



Approche statistique par corrélation de Pearson pour l'évaluation de la stabilité du massif rocheux autour de la galerie d'amenée de l'aménagement hydroélectrique Zongo II

[A statistical approach using Pearson correlation to assess the stability of the rock mass surrounding the intake tunnel of the Zongo II hydroelectric project]

Boniface Mumbim Atalatala^{1,2*}, Omer Kawende^{1,2}, Ivon Ndala¹, André Mampuya Nzita^{3,4}, Clément N'zau Umba-Di-Mbudi^{1,3} & Jean Baptiste Mianza Kapit⁵

¹Université de Kinshasa, Faculté des Sciences et Technologies, Mention Géosciences, Kinshasa, République Démocratique du Congo

²Société Nationale d'Electricité (SNEL), RD Congo

³Faculté Polytechnique, Université Président Joseph Kasa-Vubu, Boma, République Démocratique du Congo

⁴Ecole Régionale de l'Eau (ERE), Université de Kinshasa (UNIKIN), Kinshasa, République Démocratique du Congo

⁵Institut Supérieur Technique, Kinshasa et Agent retraité de la Société Nationale d'Electricité (SNEL), République Démocratique du Congo

Résumé

Les ouvrages hydroélectriques souterrains constituent des infrastructures stratégiques dont la stabilité dépend fortement des caractéristiques géologiques, géotechniques, géophysiques et hydrodynamiques du massif rocheux encaissant. La présente étude porte sur la galerie d'amenée de l'aménagement hydroélectrique Zongo II, située dans le bassin de l'Inkisi au Kongo Central, en République Démocratique du Congo. Elle vise à analyser les relations entre la fracturation des grès feldspathiques, leurs propriétés mécaniques, géophysiques et hydrodynamiques afin d'évaluer la stabilité de l'ouvrage et les risques d'infiltration des eaux souterraines. La méthodologie adoptée repose sur une approche intégrée combinant des investigations géologiques et structurales, des essais géotechniques de laboratoire, des mesures géophysiques par sismique réflexion ainsi que des essais hydrauliques de type Lugeon réalisés dans plusieurs forages. Quarante-deux stations de mesures ont été réparties le long de la galerie afin d'assurer une représentativité spatiale des données. Les relations entre les paramètres géomécaniques, géophysiques et hydrodynamiques ont été analysées statistiquement à l'aide du coefficient de corrélation de Pearson sous l'environnement Python Anaconda. Les résultats montrent que le massif rocheux est globalement compact, résistant et faiblement perméable. Les fortes corrélations positives entre RMR, Q-system, RQD, UCS et Vp traduisent une bonne qualité géomécanique et une forte compacité des roches. A l'inverse, les corrélations négatives avec les paramètres hydrodynamiques indiquent que les zones fracturées favorisent les infiltrations d'eau et réduisent la stabilité locale. L'étude conclut que l'intégration des approches géotechniques, géophysiques et hydrodynamiques constitue un outil efficace pour améliorer la sécurité, la durabilité et la gestion des ouvrages hydroélectriques souterrains.

Mots-clés : Galerie d'amenée ; Géologie, Géotechnique, Géomécanique ; Géophysique ; Perméabilité ; Corrélation de Pearson.

Abstract

Underground hydroelectric facilities constitute strategic infrastructure whose stability depends heavily on the geological, geotechnical, geophysical, and hydrodynamic characteristics of the surrounding rock mass. This study focuses on the intake tunnel of the Zongo II hydroelectric project, located in the Inkisi basin in Kongo Central, Democratic Republic of Congo. It aims to analyze the relationships between the fracturing of feldspathic sandstones and their mechanical, geophysical, and hydrodynamic properties in order to assess the stability of the structure and the risks of groundwater infiltration. The methodology adopted is based on an integrated approach combining geological and structural investigations, laboratory geotechnical tests, geophysical measurements using seismic refraction, and Lugeon hydraulic tests carried out in several boreholes. Forty-two measurement stations were distributed along the tunnel to ensure spatial representativeness of the data. The relationships between geomechanical, geophysical, and hydrodynamic parameters were statistically analyzed using Pearson's correlation coefficient in the Python Anaconda environment. The results show that the rock mass is generally compact, resistant, and has low permeability. Strong positive correlations between RMR, Q-system, RQD, UCS, and Vp indicate good geomechanical quality and high rock compactness. Conversely, negative correlations with hydrodynamic parameters indicate that fractured zones promote water infiltration and reduce local stability. This study concludes that integrating geotechnical, geophysical, and hydrodynamic approaches is an effective tool for improving the safety, durability, and management of underground hydroelectric facilities.

Keywords: Penstock; Geology; Geotechnics; Geomechanics; Geophysics; Permeability; Pearson correlation.

*Auteur correspondant: Boniface Mumbim Atalatala, (bonimumbim2@gmail.com). Tél. : (+243) 819042243

 <https://orcid.org/0009-0009-6495-6312>; Reçu le 11/08/2026; Révisé le 07/09/2026; Accepté le 28/09/2026

DOI: <https://doi.org/10.59228/rcst.026.v5.i4.353>

Copyright: ©2026 Atalatala et al. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International License (CC-BY-NC-SA 4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.

1. Introduction

Les ouvrages hydroélectriques souterrains représentent des infrastructures stratégiques dont la stabilité dépend fortement des caractéristiques géologiques, géotechniques, géophysiques et hydrodynamiques des massifs rocheux encaissants. Dans les galeries d'amenée d'eau, la fracturation, l'altération et les circulations d'eau souterraine contrôlent directement la résistance mécanique, la stabilité des excavations et la durabilité des ouvrages. Une caractérisation intégrée des massifs rocheux est donc essentielle afin de limiter les risques d'instabilité et d'infiltration. Les approches géophysiques, géotechniques et hydrogéologiques sont aujourd'hui reconnues comme complémentaires dans l'analyse des ouvrages souterrains, notamment en milieux fracturés (Feng et al., 2019 ; Holub et al., 1994 ; Takahashi, 2004 ; Takahashi et al., 2006).

L'état de l'art montre que de nombreuses études ont établi des liens entre paramètres mécaniques et géophysiques. Rezaei et al. (2018) et Guo et al. (2023) confirment la corrélation entre propriétés géotechniques et vitesses sismiques. Akingboye et al. (2024) proposent des modèles intégrés améliorant la prédiction des propriétés du sous-sol. Par ailleurs, les approches d'apprentissage automatique renforcent la capacité de prédiction des comportements géotechniques et hydrodynamiques (Onyelowe et al., 2025 ; Yousefpour et al., 2025 ; Ye et al., 2026).

Dans le domaine hydroélectrique, Jembere et Yihdego (2016), Naithani et al. (2009) et Naji et al. (2019) soulignent l'impact de la fracturation et de l'hétérogénéité sur la stabilité des tunnels. Zhou et al. (2013) et Yanis et al. (2022) montrent l'importance de l'intégration géotechnique-géophysique pour la modélisation des ouvrages. Les méthodes géophysiques ont évolué depuis Arandjelović (1966), avec des avancées majeures dans l'imagerie et la détection des zones instables (Vyzhva et al., 2017 ; Deyneko et al., 2017 ; Frankstein et al., 2020).

Sur le plan hydrodynamique, El Osta et al. (2021) et Ekanem et al. (2025) montrent l'intérêt des approches hydrogéophysiques pour caractériser les aquifères, tandis que Pasculli et al. (2018) et Pinheiro et al. (2021) soulignent le rôle critique des interactions hydro-mécaniques dans la stabilité des excavations.

Cependant, malgré ces avancées, peu d'études intègrent simultanément les paramètres géomécaniques (RMR, Q-system, RQD), géophysiques (Vp, Iv) et hydrodynamiques (Lugeon, K) dans les formations

gréseuses du Supergroupe Ouest-Congolien du Kongo central, notamment en RDC. Les ouvrages du bassin de l'Inkisi restent encore insuffisamment documentés, alors que les études existantes se concentrent surtout sur les aspects énergétiques et hydrauliques (Kiraga, 2021 ; Lyubimova et al., 2020 ; Fang et al., 2008 ; Nzita et al., 2024).

La présente étude vise donc à combler cette lacune scientifique en proposant une analyse intégrée des relations entre les paramètres géomécaniques, géophysiques et hydrodynamiques du massif rocheux traversé par la galerie d'amenée de l'aménagement hydroélectrique Zongo II, située dans le bassin de l'Inkisi au Kongo Central en RDC. L'objectif principal est d'évaluer l'influence de la fracturation, de la qualité géomécanique et des propriétés élastiques des grès feldspathiques sur la circulation des eaux souterraines et la stabilité de la galerie. Plus spécifiquement, cette recherche cherche à caractériser les propriétés mécaniques et structurales du massif rocheux, à analyser les propriétés géophysiques à partir des vitesses des ondes sismiques, à déterminer les propriétés hydrodynamiques par essais Lugeon et à établir des corrélations statistiques entre ces différents paramètres à l'aide du coefficient de Pearson.

Pour atteindre ces objectifs, une approche méthodologique intégrée a été adoptée. Des investigations géologiques et structurales ont été réalisées le long de la galerie afin de caractériser les familles de fractures, les niveaux d'altération et les propriétés du massif rocheux. Des essais géotechniques de laboratoire ont permis de déterminer la résistance à la compression uniaxiale et les paramètres mécaniques des grès feldspathiques. Des mesures géophysiques par sismique réfraction ont ensuite été utilisées pour évaluer les vitesses des ondes longitudinales et l'indice d'intégrité du massif. Des essais hydrauliques sous pression de type Lugeon ont été effectués dans plusieurs forages afin d'estimer la perméabilité et les conditions de circulation des eaux souterraines. Enfin, les relations entre les paramètres géomécaniques, géophysiques et hydrodynamiques ont été analysées statistiquement à l'aide des coefficients de corrélation de Pearson sous l'environnement Python Anaconda (Nzita et al., 2025), permettant ainsi une interprétation quantitative intégrée du comportement du massif rocheux de Zongo II.

2. Matériel et méthodes

2.1. Type d'étude

La présente étude repose sur une approche méthodologique essentiellement documentaire et analytique, combinant la synthèse des données scientifiques existantes :

a. Revue bibliographique et géologique : Exploitation des cartes géologiques de la RDC (feuilles de Kinshasa et du Bas-Congo), des rapports de services géologiques et des thèses académiques antérieures portant sur le groupe de l'Inkisi, Rapport de prospection géotechnique dans le cadre du projet de centrale hydroélectrique ZONGO II (Version révisée)

b. Dépouillement des rapports géotechniques : Analyse de données de laboratoire issues de divers rapports d'ingénierie (essais de compression simple UCS, essais brésiliens de traction indirecte, détermination de l'indice de résistance géologique - GSI).

c. Analyse des paramètres géologiques, géotechniques, géophysiques et hydrodynamiques du massif rocheux traversé par la galerie d'amenée de la centrale hydroélectrique de Zongo II statistiquement à l'aide des coefficients de corrélation de Pearson sous l'environnement Python Anaconda, permettant ainsi une interprétation quantitative intégrée du comportement du massif rocheux de Zongo II.

2.2. Présentation du milieu d'étude et cadre géologique

Le site hydroélectrique de Zongo II est localisé dans la province du Kongo Central, à l'Ouest de la République Démocratique du Congo, à environ 70 km au sud-ouest de Kinshasa. Il est situé entre les latitudes 4°46'16'' et 4°46'46'' Sud, ainsi qu'entre les longitudes 14°52'02'' et 14°53'40'' Est. Le projet se situe dans le bassin versant de l'Inkisi, qui couvre une superficie d'environ 13 500 km², dont 5 151 km² en RDC. L'altitude de la zone d'étude varie entre 200 et 500 m. Zongo II (150 MW) constitue le troisième aménagement hydroélectrique sur le cours inférieur de la rivière Inkisi, après les centrales de Sanga (12 MW) et Zongo I (75 MW). L'infrastructure comprend une galerie principale de 2 544 m de longueur et de 7.5 à 9 m de diamètre, caractérisée par un tracé complexe présenté à la figure 1. Le cadre géologique est dominé par des formations géologiques meubles du Protérozoïque supérieur et du Quaternaire (Caballero et al., 2004 ; Kiraga, 2021 ; Yakovliev et al., 2024).

L'aménagement hydroélectrique Zongo II dispose d'une galerie longue de 2 544 m et de 9 à 7,5 m de diamètre suivant les endroits (Sinohydro, 2014). Elle se distingue par sa longueur, son diamètre imposant et son tracé complexe, comprenant deux virages majeurs et des galeries auxiliaires (ou secondaires) dédiées à la maintenance (figure 1).

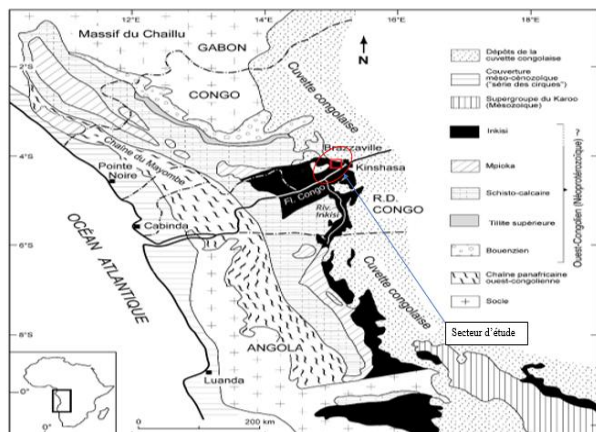


Figure 1. Vue panoramique du site de l'aménagement hydroélectrique Zongo II, adaptation personnelle à partir de l'image satellitaire extraite de Google Mapp

Le cadre géologique appartient au Supergroupe Ouest-Congolien et à la Formation de l'Inkisi (Pt3a), dominée par des grès arkosiques, quartzites et niveaux

péliciques fracturés. Le climat tropical humide favorise l'altération latéritique superficielle et influence les propriétés hydrodynamiques du massif rocheux dans la

et al., 2017). Des essais Lugeon ont ensuite évalué la perméabilité du massif rocheux (0.3 MPa, 0.6 MPa et 1.0 MPa) sur des sections isolées de 5 m à l'aide d'obturateurs pneumatiques. Les coefficients de perméabilité hydraulique ont été déterminés à partir de la loi de Darcy appliquée au régime permanent :



2.3. Stratégie d'échantillonnage et acquisition des données

$$K = \frac{Q}{A \times i} \quad (2)$$

$$K = \frac{Q}{H_l \times i} \ln \left(\frac{L}{r_0} \right) \quad (3)$$

2.4. Classification géomécanique et traitement statistique

$$RMR = R_1 + R_2 + R_3 + R_4 + R_5 + R_6 \quad (4)$$
$$RQD = 100 \times e^{-0.1\lambda}(1 + 0.1\lambda) \quad (5)$$

Parallèlement, l'indice de qualité Q proposé par Barton a été calculé afin de caractériser la stabilité potentielle de la galerie et les besoins en soutènement. Ce paramètre est défini par :

$$V_p = \frac{L}{t} \quad (1)$$

Où L représente la distance séparant la source du géophone, fixée à 2,0 m, et t le temps de première arrivée de l'onde compressive. Les mesures de célérité ont permis de déterminer l'indice d'intégrité du massif (I_v) et d'identifier les zones fracturées ou conductrices grâce aux méthodes sismiques (Arandjelović, 1966 ; Takahashi et al., 2006 ; Deyneko et al., 2017 ; Vyzhva

$$Q = \left(\frac{RQD}{J_n} \right) \times \left(\frac{J_r}{J_a} \right) \times \left(\frac{J_w}{SRF} \right) \quad (6)$$

Où J_n correspond au nombre de familles de joints, J_r à l'indice de rugosité, J_a à l'altération des surfaces de fracture, J_w au facteur de réduction lié à l'eau et SRF au facteur de réduction des contraintes. Le système Q constitue l'un des outils les plus utilisés dans le dimensionnement des soutènements de tunnels et l'évaluation de la stabilité des excavations souterraines (Buljan & Prelogović, 1997 ; Imran & Rahul, 2016 ; Naji et al., 2019).

Enfin, les relations entre les paramètres géomécaniques, géophysiques et hydrodynamiques ont été analysées à l'aide du coefficient de corrélation linéaire de Pearson afin de vérifier l'existence de lois de comportement cohérentes entre la fracturation du massif, sa perméabilité et sa réponse élastique. Le coefficient de corrélation r est exprimé par :

$$r = \frac{\sum(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum(x_i - \bar{x})^2 \sum(y_i - \bar{y})^2}} \quad (7)$$

Où x_i et y_i représentent les valeurs observées des variables étudiées et $\bar{x}$, $\bar{y}$ leurs moyennes arithmétiques respectives. Cette approche statistique permet d'établir des corrélations quantitatives entre les indices géomécaniques (RMR, Q), les vitesses sismiques (V_p) et les coefficients de perméabilité hydraulique (K), en vue d'une interprétation intégrée du comportement du massif rocheux encaissant la galerie de Zongo II (Akingboye et al., 2024 ; Rezaei et al., 2018 ; Onyelowe et al., 2025 ; Takahashi et al., 2006).

2.5. Analyse de corrélation de Pearson aux variables géomécaniques, géophysiques et hydrodynamiques du massif rocheux au logiciel python anaconda

Le logiciel Anaconda a été utilisé pour développer un script basé sur l'analyse de corrélation linéaire de Pearson appliquée aux variables géomécaniques, géophysiques et hydrodynamiques du massif rocheux (Nzita et al., 2024). Les données ont été organisées sous forme de dataframe puis analysées avec la fonction `df.corr(method='pearson')` afin d'obtenir la matrice de corrélation. Les tests statistiques réalisés avec `pearsonr` ont permis de calculer les coefficients r et les p -values pour identifier les corrélations significatives ($p < 0.05$) et quantifier les dépendances entre les propriétés du massif rocheux (Ye

et al., 2026 ; Yousefpour et al., 2025 ; Nzita et al., 2025).

3. Résultats

3.1. Géologiques et profils d'altération structurale

La constitution géologique autour de la galerie d'amenée présente une forte régularité avec une structure monoclinale subhorizontale. Les strates suivent une direction moyenne NW300°–320°, inclinées vers le NE avec un pendage faible de 5°–10°. Aucune faille majeure ni zone de cisaillement n'a été observée. Le massif est affecté par deux familles principales de diaclases : l'ensemble ① orienté NE50°–60°, quasi vertical (90°), avec un espacement de 0.5–1 m ; et l'ensemble ② orienté NW320°–350°, pendage SW de 60°–85°, espacement de 1–2 m. Les fractures sont faiblement ouvertes et sans remplissage notable. Aucun glissement, affaissement ou chute de blocs n'a été identifié. L'altération météoritique varie selon le relief : au fond des vallées, l'altération forte atteint 0.5–2.6 m et l'altération faible 5.0–9.9 m ; à l'entrée de la galerie, les épaisseurs varient de 0.8–1.4 m puis 4.6–8.1 m ; au sommet des collines, l'altération latéritique atteint 30.95–33.3 m au-dessus d'un horizon gréseux fortement altéré de 8.4 m.

3.2. Géotechniques et classification des roches encaissantes

L'encaissant est constitué de grès feldspathiques de la formation Inkisi (Pt3a). Les horizons modérément altérés présentent une densité de 2.63 g/cm³, une porosité de 0,89 % et $\sigma_c = 91.0$ MPa. Les horizons faiblement altérés à frais montrent 2.64 g/cm³, 1.35 % et $\sigma_c = 181.7$ MPa. La caractérisation géotechnique globale de la galerie d'adduction ou d'amenée d'eau, étalée sur un linéaire total excavé de 2 534.822 m, est synthétisée dans le [tableau I](#).

Tableau I. Catégories et proportions des roches encaissantes le long de la galerie d'amenée d'eau de Zongo II (Source : [Sinohydro, 2014](#))

Galerie d'adduction ou d'amenée	Catégorie des roches encaissantes	Longueur de section des roches (m)	Proportion par rapport à la longueur totale (%)	Qualité du massif
2 534.822 m	Classe II	1 955.822	77.2 %	Bonne roche
	Classe III	493.000	19.5 %	Roche moyenne
	Classe IV	82.000	3.2 %	Mauvaise roche
	Classe V	4.000	0.1 %	Très mauvaise roche

Le comportement structural longitudinal indique une excellente stabilité des parois, les classes géomécaniques II et III représentant 96,7 % de la galerie, contre seulement 3,3 % pour les classes dégradées IV et V. À l'entrée (H0+000–H0+060), sous

une couverture de 16–58 m, des grès feldspathiques modérément altérés présentent des fractures inclinées de 20°–35° et 75°–90°, associées à la nappe phréatique, classant cette zone en catégorie III. Le tronçon central (H0+060–H2+514), sous 50–140 m de couverture, reste majoritairement en classes II–III,

Tableau II. Caractéristiques géomécaniques de la roche encaissante suivant ses catégories (Source : Sinohydro, 2014 / Guilloux et al., 2021)

Lithologie	Catégorie de roche	Densité (g/cm ³)	Module de déformation Em (GPa)	Module d'Élasticité E (GPa)	Coefficient de Poisson ν	Coeffi-cient de résis-tance élasti-que Ks (MPa/m)	Coeffi-cient de stabilisation	Coefficient de réduction d'eau pressiométrique extérieure
Grès feldspathique	II	2.64	8 – 10	15 ~ 18	0.25	7 000 ~ 8 000	7	0.1 ~ 0.4
	III	2.63	4 – 6	8 ~ 12	0.30	3 000 ~ 4 000	4	-
	IV	2.40	1 – 2	3 ~ 4	0.35	800 ~ 1 500	2 ~ 3	0.4 ~ 0,6
	V	2.20	0.2–0.5	0.5 ~ 0.8	0.40	100 ~ 300	0.8 ~ 1.0	-

Le [tableau II](#) montre une dégradation progressive du grès feldspathique des catégories II à V. Les roches de catégorie II sont denses, résistantes et stables, tandis que celles de catégorie V sont fragiles, déformables et sensibles à l'eau, nécessitant un soutènement renforcé dans certaines zones de la galerie.

3.3. Investigations géophysiques

L'analyse par sismique réfraction montre une amélioration progressive de la qualité rocheuse avec la profondeur. Le massif superficiel fortement altéré présente des vitesses Vp de 1 710–2 410 m/s ($\mu=1\,960$ m/s) et un indice Kv de 0.12–0.23 ($\mu=0,15$), traduisant une roche très fracturée. Le massif intermédiaire affiche des Vp de 2 700–4 880 m/s ($\mu=4\,140$ m/s) et Kv de 0.29–0.95 ($\mu=0.69$), indiquant une compacité

sauf les sections H1+055–H1+077 (classe IV) et H1+996–H2+000 (4 m, classe V) fortement fracturées. Les paramètres d'ingénierie élastiques et mécaniques calculés pour le dimensionnement du soutènement selon ces catégories de terrain sont répertoriés dans le [tableau II](#).

moyenne. En profondeur, les Vp atteignent 3 180–5 260 m/s ($\mu=4\,620$ m/s) avec Kv de 0.40–1.00 ($\mu=0.85$), révélant une roche compacte à très compacte. Le test de Pearson confirme une forte corrélation positive ($r=+0.82$).

3.4. Hydrogéologiques et hydrodynamiques

Les diagraphies de forages le long du tracé montrent que les cotes stabilisées du niveau d'eau souterraine se situent entre 342 m et 387 m dans le [tableau III](#). La galerie d'amenée étant creusée à des cotes de fond variant entre 340 m et 310 m, l'excavation s'est implantée entièrement sous le niveau de la nappe phréatique active, plaçant l'ouvrage sous une charge hydrostatique permanente.

Tableau III. Résultats d'observation de la nappe souterraine dans les sondages de la galerie d'amenée (Source : Sinohydro, 2014)

N° Sondage	Position du sondage (N° Piquetage)	Cote du trou (m)	Niveau d'eau souterraine (m) / Date d'observation	Condition hydrogéologique
TZK1	H0 – 30.401	347.35	341.90 / 12-4-2010	Aquifère phréatique interceptée
TZK2	Amont du sondage TZK6	425.93	387.43 / 18-3-2010	Aquifère phréatique élevée
TZK3	H1 + 544.329	380.00	370.10 / 15-4-2010	Aquifère phréatique interceptée
TZK4	H2 + 519.909	385.09	Sans niveau d'eau décelé	Secteur localement sec / étanche
TZK5	H2 + 759.689	344.53	Sans niveau d'eau décelé	Secteur localement sec / étanche
TZK6	H0 + 987.599	386.64	382.84 / 08-4-2010	Aquifère phréatique élevée

Les sondages TZK1, TZK2, TZK3 et TZK6 ont révélé des aquifères actifs dans la galerie, indiquant une circulation d'eau dans les fractures rocheuses. À l'inverse, TZK4 et TZK5 sont restés secs, traduisant des zones compactes et étanches. La perméabilité a été

déterminée par essais pressiométriques. L'essai d'eau pressiométrique des sondages était fait par la séparation du piston simple du haut en bas avec la profondeur croissante du sondage. Le tronçon d'essai est de 5 m, la réalisation par trois pressions (0.3 MPa, 0.6 MPa, 1.0 MPa) avec 5 phases dans le [tableau IV](#).

Tableau IV. Essai d'eau pressiométrique des sondages le long de la galerie

Position du sondage	N° du sondage	Section (m)	Cote (m)	Niveau d'altération	Perméabilité (Lu)	Type de la courbe de l'essai	Coefficient de perméabilité K	
							m/d	cm/s
H0-30.401	TZK1	10.0~15.0	337.35~332.35	Peu-neuf	0.54	A	0.0042	4.9E-06
		15.0~20.0	332.35~327.35		0.44	A	0.0029	3.4E-06
		20.0~25.0	327.35~322.35		0.38	A	0.0025	2.9E-06
		25.0~30.0	322.35~317.35		0.60	A	0.0050	5.8E-06
H0+987.599	TZK6	5.0~10.0	381.64~376.64	Faible	2.4	A	0.0242	2.8E-05
		10.0~15.0	376.64~371.64	Peu-neuf	2.8	A	0.0238	2.8E-05
		15.0~20.0	371.64~366.64		1.3	A	0.0084	9.8E-06
		20.0~25.0	366.64~371.64		0.70	A	0.0041	4.8E-06
		25.0~30.0	316.64~356.64		0.94	A	0.0048	5.7E-06
H1+544.329	TZK3	10.0~15.0	370.00~365.00	Faible	2.4	A	0.0186	2.2E-05
		15.0~20.0	365.00~360.00	Peu - neuf	2.1	A	0.0185	2.1E-05
		20.0~25.0	360.00~355.00		0.52	A	0.0038	4.4E-06
		25.0~30.0	355.00~350.00		0.96	A	0.0055	6.4E-06
		30.0~35.0	350.00~345.00		1.7	A	0.0099	1.2E-05
		35.0~40.0	345.00~340.00		1.6	A	0.0081	9.4E-06
		40.0~45.0	340.00~335.00		1.8	A	0.0125	1.5E-05
		45.0~50.0	335.00~330.00		1.5	A	0.0064	7.5E-06
		55.0~60.0	330.09~325.09		Faible	2.3	A	0.0083
60.0~65.0	325.09~320.09	1.7	A	0.0060		7.0E-06		
Max.				2.8		0.0242	2.8E-05	
Mini.				0.38		0.0025	2.9E-06	
Moyenne				1.40		0.0081	9.3E-06	
Moyenne des minima				0.70		0.0044	5.1E-06	
Moyenne des maxima				2.0		0.0136	1.6E-05	
Différence nominale				0.77		0.0042	4.9E-06	
Coefficient variant				0.55		0.52	0.53	

Les essais pressiométriques du [tableau IV](#) indiquent une faible à moyenne perméabilité du massif rocheux, avec des valeurs comprises entre 0.38 et 2.8 Lu ($\mu=1,40$ Lu). Le sondage TZK1 révèle une roche compacte et peu fissurée, favorable à la stabilité. À l'inverse, TZK3 et TZK6 montrent des zones plus fracturées facilitant l'infiltration d'eau. Globalement,

le massif reste adapté aux travaux souterrains, bien que certaines sections nécessitent des mesures d'étanchéité et de drainage pour limiter les circulations hydrauliques. L'analyse fréquentielle menée sur 25 sections d'essais dans le [tableau V](#) confirme que la perméabilité reste faible à légère, excluant toute conductivité de type karstique ouverte.

Tableau V. Classement de perméabilité des grès selon les tronçons d'essais (Source : [Sinohydro, 2014](#))

Niveau d'altération	Nombre de tronçons d'essai	Perméabilité très légère ($q < 0,1$ Lu)	Perméabilité légère ($0,1 \leq q < 1$ Lu)	Perméabilité faible ($1 \leq q < 10$ Lu)
Altération faible	5	0 % (0 tronçon)	20 % (1 tronçon)	80 % (4 tronçons)
Léger et frais	20	10 % (2 tronçons)	50 % (10 tronçons)	40 % (8 tronçons)

Le [tableau V](#) montre une faible circulation d'eau dans les grès fracturés. Les zones faiblement altérées présentent une perméabilité plus élevée, favorisant les infiltrations, tandis que les roches fraîches restent compactes et relativement étanches. L'application de la loi de Darcy aux essais Lugeon a permis d'estimer des

coefficients de perméabilité variant de $K=1.6 \times 10^{-5}$ cm/s (0.0136 m/j) dans les secteurs peu confinés à $K=2.9 \times 10^{-6}$ cm/s (0.0025 m/j) dans les horizons profonds fortement confinés, confirmant une faible conductivité hydraulique globale du massif dans le [tableau VI](#).

Tableau VI. Valeurs du coefficient de perméabilité (K) calculées le long du tracé de la galerie d'amenée (Source d'origine : [Sinohydro, 2014](#))

Position le long du tracé (m)	Formation & Faciès Lithologique	Caractéristiques Structurales	Longueur du tronçon (m)	Profondeur noyée moyenne (m)	Coeff. de perméabilité K (m/d)	Coeff. de perméabilité K (cm/s)
0+000 ~ 0+888	Pt3a - Grès quartzueux arkosique	Fissure non croissante	888	114	0.0081	9.3×10^{-6}
0+888 ~ 1+000	Pt3a - Grès quartzueux arkosique	Fissure non croissante	112	60	0.0136	1.6×10^{-5}
1+000 ~ 1+500	Pt3a - Grès quartzueux arkosique	Fissure non croissante	500	78	0.0081	9.3×10^{-6}
1+500 ~ 1+813	Pt3a - Grès quartzueux arkosique	Fissure non croissante	313	62	0.0136	1.6×10^{-5}
1+813 ~ 2+514	Pt3a - Grès quartzueux arkosique	Fissure non croissante	701	107	0.0081	9.3×10^{-6}

Le **tableau VI** indique une faible perméabilité globale des grès, limitant la circulation d'eau. Les fissures restent stables et cohésives. Certaines zones présentent toutefois une perméabilité légèrement plus élevée, favorisant des infiltrations locales et nécessitant une surveillance hydrogéologique adaptée.

3.5. Coefficient de corrélation linéaire de Pearson les relations entre les paramètres géomécaniques, géophysiques et hydrodynamiques

Le **tableau VII** présente une synthèse des relations entre les paramètres géomécaniques, géophysiques et hydrodynamiques du massif rocheux étudié.

Tableau VII. Relations entre les paramètres géomécaniques, géophysiques et hydrodynamiques

Station	RMR	Q-system	RQD	UCS (MPa)	Vp (m/s)	Iv	Lugeon
1	72	15.0	85	182	5260	1.00	0.38
2	68	12.0	82	176	5100	0.95	0.44
3	65	10.0	80	170	4980	0.92	0.52
4	60	8.0	76	160	4800	0.88	0.60
5	58	7.0	74	150	4700	0.85	0.70

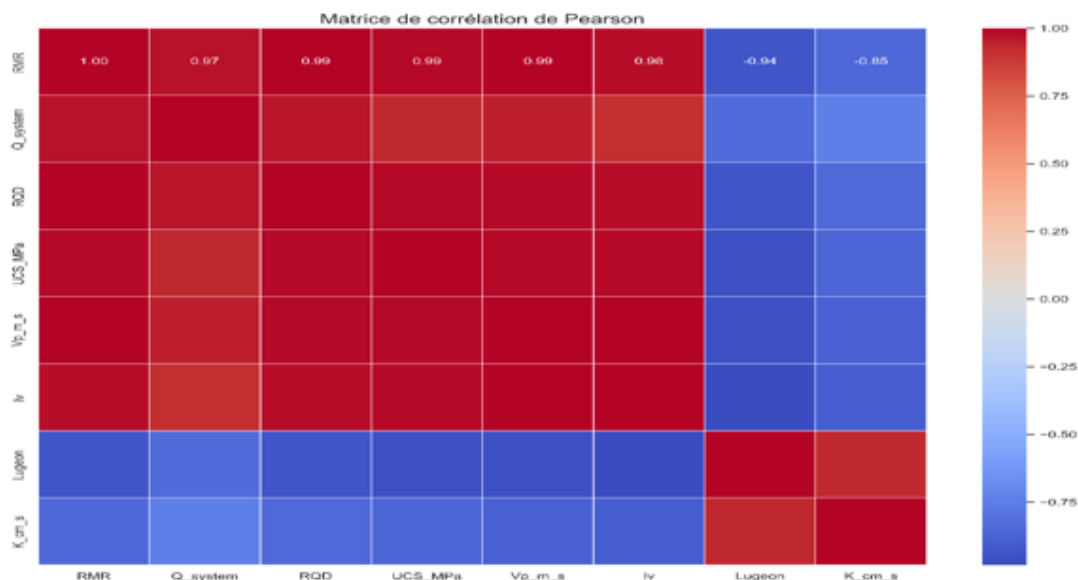


Figure 3. Matrice de corrélation de Pearson des relations entre les paramètres géomécaniques, géophysiques et hydrodynamiques du massif rocheux

L'analyse statistique met en évidence de très fortes relations entre les paramètres géomécaniques, géophysiques et hydrodynamiques du massif rocheux de Zongo II. Le RMR présente des corrélations positives élevées avec le Q-system ($r=0.973$), le RQD ($r=0.994$), l'UCS ($r=0.988$), la vitesse sismique Vp ($r=0.993$) et l'indice d'intégrité Iv ($r=0.981$), avec des p-values=0.000. Cela indique que l'amélioration de la qualité géomécanique s'accompagne d'une roche plus compacte, résistante et stable, réduisant les risques d'effondrement et les besoins en soutènement. Le Q-system montre également de fortes corrélations avec le

Le **tableau VII** montre une bonne qualité géomécanique du massif, caractérisée par des vitesses sismiques élevées, une forte résistance mécanique et de bons indices RMR, Q-system, RQD et UCS. Les faibles valeurs Lugeon et K_{cm_s} indiquent une faible circulation d'eau. La **figure 3**, basée sur la corrélation de Pearson, met en évidence les relations positives et négatives entre paramètres géomécaniques, géophysiques et hydrodynamiques, confirmant un massif globalement compact, stable et favorable aux travaux souterrains.

RQD ($r=0.966$), l'UCS ($r=0.937$), Vp ($r=0.949$) et Iv ($r=0.917$), confirmant la cohérence des méthodes de classification et la bonne qualité globale du massif.

Les paramètres hydrodynamiques présentent cependant des corrélations négatives importantes. Le Lugeon est négativement corrélé au RMR ($r=-0.938$), au RQD ($r=-0.937$), à l'UCS ($r=-0.960$), à Vp ($r=-0.962$) et à Iv ($r=-0.982$). Le coefficient de perméabilité K montre aussi des corrélations négatives avec le RMR ($r=-0.853$), le Q-system ($r=-0.746$), le RQD ($r=-0.847$), l'UCS ($r=-0.863$), Vp ($r=-0.885$) et Iv ($r=-0.903$). Ces résultats traduisent une augmentation des infiltrations

d'eau dans les zones fracturées. Enfin, la forte corrélation positive entre Lugeon et K ($r=0.933$) confirme la relation directe entre perméabilité et circulation d'eau.

3.6. Comparaison des Coefficients de Pearson entre différents paramètres géomécaniques, géophysiques et hydrodynamiques

Cette figure 4 présente une comparaison des corrélations de Pearson entre différents paramètres géomécaniques (RMR, Q-system, RQD, UCS), géophysiques (Vp, Iv) et hydrodynamiques (Lugeon, K_cm_s).

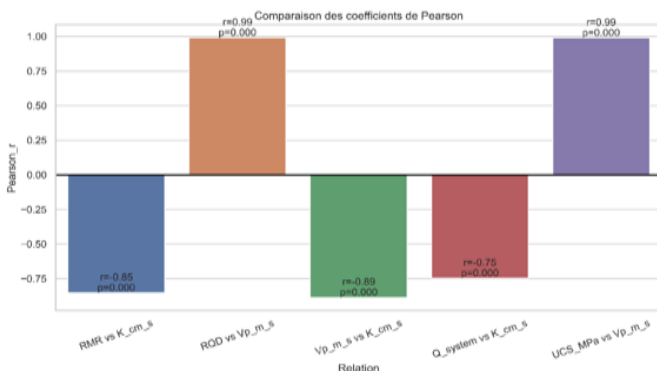


Figure 4. Comparaison de la matrice de corrélation de Pearson des relations entre les paramètres géomécaniques, géophysiques et hydrodynamiques du massif rocheux

La matrice de corrélation de Pearson montre une forte cohérence entre les paramètres géomécaniques, géophysiques et hydrodynamiques du massif rocheux de Zongo II. Les fortes corrélations positives entre RQD et Vp ($r = 0.991$; $p = 2.17 \times 10^{-17}$) ainsi qu'entre UCS et Vp ($r = 0.989$; $p = 1.74 \times 10^{-16}$) indiquent que les roches les plus intactes et résistantes présentent aussi les meilleures vitesses sismiques, traduisant un massif compact, stable et favorable aux travaux souterrains. A l'inverse, les corrélations négatives entre K et RMR ($r = -0.853$), Vp ($r = -0.885$) et Q-system ($r = -0.746$) montrent que les zones fracturées facilitent les infiltrations d'eau, augmentant les risques d'instabilité, de drainage difficile et de maintenance élevée. Les p-values très faibles confirment la fiabilité statistique des relations obtenues. Ces résultats démontrent que la stabilité et la durabilité de la galerie d'amenée dépendent étroitement du comportement mécanique et hydraulique du massif rocheux.

4. Discussion

4.1. Discussion des résultats géologiques et des profils d'altération structurale

Les résultats géologiques de la galerie de Zongo II montrent un massif rocheux globalement homogène, constitué de grès feldspathiques de la formation de l'Inkisi à structure monoclinale subhorizontale. Cette configuration traduit une stabilité tectonique favorable aux ouvrages souterrains. L'absence de failles majeures et la présence de deux familles de diaclases peu ouvertes et sans remplissage réduisent les risques d'instabilité et d'infiltration. Ces observations confirment les travaux de Buljan & Prelogović (1997) et de Jembere et Yihdego (2016), qui soulignent que les massifs peu fracturés améliorent la stabilité des galeries hydroélectriques. L'altération varie fortement selon le relief, avec plus de 30 m au sommet et des valeurs plus faibles en vallée, liée aux processus tropicaux décrits par Elias (2002) et Wang et al. (2015). Toutefois, Naji et al. (2019) rappellent que des hétérogénéités locales peuvent provoquer des instabilités. Globalement, Zongo II présente des conditions favorables avec des renforcements localisés nécessaires.

4.2. Géotechniques et de la classification des roches encaissantes

Les résultats géotechniques montrent que l'encaissant de la galerie d'amenée d'eau de Zongo II est constitué principalement de grès feldspathiques à bonnes propriétés mécaniques. Les résistances à la compression uniaxiale saturée varient de 91 MPa (horizons modérément altérés) à 181 MPa (horizons frais), indiquant un massif de bonne à très bonne qualité. La classification géomécanique montre une domination des classes II et III (>96 %), traduisant une forte capacité portante, une faible densité de discontinuités et une stabilité naturelle favorable aux excavations souterraines, tandis que les classes IV et V restent localisées. Ces résultats confirment Feng et al. (2019) et Sun et al. (2016), qui soulignent la performance des ouvrages en milieux rocheux compétents. La dégradation progressive des paramètres mécaniques entre les classes II et V confirme l'effet de l'altération et de la fracturation, en accord avec Guo et al. (2023). Cependant, Pasculli et al. (2018) rappellent que des hétérogénéités locales peuvent générer des instabilités, comme observé dans les zones H1+055 ~ H1+077 et H1+996 ~ H2+000. Globalement, Zongo II

présente une très bonne qualité géotechnique avec des renforcements localisés nécessaires.

4.3. Investigations géophysiques

Les investigations géophysiques par sismique réfraction montrent une amélioration nette de la qualité du massif rocheux de Zongo II avec la profondeur. Les faibles vitesses sismiques en surface traduisent des roches altérées, fracturées et décompactées, tandis que les vitesses élevées en profondeur indiquent un massif sain, compact et mécaniquement résistant. Ces résultats confirment [Takahashi \(2004\)](#) et [Takahashi et al. \(2006\)](#), qui soulignent la fiabilité de la sismique en ingénierie souterraine, ainsi que [Rezaei et al. \(2018\)](#), qui établissent des liens entre paramètres géophysiques et géotechniques. Le coefficient d'intégrité K_v élevé en profondeur traduit une bonne cohésion interne, cohérente avec [Eyinla et al. \(2021\)](#), tandis que [Yanis et al. \(2022\)](#) montrent l'intérêt de l'intégration géophysique-géotechnique. Toutefois, [Gelisli & Ersoy \(2017\)](#) rappellent que l'humidité peut influencer les mesures. Globalement, Zongo II présente un massif plus stable en profondeur, validant l'approche géophysique.

4.4. Hydrogéologiques et hydrodynamiques

Les résultats hydrogéologiques montrent que la galerie de Zongo II est entièrement située sous la nappe phréatique active, ce qui implique une charge hydrostatique permanente influençant la stabilité et la durabilité de l'ouvrage. Les forages révèlent une forte hétérogénéité spatiale, avec des zones aquifères actives et d'autres totalement sèches, traduisant une variabilité du réseau de fractures et de la perméabilité. Ces observations confirment [El Osta, Masoud & Badran \(2021\)](#), qui soulignent l'efficacité des méthodes hydrogéophysiques pour identifier les circulations d'eau souterraine. Les essais pressiométriques indiquent une perméabilité globale faible à modérée, comprise entre 2.9×10^{-6} cm/s et 1.6×10^{-5} cm/s, confirmant un massif globalement peu perméable, comme l'ont montré [Stewart \(1999\)](#) et [Remelli et al. \(2019\)](#). Les zones plus perméables correspondent aux secteurs fracturés, en accord avec [Majewski et al. \(2022\)](#). Les approches prédictives récentes d'[Ekanem et al. \(2025\)](#) et [Onyelowe et al. \(2025\)](#) améliorent l'interprétation des écoulements, tandis que [Pujades et al. \(2019\)](#) rappellent l'importance du suivi post-exploitation. Globalement, Zongo II présente un massif favorable avec drainage local nécessaire.

4.5. Corrélations entre les paramètres géomécaniques, géophysiques et hydrodynamiques

Les analyses statistiques par corrélation de Pearson mettent en évidence de très fortes relations entre les paramètres géomécaniques, géophysiques et hydrodynamiques du massif rocheux au tour de la galerie d'amenée de l'aménagement hydroélectrique Zongo II. Les corrélations positives élevées entre RMR, Q-system, RQD, UCS, V_p et I_v indiquent que les roches les plus résistantes sont aussi les plus compactes et les moins fracturées. Ces résultats confirment [Guo et al. \(2023\)](#) et [Rezaei et al. \(2018\)](#), qui montrent que les vitesses sismiques sont de bons indicateurs de la qualité mécanique. Les corrélations négatives entre Lugeon, perméabilité K et les paramètres mécaniques montrent que les zones fracturées favorisent la circulation de l'eau, en accord avec [Eyinla et al. \(2021\)](#) et [El Osta et al. \(2021\)](#). [Akingboye et al. \(2024\)](#) confirment l'intérêt de l'intégration géotechnique-géophysique. Les p-valeurs très faibles valident la robustesse statistique des résultats. Enfin, [Yousefpour et al. \(2025\)](#) et [Ye et al. \(2026\)](#) soulignent le rôle de l'IA dans la prédiction des comportements complexes. Globalement, le massif encaissant de la galerie de Zongo II montre une forte interdépendance mécanique et hydraulique.

4.6. Comparative des coefficients de Pearson et implications pour la galerie d'amenée d'eau de l'aménagement hydroélectrique de Zongo II

La comparaison des coefficients de corrélation de Pearson met en évidence une forte cohérence entre les paramètres géomécaniques, géophysiques et hydrodynamiques du massif rocheux autour de la galerie d'amenée de Zongo II. Les corrélations positives élevées entre RQD, UCS et V_p montrent que la qualité mécanique est étroitement liée aux propriétés géophysiques, en accord avec [Takahashi \(2004\)](#), qui confirme la fiabilité des méthodes sismiques pour l'évaluation des massifs rocheux. À l'inverse, les corrélations négatives entre paramètres hydrodynamiques et mécaniques indiquent que l'augmentation de la perméabilité traduit une dégradation du massif, conformément à [Plassart et De France-EDF \(2011\)](#). Ces résultats impliquent un risque accru d'infiltration et d'instabilité locale dans les zones fracturées, comme le soulignent [Pinheiro et al. \(2021\)](#) et [Fang et al. \(2008\)](#). Les travaux de [Lyubimova et al. \(2020\)](#), [Gogoşae et al. \(2018\)](#) et [Kiraga \(2021\)](#) confirment l'impact des ouvrages hydroélectriques sur les systèmes hydrologiques. [Yakovliev et al. \(2024\)](#) rappellent l'importance du suivi des risques évolutifs.

Les p -values < 0.05 confirment la robustesse des relations et l'interdépendance mécanique et hydraulique du massif. Cette étude contribue à la compréhension intégrée des interactions géologiques, géotechniques, géophysiques et hydrodynamiques dans la galerie d'amenée de l'aménagement hydroélectrique Zongo II. Elle démontre que la sismique réfraction permet de prédire efficacement les propriétés mécaniques et hydrauliques des grès feldspathiques. Les fortes corrélations statistiques obtenues facilitent l'identification des zones critiques nécessitant soutènement, drainage ou étanchéité, tout en offrant une base scientifique pour de futurs modèles prédictifs utilisant l'intelligence artificielle. Il est nécessaire de renforcer le soutènement dans les zones fracturées (IV–V), conformément à [Naji et al. \(2019\)](#) et [Pinheiro et al. \(2021\)](#), qui montrent que l'hétérogénéité structurale contrôle directement la stabilité des excavations souterraines. Mettre en place un drainage et une étanchéité ciblés dans les secteurs à forte perméabilité, en accord avec [Remelli et al. \(2019\)](#) et [El Osta et al. \(2021\)](#), qui soulignent le rôle des fractures dans la circulation hydraulique. Assurer une surveillance hydrogéologique continue sous nappe, comme recommandé par [Pujades et al. \(2019\)](#). Intégrer systématiquement les approches couplées géomécaniques–géophysiques–hydrodynamiques, validées par [Akingboye et al. \(2024\)](#) et [Yanis et al. \(2022\)](#). Utiliser la sismique réfraction et les essais Lugeon pour le suivi, conformément à [Takahashi \(2004\)](#) et [Rezaei et al. \(2018\)](#). Améliorer la cartographie structurale des zones faibles, comme le confirment [Guo et al. \(2023\)](#) et [Feng et al. \(2019\)](#), sur le lien direct entre fracturation et dégradation mécanique.

5. Conclusion

Cette étude a permis de réaliser une analyse intégrée des paramètres géologiques, géotechniques, géophysiques et hydrodynamiques du massif rocheux traversé par la galerie d'amenée de l'aménagement hydroélectrique Zongo II, dans le bassin de l'Inkisi au Kongo Central en RDC. Les résultats obtenus montrent que le massif rocheux est dominé par des grès feldspathiques globalement compacts, résistants et faiblement perméables, offrant des conditions favorables à la stabilité de l'ouvrage souterrain. Les classifications géomécaniques, les vitesses sismiques élevées et les faibles valeurs de perméabilité

confirment la bonne qualité mécanique et structurale de la majorité des sections étudiées. L'étude met également en évidence l'existence de zones localement fracturées et altérées où les infiltrations d'eau sont plus importantes et où les risques d'instabilité augmentent. Les analyses statistiques par le coefficient de corrélation de Pearson ont montré de très fortes relations entre les paramètres géomécaniques, géophysiques et hydrodynamiques. Les corrélations positives observées entre le RMR, le Q-system, le RQD, l'UCS, la vitesse sismique V_p et l'indice d'intégrité traduisent qu'une roche plus compacte et résistante présente une meilleure stabilité. À l'inverse, les corrélations négatives avec les paramètres hydrodynamiques démontrent que la fracturation et l'altération favorisent la circulation des eaux souterraines et réduisent la qualité mécanique du massif rocheux. Cette recherche démontre ainsi que l'intégration des approches géotechniques, géophysiques et hydrodynamiques constitue une méthode efficace pour comprendre le comportement des massifs rocheux dans les ouvrages hydroélectriques souterrains. Les résultats obtenus fournissent une base scientifique utile pour l'identification des zones critiques nécessitant des mesures de soutènement, de drainage et d'étanchéité. Ils contribuent également à l'amélioration de la sécurité, de la durabilité et de la gestion des infrastructures hydroélectriques en contexte tropical africain. Enfin, cette étude ouvre des perspectives pour le développement futur de modèles prédictifs utilisant l'intelligence artificielle afin d'optimiser la surveillance et la stabilité des ouvrages souterrains hydroélectriques.

Remerciements

Nous tenons à remercier la Société Nationale d'Electricité et les responsables de l'Entreprise SINOHYDRO, entreprise qui avait la charge de réaliser les études et d'exécuter les travaux de construction de la centrale Zongo II et réseaux associés, pour leur précieux soutien, collaboration et ouverture dans la réalisation de cette étude.

Financement

Cet article n'a bénéficié d'aucun financement. Elle découle des efforts personnels des auteurs.

Conflit d'Intérêt

Les auteurs déclarent n'avoir aucun conflit d'intérêts en lien avec le processus de publication de cet article.

Considérations éthiques

Cet article a été préparé conformément aux principes éthiques de la recherche, garantissant ainsi le respect des normes en vigueur. Il est important de noter qu'aucune donnée humaine ou animale n'a été utilisée dans cette étude, assurant ainsi le respect total des exigences éthiques. Les auteurs déclarent également n'avoir aucun conflit d'intérêts concernant cette recherche, ce qui renforce la crédibilité de l'étude. Les données utilisées pour cette analyse ont été obtenues de manière éthique et légale, conformément à toutes les réglementations applicables. Enfin, les résultats de l'étude ont été présentés de manière honnête et transparente, sans aucune manipulation de données, afin de garantir l'intégrité scientifique de l'ensemble du travail.

Contribution des auteurs

Chaque auteur a joué un rôle clé dans l'élaboration et la finalisation de l'article.

B.M.A. : était responsable de la rédaction et de la préparation de la version originale. Il s'est également concentré sur la collecte et l'analyse des données et a validé la version finale.

O.M, I.N. and A.M.N. : ont été responsable de la relecture de l'enquête, a contribué à l'amélioration de la qualité de la version originale et a effectué la révision finale, s'assurant ainsi que l'article était prêt pour publication.

C.N.U.D.-M. et J.B.M.K. : ont supervisé l'ensemble du processus, veillant à ce que toutes les étapes soient correctement suivies.

Tous les auteurs ont lu et approuvé la version finale du manuscrit.

ORCID des Auteurs

Atalatala M.B. : <https://orcid.org/0009-0009-6495-6312>;

Kawende O. : N/A

Ndala I. : N/A

Nzita M.A. : <https://orcid.org/0009-0007-6092-145X>;

Uba-Di-Mbudi N.C. : <https://orcid.org/0009-0007-3515-1588>;

Kapit M.J.B : N/A

Références bibliographiques

Akingboye, A. S., Bery, A. A., Aminu, M. B., Dick, M. D., Bala, G. A., & Ale, T. O. (2024). Caractérisation surface-sous-sol via une modélisation géophysique-géotechnique interfacée et une modélisation de régression optimisée. *Modélisation des systèmes terrestres et de l'environnement*, 10(4), 5121–5143.

- Arandjelović, D. (1966). Méthodes géophysiques utilisées pour résoudre certains problèmes géologiques rencontrés lors de la construction de la centrale hydroélectrique de Trebišnjica (en Yougoslavie). *Prospection géophysique*, 14(1), 80.
- Buljan, R., & Prelogović, E. (1997). L'importance de l'évaluation des relations structurelles et géologiques dans la construction de la centrale hydroélectrique souterraine d'Ombla. *Rudarsko-geološko-naftni zbornik*, 9(1), 17–22.
- Caballero, Y., et al. (2004). Modélisation des écoulements dans une vallée de haute montagne équipée de centrales hydroélectriques : Vallée du Rio Zongo, Cordillère Real, Bolivie. *Hydrological Processes*, 18(5), 939–957.
- Deyneko, S., Vyzhva, S., & Bernevek, A. (2017). Informatisation des méthodes géophysiques de forage dans le choix de l'emplacement des principales structures de la centrale hydroélectrique. *Géophysique*, 25.
- Ekanem, K. R., George, N. J., Ekanem, A. M., Udosen, N. I., & Thomas, J. E. (2025). Modélisation hydrogéophysique prédictive des conditions souterraines utilisant des données géoélectriques le long d'un chenal d'eau dans l'État d'Akwa Ibom, dans le sud du Nigeria. *Researchers Journal of Science and Technology*, 5(4), 92–120.
- El Osta, M., Masoud, M., & Badran, O. (2021). Estimation des paramètres hydrauliques de l'aquifère basée sur des méthodes hydrogéophysiques dans le delta du Nil occidental, en Égypte. *Environmental Earth Sciences*, 80(9), 344.
- Elias, M. (2002). Gisements de latérite de nickel : Aperçu géologique, ressources et exploitation. *CODES Special Publication*, 4, 205–220.
- Eyinla, D. S., Oladunjoye, M. A., Olayinka, A. I., & Bate, B. B. (2021). Physique des roches et application géomécanique dans l'interprétation des tendances des propriétés rocheuses pour la détection de surpression. *Journal of Petroleum Exploration and Production*, 11(1), 75–95.
- Fang, H., Chen, L., Dlakavu, N., & Shen, Z. (2008). Outil de modélisation et de simulation de base pour l'analyse des transitoires hydrauliques dans les centrales hydroélectriques. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 23(3), 834–841.
- Feng, X. T., Zhou, Y. Y., & Jiang, Q. (2019). Contributions de la mécanique des roches aux récents développements hydroélectriques en Chine. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 11(3), 511–526.
- Frankstein, A., Gregorio, A. P., Darrian, D. W. A., & Sugiyono. (2020). Méthode géophysique intégrée, test d'intrusion standard et télédétection pour interpréter, corrélérer et analyser les causes des glissements de terrain causés par fuite de canalisations d'irrigation : Étude de cas de la

- centrale hydroélectrique CBLP. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 479(1), 012042. IOP Publishing.
- Gelisli, K., & Ersoy, H. (2017). Enquête sur les glissements de terrain utilisant des méthodes géophysiques : Une étude de cas dans le nord-est de la Turquie. *Avancées en biologie et sciences de la Terre*, 2(1).
- Gogoaş Nistoran, D. E., Ionescu, C. S., Braşoveanu, L., Armaş, I., Opreş, I., & Costinaş, S. (2018). Modéliser les changements hydrodynamiques induits par les centrales hydroélectriques à cours d'eau le long de la rivière Prahova en Roumanie. *Journal of Energy Engineering*, 144(2), 04017078.
- Guo, S., Zhang, Y., Iraj, A., Gharavi, H., & Deifalla, A. F. (2023). Évaluation des propriétés géomécaniques de la roche et estimation des vitesses d'onde. *Acta Geophysica*, 71(2), 649–670.
- Holub, P., & Dumitrescu, T. (1994). Détection des cavités à l'aide de mesures électriques et du géoradar dans une galerie d'amenée d'eau. *Journal of Applied Geophysics*, 31(1–4), 185–195.
- Imran, S., & Rahul, K. (2016). Investigations géotechniques pour localiser une centrale souterraine dans des roches calcaires, Himachal Pradesh, Inde. In *Recent advances in rock engineering (RARE 2016)* (pp. 141–148). Atlantis Press.
- Jembere, D., & Yihdego, Y. (2016). Évaluation de la masse rocheuse en ingénierie pour une centrale hydroélectrique polyvalente : Cas de Genale Dawa (GD-3), Éthiopie. *Génie géotechnique et géologique*, 34(5), 1593–1612.
- Kiraga, M. (2021). Centrales hydroélectriques et processus morphodynamiques fluviaux. *Journal of Ecological Engineering*, 22(7), 163–178.
- Lyubimova, T., Parshakova, Y., Lepikhin, A., Lyakhin, Y., & Tiunov, A. (2020). L'effet du débit d'eau instable à travers les barrages des centrales hydroélectriques sur les régimes hydrodynamiques des bassins supérieurs des réseaux d'eau. *Water*, 12(5), 1336.
- Majewski, R. S., Valenta, J., Tábořík, P., Weger, J., Kučera, A., Patočka, Z., & Čermák, J. (2022). Imagerie géophysique des zones d'absorption et de conduction des racines d'arbres en conditions de champ : Une comparaison des méthodes géoélectriques courantes. *Plant and Soil*, 481(1), 447–473.
- Naithani, A. K., Bhatt, A. K., & Krishna Murthy, K. S. (2009). Investigations géologiques et géotechniques du projet hydroélectrique Loharinag-Pala, Garhwal Himalaya, Uttarakhand. *Journal de la Société géologique de l'Inde*, 73(6), 821–836.
- Naji, A. M., Emad, M. Z., Rehman, H., & Yoo, H. (2019). Hétérogénéité géologique et géomécanique dans les tunnels hydroélectriques profonds : Étude de cas d'une rupture de roche. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 84, 507–521.
- Nkodia, H. M. D. V. (2017). *Style tectonique et structural de la formation de l'Inkisi à Brazzaville, République du Congo*.
- Nzita, A. M., Mizengi, L. M., Ndiwulu, G. W., Ngoma, G. D., Umba-di-Mbudi, C. N. Z., Ngimbi, R. M., & Phuati, E. P. (2024). Analyse statistique du vieillissement des composants électriques dans le groupe 6 de la centrale hydroélectrique Inga 2 après des arrêts brusques. *Recherche computationnelle et expérimentale sur les matériaux et les énergies renouvelables*, 7(2), 78–92.
- Nzita, A. M., Nkanka, B. N., Ngoma, G. D., & Umba-di-Mbudi, C. N. Z. (2025). Optimisation des prévisions énergétiques à Boma : Étude des algorithmes PSO et Leap-Nemo (2023–2053). *Revue Congolaise des Sciences et Technologies*, 4(4), 801–809.
- Nzita, A. M., Nkanka, B. N., Ngoma, G. D., & Umba-di-Mbudi, C. N. Z. (2025). Optimisation des prévisions énergétiques chez Boma pour 2023 à 2053 en utilisant les techniques d'apprentissage automatique de l'algorithme PSO. *Recherche computationnelle et expérimentale en matériaux et énergies renouvelables*, 8(1), 104–125.
- Nzita, A. M., Phuati, E. P., Ngimbi, R. M., Ngoma, G. D., & Mavungu, N. M. (2024). Investigation of lateral vibrations in turbine-generator unit 5 of the Inga 2 hydroelectric power plant. *IgMin Research*, 2(4), 255–260. <https://doi.org/10.61927/igmin173>
- Onyelowe, K. C., Ebid, A. M., Hanandeh, S., & Kamchoom, V. (2025). Évaluation du comportement des pentes pour la prédiction géophysique des écoulements avec des combinaisons avancées d'apprentissage automatique. *Scientific Reports*, 15(1), 6531.
- Pasculli, A., Calista, M., & Sciarra, N. (2018). Variabilité des états locaux de contrainte résultant de l'application des méthodes de Monte Carlo et des différences finies à l'étude de stabilité d'une pente sélectionnée. *Engineering Geology*, 245, 370–389.
- Pinheiro, M., Emery, X., Miranda, T., Lamas, L., & Espada, M. (2021). Utilisation de scénarios géotechniques pour l'analyse de structures souterraines : Une étude de cas dans un complexe hydroélectrique du nord du Portugal. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 111, 103855.
- Pujades, E., Jurado, A., Orban, P., & Dassargues, A. (2019). Évaluation paramétrique des changements hydrochimiques liés au stockage hydroélectrique par pompage souterrain. *Science of the Total Environment*, 659, 599–611.

- Remelli, S., Petrella, E., Chelli, A., Conti, F. D., Lozano Fondón, C., Celico, F., ... Menta, C. (2019). Caractérisation hydrodynamique et de la biodiversité des sols lors d'un glissement de terrain actif. *Water*, 11(9), 1882.
- Rezaei, S., Shooshpasha, I., & Rezaei, H. (2018). Corrélation empirique entre les paramètres géotechniques et géophysiques dans une zone de glissement de terrain : Étude de cas du glissement de terrain de Naigeschal. *Revue de recherche en sciences de la Terre*, 22(3), 195–204.
- Stewart, M. T. (1999). Des investigations géophysiques. In *L'intrusion d'eau de mer dans les aquifères côtiers : Concepts, méthodes et pratiques* (pp. 9–50). Springer.
- Sun, S. Q., Huang, R. Q., Pei, X. J., & Zhao, S. J. (2016). Classification géologique en ingénierie des plans structuraux pour les projets hydroélectriques dans les basaltes d'Emeishan. *Journal of Mountain Science*, 13(2), 330–341.
- Takahashi, T. (2004). ISRM suggested methods for land geophysics in rock engineering. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 41(6), 885–914.
- Takahashi, T., Takeuchi, T., & Sassa, K. (2006). L'ISRM a suggéré des méthodes pour la géophysique des forages en génie des roches. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 43(3), 337–368.
- Vyzhva, S., Onyshchuk, V., Onyshchuk, I., & Reva, M. (2017). Investigation des structures géologiques souterraines utilisant des méthodes géophysiques sur le territoire de la centrale hydroélectrique (HPP). In *16e Conférence internationale sur les aspects théoriques et appliqués de la géoinformatique* (Vol. 2017, No. 1, pp. 1–6). Association européenne des géoscientifiques et ingénieurs.
- Wang, A. M., Li, X. G., Huang, Z. Q., Huang, X. C., Wang, Z. F., Wu, Q., ... Lu, X. J. (2015). Étude en laboratoire sur les caractéristiques géologiques techniques et le mécanisme de formation des roches altérées de la centrale de pompage-pompe de Tianchi du Henanchi, en Chine. *Environmental Earth Sciences*, 74(6), 5063–5075.
- Yakovliev, Y., Rogozhin, O., Stefanyshyn, D., Kreta, D., Anpilova, Y., & Myrontsov, M. (2024). Risques environnementaux et géologiques après l'explosion de la centrale hydroélectrique de Kakhovka et options de réhabilitation. In *Systems, decision and control in energy VI: Volume II: Power engineering and environmental safety* (pp. 537–557). Springer Nature Switzerland.
- Yanis, M., Marwan, M., Paembonan, A. Y., Yudhyantoro, Y., Rusydy, I., Idris, S., & Asrillah, A. (2022). Approches géophysiques et géotechniques dans le développement de modèles sous-marins pour la fondation de centrales à gaz. *Indian Geotechnical Journal*, 52(1), 237–247.
- Ye, Y., Cheng, C., Chen, J., Liu, X., Li, X., Chen, G., ... Li, P. (2026). Quantification et prédiction de l'hétérogénéité dans les réservoirs clastiques marins grâce à l'apprentissage automatique : Méthodologie et applications. *Natural Resources Research*, 35(2), 1039–1059.
- Yousefpour, N., Liu, Z., & Zhao, C. (2025). Méthodes d'apprentissage automatique pour la caractérisation géotechnique des sites et l'évaluation de l'érosion. *Transportation Research Record*, 2679(1), 632–655.
- Zhou, J. W., Shi, C., & Xu, F. G. (2013). Caractéristiques géotechniques et analyse de stabilité de la pente des agrégats rocheux-sol à la centrale hydroélectrique de Gushui, sud-ouest de la Chine. *The Scientific World Journal*, 2013, 540636.