



UTILISATION DE LA TELEDETECTION DANS LA CARTOGRAPHIE AUTOMATIQUE DES LINEAMENTS GEOLOGIQUES : Cas du granite hyperalkalin de Noqui dans sa partie congolaise

« USE OF REMOTE SENSING IN AUTOMATIC MAPPING OF GEOLOGICAL LINEAMENTS : Case of the Noqui hyperalkaline granite in its congolese part »

**Katshunga Akazia Prisca¹ ; Malolo Stanley Hervé⁵ ; Atama Atafo Emmanuel⁵ ; Kanika Mayena Thomas⁵
; Nzambe Keyila Kelly^{2,4} ; Kra Sulukia Jojo³ ; Musianga Siyum Steeve¹ ; Kra Ange¹**

¹Centre National de Télédétection, Ministère de la Recherche Scientifique et Innovation Technologique, Kinshasa, République Démocratique du Congo.

²Université de Kinshasa, Faculté de Pétrole et Gaz, Département d'Explo- production pétrolière, République Démocratique du Congo

³Centre des Recherches Géologiques et minières, Ministère de la Recherche Scientifique et Innovation Technologique, Kinshasa, République Démocratique du Congo.

⁴Centre des Recherches en Géophysique, Kinshasa, République Démocratique du Congo.

⁵Université de Kinshasa, Faculté des Sciences, Département de Géosciences, République Démocratique du Congo

Abstract

This work highlighted the possibilities for hydrogeological and mining exploration, particularly in the tin deposits of the Matadi region, especially in areas affected by intense fracturing shearing, and coarse grain size. Groundwater could also be stored in the Noqui granite for the benefit of the population Matadi.

Keywords : hydrogeological ; mining ; granit ; remote sensing ; ...

Resume

Ce travail a ressorti les possibilités de prospection hydrogéologique et minière, notamment dans la filière stannifère de la région de Matadi, particulièrement dans les parties affectées par une intense frustration, un cisaillement et à granulométrie grossière. De même que les eaux souterraines pourraient s'emmagasiner dans le granite de Noqui pour le bien-être de la population de Matadi.

Cet article met en évidence de manière pertinente les potentialités hydrogéologiques et minières de la région de Matadi, en République démocratique du Congo. • L'analyse des zones affectées par des phénomènes tectoniques (fracturation, cisaillement) et leur lien avec la prospection stannifère est scientifiquement cohérente. • Le travail apporte également un éclairage intéressant sur le potentiel aquifère du granite de Noqui, avec des implications concrètes pour l'approvisionnement en eau et le bien-être des populations locales.

Mots clés : hydrogéologique ; Granite ; Minière, télédétection; ...

Digital Object Identifier (DOI) : <https://doi.org/10.5281/zenodo.19351358>

1 INTRODUCTION

Au cours de son évolution géologique, la région de Matadi a connu une succession d'événements, notamment structuraux, qui justifient les diverses orientations des fractures signalées à différents endroits sur terrain. Notre étude s'intéresse au granite hyperalcalin de Noqui situé au Sud de Matadi et qui a dans le passé, fait objet de plusieurs études d'ordre cartographique, pétrographique, structural, géochimique et géochronologique. Cette étude a pour particularité, l'analyse des linéaments ayant affecté cette intrusion et qui constitue une approche puissante dans la cartographie géologique et dans la prospection minière et hydrologique.

PROBLEMATIQUE

L'étude des fractures en surface sur plusieurs mètres de distance, peut-elle aider à comprendre certains phénomènes géologiques de profondeur ?

Les méthodes de cartographie traditionnelle par photographie aérienne ne facilitent pas une étude précise des structures géologiques sur de grandes superficies. Les méthodes géophysiques qui donnent une idée précise sur les fractures, sont souvent coûteuses et non accessibles au commun des mortels. La Télédétection ne serait-elle pas une alternative à ce problème ?

La cartographie linéamentaire par télédétection, pourrait-elle donc être une véritable source d'informations sur évolution structural de la région, particulièrement pour des zones jugées inaccessibles par défaut d'infrastructures routières ? Pourrait-elle aussi constituer un véritable outil de première validation du potentiel structural d'une zone donnée avant d'engager des coûts exorbitants pour la géophysique ?

HYPOTHESES

Deux hypothèses principales sont sous-jacentes à ce travail, à savoir : (1) Le comportement spatial des fractures (orientations, densités, longueurs) à partir d'une image satellitaire informe sur leur signification géologique, structurale et incidence sur la prospection minérale et hydrogéologique et ; (2) Les techniques de la télédétection améliorent la localisation des structures géologiques et permettent la cartographie des linéaments de façon raffinée et précise.

OBJECTIF DU TRAVAIL

L'objectif principal de ce travail est de produire une carte linéamentaire de référence de la région sud de Matadi sur le granite hyperalcalin de Noqui, à partir de l'image Landsat 8. Et dont les objectifs spécifiques consistent à : (i) Valider les fractures majeures connues dans la région, (ii) Développer une méthodologie rationnelle de confrontation de données structurales à partir de l'imagerie satellitaire, (iii) Valider une méthode d'extraction des linéaments dans les zones inaccessibles ou très lointaines et, (iv) Ressortir les possibilités de prospection minière et hydrogéologique dans la région sud de Matadi.

MATERIELS ET METHODES

Hormis les logiciels de SIG, ceux de traitement d'images et autres qui seront élucidés dans le troisième point de ce travail, les outils nous ayant permis de mener à bien notre lever sur terrain ont été notamment : Une boussole de géologue avec clinomètre ; Un GPS de marque Garmin ; Un double décimètre ; Un Appareil photo de marque Nikon ; Un marteau de géologue et une masse de 5 kg ; Un carnet de terrain ; Un feutre, des stylos ; Un fond topo ; et D'autres accessoires.

Tout a commencé par la documentation qui a ainsi concerné, les mémoires et écrits antérieurs sur la zone d'étude et la télédétection en générale, l'acquisition des images satellitaires, etc. Pour améliorer la visibilité des linéaments, nous avons opté pour l'approche méthodologique suivante : le prétraitement de l'image ; le traitement proprement dit ; l'extraction des linéaments et ; la validation des linéaments suivants plusieurs critères.

Pour mener à bien cette étude, nous avons eu besoin de l'image Landsat 8 OLI acquise au mois de Mars de l'an 2015, période caractérisée par la quasi-absence des nuages (Fig. 5). L'image utilisée dans ce travail a été prise à l'Observatoire Satellital des Forêts d'Afrique Centrale (OSFAC), une structure détenant une grande

banque des données d'images de toute l'Afrique centrale. Les principales caractéristiques des images Landsat 8 OLI sont élucidées dans le tableau 2.

Hormis l'image satellitaire, nous nous sommes servis de l'image SRTM pour l'élaboration du modèle hydrologique de la région, de données géo scientifiques, des données de terrain et de plusieurs logiciels de traitement d'image mais aussi de cartographie notamment :

ArcGIS 10.5 : Le programme ArcGIS nous a été très utile surtout dans la conception de la quasi-totalité des cartes reprises dans ce travail, notamment pour leur superposition lorsque cela s'avère indispensable et pour certains traitements d'images satellitaires.

ENVI 4.6.1 et 5.3 : (The Environment For Visualizing Images, élaboré par la société « ITTVIS »). Ce programme nous a servi à faire de compositions colorées, rapport de bandes et également à réaliser le Principal Component Analysis (PCI, en français Analyse en Composante Principale).

PCI-Geomatica : C'est le PCI-Geomatica dans sa version de 2016 qui a été utilisé pour ce travail. Nous l'avons utilisé pour ses puissants algorithmes, notamment celui d'extraction automatique des linéaments (LINE). Toutes les images rehaussées sont transférées dans ce programme pour l'extraction des linéaments.

Rockworks16 : outils de gestion, analyse et modélisation de données essentiellement géologiques, notamment les données de puits. Il peut aussi ressortir la rosace de données linéaires comme les linéaments géologiques.

Stereonet version 9.5.3 : c'est un outil de traitement des données structurales, ces données peuvent être planaires, linéaires, etc. Pour ce travail, il s'agissait de ressortir la rosace de nos mesures prises sur les filons.

Google Eath Pro : à la différence des images satellitaires multispectrales, cet outil permet de visualiser le globe. Dans ce travail, l'outil a plus servi dans l'étape de la validation de nos linéaments.

2 Contexte géographique et géologique du granite

Un des principaux faciès pétrographiques de la ville de MATADI dans la province du Kongo Central, le granite hyperalcalin de Noqui est situé à cheval entre la République Démocratique du Congo et la République d'Angola, plus précisément entre les méridiens 13°25'50" et 13°29'15" Est et les parallèles 5°47'15" et 5°51'50" Sud. Il affleure donc de part et d'autre de la frontière, un peu au Sud de la ville portuaire de Matadi. Sur le plan Géologique, le granite ultra-alcalin de Noqui est calé à 999 ± 7 Ma (Tack et al., 2001) et a d'une façon générale une granulométrie croissante de la bordure au centre mais aussi en zones surélevées (Fig. 1). Hypothèse confirmée par les travaux effectués par Makoka (2015) et de Makoka et al. (2016b). La figure 2 montre cette granulométrie variable, en passant du faciès microgrenu, vers la bordure au contact avec les roches encaissantes, au faciès à grain moyen et grossier (pouvant atteindre 1 cm) vers le centre du massif et en zones surélevées, reflétant le caractère intrusif de ce massif ; lequel est en outre attesté par le redressement des roches métasédimentaires à son contact (Makoka et al., 2016b). **Il est généralement de couleur grise et présente macroscopiquement un aspect chaotique (Fig. 3).**

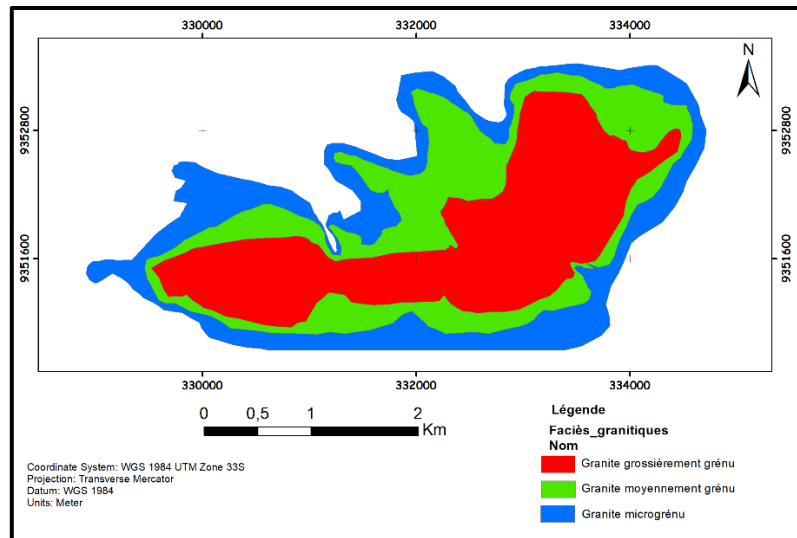


Figure 1 : Les faciès granitiques



Figure 2 : Différents faciès du granite de Noqui. A : granulométrie fine (AM078) ; B : granulométrie moyenne (AM097) et C : granulométrie grossière (AM051).



Figure 3 : Aspect chaotique du granite

Le granite ultra-alcalin de Noqui est traversé par plusieurs mégacassures (Tab. 1) décrites par Makoka et al. (2016a).

Tableau 1 : Mégacassures déduites de l'image radar du bassin du fleuve Congo aux environs de Matadi (Makoka et al., 2016a)

Mégacassures de (du)	Orientation de miroirs de faille	Orientation des stries	Sens du déplacement des compartiments et regard du miroir de la faille
Noqui	N0°E	-	Regard W
Ravin Leopold	N0°E	-	Regard W
Mbengu-Mbengu	N115°	-	Regard NNE
Soyo	N75°E	N126°/39°NW	Regard NNW
La M'pozo	N20°E	N105°/90°	Regard WNW
La centrale M'pozo	N85°E		
Barrage de M'pozo	N50°E		
Loango	N135°		Regard SW

Ce granite est de type-A (Eeckout, 2014). En se référant à la classification des granites proposée et décrite par Walter (2011), ce type de granite est le produit de fusion-extraction répétée des mêmes roches-sources. Les granites issus de ce type de fusion sont généralement anorogéniques, hyperalcalins, alumineux et anhydres et du contexte distensif (rifts continentaux).

Walter distingue deux types de gisements susceptibles d'être retrouvés dans ce genre des granites :

- Les granites riches en sodium contenant du Nb, de l'U, Th, des éléments rares et parfois de l'Etain et ;
- Les granites riches en potassium avec la silicification hydrothermale, la tourmalinisation et l'acidité qui produisent des gisements d'étain, de tungstène, de plomb, zinc et de fluor. Cette seconde association peut se produire dans le corps granitique (greisen endogranitique, pegmatite et les minerais de stockworks porphyriques) ou alors dans les champs des veines au sein des roches intrudées (gisement exogranitique).

2.1 Généralités sur la télédétection

Histoire, origine et définition

D'après Gupta (2018), tout a commencé avec les techniques de photographie aérienne et la photo-interprétation. Un élément marqueur fut la décision des USA et URSS de faire atterrir l'Homme sur la lune. The European Space Agency (ESA) avec les agences spatiales nationales de pays comme le Japon, Canada, Inde, Brésil et Corée du Sud ont stimulé le développement de cette technique. Et notons que la transmission de la première photo de l'espace a été effectuée en 1959 par le satellite Explorer-6, puis par Mercury Program (1960).

D'abord destiné pour la météo par NOAA, il a été modifié pour être the first Earth Resources Technologie Satellite (ERST-1 puis renommé Landsat-1). Lancé en 1972, il marque le début de l'ère de la télédétection avec à bord un capteur multispectral scanning system (MSS) (Gupta, 2018).

Cette discipline devenue incontournable aujourd'hui se définit simplement comme la science et l'art d'obtenir des informations sur un objet, une surface ou un phénomène sans être en contact direct avec cet objet, cette surface ou ce phénomène (Centre Canadien de Télédétection, 2015).

2.2 Processus de la télédétection

De l'obtention à l'image, il existe plusieurs étapes, telles que montrées dans la figure 4. Premièrement, on a besoin d'une source lumineuse (A), qui peut être produite par le soleil (détection passive) ou par le capteur lui-même, embarqué sur une plateforme (D), la détection active. A l'aide d'une fusée, le satellite est mis en orbite à une distance comprise entre 600 - 40.000 km. Et cette orbite est soit héliosynchrone, soit géostationnaire ou encore quelconque (Lacombe et al., 2007).

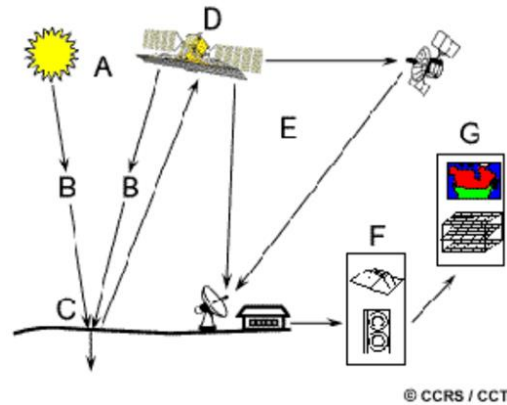


Figure 4 : Processus de la télédétection

Le rayonnement électromagnétique (REM) traverse l'atmosphère (B) à deux reprises. Premièrement, c'est en direction de la cible. Deuxièmement, entre la cible et le capteur. Lors de ce passage, le REM interagit avec l'atmosphère et la cible (C). Avec le premier, il résulte la diffusion (Rayleigh, Mie et Non-sélective), tandis qu'avec le deuxième, on note la transmittance, l'absorptance et le réflectance. Il faut noter que la nature de cette interférence est subordonnée par des caractéristiques du rayonnement et des propriétés de la surface.

Une fois l'information enregistrée, elle est transmise (E) par le moyen électronique à une station de réception où elle est transformée en image (numérique ou photographique) multispectrale. Au niveau de la station de réception, elle subit le toilettage avant l'analyse et interprétation (F).

Les données récoltées nous permettent de mieux comprendre la cible (objet, surface ou phénomène) afin de découvrir d'autres nouveaux aspects. Tout ça dans un seul but principal, celui de mieux gérer nos ressources.

Aujourd'hui, on dénombre une panoplie des disciplines qui utilisent la Télédétection (G). Elles sont regroupées en trois grands domaines : le domaine marin, terrestre et atmosphérique

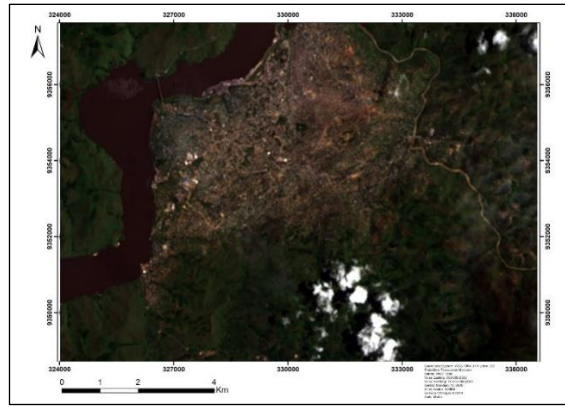


Figure 5 : Image Landsat 8 OLI vraie couleur (432) de la Zone d'Etude

Tableau 2 : Caractéristiques de l'image Landsat 8 (SI Mhamdi et al., 2016)

Bands	Wavelength (micrometers)	Résolutions (mètres)	Common Name
Band 1	0.43 – 0.45	30	Coastal aérosol
Band 2	0.45 – 0.51	30	Blue
Band 3	0.53 – 0.59	30	Green
Band 4	0.64 – 0.67	30	Red
Band 5	0.85 – 0.88	30	Near Infrared (NIR)
Band 6	1.57 – 1.65	30	SWIR 1
Band 7	2.11 – 2.29	30	SWIR 2
Band 8	0.50 – 0.68	15	Panchromatic
Band 9	1.36 – 1.38	30	Cirrus
Band 10	10.60 – 11.19	100 * (30)	Thermal Infrared (TIRS) 1
Band 11	11.50 – 12.51	100 * (30)	Thermal Infrared (TIRS) 2

Quant à la méthodologie, elle est résumée dans la figure 6. Nous avons opté pour la méthode d'extraction automatique. Pour ce faire, nous avons faits des prétraitements de l'image en appliquant différentes corrections d'ordre géométrique, radiométrique et atmosphérique. Par la suite, nous avons fait la bande composite afin de condenser les informations contenues dans les différentes bandes. Le résultat obtenu nous a permis de générer les PCA (Principal Component Analysis) des 7 premières bandes. Après le filtrage directionnel de SOBEL, sur le PCA selon quatre directions (0°, 45°, 90° et 135°), qui permet d'améliorer la perception des linéaments en provoquant un effet optique d'ombre portée sur l'image comme si elle était éclairée par une lumière rasante (Marion, 1987), plusieurs tests d'extraction automatique des linéaments sur les différentes bandes de l'image et sur les résultats des PCA ont été réalisés et nous avons retenu le PCA1, qui, contenait la quasi-totalité de l'information, soit 81,8176651% d'informations sur le total pour l'extraction des linéaments de ce travail.

Pour vérifier l'efficacité de cette méthode automatique et confirmer que tous les linéaments extraits étaient géologiques, nous nous sommes donné la peine de valider les linéaments extraits vis-à-vis des cartes structurales existantes, de la géomorphologie, du réseau de drainage, de l'image SRTM en 3D et des données de terrain.

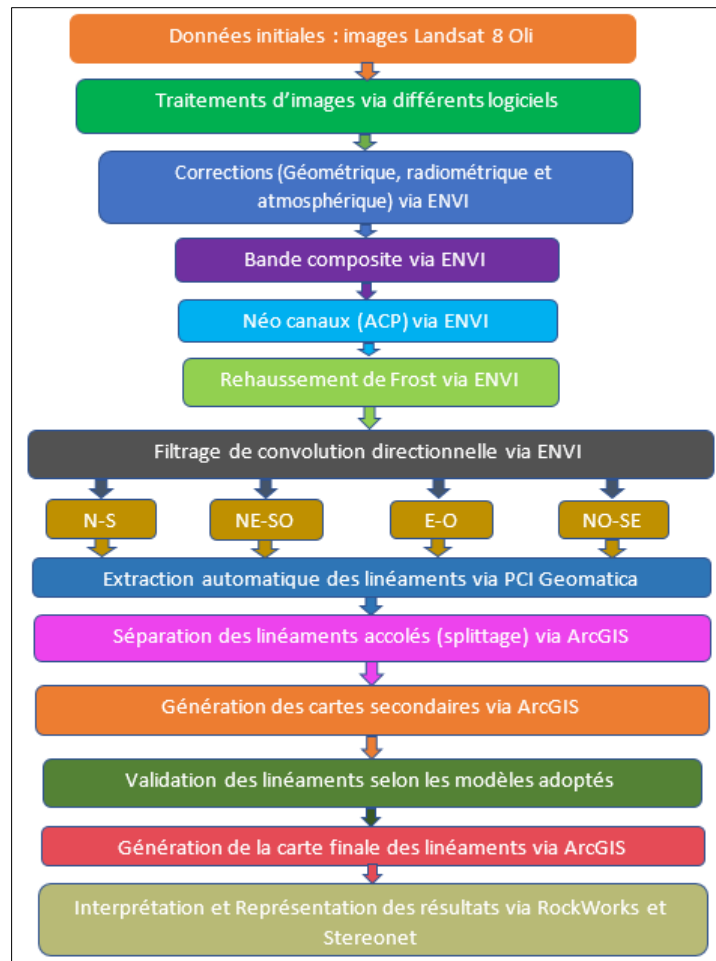


Figure 6 : Organigramme de traitement

3 RESULTATS ET ANALYSES

3.1 Prétraitement

Avant d'effectuer les analyses, les images ont été prétraitées, tel que dans les figures 7 et 8, dans le but d'obtenir les meilleurs résultats de l'analyse (voir la partie matériels et méthodes). Grâce aux logiciels ArcGIS 10.5, pour la correction géométrique, et ENVI 5.3, avec ses logarithmes « Apply Gain and Offset » et « Atmospheric Correction Module – FLAASH Atmosphérique Correction », pour les deux autres corrections.

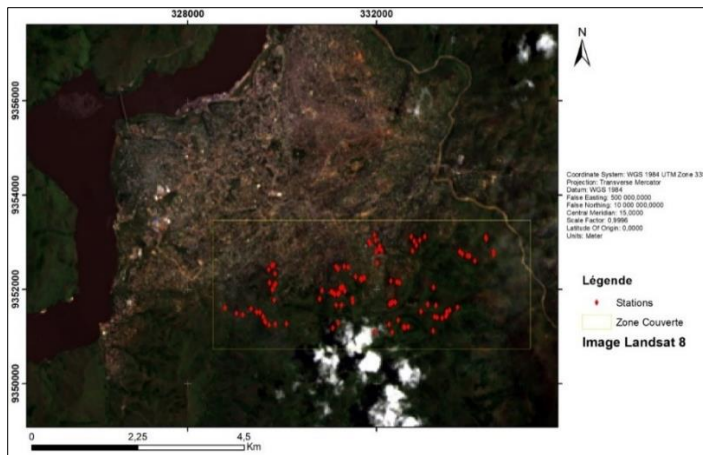


Figure 7 : correction géométrique

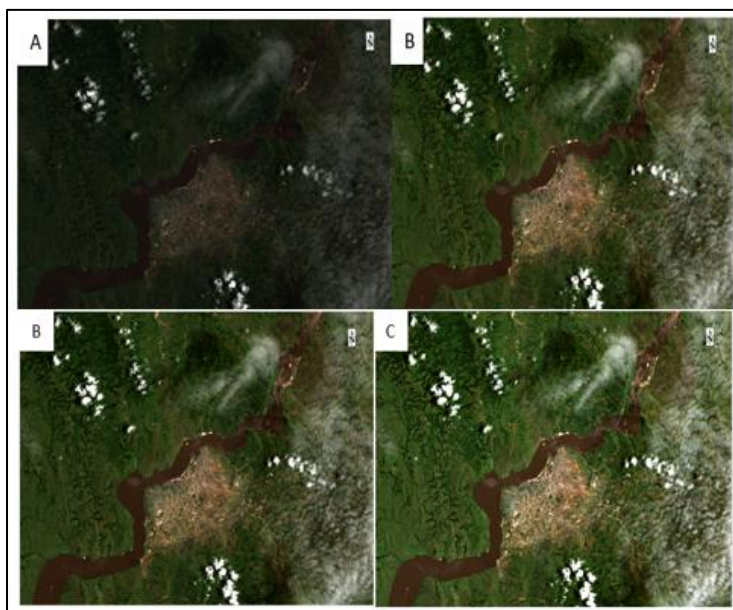


Figure 8 : de l'image non corrigée (A), suivi de celles obtenues après corrections radiométrique (B) et atmosphérique (C)

3.2 Création des néocanaux

Pour extraire nos linéaments, il a fallu n'avoir qu'une seule image représentative. Sur ce, il était indispensable d'éliminer les redondances en créant d'abord une bande composite et, ensuite aboutir à l'analyse en composante principale (PCA) en trois bandes (Fig. 9). Au final, la première, donc (A), a servi pour le filtrage, car elle regorgeait plus de 80 % d'informations.

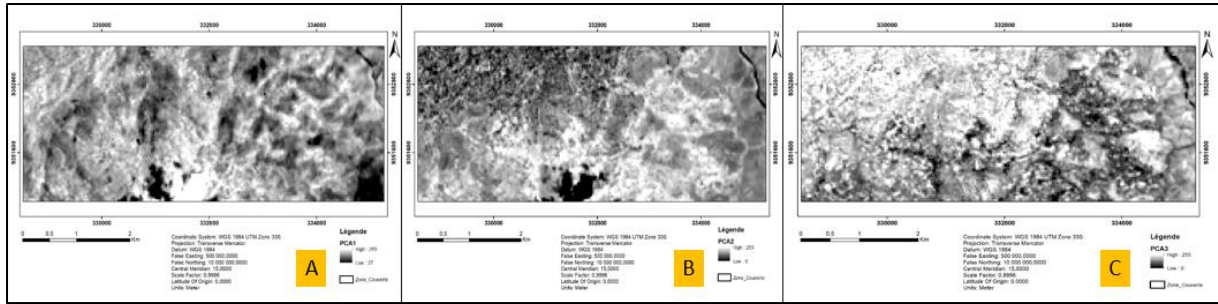


Figure 9 : les trois (3) bandes (PCA1, PCA2, PCA3 correspondant respectivement aux lettres A, B, C) du PCA

Filtrage par convolution directionnelle de sobel

La première bande, PCA1, nous a servi pour le filtrage. Ce dernier permet d'améliorer la visualisation et le contraste des objets en éliminant notamment les bruits. Certes il existe plusieurs façons de réaliser cette opération, pour ce travail, nous avons utilisé le filtre directionnel de SOBEL (pour rehausser les caractéristiques linéaires d'une image) avec la matrice 3×3, selon les quatre directions (Fig. 10), afin d'acquérir le maximum d'informations possibles. A cet effet, l'algorithme « Convolutions and Morphology » du programme ENVI 5.3 était l'idéal.

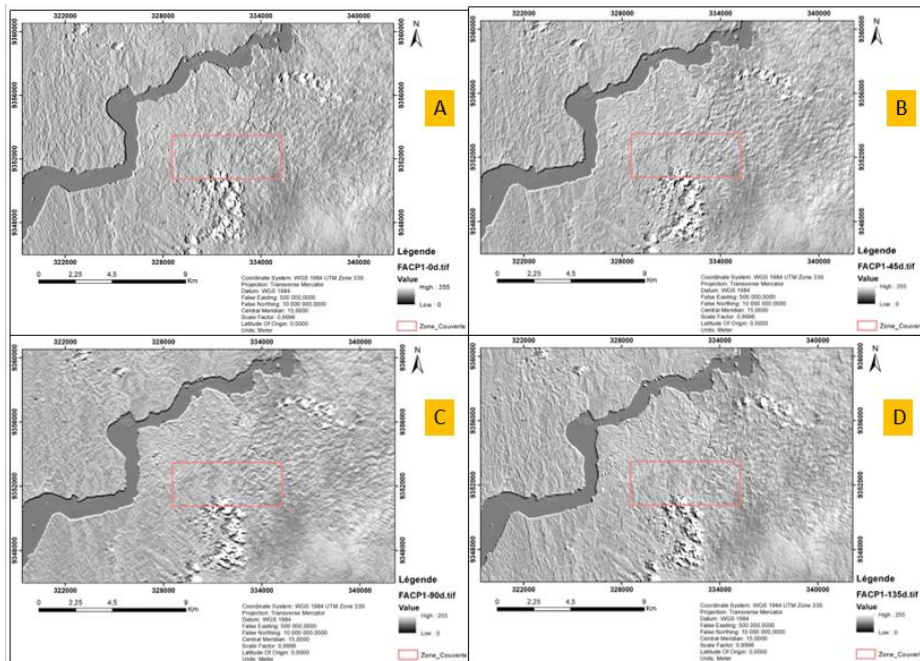


Figure 10 : filtrage selon les 4 directions : 0° (A), 45° (B), 90° (C) et 135° (D)

Extraction automatique des lineaments

Etape déterminante de ce processus, grâce à son algorithme **Line extraction**, PCI Geomatica 2016 nous a permis d'effectuer ladite opération, en tenant compte des images filtrées selon les quatre directions (Fig. 11).

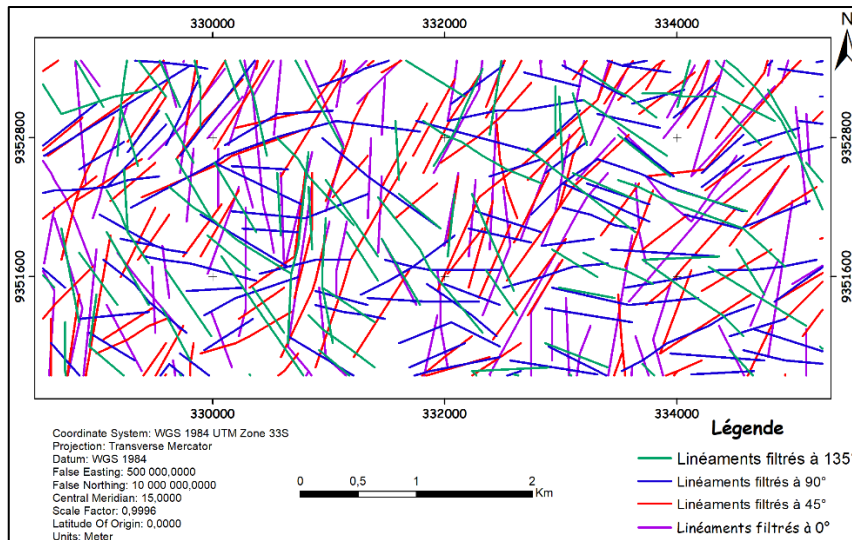


Figure 11 : Linéaments extraits selon les quatre directions du filtrage

Validation des linéaments

Différents modèles, tels que détaillés dans le chapitre précédent, nous ont servi de background ; et dont le résultat est présenté dans la figure 12.

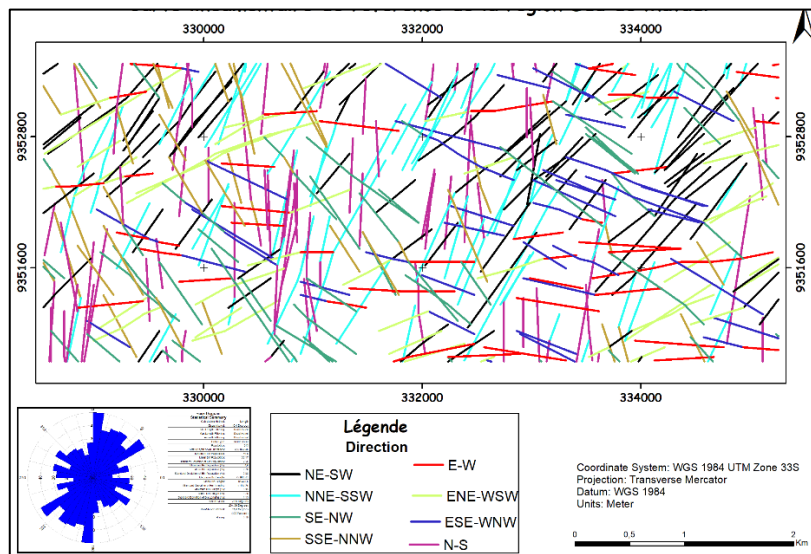


Figure 12 : les linéaments validés

3.3 Discussions et interprétations

L'analyse statistique des linéaments dans la zone sud de Matadi, a permis de mettre en évidence **les orientations** structurales majeures dans la région, les secteurs de plus grande densité de fracturation et les longueurs les plus significatives des fractures.

Orientations des linéaments

Il ressort de l'analyse statistique qu'il existe 516 linéaments après validation. Et que les directions NE-SW, N-S, NNE-SSW et NW-SE sont les plus dominantes (Tab. 3), et correspondent à plusieurs zones de cisaillement et des corridors structuraux rencontrés dans la région, comme moult études l'ont prouvé.

Ces quatre (4) directions dominantes sont en effet celles des fractures les plus connues de la région : Noqui, Ravin Léopold, Soyo, M'pozo, Centrale M'pozo, Barrage M'pozo et Loango (tab. 1) (Makoka et al., 2016a).

Tableau 3 : Nombre des linéaments par direction

Label	Count
<all other values>	0
Direction	516
E-W	51
ENE-WSW	55
ESE-WNW	51
N-S	83
NE-SW	86
NNE-SSW	80
SE-NW	67
SSE-NNW	43

Longueurs des lineaments

Les longueurs des linéaments sont très variables dans cette zone, allant de 11 m à 1571 m. Les directions N-S et NNE-SSW sont celles qui ont enregistré le plus de linéaments longs (fig. 1).

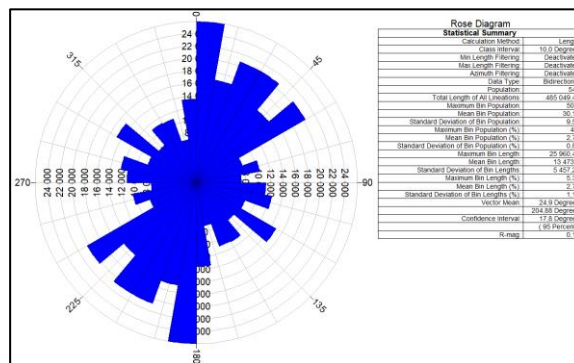


Figure 13 : Rose diagramme en fonction de la longueur des linéaments

Densité des lineaments

Les parties encadrées en vert sur la figure 14 sont considérées comme étant celles qui contiennent le plus de linéaments, traduisant ainsi une fracturation plus intense au sein de granite de Noqui.

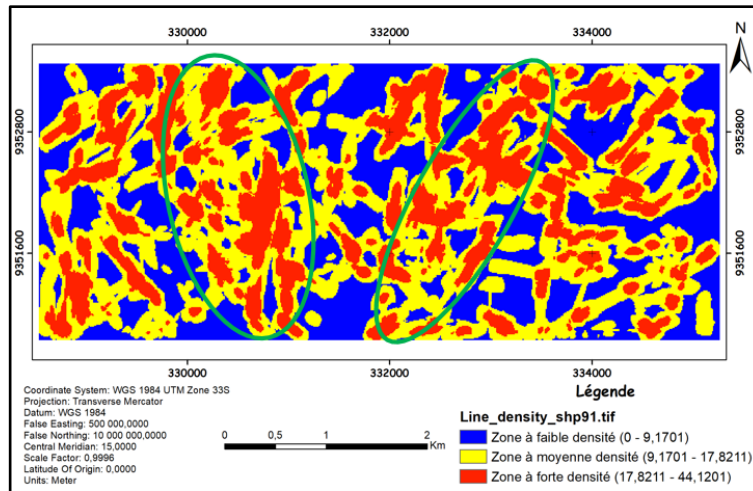


Figure 14 : carte de la densité linéaire

Efficacité d'extraction des linéaments

Les cartes préexistantes de la région ont été utilisées pour montrer la force de cette technique de cartographie. Après extraction des linéaments par notre technique, nous avons fait le constat suivant :

- Tous les linéaments se trouvant sur la carte structurale de la région, se retrouvent dans nos résultats ;
- Beaucoup des linéaments repris dans nos résultats ne se retrouvent pas sur la carte structurale connue et publiée pour la région sous étude ;
- Nos résultats sur la densité linéaire corroborent l'hypothèse de Makoka et al. (2016a, b) selon laquelle, il existe deux principales phases tectoniques orientées l'une NW-SE en relation avec la tectonique panafricaine, et l'autre NE-SW en relation avec la tectonique kimezienne.

Liens entre les linéaments, la prospection minière et hydrogéologique

Comme dit précédemment, en se basant sur la classification de Walter sur le granite hyperalcalin de Noqui est de type A, il est riche en potassium avec la salification hydrothermale, la tourmalinisation et l'acidité produisant des gisements d'étain, de tungstène, de plomb, zinc et de fluor.

Lors de notre descente sur le terrain, nous avons rencontré et collecté plusieurs cristaux de tourmaline brun-noirs à noirs (Fig. 15). La plupart de ces cristaux sont rencontrés dans les veines silicifiées dans la partie à granulométrie très grossière.



Figure 15 : La tourmaline noire. A : Venant de filons de quartz dans le granite de Noqui

Notre zone d'étude montre des indications d'une grande possibilité de trouver des minéralisations de la filière stannifère. A ce propos, plusieurs témoignages vont dans ce sens à travers les travaux des artisans. Une véritable campagne d'exploration minière pourra confirmer ou infirmer cette assertion.

Les zones à forte densité de fracturation et à granulométrie grossière, peuvent constituer des cibles favorables de prospection d'eau souterraine dans la région sud de Matadi. Ce type de granite pourrait donc constituer une roche réservoir d'eau à exploiter pour le bien-être de la population.

CONCLUSION

Les objectifs de ce travail ont été tous atteints. A l'issue de ce travail, nous avons réussi à produire une carte linéamentaire de référence de la région sud de Matadi sur le granite de Noqui à partir de l'imagerie satellitaire Landsat 8.

Nous recommandons ce qui suit :

- Que cette étude menée dans la partie Congolaise soit également faite du côté Angolais pour qu'elle soit assez complète sur tout le granite ;
- Que dans le futur, les résultats de cette étude soient couplés aux données hydrodynamiques (débits, transmissivité, perméabilité, etc.) pour optimiser les études hydrogéologiques et réduire considérablement le taux d'échec si jamais une implantation des forages a lieu dans cette zone. Ceci devrait ensuite permettre d'aborder le problème des écoulements souterrains dans le système fracturé au Travers d'une modélisation numérique ;
- La silicification, la tourmalinisation et l'aspect pegmatitique des grains mis en évidence dans ce travail étant des preuves d'une possible minéralisation de la filière stannifère, nous estimons qu'une étude plus poussée et détaillée permettrait d'avoir une idée claire sur la présence ou non d'un minerai de cette filière.
- Ce papier propose une étude géologique et hydrogéologique pertinente articulant ressources minières et gestion des eaux souterraines dans la région de Matadi.
- L'ensemble est clair, cohérent et présente un intérêt notable pour la planification territoriale et le développement durable régional.
- L'identification des structures favorables à la minéralisation et au stockage des eaux souterraines constitue une contribution utile tant sur le plan scientifique que socio-économique.

Revue-IRS

Revue Internationale de la Recherche Scientifique : [Revue-irs.com](http://www.revue-irs.com)

REFERENCES

- [1] **Cahen, L. (1978).** *Stratigraphie et la tectonique du supergroupe Ouest-Congolien dans les zones médianes et externes de l'orogénèse Ouest-Congolienne (Panafricaine) au Bas-Congo et dans les régions limitrophes.* Musée Royale de l'Afrique Centrale Tervuren, Belg.Sci.Géol.
- [2] **Cahen, L., Delhal, J. & Ledent, D. (1976).** *Chronologie de l'orogénèse Ouest-Congolienne (pan-Africaine) et comportement isotopique de roches d'alcalinité différente dans la zone interne de l'orogénèse, au Bas-zaïre.*
- [3] **Centre Canadien de Télédétection (2015).** Notions Fondamentales de Télédétection. <https://www.rncan.gc.ca>
- [4] **Eeckhout, S. (2014).** *Geology and petrology of the felsic intrusions in the metasedimentary and metavolcanic rocks of the early Neoproterozoic Zadinian Group around Matadi (Lower-Congo Region, D.R. Congo).* Gent: Uniersiteit Gent; Faculteit wetenschappen.
- [5] **Gupta, R. P. (2018).** *Remote Sensing Geology.* Third edition, Berlin: Springer.
- [6] **Lacombe, J.-P. & Sheeren, D. (2007).** *Cours de télédétection aérospatiale.* Toulouse : Ecole Nationale Supérieure Agronomique de Toulouse (ENSAT), Département Agronomie et Environnement.
- [7] **Makoka, M. F., Kanika, M. T., Mvuemba, N. F., Makutu, M. N. J.-A. & Intiomale M. J.-P. (2016).** « *Le complexe plutonique alcalin à ultra-alcalin et les terrains protérozoïques des environs de Matadi (R.D.C.) et Noqui (Angola) dans la chaîne Ouest-Congo : Structurogénèse* ». CONGO SCIENCES, VOLUME 4, NUMBER 1, p1-15.
- [8] **Makoka, M. F., Kanika, M. T., Mvuemba, N. F., Makutu, M. N. J.-A., Intiomale, M. J.-P. et Makutu, K. D. (2016).** *Contribution à l'actualisation de la carte géologique des environs de Matadi (R.D.C.) et Noqui (Angola).* CONGO SCIENCES, Volume 4, Numéro 2, pp. 84-93.
- [9] **SI Mhamdi, H., Raji, M. & Oukassou, M. (2016).** *Utilisation de la Télédétection dans la Cartographie Automatique des Linéaments Géologiques du Granitoïde de Tichka (Haut Atlas Occidental).* European Journal of Scientific Research, 142(4), pp. 321-333.
- [10] **Marion, A. (1987).** *Introduction aux techniques de traitement d'images.* Editions Eyrolles éd. Paris.
- [11] **Tack, L., Wingate, M., Fernandez-Alonso, J. & Deblond, A. (2001).** *Early Neoproterozoic magmatism (1000-910Ma) of the Zadinian and Mayumbian groups (Bas-Congo); onset of Rodinia rifting at the western edge of the Congo craton.* Prec. Research: 110: 277-306.
- [12] **Walter, L. P. (2011).** *Introduction to Formation and Sustainable Exploitation of Mineral Deposits.* Chapter 1; p25-32 éd. Blackwell Publishing Ltd.