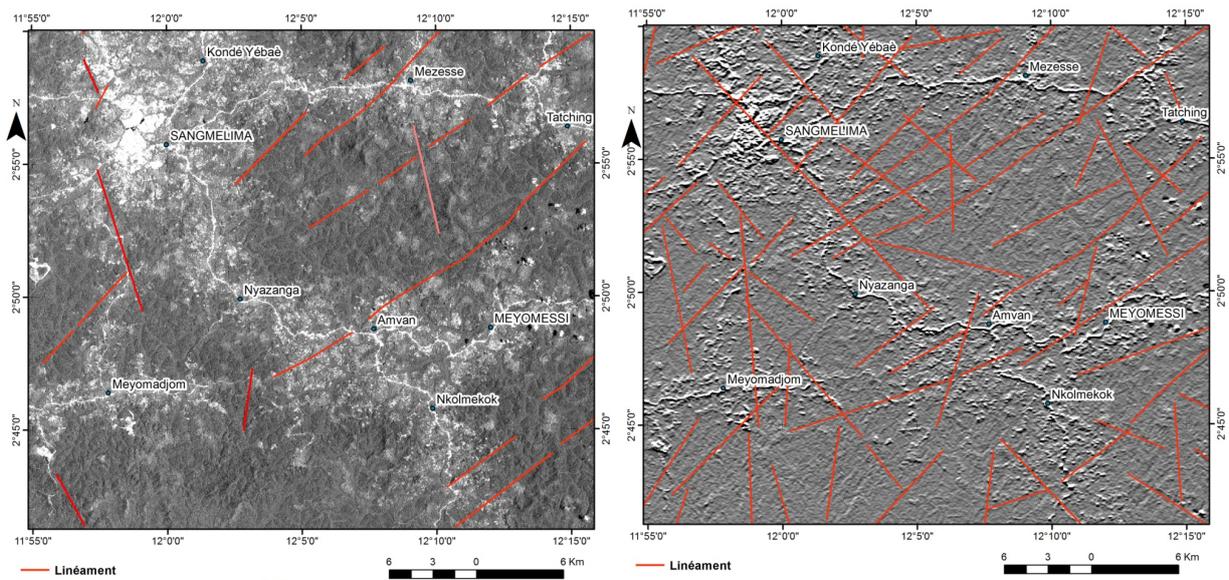


FIGURE 5 : (Gauche) Image ACP1 rehaussant les principaux accidents majeurs. (Droite) Accidents majeurs rehaussés par le filtrage gradient de Yésou et al. (1993) appliqué à l'image ACP1.

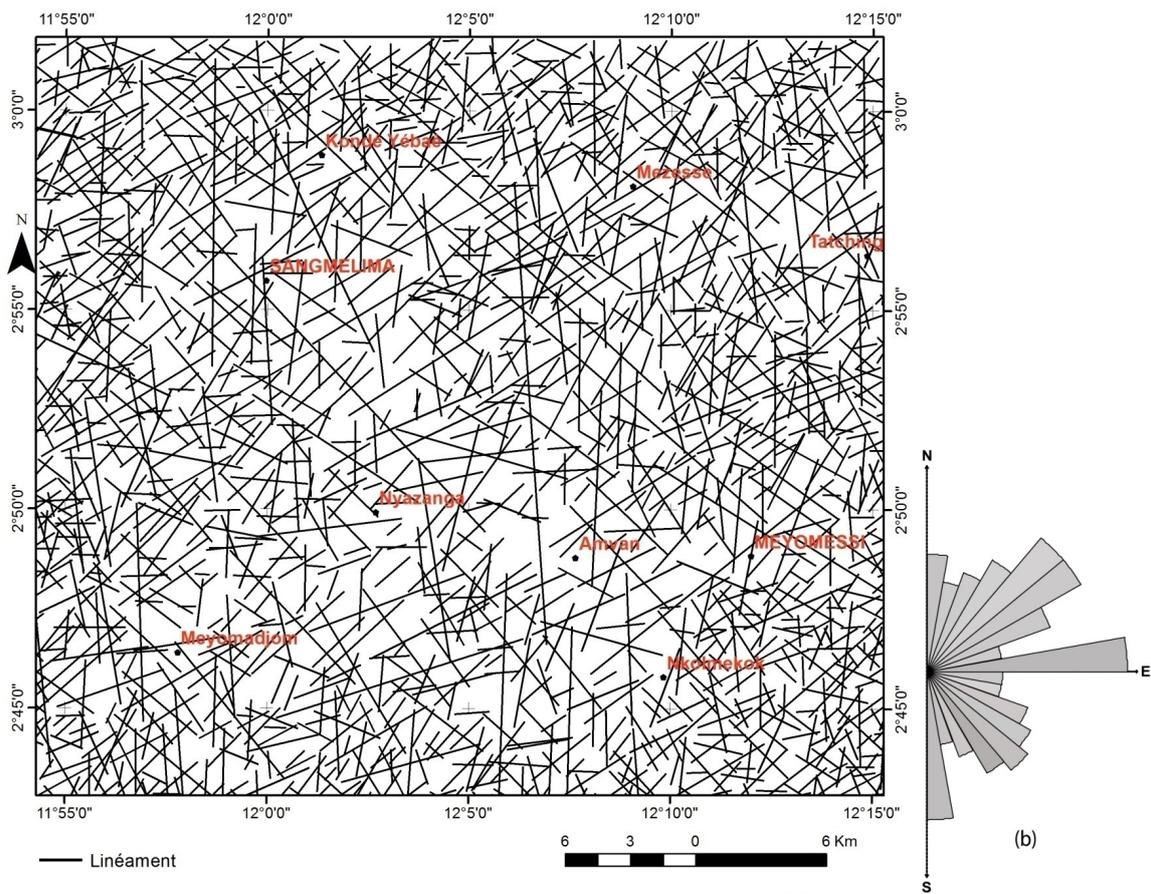


FIGURE 6 : (a) Carte détaillée des linéaments de la région de Sangmélima établie à partir de l'analyse des images ETM+ de Landsat 7. (b) Rosace directionnelle des linéaments.

Type de modèle	Cubique	Linéaire	Exponentiel	Sphérique	Logarithmique	Gaussien
RMS dans la direction NE-SW	33	18	11	10	40	29
RMS dans la direction NW-SE	20	15	10	8	11	11

TABEAU 2 : Résultat des erreurs quadratiques moyennes (RMS) de la longueur de fracturation.

directions secondaires sont par ordre décroissant, les classes N120°- N150°, N-S, E-W, N60°- N80, N10°-N30° et N150°- N170°.

La carte linéamentaire met en évidence les différents nœuds des fractures (Figure 6a). Ces nœuds constitués par les intersections des fractures auraient des potentiels hydriques non négligeables et peuvent correspondre à des zones à potentiel minier élevé. Ils apparaissent souvent avec un décalage plus ou moins marqué, mais à l'échelle d'observation satellitaire, ils sont parfois difficilement observables. Cependant, à certains endroits, on peut observer des zones de décrochements transverses nets entre les linéaments, caractéristiques d'une zone de cisaillement (Figure 13).

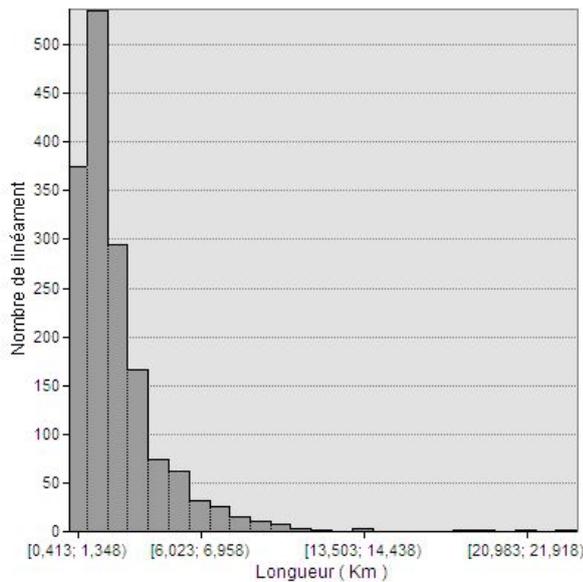


FIGURE 7 : (a) Histogramme de distribution de la longueur des linéaments. (b) Diagramme Semi-log de distribution des fréquences des longueurs des linéaments (ajustement à une loi de puissance).

4.2.2. Analyse géostatistique des linéaments

Le variogramme des linéaments tous azimuts est représenté à la figure 8a. Il présente un comportement particulier caractérisé par trois paliers. Ceci peut être l'indication d'un emboîtement de plusieurs structures à plusieurs échelles différentes (Youan Ta et al., 2008). La longueur cumulée des linéaments est donc caractérisée par une triple régionalisation. Les paramètres de régionalisation sont déterminés à l'aide du modèle sphérique.

Les équations des trois variogrammes élémentaires sont données par les équations suivantes :

$$\gamma_1(h) = 4,3 + 1,12 \left[1,5 \frac{h}{2,85} - 0,5 \frac{h^3}{2,85^3} \right] \quad (4)$$

$$\gamma_2(h) = 0,92 \left[1,5 \frac{h}{6,79} - 0,5 \frac{h^3}{6,79^3} \right] \quad (5)$$

$$\gamma_3(h) = 0,47 \left[1,5 \frac{h}{12,73} - 0,5 \frac{h^3}{12,73^3} \right] \quad (6)$$

Le variogramme global des linéaments modélisé correspond à la somme des trois variogrammes élémentaires dont l'équation générale est donnée par l'expression (7) :

$$\gamma_g(h) = \gamma_1(h) + \gamma_2(h) + \gamma_3(h) \quad (7)$$

L'effet de pépite représente 79,34% de la dispersion totale au niveau de la fracturation tous azimuts. Cette valeur est respectivement de 72,86% et 34% pour les familles linéamentaires NW-SE et NE-SW. D'une manière générale, la dispersion est très importante au niveau des variogrammes tous azimuts et dans la direction NW-SE. Ceci pourrait provenir de diverses sources telles que les erreurs de mesure, la présence d'une microstructure d'une portée plus faible que la taille de l'échantillon et / ou la présence d'une microstructure associée à une portée plus faible que la distance séparant les deux observations les plus rapprochées. Il peut être impossible de quantifier l'apport de chaque source.

Ce variogramme est caractérisé par trois portées pratiques $a_1 = 2,85$ km, $a_2 = 6,79$ km et $a_3 = 12,73$ km.

La distance de structuration des familles de linéaments NE-SW et NW-SE est estimée respectivement à 10,51 et 14,52 km (Figures 8b et 8c). Les équations de modélisation de ces variogrammes sont représentées par les expressions (8) et (9) ci-dessous :

$$\gamma_{NE-SW}(h) = 3,06 + 1,14 \left[1,5 \frac{h}{10,51} - 0,5 \frac{h^3}{10,51^3} \right] \quad (8)$$

$$\gamma_{NW-SE}(h) = 2,38 + 4,62 \left[1,5 \frac{h}{14,52} - 0,5 \frac{h^3}{14,52^3} \right] \quad (9)$$

4.3. Tectonique

4.3.1. Caractérisation des phases de la déformation

L'analyse descriptive et cinématique des principales structures identifiées sur le massif a révélé l'existence d'une foliation, structure pénétrative postérieurement reprise par d'autres structures. Il en découle une chronologie des épisodes tectoniques agencés ainsi.

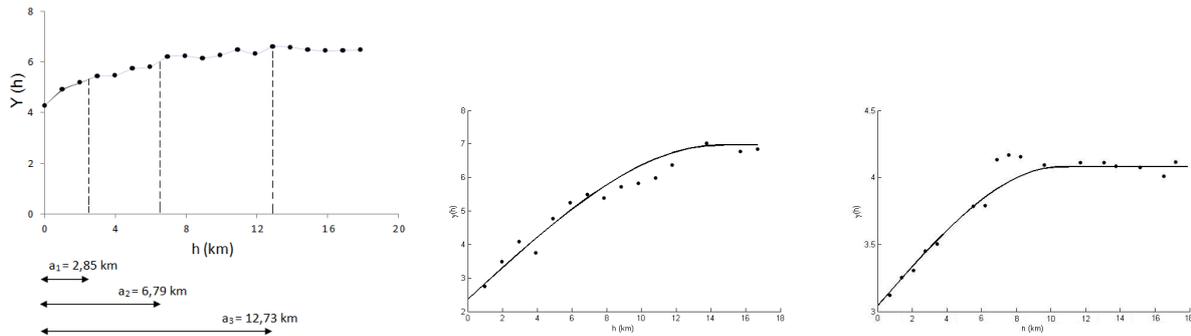


FIGURE 8 : (a) Variogramme des linéaments tous azimuts. (b) Variogramme de la famille linéamentaire NE-SW. (c) Variogramme de la famille linéamentaire NW-SE.

▷ Phase D_n :

C'est la première phase de déformation enregistrée dans les roches du massif considéré. Elle est soulignée par la fluidalité/foliation magmatique S_n , structure primaire dont la répartition stéréographique des pôles montre (Figure 9) sa reprise par des déformations postérieures à sa mise en place. Elle porte par ailleurs une linéation minérale et/ou d'étirement L_n dont l'orientation n'a pas pu être précisée sur le terrain. La nature et le régime de la déformation D_n n'ont pas été déterminés à cause de l'intensité des déformations qui la reprennent.

▷ Phase D_{n+1} :

La foliation S_n est affectée par des plis P_{n+1} (Figure 10) induits par des plans de cisaillement C_{n+1} (Figure 10). Les stéréogrammes de la figure 9 montrent la répartition des pôles de S_n suivant deux grands cercles matérialisant deux axes de raccourcissement conjugués NNW-SSE et NE-SW. La compression NE-SW est responsable des plis relativement symétriques, redressés et serrés, de direction axiale ESE-WNW (N122E 11°ESE). Par contre, la compression NNW-SSE induit un plissement dissymétrique de vergence NNW et d'axe orienté ENE-WSW (N065E 03°ENE). La reconstitution des axes dynamiques liés à ces deux directions de raccourcissement montre qu'il s'agit dans les deux cas de régime de tectonique décrochante ($\phi_{\sigma_2} > \phi_{\sigma_1} > \phi_{\sigma_3}$). Par ailleurs, les compressions conjuguées ainsi mises en évidence sont compatibles respectivement avec :

- une transpression dextre NE-SW à ENE-WSW (Figure 10b) responsable des décrochements C_{n+1} N-S, NNE-SSW, synthétiques de la polarité dextre d'une bande de cisaillement principal N-S et des décrochements NNW-SSE et NE-SW, antithétiques (senestres) ;
- une transpression sénestre NNW-SSE (Figure 10a) responsable des décrochements C_{n+1} N-S, NNE-SSW à NE-SW, synthétiques de la polarité sénestre d'une bande de cisaillement principale NNE-SSW et des décrochements ENE-WSW, NNW-SSE antithétiques (dextres).

Tous ces décrochements comme le montre la figure 10b sont repris par un dernier épisode décrochant en transpression senestre N-S responsable des décrochements C'_{n+1} ENE-WSW, NE-SW synthétiques de la polarité senestre d'une bande de cisaillement principale NE-SW et des décrochements C'_{n+1} NNW-SSE, N-S antithétiques dextres. Ce changement de direction des contraintes justifie le jeu antagoniste de décrochement et les striations multiples observés sur les miroirs des failles (Figure 11a).

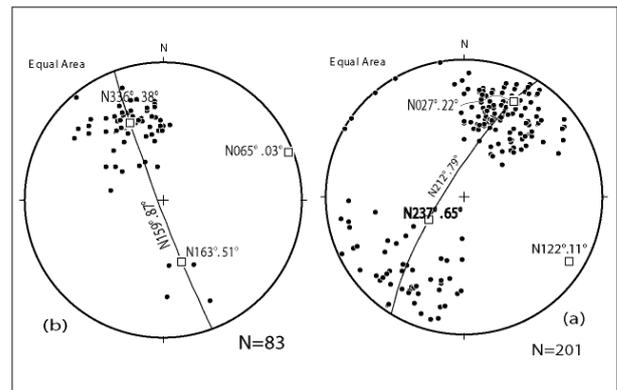


FIGURE 9 : Stéréogrammes des pôles des plans de foliation de l'affleurement de Mezesse.

▷ Phase D_{n+2} :

La phase D_{n+2} est fragile, caractérisée par quatre familles de fractures, illustrées dans le stéréogramme de la figure 11b, à remplissage filonien ou non, sans déplacement apparent à leurs contacts, il s'agit des familles NE-SW (d'attitudes moyennes N045E 60°SE et N058E 63°NW) et NW-SE (d'attitudes moyennes N138E 72°SW et N142E 60°NE) à sens de pendage opposés (Figure 11c). Ces fractures sont induites par des axes de compression conjugués NNW-SSE et NE-SW.

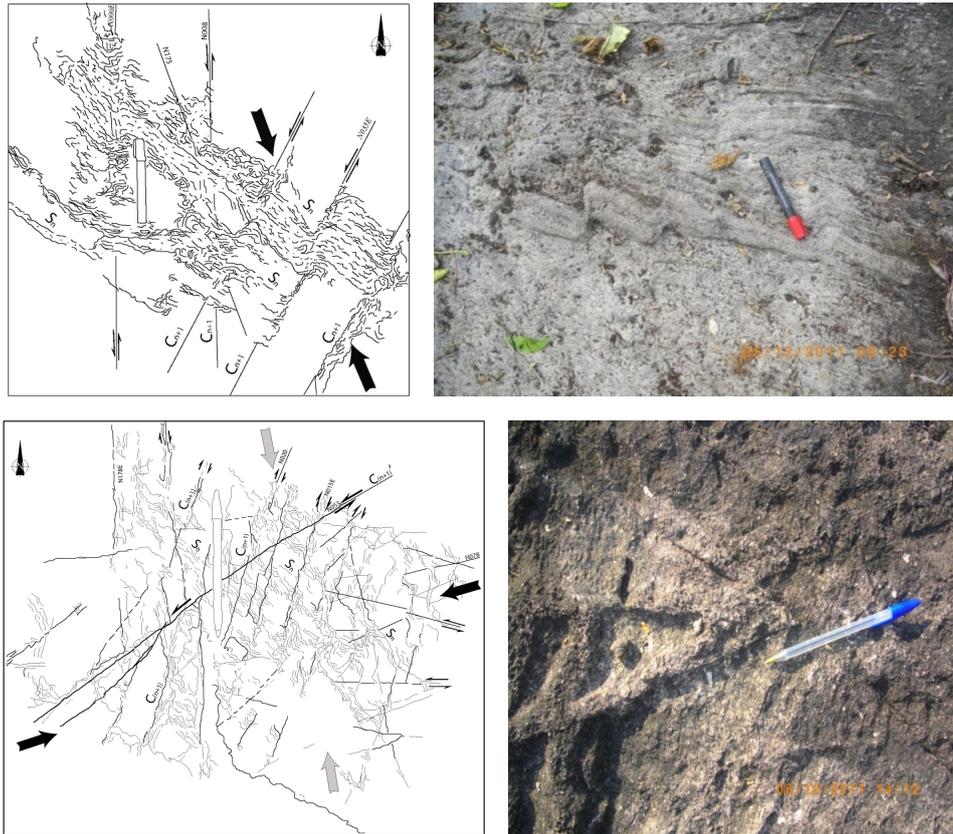


FIGURE 10 : Illustrations des structures transpressives observées dans le massif de Mezesse.

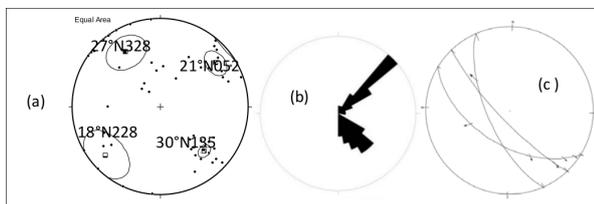


FIGURE 11 : (a) Projection stéréographique des plans de faille striés. (b) Répartition stéréographique des pôles et (c) rosaces de fracture.

4.3.2. Relation entre les linéaments identifiés à partir des images satellitaires et les structures géologiques

Les principales directions linéamentaires interprétées à partir des images ETM+ montrent une correspondance avec les principales directions structurales observées sur le terrain (Figure 12). Ces correspondances sont résumées dans le tableau 3.

5. Synthèse structurale

La confrontation des données de terrain avec les cartes de linéament et géologiques dans un SIG a permis d'esquisser la carte structurale de la figure 13. Elle montre que les trajectoires de foliation sont globalement

orientées E-W à NW-SE ; elles sont sporadiquement rebroussées de part et d'autre de certains linéaments correspondant aux décrochements dextres et senestres. L'analyse structurale des granodiorites de Mezesse révèle que la direction prédominante de la foliation S_n est NW-SE en dehors des perturbations locales liées aux déformations post-foliales. L'orientation de cette foliation S_n des granitoïdes se prolonge dans leur encaissant. Dès lors, la déformation D_n qui en est responsable s'avère être un épisode tectonique ayant transposé la foliation précoce S_1 , caractéristique de la première phase de déformation régionale D_1 , antérieure à la mise en place du massif. D_n dans le massif granodioritique correspondrait donc à la deuxième phase de déformation régionale D_2 . D_2 est reprise par un épisode décrochant et transpressif conjugué D_3 caractérisé par des plis P_3 induits par des joints de cisaillement C_3 , repris à leur tour par des plans de cisaillement senestre C'_3 . L'ensemble est repris par une déformation cassante D_4 , induite par une double compression conjuguée NNW-SSE et NE-SSW.

6. Conclusion

La présente étude avait pour objectif de cartographier d'une part les principales directions structurales connues dans le complexe du Ntem et d'autre part de tester l'utilisation des images ETM+ de Landsat-7 pour la cartographie structurale en milieu latéritique.

Directions linéamentaires	Directions structurales sur le terrain
N010°E-N025°E	Cisaillement senestre C_2 , filon de pegmatite
N030°E-N065°E	Cisaillement senestre C_2 , dyke de dolérite fracturé, fractures
E-W à NW-SE	Foliation dans les charnockites et le granodiorites, cisaillement dextre C_2 , boudin de gabbro, filons basiques fractures
NNW-SSE à N-S	Foliation dans les migmatites, joints de cisaillement dextre ou senestre, filons de pegmatite, axes de plis, filon basique

TABLEAU 3 : Relation entre les directions linéamentaires et les directions structurales sur le terrain.



FIGURE 12 : Structures observées. (a) Dyke de dolérite fracturé. (b) Filon basique dans les granodiorites. (c) Filon basique plissé dans les migmatites. (d) Joint de cisaillement senestre.

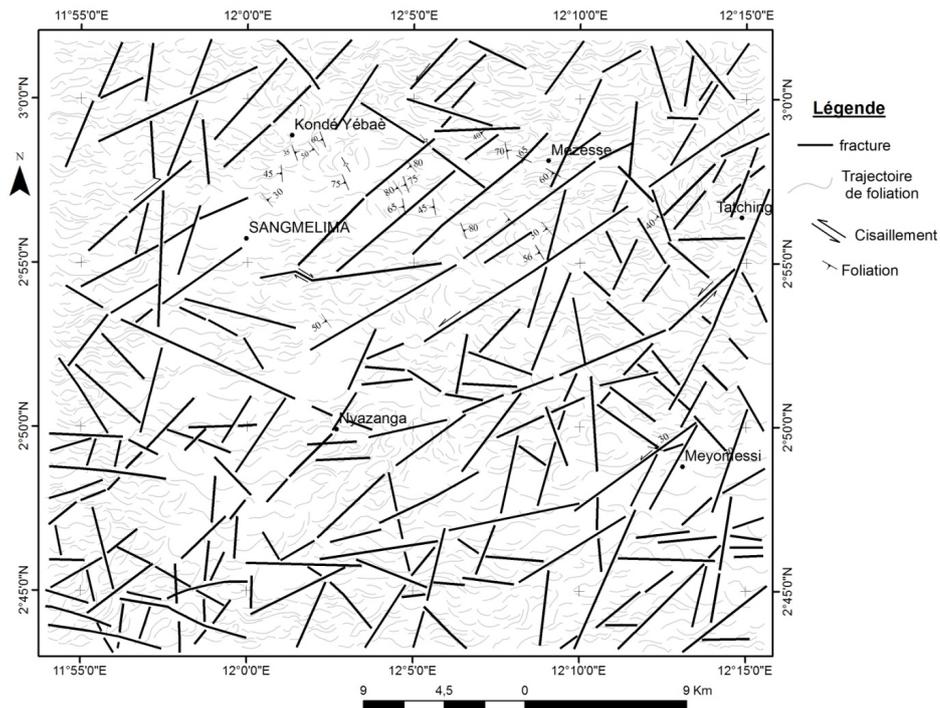


FIGURE 13 : Carte structurale de la région de Sangmélima.

La carte des linéaments de Sangmélima est le résultat de plusieurs traitements effectués sur les images ETM+ Landsat-7 de la zone et corrélés aux travaux réalisés dans la région. Ces résultats mettent en évidence une déformation polyphasée D_1 - D_4 dominée par important épisode tectonique décrochant et transpressif conjugué à l'origine de l'architecture actuelle des formations géologiques de la région. La méthodologie mise en œuvre, appliquée à l'ensemble du domaine archéen du Sud-Cameroun, devrait en améliorer la connaissance géologique.

Remerciements

Les auteurs remercient les relecteurs anonymes dont les remarques et suggestions pertinentes ont contribué à l'amélioration de ce travail.

Références

Caen-Vachette M., Vialette Y., Bassot J.P., Vidal P., 1988. Apport de la géochronologie à la connaissance de la géologie gabonaise. Chron. Rech. Min. 491 :35-54.

Darcel, C., 2002. Corrélation dans les réseaux de fractures : Caractérisation et conséquences sur les propriétés hydrauliques. Ph.D. Thesis, Université Rennes 1, France.

Dreuzy J.R., 2000. Analyse des propriétés hydrauliques des réseaux de fractures, Université de Rennes. Ph.D. Thesis, Université Rennes 1, Rennes, France.

Lasm, T., Youan Ta, M., Jourda, P., Kouame, K.F., 2008. Fracture Networks Analysis in Crystalline Basement : Case of Bondoukou Area (Northeast Côte d'Ivoire). European Journal of Scientific Research, 21(1), 196-208.

Deroin, J.-P., Chorowicz, J., Tamain, A.L.G., Deroin, T., Dutartre, P., Malon, J.F., Scanvic, J.Y., 1991. Combinaison d'images de télédétection et de données exogènes pour la compréhension géologique des paysages. Application à la cartographie lithologique et à l'analyse structurale en pays Cevenol (Massif Central français). Bulletin de la Société française de photogrammétrie et de télédétection 122, 53-57.

El Hadani, D., 1997. Télédétection et Systèmes d'Information Géographique pour la gestion et la recherche de l'eau. Géo-Observateur. Les Rapport Thématiques 1, 28 p.

Gomez C., Delacourt C., Allemand P., Ledru P., 2004. Potentials and Limitations of Coupling ASTER and Airborne Geophysical Data for Improvement of Geological Mapping in Arid Region (Namibia, Rehoboth Region). Remote Sensing for Environmental Monitoring, GIS Applications, and Geology III, edited by Manfred Ehlers, Hermann J. Kaufmann, Ulrich Michel, Proceedings of

SPIE 5239, 98-108.

Himiyari, S.M. Hoepffner, C. Benzakour, M., Hadani, D.E., 2002. Structural study of the Haut Atlas Oriental (Morocco) using the SPOT's HRV (XS) images lineament analysis. *Téledétection* 2(4), 243-253.

Jourda J.P., Saley M.B., Djagoua E.V., Kouame K.J., Razack M., 2006. Utilisation des données ETM+ de Landsat et d'un SIG pour l'évaluation du potentiel en eau souterraine dans le milieu fissuré précambrien de la région de Korhogo (Nord de la Côte d'Ivoire) : Approche par analyse multicritère et test de validation. *Téledétection* 5(4), 339-357.

Lasserre, M. Soba, D., 1976. Age libérien des granodiorites et des gneiss à pyroxènes du Cameroun Meridional. *Bull. BRGM* 2(4), 17-32.

Maurizot, P., Feybesse, J.K. Johan, Lecomte P., 1986. Etude et prospection minière du Sud-Ouest Cameroun, synthèse des travaux de 1978 à 1985. Rapport du Bureau de Recherche géologique et minière, 85, CMR066, 274 p.

Nédélec A., Nsifa E.N., Martin H., 1990. Major and trace element geochemistry of the Archaean Ntem plutonic Complex (South Cameroon) : Petrogenesis and crustal evolution. *Precambrian Research* 47, 35-50.

Nguetnkam J.-P., Yongue Fouateu R., Bitom D., Bilong P., Volkoff B., 2006. Etude pétrologique d'une formation latéritique sur granite en milieu tropical forestier sud-camerounais (Afrique centrale) : Mise en évidence de son caractère polyphasé. *Étude et Gestion des Sols* 13(2), 89-102.

Nsifa, E.N., Riou, R., 1990. Post-Archaean migmatization in the charnockitic series of the Ntem Complex, Congo craton, Southern Cameroon. In : Rocci, G. and Deschamps, M. (Editors). *Etudes récentes sur la géologie de l'Afrique*. 15th Coll. Afr. CIFEG. 22, 33-36.

Owona S., Mvondo Ondoa J., Ratschbacher L., Mbola Ndzana S.P., Tchoua M.F., Ekodeck G.E., 2011. The geometry of the Archaean, Paleo- and Neoproterozoic tectonics in the Southwest Cameroon. *Compte. Rendus de Geoscience* 343, 312-322.

Owona S., Mbola Ndzana S.P., Mvondo Ondoa J., Moussa Nsangou Ngapna, Nkabsaah C., Ratschbacher L., Ekodeck G.E., 2012. Geological control of geomorphologic units in the Southwest (SW) Cameroon (Central Africa). *Journal of Geology and Mining Research* 4(7), 152-167.

Owona, S., Mvondo Ondoa J., Ratschbacher L., Ekodeck G.E. 2013. Evidence of quartz dynamic recrystalliza-

tions in SW Cameroon : Implications on post-archean, -eburnean and late-panafrican deformations over 250-750°C. *Sciences, Technologies et Développement* 14, 48-58.

Scanvic J., 1983. Utilisation de la télédétection dans les sciences de la Terre. Coll. *Manuels et Méthodes*, BRGM Eds. Orléans, France 7, 159 p.

Lasserre, M. Soba, D., 1976. Age libérien des granodiorites et des gneiss à pyroxènes du Cameroun Meridional. *Bull. BRGM* 2(4), 17-32.

Shang, C.K., 2001. *Geology, Geochemistry and Geochronology of Archaean Rocks from the Sangmelima Region, Ntem complex, NW Congo craton, South Cameroon*. Unpublished Ph.D. Thesis, University of Tubingen, Germany, 313 p.

Shang, C., Satir, M., Siebel, W., Nsifa, E.N., Taubald, H., Liegeois, J.P., Tchoua, F.M. 2004. TTG magmatism in the Congo Craton ; a view of major and trace element geochemistry, Rb-Sr and Sm-Nd systematics : case of the Sangmelima region, Ntem Complex, Southern Cameroon. *Journal of African Earth Sciences* 40, 61-79.

Shang, C.K., Satir, M., Nsifa, E.N., Liegeois, J.P., Siebel, W., Taubald, H., 2007. Archaean high-K granitoids produced by remelting of earlier Tonalite-Trondhjemite-Granodiorite (TTG) in the Sangmelima region of the Ntem complex of the Congo craton, Southern Cameroon. *International Journal of Earth Science (Geol Rundsch)* 96, 817-841.

Shang C.K., Liégeois J.-P., Satir M., Frisch W., Nsifa E.N., 2010. Late Archaean high-K granite geochronology of the northern metacratonic margin of the Archaean Congo craton, Southern Cameroon : Evidence for Pb-loss due to non-metamorphic causes. *Gondwana Research* 18 (2-3), 337-355.

Tchameni R., 1997. *Géochimie et géochronologie des formations de l'archéen et du paléoprotozoïque du Sud-Cameroun (groupe du Ntem. Craton du Congo)*. Unpublished Ph.D. Thesis, Université d'Orléans, France, 335p.

Tchameni R., Mezger K., Nsifa E.N., and Pouclet A., 2000. Neoproterozoic evolution in the Congo Craton : Evidence from K rich granitoids of the Ntem complex, Southern Cameroon. *Journal of the Earth Sciences* 30(1) 113-147.

Tchameni, R., Mezger, K., Nsifa, N.E., Pouclet, A., 2001. Crustal origin of Early Proterozoic syenites in the Congo craton (Ntem complex), South Cameroon. *Lithos* 57, 23-42.

Tchameni, R., Pouclet, A., Mezger, K., Nsifa, E.N., Vicat, J.P., 2004. Monozircon and Sm-Nd whole rock ages from the Ebolowa greenstone belts : Evidence for the terranes older than 2.9 Ga in the Ntem Complex (Congo craton, South Cameroon). *Journal of Cameroon Academic Sciences* 4, 213-224.

Toteu, S.M., Van Schmus, W.R., Penaye, J., Nyobe, J.B., 1994. U-Pb and Sm-Nd evidence for Eburnean and Pan-African high grade metamorphism in cratonic rocks of southern Cameroon. *Precambrian Research* 67, 321-347.

Vicat, J.P., Leger, J.M., Nsifa, E., Piguët, P., Nzenti, J.P., Tchameni, R., Pouclet, A., 1996. Distinction au sein du craton congolais du Sud-Ouest du Cameroun, de deux épisodes doléritiques initiant les cycles orogéniques éburnéen (Paléoprotérozoïque) et Pan-Africain (Néoprotérozoïque). *Compte Rendu de l'Académie des Sciences Paris* 323, 575-582 série IIa.

Yao, K. T., Fouché-Grobla, O., Yéi, O., M., Assoma T. V., 2012. Extraction of structural lineaments from satellite images in precambrian metamorphic hard-rocks and extraction-induced estimation bias. *Téledétection* 10(4), 161-178.

Yésou, H. Pion, J. C. Besnus, Y. et Saint Jean, R., 1993. Amélioration des données SPOT pour la cartographie structurale en milieu tropical. Exemple de la région des chapeaux de fer de Pagala Togo). In : *IIIèmes Journées Scientifiques du Réseau Téledétection UREF*, Toulouse, France, 13-16 November 1990, pp. 143-164. In : J.M. Dubois, F. Blasco dir), *Outil microinformatique et Téledétection de l'évolution des milieux*, PUQ/AUPELF UREF. Ed., 492 p.

Youan Ta, M., Lasm, T., Jourda, J.-P., Kouame, K. F. et Razack, M., 2008. Mapping geological accidents from Landsat 7 ETM+ imagery and analysis of fractures networks of the precambrium substratum of the Bondoukou area (North-East of Ivory Coast). *Téledétection* 8(2), 119-135.