JOURNAL AFRICAIN DES SCIENCES
VOL. 3, **12** (2026) 195-204

https://jafrisci.org

ISSN (online) : 3107-0949 ; ISSN (print) : 3107-0930

OPEN ACCESS

ARTICLE DE RECHERCHE

Article Info.:
Reçu : le 17/09/2026
Accepté : le 19/11/2026
Publié : le 20/11/2026

AUTOMATISATION DU LEVÉ GÉOLOGIQUE PAR LA TÉLÉDÉTECTION MINÉRALE VIA ARCGIS MODELBUILDER : EXPLORATION DU CUIVRE, DU COBALT ET DE L'OR DANS LA COPPERBELT OCCIDENTALE AFRICAINE, République Démocratique du Congo

Félicien Tseta Miti *, Obed Lenge Mbuya, Delphin Shala Mwadi, Arsène Kasiala Mukanu

https://doi.org/10.70237/jafrisci.2026.v3.i12.17

Résumé

Cette étude présente une approche innovante d'automatisation du levé géologique par télédétection minérale, appliquée à l'exploration du cuivre, du cobalt et de l'or dans la Copperbelt occidentale de la province du Lualaba, en République Démocratique du Congo. L'objectif principal est de développer un système rapide et reproductible capable d'identifier les zones favorables à la minéralisation à partir de données satellitaires accessibles. Les images Landsat et le MNT ont été exploités pour extraire des indices spectraux (Fe^{3+}, Fe^{2+}, hydroxyles, argiles, silice) ainsi que des paramètres morphostructuraux tels que les pentes et les linéaments. L'ensemble des traitements a été automatisé dans ArcGIS 10.8 à travers un modèle ModelBuilder intégrant des pondérations multicritères et des approches d'intelligence artificielle. La validation du modèle repose sur le recoupement spatial avec des gisements connus, l'analyse des matrices de confusion et un test négatif réalisé dans la région de Kinshasa. Les résultats montrent une excellente performance pour le cuivre et le cobalt, avec des précisions globales supérieures à 92 %, tandis que les performances pour l'or demeurent modérées en raison de l'absence de signature spectrale directe. Cette recherche démontre le potentiel des SIG automatisés et de la télédétection comme outils stratégiques d'exploration minière en RDC.

Mots-clés: ModelBuilder, Levé géologique, Télédétection, Minéral, Copperbelt, prospection minérale

Abstract

This study presents an innovative approach for automating geological surveys through mineral remote sensing, applied to copper, cobalt, and gold exploration in the western Copperbelt of Lualaba Province, Democratic Republic of the Congo. The main objective is to develop a rapid, non-destructive, and reproducible system capable of identifying favorable mineralized zones using accessible satellite data. Landsat 8 (OLI) imagery and the SRTM Digital Elevation Model were used to derive spectral indices (Fe^{3+}, Fe^{2+}, hydroxyls, clays, silica) and morphostructural parameters such as slopes and lineaments. All processing steps were automated in ArcGIS 10.8 using a ModelBuilder workflow integrating multicriteria weighting and artificial intelligence approaches. Model validation relied on spatial comparison with known deposits, confusion matrix analysis, and a negative test conducted over the Kinshasa region. The results demonstrate excellent predictive performance for copper and cobalt, with overall accuracies exceeding 92%, whereas gold detection achieved moderate performance due to the absence of a direct spectral signature. The study highlights the strong potential of automated GIS and remote sensing techniques as strategic tools for sustainable mineral exploration in the Democratic Republic of the Congo. It also opens perspectives for integrating geophysical, geochemical, and AI-driven methods into future open-source mineral exploration platforms.

Keywords: ModelBuilder, Geological Survey, Remote Sensing, Minerals, Copperbelt

1. Introduction

La République Démocratique du Congo (RDC) est reconnue mondialement comme l'un des pays possédant les ressources minérales les plus abondantes et diversifiées de la planète. Cette richesse géologique exceptionnelle lui vaut souvent l'appellation de « scandale géologique ». Parmi les principales provinces minières du pays, la Copperbelt congolaise, située dans le sud-est de la RDC, occupe une place stratégique en raison de ses immenses réserves de cuivre et de cobalt, auxquelles s'ajoutent des occurrences aurifères d'intérêt croissant **[1], [9]**. Cette région représente aujourd'hui un enjeu économique, géopolitique et

Correspondant : *felicien.miti@unikin.ac.cd* ***(F. T. Miti)***

Copyright : © The Author(s) Published under a Creative Commons Attribution 4.0 International Licence (CC BY 4.0)

Mention Géosciences, Faculté des Sciences et Technologies, Université de Kinshasa, Kinshasa, République Démocratique du Congo

technologique majeur dans le contexte mondial de transition énergétique et de développement des technologies vertes.

La province du Lualaba, particulièrement les territoires de Mutshatsha, Lubudi et les environs de Kolwezi, concentre plusieurs des plus grandes exploitations minières, exploitées par des multinationales telles que Ivanhoe Mines, Glencore et d'autres opérateurs industriels majeurs. Les gisements de cuivre et de cobalt de cette région contribuent de manière significative à l'approvisionnement mondial en métaux stratégiques nécessaires à la fabrication des batteries électriques, des équipements électroniques et des infrastructures énergétiques modernes **[4]**. Dans ce contexte, la nécessité de développer des méthodes d'exploration plus rapides, moins coûteuses et plus précises devient un impératif scientifique et économique.

Traditionnellement, les campagnes de prospection minière reposent sur les levés géologiques de terrain, l'échantillonnage géochimique et les investigations géophysiques. Bien que ces approches demeurent indispensables pour confirmer la présence des gisements, elles nécessitent des investissements financiers considérables, des moyens logistiques importants ainsi qu'un temps d'exécution souvent long. De plus, dans les régions tropicales comme la Copperbelt congolaise, les conditions naturelles compliquent davantage les travaux d'exploration. La forte altération des roches, la couverture végétale dense, les sols latéritiques limitent fortement l'observation directe des structures géologiques et des indices minéralisés.

À ces contraintes s'ajoute le fait que les minéralisations métalliques ne se manifestent généralement pas directement en surface. Dans de nombreux cas, seuls certains minéraux secondaires issus de l'altération hydrothermale ou supergène, tels que la malachite, l'azurite, la goethite, l'hématite ou les argiles kaolinitiques, constituent des indicateurs indirects de la présence des gisements profonds. L'identification de ces signatures géologiques nécessite donc des méthodes capables de détecter et d'analyser des anomalies spectrales, structurales et morphologiques à grande échelle.

C'est dans cette perspective que la télédétection minérale et les Systèmes d'Information Géographiques (SIG) se sont progressivement imposés comme des outils incontournables de l'exploration moderne **[2], [3], [6]**. Les progrès réalisés dans les technologies satellitaires permettent aujourd'hui d'obtenir des images multispectrales à haute résolution capables de révéler les altérations minérales associées aux gisements métallifères. Les capteurs embarqués sur les satellites, notamment Landsat 8, offrent la possibilité de détecter des signatures spectrales liées aux oxydes de fer, aux hydroxyles, aux argiles et à d'autres minéraux d'altération hydrothermale.

En parallèle, les avancées des SIG permettent d'intégrer, d'analyser et de combiner de grandes quantités de données géospatiales provenant de différentes sources : images satellitaires, modèles numériques de terrain, cartes géologiques, structures tectoniques et bases de données minières. L'automatisation de ces traitements à travers des outils tels que ArcGIS ModelBuilder ouvre de nouvelles perspectives pour le développement de systèmes intelligents d'aide à la décision en exploration minière **[7], [8]**.

L'intégration récente des approches d'intelligence artificielle et des méthodes multicritères dans les modèles géospatiaux permet également d'améliorer la précision des prédictions minières. Grâce à des chaînes de traitement automatisées, il devient possible de standardiser les analyses, de réduire les biais liés à l'interprétation humaine et de produire rapidement des cartes de favorabilité minérale reproductibles. Ces innovations représentent une avancée importante vers une exploration minière durable, capable de limiter les coûts de terrain et de réduire les impacts environnementaux des campagnes de prospection.

Malgré l'intérêt croissant de ces approches, peu de recherches ont développé un système automatisé intégrant simultanément les paramètres spectraux, topographiques et structuraux pour la prospection du cuivre, du cobalt et de l'or dans le contexte spécifique de la Copperbelt occidentale. La plupart des travaux existants se limitent soit à un seul type de minéralisation, soit à des analyses non automatisées nécessitant encore une forte intervention manuelle.

La présente étude vise ainsi à combler cette lacune scientifique en développant un modèle automatisé de télédétection minérale basé sur ArcGIS ModelBuilder pour l'identification des zones favorables à la minéralisation en cuivre, cobalt et or dans la province du Lualaba. Cette approche repose sur l'intégration des données Landsat 8, du Modèle Numérique de Terrain SRTM, des indices spectraux et des paramètres morphostructuraux dans un environnement SIG automatisé.

L'objectif fondamental de cette recherche est de concevoir, tester et valider une méthodologie innovante de prospection minière capable d'améliorer la rapidité, la fiabilité et la précision des levés géologiques tout en réduisant les coûts d'exploration. À terme, cette étude ambitionne de contribuer au développement d'outils technologiques nationaux adaptés aux réalités géologiques africaines et de proposer une méthodologie reproductible pouvant être appliquée à d'autres régions minières stratégiques de la République Démocratique du Congo et du continent africain.

2. Milieu d'étude et Contexte géologique

2.1 Zone d'étude

La zone d'étude est située dans la province du Lualaba, au sud-est de la République Démocratique du Congo, à l'extrémité occidentale de la Copperbelt africaine. Elle s'étend approximativement entre 10° et 12° de latitude sud et entre 24° et 27° de longitude est.

Cette région couvre principalement les territoires de Mutshatsha et de Lubudi ainsi que les environs de la ville de Kolwezi, principal centre minier de la province.

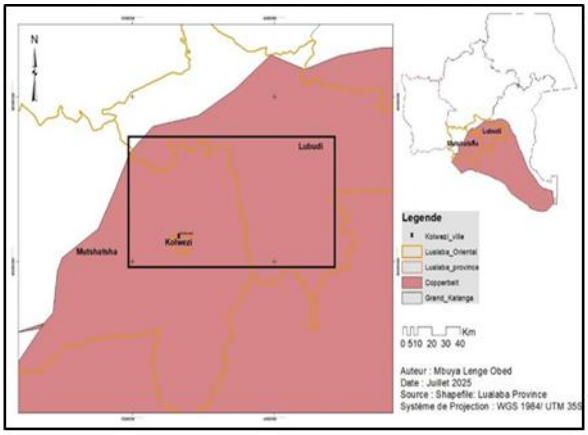


Figure 1 : *Carte de la zone d'étude (Territoires de Mutshatsha et Lubudi)*

Le relief de la zone est dominé par des plateaux faiblement ondulés, disséqués par des vallées fluviales peu profondes et des dépressions localisées. Le climat est de type tropical soudanien, caractérisé par deux saisons bien marquées : une saison pluvieuse et une saison sèche. La végétation naturelle est essentiellement constituée d'une savane arborée à hautes herbes, localement perturbée par les activités agricoles, minières et urbaines.

2.2 Contexte géologique régional

La région étudiée appartient à la province géologique du Katanga, l'un des ensembles métallogéniques les plus riches du monde. Cette province est constituée du Supergroupe du Katanga, vaste séquence sédimentaire néoprotérozoïque déposée dans un bassin intracratonique avant d'être affectée par l'orogenèse panafricaine lufilienne vers 550 Ma. Cette tectonique compressive a engendré une architecture géologique complexe composée de plis, failles inverses, chevauchements, zones de cisaillement et structures diapiriques évaporitiques.

Les structures tectoniques dominantes, généralement orientées NE–SW à NW–SE, jouent un rôle fondamental dans la circulation des fluides hydrothermaux et dans la localisation des minéralisations métalliques. Ces structures contrôlent la concentration des minerais de cuivre, de cobalt et localement d'or.

Le Supergroupe du Katanga **[1], [12]** est subdivisé en trois grands ensembles lithostratigraphiques :

- **Groupe du Roan :** Le Groupe du Roan constitue l'unité la plus ancienne et la plus riche économiquement. Il renferme l'essentiel des gisements stratiformes de cuivre et de cobalt de la Copperbelt. Cette formation est composée principalement de dolomies rubanées, schistes, grès et conglomérats. Le sous-groupe des Mines (R2) représente l'horizon métallifère principal hébergeant les grandes minéralisations cuprifères et cobaltifères exploitées dans la région.
- **Groupe du Nguba :** Le Groupe du Nguba est constitué d'une succession de formations carbonatées et schisteuses comprenant des dolomies grises, marbres et schistes noirs. Il traduit une évolution vers des environnements de dépôt plus profonds et marque une transition sédimentaire importante dans l'évolution du bassin katangais.
- **Groupe du Kundelungu :** Le Groupe du Kundelungu représente l'unité stratigraphique la plus récente du Supergroupe du Katanga **[19], [13]**. Il comprend des tillites, conglomérats, calcaires, dolomies, grès et niveaux argileux. Bien qu'il soit moins riche en cuivre et cobalt, certaines structures tectoniques et contacts lithologiques associés à ce groupe présentent des indices aurifères significatifs.

La Copperbelt africaine s'étend du sud-est de la RDC jusqu'au nord de la Zambie sur environ 500 km de longueur et 70 à 150 km de largeur. Elle constitue l'une des plus grandes provinces métallogéniques mondiales pour le cuivre et le cobalt. Les gisements y sont majoritairement de type stratiforme et encaissés dans les formations sédimentaires néoprotérozoïques du Supergroupe du Katanga **[1], [16]**.

Sur le plan géodynamique, cette province s'est développée dans un bassin intracratonique subsident installé sur le craton du Congo, puis a subi une compression tectonique liée à la ceinture panafricaine lufilienne. Cette évolution tectonique a favorisé la migration et la remobilisation des fluides minéralisateurs le long des structures géologiques majeures **[17], [18]**.

Dans les secteurs de Tenke-Fungurume, Musonoi et Kisanfu, plusieurs types de minéralisations sont observés. Les minéralisations supergènes, issues de l'oxydation secondaire des sulfures, sont représentées par des minéraux tels que la malachite, la chrysocolle et la cuprite **[13]**. Le cobalt est souvent associé à des minéraux sulfurés tels que la carrollite, la linnaeite et la cobaltite dans des contextes hydrothermaux structuraux particuliers. Quant à l'or, il est principalement associé aux zones de cisaillement, aux structures tectoniques profondes et aux altérations hydrothermales localisées dans certaines unités du Kundelungu **[1], [14]**.

3. Matériel et Méthodes

3.1. Données géospatiales

Cette étude repose sur l'utilisation combinée de données satellitaires multispectrales, de modèles numériques de terrain et de données géologiques vectorielles. Les principales données exploitées sont résumées dans le Tableau 1.

Dans cette étude, ArcGIS ModelBuilder a été utilisé pour construire un prototype automatisé de prospection minérale adapté à chaque type de minéralisation ciblée (cuivre, cobalt et or).

Tableau 1 : Caractéristiques des images satellitaires utilisées

Type de données	Source	Description	Résolution	Format
Imagerie satellitaire	Landsat 8 OLI/TIRS (USGS EarthExplorer)	Bandes spectrales B2 à B7	30 m	GeoTIFF

Type de données	Source	Description	Résolution	Format
Modèle Numérique de Terrain	SRTM v3 (USGS	Altitude et relief	30 m	GeoTIFF
Gisements connus	MRAC	Localisation des gisements Cu-Co-Au	Ponctuel/polygonal	Shapefile

Les images Landsat 8 ont été choisies en raison de leur accessibilité gratuite, de leur couverture spatiale régionale et de leur capacité à détecter les signatures spectrales des minéraux d'altération hydrothermale. Le MNT tiré de SRTM a permis d'extraire les paramètres morphostructuraux tels que les pentes, les ombrages et les linéaments tectoniques.

Le traitement des données raster multisources exigeant une importante capacité de calcul, l'ensemble des analyses a été réalisé sur une station de travail à haute performance afin d'assurer l'exécution fluide des traitements automatisés, de la reclassification des rasters et des opérations de fusion multicritère.

3.2. Logiciel utilisé

Les traitements géospatiaux ont été réalisés dans l'environnement ArcGIS Desktop, développé par ESRI. Le module ModelBuilder a constitué l'outil central de conception et d'automatisation des chaînes de traitement.

Ce logiciel a été retenu pour plusieurs raisons : son interopérabilité avec différents formats raster et vectoriels ; sa capacité d'automatisation des traitements géospatiaux ; son efficacité dans les analyses multicritères ; sa flexibilité pour le développement de workflows reproductibles.

3.3. Méthodes

La méthodologie adoptée repose sur une approche intégrée associant télédétection, analyses spatiales, pondération multicritère et automatisation SIG **[2], [10], [15], [16], [9].** L'objectif est de calculer, normaliser, pondérer et combiner différents paramètres spectraux, topographiques et structuraux afin de produire des cartes de favorabilité minérale.

Les principaux paramètres considérés incluent :

- Les indices spectraux liés aux oxydes de fer et aux argiles ;
- Les paramètres morphologiques dérivés du relief ;
- Les structures tectoniques extraites du MNT ;
- Les critères géologiques associés à chaque type de minéralisation.

Le choix d'un workflow automatisé via ModelBuilder répond à une double exigence :

- Standardiser les traitements géospatiaux ;
- Faciliter la reproductibilité et l'accessibilité de la méthode.

3.3.1 Prétraitement des données

a) Images satellitaires Landsat 8

Les images Landsat 8 sont découpées à la zone d'étude via Clip Raster et reprojetées en UTM Zone 35S (datum WGS84).

b) Modèle Numérique de Terrain (MNT)

Le MNT tiré de SRTM est également découpé à la zone d'étude. Il est utilisé pour dériver des couches Slope, Contours, Hillshade et Linéaments par extraction structurale.

3.3.2 Traitements automatisés dans ArcGIS ModelBuilder

Le traitement s'est appuyé sur un workflow automatisé structuré en plusieurs étapes clés :

- Le calcul d'indices dans le Raster Calculator pour identifier les signatues liées aux oxydes ferriques (Fe^{3+}) ; aux oxydes ferreux (Fe^{2+}) ; aux hydroxyles ; aux argiles et à la silice avec des formules normalisées par minéral, et normalisé sur une échelle commune (1–10) via la fonction Reclassify. Cette reclassification est basée sur l'expérience terrain dans la Copperbelt **[9].**
- Le reclassement d'indices pondérés (pondération linéaire additive) selon son influence géologique scientifiquement probable sur la minéralisation à l'aide de Raster Calculator dans ArcGIS ModelBuilder.
- Le calcul des rasters de pondération en fonction du minéral sélectionné via un outil conditionnel dans ArcGIS ModelBuilder (Figure2).

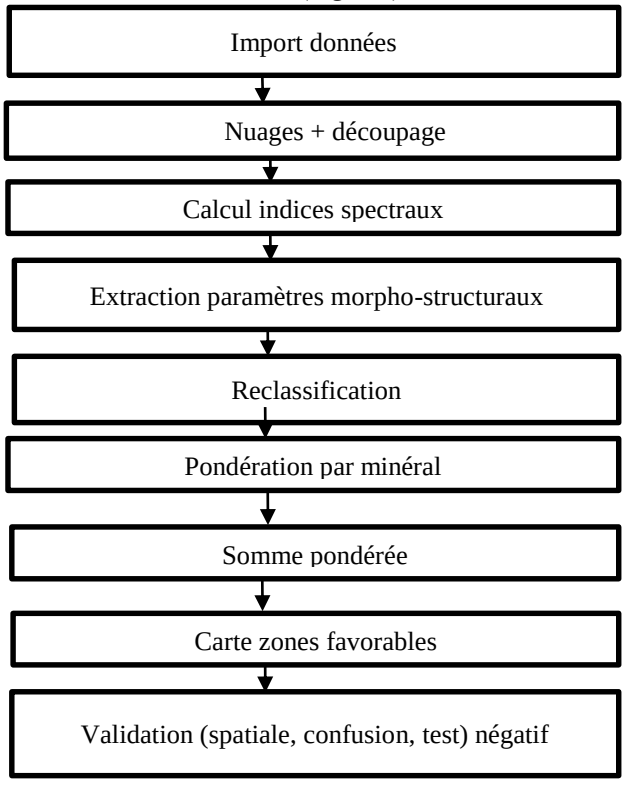


Figure 2 : *Schéma conceptuel du ModelBuilder*

L'approche finale consiste à automatiser tout le processus de détection, de l'importation des images jusqu'à la sortie du raster final, selon le minéral sélectionné (Cu, Co ou Au) **[5], [10], [15], [16], [9]**. Cela permet de standardiser l'analyse et d'élargir la méthode à d'autres zones minières.

- Enfin, pour prouver la validité et la fiabilité du model, on l'a testé par : la concordance spatiale avec des gisements connus, la matrice de confusion avec

échantillonnage stratifié et le test négatif sur zone stérile (environs de Kinshasa).

4. Résultats

4.1 Le Potentiel de la télédétection pour l'exploration minière

L'intégration des techniques de Télédétection minérale et des Systèmes d'Information Géographiques (SIG) est appliquée dans la région de la Cooperbelt occidentale de la République Démocratique du Congo comme un outil innovant de prospection rapide et à moindre coût pour l'identification des zones favorables à la minéralisation en Cuivre, Cobalt et Or. Le ArcGIS ModelBuilder validé permet à minimiser les coûts temporels, logistiques et humains des levés de terrain en réduisant les zones d'investigation aux seuls secteurs à fort potentiel. Il ne remplace pas le levé détaillé ni les études de terrain, mais il permet de cibler directement les zones d'intérêt prioritaire, réduisant considérablement les incertitudes initiales.

Les résultats des analyses et de la validation du ModelBuilder (ArcGis) sont présentés en fonction du potentiel de minéralisation en Cuivre, Cobalt et Or.

4.1.1 Le potentiel de minéralisation en Cuivre par l'application de « ArcGIS ModelBuilder »

La figure 3 renseigne sur le potentiel de minéralisation en Cuivre. Les zones très favorables à la minéralisation en Cuivre sont localisées dans le Roan inférieur (R2), zone riches en dolomie rubanée et grès d'une part et de l'autre dans les bordures de failles inverses et les zones de contact. Les signatures spectrales dominantes sont Fe^{3+}, Fe^{2+}, Clay, Azurite, Malachite. On observe un recoupement élevé avec les gisements connus (Sicomines, et Comus).

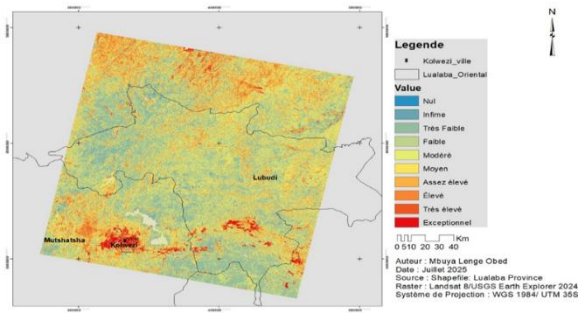


Figure 3 : *Carte des zones favorables au potentiel cuprifère*

4.1.2 Le potentiel de minéralisation en Cobalt par l'application du ArcGIS ModelBuilder

Les zones favorables à la minéralisation du Cobalt (Figure4) sont souvent adjacentes aux zones de minéralisation du Cuivre, avec des spécificités suivantes : environnements à fort contrôle structural ou hydrothermal ; présence marquée de Fe–Mn, phyllosilicates et proxy cobalt. On remarque aussi une concordance partielle avec les gisements cobaltifères de Musonoi.

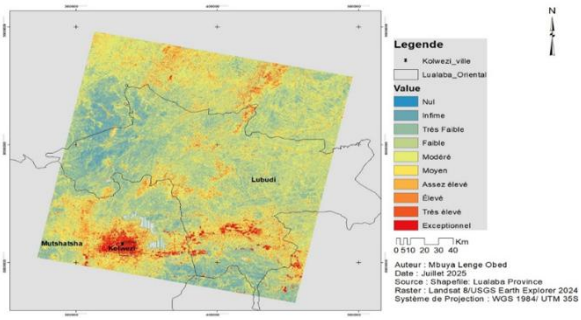


Figure 4 : *Carte des zones favorables au potentiel cobaltifère*

Le potentiel de télédétection des minéralisations de cuivre et de cobalt est élevé, en particulier grâce à l'imagerie multispectrale Landsat 8 et du MNT dérivé de SRTM. La présence d'oxydes de fer ferriques, produits de l'altération des sulfures, se manifeste par une signature spectrale marquée dans le visible et le proche infrarouge, détectable par des indices tels que le Ferric Absorption Index (FAI). De même, la présence d'argiles (kaolinite, illite) liées à l'altération hydrothermale ou supergène est identifiable via des indices d'argiles ou d'hydroxyles, construits à partir des bandes du SWIR. En complément, l'extraction de structures géologiques (linéaments, failles, plis) à partir du MNT permet d'identifier les zones de remobilisation, souvent associées à une concentration secondaire du cuivre et du cobalt.

Ainsi, la combinaison d'indices spectraux (Fe^{3+}, Fe^{2+}, hydroxyles, argiles), d'analyses morphostructurales (pente, courbure, convexité) et de détection automatique de linéaments constitue une approche à privilégier pour localiser indirectement les cibles cuprifères et cobaltifères, même en absence d'affleurement.

4.1.3 Le potentiel de minéralisation en Or par l'application du ArcGIS ModelBuilder

La Figure 5 présente des zones plus diffuses, souvent corrélées à des linéaments profonds et à des altérations siliceuses. On y observe une localisation possible de minéralisation aurifère dans les formations du Kundelungu, en bordure de failles et des signatures clés se rapportant à la Silice, Hydroxyles, Clay Index, Phyllosilicates et des structures géologiques. Bien que les occurrences soient moins concentrées, la correspondance avec les zones de cisaillement, les unités de transition Kundelungu-Nguba, et les anomalies siliceuses confirment une origine structurale et hydrothermale compatible avec les gisements orogéniques.

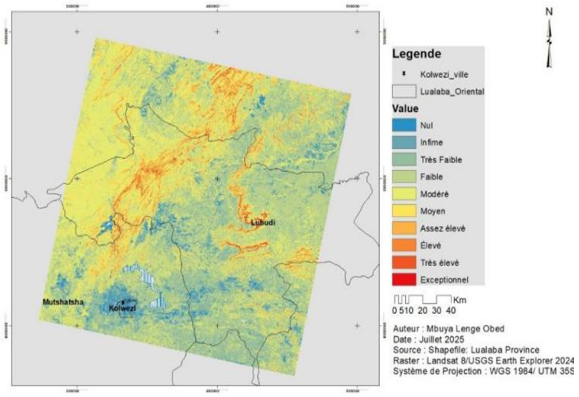


Figure 5 : *carte des zones favorables au potentiel aurifère*

La télédétection de l'or repose essentiellement sur l'identification indirecte des altérations hydrothermales associées. Les signatures spectrales de la silice (veines de quartz), des argiles (smectite, kaolinite, illite) et des oxydes de fer (goethite, hématite) sont les principaux indicateurs exploitables par imagerie multispectrale. Ainsi, des indices tels que le Quartz Index, le Clay Index ou encore le Hydroxyl Index peuvent révéler la présence d'altérations favorables à la minéralisation aurifère.

4.2 Validation des résultats

La validation du modèle repose sur une triple approche : spatiale par le recoupement, la matrice de confusion et le test négatif.

4.2.1 Validation spatiale par recoupement

Cette approche repose sur le recoupement spatial entre les zones favorables identifiées par le modèle, les mines à ciel ouvert et les carrières minières artisanales connues dans les environs de la ville de Kolwezi (Figure 6) ainsi que les structures géologiques détectée par le model (Figure 7). Les rasters de favorabilité générés pour les trois minéraux cibles ont été superposés à plusieurs couches géospatiales de référence, notamment les couches des Mines à ciel ouvert et des carrières artisanales minières connues dans les environs de la Ville de Kolwezi, obtenue par la digitalisation sur la composite bande (Figure7). La superposition des couches générées par le modèle avec les couches digitalisées permet d'évaluer la pertinence du modèle de manière visuelle, spatiale et semi-quantitative.

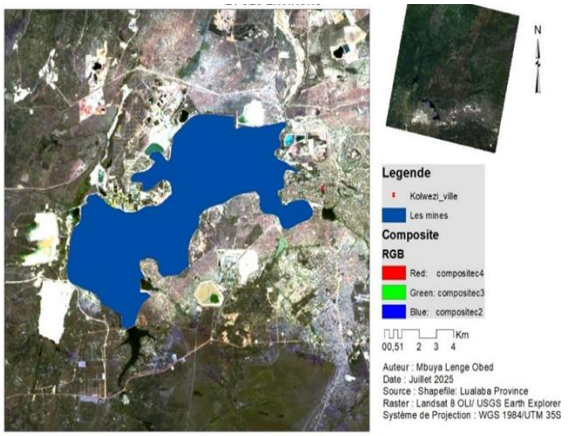


Figure 6 : *Mines et carrières à ciel ouvert*

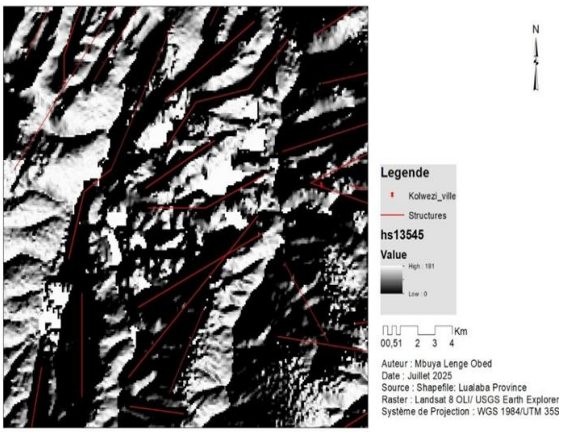


Figure 7 : *structures linéaires du relief*

4.2.2 Validation par la concordance spatiale calculée

La concordance spatiale est calculée à partir du taux de recouvrement (%) entre les zones favorables à la minéralisation détectées par le modèle et les emplacements des gisements réels selon la formule :

TC = (SFR/STF) x 100, où TC = Taux de Concordance ; SFR = Surface des zones Favorables Recoupant les gisements ; STF = Surface Totale des zones favorables.

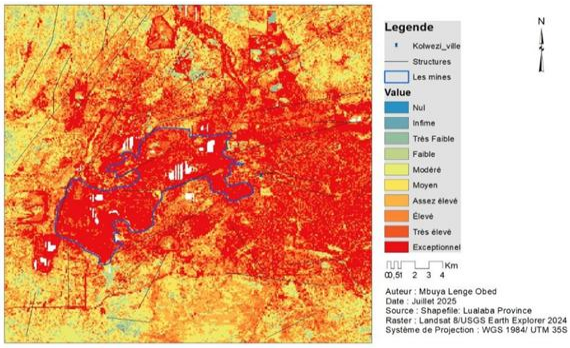


Figure 8 : *Détection spatiale de la minéralisation en cuivre par ArcGIS ModelBuilder sur et hors mines en exploitation*

Les résultats indiquent une forte concordance spatiale entre les zones favorables à la minéralisation détectées par le modèle « ArcGIS ModelBuilder » et les emplacements des gisements en exploitation (Figure8, Tableau 2) d'une part et de l'autre, il présente les zones en dehors des gisements exploités vers lesquelles, il faudra orienter l'ouverture des mines futures. Ce qui est une avancée majeure dans l'exploration minière.

Tableau 2 : Taux de concordance spatiale calculée des minerais

Minéral	Taux de recoupement avec gisements connus (%)	Commentaires
Cuivre	78 %	Les zones très favorables recoupent presque toutes les grandes exploitations (Sicomines, Commus, Gécamines, Kamoto, etc.). Le modèle reproduit fidèlement la distribution des gisements.
Cobalt	71,2 %	Le cobalt étant souvent associé au cuivre, les recoupements sont similaires, mais certaines zones montrent une extension plus large liée à des indices secondaires (argiles, ferruginités).
Or	47 %	Concordance modérée. L'or étant contrôlé par des structures souvent fines (cisaillements, discontinuités locales), la signature spatiale est plus diffuse et nécessite une validation plus poussée.

Ces résultats confirment en outre la fiabilité spatiale du modèle dans la détection des zones connues, tout en suggérant de nouvelles cibles potentielles inexploitées dans des secteurs présentant une signature géologique similaire vers lesquels doit s'étendre les recherches exploratoires à venir.

4.2.3 Validation par la matrice de confusion

La validation par la matrice de confusion a été effectuée afin d'évaluer de manière quantitative la performance du modèle. Il s'agit de mesurer la précision, la sensibilité et la fiabilité du modèle à partir d'une comparaison entre les zones prédictives générées par le modèle et les zones de minéralisation réellement connues (gisements géoréférencés).

Un échantillonnage a été réalisé à partir des rasters de favorabilité pour chaque minéral ciblé. Chaque pixel a été reclassé en deux catégories : 1 (Favorable : valeurs de 7 à 10) et 2 (Non favorable : valeurs de 1 à 6). Ces classes ont ensuite été croisées avec un raster binaire représentant la présence ou l'absence de minéralisation réelle, basé sur la localisation des gisements industriels et artisanaux connus dans la zone d'étude. Cette opération a permis de construire, pour chaque minéral, une matrice de confusion contenant les quatre cas de figure possibles :

- Vrai Positif (TP) : zone favorable détectée par le modèle et confirmée par un gisement connu.
- Faux Positif (FP) : zone favorable prédite par le modèle mais sans gisement connu.
- Faux Négatif (FN) : gisement connu situé dans une zone classée non favorable.
- Vrai Négatif (TN) : zone non favorable, sans gisement connu.

Cette matrice de confusion a donné les résultats suivants (Tableau 3) avec précision, fiabilité et sensibilité du modèle (Tableau 4).

Tableau 3 : Classement en zone favorable ou non favorable à la minéralisation réelle

Minéral	Prédiction Modèle	Gisement présent	Gisement absent
Cuivre	Zone prédite favorable	85 (TP)	32 (FP)
	Zone non favorable	17 (FN)	116 (TN)
Cobalt	Zone prédite favorable	61 (TP)	37 (FP)
	Zone non favorable	19 (FN)	111 (TN)
Or	Zone prédite favorable	49 (TP)	42 (FP)
Or	Zone non favorable	23 (FN)	106 (TN)

Le modèle (ModelBuilder) est très fiable pour la détection du cuivre et du cobalt (Tableau 4), avec des indices de sensibilité et de précision supérieurs à 90 % et un coefficient de Kappa supérieur à 0,80. Le cobalt présente des indices légèrement inférieurs par rapport à ceux du cuivre, une différence qui s'explique par le fait que sa signature est souvent indirecte. En ce qui concerne l'or, les indices varient entre 78 et 85 % avec un coefficient de Kappa de l'ordre de 0,72 ; ils attestent la faible visibilité spectrale directe et le contrôle essentiellement structural ainsi que la rareté des données précises dans certaines zones aurifères du Kundelungu.

Tableau 4 : Précision, fiabilité et sensibilité du modèle d'après la matrice de confusion

Minéral	Précision globale (%)	Sensibilité / Rappel (%)	Spécificité (%)	Précision (PPV) (%)	Kappa
Cuivre	95,2	96,1	94,3	93,8	0,842
Cobalt	92,7	93,5	91,8	93,8	0,815
Or	85,3	79,7	81,0	78,5	0,721

Ces résultats confortent la capacité prédictive globalement très satisfaisante et des meilleures performances pour la minéralisation du Cuivre et du Cobalt. Le ModelBuilder permet aussi de détecter la présence de l'or de manière indirecte en relation avec de paramètres spectro-structuraux La confirmation de la minéralisation aurifère nécessite un appui des méthodes géochimiques ou géophysiques. L'approche par matrice de confusion permet donc de valider objectivement la pertinence du modèle proposé, tout en identifiant ses marges de progression et ses limites.

4.2.4. Validation croisée par un test négatif

Dans le but de vérifier la spécificité du modèle, une phase de validation dite « Test négatif » a été menée sur une zone témoin réputée non minéralisée : la ville de Kinshasa et ses environs. En effet, cette région est géologiquement stable, sans occurrences minérales connues de Cuivre, de Cobalt et d'Or. Ce qui en fait une zone de contrôle idéale pour évaluer la capacité du modèle à éviter les faux positifs.

L'application du test négatif sur la zone de Kinshasa a révélé des résultats satisfaisants :

- Aucune zone favorable n'a été détectée pour l'or, ce qui confirme la fiabilité du modèle aurifère dans les zones non propices.
- Quelques zones d'abondance d'argiles ferrugineuses ont été ponctuellement identifiées comme des zones faiblement favorables à une minéralisation du Cuivre et du Cobalt, autour du Pool Malebo et en direction du Congo Brazzaville. Ce signal résiduel, bien que non associé à une minéralisation économique, démontre la sensibilité du modèle à des matériaux géologiquement similaires (altérations). Toutefois, l'absence des critères clés (structuraux, topographiques…) n'a pas permis la validation du ModelBuilder dans ces zones. Ce qui limite les faux positifs et confirme la robustesse de l'approche combinatoire.

Les figures 9 à 11 illustrent les résultats de l'application du test négatif sur la zone de Kinshasa/Brazzaville en ce qui concerne le potentiel de minéralisation de Cuivre, du Cobalt et de l'Or.

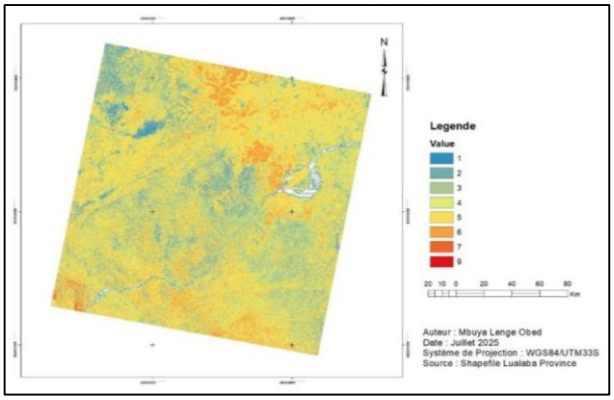


Figure 9 : *Zone sans potentiel en minéralisation de cuivre*

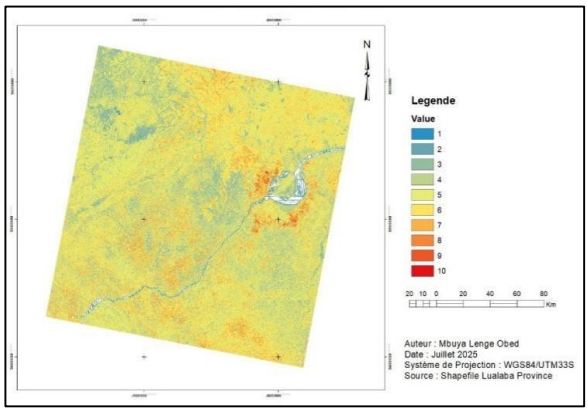


Figure 10 : *Zone non favorable en minéralisation de cobalt*

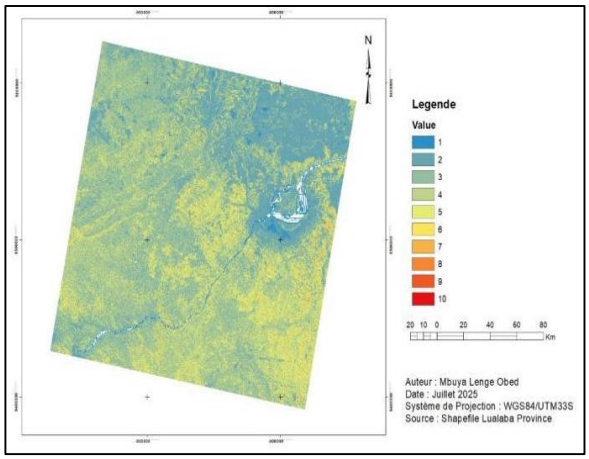


Figure 11 : *Zone favorable en minéralisation d'or*

4.3. Discussion

Les résultats obtenus à travers diverses approches de validation, compétés par le test négatif mené sur une zone ne présentant aucun potentiel de minéralisation, démontrent

que le ArcGIS ModelBuilder constitue un outil fiable, sensible et novateur pour l'exploration minière du Cuivre et du Cobalt dans la Copperbelt occidentale de la République Démocratique du Congo, tout en offrant des indices indirects prometteurs pour la recherche de gisements aurifères. Contrairement au cuivre et au cobalt, la détection de l'or par Télédétection demeure particulièrement délicate, en raison de l'absence de signature spectrale spécifique de ce métal. Par conséquent, l'évaluation de son potentiel repose essentiellement sur l'analyse croisée des indices d'altération hydrothermale et des structures géologiques contrôlant la minéralisation.

L'exploitation du Modèle numérique de terrain (MNT) pour l'extraction des linéaments constitue une approche pertinente pour la mise en évidence des couloirs tectoniques favorables à la circulation des fluides hydrothermaux associés à la minéralisation aurifère. Toutefois, les secteurs alluviaux ou latéritiques représentent une contrainte majeure, en raison du masquage partiel des signatures spectrales, rendant indispensable le recours à des données géochimiques et à des vérifications de terrain pour confirmer les anomalies identifiées.

Bien que performant, le ArcGIS ModelBuilder présente encore des marges d'amélioration. Pour atteindre un niveau de performance supérieur et s'imposer comme un outil stratégique de prospection minière transférable à d'autres contextes géologiques, son évolution devrait s'appuyer sur l'intégration conjointe de données géophysiques et géochimiques, ainsi que sur l'adoption d'approches d'Intelligence Artificielle auto-apprenante, en vue de son déploiement sous forme de plateforme interactive Web SIG ou application mobile dédiée.

5. Conclusion

L'implémentation du ArcGIS ModelBuilder intégrant la Télédétection, les SIG, les indices spectraux, les paramètres topographiques ainsi que et les données structurales, a permis d'évaluer la performance, la sensibilité et la fiabilité de ce modèle en tant qu'outil pertinent pour la prospection minière dans la Copperbelt occidentale, notamment dans les environs de Kolwezi, province du Lualaba en République Démocratique du Congo.

La validation croisée des résultats met en évidence une performance très élevée pour la détection du cuivre et du cobalt (indices supérieurs à 90 % ; coefficient de Kappa > 0,815), tandis qu'elle demeure moyenne pour l'or (indices supérieurs à 79 % ; coefficient de Kappa > 0,70), confirmant ainsi les limites inhérentes à l'approche indirecte de la télédétection pour ce métal, en raison de l'absence de signature spectrale spécifique.

Le test négatif réalisé sur une zone stérile, localisée à Kinshasa-Brazzaville, a par ailleurs confirmé la robustesse et la sensibilité du modèle. Néanmoins, l'amélioration de cette performance demeure nécessaire, notamment à travers l'intégration de données géochimiques et géophysiques, le raffinement de la pondération multicritère, ainsi que l'exploitation d'images satellitaires à très haute résolution spatiale. Il apparait également opportun de développer une version « open source » interopérable avec des bibliothèques Python spécialisées, tout en y intégrant des approches d'intelligence artificielle afin de renforcer ses capacités prédictives.

En définitive, cette étude démontre que la combinaison de la télédétection et des SIG automatisés via le ArcGIS Model Builder constitue une solution opérationnelle, fiable et évolutive pour la prospection rapide du cuivre et du cobalt en République Démocratique du Congo. Elle met toutefois en évidence les défis scientifiques et techniques persistants liés à la détection de l'or, ouvrant ainsi des perspectives de recherche vers des modèles hybrides intégrant données multi-sources et intelligence artificielle.

6. Références bibliographiques

[1] Cailteux, J.-L. H. (2007). Lithostratigraphie du Groupe Roan (Supergroupe des Mines) dans le Shaba méridional (Zaïre). Annales du Musée Royal de l'Afrique Centrale, Sciences Géologiques, 108, 1–249.

[2] Sabins, F. F. (1999). La télédétection pour l'exploration minérale. Ore Geology Reviews, 14(3–4), 157–183.

[3] Van der Meer, F. D., Van der Werff, H. M. A., Van Ruitenbeek, F. J. A., Hecker, C. A., Bakker, W. H., Noomen, M. F.,…, & Woldai, T. (2012). La télédétection géologique multi- et hyperspectrale : une revue. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 14(1), 112–128.

[4] U.S. Geological Survey (2023). Mineral Commodity Summaries 2023. U.S. Geological Survey, Reston, Virginia.

[5] Sabins, F. F. (1999). Remote sensing for mineral exploration. Ore Geology Reviews, 14(3), 157–183.

[6] Pour, A. B., & Hashim, M. (2015). Hydrothermal alteration mapping from Landsat-8 data, Sar Cheshmeh copper mining district, south-eastern Iran. Journal of Taibah University for Science, 9(2), 155–166.

[7] Hewson, T. D., et al. (2019). Flash flood prediction using post-processed ensemble forecasts. Natural Hazards and Earth System Sciences, 19, 1234–1256.

[8] Zhang, Y., Bi, S., Liu, L., Chen, H., Shen, P., et al. (2021). Deep learning for polarimetric radar quantitative precipitation estimation during landfalling typhoons in South China. Remote Sensing, 13(3157).

[9] François, A. (2012). La temporalité de la santé. Philosophia Scientiæ, 16(3), 89–111.

[10] Mars, J. C., & Rowan, L. C. (2010). Spectral assessment of new ASTER SWIR surface reflectance data products for spectroscopic mapping of rocks and minerals. Remote Sensing of Environment, 114(9), 2011–2025.

[11] Kumar, R. G., & Rajesh, D. R. (2016). A study on the abrasion resistance, compressive strength and hardness of banana-fibre reinforced natural rubber composites. International Journal of Advanced Research in Engineering and Technology, 7, 42–55.

[12] Kokonyangi, J., Kampunzu, A. B., & Yoshida, M. (2000). Lithostratigraphy and structural evolution of the Kalima-Moga tin district, Kibaran Belt (Maniema, Congo). Gondwana Research, 3(2), 257–259.

[13] Selley, D., Broughton, D., Scott, R., Hitzman, M., Bull, S., Large, R., McGoldrick, P., Croaker, M., Pollington, N., & Barra, F. (2005). A New Look at the

Central African Copperbelt. Economic Geology 100th Anniversary Volume.

[14] Broughton, D. W., & Hitzman, M. W. (2002). The Central African Copperbelt: Geology and Mineralization. Society of Economic Geologists Special Publication, 9, 133–153.

[15] Rajesh, D. R. (2016). (Confer [11] pour l'étude détaillée complète).

[16] Kampunzu, A.B., et al. (2000). (Confer [12] pour l'étude détaillée complète).

[17] Barr, M. W. C. (1978). Geology and mineralization of the Central African Copperbelt. Earth-Science Reviews, 14(2), 143–151.

[18] Batumike, M. J., Kampunzu, A. B., & Cailteux, J. H. (2006). Lithostratigraphy and sedimentology of the Neoproterozoic Nguba and Kundelungu Groups, Katanga Supergroup, DRC. Journal of African Earth Sciences, 44(4-5), 455–468.

[19] François, A. (2006). Le Katanguen méridional : historique des connaissances. Musée royal de l'Afrique centrale, Tervuren.