

# Contribution de la géomatique à l'analyse de la qualité des nappes souterraines : Approche intégrée des indices spectraux appliquée au site minier de Tortiya (Nord de la Côte d'Ivoire)

**Kra Ahou Christiane Colombe, Doctorante, spécialité hydrogéologie**  
**Koffi Avy Stéphane, Enseignant-Chercheur**

Département de Géosciences, UFR des Sciences Biologiques  
Université Peleforo Gon Coulibaly de Korhogo, Côte d'Ivoire

**Shaw Kassi Olivier, Géologue, spécialité SIG**

Société pour le Développement Minier de la Côte d'Ivoire (SODEMI),  
Chef de Service de Gestion des Données Géoscientifiques

**El Hamidi Mohamed Jalal, Enseignant-Chercheur**

LAMERN, Mohammed V University in Rabat, Mohammadia School of  
Engineers, Regional Water Centre of Maghreb, Rabat, Morocco

Doi: 10.19044/esipreprint.2.2026.p355

---

Approved: 14 February 2026

Copyright 2026 Author(s)

Posted: 16 February 2026

Under Creative Commons CC-BY 4.0

OPEN ACCESS

---

## Cite As:

Kra, A.C.C., Koffi, A.S., Shaw, K.O. & El Hamidi, M.J. (2026). *Contribution de la géomatique à l'analyse de la qualité des nappes souterraines : Approche intégrée des indices spectraux appliquée au site minier de Tortiya (Nord de la Côte d'Ivoire)*. ESI Preprints. <https://doi.org/10.19044/esipreprint.2.2026.p355>

---

## Résumé

L'exploitation minière exerce une pression significative sur les écosystèmes et les ressources en eau souterraine, particulièrement dans les zones de socle cristallin fissuré comme le site minier de Tortiya (nord de la Côte d'Ivoire). Cette étude évalue la contribution de la géomatique et de la télédétection satellitaire à l'analyse de la qualité des nappes souterraines à travers le rapport surface-subsurface dans un contexte minier. Les indices spectraux NDVI (végétation), NDWI (eau de surface et recharge de la nappe) et NDTI (turbidité et sols exposés) ont été calculés à partir des images Sentinel-2 en bandes visibles uniquement, grâce à une extraction automatique via Google Earth Engine (GEE). Le croisement de ces indices intégrés à QGIS a permis d'établir une carte vulnérabilité environnementale pour l'identification des zones d'activité minière, haldes et zones de référence. Le NDVI varie entre -0,19 et 0,90, le NDWI quant à lui varie de -

0.97 à 0.09 et le NDTI de -0.14 à 0.30. Les résultats obtenus mettent en évidence une hétérogénéité spatiale marquée par une vulnérabilité accrue de tout le site. Quatre (04) classes de vulnérabilité caractérisent le site minier de Tortiya parmi lesquelles les fortes et très fortes vulnérabilités observées étouffent respectivement le Nord et le Sud. Enfin, l'approche intégrée des indices spectraux offre un outil efficace pour la gestion durable des ressources en eau et la surveillance environnementale dans les sites miniers. Cette méthodologie peut être appliquée à d'autres régions minières et étendue à des séries temporelles de contrôle et suivi de l'évolution des impacts environnementaux.

---

**Mots clés :** Géomatique, Sentinel-2, NDVI, NDWI, NDTI, SIG, nappes souterraines, qualité de l'eau, extraction minière, vulnérabilité, Tortiya, Côte d'Ivoire

---

## **Contribution of Geomatics to the Analysis of Groundwater Quality: An Integrated Approach to Spectral Indices Applied to the Tortiya Mining Site (Northern Côte d'Ivoire)**

*Kra Ahou Christiane Colombe, Doctorante, spécialité hydrogéologie  
Koffi Avy Stéphane, Enseignant-Chercheur*

Département de Géosciences, UFR des Sciences Biologiques  
Université Peleforo Gon Coulibaly de Korhogo, Côte d'Ivoire

*Shaw Kassi Olivier, Géologue, spécialité SIG*

Société pour le Développement Minier de la Côte d'Ivoire (SODEMI),  
Chef de Service de Gestion des Données Géoscientifiques

*El Hamidi Mohamed Jalal, Enseignant-Chercheur*

LAMERN, Mohammed V University in Rabat, Mohammadia School of  
Engineers, Regional Water Centre of Maghreb, Rabat, Morocco

---

### **Abstract**

Mining activities exert significant pressure on ecosystems and groundwater resources, particularly in fractured crystalline basement settings such as the Tortiya mining site in northern Côte d'Ivoire. This study assesses the contribution of geomatics and satellite remote sensing to the analysis of groundwater quality through the surface–subsurface relationship in a mining context. The spectral indices NDVI (vegetation), NDWI (surface water and groundwater recharge), and NDTI (turbidity and exposed soils) were computed from Sentinel-2A imagery using visible bands only, through automated extraction via Google Earth Engine (GEE). The integration and

cross-analysis of these indices in QGIS enabled the development of an environmental vulnerability map for identifying mining activity zones, waste rock dumps, and reference areas. The NDVI varies between -0.19 and 0.90, the NDWI varies from -0.97 to 0.09 and the NDTI from -0.14 to 0.30. The results reveal pronounced spatial hétérogénéité with elevated levels of vulnerability across the entire site. Four (04) vulnerability classes were identified at the Tortiya mining site with high and very high vulnerability levels, predominantly affecting the northern and southern sectors, respectively. Overall, the integrated use of spectral indices provides an effective tool for sustainable water resources management and environmental monitoring in mining areas. This methodology can be applied to other mining regions and extended to time-series analyses for monitoring and tracking the evolution of environmental impacts.

---

**Keywords:** Geomatics; Sentinel-2A; NDVI; NDWI; NDTI; GIS; groundwater; water quality; mining; vulnerability; Tortiya; Côte d'Ivoire

## Introduction

Les eaux souterraines constituent la principale source d'approvisionnement en eau potable pour les populations rurales et péri-urbaines d'Afrique de l'Ouest, en raison de leur disponibilité et de leur relative protection contre les contaminations immédiates (UNESCO, 2022). Cependant, ces ressources sont de plus en plus soumises à des pressions anthropiques, notamment dans les zones minières où l'exploitation industrielle et artisanale modifie profondément l'occupation du sol, la couverture végétale et les flux hydrologiques (Lapworth et al., 2020 ; MacDonald et al., 2021). Ces perturbations augmentent le risque de transfert de contaminants vers les aquifères et en particulier dans les formations de socle cristallin fissuré et altéré comme celles du nord de la Côte d'Ivoire où les aquifères sont peu profonds et présentent une vulnérabilité élevée (Jourda et al., 2020).

Les activités minières génèrent des impacts environnementaux variés : décapage et exposition des sols, fosses et haldes minières, turbidité accrue des eaux de surface et modification les réseaux de drainage. Ces perturbations favorisent l'érosion et la mobilisation de matières fines et de métaux potentiellement toxiques (arsenic, mercure, plomb) pouvant infiltrer les nappes souterraines et altérer leur qualité (Simate et al., 2019 ; Tabelin et al., 2021). Dans le souci de contrôler les impacts environnementaux et suivre la qualité des nappes, une évaluation géospatiale combinant SIG et télédétection a été initiée. Le but de cette étude est d'analyser la spatialisation des impacts miniers sur les nappes à travers la caractérisation d'indices spectraux normalisés.

L'objectif principal de cette étude est donc de contribuer au diagnostic et au suivi des nappes souterraines en contexte minier, à travers l'intégration des indices NDVI, NDWI et NDTI appliquée au site minier de Tortiya.

Les objectifs spécifiques sont :

- ✓ Cartographier la dynamique spatiale de la couverture végétale, des eaux de surface et de la turbidité des sols liées aux activités minières.
- ✓ Analyser les relations spatiales entre indices et eaux souterraines.
- ✓ Identifier les zones vulnérables à la dégradation de la qualité des nappes.

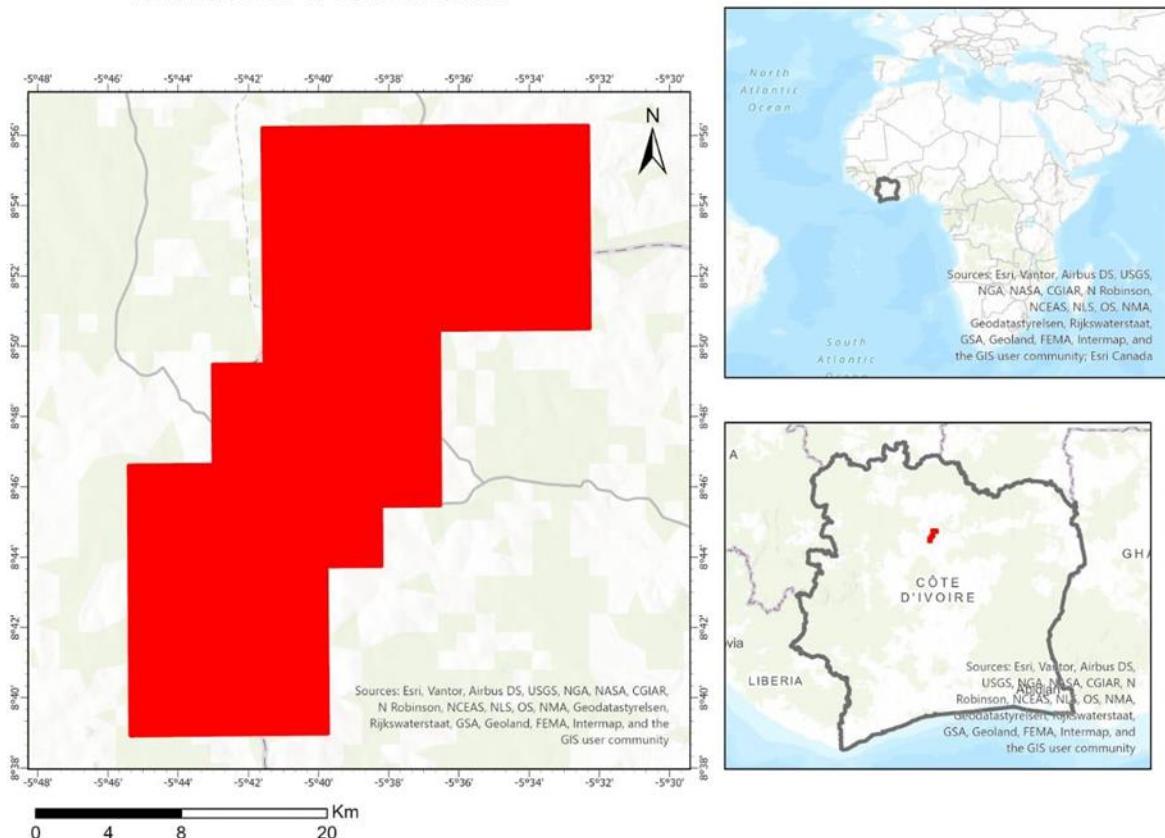
## Matériels et méthodes

### Zone d'étude

Le site de Tortiya, situé dans le nord de la Côte d'Ivoire (9°46' N, 6°47' W), est un ancien centre d'exploitation diamantifère industrielle, actuellement marqué par des activités artisanales et semi-mécanisées. La région présente un relief peu accidenté, dominé par des formations de socle cristallin fissuré et altéré où les aquifères sont principalement localisés dans les altérites et fractures profondes.

Les précipitations annuelles moyennes sont comprises entre 1200 et 1400 mm, concentrées sur une saison de pluies de mai à octobre. Les populations locales dépendent essentiellement des eaux souterraines pour l'usage domestique et agricole (Géomines, 1982 ; Bamba et al., 2021 ; Kouassi et al., 2022). Ces caractéristiques font du site un terrain d'étude pertinent pour évaluer l'impact des activités minières sur la qualité des nappes.

## Situation de la zone d'étude



**Figure 1 :** Situation géographique du site minier de Tortiya

## Données satellitaires et prétraitement

Les données de télédétection utilisées dans cette étude proviennent du satellite Sentinel-2 du programme Copernicus de l'Agence Spatiale Européenne (ESA). Les images exploitées correspondent au produit Sentinel-2 Surface Reflectance (COPERNICUS/S2\_SR) qui bénéficie d'une correction atmosphérique préalable (niveau L2A) garantissant une meilleure comparabilité radiométrique.

Seules les bandes du visible ont été retenues en raison de leur pertinence pour la caractérisation des surfaces en eau des zones anthropisées et de la couverture végétale superficielle : B2 (Bleu), B3 (Vert) et B4 (Rouge).

Les images ont été captées pour une période de 8 ans en fonction de la disponibilité (2015-2023) avec un seuil maximal de 10 % de couverture nuageuse afin de minimiser les perturbations atmosphériques.

## Traitement des images

L'extraction et le prétraitement des images Sentinel-2 ont été réalisés à l'aide de la plateforme Google Earth Engine (GEE) qui permet le traitement de grands volumes de données géospatiales dans un environnement cloud.

Les étapes suivantes ont été appliquées :

- Délimitation de la zone d'étude (Area Of Interest) à partir d'un polygone spatial.
- Filtrage spatial et temporel des images Sentinel-2.
- Filtrage des nuages basé sur le pourcentage de pixels nuageux.
- Agrégation temporelle par calcul de la médiane des images sélectionnées afin de produire une image représentative et stable.
- Découpage (clipping) des images selon la zone d'étude.

Les images finales ont été exportées avec une résolution spatiale de 10 m et un système de projection géographique (WGS 84).

## Extraction des indices spectraux

Les bandes visibles extraites ont été utilisées pour le calcul des indices spectraux. Cela s'est fait de façon automatique en intégrant les formules selon l'indice voulu dans Google Earth Engine (GEE) pour chaque pixel de l'image. Les indices sélectionnés sont :

- ✓ NDVI (Normalized Difference Vegetation Index)

L'objectif du calcul de cet indice est de détecter la dégradation de la couverture végétale liée aux zones d'exploitation et aux haldes. Bande utilisée : Rouge (B4), Vert (B3).

$$NDVI = \frac{B4 - B3}{B4 + B3}$$

- ✓ NDWI (Normalized Difference Water Index)

L'objectif ici est détecter les plans d'eau, zones humides et humidité de surface liés à la recharge des nappes et au transport de contaminants. Bande utilisée : Vert (B3), Rouge (B4).

$$NDWI = \frac{B3 - B4}{B3 + B4}$$

- ✓ NDTI (Normalized Difference Turbidity Index)

Son objectif est de quantifier la turbidité des eaux de surface et l'exposition des sols (érosion, sédiments), indicateurs des impacts miniers. Bande utilisée : Rouge (B4), Vert (B3).

$$NDTI = \frac{B4 - B3}{B4 + B3}$$

**Tableau 1 : Matrice de pondération normalisée**

Critère	NDTI	NDWI	NDVI	Poids ( $w_i$ )
NDTI	0.65	0.69	0.56	<b>0.63</b>
NDWI	0.22	0.23	0.33	<b>0.26</b>
NDVI	0.13	0.08	0.11	<b>0.11</b>

## Intégration de SIG

L'intégration de ces indices dans QGIS permet donc d'effectuer des analyses spatiales croisées et de générer une carte de la vulnérabilité environnementale, en mettant en relation la dégradation de la végétation, la turbidité des eaux et la présence d'eau de surface.

### *Normalisation des indices*

Les indices calculés présentent des plages de valeurs différentes et ne sont pas directement comparables. Une normalisation de type min–max a donc été appliquée :

$$X_{norm} = \frac{X - X_{min}}{X_{max} - X_{min}}$$

Étant donné que des valeurs élevées de l'indice de végétation traduisent une faible vulnérabilité, une inversion a été réalisée après normalisation :

$$NDVI_{inv} = 1 - NDVI_{norm}$$

Ainsi, tous les indices normalisés expriment une contribution croissante à la vulnérabilité environnementale sur une échelle commune comprise entre 0 et 1.

### *Détermination des pondérations par la méthode AHP*

Les pondérations des indices ont été déterminées à l'aide de la méthode AHP (Analytic Hierarchy Process) simplifiée, fondée sur des comparaisons par paires. Les indices NDVI, NDWI et NDTI ont été comparés selon leur influence relative sur la vulnérabilité à la contamination, en s'appuyant sur leur rôle physique respectif (protection du sol, transfert des polluants et pression anthropique).

La matrice de comparaison a été construite selon l'échelle de Saaty, puis normalisée afin d'extraire les poids( $w_i$ ) relatifs de chaque indice. Les pondérations finales obtenues sont les suivantes :

## Élaboration de la carte de vulnérabilité environnementale

La carte de vulnérabilité environnementale a été produite par combinaison linéaire pondérée des indices normalisés, selon l'équation suivante :

$$V = 0.63 \cdot NDTIn + 0.26 \cdot NDWIn + 0.11 \cdot NDVIn$$

L'indice de vulnérabilité résultant a été classé en cinq classes (très faible, faible, moyenne, élevée et très élevée) à l'aide de la méthode des seuils naturels (Jenks), afin de faciliter l'analyse spatiale des zones sensibles du site minier de Tortiya.

## Résultats

### Cartographie et interprétation des indices spectraux

#### Image satellitaire

L'image Sentinel-2 a permis de déterminer les indices NDVI, NDWI et NDTI à partir desquels a été faite la spatialisation environnementale des impacts miniers du site de Tortiya.

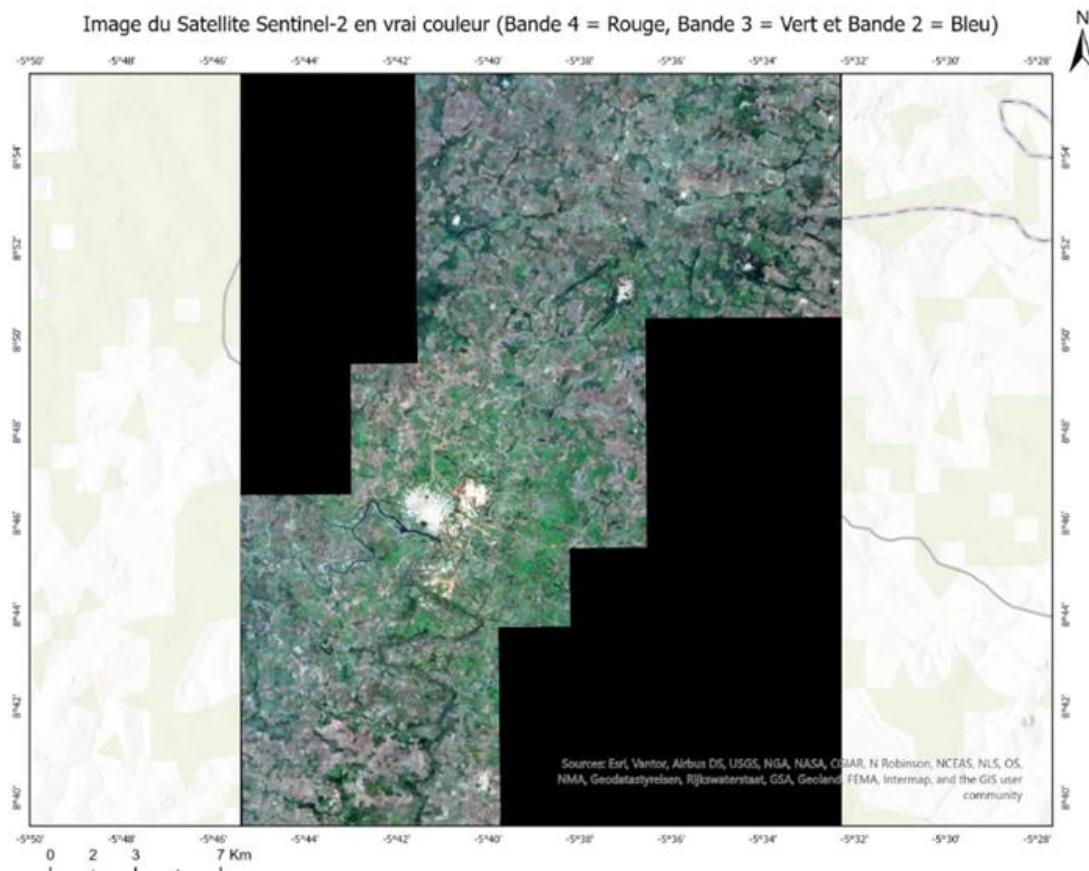


Figure 2 : Présentation de l'image satellitaire

## Le NDVI (Normalized Difference Vegetation Index)

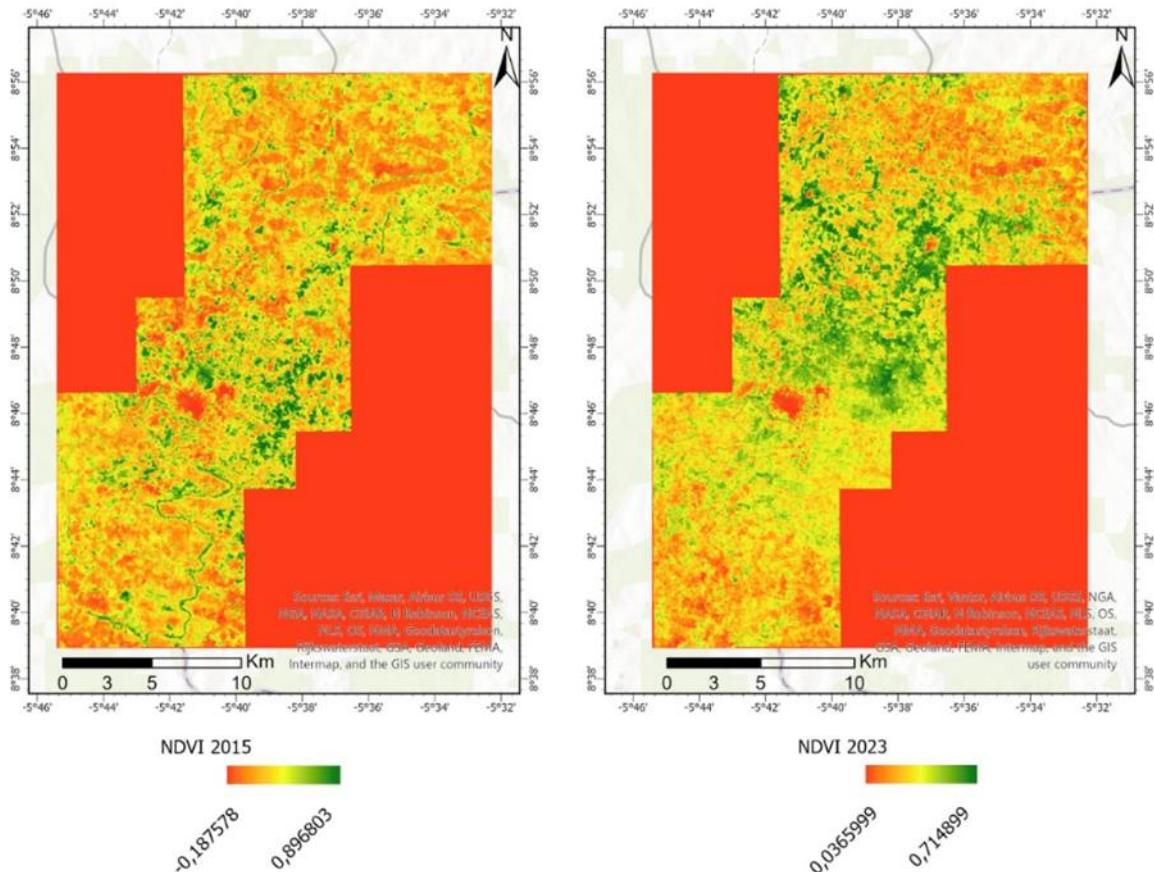


Figure 3 : Carte de l'indice de végétation

- On observe une reforestation dans le temps au Centre et au Nord-Ouest du site à l'exception d'un espace carrément rasé qui reste inchangé dans le Centre. Le Nord-Est et le Sud présentent de faibles valeurs de NDVI indiquant des sols nus ou une végétation stressée. Les zones de référence non impactées présentent des valeurs plus élevées.
- Les faibles valeurs du NDVI observées dans plusieurs secteurs du site minier indiquent une dégradation significative de la couverture végétale, réduisant ainsi la capacité naturelle des sols à limiter l'érosion et à filtrer les eaux d'infiltration.

## Le NDWI (Normalized Difference Water Index)

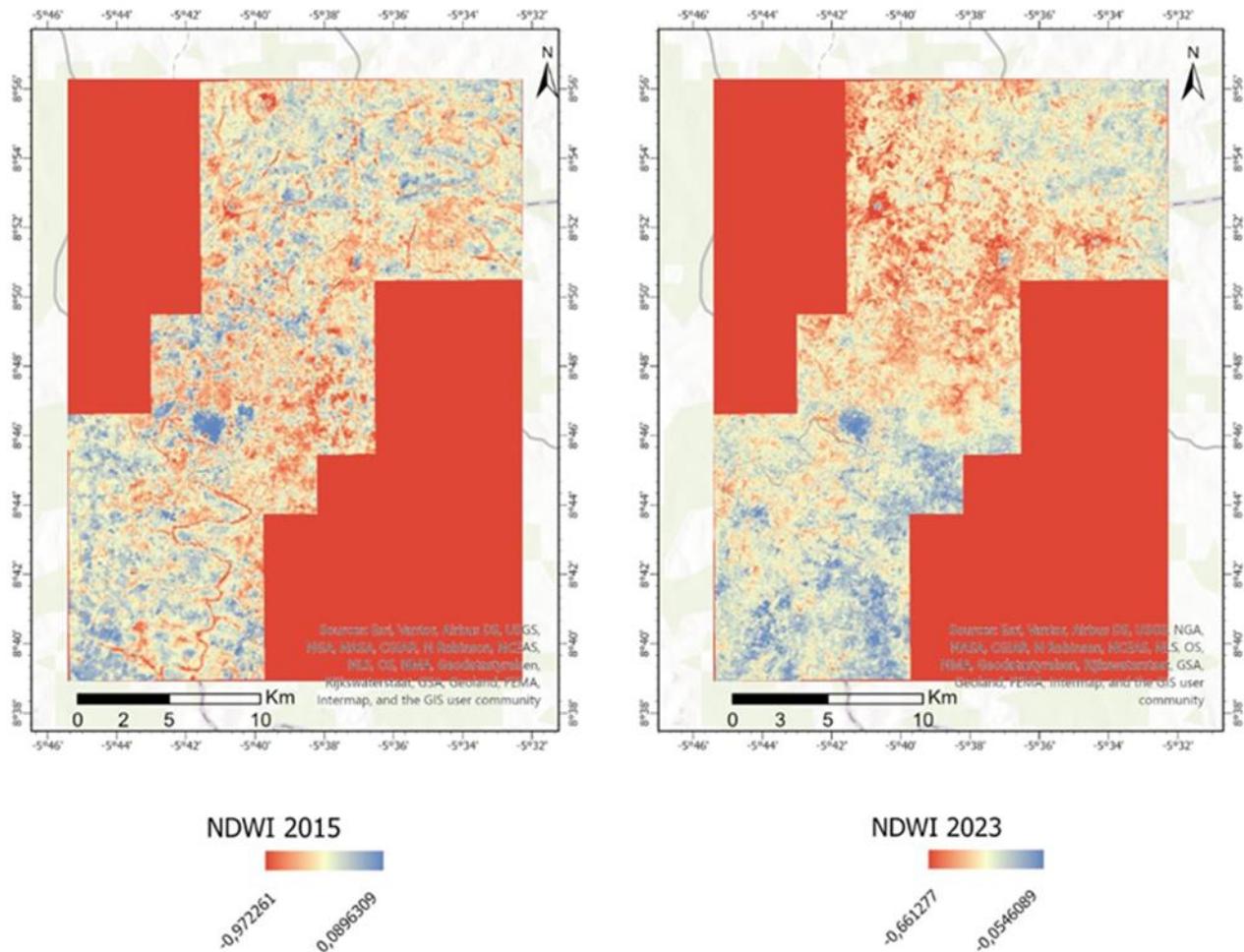


Figure 4 : Carte de l'indice de l'humidité

- On remarque ici une absence significative de plans d'eau dans le temps au Centre et au Nord-Ouest du site minier. Visiblement, ces deux parties du site seraient les zones les moins problématiques. A contrario, le Nord et le Sud à NDWI élevé sont particulièrement parsemés de plans d'eau et exposés au ravinement.
- Les faibles valeurs de NDWI observées temps au Centre et au Nord-Ouest révèlent d'un terrain moins anthropisé limitant ainsi la de rétention d'eau de précipitation.

## Le NDTI (Normalized Difference Turbidity Index)

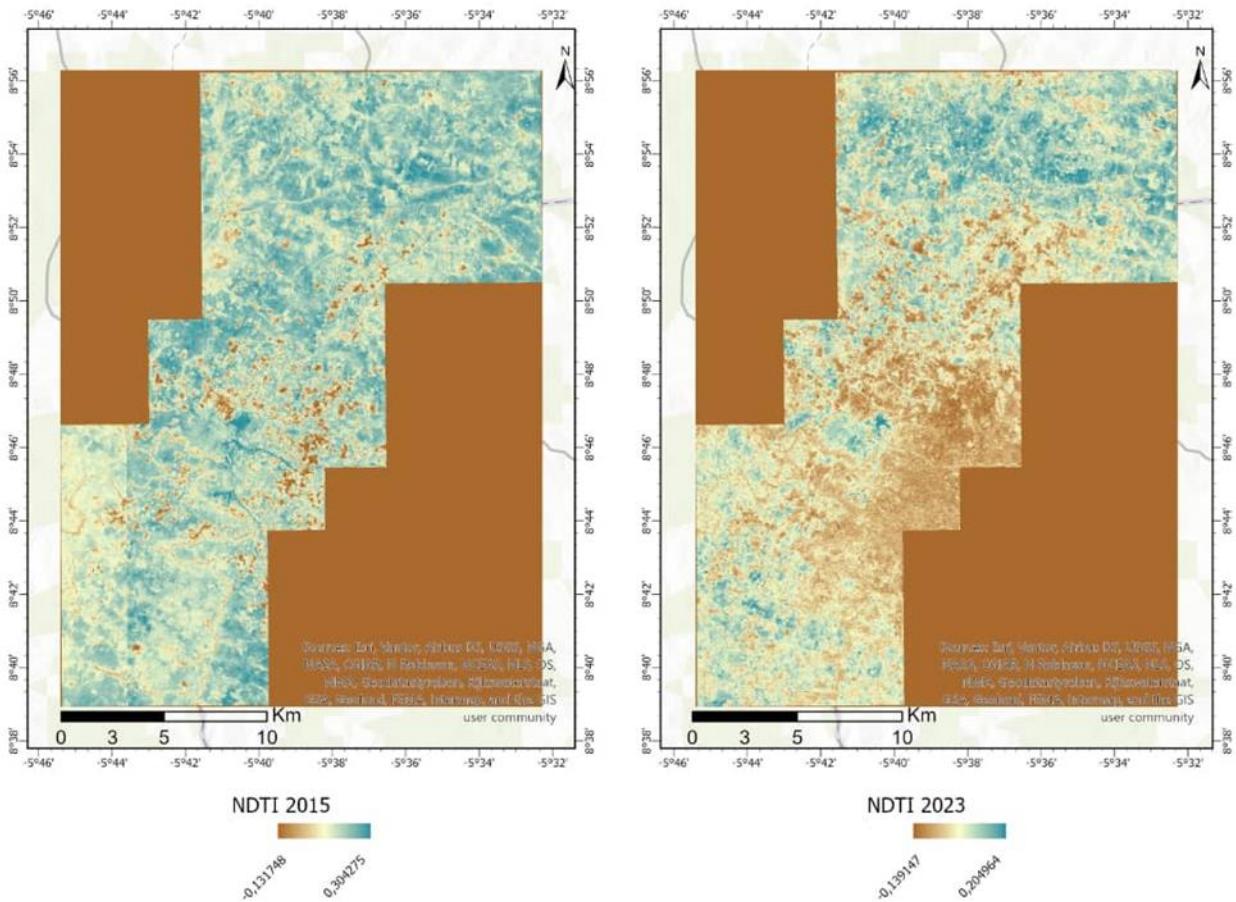
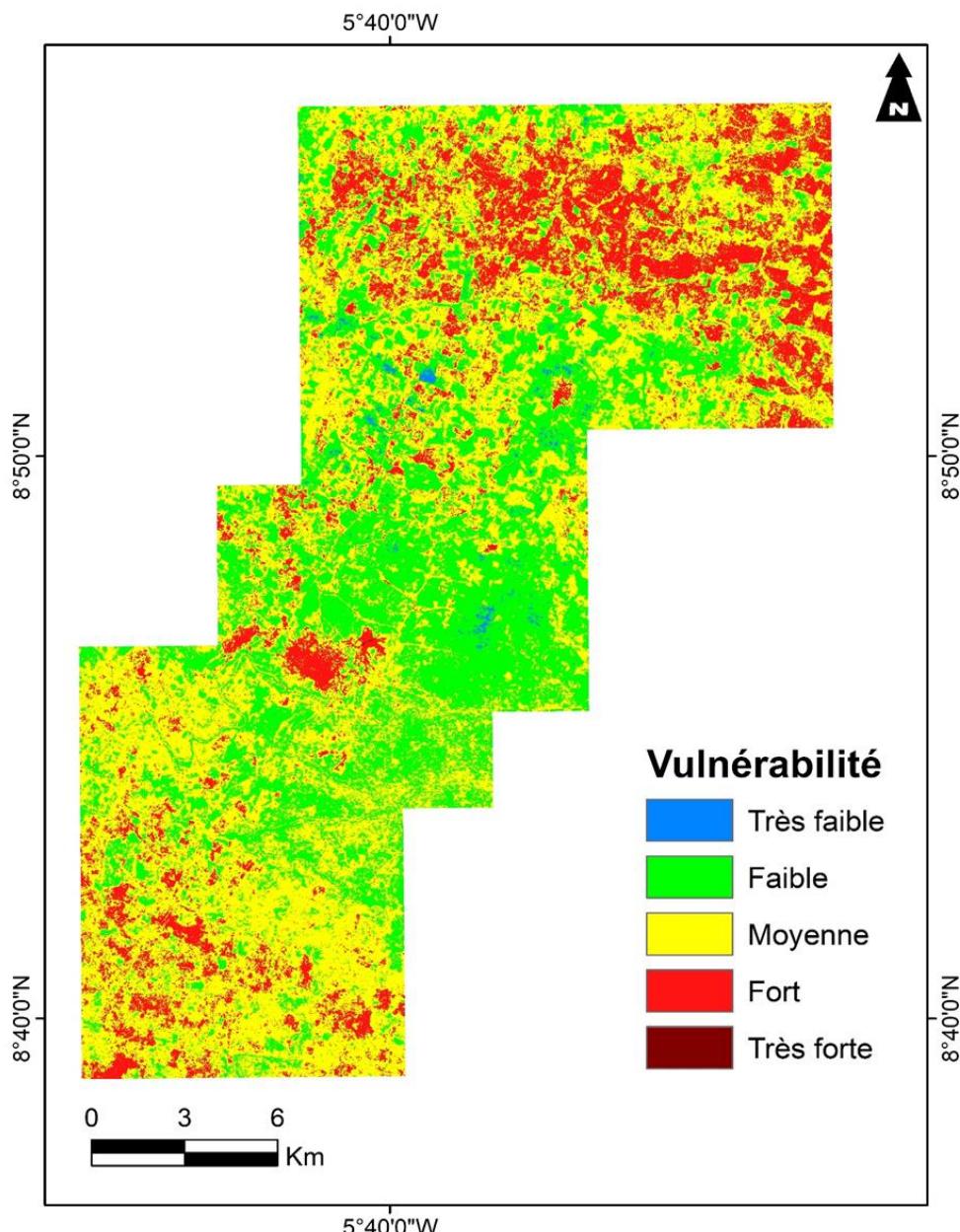


Figure 5 : Carte de l'indice de l'humidité

- De 2015-2023, on remarque une variation assez significative de la turbidité sur tout le site minier. En effet, les valeurs de turbidité ont chuté de façon graduelle allant du Sud au Centre.
- Alors de façon générale, le NDTI est plus élevé au Nord site, moyen au Sud et faible Centre. Dans le Centre-Est où la forêt est dense le suffrage du NDTI est presque nulle.
- Les valeurs élevées de NDTI peuvent immédiatement représenter des zones érodées ou des facteurs aggravants qui favorise le ruissellement, l'érosion et le transfert rapide des contaminants vers les aquifères.

## Vulnérabilité et analyse spatiale



**Figure 6 :** Carte de vulnérabilité environnementale du site minier de Tortiya

- L'intégration conjointe des indices NDVI, NDWI et NDTI met en évidence l'état qualitatif de l'environnement et sa vulnérabilité à la contamination.
- La carte de vulnérabilité environnementale issue du croisement des indices spectraux montre que la quasi-totalité du site est vulnérable à la contamination. Cela traduit une dégradation avancée du milieu et un risque accru de contamination du sol et de transfert de contaminants du sol vers les eaux souterraines. Cependant, le Nord et le Sud indiquent des classes élevées à très élevées du niveau de vulnérabilité faisant de ces deux zones les plus critiques du site minier de Tortiya.
- Par ailleurs, les résultats présentant les zones les plus critiques sont les zones où se combinent un NDVI faible, un NDWI faible et un NDTI élevé où la capacité naturelle de protection des aquifères est fortement compromise.

## Discussion

### Pertinence de l'approche

L'utilisation de Sentinel-2 avec GEE permet une surveillance rapide et automatisée de l'état de l'environnement sur une large échelle. L'intégration de SIG facilite la visualisation spatiale et la délimitation de zones vulnérables rendant la méthodologie praticable pour la gestion environnementale. La méthodologie peut orienter les mesures de protection des nappes et guider les autorités locales sur les zones prioritaires pour la surveillance.

Les indices spectraux sont des indicateurs d'informations pour l'analyse des irrégularités dans les paysages et de puissants outils pour exprimer des suffrages là où manquent des données *in situ*. Plusieurs chercheurs les ont utilisés comme outils d'analyse ou de prédiction dans leurs travaux. C'est le cas de Rahmati et al. (2015) qui grâce au croisement d'indices spectraux et paramètres physiques ont cartographier des zones de recharge de la nappe. Li et al. (2022) ont dans le même utilisés le NDVI pour évaluer l'impact de l'exploitation minière sur la végétation.

### Lien entre indices et qualité des nappes

L'analyse statistique corrélation, régression spatiale confirme la relation entre l'état de la surface (indices) et la qualité des nappes.

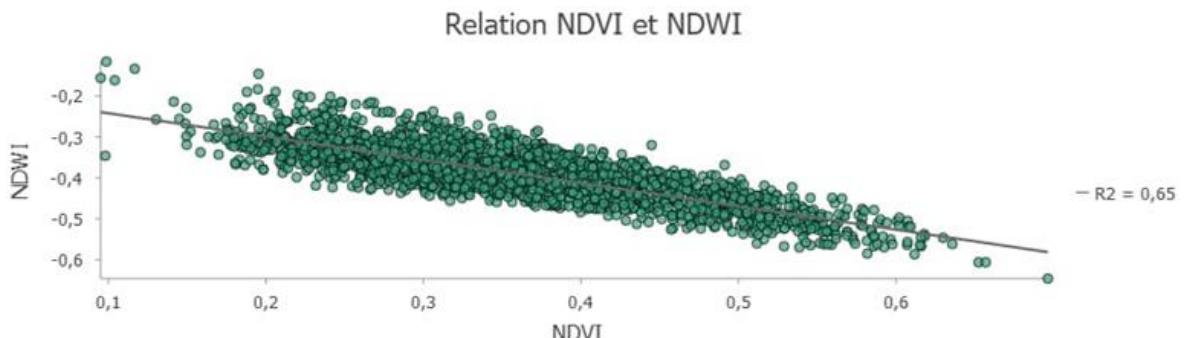


Figure 7 : Diagramme de corrélation entre NDVI et NDWI

Il ressort de cette analyse qu'il ya une forte corrélation entre le NDVI et le NDWI. Cette distribution spatiale révèle une relation directe entre la couverture végétale et la rétention de l'eau du sol.

Explicitement, les zones à forte couverture végétale présentent une meilleure rétention hydrique, traduisant augmentation de l'infiltration des eaux de pluie et contribution indirecte à la recharge des nappes souterraines, particulièrement en zones de socle fissuré comme celui de Tortiya. Ce résultat est cohérent avec les travaux de Gyssels et al. (2005) qui démontrent que les sols végétalisés présentent une résistance accrue à l'érosion et une meilleure capacité de stockage et d'infiltration de l'eau dans le sol.

De même, (Bronick et al 2005) soulignent que les sols sous couverture végétale continue présentent une capacité d'infiltration d'eau plus élevée en raison d'une meilleure stabilité des agrégats et d'une macroporosité plus développée.

À l'inverse, les zones à faible couverture végétale indiquant de faibles valeurs de NDVI présentent une faible capacité de rétention hydrique. L'absence de protection végétale expose directement le sol à l'érosion favorisant la diminution de l'infiltration. Ce comportement hydrologique a été largement documenté par Lal (2001) et Bruijnzeel (2004).

Par ailleurs, la relation observée entre le NDVI et NDWI est corroborée par des études en télédétection de Wang et al. (2005) qui montrent que des valeurs élevées de NDVI sont généralement associées à des teneurs en eau du sol plus importantes, confirmant le rôle de la végétation comme facteur clé du maintien de l'humidité des sols.

La reforestation observée au niveau de certaines zones du site pourrait s'expliquer par le fait qu'en saison pluvieuse, certaines surfaces perturbées peuvent montrer une reprise végétale temporaire augmentant ainsi le NDVI. Aussi, ce phénomène pourrait s'expliquer par la campagne de reboisement faite il y a quelques années représentant 10% du paysage boisé ([www.googleearthengine.com](http://www.googleearthengine.com)).

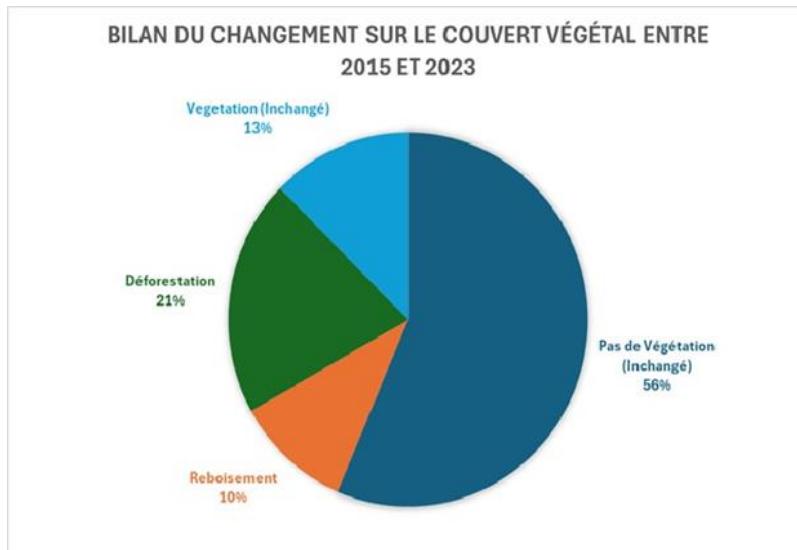


Figure 8 : Diagramme illustratif du niveau variation de la végétation

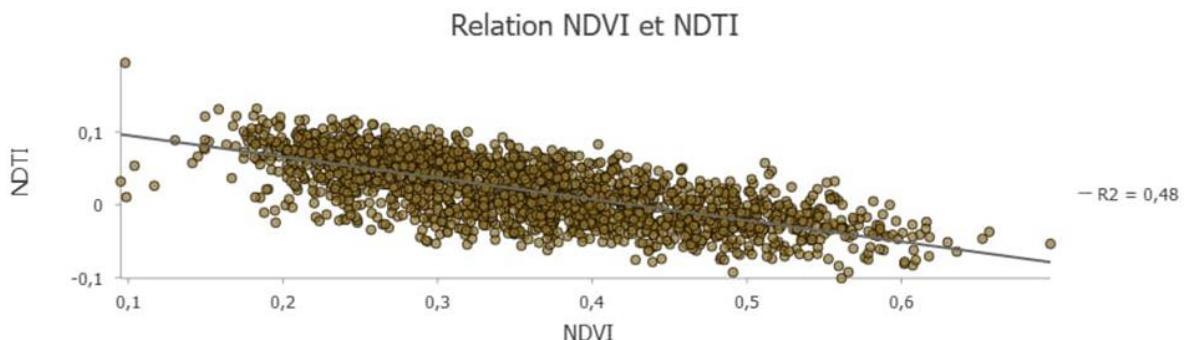


Figure 9 : Diagramme de corrélation entre NDVI et NDTI

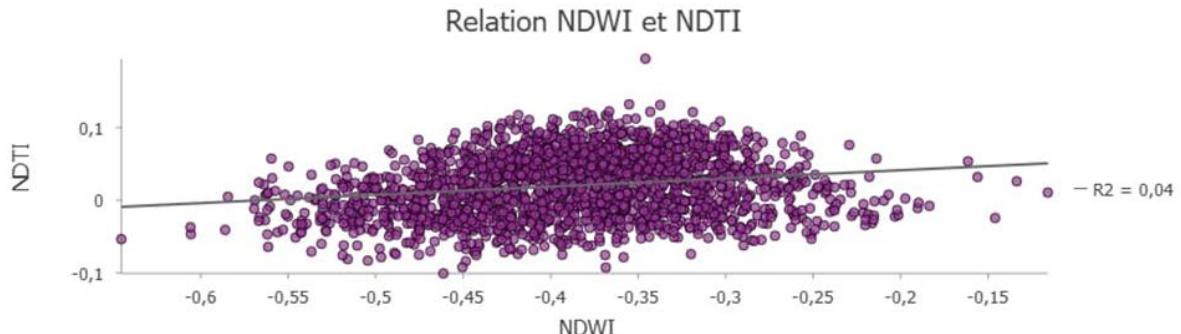
La corrélation négativement modérée observée entre le NDVI et le NDTI traduit une relation inverse significative mais nuancée entre la dynamique de la végétation et le degré de perturbation des sols. Elle met en évidence des paysages soumis à une anthropisation modérée où la dégradation des sols coexiste avec des poches de végétation active avec des implications directes sur la stabilité environnementale et la recharge potentielle des nappes souterraines.

Alors lorsque les activités anthropiques (exploitation minière, déforestation) augmentent, le NDTI tend à croître tandis que le NDVI diminue. Ces résultats sont en accord avec ceux de (Zhu et al., 2023) démontrant la pertinence de cette relation dans l'identification des secteurs à risque hydrogéologique élevé.

Enfin la combinaison NDVI-NDTI constitue un indicateur robuste de la dynamique végétation-sol-anthropisation. Elle permet d'identifier

efficacement les zones de dégradation environnementale et d'inférer indirectement les impacts potentiels sur la recharge et la vulnérabilité des nappes souterraines.

C'est dans ce sens que Roderick et al. (2007) ont montré que les combinaisons spectrales sont efficaces pour cartographier les états de surface vulnérables.



**Figure 10 :** Diagramme de corrélation entre NDWI et NDTI

Le NDWI et le NDTI dans cette étude présente une corrélation négativement mauvaise. Ce résultat signifie que NDWI et NDTI varient indépendamment. Cela pourrait s'expliquer par l'influence de l'effet saisonnier sur les variables (exemple des saisons pluvieuses). Dans le cas précis de Tortiya, l'on pourrait émettre l'hypothèse selon laquelle les précipitations ne sont pas des facteurs primordiaux de propagation de contaminant mais que la contamination peut être ponctuelle sous l'influence des activités anthropiques.

Ce résultat est à l'opposé des récents travaux de (Fang et al., 2021 ; Li et al., 2022) montrant que l'humidité de surface constitue un facteur clé dans la propagation des polluants en milieu tropical.

### Analyse de la vulnérabilité environnementale

Les résultats obtenus mettent en évidence une hétérogénéité spatiale marquée de la vulnérabilité environnementale du site minier de Tortiya. Les zones présentant une vulnérabilité élevée à très élevée correspondent principalement aux secteurs anciennement ou actuellement affectés par les activités minières, caractérisés par une forte exposition des sols nus, une dégradation de la couverture végétale et une faible rétention de l'humidité de surface.

Cette observation spatiale est cohérente avec les dynamiques observées dans de nombreux sites miniers abandonnés ou en activité, où la perturbation mécanique des sols entraîne une altération durable des processus hydrologiques de surface et de subsurface comme le décrit (Lal, 2001 ; Panagos et al., 2015).

Les zones les plus vulnérables à la contamination sont celles qui combinent un NDVI faible, un NDWI faible et un NDTI élevé indiquant une dégradation significative de la couverture végétale, une réduction de la capacité naturelle des sols à limiter l'érosion et à filtrer les eaux d'infiltration.

Dans ces zones-là, les nappes sont particulièrement exposées aux pollutions diffuses et ponctuelles par des résidus miniers, des métaux lourds et matières en suspensions dont le transfert est facilité par l'absence de filtration naturelle comme signifie (Förstner et al., 2012).

## Conclusion

Cette étude a démontré la pertinence de l'outil géomatique pour l'évaluation de la qualité des nappes souterraines dans un contexte minier complexe. En utilisant les indices spectraux NDVI, NDWI et NDTI extraits à partir d'image satellitaire, il a été possible de cartographier la dégradation de la couverture végétale, la turbidité des sols et la dynamique des eaux de surface sur le site de Tortiya.

L'intégration de ces indices dans un SIG a permis de réaliser une analyse spatiale détaillée, mettant en évidence les zones potentiellement vulnérables à la contamination des nappes souterraines à travers le rapport surface-subsurface.

Les résultats obtenus montrent quatre grandes classes de vulnérabilité dont les fortes et très fortes vulnérabilités au Nord et au Sud du site sont des zones d'extraction et des haldes aggravant la dégradation environnementale et favorisant l'infiltration de contaminants. A l'évidence, la quasi-totalité du site est soumis à des pressions anthropiques et les zones de référence avec couverture végétale intacte présentant une meilleure structure environnementale sont presque inexistantes.

Enfin, cette étude ouvre la voie à des analyses temporelles et multi-sources, en intégrant d'autres bandes spectrales ou des séries chronologiques, afin de suivre l'évolution des impacts miniers et de renforcer la planification de la protection des nappes sur le long terme.

**Conflit d'intérêts :** Les auteurs n'ont signalé aucun conflit d'intérêts.

**Disponibilité des données :** Toutes les données sont incluses dans le contenu de l'article.

**Déclaration de financement :** Les auteurs n'ont obtenu aucun financement pour cette recherche.

**References:**

1. Bamba, K., Kouassi, A., & Traoré, S. (2021). Étude de l'impact des activités minières artisanales sur la qualité de l'eau souterraine en Côte d'Ivoire. *Journal of African Earth Sciences*, 183, 104324.
2. Bronick, C. J., & Lal, R. (2005). Soil structure and management: A review. *Geoderma*, 124(1–2), 3–22. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2004.03.005>
3. Bruijnzeel, L. A. (2004). Hydrological functions of tropical forests: Not seeing the soil for the trees? *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 104(1), 185–228. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2004.01.015>
4. Chen, W., Hong, H., Li, S., & Shahabi, H. (2020). Spatial prediction of environmental vulnerability using remote sensing and GIS-based multi-criteria decision analysis. *Science of the Total Environment*, 706, 136–146.
5. Fang, Y., Zhang, X., & Lin, M. (2021). Surface water dynamics and environmental vulnerability assessment using multispectral remote sensing data. *Journal of Hydrology*, 603, 126–134.
6. Gao, B. C. (1996). NDWI—A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. *Remote Sensing of Environment*, 58(3), 257–266. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(96\)00067-3](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(96)00067-3)
7. Gyssels et al. (2005) Impact of plant roots on the resistance of soils to erosion. *Earth-Science Reviews*, 71, 25–57. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2005.01.002>
8. Jourda, J., Lapworth, D. J., & MacDonald, A. M. (2020). Hydrogeological characteristics of crystalline aquifers in West Africa. *Hydrogeology Journal*, 28(7), 2361–2376.
9. Kuenzer, C., Dech, S., & Wagner, W. (2019). Remote sensing for environmental monitoring and management
10. Lal, R. (2001). Soil degradation by erosion. *Land Degradation & Development*, 12(6), 519–539. <https://doi.org/10.1002/ldr.472>
11. Lapworth, D. J., Nkansah, M. A., & Stuart, M. E. (2020). Groundwater quality challenges in mining-impacted zones. *Environmental Earth Sciences*, 79, 145.
12. Li, X., Zhang, H., & Tam, C. Y. (2020). Remote sensing for water and vegetation monitoring: A review. *Remote Sensing*, 12(15), 2425.
13. Li, Z., Chen, Y., & Wang, J. (2022). Integrated assessment of surface vulnerability in mining areas using satellite-derived indices. *Environmental Monitoring and Assessment*, 194(5), 1–15.

14. MacDonald, A. M., Calow, R., & Lapworth, D. J. (2021). Groundwater resources in Africa: Vulnerability and management. *Science of the Total Environment*, 755, 142577.
15. Rahmati, O., Falah, F., Naghibi, S. A., & Deo, R. C. (2020). Application of GIS-based multi-criteria decision analysis for environmental vulnerability mapping. *Environmental Earth Sciences*, 79(18), 1–20.
16. Roderick, M. L., et al. (2007). On the attribution of vegetation trends. *Journal of Geophysical Research – Biogeosciences*, 112, G02015.
17. Tabelin, C. B., et al. (2021). Environmental impacts of gold mining on groundwater. *Journal of Environmental Management*, 283, 111973.
18. UNESCO. (2022). *The United Nations World Water Development Report 2022: Groundwater – Making the invisible visible*. UNESCO.
19. Wang, L., Li, H., & Zhang, Y. (2023). Turbidity monitoring using visible bands of Sentinel-2. *Remote Sensing of Environment*, 295, 113591.
20. Wang, Q., Adiku, S., Tenhunen, J., & Granier, A. (2005). On the relationship of NDVI with soil moisture in different vegetation types. *International Journal of Remote Sensing*, 26(12), 2495–2507. <https://doi.org/10.1080/01431160500166386>
21. Zhang, X., Friedl, M. A., Schaaf, C. B., & Strahler, A. H. (2013). Monitoring vegetation moisture using NDVI and NDWI. *Remote Sensing of Environment*, 127, 136–146. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2012.09.002>
22. Zhu, L., Zhang, H., & Liu, X. (2023). Vegetation cover and its role in mitigating environmental degradation: Insights from multispectral remote sensing. *Ecological Indicators*, 147, 109-120.
23. Zhu, Z., Wang, S., & Woodcock, C. E. (2019). Improvement and validation of cloud masking algorithm for Sentinel-2. *Remote Sensing of Environment*, 222, 217–232.