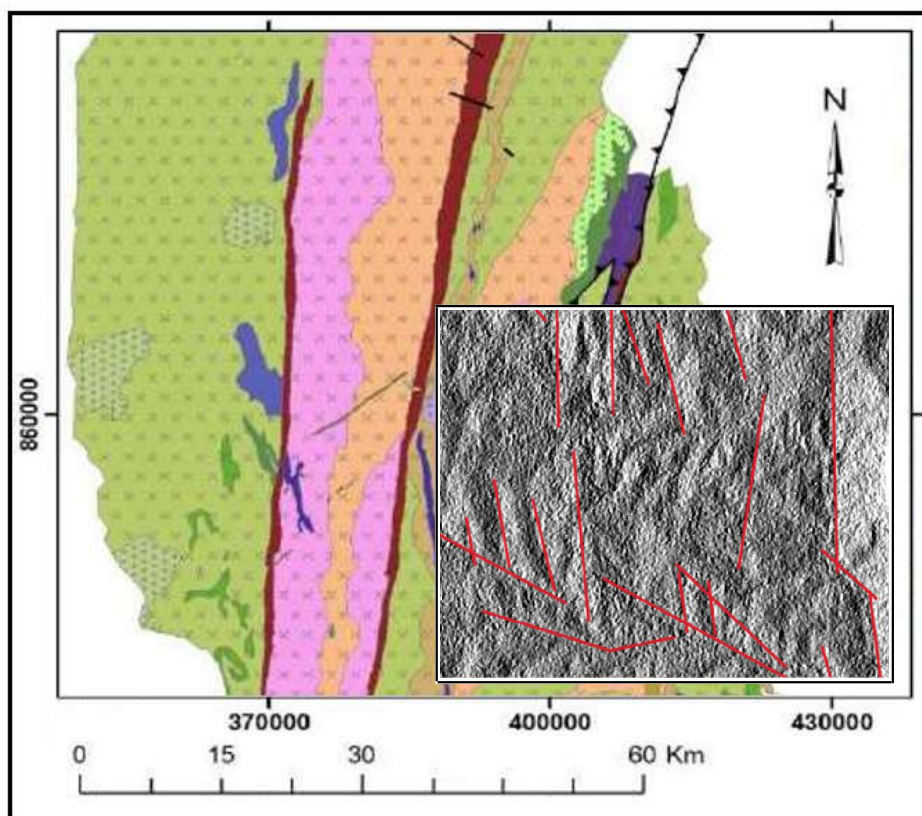


Master 1
Science de la Terre et des Planètes Environnement
mention "Atmosphère, Climat et Surfaces Continentales"

Stage Recherche
durée : 8 semaines

Jean Sébastien FINCK

**Extraction des linéaments de la zone de socle ouest-africaine à partir
d'images satellite à haute résolution :
application à la commune de Savalou (Bénin)**



Encadrants :

Jean Michel VOUILLAMOZ (IRD / IGE-PHYREV)

Fabrice LAWSON (Université d'Abomey-Calavi / PHYREV)

Attestation de non-plagiat

Je soussigné(e) (Prénom NOM)

Jean Sébastien FINCK

Auteur du mémoire de Master 1 ~~ou de l'écrit scientifique réflexif MEEF-PE / MEEF-SD / MEEF-EE / MEEF-PHF~~ (entourez la mention et indiquez le titre du mémoire)

Extraction des linéaments de la zone de socle ouest-africaine à partir d'images satellite à haute résolution : application à la commune de Savalou (Bénin)

déclare sur l'honneur que ce mémoire est le fruit d'un travail personnel, que je n'ai ni contrefait, ni falsifié, ni copié tout ou partie de l'œuvre d'autrui afin de la faire passer pour mienne.

Toutes les sources d'information utilisées et les citations d'auteur ont été mentionnées conformément aux usages en vigueur.

Je suis conscient(e) que le fait de ne pas citer une source ou de ne pas la citer clairement et complètement est constitutif de plagiat, que le plagiat est considéré comme une faute grave au sein de l'Université, pouvant être sévèrement sanctionnée par la loi.

Fait à **GRENOBLE**.....,

le **08/08/2021**.....

Signature de l'étudiant(e)



Résumé

Ce travail de stage a pour but d'explorer les possibilités offertes par l'utilisation de nouveaux outils de télédétection dans la recherche de linéaments, notamment dans le contexte particulier de la zone du socle rocheux ouest-africain. Nous nous intéresserons en particulier aux perspectives potentiellement offertes par l'utilisation d'images RADAR à bande L. Il s'agit donc de rechercher des sources de données satellitaires à haute résolution librement accessibles ainsi que des outils numériques « libres » adaptés aux contraintes opérationnelles des acteurs des pays du Sud, et ce en vue d'améliorer les protocoles en matière de prospection des eaux souterraines.

Abstract

The aim of this work is to explore the possibilities offered by the use of new remote sensing tools in lineaments research, particularly in the specific context of the West African bedrock area. In particular, we will look at the potential opportunities offered by the use of L-band RADAR images. This means looking for free access high-resolution satellite data sources and "free" digital tools which have to be adapted to the operational constraints of actors in the countries of the "South". The aim is to improve the protocols for groundwater exploration.

Table des matières

Introduction.....	1
I. Travail bibliographique.....	2
I.1 Travaux et études antérieurs ayant utilisé des produits satellitaires pour rechercher des linéaments.....	2
I.2 Prétraitement des données.....	3
I.3 Choix du ou des indice(s) à analyser.....	3
I.4 Détection des linéaments.....	4
I.5 Outils informatiques identifiés.....	5
II. Démarche scientifique et méthodologique.....	6
II.1 Choix des données.....	6
II.1.1 Les modèles numériques de terrain.....	6
II.1.2 Les images satellite RADAR.....	7
II.1.3 Les images satellite optiques.....	8
II.2 Prétraitement des images avec le filtre de Lee multidirectionnel.....	8
II.3 Les fenêtres de Sobel.....	9
II.4 Utilisation du plugging GeoTrace.....	11
II.5 Comparaison d'images de natures différentes.....	12
Conclusion et perspectives.....	14
Références bibliographiques.....	14
Annexe.....	16

Introduction

Dans le domaine des géosciences et de la géodésie, l'analyse linéamentaire est une pratique relativement ancienne qui répond à différentes finalités : identification des limites entre formations rocheuses pour élaborer une carte géologique, extraction de lignes de rivage ou de réseaux de drainage dans le cadre d'études paléo-hydrologiques, analyse de la fracturation dans une démarche de prospection hydrogéologique ou minière, mais aussi (et pour ne citer que ceux là) mise en lumière des lignes de fracture majeures pour comprendre un contexte tectonique régional complexe.

La majeure partie de l'Afrique de l'Ouest est couverte par une large zone de socle rocheux altéré en surface. Cette couche « d'altérites », recouvrant le socle dit « sain », peut être plus ou moins épaisse en fonction des endroits. L'usage montre que dans la plupart des cas, notamment quand l'épaisseur de la couche altérée est importante, celle-ci constitue un aquifère intéressant susceptible d'être exploité pour l'adduction en eau potable. Dans le cas du Bénin, ce type de formations géologiques recouvre plus de 80 % du territoire national et constitue donc (et de très loin) les réserves d'eau potable exploitables les mieux réparties sur le territoire national. Cependant, le débit d'exploitation des forages varie beaucoup selon les propriétés locales des aquifères, et notamment l'épaisseur d'altération qui est généralement plus importante à proximité des fractures géologiques. C'est pour cette raison que depuis longtemps, l'usage préconise de réaliser les forages d'adduction d'eau à proximité immédiate de ces fractures, et ce de façon à maximiser leurs chances de succès. La pratique consiste donc à rechercher ces alignements dans le paysage, ces « linéaments », qui sont généralement le signe d'une fracturation sous-jacente.

J'ai eu la chance d'être accueilli pendant deux mois dans une équipe de recherche mixte Franco-béninoise constituée dans le cadre d'une collaboration engagée de longue date par Jean-Michel VOUILLAMOZ (IRD) et Fabrice LAWSON (Université Abomey-Calavi), tous deux membres du Laboratoire Mixte International (LMI) Ressources en Eau de la Zone Critique (REZOC) et de l'observatoire éco-hydro-météo en Afrique de l'Ouest AMMA-CATCH (Analyse Multidisciplinaire de la Mousson Africaine – Couplage de l'Atmosphère Tropicale et du Cycle Hydrologique). Les thématiques de recherches portées par ce LMI et cet observatoire sont nombreuses, et portent toutes sur l'étude de la « zone critique » dans le contexte ouest-africain. L'équipe que j'ai intégré s'intéresse plus particulièrement à la recherche d'éléments objectifs et d'outils opérationnels adaptés au contexte ouest-africain permettant d'améliorer les pratiques en matière de prospection d'eau souterraine. Le premier objectif de mon travail était donc d'apporter à l'équipe des éléments concernant :

- l'utilisation d'images satellite en matière de recherche linéamentaire, en se focalisant notamment sur les travaux réalisés sur la zone du socle rocheux ouest-africain ;

- les sources de données satellitaires haute résolution disponibles et accessibles (idéalement en accès libre) susceptibles de pouvoir être utilisées dans le cadre d'une analyse linéamentaire (en s'intéressant notamment aux perspectives potentiellement offertes par l'utilisation d'images RADAR en bande L) ;

- les outils informatiques « libres » existants, permettant de traiter les données, de les analyser et d'identifier les linéaments de façon automatique ou semi-automatique. Par ailleurs, ces outils doivent être adaptés aux contraintes opérationnelles des acteurs des pays du Sud (bureaux d'étude, services techniques et administrations notamment).

Il s'agissait ensuite, sur la base de ces éléments, de s'appropriier les méthodes et outils identifiés puis de définir un (ou des) protocole(s) permettant d'évaluer de façon qualitative la plus-value apportée par rapport à la méthode « traditionnelle » d'identification des linéaments. La commune de Savalou (au Sud-Ouest du Bénin) a été choisie préalablement à ce stage comme « aire de test », notamment du fait d'un historique d'études déjà important sur la zone. Le format « court » de ce rapport ne nous a pas permis de détailler ou d'illustrer l'ensemble du travail réalisé au cours de ce stage. Les grandes lignes sont néanmoins décrites dans le corps du texte de façon à ce que le lecteur puisse se faire une idée de ce qui a été réalisé.

I. Travail bibliographique

De par sa dimension « exploratoire », une part importante du travail réalisé a consisté à s'approprier les travaux, protocoles, méthodes et outils développés ces dernières années en matière de recherche linéamentaire (notamment pour ceux qui concernent la zone du socle ouest-africain).

I.1 Travaux et études antérieurs ayant utilisé des produits satellitaires pour rechercher des linéaments

Ces dernières décennies, beaucoup de choses ont été faites en vue de développer les techniques de recherche linéamentaire, que ce soit dans le contexte ouest-africain comme dans bien d'autres à travers le monde. A l'origine, la technique d'identification « traditionnelle » des linéaments se basait sur l'interprétation stéréo-photogramétrique d'images aéroportées suivie de campagnes in situ de reconnaissance à l'affleurement. Cela nécessitait de disposer des données nécessaires (stéréo-photos), de mobiliser d'importants moyens matériels et humains, et constituait un travail particulièrement chronophage. Les progrès de l'informatique, des systèmes de positionnement globaux (GPS), des outils SIG ainsi que la démocratisation de l'utilisation des Modèles Numériques de Terrain (MNT, ou Digital Elevation Model (DEM) en anglais) ont permis des gains significatifs de productivité : aujourd'hui, la technique d'identification « classique » des linéaments consiste à identifier sur ces MNT des alignements morpho-structuraux dans les reliefs susceptibles

d'être liés à la fracturation du socle rocheux. Mais au-delà de l'analyse des modèles d'élévation, un certain nombre d'études ont également tenté d'exploiter d'autres sources de données telles que des images satellites optiques multispectrales ou des images RADAR à longueurs d'onde relativement importantes, en bande C et bande L notamment (Koita (2010), Oussou et al. (2020)). Cependant, l'utilisation de ces sources de données « alternatives » en Afrique de l'Ouest (et plus généralement sur la ceinture tropicale) est resté jusque là très limitée en raison d'un contexte climatologique régional relativement défavorable (végétation et couverture nuageuse importantes pendant une grande partie de l'année). Néanmoins, l'expérience montre que les résultats obtenus par l'analyse de ces données peuvent donner des résultats sensiblement différents selon les sources, et les cartes linéamentaires obtenues demandent généralement à être validées sur la base d'informations complémentaires (vérifications in situ à l'affleurement ou sur carte géologique, données géophysiques).

I.2 Prétraitement des données

Qu'il s'agisse d'images satellites optiques multispectrales ou RADAR, celles-ci doivent le plus souvent subir un prétraitement avant de pouvoir être analysées de façon plus poussée. Généralement, seules les données d'élévations issues d'un MNT peuvent être utilisées tel quel (bien qu'il arrive fréquemment que celles-ci fassent également l'objet d'un filtrage « passe bas », notamment dans le cas de MNT à haute résolution). Mes recherches bibliographiques n'ont fait apparaître aucun consensus quant aux protocoles adoptés pour prétraiter ces images. Selon les références, celui-ci peut consister en un simple filtrage linéaire (généralement gaussien) par convolution avec une fenêtre prédéfinie dont la taille et les caractéristiques peuvent être variables d'une référence bibliographique à une autre ; ou « adaptatif » (filtre médian, filtre passe bas conditionnel, filtre de Lee, filtre de Frost, filtre gamma, ...) qui tient compte des évolutions locales de la moyenne et de l'écart type calculés au voisinage de chacun des pixels (Lee (1980), Cocquerez et al. (1995), Bres et al. (2003)). Ces techniques de filtrage « adaptatives » sont les seules à être adaptées au traitement des images RADAR, notamment du fait du caractère multiplicatif du bruit auquel celles-ci sont sujet (chatoiement). Par ailleurs, ce dernier type de filtrage peut aussi être appliqué à des fenêtres directionnelles de façon à préserver les contours et les potentielles traces de linéaments (Selige et al. (2006)). A noter aussi que beaucoup d'études utilisent des compositions de ces filtres (Koita (2010)), compositions qui par ailleurs ne sont pas toujours très bien explicitées dans le corps des articles.

I.3 Choix du ou des indice(s) à analyser

Contrairement aux MNT, les images optiques multispectrales et RADAR offrent un certain nombre de « bandes » ou de « canaux ». Or, la quasi totalité des techniques automatiques ou semi-

automatiques de détections de contours se basent sur l'analyse d'images monobandes (Bres et al. (2003)). Bien qu'une extraction « manuelle » des linéaments par un opérateur est toujours possible sur la base de compositions colorées, il conviendra donc, dans les autres cas et une fois encore, de faire un choix quant à la bande, à l'indice ou à la combinaison de bandes qui sera utilisé(e) pour réaliser une détection automatique ou semi-automatique des lignes de fracture. Là encore, aucun consensus particulier ne semble se dégager de la littérature :

- pour ce qui est des images RADAR, le faible nombre de canaux (2 ou 4 selon les sources de donnée) limite ce choix de manière importante : dans le cas des images issues de ALOS-2 PALSAR-L, un RADAR à synthèse d'ouverture en bande L à deux polarités (HH et HV), la plupart des références utilisent les canaux de base (HH ou HV), ou bien des combinaisons relativement simples de ces canaux comme "HH + HV", ou " $(HV - HH) / (HV + HH)$ " (Paillou et al. (2010), De Oliveira Andrades Filho et al. (2012)) ;

- Pour ce qui est des images optiques, ce sont les bandes de l'infrarouge (proche et moyen) qui semblent susciter le plus d'intérêt, ainsi que, mais dans une moindre mesure, les bandes visibles du spectre. La plupart des études récentes se basent sur des images optiques enregistrées dans le cadre du programme d'observation LANDSAT, et notamment par ses deux satellites actuellement en fonctionnement : Landsat-7 (ETM+) et Landsat-8 (OLI/TIRS). Ces capteurs fournissent des images à une résolution spatiale de 30m pour l'ensemble des bandes, à l'exception d'une bande panchromatique pour laquelle la résolution spatiale est supérieure (15m) mais au prix d'une plus faible résolution spectrale. Pour extraire les lignes de fracture de ces images, peu d'études utilisent les seules bandes de base, à l'exception de la bande panchromatique qui est mieux résolue spatialement et plus « intégratrice » d'un point de vue spectral. Mais la plupart des études utilisent des combinaisons de bandes entre l'infrarouge moyen et l'infrarouge thermique. D'autres travaux encore préfèrent en passer par une analyse en composantes principale (ACP), appelée aussi « transformée de Hotelling », généralement sur l'ensemble des bandes allant du visible jusqu'à l'infrarouge thermique. L'étude linéamentaire est alors effectuée sur la 1ère composante principale des bandes analysées (PC1).

I.4 Détection des linéaments

La détection des linéaments ne s'effectue pas de la même manière selon la nature des données utilisées pour mener l'analyse. La méthode « classique » d'extraction des linéaments se base sur un profil d'élévation issu d'un MNT sur lequel est appliqué différents ombrages (généralement éclairé selon un angle d'élévation de 30° et les azimuts 0°, 60° et 120° par rapport au Nord). Ces ombrages sont ensuite fusionnés (différents algorithmes peuvent être utilisés) ou bien affichés sous la forme d'une composition colorée. C'est sur cette base (fusion/composition) que l'extraction des linéaments est ensuite réalisée, généralement de façon « manuelle ».

S'agissant des images RADAR et optiques, d'autres méthodes doivent généralement être utilisées pour détecter les contours et/ou rehausser les contrastes. Différentes techniques existent :

- pour ce qui est du réhaussement des contrastes, il s'agit généralement d'opérations effectuées sur l'histogramme local (plus rarement global) de la distribution des niveaux de gris : l'objectif est alors d'augmenter la résolution spectrale des niveaux de gris de façon à augmenter les contrastes sur certaines plages de valeurs (Cocquerez et al. (1995), Bres et al. (2003)). Bien que celles-ci soient aujourd'hui largement utilisées dans le domaine du traitement d'images numériques, ces techniques n'ont été ni utilisées ni même abordées dans le cadre de ce stage.
- pour ce qui est de la détection des contours, de nombreuses techniques ont été développées ces dernières décennies. Mais aujourd'hui encore, les méthodes basées sur la convolution de l'image analysée par une matrice filtre « passe haut » restent les plus courantes (Yao et al. (2012)). Parmi elles, les fenêtres directionnelles de Sobel notamment figurent encore aujourd'hui parmi les plus utilisées : elles consistent à estimer le gradient selon une certaine direction (parmi 4 au total) tout en lissant le signal dans la direction perpendiculaire. Comme toutes les méthodes de ce type, la taille des fenêtres « filtre » peut varier, mais l'expérience montre que les fenêtres de taille 3x3 restent les plus utilisées (ou 7x7 pour les images à plus haute résolution).

I.5 Outils informatiques identifiés

Conformément à notre volonté de privilégier des outils libres d'accès, notamment pour répondre aux contraintes financières et opérationnelles des acteurs des pays du Sud, nous avons fait le choix de nous détourner des logiciels sous licence privée tels que ENVI (très utilisé par les professionnels pour le traitement d'images de télédétection) ou PCI-Geomatica qui semble s'être diffusé très largement, parfois dans des versions crackées. Ce logiciel propose notamment un outils nommé « LINE » qui permet d'extraire automatiquement des linéaments à partir d'une image Raster (El Sawy et al. (2016), Shankar et al. (2016)). Cet outils est par ailleurs le seul que nous ayons identifié aujourd'hui pour effectuer cette tâche et qui soit diffusé aussi largement. Nos recherches n'ont pas permis de trouver de plugging ou de logiciel libres proposant un équivalent.

Nous avons donc choisi de travailler avec le logiciel libre QGIS, autant pour son ergonomie que pour sa bibliothèque de pluggings développée et maintenue de façon participative. Les logiciels SAGA GIS et GRASS, tous deux libres de licence et qui peuvent être facilement interfacés avec QGIS, ont également été utilisés, autant pour réaliser le prétraitement des données que pour la détection des linéaments. Deux pluggings supplémentaires de QGIS ont aussi été identifiés pour assister l'utilisateur dans ces différentes tâches :

- GeoTrace : un ensemble d'outils permettant à la fois la détection de contours sur une image RASTER, l'assistance de l'utilisateur dans le tracé des linéaments, et l'analyse statistique des caractéristiques des fractures identifiées (Thiele et al. (2017)) ;

- Network GT : il s'agit d'un ensemble d'outils permettant d'identifier, de digitaliser, de traiter et d'analyser des réseaux de fractures. Malheureusement, du fait d'une version de QGIS et de Python inadéquates, nous ne sommes finalement pas parvenus à utiliser l'outil de digitalisation automatique proposé par ce plugging. Néanmoins, et pour pallier à ça, nous avons cherché à tester l'outil "Raster skeletonization" proposé par SAGA GIS et utilisé par Network GT dans son code source en Python (la part du travail avec NetworkGT n'est pas développée dans ce rapport).

II. Démarche scientifique et méthodologique

Parallèlement à la recherche bibliographique présentée précédemment, l'autre grand objectif de ce stage était de pouvoir explorer de nouvelles approches pour identifier les linéaments, notamment sur la zone du socle rocheux ouest-africain, et plus particulièrement sur le Sud du Bénin. Nous nous intéressons en particulier aux éventuelles plus-values que pouvait apporter l'utilisation de nouveaux jeux de données à haute résolution, et notamment des images RADAR à bande L (Schaber et al. (1986)). La première étape consistait donc à identifier les jeux de données disponibles, idéalement en libre accès, avant de définir une démarche scientifique complète visant à comparer nos résultats avec les méthodes « classiques » couramment utilisées aujourd'hui.

II.1 Choix des données

Comme identifié au chapitre précédent, 3 grands types de données différents sont susceptibles d'être mobilisés pour réaliser une analyse linéamentaire.

II.1.1 Les modèles numériques de terrain

Plusieurs missions satellitaires récentes lancées ces dernières années ont permis de produire des MNT à haute résolution potentiellement mobilisables dans le cadre d'une analyse linéamentaire. Tous cependant ne sont pas en accès libre :

- SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) DEM : probablement le MNT le plus diffusé à travers le monde. Celui-ci propose en libre accès, sur le portail de l'USGS « EarthExplorer », un modèle d'élévation pour 80 % des terres émergées à une résolution de 30m (depuis 2015) et 90m.
- ASTER GDEM : autre MNT disponible en libre accès sur le portail de la NASA « EarthData » à une résolution de 30m. Contrairement au SRTM, ce MNT a été produit à partir de la stéréo-interprétation de paires d'images optiques enregistrées par le radiomètre ASTER.
- ALOS World 3D : un autre MNT disponible à une résolution de 30m en libre accès sur le portail de l'agence aérospatiale japonaise « JAXA/EORC ». Comme ASTER GDEM, ce DEM est obtenu à partir de la stéréo-interprétation de triplets d'images optiques enregistrées par le capteur ALOS-PRISM.

- SPOT DEM : un MNT produit à partir d'images optiques enregistrées par la constellation de satellites SPOT. Celui-ci est disponible en accès restreint à une résolution 20m ou 30m.
- WorldDEM : reposant sur la paire de satellites jumeaux TanDEM-X/TerraSAR-X qui volent en formation serrée (distance entre les deux satellites contrôlée entre 250 et 500m), cette mission visait à produire d'ici à 2014 un MNT mondial à très haute résolution (12m) adapté aux besoins des utilisateurs commerciaux. Seul la version du DEM à la résolution 90m est actuellement en accès libre (la version à 12m de résolution n'est accessible que sous licence payante).
- PALSAR DEM : Contrairement à ce qui a pu être suggéré par certaines références bibliographiques récentes (Oussou et al. (2020)), ce DEM n'est pas issu de l'interprétation d'images enregistrées par le RADAR à synthèse d'ouverture ALOS-PALSAR. Il s'agit en fait d'une version « downscaled » à 12,5m du SRTM DEM, utilisée pour corriger les effets de la topographie sur les images radar RTC (Radometrically Terrain Corrected). Ces données d'élévation sont incluses dans les fichiers d'image ALOS-PALSAR L (version RTC) qui sont librement téléchargeables sur le portail de la NASA/ASF « EarthData ».

Nous avons fait le choix pour la suite de ce travail d'utiliser le DEM en libre accès qui offrait la meilleure résolution spatiale, à savoir le « PALSAR DEM ».

II.1.2 Les images satellite RADAR

Au vu de l'utilisation que nous souhaitons en faire (détection de fractures et de structures géologiques linéaires) et au vu du contexte régional (région tropicale, végétation et couche nuageuse importantes), nous nous sommes tournés vers les images RADAR disponibles obtenues avec des longueurs d'onde qui soient les plus importantes possibles. En effet, la pénétration des ondes RADAR dans la végétation et/ou dans les sols est d'autant plus importante que la longueur d'onde est grande (Schaber et al. (1986)). Deux sources de données RADAR ont ainsi été identifiées :

- Sentinel-1 C-SAR : il s'agit d'un RADAR à synthèse d'ouverture en bande C ($\lambda = 5,5$ cm) à double polarisation (HH+HV et VV+VH), dont les clichés peuvent atteindre une résolution spatiale de 10m sur certaines régions du monde.
- ALOS-PALSAR L : il s'agit d'un RADAR à synthèse d'ouverture en bande L ($\lambda = 23$ cm) à double polarisation (HH et HV) qui propose notamment une version de ses clichés « RTC » (corrigée des effets de la topographie) à une résolution spatiale de 12,5m.

Nous avons choisi de privilégier les images ALOS-PALSAR L RTC, notamment pour rester le plus possible cohérent avec les données d'élévation que nous avons retenues.

II.1.3 Les images satellite optiques

Bien que le contexte climatologique régional soit relativement défavorable à l'utilisation d'images optiques pour détecter les linéaments en région tropicale, beaucoup d'études intègrent ces données dans leur recherche, notamment pour distinguer les fractures de plus petite taille (quelques centaines de mètres) qui ne sont pas toujours identifiables sur les modèles numériques de terrain (Koita (2010), Oussou et al. (2020)). La quasi-totalité des études récentes réalisées sur le sujet utilisent des images issues du programme Landsat, qui offre une résolution spatiale de 30m pour l'ensemble de ses bandes allant du visible à l'infrarouge thermique (à l'exception de sa bande panchromatique mieux résolue spatialement). Cette résolution constante entre tous les canaux est très intéressante, notamment quant il s'agit d'utiliser des combinaisons de bande ou de réaliser une analyse en composante principale. Néanmoins nous avons fait le choix, dans le cadre de ce travail, d'utiliser des images issues de la constellation de satellites Sentinel-2, qui propose en libre accès des acteurs institutionnels (services de l'État, Universités, ...) des images optiques à une résolution de 10m pour ses bandes allant du visible au proche infrarouge (la résolution spatiale diminue ensuite pour les plus grandes longueurs d'onde). Nous voulions notamment appréhender ce qu'apportait véritablement l'augmentation de la résolution spatiale des images dans l'identification des linéaments.

II.2 Prétraitement des images avec le filtre de Lee multidirectionnel

Dans la mesure où nous cherchions à définir un protocole qui soit adapté aux contraintes opérationnelles des acteurs des pays du Sud, nous avons fait le choix de nous limiter aux filtres existants et opérations de prétraitement déjà implémentées et proposées dans les logiciels et pluggings identifiés et retenus au paragraphe I.5, en tenant compte des spécificités de chaque type de données. Par ailleurs, nous avons aussi fait le choix de limiter au maximum ces filtres et opérations de façon à ce que notre protocole soit le plus simple possible. De même, et contrairement à d'autres références, nous avons choisi de ne pas multiplier les opérations de prétraitement, et de ne pas appliquer de succession de filtres.

Pour ce qui est du MNT (PALSAR DEM), après avoir testé plusieurs protocoles de filtrage, nous avons finalement décidé d'utiliser le produit brut et de ne réaliser aucun prétraitement.

Pour ce qui est des autres sources de données (images RADAR et optiques), nous avons finalement retenu le filtre de Lee multidirectionnel implémenté dans le logiciel SAGA GIS. Cette routine permet d'appliquer un filtre adaptatif de Lee à la fenêtre directionnelle dont la variance calculée est la plus faible (parmi les 16 fenêtres directionnelles 9x9 présentées à la Figure 1). Cette routine intègre aussi 3 modèles de bruits dont deux ont été testés au cours de ce stage :

- un bruit dont la variance est considérée constante (modèle plutôt adapté au filtrage des images optiques) : ce modèle a été retenu pour le prétraitement des images Sentinel-2

- un bruit dont la variance est considérée être proportionnelle à la déviation standard moyenne (modèle plutôt adapté au filtrage des images RADAR sujettes au chatoiement) : ce modèle a été retenu pour le prétraitement des images ALOS-PALSAR L.

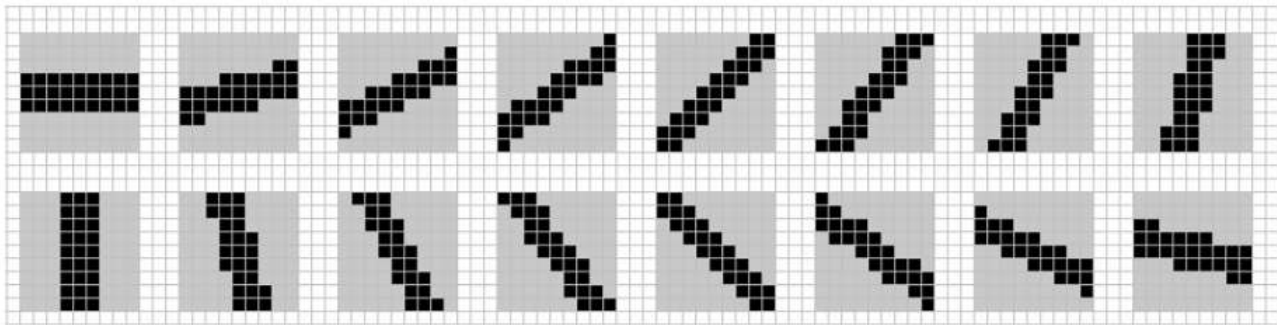


Figure 1 : Les 16 masques directionnels utilisés par le filtre de Lee multidirectionnel implémenté dans SAGA GIS pour filtrer le bruit des images satellites (seuls les pixel en noir sont considérés). Illustration issue de Selige et al. (2006)

Un autre avantage de cette routine est qu'elle offre également la possibilité d'extraire, pour chaque pixel, la direction pour laquelle la variance est minimum ainsi que la valeur de cette variance. Certaines références préfèrent utiliser cette variance directionnelle plutôt que les valeurs du champs filtré. Celle-ci permettrait dans certains cas de mieux discerner les contours (Yao et al. (2012)).

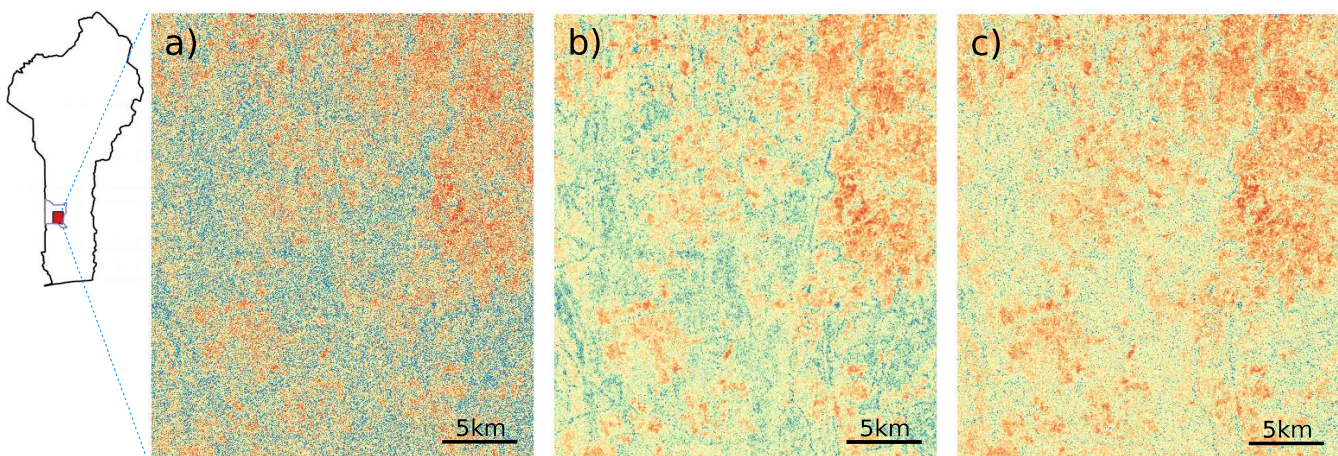


Figure 2 : Application du filtre de Lee multidirectionnel à une fenêtre test d'une image radar ALOS-PALSAR L : a) image brute ; b) image filtrée (paramètre = 10) ; c) variance directionnelle minimum.

II.3 Les fenêtres de Sobel

La convolution avec des fenêtres directionnelles fait partie des méthodes les plus courantes pour mettre en exergue et identifier des structures linéaires sur une image satellite ou sur un MNT. Parmi les fenêtres existantes, celles de Sobel sont de loin les plus couramment utilisées. Nous ne

reviendrons pas sur ce que nous avons déjà écrit au paragraphe 1.4 concernant celles-ci. Néanmoins, la Figure 3 illustre les résultats que l'on obtient par convolution de la fenêtre test prise sur la commune de Savalou (voir Figure 2) avec les 4 fenêtres directionnelles de Sobel. On remarque notamment que les structures linéaires accentuées ne sont pas les mêmes selon la direction de la fenêtre de Sobel. Les linéaments qui sont extraits peuvent donc différer selon l'orientation que l'on considère.

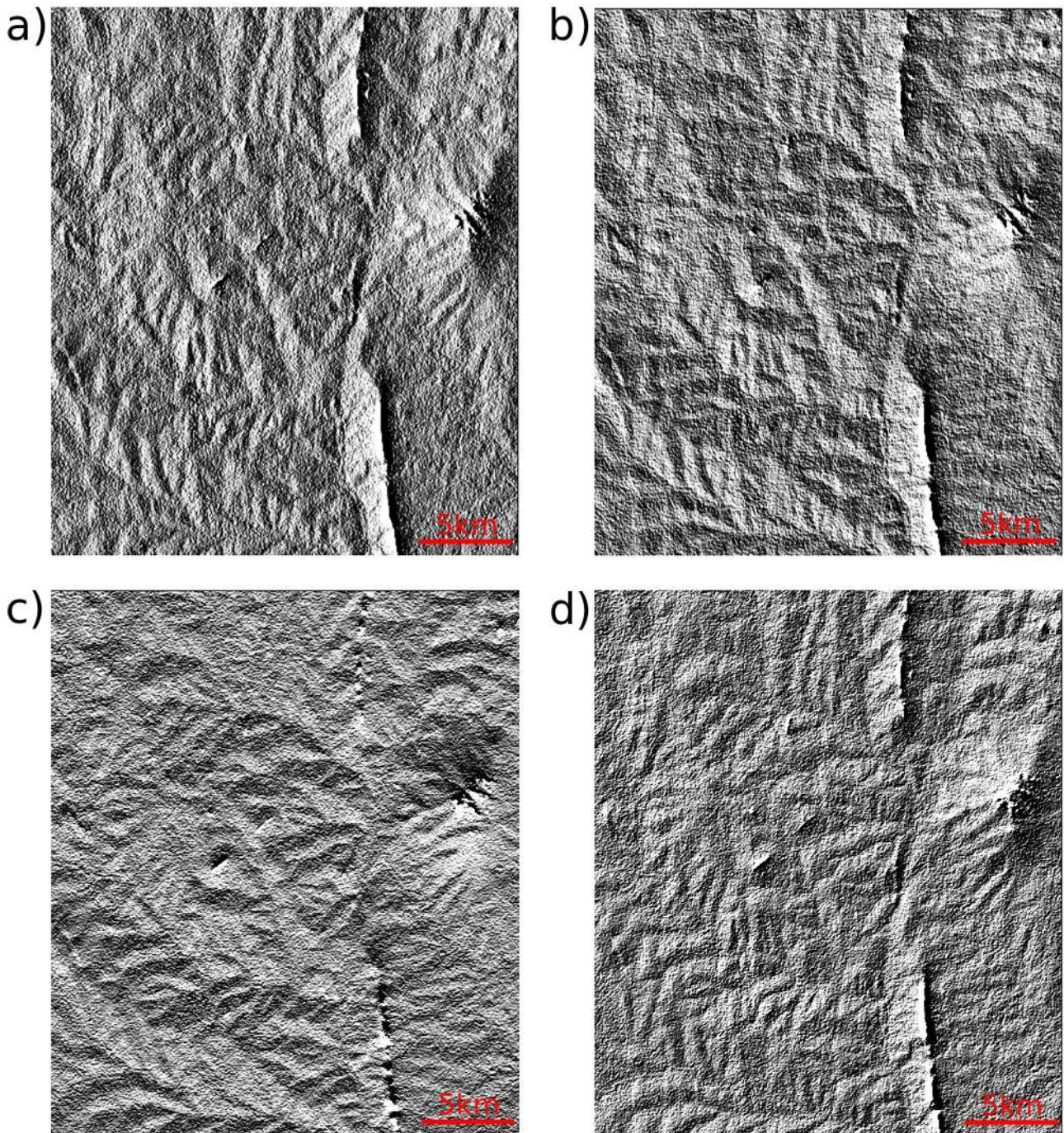


Figure 3 : Application des fenêtres directionnelles de Sobel 7x7 à une fenêtre test du MNT PALSAR DEM : a) Nord/Sud ; b) Nord-Est/Sud-Ouest ; c) Est-Ouest ; d) Nord-Ouest/Sud-Est.

II.4 Utilisation du plugging GeoTrace

GeoTrace est un plugging du logiciel libre QGIS conçu pour extraire des fractures ou des linéaments de façon semi-automatique à partir d'images raster. Il compte également des outils permettant de réaliser une analyse statistique des caractéristiques des fractures identifiées et d'afficher les résultats, notamment sous la forme de rosaces directionnelles. Seuls les outils servant à l'extraction semi-automatique des fractures ont été utilisés dans le cadre de ce stage. Nous avons notamment testé les différentes routines proposées par le plugging pour déterminer la « cost layer » utilisée par le plugging pour assister le tracé des linéaments.

Tout d'abord, et sans que nous ne soyons parvenus à en trouver la cause, il s'avère qu'aucun des algorithmes implémenté dans l'outil de calcul de la « cost layer » ne fonctionne sur les images RADAR : en effet, l'outil renvoi systématiquement une couche raster uniforme de valeur nulle et ce quel que soit le format d'entrée de l'image RADAR, que celle-ci soit prise brute ou préalablement filtrée. Nous avons donc dû utiliser le plugging « User defined filter » du logiciel SAGA GIS pour convoluer « manuellement » l'image avec les 4 fenêtres directionnelles de Sobel de façon à pouvoir tester l'outil d'assistance au tracé des linéaments sur ces données (cette partie du travail n'est pas détaillée dans la suite de ce rapport).

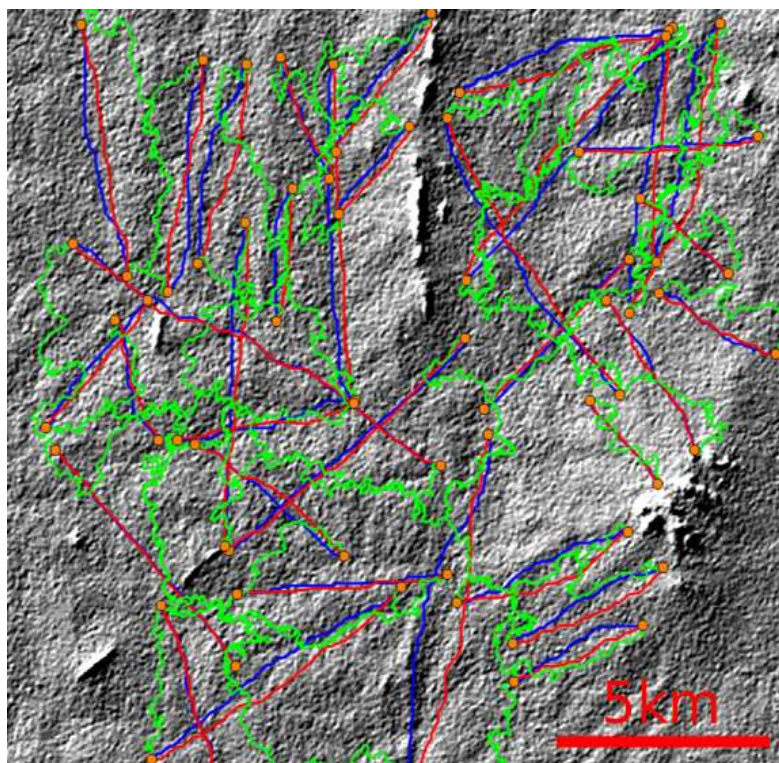


Figure 4 : Résultats de l'extraction des linéaments sur une zone test à l'aide de l'outil GeoTrace (Bleu : Sobel horizontal ; Rouge : Sobel verticale ; Vert : Sobel fusionné)

Nous ne présentons ici (Figure 4) que les résultats d'extraction obtenus sur la base du modèle numérique de terrain PALSAR DEM, et plus particulièrement ceux obtenus à l'aide d'algorithmes

utilisant les fenêtres directionnelles de Sobel. Nous remarquons notamment que les résultats utilisant une version fusionnée des images convoluées avec les fenêtres directionnelles (en vert sur la Figure 4) donnent des résultats nettement moins bons que lorsqu'une seule fenêtre directionnelle est considérée (en rouge et en bleu). De même, et bien que nous ayons fait le choix de ne pas les illustrer dans ce rapport, les résultats utilisant les autres algorithmes implémentés (croix de Robert, transformée de Prewitt, transformée de Scharr), eux aussi basés sur des versions fusionnées d'images directionnelles donnent de très mauvais résultats (comparables à ceux obtenus avec l'algorithme « Sobel fusionné »).

Par ailleurs, on observe une assez bonne correspondance entre les résultats obtenus selon différentes fenêtres directionnelles, avec malgré tout des écarts de tracé qui peuvent assez largement dépasser la centaine de mètres. Il pourrait être intéressant, dans un travail futur, de pousser plus loin ces investigations pour mieux évaluer ces différences entre directions de manière à pouvoir rationaliser la méthode d'extraction des linéaments.

II.5 Comparaison d'images de natures différentes

L'un des objectifs affichés de ce stage était d'investiguer le potentiel des images RADAR à bande L pour l'extraction des linéaments, notamment au niveau de la zone de socle ouest-africaine. En effet, la végétation et l'importante couverture nuageuse présente sur cette région durant une bonne partie de l'année contraint fortement les possibilités d'utiliser la télédétection satellitaire optique, contrairement aux enregistrements RADAR à longues bandes pour lesquels la végétation et la basse atmosphère sont totalement transparentes. Mais au-delà de cet état de fait se pose aussi la question de savoir si les objets identifiés sur ces différents types d'images sont ou non équivalents. Et dans le cas contraire, comment comparer ces « linéaments » alors même que ce terme désignerait des objets identifiés selon des bases physiques et des définitions différentes ? La question n'est pas tranchée, et constitue vraisemblablement une limite importante dans l'étude à grande échelle de la fracturation du socle et des liens entre les linéaments et le débit d'exploitation des forages.

Le format de ce rapport ne permet pas d'entrer dans le détail de l'ensemble des interprétations qui ont pu être faites à partir des résultats préliminaires obtenus au cours de ce stage. Nous nous limiterons donc aux principales conclusions :

La Figure 5 montre 3 cartes linéamentaires obtenues à l'aide de l'outil GeoTrace (présenté au §II.4) à partir des 3 jeux de données retenus précédemment (le PALSAR DEM, une image ALOS PALSAR L RTC polarisée HV du 13/08/2007, et une image Sentinel-2 du 25/12/2019). Ces 3 jeux sont représentatifs des 3 types de sources susceptibles d'être utilisées dans le cadre d'une analyse linéamentaire. L'image RADAR a été filtrée à l'aide du filtre de Lee multidirectionnel (présenté au §II.2) tandis qu'une ACP a été réalisée sur les canaux de résolution 10m de l'image optique Sentinel-2 préalablement filtrés (la PC1 constitue le fond de carte de la Figure 5.c).

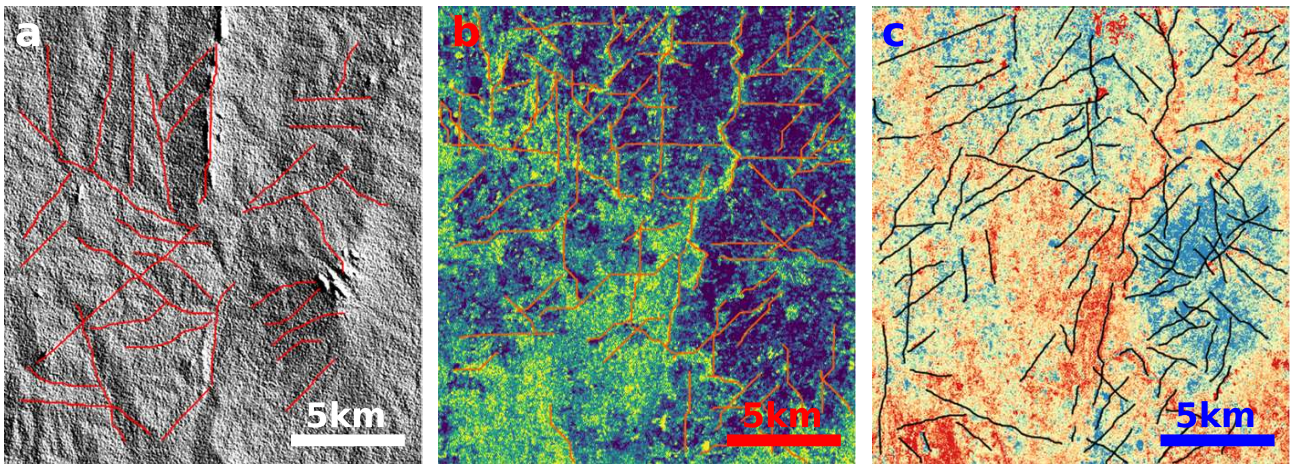


Figure 5 : Résultats de l'extraction des linéaments à l'aide de l'outil GeoTrace sur la base de 3 jeux de données différents : a) MNT PALSAR DEM ; b) image radar ALOS PALSAR L RTC polarisée HV ; c) PC1 de l'image optique Sentinel-2 du 25/12/2019

De façon générale (et conformément aux constatations faites lors d'autres travaux), nous avons remarqué que le MNT présentait moins de détails que les deux autres sources de données (nous distinguons de fait moins de linéaments avec le MNT qu'avec les autres sources de données). Cela peut être dû au traitement des données SRTM nécessaire à l'élaboration d'un MNT ou au traitement informatique utilisé pour le « downscaling » du MNT (dont le protocole nous est inconnu). Concernant l'utilisation des données RADAR, il s'avère que l'image filtrée présente moins de bruit et plus de détails que l'indice de variance directionnelle minimale (voir §II.2). On distingue donc moins de linéaments sur ce dernier que sur l'image filtrée (non illustré). Mais au-delà du nombre, une très bonne cohérence entre les linéaments extraits est observée sur la base de ces deux produits.

A l'usage, il s'avère que c'est avec l'image optique (PC1) que GeoTrace distingue le plus précisément le tracé des linéaments. L'outil a probablement été développé pour distinguer des structures linéaires à partir d'images optiques plutôt que d'images RADAR. Par ailleurs, le choix délibéré de limiter la complexité du protocole de filtrage a peut être eu pour effet de limiter les possibilités de pouvoir distinguer des structures linéaires sur les images RADAR qui, contrairement aux images optiques, sont sujettes à un bruit multiplicatif (chatoiement) qui peut être particulièrement tenace. Un effet de la résolution spatiale, 10m pour l'image Sentinel-2 contre 12,5m pour le MNT et l'image RADAR, n'est pas non plus à exclure.

Pour ce qui est de la correspondance entre linéaments extraits à partir des différentes sources de données, les résultats préliminaires sur la zone de test indiquent qu'elle peut être assez variable suivant la localisation : elle peut être très bonne sur certaines zones et très mauvaise sur d'autres. Cela doit aussi être considéré au regard du nombre de linéaments extraits qui varie sensiblement d'une source de données à l'autre (dans l'ordre croissant : MNT < RADAR < optique)

Conclusion et perspectives

Ce stage aura été pour moi l'occasion de me familiariser avec la problématique de la recherche linéamentaire en zone de socle altéré. Au delà de l'objectif affiché d'améliorer les pratiques et outils de prospection des eaux souterraines dans le contexte ouest-africain, notamment par l'apport de nouveaux outils de télédétection, j'ai pu me rendre compte à quel point celle-ci touchait à d'autres problèmes concrets rencontrés dans bien d'autres domaines : la chaîne d'acquisition des données satellitaires ; le filtrage, le traitement et l'analyse d'images numériques ; le choix des données, des outils, et d'un protocole de traitement, d'analyse et d'extraction, ...

Néanmoins, beaucoup de questions restent en suspens à l'issue de ce travail : Malgré une recherche bibliographique fournie, nous n'avons trouvé de consensus ni sur les données ou indices utilisés pour extraire les fractures, ni sur les méthodes de prétraitement ou de détection de ces linéaments. Par ailleurs, nos résultats préliminaires indiquent que le résultat des extractions (présence et tracé d'un linéament) peut varier sensiblement d'une source de données à l'autre. Dans ce contexte, il pourrait être intéressant de croiser les résultats obtenus avec des données indépendantes (géophysiques par exemple). Cela montre en tout cas l'intérêt de rationaliser les pratiques : de mieux définir l'objet d'étude (qu'est ce qu'on cherche précisément), de rationaliser les opérations de prétraitement des données, de détection et d'extraction de ces linéaments. En tout cas, cela me paraît être un préalable incontournable à toute tentative d'extraction automatique.

Références bibliographiques

Bres S., Jolion J.-M. and Lebourgeois F., "Traitement et analyse des images numériques", édition Hermes Science Publications, Lavoisier, pp. 411, Jul 2003

Centre canadien de télédétection, Ressources naturelles Canada, "Rehaussement radiométrique", pp. 52, ftp://ftp.ccrs.nrcan.gc.ca/ad/MAS/globesar/fre/int5_f.pdf, last access: 15 Aug 2021

Cocquerez J.-P., Philipp S., Bolon P., Chassery J.-M., Demigny D., Graffigne C., Montanvert A., Zédoudj R. and Zerubia J., "Analyse d'Images: Filtrage et Segmentation", édition Elsevier-Masson, Enseignement de la physique, pp. 488, Oct 1995

De Oliveira Andrades Filho C. and Rossetti D. F., "Effectiveness of SRTM and ALOS-PALSAR data for identifying morphostructural lineaments in northeastern Brazil", in International Journal of Remote Sensing, vol. 33, pp. 1058-1077, doi: 10.1080/01431161.2010.549852, Feb 2012

El-Sawy E. K., Ibrahim A. M., El-Bastawesy M. A. and El-Saoud W. A., "Automated, manual lineaments extraction and geospatial analysis for Cairo-Suez district (Northeastern Cairo-Egypt), using remote sensing and GIS", in International Journal of Current Research in Science Engineering & Technology, vol. 3, pp. 491-500, May 2016

- Koita M., "Caractérisation et modélisation du fonctionnement hydrodynamique d'un aquifère fracturé en zone de socle : région de Dimbokro-Bongouanou (Centre Est de la Côte d'Ivoire)", Ph.D. thesis, IRD, Université Montpellier 2, France, 235 pp., Jul 2010
- Lee J.-S., "Digital Image Enhancement and Noise Filtering by Use of Local Statistics", in IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, vol. PAMI-2, no. 2, pp. 165-168, doi: 10.1109/TPAMI.1980.4766994, Mar 1980
- Oussou F. E., Yalo N., Ndehedehe C. E., Oloukoi J., Alassane A., Boukari M. and Gbewezoun V. H. G., "Fracture aquifers identification in the Zou basin (West Africa) using Remote sensing and GIS", in Geocarto International, doi: 10.1080/10106049.2020.1852613, Dec 2020
- Pailou P., Lopez S., Farr T. and Rosenqvist A., "Mapping Subsurface Geology in Sahara Using L-Band SAR: First Results From the ALOS/PALSAR Imaging Radar", in IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, vol. 3, no. 4, pp. 632-636, doi: 10.1109/JSTARS.2010.2056915, Dec 2010
- Schaber G. G., Mc Cauley J. F., Breed C. S. and Olhoeft G. R., "Shuttle Imaging Radar: Physical Controls on Signal Penetration and Subsurface Scattering in the Eastern Sahara", in IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. GE-24, no. 4, pp. 603-623, doi: 10.1109/TGRS.1986.289677, Jul 1986
- Selige T., Böhner J. and Ringeler A., "Processing of SRTM X-SAR data to correct interferometric elevation models for land surface applications", in Göttinger Geographische Abhandlungen, vol. 115, pp. 97-104, Jan 2006
- Shankar B., Tornabene L., Osinski G. R., Roffey M., Bailey J. M. and Smith D., "Automated Lineament Extraction Technique for the Sudbury Impact Structure Using Remote Sensing Datasets - An update", 47th Lunar and Planetary Science Conference, Houston, Texas-US, pp. 2, Mar 2016
- Thiele S. T., Grose L., Samsu A., Micklethwaite S., Vollgger S. A. and Cruden A. R., "Rapid, semi-automatic fracture and contact mapping for point clouds, images and geophysical data", in Solid Earth, vol. 8, pp. 1241-1253, doi: 10.5194/se-8-1241-2017, Dec 2017
- Yao T., Fouché-Grobla O., Oga M.-S. and Assoma V., "Extraction de linéaments structuraux à partir d'images satellitaires, et estimation des biais induits, en milieu de socle précambrien métamorphisé", in Revue Teledetection, Editions des Archives Contemporaines / Editions scientifiques GB / Gordon and Breach Scientific Publishers, vol. 10, no. 4, pp.161-178, Apr 2012

Annexe

Liste des dates pour lesquelles toutes les images satellites enregistrées par Sentinel-2 sur le sud du Bénin sont sans nuages (couverture nuageuse affichée à 0 %) depuis le début de la mission en juin 2015 :

Hiver 2015-2016 :

- 11/12/2015
- 21/12/2015
- 31/12/2015
- 30/01/2016

Hiver 2016-2017 :

- 04/01/2017

Hiver 2017-2018 :

- 30/12/2017
- 04/01/2018

Hiver 2018-2019 :

- 15/12/2018
- 25/12/2018
- 04/01/2019

Hiver 2019-2020 :

- 25/12/2019
- 30/12/2019
- 09/01/2020 (*Harmattan*)
- 19/01/2020 (*Harmattan*)
- 08/02/2020 (*Harmattan*)

Fin de saison sèche 2020-2021 :

- 23/05/2021
(seule situation sans nuages enregistrée en dehors de la période décembre - février)