

Utilisation des images Landsat 8 et l'Indice de Position Topographie (IPT) pour cartographier le Régolite: Implication dans l'exploration géochimique de l'or

[Using Landsat 8 images and Topographic Position Index (TPI) to map regolith units: For gold geochemical exploration implication]

Kio Ali¹, Gnammytchet Barthélemy Koffi¹, Alphonse Kouakou Yao¹, and Moussa Konaté²

¹Laboratoire de Génie Civil, Géosciences et Sciences Géographiques, Institut National Polytechnique Félix Houphouët-Boigny, Yamoussoukro BP 1093, Côte d'Ivoire

²Laboratoire des Eaux Souterraines et des Géoressources, Université Abdou Moumouni, Faculté des Sciences et Techniques, Département de Géologie, BP 10662 Niamey, Niger

Copyright © 2022 ISSR Journals. This is an open access article distributed under the *Creative Commons Attribution License*, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

ABSTRACT: The regolith mapping of the SML concession of the Nigerien Liptako of West Africa has been established by using LANSAT 8 images and topographic position index (TPI). Regolith units were extracted from band reports. The 5/7 ratio has been used to distinguish clay minerals, the 3/1 ratio has been used to determine iron oxide materials and that 4/2 to distinguish ferruginous materials. The color composition of the band 572 by assigning respectively RGB permitted for unsupervised classification because this assignment showed moderately the regolith units. Discrimination of landforms has been realized and performed by IPT. The superposition of the regolith map and that of the relief and the control work in the field made it possible to validate the final regolith units map. This method made possible to classify the regolith units into four groups: alluvial sediments (Da), sedimentary rocks of the "terminal continental" horizontally covering Birimian rocks (Dc), altered and "saproilitized" Birimian rocks sometimes covered by sand, soil or outcrop by the underlying fresh rock (Es) and a layer of sand from the disintegration of rocks of the "terminal continental" and horizontally covering the Birimian rocks (Rs). The study showed that approximately 70% of the study area is ideal and more than 30% has a negative impact on geochemical exploration for gold and therefore requires specialized sampling techniques. This shows that the method used is effective in mapping regolith units in the Nigerien Liptako and also in similar areas.

KEYWORDS: Regolith Mapping, Remote Sensing, Nigérien Liptako, Gold, Sampling.

RESUME: La carte du régolite de la concession SML du Liptako nigérien de l'Afrique de l'Ouest a été réalisée par l'utilisation des images OLI de LANSAT et l'indice de position topographie (IPT). Les unités du régolite ont été extraites à partir des rapports des bandes. Le rapport 5/7 a permis de discriminer les minéraux argileux, le rapport 3/1 a permis pour déterminer les matériaux oxydés et celui de 4/2 a permis de distinguer les matériaux ferrugineux. La composition colorée des canaux 572 en assignant respectivement RGB a permis de faire classification non supervisée car cette assignation montrait modérément les unités de régolite. La discrimination des formes du relief a été effectuée par l'IPT. La superposition de la carte du régolite et celle du relief et les travaux de contrôle sur le terrain a permis de valider la carte finale des unités du régolite. Cette méthode a permis de classer les unités de régolite en quatre groupes: les sédiments alluvionnaires (Da), les roches sédimentaires du « continental terminal » recouvrant horizontalement les roches birimiennes (Dc), les roches birimiennes altérées et « saprolitisées » parfois recouvertes par du sol peu épais où de l'affleurement par la roche fraîche sous-jacente (Es) et une couche de sable provenant de la désintégration des roches du « continental terminal » et recouvrant horizontalement les roches birimiennes (Rs). L'étude a montré qu'à peu près 70 % de la zone d'étude est idéale et plus de 30 % a un impact négatif sur l'exploration géochimique de l'or et nécessite donc des techniques d'échantillonnages spécialisées. Cela montre que la méthode utilisée est efficace pour cartographier les unités de régolite dans le Liptako nigérien et aussi dans des zones similaires.

MOTS-CLEFS: Cartographie du Régolite, Télédétection, Liptako nigérien, Or, Echantillonnage.

1 INTRODUCTION

En Afrique de l'Ouest, les zones tropicales et semi-arides sont recouvertes par des régolites [1], [2] provenant de la transformation des formes du relief préexistante. Le développement de ses formes et leurs transformations au cours des temps géologiques engendrent des modèles de régolite important [3]. Les régolites sont dans de nombreux cas une entrave à l'exploration minière [4]. La signature géochimique des roches minéralisées est modifiée par le processus d'altération [5], [6]. A cela s'ajoute d'autres processus géologiques par exemple le dépôt des matériaux pouvant redistribués ou masqués la minéralisation et rendant l'exploration difficile [7]. D'une part, les techniques adaptées [1] permettant d'échantillonner les matériaux en place et d'autre part l'interprétation des anomalies géochimiques [8] sont les énormes challenges pour l'exploration géochimique de l'or. Il est couramment épineux de délimiter des anomalies géochimiques réalistes sans intégrés dans l'interprétation les données des processus de transformation qui ont affecté l'environnement du régolite [9]. Afin de bien orienter et planifier les travaux d'exploration géochimique, il est nécessaire d'avoir une bonne compréhension de l'environnement du régolite. Dans le Liptako nigérien, l'environnement du régolite est mal connu. De ce fait, les unités de régolite de la zone doivent être identifiées afin d'analyser leurs impacts sur exploration géochimique de l'or. Plusieurs travaux [10], [11], [12], [13], [14] ont montré l'importance de la cartographie du régolite. Ainsi, en Afrique de l'Ouest, divers auteurs [1], [4], [14], [15] ont fait des recherches sur les méthodes de cartographie du régolite. Ses études montrent que les méthodes diffèrent en fonction du relief de la zone et celles qui s'appliquent à une localité ne s'adaptent pas nécessairement à l'autre. Pour apporter une esquisse de solution à cette situation, il est important de réaliser une carte du régolite, qui prend en considération l'évolution climatologique, géomorphologique et le processus d'altération afin de normaliser les phases de la cartographie des unités de régolite du Liptako nigérien en Afrique de l'ouest. La méthodologie portait sur l'interprétation des images OLI de LANSAT 8 et l'IPT. L'objectif de cet article est de mettre en place une méthode de cartographie des unités du régolite afin d'analyser leurs impacts sur l'exploration géochimique de l'or.

2 MATERIEL ET METHODES

2.1 PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE

La zone d'étude fait partir de la concession SML du Liptako nigérien. Elle est localisée dans la région du Liptako, partie Sud-ouest du Niger (Figure 1). Il s'agit du permis d'exploitation Tiawa d'une superficie de 82 km² octroyé par arrêté 0027 /MME/DM, 20 mars 2006. Elle est localisée à 100 kilomètres environ à l'ouest de Niamey, la capitale du Niger. Administrativement, le périmètre de Tiawa se trouve dans le département de Tera, région de Tillabéri. La route d'accès primaire (Figure 1) longe la route nationale bitumée de Niamey-Tilabéry, le long de la rive gauche du fleuve Niger jusqu'à Farié, qui se situe à 55 kilomètres à l'ouest-nord-ouest de la capitale. Les véhicules joignent la rive droite du fleuve en traversant le fleuve Niger par le pont de Farié. A partir de Farié, le site est accessible par une route latéritique praticable en toute saison, sur une distance de 70 kilomètres, longeant généralement la rive nord de la rivière Sirba, affluent du fleuve Niger.

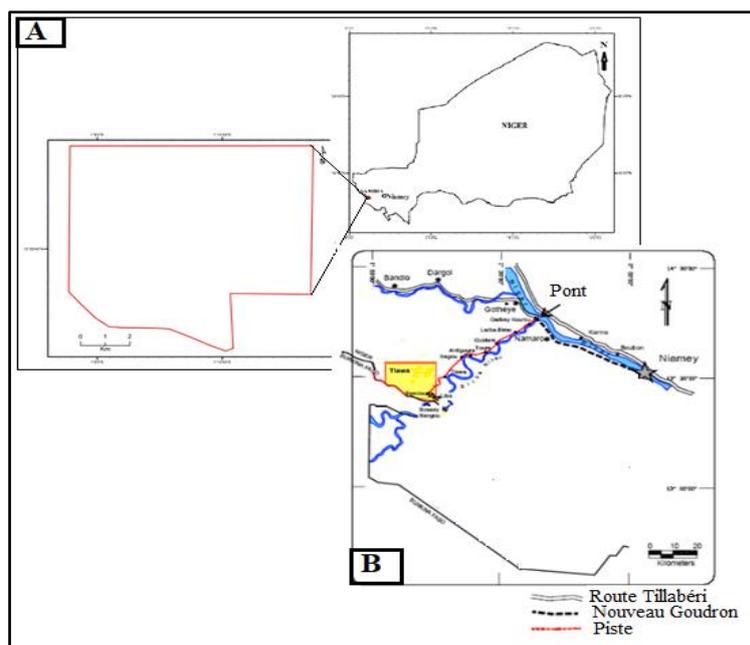


Fig. 1. Présentation de la zone d'étude A- situation géographique B- accès

2.2 GEOLOGIE DE LA ZONE D'ETUDE

La concession SML appartient à la région du Liptako nigérien de l'extrémité Nord-Est du domaine Baoulé-Mossi, qui constitue le Protérozoïque inférieur du bouclier de Léo, dorsale méridionale du Craton de l'Afrique de l'Ouest (Figure 2). Les formations géologiques sont réparties entre un socle birrimien d'âge paléo-protérozoïque moyen et des formations de couverture représentées par le Voltaïen d'âge néoprotérozoïque, les formations du continental terminal d'âge Miocène à pliocène et des ensembles récents quaternaires [36]. Les roches méta-volcano-sédimentaires et méta-plutoniques sont classées en trois sillons ou ceintures volcano-sédimentaires, séparées par des massifs de granitoïdes.

Ce sont:

- le sillon de Goroul;
- le sillon de Téra;
- le sillon de la Sirba.

Ces sillons se composent de roches supracrustales métamorphiques, dont le degré de métamorphisme varie du faciès schiste vert à amphibolite et qui constituent des successions alternantes de roches volcaniques de composition tholéiitique à calco-alcaline et de faciès sédimentaires grésopélitiques.

Sur le plan structurale [16], les roches birimiennes du craton ouest africain ont été déformées par trois phases tectono-métamorphiques majeures durant l'orogénèse éburnéenne (2 200 à 2 000 Ma). Au cours de la première phase (D1) de compression, les formations supracrustales du Protérozoïque inférieur ont été chevauchées sur le socle archéen. Les phases suivantes (D2 et D3) représentent des déformations principalement par cisaillement horizontal (décrochements). La phase D2 était accompagnée par la mise en place d'importants volumes de roches granitoïdes et des zones de cisaillement d'orientation NE-SW dominaient la phase D3. L'étude de structures géologiques suggère que les successions volcano-sédimentaires ont subi les effets d'une déformation cisailante à caractère souple. L'ensemble des faciès volcano-sédimentaires est marqué par une schistosité bien exprimée.

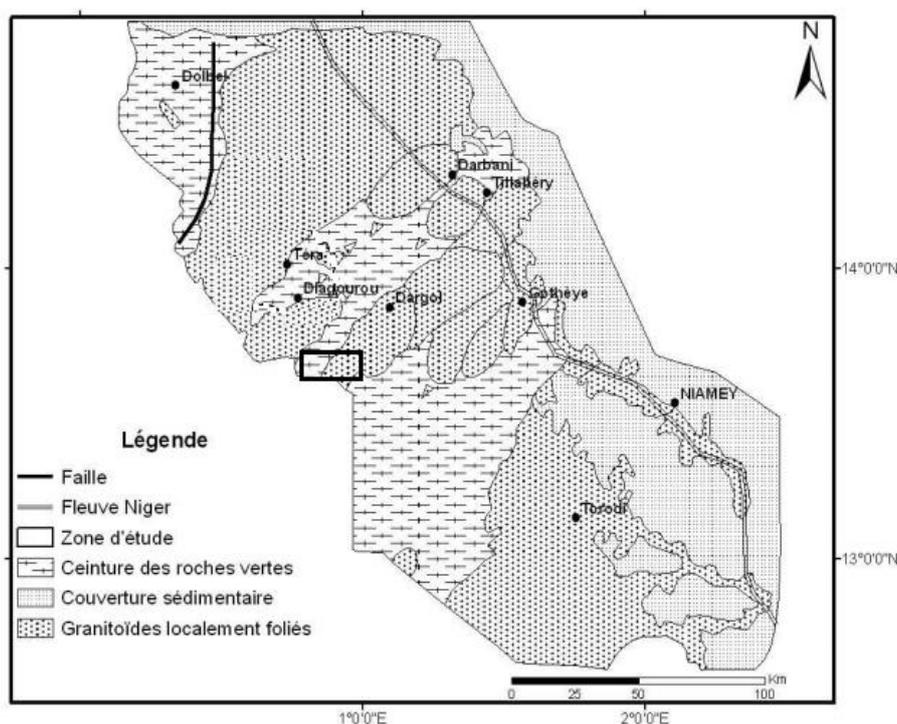


Fig. 2. Carte géologique simplifiée du Liptako nigérien [36]

2.3 MATERIEL

Pour mener à bien ce travail, les matériels utilisés sont: les images OLI de LANDSAT 8, le modèle numérique de terrain MNT d'ASTER (GDEM) et les différents matériels informatiques. Les images OLI de LANDSAT 8 (« LANDSAT_SCENE_ID = LC81930512013158LGN01 ») couvrant le permis d'exploitation de la SML ont été téléchargées sur le site USGS à l'adresse suivante <https://earthexplorer.usgs.gov/>. Le Modèle Numérique de Terrain MNT de ASTER (GDEM) utilisé a été publié en octobre 2011 et est disponible à l'adresse: <http://asterweb.jpl.nasa.gov/gdem.asp>. Cette version offrait une résolution spatiale améliorée et une précision horizontale et verticale

accrue comparée à la première version publiée en juin 2009. Le traitement de toutes ces données s'est fait à l'aide des logiciels, installés sur un ordinateur équipé d'un processeur « Intel Core i5 7th Gen » de marque HP, d'une mémoire RAM de 8 Go et d'un disque dur d'un Téraoctet. Cet équipement a permis d'exécuter les programmes de l'ensemble des logiciels. Tous les travaux de prétraitement et de traitement des images OLI de LANDSAT 8 ont été exécutés à travers les logiciels ENVI 5.1 et ArcGis 10.4.1. Le modèle numérique de terrain MNT de ASTER (GDEM) n'a subi aucun prétraitement si ce n'est l'extraction de la zone d'étude sur ArcGis 10.4.1. Mais son traitement a été effectué à partir de l'algorithme « tpi_jen.avx » développée par l'entreprise Jeff Jenness [17] qui fonctionne avec les logiciels ESRI.

2.4 METHODOLOGIE

2.4.1 APPROCHE DE CARTOGRAPHIE DU REGOLITE

La cartographie des unités de régolites à partir des images satellitaires permet d'étudier l'évolution géomorphologique ainsi que le processus d'altération des zones tropicales ou semi-aride dans lesquelles les affleurements sont inégalement répartis ou absents. Toute fois la cartographie et l'interprétation des unités de régolite doivent être faites avec réserve car elles nécessitent une bonne compréhension du terrain. Les images de télédétection peuvent fournir des informations précieuses pour la cartographie et la détermination des unités de régolite [18]. Pour analyser les images de télédétection, la composition colorée et le rapport des bandes sont couramment utilisées pour extraire les informations [19], [20], [21], [22]. Les auteurs [23], [24] ont défini le régolite comme tous les matériaux qui se trouvent au-dessus du substratum rocheux. Cette définition tient compte des alluvions, des colluvions, du calcaire, des crêtes et des matériaux altérés. De même les matériaux carbonatés, siliceux et les minéraux ferrugineux sont des composants du régolite. Donc le régolite est l'ensemble des formations géologiques superficielles composées de la couverture latéritique et les matériaux meubles.

Ses matériaux proviennent non seulement de l'altération chimique des roches sous-jacentes mais aussi du processus d'érosion, de transport et de sédimentation à la surface de la terre.

2.4.2 METHODE DE TRAITEMENT DES IMAGES OLI DE LANDSAT 8

Les images OLI de LANDSAT 8 bénéficient d'un étalonnage radiométrique et d'une correction atmosphérique avant tout traitement. L'ensemble des procédés du traitement et d'extraction de l'information à partir des images est résumé sur l'organigramme de l'approche méthodologique suivant (Figure 3).

Tableau 1. Classification des formes du relief basé sur le TPI

1	Canyons, vallées fortement encaissées
2	Pentes moyennes, vallées peu profondes
3	Sources, plateaux drainés
4	Vallées en forme de U
5	Plaines
6	Pentes ouvertes
7	Plateaux, pentes sommitales
8	Crêtes locales, buttes dans les vallées
9	Crêtes à mi-pente, petites collines en plaine
10	Sommets, crêtes

2.4.4 STAGE DE TERRAIN

Le travail sur le terrain a consisté à une investigation claire et concise pour la reconnaissance des matériaux en place ou non à travers laquelle les unités identifiées et vérifiées au sol ont été reportées sur les cartes. Les matériaux de surface ont été examinés. Les formes du relief ont été caractérisées. A chaque endroit contrôlé, des observations ont été faites sur les unités cartographiées et leurs environnements de dépôt.

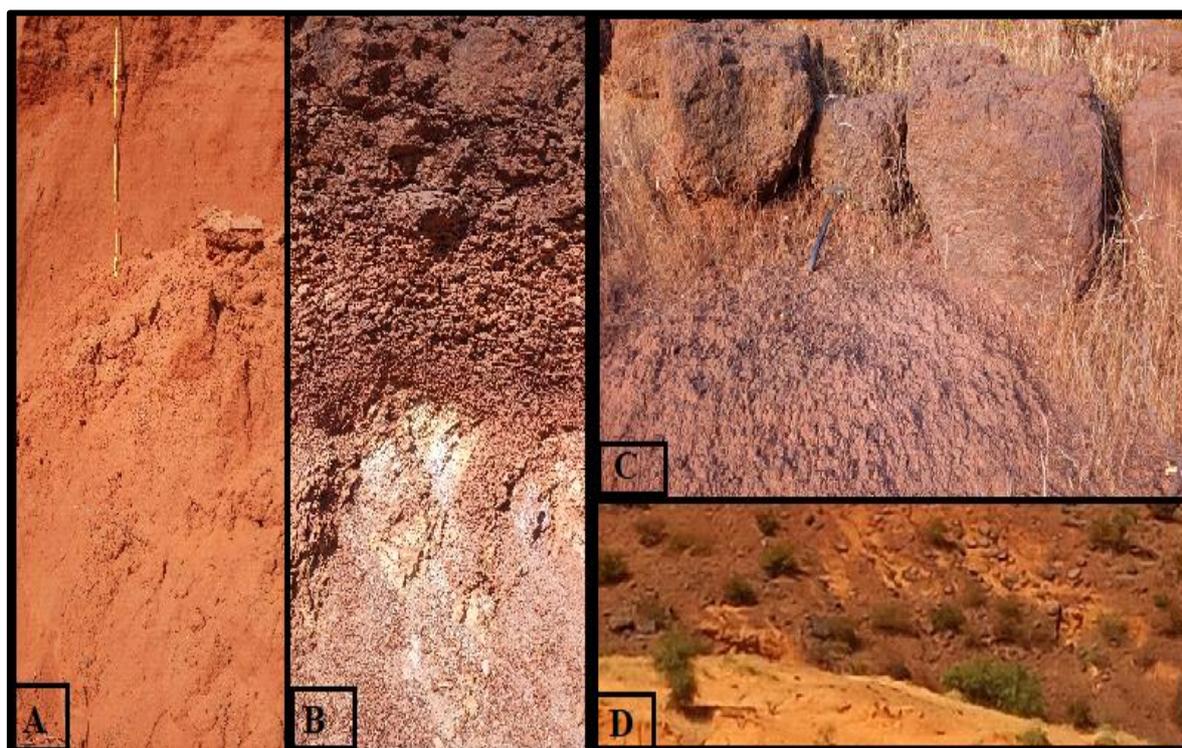


Fig. 4. Photos terrain A- dépôt du sable; B- Zone érodée; C- Latérites; D- Sable en bord de colline

3 RESULTATS

3.1 RATIO DES BANDES

Le rationnement des bandes est un processus d'amélioration de la valeur de la luminosité des pixels dans lequel une bande est divisée par toute autre bande du capteur. Il permet également de réduire ou éliminer les effets d'ombrage [20]. Trois ratios de bande ont été utilisés (Fig 5).

- Le ratio bande 5/7 est un excellent moyen pour identifier de minéraux hydratés tels que les argiles, alunite [21], [20]. Une valeur élevée de l'indice d'argile indique la présence de minéraux argileux tandis qu'une valeur faible indique des roches non altérées [22]. La variation spatiale de la teneur en argile dans la zone d'étude (Figure 5-A) a révélé une diversité de l'intensité de l'altération. Les tonalités rouges représentent les valeurs élevées de l'indice de l'argile.
- Le rapport 3/1 met en évidence la présence de l'oxyde de fer [28], [20], [21]. Une valeur élevée de l'indice de l'oxyde de fer montre la présence des minéraux de fer altérés et une valeur faible indique des zones sans oxyde de fer [22]. Dans la zone d'étude (Figure 5-B), les tonalités rouges représentent les valeurs élevées de l'indice de l'oxyde de fer.
- Le rapport 4/2 permet de séparer les ferrugineux du régolite non ferrugineux [14]. Une valeur élevée correspond à une teneur élevée en minéraux ferreux tandis qu'une valeur faible indique la présence de minéraux non ferreux (Figure 5-C). Les tonalités rouges représentent les valeurs élevées de l'indice des matériaux ferrugineux.

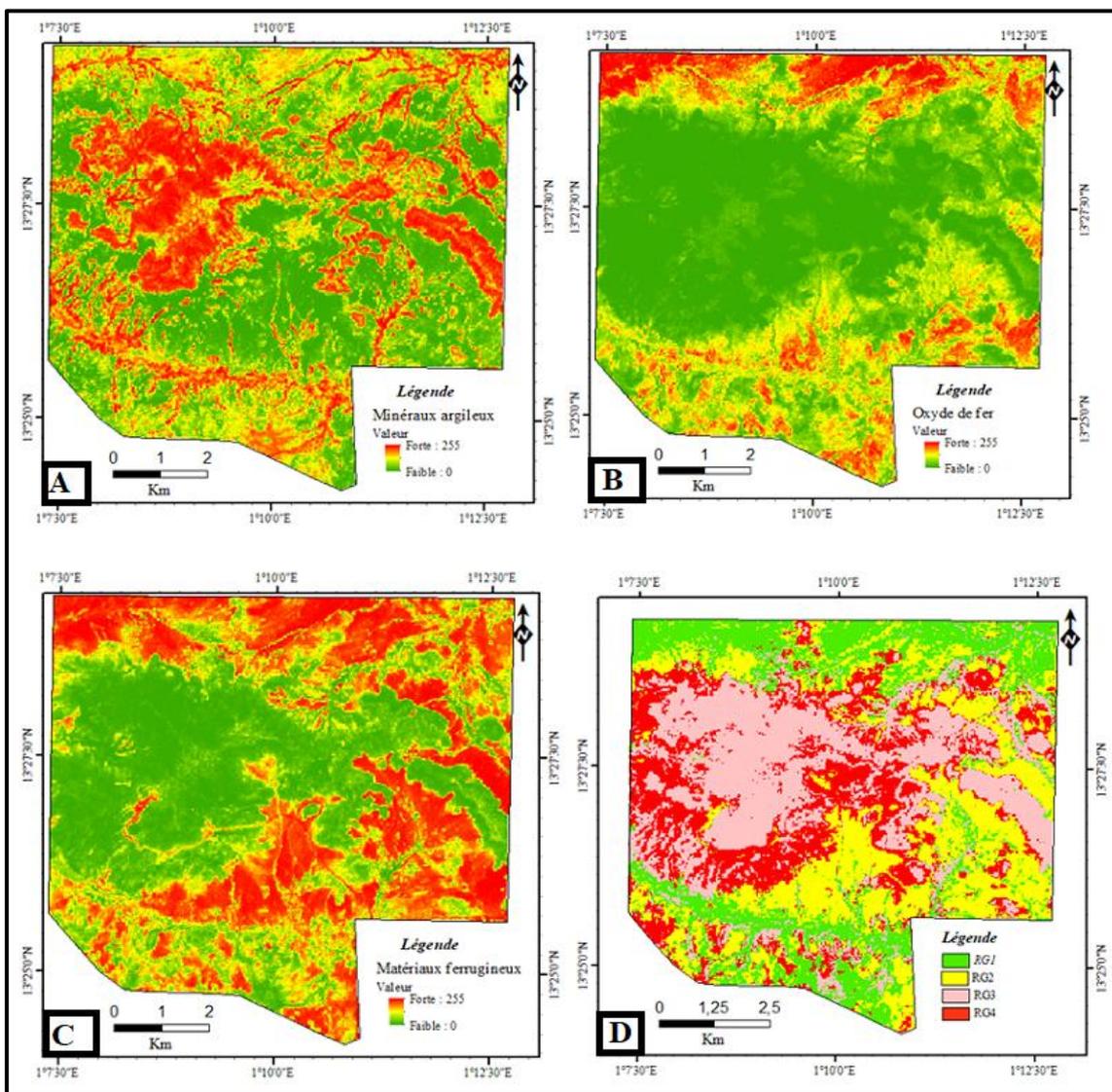


Fig. 5. Ratio des bandes images OLI A- Carte de l'indice d'argile; B- Carte de l'indice d'oxyde de fer; C- Carte des matériaux ferrugineux; D- Carte des différentes classes du régolite

Dans le contexte spatial, la classification non supervisée a été largement étudiée pour analyser des images ou des données de télédétection [29]. Elle est devenue une méthode généralement utilisée pour cartographier des zones [30]. La méthode couramment utilisée est l'algorithme de cluster qui est une technique d'analyse des données hiérarchiques et itératives par agrégation. C'est une méthode performante pour les scènes LANDSAT [31]. Contrairement à la classification supervisée, la classification non supervisée ne commence pas par l'échantillonnage. A la place de cela, on définit le nombre de classes, puis l'ordinateur regroupe automatiquement les pixels statistiquement similaires et en catégorie à l'aide de l'algorithme de cluster. La composition colorée des canaux 572 en assignant respectivement RGB a permis de faire cette classification car cette assignation montre modérément les types de régolite que les autres assignations. La classification a été effectuée et produite quatre classes différentes (Figure 5-D).

3.2 CARTOGRAPHIE DES FORMES DU RELIEF

3.2.1 PARAMETRAGE DU RAYON DE L'IPT

Le paramétrage du rayon d'analyse de l'indice de position topographique (IPT) a permis le couplage d'une petite et d'une grande échelle pour une bonne prise en compte de l'emboîtement des formes du relief. La petite échelle est de 3x3 et la grande 11x11. La classification des reliefs via l'algorithme de J.J de la petite cellule 3x3 a donné lieu (Figure 6-A) et celle de la grande échelle est illustrée (Figure 6-B).

Selon les figures 10 et 11, les valeurs de l'indice de position topographique sont comprises entre -8,96 et 10,82 pour la petite échelle 3x3 et pour la grande échelle 11x11 elle se trouve entre -17,97 et 28,83.

Après avoir mis la carte de l'indice de position topographique pour chaque échelle, la carte de classification des reliefs a été générée. Cette carte de classification des reliefs générés sur la base des valeurs calculées de l'indice de position topographique est montrée (Figure 6-C). Les classes sont constituées les vallées, les plaines, les plateaux et les collines.

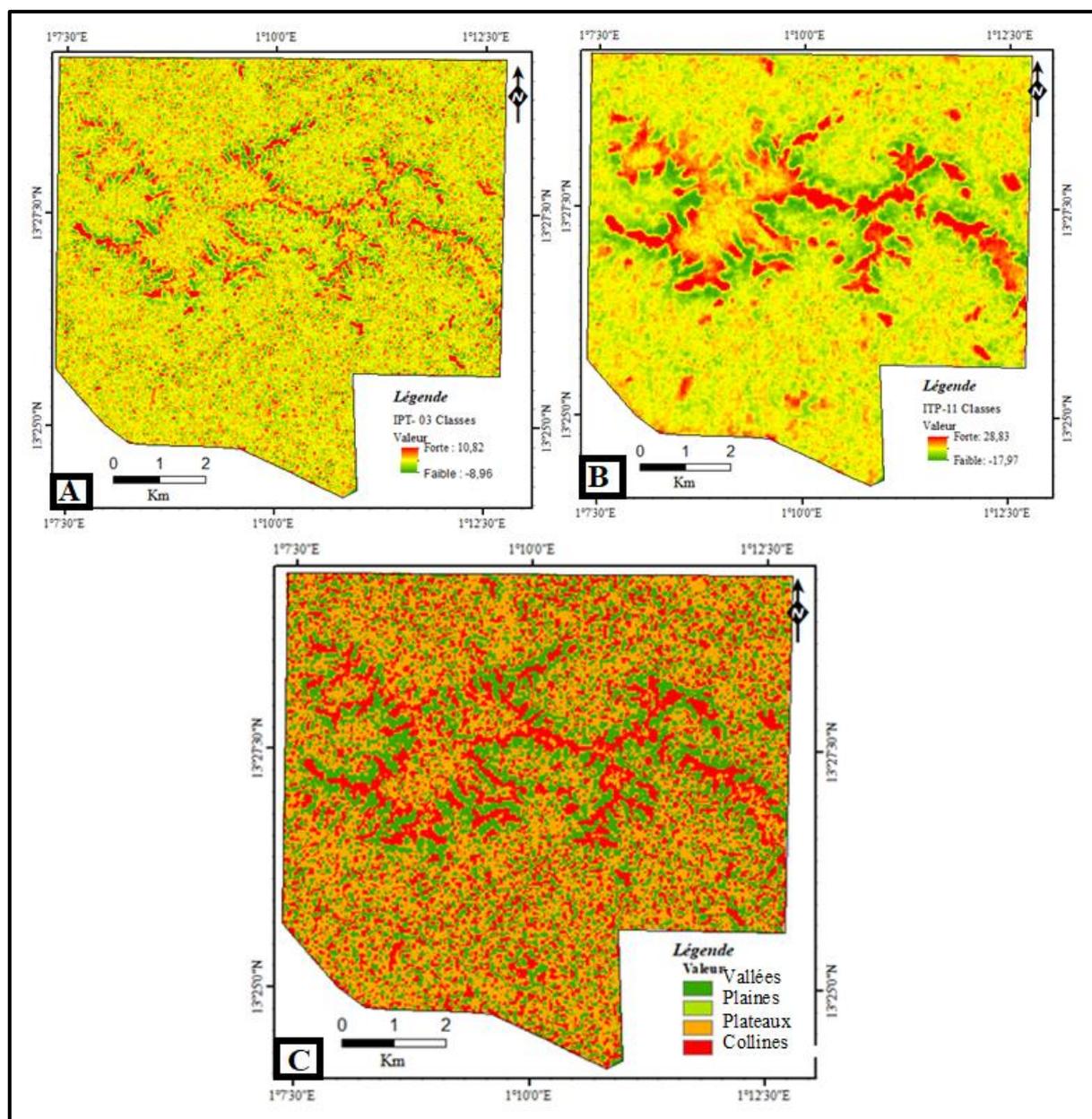


Fig. 6. Carte à base de l'IPT A- Carte IPT- 03 Classes; B- Carte IPT- 11 Classes; C- Carte des formes du relief

3.3 SUPERPOSITION ET VALIDATION

La carte de régolite issue de la classification non supervisée et celle des formes du relief générées à l'aide de l'indice de position topographique ont été utilisées pour effectuer la superposition. Dans ce travail, les formes du relief ont été utilisées comme les substituts des types de régolites [14]. En plus les techniques de corrélation spatiale entre le relief et le régolite ont été utilisées. A l'échelle cartographique, les zones dans lesquelles les caractéristiques des formes du relief et des types de régolite sont similaires peuvent être isolées [32], [33], [34], [2], [35], [15].

Le contrôle sur le terrain pour valider les unités de régolite qui sont extraites du traitement numérique des images satellites et de l'indice de position topographique est indispensable pour évaluer la performance de la méthodologie utilisée. A ce titre une mission du terrain a été faite en Mai 2021 afin de valider les résultats obtenus par le traitement des images OLI de LANDSAT 8 et l'indice de position topographique dans la zone d'étude. Les levés de reconnaissance ont été réalisés sur une partie représentative de la zone d'étude en tenant compte de l'accessibilité du terrain et les unités de régolite à traverser. Ils nous ont permis de constater que la majorité des unités de régolite visible sur le terrain est identique à celles retrouvées par le traitement télé-analytique sauf quelques chevauchements par endroit. Au moment de cette reconnaissance, les informations sur le processus de transformation des formes du relief et du régolite ont été codées et utilisées tout au long de ce travail. Cela concerne l'attribution des lettres majuscules pour les unités et le processus de transformation des formes du relief et des lettres minuscules pour le type du régolite. Le degré d'oxydation était désigné par faible, moyen ou fort tableau 2 ci-dessous.

Tableau 2. Classification des unités du régolite

Formes	Code	Types de Régolite	oxydation
Dépôt	Da	Alluvions	moyenne
	Dc	Latérites du « Continental Terminal » recouvrant horizontalement les roches birimiennes	faible
Erosion	Es	Sol peu épais sur les roches birimiennes altérées « Saprolite »	forte
Résiduel	Rs	Couche de sable recouvrant les roches birimiennes	faible

De plus, les informations sur la puissance des unités de régolite ont été recueillies à partir de certaines tranchées, log et débris des sondages RC (Figure 7).

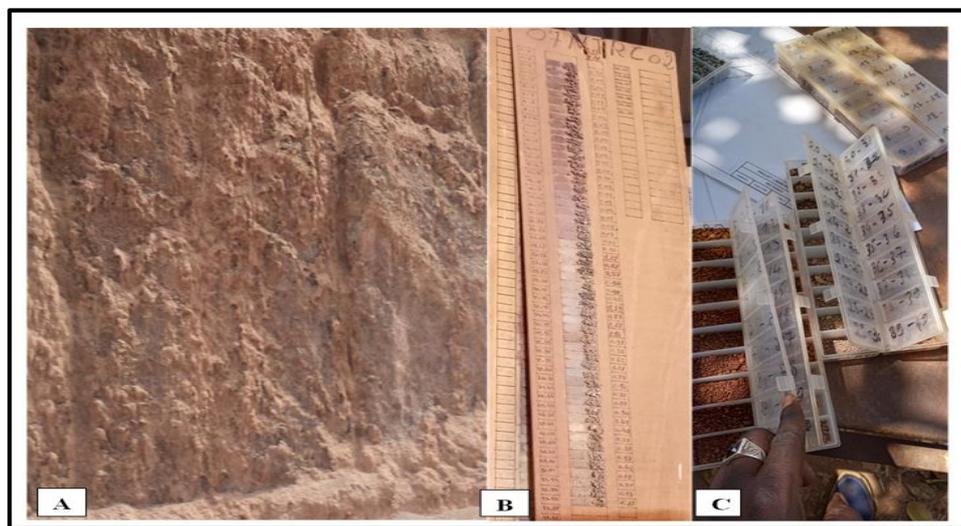


Fig. 7. Photos de reconnaissance A- Tranché; B- Log; C- Débris des sondages RC

Elles ont montré une analogie entre les matériaux du régolite superficiels et les différents types de régolites interprétés. La déduction des unités de régolites a été effectuée sur la base de l'exactitude de l'interprétation des unités résultants du traitement numérique des images OLI de LANDSAT 8, de l'indice de position topographique et les données vérifiées sur terrain. La carte de régolite ainsi obtenue figure 8 dans le cadre de cette étude a été réalisée dans un environnement SIG. Elle servira de base pour l'analyse de l'impact du régolite pour une meilleure exploration géochimique dans la zone d'étude.

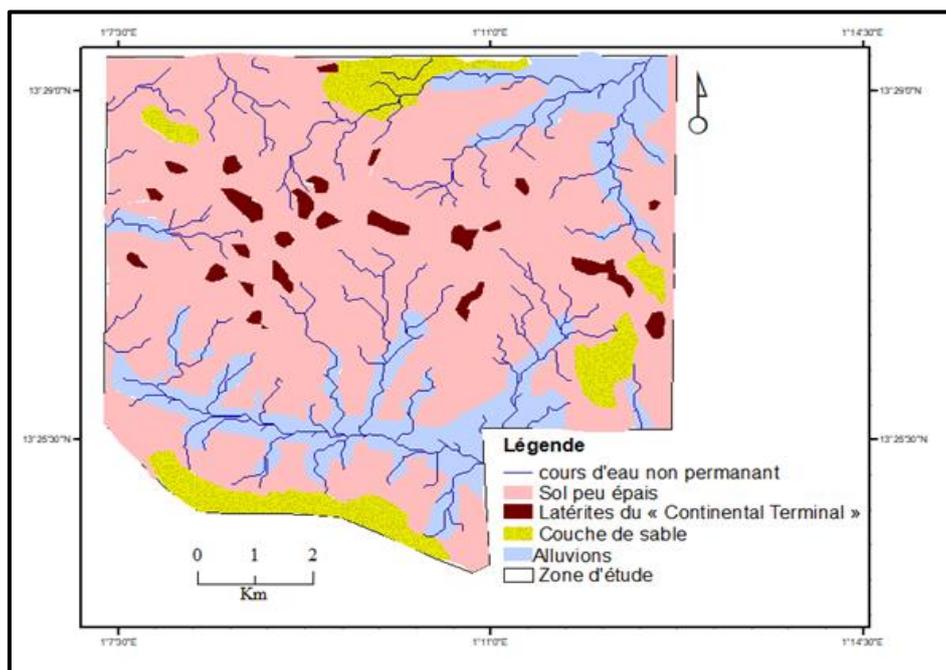


Fig. 8. Carte des unités du régolite

4 INTERPRETATIONS

Au cours des temps géologiques, l'évolution climatologique et géomorphologique ainsi que le processus d'altération du Liptako nigérien soulignent la présence des régolites complexes dans la zone d'étude. Globalement, la zone d'étude pourrait être subdivisée en trois zones différentes en relation avec les unités du régolite présentes (Figure 8).

En outre, la zone composée des parties Sud et Nord du permis contenant essentiellement des sédiments alluvionnaires (Da), présente une couverture de dépôt des sédiments alluvionnaires d'épaisseur méconnue compromettant l'exploration géochimique par l'inefficacité de l'échantillonnage. Pour la grande partie de ses sédiments alluvionnaires, il s'agit du sable d'origine éolienne qui recouvre une grande partie, des dunes de sable de fois linéaires orientées dans la direction Sud-Est d'épaisseur souvent plus de 20 m par endroit. A cela s'ajoute un important dépôt d'alluvions récentes ou des matériaux transportés de fois ferrugineux qui est associé aux cours d'eau non permanent dans une partie de l'année de la zone.

Puis, la zone constituée du centre vers l'ouest est composée majoritairement des roches birimiennes altérées (Es) ainsi des roches sédimentaires du « continental terminal » (Dc). Dans cette partie du permis composée principalement des roches birimiennes saprolitisées. Leurs affleurements se présentent généralement sous la forme de faible colline rocheuse tantôt lisse ou de plaine qui coupe étroitement par des chenaux la saprolite développée à partir de la roche sous-jacente. Le matériel transporté ou le sol peu épais qui s'est développé sur la saprolite possède localement une puissance à peu près de 30 cm. Les roches sédimentaires du « continental terminal » sont des grès ayant subis une latéritisation d'épaisseur généralement supérieures à des dizaines de mètres par endroit. Elles se reposent en discordance sur les roches birimiennes. Les roches du « continental terminal » pourraient sans nul doute modifier la signature des minéralisations des roches sous-jacentes et rendre difficile la découverte des anomalies géochimiques.

En fin, la zone Sud-Est est composée du sable provenant de la désintégration des roches du « continental terminal » (Rs). Cette partie Est du permis contenait des faibles dépôts de sable possédant une épaisseur assez faible, la plupart du temps inférieurs à 1 mètre. Ils sont dérivés de l'érosion du grès « Continental Terminal » développé sur les roches birimiennes altérées. Ses dépôts ont été observés à plusieurs endroits où ils sont partiellement ferrugineux. Dans certains endroits la saprolite était présente, c'est qui prouve la faible puissance de la couche de sable.

Dans la zone d'étude, les régolites peuvent être subdivisés en deux grandes parties pour les besoins de l'exploration géochimique. En première lieu, à peu près 30 % de la zone d'étude qui regroupe la zone couverte par des sédiments alluvionnaires et la zone contenant des roches sédimentaires du « continental terminal » recouvrant horizontalement les roches birimiennes où les méthodes d'échantillonnages conventionnelles sont inopérantes et inefficaces. En seconde partie, plus de 70% du permis qui correspond à la zone composée des roches birimiennes altérées et « saprolitisées » parfois recouvertes par du sol peu épais ou de l'affleurement par la roche fraîche sous-jacente et la zone constituée d'une couche de sable provenant de la désintégration des roches du « continental terminal » recouvrant horizontalement les roches birimiennes. Dans cette partie l'échantillonnage conventionnel peut être utilisé.

5 CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

La carte du régolite de la concession SML du permis d'exploitation Tiawa été produite grâce à l'utilisation des images Landsat 8 et de l'indice de position topographique (IPT). Cela démontre l'utilité et l'efficacité de la télédétection et de l'IPT dans la cartographie du régolite.

Dans la zone d'étude, l'étude a permis de cartographier quatre unités de régolite à savoir les sédiments alluvionnaires, les roches sédimentaires du « continental terminal », les roches birimiennes altérées et « saprolitisées » parfois recouvertes par du sol peu épais ou de l'affleurement par la roche fraîche sous-jacente et le sable provenant de la désintégration des roches du « continental terminal ».

Ainsi, l'étude a montré qu'à peu près 70 % de la zone est recouverte des matériaux provenant de diverses sources telles que les roches birimiennes altérées et « saprolitisées » parfois recouvertes par du sol peu épais ou de l'affleurement par la roche fraîche sous-jacente et du sable provenant de la désintégration des roches du « continental terminal ».

Aussi, l'étude a également montré que plus de 30 % du terrain était recouvert des sédiments alluvionnaires et les roches sédimentaires du « continental terminal » recouvrant les roches birimiennes. Dans l'environnement superficiel, ses matériaux ont un impact négatif sur l'exploration géochimique de l'or. Cette partie nécessite des techniques d'échantillonnages spécialisées couplées à une cartographie détaillée du régolite de façon à agir adéquatement l'effet d'un recouvrement pouvant masquer les cibles de l'exploration géochimique.

A partir des résultats escomptés, l'étude propose l'utilisation de la méthode de télédétection et de l'IPT pour la cartographie du régolite dans le Liptako nigérien et dans des environnements similaires. Par ailleurs, elle suggère de forer ou de foncer des puits jusqu'à la saprolite. Cette technique d'échantillonnage permettrait de détecter des signaux géochimiques issus des minéralisations aurifères cachées. Toutefois, l'exploration géochimique nécessite une bonne connaissance des diverses formes que peuvent prendre les matériaux transportés de façon à pouvoir les identifier adéquatement sur chaque point d'échantillonnage.

REFERENCES

- [1] D. Chardon, J.-L. Grimaud, A. Beauvais, et O. Bamba, « West African lateritic pediments: Landform-regolith evolution processes and mineral exploration pitfalls », *Earth-Science Reviews*, vol. 179, p. 124-146, avr. 2018, doi: 10.1016/j.earscirev.2018.02.009.
- [2] E. Arhin, « Use of regolith geochemistry to delineate gold mineralisation under cover: a case study in the Lawra belt, NW Ghana », *undefined*, 2013.
- [3] A.-G. Patrick, A. Ewusi, et A. Yeboah, « Weathering and its influence on regolith mapping in mineral exploration: A case study on the Manso Amenfi gold project in the Western Region of Ghana. », nov. 2012.
- [4] B. Sawadogo, O. Bamba, et D. Chardon, « Landform-regolith mapping in the West African context », *Ore Geology Reviews*, vol. 126, p. 103782, nov. 2020, doi: 10.1016/j.oregeorev.2020.103782.
- [5] R. R. Anand et M. Paine, « Regolith geology of the Yilgarn Craton, Western Australia: implications for exploration », *Australian Journal of Earth Sciences*, vol. 49, no 1, p. 3-162, 2002, doi: 10.1046/j.1440-0952.2002.00912.x.
- [6] K. McQueen et K. Scott, « Rock Weathering and Structure of the Regolith », in *Regolith Science*, K. Scott et C. Pain, Éd. Australia: CSIRO Publishing, 2009, p. 103-126.
- [7] N. T. Arndt, L. Fontboté, J. W. Hedenquist, S. E. Kesler, J. F. H. Thompson, et D. G. Wood, « Future Global Mineral Resources », *Geochemical Perspectives*, vol. 6, no 1, p. 1, 2017, doi: 10.7185/geochempersp.6.1.
- [8] R. R. Anand et C. R. M. Butt, « A guide for mineral exploration through the regolith in the Yilgarn Craton, Western Australia », *Australian Journal of Earth Sciences*, vol. 57, no 8, p. 1015-1114, déc. 2010, doi: 10.1080/08120099.2010.522823.
- [9] Q. Cheng, « Singularity theory and methods for mapping geochemical anomalies caused by buried sources and for predicting undiscovered mineral deposits in covered areas », *Journal of Geochemical Exploration*, vol. 122, p. 55-70, nov. 2012, doi: 10.1016/j.gexplo.2012.07.007.
- [10] M. A. Craig, « Regolith mapping for geochemical exploration in the Yilgarn Craton, Western Australia », *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*, vol. 1, no 4, p. 383-390, nov. 2001, doi: 10.1144/geochem.1.4.383.
- [11] C. Pain, R. Chan, M. Craig, D. Gibson, P. Ursem, et J. Wilford, « RTMAP REGOLITH DATABASE FIELD BOOK AND USERS GUIDE », p. 101.
- [12] K. McQueen, « The nature, origin and exploration significance of the regolith, Girilambone-Cobar Region: Exploration Field Workshop Cobar Region 2004 », *Exploration Field Workshop Cobar Region 2004*, p. 51-56, 2004.
- [13] R. R. Anand, « WEATHERING HISTORY, LANDSCAPE EVOLUTION AND IMPLICATIONS FOR EXPLORATION », p. 31.
- [14] E. Arhin, R. T. Jenkin, D. Cunningham, et P. Nude, « Regolith mapping of deeply weathered terrain in savannah regions of the Birimian Lawra Greenstone Belt, Ghana », *Journal of Geochemical Exploration*, vol. 159, sept. 2015, doi: 10.1016/j.gexplo.2015.09.008.
- [15] C. Ntori, E. Arhin, A. Sulemana, et D. Boateng, « Characterization of Regolith Types and its Impact on Gold Anomaly in Highly Weathered Terrains Using Multiple Dataset », *International Journal of Geography and Geology*, vol. 8, p. 137-152, janv. 2019, doi: 10.18488/journal.10.2019.84.137.152.

- [16] A. Soumaïla et M. Konaté, « Caractérisation de la déformation dans la ceinture birimienne (paléoprotérozoïque) de Diagorou-Darbani (Liptako nigérien, Afrique de l'Ouest) », *Africa Geoscience Review*, vol. 12, no 3, p. 161-178, oct. 2005, Consulté le: 3 mai 2022. [En ligne]. Disponible sur: <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00201276>.
- [17] « Jenness Enterprises - Extensions ArcView; Indice de position topographique ». <http://www.jennessent.com/arcview/tpi.htm> (consulté le 16 septembre 2021).
- [18] F. A. Kruse, J. W. Boardman, et J. F. Huntington, « Comparison of airborne hyperspectral data and EO-1 Hyperion for mineral mapping », *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 41, no 6, p. 1388-1400, juin 2003 doi: 10.1109/TGRS.2003.812908.
- [19] H. Yésou, Y. Besnus, et J. Rolet, « Extraction of spectral information from Landsat TM data and merger with SPOT panchromatic imagery — a contribution to the study of geological structures », *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. 48, no 5, p. 23-36, oct. 1993, doi: 10.1016/0924-2716(93)90069-Y.
- [20] A. Alasta, *Using Remote Sensing data to identify iron deposits in central western Libya*. 2011.
- [21] J. A. Richards et X. Jia, *Remote sensing digital image analysis: an introduction*, 4th ed. Berlin: Springer, 2006.
- [22] S. Al-Rawashdeh, B. Saleh, et M. Hamzah, « The use of Remote Sensing Technology in geological Investigation and mineral Detection in El Azraq-Jordan », *Cybergeo : European Journal of Geography*, oct. 2006, doi: 10.4000/cybergeo.2856.
- [23] G. Taylor et R. A. Eggleton, *Regolith Geology and Geomorphology*. John Wiley & Sons, 2001.
- [24] P. Wright, « Ollier, C. & Pain, C. 1996. *Regolith, Soils and Landforms*. ix + 316 pp. Chichester, New York, Brisbane, Toronto, Singapore: John Wiley & Sons. Price £65.00 (hard covers). ISBN 0 471 96121 3. », *Geological Magazine*, vol. 134, no 1, p. 121-142, janv. 1997, doi: 10.1017/S0016756897386130.
- [25] M. Mokarram et M. Hojati, « Comparison of Landform Classifications of Elevation, Slope, Relief and Curvature with Topographic Position Index in the South of Bojnoord », *Ecopersia*, vol. 4, p. 1343-1357, juin 2016, doi: 10.18869/modares.ecopersia.4.2.1343.
- [26] J. P. Wilson et J. Gallant, « *Terrain analysis : principles and applications* », undefined, 2000, Consulté le: 19 septembre 2021. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.semanticscholar.org/paper/Terrain-analysis-%3A-principles-and-applications-Wilson-Gallant/b42e384e7ad6d2c93e87ab37809a7d178aac7d00>.
- [27] « tpi-poster-tnc_18x22.pdf ». Consulté le: 16 septembre 2021. [En ligne]. Disponible sur: http://www.jennessent.com/downloads/tpi-poster-tnc_18x22.pdf.
- [28] C. Oppenheimer, « Drury S. A., 1993. *Image Interpretation in Geology*, 2nd ed. xi + 283 pp. London, Glasgow, New York, Tokyo, Melbourne, Madras: Chapman ' Hall. Price £24.95 (paperback). ISBN 0 412 48880 9. », *Geological Magazine*, vol. 131, no 5, p. 704-706, sept. 1994, doi: 10.1017/S0016756800012693.
- [29] G. Celeux, F. Forbes, et N. Peyrard, « EM procedures using mean field-like approximations for Markov model-based image segmentation », *Pattern Recognition*, vol. 36, no 1, p. 131-144, janv. 2003, doi: 10.1016/S0031-3203(02)00027-4.
- [30] M. Wulder, S. Franklin, J. White, M. Cranny, et J. Dechka, « Inclusion of topographic variables in an unsupervised classification of satellite imagery », *Canadian Journal of Remote Sensing*, vol. 30, p. 137149, avr. 2004, doi: 10.5589/m03-063.
- [31] T. Duda et M. Canty, « Unsupervised classification of satellite imagery: Choosing a good algorithm », *International Journal of Remote Sensing*, vol. 23, p. 2193-2212, juin 2002, doi: 10.1080/01431160110078467.
- [32] C. Pain, R. Chan, M. Craig, D. Gibson, P. Ursem, et J. Wilford, « RTMAP REGOLITH DATABASE FIELD BOOK AND USERS GUIDE », p. 101.
- [33] M. A. Craig, K. G. McQueen, et Centre for Australian Regolith Studies, Éd., *Developments and new approaches in regolith mapping: proceedings of a two day seminar and workshop organised by the Centre for Australian Regolith Studies at the University of Canberra, 20-21 June 1995*. Canberra: Centre for Australian Regolith Studies, Australian National University, Unieristy of Canberra, 1995.
- [34] S. W. Laffan et B. G. Lees, « Predicting regolith properties using environmental correlation: a comparison of spatially global and spatially local approaches », *Geoderma*, vol. 120, no 3, p. 241-258, juin 2004, doi: 10.1016/j.geoderma.2003.09.007.
- [35] F. Agustin, « ASTER Mineral Classification for Regolith Mapping in Tick Hill Mount Isa, Northwest Queensland », *Indonesian Journal on Geoscience*, vol. 4, juill. 2017, doi: 10.17014/ijog.4.2.97-109.
- [36] MACHENS E.1973: contribution à l'étude des formations du socle cristallin et de la couverture sédimentaire de l'Ouest de la République du Niger. Mémo. BRGM, n°82, 167p.