

Cartographie par traitement d'image satellitaire des linéaments du groupe de l'Inkisi en République du Congo : implications hydrogéologique et minière

**Timothée MIYOUNA^{1*}, Nicy Carmel BAZEBIZONZA TCHIGUINA¹, Florent Olivier ESSOULI¹,
Adolphe KEMPENA¹, Hardy Medry Dieu-Veill NKODIA¹ et Florent BOUDZOU MOU^{1,2}**

¹ *Université Marien Ngouabi, Faculté des Sciences et Techniques, Département des Master, Laboratoire des Géosciences, BP 69, Brazzaville, République du Congo*

² *Institut de Recherche en Sciences Exactes et Naturelles, Département des Géosciences, BP 2400, Brazzaville, République du Congo*

* Correspondance, courriel : miyounatim@yahoo.fr

Résumé

Cette étude porte sur la cartographie par traitement de l'image satellitaire Landsat 8 OLI, des linéaments du groupe de l'Inkisi dans la partie sud de Brazzaville et dans le département du Pool. L'objectif est premièrement de faire une analyse statistique des linéaments et de les confronter aux données obtenues sur le terrain, afin de mieux comprendre l'organisation de la fracturation dans le groupe de l'Inkisi. Deuxièmement, d'identifier les zones à forte densité de fracturation et leurs relations avec le réseau hydrographique et enfin d'orienter l'implantation des forages d'eau à fort débit d'exploitation et la recherche des ressources minières. La méthodologie mise en œuvre est basée sur le traitement d'une image satellitaire Landsat 8 OLI à partir des techniques de Compositions colorées, Analyses en Composantes Principales, Ratios de bandes et Filtre directionnel de Sobel, suivies d'une extraction automatique des linéaments via l'algorithme LINE du logiciel PCI Geomatica. Les résultats obtenus montrent que le groupe de l'Inkisi contient des linéaments qui s'organisent en deux principaux systèmes orientés NW-SE et NE-SW. Ces linéaments correspondent à des failles qui ont les mêmes directions que celles des failles mises en évidence par les travaux récents et notre étude sur le terrain. Ces linéaments s'organisent en réseaux et couloirs qui définissent des grandes zones ou des couloirs de fracturations qui contrôlent les grands cours d'eau (Loufoulakari et Djoué) et fleuve (Fleuve Congo) qui drainent la zone d'étude. Ces réseaux et couloirs isolent des polygones à faible voire moyenne densité de fracturation. Cette densité de fracturation confère au groupe de l'Inkisi des bonnes potentialités aquifères et réservoirs. L'implantation des forages d'eau à bon débit d'exploitation ainsi que la recherche des minéralisations devraient cibler en priorité les fractures et les zones à forte densité de fractures orientées NW-SE et NE-SW.

Mots-clés : *linéaments, image satellitaire, fractures, Inkisi, Congo.*

Abstract

Mapping lineaments of the Inkisi group by processing satellite image in the Republic of Congo : hydrogeological and mining implications

This study aims to map, by processing the Landsat 8 OLI satellite image, the lineaments of the Inkisi group in the southern of Brazzaville and in the department of Pool. The objective followed is thirstily to make a statistical analysis of the lineaments and compare them with the data obtained in the field, in order to

understand the fracturing organization in the Inkisi group. The second objective is to identify the zones with high density of fracturing and their relationships with the hydrographic network, and finally to orient the establishment of borehole with high operating rate and the mining exploration. The methodology implemented is basing on the processing of a Landsat 8 OLI satellite image using the techniques of Colored Compositions, Principal Component Analysis, Band Ratios and Sobel Directional Filter followed by an automatic extraction of the lineaments using the LINE algorithm in PCI Geomatica software. The results obtained show that the Inkisi group underwent lineaments, which are organized into two main systems oriented NW-SE and NE-SW. These lineaments correspond to faults which have the same directions as those highlighted by recent work and our study in the field. These lineaments are organizing into networks and corridors, which define large zones or fracturing corridors, which control the Loufoulakari, Djoué and Congo rivers, which drain the study area. These networks and corridors isolate polygons with low or even medium fracturing density. This fracturing density gives to the Inkisi group a good aquifer and reservoir potential. The implementation of borehole with good operating flow as well as the exploration for mineralization should target the fractures and the corridors with high density of fractures oriented NW-SE and NE-SW.

Keywords : *lineaments, satellite image, fractures, Inkisi, Congo.*

1. Introduction

La cartographie des linéaments à partir des techniques de télédétection constitue une approche importante dans les études géologiques [1]. De nos jours de nombreux travaux ont démontré l'intérêt des techniques de télédétection dans la cartographie des linéaments [2 - 5]. Ces linéaments sont considérés comme d'importants indicateurs tectoniques et structuraux permettant de déterminer les tendances tectoniques régionales et les zones de fractures dans les roches [6]. Ces techniques ont donc été appliquées au groupe de l'Inkisi qui constitue le soubassement du sous-sol de la partie sud de Brazzaville et du département du Pool au Congo Brazzaville. Les récentes études tectoniques et structurales portant sur cette formation ont été réalisées dans la partie sud de Brazzaville. Elles ont révélé que le groupe de l'Inkisi est affectée par deux phases tectoniques cassantes décrochantes orientées NW-SE (senestre) et NE-SW (dextre) [7, 8]. Le caractère localisé de ces études, l'absence d'affleurements rocheux n'ont pas permis d'étendre ces études dans les confins sud de Brazzaville et du département du Pool. Les linéaments associés à des fractures constituent des véritables conduits des eaux souterraines dans les aquifères fracturés [9]. Ils modifient considérablement les propriétés hydrauliques des roches cristallines [10, 11] et sont à l'origine de la quasi-totalité de leurs propriétés de perméabilité (perméabilité de fractures) [12]. Ces fractures peuvent constituer des chemins préférentiels d'écoulement de fluides hydrothermaux [13]. Ainsi, L'objectif de cette étude est de cartographier à partir de l'image satellitaire Landsat 8 OLI, les linéaments du groupe de l'Inkisi, de faire leur analyse statistique et de les confronter aux données obtenues sur le terrain. Elle vise premièrement à comprendre l'organisation des fractures dans la zone d'étude en comparant l'organisation et la structuration des linéaments extraits des images satellitaires, aux résultats tectoniques et structurales de l'étude sur le terrain, de déterminer la relation de la fracturation avec le réseau hydrographique et enfin d'orienter l'implantation des forages à haut débit d'exploitation et l'exploration des ressources minières. La connaissance du réseau de fractures ainsi généré par sa cartographie est fondamentale pour une meilleure caractérisation des potentialités aquifères, réservoirs et minières des grès de l'Inkisi.

2. Matériel et méthodes

2-1. Situation et contexte géologique de la zone d'étude

La zone d'étude se situe en République du Congo, il se localise entre les latitudes 4,2° et 4,8° S et les longitudes 14,4° et 15,4° E ; WGS_1984_UTM_Zone_33S (**Figure 1**). Elle s'étend du pont du Djoué aux confins sud du département du Pool. Le sous-bassement du sous-sol de la partie sud de Brazzaville et du département du Pool est en grande partie constitué des grès de l'Inkisi. C'est une formation rocheuse essentiellement constituée des grès arkosiques [14] d'origine fluviale présentant, trois (3) termes répétitifs [15] : (i) grès grossiers associés à galets de quartzitiques, de roches magmatiques et métamorphiques de forme elliptique, qui parfois montrent dans sa partie inférieure des conglomérats ; (ii) : grès grossiers massifs à stratification entrecroisées ; (iii) : alternance grès fins à très fins micacés à stratifications planes parallèles et à rides de courant. L'âge du groupe de l'Inkisi est suggéré pré-Karoo (320Ma) [16], car en Angola il est surmonté par les dépôts du Karoo d'âge Permien [17]. Les âges obtenus sur l'analyse des zircons détritiques les plus jeunes se situent entre 558 et 851 Ma [18, 19]. De plus, les travaux récents réalisés au Congo Brazzaville montrent également que la proportion de zircons fini-néoprotérozoïque représente plus de 55 % de l'ensemble des âges obtenus [20]. Par contre, les populations secondaires de zircons se répartissent dans l'ordre d'abondance entre le Paléoprotérozoïque et l'Archéen. Ce qui contraint l'âge du groupe de l'Inkisi au Paléozoïque inférieur [21 - 24].

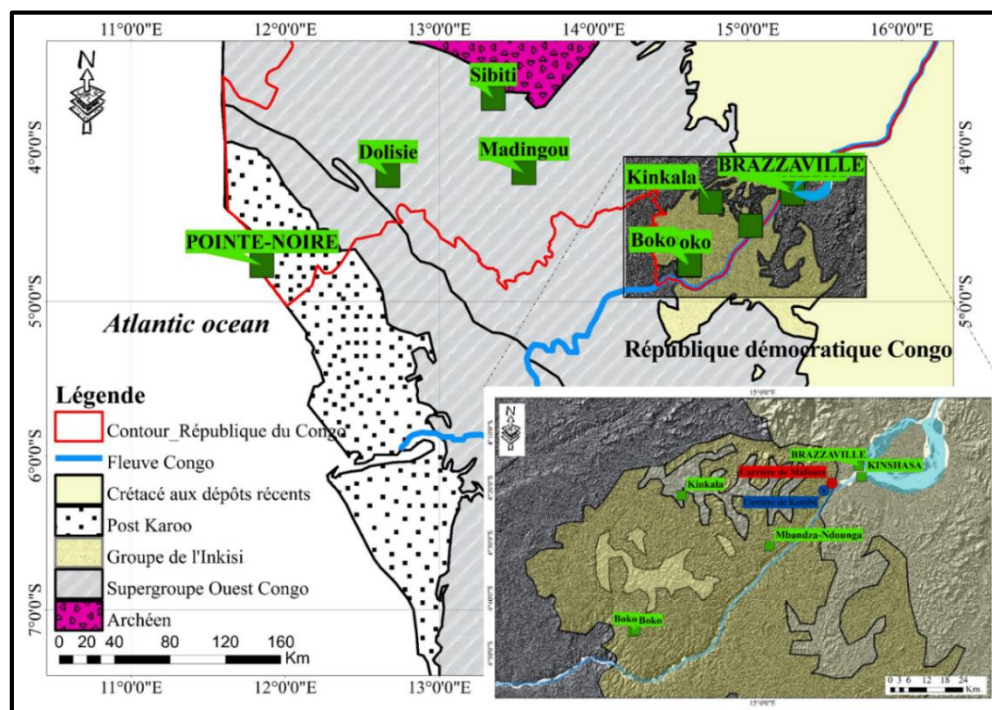


Figure 1 : Répartition des grès du groupe de l'Inkisi autour de l'Afrique centrale et localisation de la zone d'étude (rectangle noir)[23]

2-2. Matériel

La réalisation de cette étude a nécessité l'utilisation des données suivantes :

- l'image satellitaire optique Landsat 8 OLI ne possédant aucune couverture nuageuse et deux scènes Aster 014 et 015, téléchargées sur le site <http://earthexplorer.usgs.gov/>. L'image Landsat 8 OLI est référencée LC08_L1TP_182063_20190219_20190222_01_T1 et correspond à la scène de Path182/Row063 en date du 19 Février 2019. Elle possède les caractéristiques présentées dans le **Tableau 1** ;

- une base de données cartographiques constituée des cartes topographique et géologique de la République du Congo au 1/1.000.000 (Ministère des Mines et de l'Energie, 1995).
- Les différentes étapes nécessaires à la réalisation de cette étude ont nécessité l'utilisation des logiciels suivants : Microsoft Office 2013, Microsoft Excel 2013, Envi 5.1, ArcGIS 10.0, PCI Geomatica 2013.

Tableau 1 : Caractéristiques du capteur OLI de Landsat 8

Bandes spectrales	Longueur d'onde	Résolution spatiale
Bande 1 - Aérosols	0,433 - 0,453 μm	30 m
Bande 2 - Bleu	0,450 - 0,515 μm	30 m
Bande 3 - Vert	0,525 - 0,600 μm	30 m
Bande 4 - Rouge	0,630 - 0,680 μm	30 m
Bande 5 - Infrarouge proche	0,845 - 0,885 μm	30 m
Bande 6 - Infrarouge moyen 1	1,560 - 1,660 μm	30 m
Bande 7 - Infrarouge moyen 2	2,100 - 2,300 μm	30 m
Bande 8 - Panchromatique	0,500 - 0,680 μm	15 m
Bande 9 - Cirrus	1,360 - 1,390 μm	30

2-3. Méthodes

La méthodologie adoptée consiste : (i) : au traitement de l'image satellitaire Landsat 8 OLI afin de rehausser les linéaments ; (ii) : à extraire automatiquement les linéaments rehaussés et (iii) : à les valider. L'approche méthodologique adoptée est résumée dans la **Figure 2**.

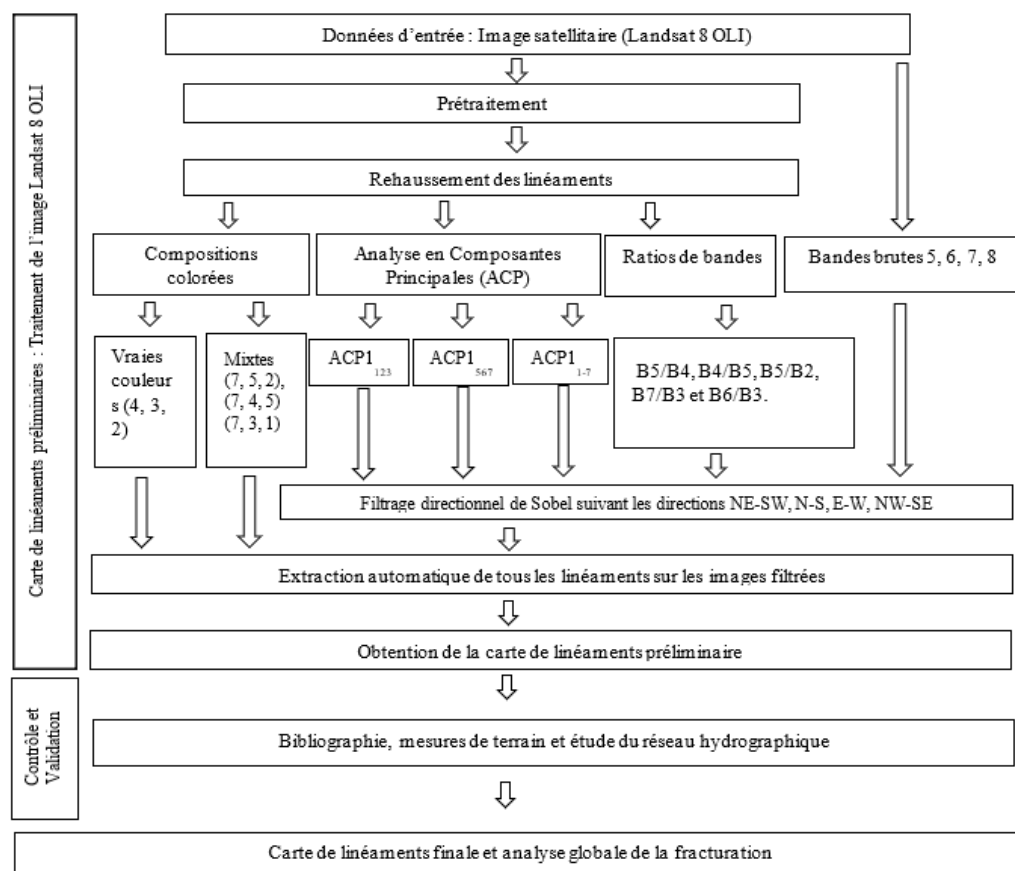


Figure 2 : Méthodologie adoptée

3. Résultats

3-1. Traitement de l'image satellitaire Landsat 8 OLI

Le traitement de l'image Landsat 8 OLI a consisté au prétraitement et au rehaussement des linéaments. Le prétraitement a consisté au découpage de la zone d'étude. Chaque bande de l'instrument OLI a été découpée suivant la zone d'intérêt (zone comprenant le groupe de l'Inkisi) dont les coordonnées sont comprises entre 4° et 5° Sud et 14.4° et 15.4° Est, WGS_1984_UTM_Zone_33S. Le rehaussement des linéaments revient à mettre en évidence les fortes transitions de réflectance dans l'image et les hautes fréquences spatiales qui leur sont associées [25]. Différents traitements ont été appliqués à l'image Landsat 8 OLI prétraitée afin de rehausser la perception des structures linéaires, notamment :

- l'Analyse en Composantes Principales (ACP) est une technique efficace d'accentuation d'une image multi-spectrale pour des fins d'interprétation géologique [26]. Dans le cadre de cette étude, nous avons effectué une ACP sélective sur les bandes du visible (123) (**Figure 3A**), de l'infrarouge (567) et sur l'ensemble des sept (7) premières bandes (1234567) ;
- les compositions colorées vraies et fausses couleurs constituent une technique de rehaussement permettant de visualiser l'image grâce à l'association de trois bandes. Nous avons effectué une composition colorée vraie couleur (432) (**Figure 3B**) et des compositions colorées fausses couleurs (752), (745) et (731) ;
- les ratios de bandes consistent en la division de la valeur radiométrique d'un pixel dans une bande par la valeur radiométrique d'un pixel dans une autre bande [27]. Les ratios des bandes 7/3, 6/3, 4/5 et 5/2, 5/4 (**Figure 3C**) ont été réalisés.

Les images issues de ces précédents traitements et les bandes brutes 5, 6, 7 et 8 sont passées au filtrage directionnel de Sobel qui constitue un filtrage spatial détectant les contours qui sont utilisés pour rehausser les caractéristiques linéaires d'une image [3]. Le filtre directionnel de Sobel (**Figure 3D**) en choisissant une fenêtre de 5 x 5 a été sélectionné parce qu'il permet de détecter les linéaments suivant toutes les directions (N-S, NE-SW, E-W et NW-SE) de la zone d'étude.

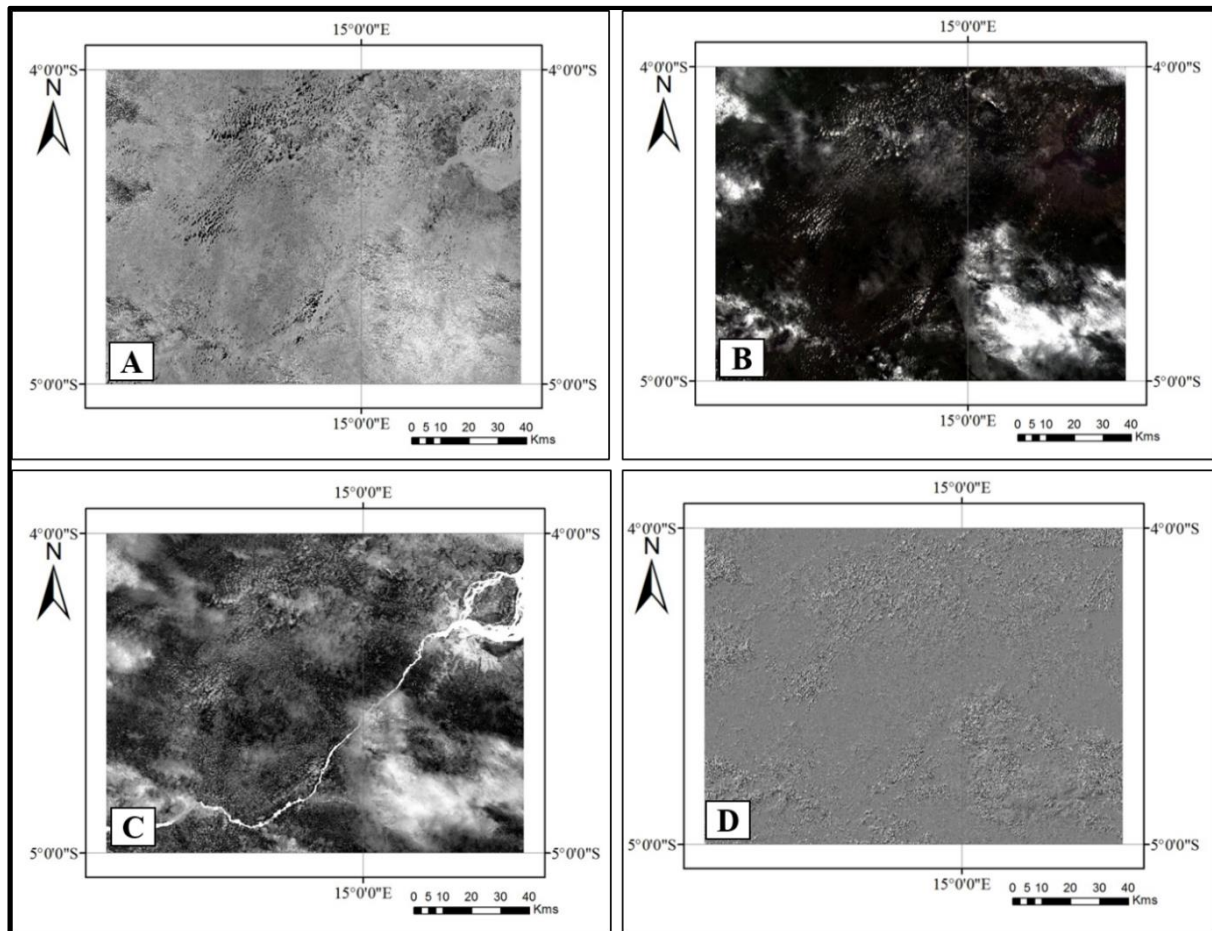


Figure 3 : *Traitements de l'image satellitaire Landsat 8 OLI. (A) : AC1123 ; (B) : Compositions colorées (432) ; (C) : ratio bande 5 / bande 4 ; (D) : Filtre directionnel de Sobel à 45° appliqué sur la bande 8 de l'image Landsat*

3-2. Extraction des linéaments

La méthode d'extraction automatique a été préférée dans cette étude en raison de sa capacité à uniformiser l'analyse des différents types d'images permettant d'optimiser la cartographie des structures linéamentaires [2]. L'extraction automatique s'est faite au moyen du logiciel PCI Geomatica 2013 via l'algorithme « LINE : LINEament Extraction ».

3-2-1. Carte de linéaments préliminaires du groupe de l'Inkisi

A l'issue de la phase de traitement et d'extraction des linéaments, suivi de la suppression de quelques linéaments non géologiques, nous avons obtenu la carte de linéaments majeurs (**Figure 4**). Cette carte a été découpée et circonscrite aux de Kombé et la Brossette, dans le but de mieux visualiser les linéaments des environs où a été effectuée l'étude tectonique et structurale sur le terrain (**Figure 5**).

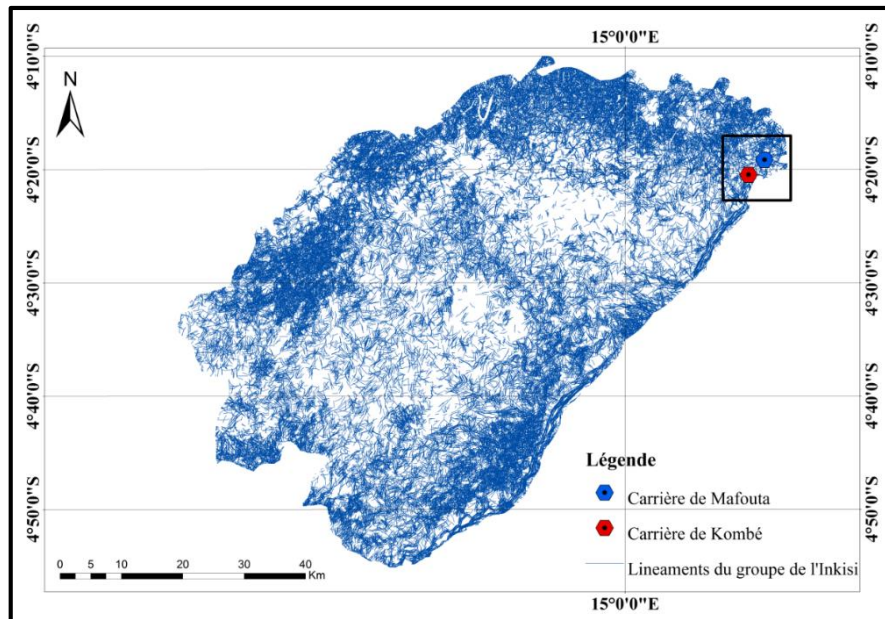


Figure 4 : Carte des linéaments du groupe de l'Inkisi dans la partie sud de Brazzaville et le département du Pool

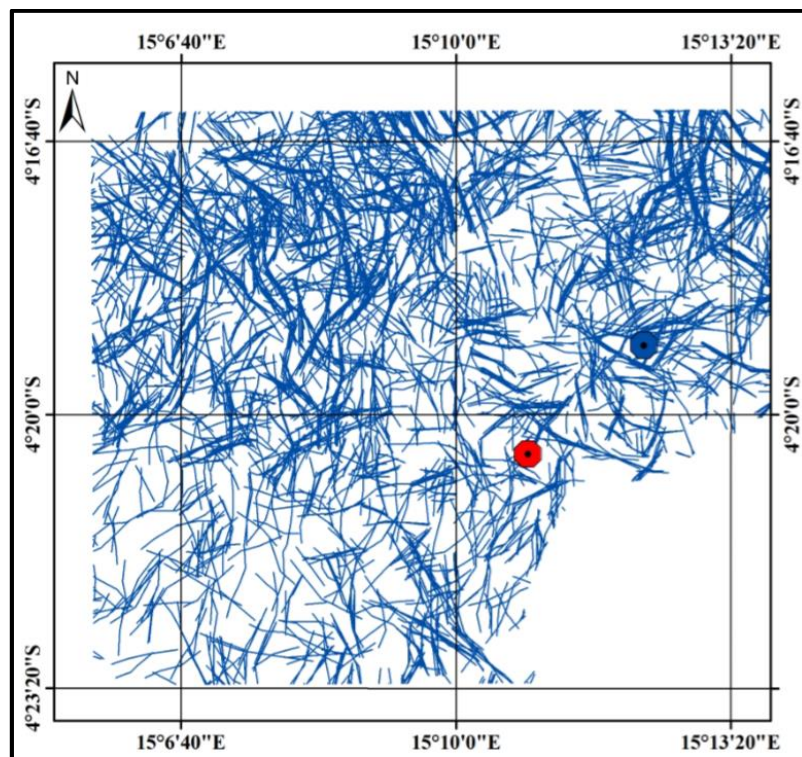


Figure 5 : Carte des linéaments dans le groupe de l'Inkisi dans les environs des carrières de Kombé et la Brossette au sud de Brazzaville

3-2-2. Carte de densité des linéaments

La densité de linéaments est le rapport de la longueur totale des linéaments d'une surface donnée par la superficie de cette dernière. Elle s'exprime en km/km². La carte de densité de fréquence des linéaments (**Figure 6**) a été produite en adoptant un maillage de 500 m x 500 m.

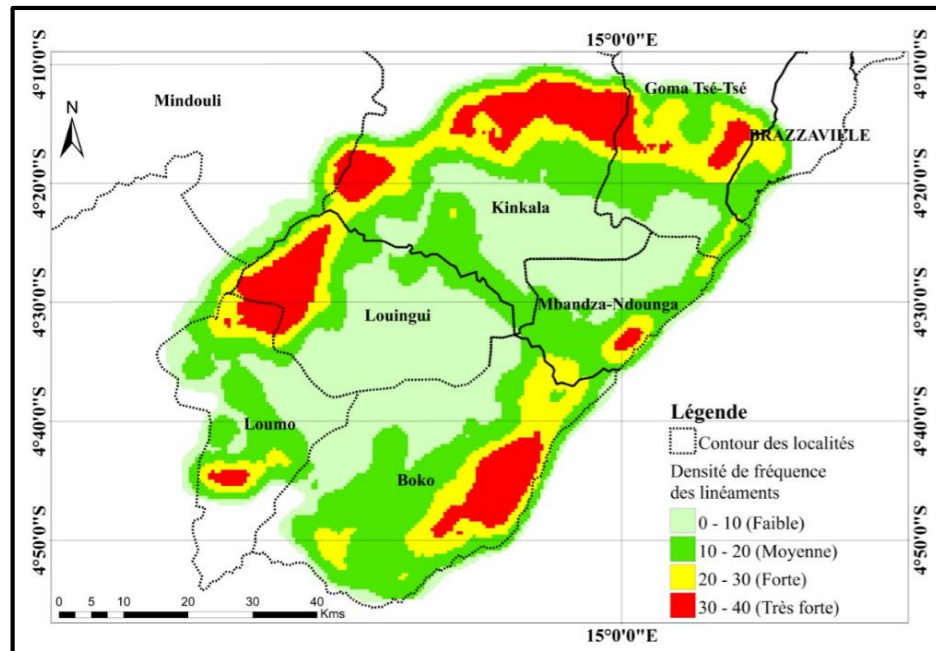


Figure 6 : Carte de densité de fréquence des linéaments du groupe de l'Inkisi dans la partie sud de Brazzaville et le département du Pool

Rangée en quatre classes, la carte de densité de linéaments (**Figure 6**) montre des zones à forte densité linéamentaire (forte à très forte) qui forment des réseaux orientés NW-SE et NE-SW. Le réseau NW-SE forme trois couloirs. Le premier couloir situé au Nord-est de la zone d'étude, part du sud de Brazzaville, passe par Goma Tsé-Tsé et se poursuit au nord de Kinkala. Le deuxième part du sud de Mbandza-Ndounga, longe la limite administrative de Kinkala et Louingui et se poursuit à la frontière Sud-est de Mindouli. Le troisième, qui est peu net, passe par le sud de Boko et le centre de Loumo. Le réseau orienté NE-SW montre deux couloirs. Le premier situé à l'est de la zone d'étude, longe toute la bordure est. Il part du sud de Boko au sud de Brazzaville en passant par Mbandza-Ndounga. Le deuxième couloir longe la bordure ouest. Il part de l'ouest de Louingui, suit la limite administrative entre les localités de Kinkala et Louingui et se poursuit au Nord-est en passant par le Centre-est de Kinkala.

3-2-3. Analyse statistique globale des linéaments

L'analyse statistique directionnelle des linéaments extraits du groupe de l'Inkisi (**Figure 7A**), montre deux directions préférentielles, globalement orientées NW-SE et NE-SW. L'histogramme des fréquences relatives (**Figure 7B**), confirme les mêmes classes linéamentaires. On reconnaît : (i) : la classe de direction dominante orientée NE-SW. Elle présente deux sous classes : la sous classe $N000^{\circ} - N020^{\circ}$ et la sous classe $N040^{\circ} - N060^{\circ}$; (ii) : la deuxième classe de direction dominante est orientée NW-SE. Elle présente également deux sous classes orientées $N140 - N160$ et $N160^{\circ} - N180^{\circ}$.

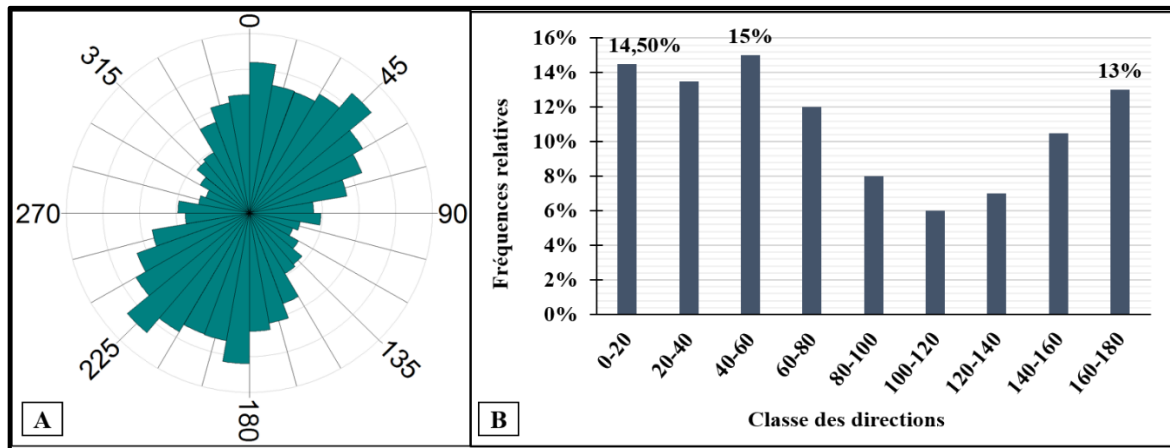


Figure 7 : Analyse statistique directionnelle. (A) : Rose diagramme des linéaments du groupe de l'Inkisi. (B) : Histogramme de fréquence des linéaments du groupe de l'Inkisi. En abscisse : Classe des directions et en ordonnée : fréquence (pourcentage)

3-3. Contrôle et validation des linéaments

Le contrôle et la validation des linéaments préliminaires du groupe de l'Inkisi (**Figure 4**) ont consisté à comparer les directions préférentielles des linéaments extraits de l'image satellitaire, à les confronter aux résultats des études tectoniques et structurales récentes [7, 8], aux résultats de l'étude sur le terrain, au réseau hydrographique et aux directions des failles extraites de ce dernier.

3-3-1. Contrôle à partir des travaux tectonique et structural récents sur la zone d'étude

Les structures tectoniques cassantes présentes dans le groupe de l'Inkisi, s'organisent en deux principales directions de fracturation qui sont : NW-SE (moyenne : $N170^\circ$) et NE-SW (moyenne : $N45^\circ$) [7, 8]. Ces deux directions correspondent à celles des linéaments extraits de l'image Landsat 8 OLI (**Figure 8**).

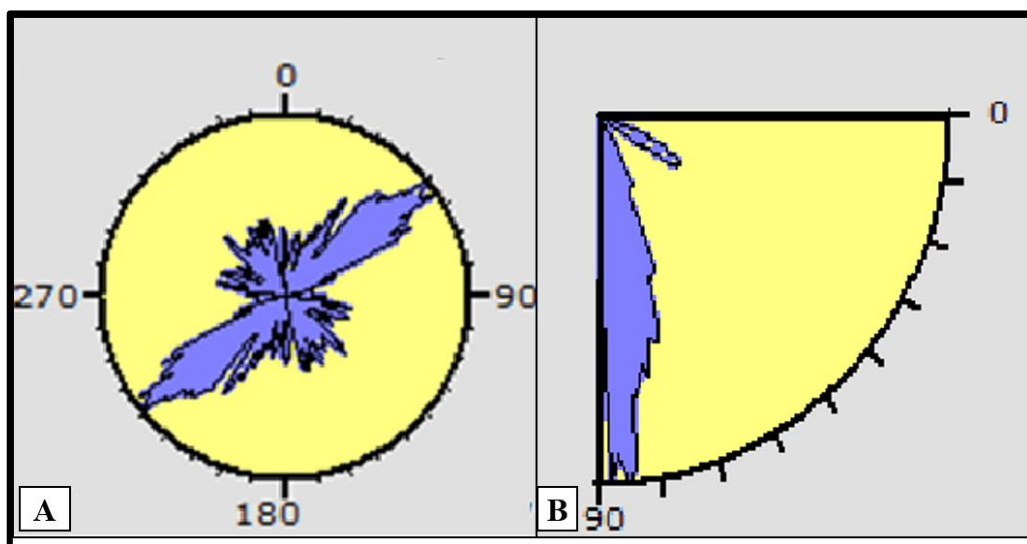


Figure 8 : (A) : Rosace directionnelle des fractures observées dans le groupe de l'Inkisi [7, 8], (B) : Pendages de ces plans de fractures

3-3-2. Contrôle à partir des données de terrain

Le contrôle par les données de terrain constitue le moyen le plus adéquat pour valider les linéaments. Près de 152 plans de fracture ont été mesurés aux carrières de Kombé et la Brossette-Mafouta, situés au sud de Brazzaville. Les roses diagrammes et les stéréogrammes (diagramme stéréographique de Schmidt) obtenus montrent que l'ensemble des structures tectoniques s'organise en deux systèmes de fracturations (**Figure 14C**) ayant des pendages qui varient entre 70° et 95° :

- le premier système est orienté NW-SE. Il comprend une classe prépondérante $N160^\circ - N180^\circ$ (**Figure 13C**). Il est caractérisé par des failles décrochantes senestres (**Figure 9A, B**).

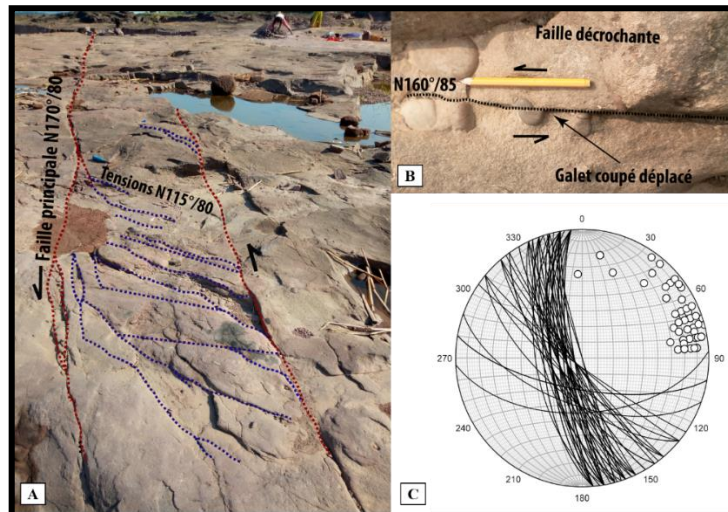


Figure 9 : Failles décrochantes senestres observée dans la carrière de Kombé. (A) : Vue de loin d'une faille senestre avec fractures en extension ; (B) : Galet coupé déplacé ; (C) : Traces cyclographiques et pôles de l'ensemble des plans de failles décrochantes senestres étudiées

- le second système est orienté NE-SW, avec une classe prépondérante $N040^\circ - N060^\circ$ (**Figure 14C**). Il est caractérisé par des failles décrochantes dextres (**Figure 10, A, B**).

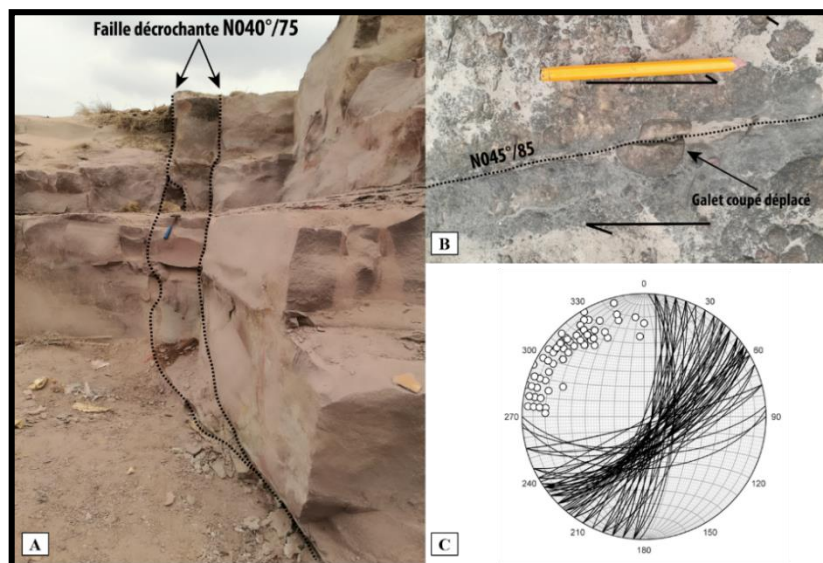


Figure 10 : Failles décrochantes dextres observée dans la carrière de la Brossette : (A) : Vue de loin d'une faille ; (B) : Galet coupé déplacé ; (C) : Traces cyclographiques et pôles des plans de l'ensemble des failles décrochantes dextres étudiées

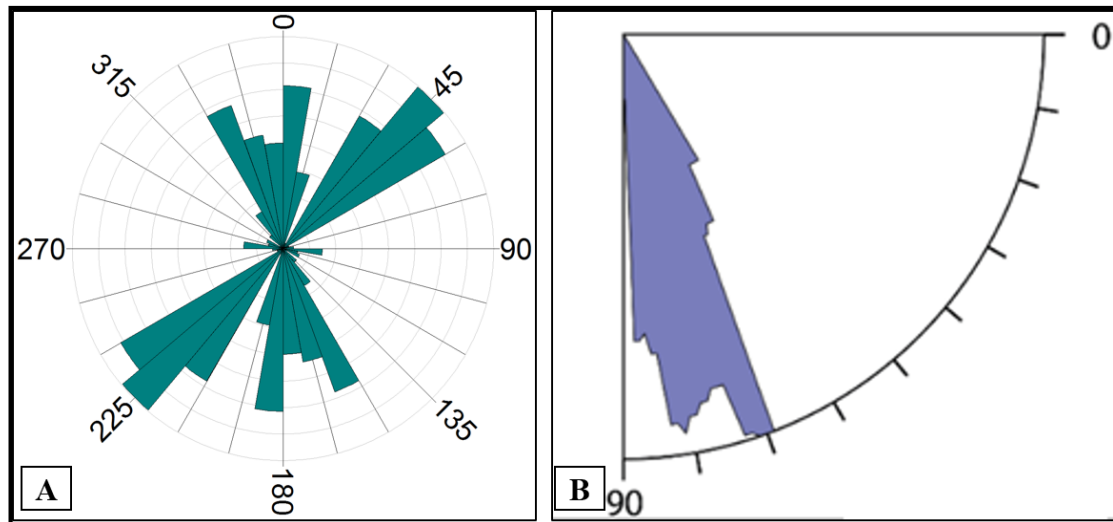


Figure 11 : (A) : *rosace directionnelle des fractures étudiées sur le terrain* ; (B) : *pendages des plans de fractures mesurés sur le terrain*

Ces deux systèmes de failles décrochantes développent des structures en fleurs (**Figure 12A**), des joints plumes (**Figure 12B**), des lentilles, des structures pull-apart, etc. Les travaux de [7] donnent une description plus exhaustive des structures tectoniques observées dans le groupe de l'Inkisi.

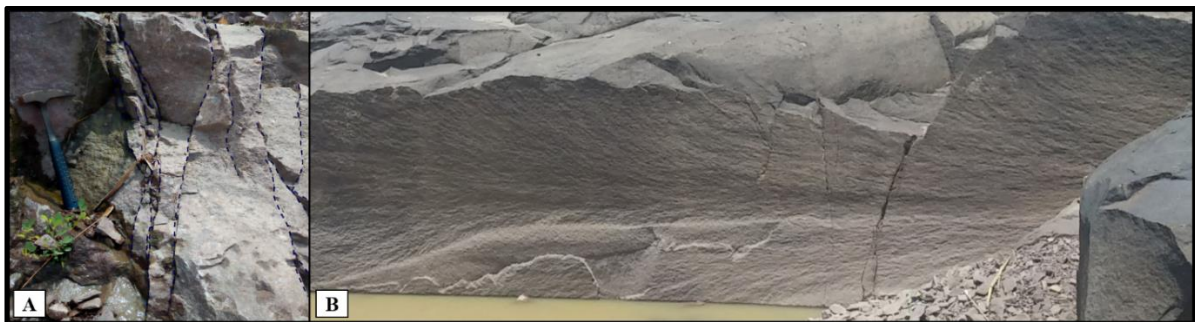


Figure 12 : *Quelques structures tectoniques observées dans le groupe de l'Inkisi dans la carrière de Kombé : (A) : structure en fleur ; (B) : fracture de type joint plume*

3-3-3. Contrôle à partir du réseau hydrographique de la zone d'étude

L'analyse de la géométrie du réseau hydrographique extrait automatiquement des scènes (014, 015) de l'ASTER DEM (**Figure 13**) montre une distribution spatiale des cours d'eau qui se fait suivant deux principales directions : (i) : la direction NE-SW principalement suivie par le fleuve Congo et (ii) la direction NW-SE suivie par ses affluents : la Loufoulakari, Matari et le Djoué (**Figure 13**). En se basant sur la classification de [28], le réseau hydrographique de la zone d'étude est de type rectangulaire, reconnaissable par les cours d'eau secondaires qui font des virages serrés et entrent dans le cours d'eau principal avec des angles élevés [29]. Suivant ce principe, quelques fractures ont été extraites manuellement dudit réseau à l'échelle de 1 : 50 000. Il ressort que, les affluents susmentionnés entrent dans le fleuve Congo avec des angles élevés (environ 90°). Les cours d'eau de ces affluents correspondent donc à des zones de fractures. La **Figure 13** montre aussi que les tracés de certaines fractures décalées à certains endroits, se traduisant ainsi par des changements brutaux de direction d'écoulement. Les fractures découlant de l'interprétation du réseau hydrographique ont été extraites à la même échelle en considérant les drains d'ordre supérieur (5 à 7). Le choix de ces ordres de drainage se justifie par le fait qu'ils sont idéaux pour la mise en évidence du schéma structural régional [30].

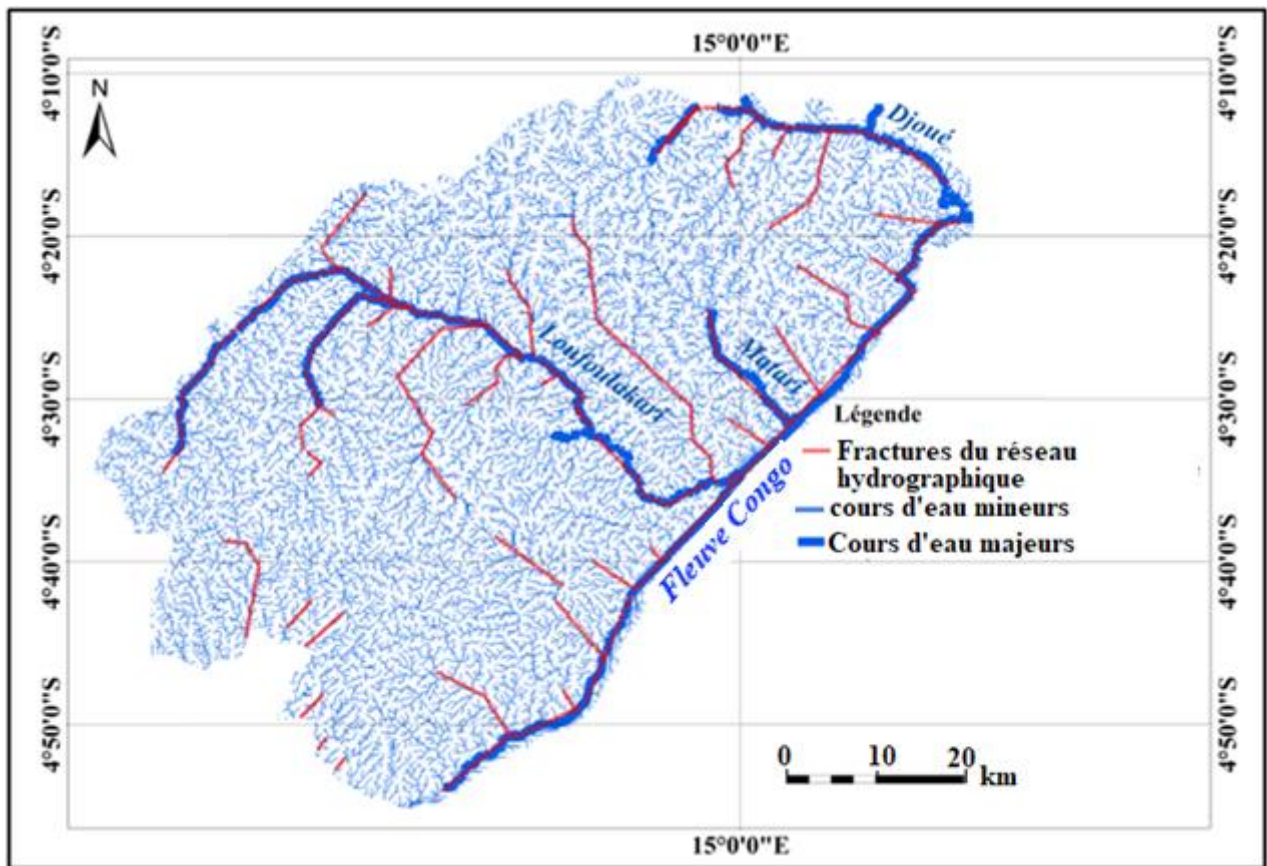


Figure 13 : Carte du réseau hydrographique du Groupe de l'Inkisi (traits bleus) et failles extraites manuellement de ce réseau (traits rouges)

La rosace directionnelle des fractures extraites du réseau hydrographique (**Figure 14D**) montre qu'elles s'organisent également en deux directions de fracturation : NW-SE et NE-SW.

3-3-4. Validation des linéaments

Les rosaces directionnelles des linéaments du groupe de l'Inkisi (**Figure 14A**), montre une nette similarité avec les rosaces des différents modèles de contrôle (**Figure 14, B, C et D**). Les familles directionnelles similaires sont NW-SE et NE-SW. Les histogrammes des fréquences relatives des linéaments du groupe de l'Inkisi (**Figure 15A**) et des différents modèles de contrôle (**Figure 15, B, C, D**) montrent également les mêmes classes de directions dominantes. Au regard de ce qui précède, les linéaments extraits de l'image satellitaire Landsat 8 OLI correspondent bel et bien à des fractures tectoniques. Ainsi contrôlée et validée, la carte des linéaments préliminaires (**Figure 4**) constitue la carte finale des fractures affectant le groupe de l'Inkisi.

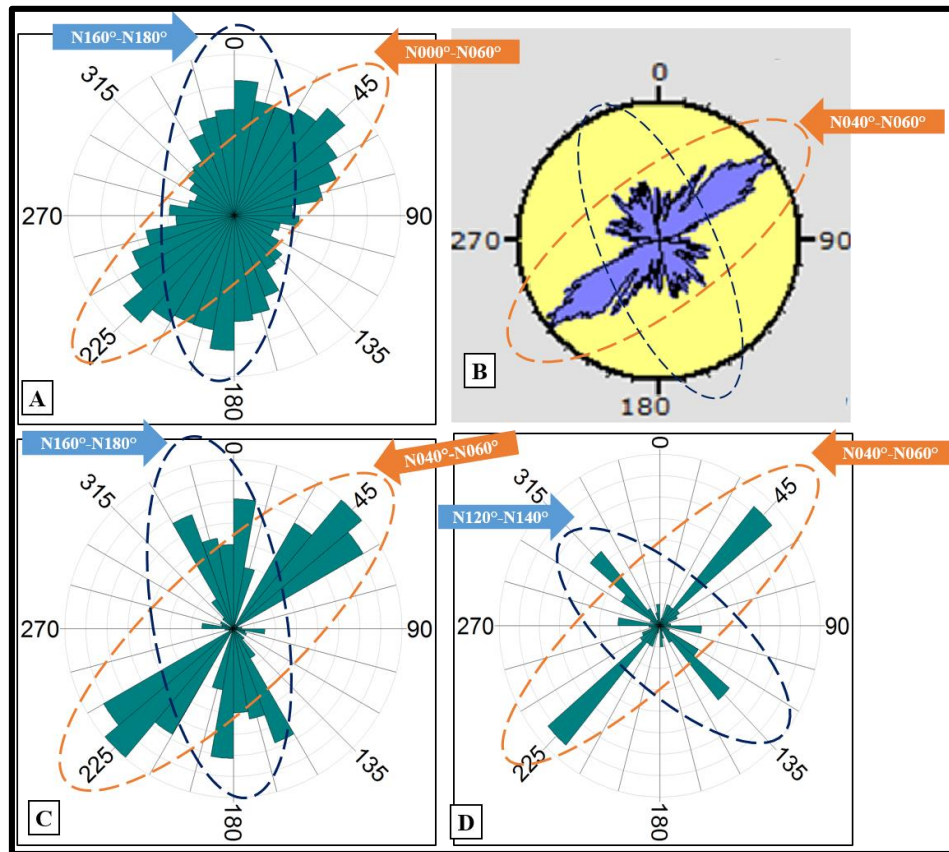


Figure 14 : Comparaison des rosaces directionnelles des : (A) : linéaments du groupe de l'Inkisi ; (B) : Orientations préférentielles de fracturation [5, 6] ; (C) : données de terrain ; (D) : fractures extraites du réseau hydrographique

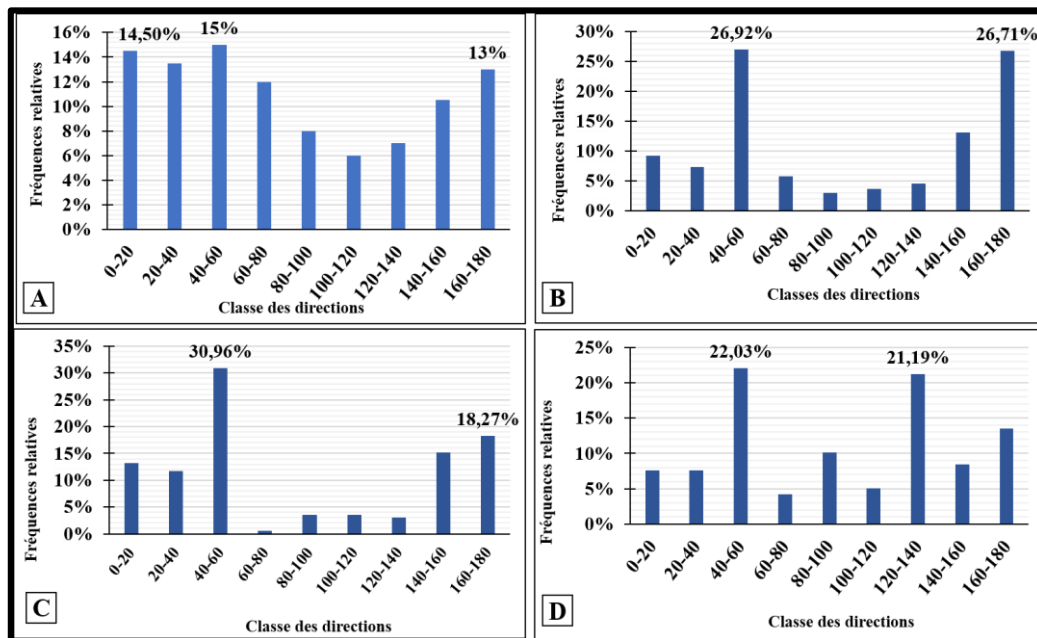


Figure 15 : Comparaison des histogrammes de fréquences (A) : linéaments du groupe de l'Inkisi ; (B) : classes de direction des fractures [5] ; (C) : fractures étudiées sur le terrain ; (D) : failles extraites du réseau hydrographique

4. Discussion

Le traitement de l'image satellitaire Landsat 8 OLI a détecté des linéaments dans le groupe de l'Inkisi. Selon [6, 31], les linéaments sont l'expression des failles, joints ou tout autre plan de faiblesse dans la roche. L'abondance des linéaments dans le groupe de l'Inkisi, suggère qu'il est affecté par une tectonique ayant conduit sa fracturation. Ce résultat est conforme aux travaux de [7, 8, 32] et à nos observations sur le terrain qui confirment la fracturation du groupe de l'Inkisi. L'analyse directionnelle des linéaments (**Figure 7**) met en évidence deux directions principales : la direction NW-SE avec une prédominance des classes $N160^{\circ}$ - $N180^{\circ}$ et la direction NE-SW avec une prédominance des classes $N000^{\circ}$ - $N020^{\circ}$ et $N040^{\circ}$ - $N060^{\circ}$. La similarité entre les rosaces directionnelles des linéaments avec les rosaces directionnelles des données des études antérieures sur le terrain, des données de notre étude sur le terrain et la rosace des fractures extraites du réseau hydrographique et le fait que les cours d'eau suivent ces linéaments en définissant un réseau hydrographique en rectangle, confirment bel et bien que ces linéaments correspondent à des fractures tectoniques comme le suggère [28 - 30]. Les zones à forte densité linéamentaire suivies par les grands cours correspondent d'après [33] à des grands couloirs de fracturations. Ainsi, les zones à forte densité linéamentaire (**Figure 6**) formant des réseaux et des couloirs orientées NW-SE et NE-SW correspondent à des grands couloirs de fracturations. Les grands cours d'eau qui les suivent confirment cela. Ces cours d'eau ont utilisé ces fractures pour creuser leurs chenaux. Il apparaît donc que le fleuve Congo et ses grands affluents (le Djoué, la Loufoulakari et la Matari) suivent des zones ou des couloirs de fractures majeures. La fracturation de la zone d'étude s'organise ainsi en grands couloirs de fracturations NW-SE (senestres) et NE-SW (dextres) qui définissent des grands polygones à faible voire moyenne densité de fracturation. D'après [33], une forte densité de fracturation d'une roche, indique un potentiel hydrogéologique important, car dans le sous-sol, les cassures constituent les couloirs naturels, privilèges de circulation des fluides. Ceci confère au groupe de l'Inkisi, qui présente de zones à forte et moyenne densité de fracturations, de bonnes potentialités aquifères pour l'alimentation en eau souterraine de certaines localités de la zone d'étude. Seulement, les fractures ou les zones à densité de fractures élevée NW-SE et NE-SW devraient être ciblées en priorité pour l'implantation des forages d'eau à bon débit d'exploitation. Ces fractures décrochantes développant des structures en fleurs, des duplex, des grandes lentilles, des structures pull-apart, etc. donnent aux grès de l'Inkisi des bonnes potentialités réservoirs.

5. Conclusion

Le présent travail qui a pour but de cartographier par traitement de l'image satellitaire Landsat 8 OLI, les linéaments du groupe de l'Inkisi montre que le traitement de l'image Landsat 8 OLI permet une bonne extraction des linéaments de cette formation rocheuse. Ces linéaments s'organisent en deux systèmes de directions principales : NW-SE et NE-SW et correspondent à des fractures. Ces fractures ont les mêmes directions que celles mises en évidence par les travaux antérieurs et confirmées par notre étude sur le terrain. Ces linéaments s'organisent en réseaux ou couloirs qui correspondent à des zones de forte densité de fracturations qui sont suivies par le fleuve Congo et ses affluents (Djoué, Loufoulakari, Matari). Ces réseaux et couloirs définissent des polygones à faible voire moyenne densité de fracturation. Cette fracturation donne aux grès de l'Inkisi des bonnes potentialités aquifères et réservoir. L'implantation des forages d'eau à bon débit d'exploitation ainsi que la recherche des minéralisations devraient cibler en priorité les fractures et les zones à forte densité de fractures NW-SE et NE-SW.

Remerciements

Nous remercions cordialement le reviewer anonyme pour la pertinence de ses observations qui ont considérablement amélioré la qualité de ce manuscrit.

Références

- [1] - N. HAMMAD, "Cartographie géologique et analyse linéamentaire de la région d'El Kseibat (Sahara du sud-ouest) à partir des images spatiales. Incidence sur l'exploration minière". Thèse de doctorat, Université KASDI MERBAH - OUARGLA, (2016) 228 p.
- [2] - G. C. ADON, S. OULARE, K. A. KOUAME, M. B. SALEY et K. F. KOUAME, "Extraction automatique des linéaments à l'aide d'images satellitaires optique et radar en milieu de socle précambrien (Haute Marahoué, Côte d'Ivoire)". *Int. J. Eng. Sci. Invent. IJESI*, 8 (01) (2019) 24 - 32
- [3] - C. MILLOGO, S. NAKOLENDOUSSE et S. SAWADOGO, "Cartographie des accidents géologiques par imagerie satellitaire et géophysique aéroportée, et analyse statistique des réseaux de fractures du socle birimien du bassin versant du lac Bam (centre Nord du Burkina)". *J. Sci.*, 18 (02) (2018) 33 - 43
- [4] - I. A.-A. MUHAMMAD, "Lineament Extraction Using Remote Sensing Data mid Iraq". *J. Univ. Babylon.*, 25 (02) (2017) 597 - 582
- [5] - J. M. AKAME, J. MVONDO ONDOA, J. B. OLINGA, J. ESSONO et P. MBIH KEMENG, "Utilisation des modèles numériques de terrain (MNT) SRTM pour la cartographie des linéaments structuraux : Application à l'Archéen de Mezesse à l'est de Sangmélina (Sud-Cameroun)". *Geo-Eco-Trop.*, 01 (37) (2013) 71 - 80
- [6] - K. EL-SAWY, M. I. ATEF, A. MOHAMED and A. WALEED, "Automated, manual lineaments extraction and geospatial analysis for Cairo-Suez district (Northeastern Cairo-Egypt), using remote sensing and GIS". *Int J Innov. Sci Eng Technol.*, 3 (05) (2016) 491 - 500
- [7] - H. NKODIA, "Style structural et tectonique de la Formation de l'Inkisi, à Brazzaville, République du Congo". Mémoire de Master, Université MARIEN NGOUABI, (2017) 93 p.
- [8] - T. MIYOUNA, H. M. D. NKODIA, O. F. ESSOULI, M. DABO, F. BOUDZOU MOU and D. DELVAUX, "Strike-slip deformation in the Inkisi Formation, Brazzaville, Republic of Congo". *Cogent Geosci.*, 4 (2018) 1542762
- [9] - P. BRUNNER, H.-J. HENDRICKS FRANSSEN, L. KGOTLHANG, P. BAUER-GOTTWEIN and W. KINZELBACH, "How can remote sensing contribute in groundwater modeling?", *Hydrogeology Journal*, 15 (1) (2007) 5 - 18
- [10] - C. DARCEL, "Corrélation dans les réseaux de fractures : caractérisation et conséquences sur les propriétés hydrauliques". Thèse de Doctorat, Université Rennes 1, (2002) 223 p.
- [11] - J.-R. DE DREUZY, "Analyse des propriétés hydrauliques des réseaux de fractures. Discussion des modèles d'écoulement compatibles avec les principales propriétés géométriques". Thèse de Doctorat, Université Rennes 1, (2000) 217 p.
- [12] - K. F. KOUAME, T. LASM, J. R. DE DREUZY, A.G. AKAFFOU, O. BOUR et P. DAVY, "Contribution d'un modèle hydrogéologique à fractures discrètes à étude des aquifères fracturés du socle Archéen de Toubia (Nord-Ouest, Côte d'Ivoire)". *Revue des sciences de l'eau / Journal of Water Science*, 23 (1) (2010) 41 - 56. <https://doi.org/10.7202/038924ar>
- [13] - H. YESOU, J. C. PION, Y. BESNUS, et R. SAINT JEAN, "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 Télédétection UREF, Toulouse, France, 13-16 November 1990, pp. 143-164. In : J.M. Dubois, F. Blasco dir), Outil microinformatique et Télédétection de l'évolution des milieux, PUQ/AUPELF UREF. Ed., 492 p.J.
- [14] - D. SOUNGA, P. AFFATON, Y. NOACK and F. MIALOUNDAMA, "Albitization in the Inkisi sandstones, Republic of Congo : Characterization and interpretation". *Global journal geological Sciences*, 10 (2) (2012) 175 - 186
- [15] - F. BOUDZOU MOU, La chaîne Ouest-Congolienne et son avant-pays au Congo : relations avec le Mayombien ; sédimentation des séquences d'âge Protérozoïque supérieur. Thèse de doctorat, Université Aix-Marseille, (1986) 220 p.

- [16] - L. TACK, D. DELVAUX, E. KADIMA, F. DELPOMDOR, A. TAHON, P. DUMONT and S. DEWAELE, "The 1.000 m thick Redbeds sequence of the Congo River Basin (CRB): A generally overlooked testimony in Central Africa of post-Gondwana amalgamation (550 Ma) and pre Karoo break-up (320 Ma)". Presented at "22nd Colloquium of African Geology, Hammamet, Tunisia", Abstract book, (2008) 86 - 88
- [17] - M. OESTERLEN, "Karoo system und präkambrishe unterlage im nördlichen Angola-II. Diagenese un Sedimentologie des Karoo Systems". *Geologisches Jahrbuch, Reihe B.*, 36 (1979) 3 - 41
- [18] - G. B. STRAATHOF, "Neoproterozoic low latitude glaciations: An African perspective". PhD thesis, University of Edinburgh, (2011) 263 p.
- [19] - H. E. FRIMMEL, L. TACK, M. S. BASEI, A. P. NUTMAN and A. BOVEN, "Provenance and chemostratigraphy of the Neoproterozoic West congoian Group in the Democratic Republic of Congo". *Journal of African Earth Sciences*, 46 (2006) 221 - 239
- [20] - P. AFFATON, F. KALSBECK, F. BOUDZOUYOU, R. TROMPETTE, K. THRANE and R. FREI, "The Pan-African West Congo belt in the Republic of Congo (Congo Brazzaville): Stratigraphy of the Mayombe and West Congo". *Precambrian Research*, 272 (2016) 185 - 202
- [21] - J. LEPERSONNE, "Carte géologique à l'échelle 1/200000. Notice explicative de la feuille Ngungu (Degré carré S6/14= SB 33.9)". *Mines Dir. Serv. Géologique, République Démocratique du Congo*, (1973) 61 p.
- [22] - G. SCOLARI and H. VAN DAALHOFF, "Le Précambrien de la chaîne congolaise du Mayombe ; état des connaissances géologiques, le problème des orogénèses". *Bull. Bur. Rech. Géologiques Minières*, (3) (1965) 163 - 181
- [23] - L. TACK, M. WINGATE, J.-P. LIÉGEOIS, M. FERNANDEZ-ALONSO and A. DEBLOND, "Early Neoproterozoic magmatism (1000-910 MA) of the Zadinian and Mayumbian Groups (Bas-Congo): onset of Rodinian rifting at western edge of the Congo craton". *Precambrian Research*, 110 (2001) 277 - 306
- [24] - F. DELPOMDOR, F. KANT, L. TACK and A. PRÉAT, "Cyclicity and sequence stratigraphy of the Neoproterozoic uppermost Haut Shiloango-Lukala carbonate ramp system in the Lower Congo region (Democratic Republic of the Congo): Example of tectonostratigraphic control versus climatic changes". *J. Afr. Earth Sci.*, 160 (2019) 1 - 19
- [25] - I. COULIBALY, "Interprétation structurale des linéaments par traitement d'image satellitaire : Cas des sous provinces d'Abitibi et d'Opatika (Quebec)". Mémoire de Maitrise des sciences en télédétection, University Sherbrooks, (1996) 106 p.
- [26] - J. BIEMI, "Contribution à l'étude géologique, hydrogéologique et par télédétection des bassins versants subsahariens 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, Université Nationale d'Abidjan, (1992) 493 p.
- [27] - M. N. YANG'TSHI, K. K. NZAMBE, E. L. LOKILO, M. B. NGUNGU, R. J. MATAMBA, C. M. KUNAMBU, M. L. LUEMBA, G. L. KALONJI, H. MUDUMBI et K.-N. NGBOLUA, "Contribution of Landsat 8 imagery in the detection and mapping of lineaments in the surroundings of Madimba, in West Congolian (Central Kongo, Democratic Republic of Congo)". *International Journal of Innovation and Scientific Research*, 38 (1) (2018) 192 - 202
- [28] - A. D. HOWARD, "Drainage analysis in geologic interpretation: A Summation". *Bulletin of the American Association of Petroleum Geologists*, 51 (1967) 2246 - 3428
- [29] - L. ZHANG, E. GUILBERT, "A study of variables characterizing drainage patterns in river networks". Presented at the XXII ISPRS Congress, *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Melbourne, Australia*, (2012) 29 - 34
- [30] - B. DEFFONTAINES, J. C. LEE, J. ANGELIER, J. CARVALHO et M. RUDANT, "New geomorphic data on the active Taiwan orogen : a multisource approach". *Geo. Research*, 99 (1994) 20243 - 20266

- [31] - T. YAO, O. FOUCHE-GROBLA, M.-S. OGA et V. ASSOMA, "Extraction de linéaments structuraux à partir d'images satellitaires, et estimation des biais induits, en milieu de socle précambrien métamorphisé". *Teledetection, Editions des Archives Contemporaines / Editions scientifiques GB / Gordon and Breach Scientific Publishers*, 10 (4) (2012) 161 - 178
- [32] - D. DELVAUX, G. GANZA, E. KONGOTA, G. FUKIABUNTU, D. MBOKOLA, F. BOUDZOUYOU, H. NKODIA, "The "fault of the Pool" along the Congo River between Kinshasa and Brazzaville is no more a myth: Paleostress from small-scale brittle structures. *Geophysical Research Abstracts*, 19 (1) (2017) 15 - 43
- [33] - N. NOUAYTI, D. KHATTACG et M. HILALI, "Cartographie des zones potentielles pour le stockage des eaux souterraines dans le haut bassin du Ziz (Maroc) : Apport de la télédétection et du système d'information géographique". *Bull. L'Institut Sci. Rabat.*, 39 (2017) 45 - 57
- [34] - Y.-S. KIM, P. PEACOCK, D. C. and J. SANDERSON, "Fault damage zones". *Journal of structural geology*. 26 (2004) 503 - 517