

# Caractérisation des grès Céno-Mésozoiques du site d'aménagement hydroélectrique de Kakobola et ses environs par diffraction et fluorescence X (Province du Kwilu/RD Congo)

## Caracterisation of the Ceno-Mesozoic Sandstones of the Kakobola Hydroelectric Power site and its Surroundings by Diffraction and Fluorescence x (Kwilu Province /DR Congo)

Ivon NDALA TSHIWISA<sup>1</sup>, Jonathan MUSITU MULIWAVYO<sup>2</sup>, Brich KALANGA KABUYA<sup>3</sup> & Clement N'ZAU UMBA-di-MBUDI<sup>4,5</sup>

Abstract: The hydroelectric power plant of Kakobola, intended to feed the populations of the towns of Kikwit, Idiofa and Gungu in electricity, is located at the South-west of the Congo basin in the current province of Kwilu of the Democratic Republic of Congo. It was detected around these facilities and surroundings, problems related to the underground cavities on the level of the soft sandstones such as collapses and the infiltration of acid water through the networks of fractures, thereby impairing the structural integrity of the dam and associated infrastructures. This paper aims at uncovering the major processes responsible for generating these cavities. Thus, the mineralogical characterization of the sandstones of the study area was carried out using both x-ray diffraction and fluorescence. The X-ray diffraction shows an abundance out of silica minerals, mainly quartz and its metastable phases in particular tridymite and cristobalite. The method also uncovered the presence of carbonated minerals. X-ray fluorescence revealed the notably presence of nickel, zinc and iron. The infiltration of acid water in soft sanstones of low density through the various networks of fractures and of the cavities induce an instability of the rock formations that could damage the hydroelectrical facilities.

Keywords: Sandstones, X-rays diffraction, X-ray fluorescence, Hydroelectric, Kakobola.

**Résumé:** L'aménagement hydroélectrique de Kakobola, destiné à alimenter les populations des villes de Kikwit, Idiofa et Gungu en énergie électrique, est situé au Sud-Ouest du bassin du Congo dans l'actuelle province de Kwilu en République démocratique du Congo. Il a été constaté aux environs de cet aménagement des problèmes liés aux cavités souterraines au niveau des grès tendres tels que des effondrements et infiltrations des eaux acides à travers les réseaux de fractures constituant des zones de faiblesse géomécanique pour l'intégrité structurale du barrage et ouvrages connexes. L'objectif de cet article est la mise en évidence de la cause majeure responsable pouvant expliquer les processus générateurs de ces cavités. Dans ce but, la caractérisation minéralogique des formations gréseuses de la zone d'étude a été effectuée grâce aux méthodes de diffraction et de fluorescence X. La diffraction aux rayons X montre une abondance en silice principalement du quartz et de ses phases métastables notamment la tridymite et la cristobalite. Elle a en plus permis à mettre en évidence la présence des minéraux carbonatés. La fluorescence X a révélé notamment la présence du nickel, du zinc et du fer. L'infiltration des eaux acides dans les matériaux gréseux rocheux de faible densité et à travers les différents réseaux de fractures et des cavités entraine une instabilité de la roche qui pourrait endommager l'aménagement hydroélectrique.

Mots-clés . : Grès, Diffraction X, Fluorescence X, Hydroélectrique, Kakobola

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup>Doctorant, Groupe de recherche Géo-Hydro-Energie, Mention Géosciences, Faculté des Sciences et Technologies, Université de Kinshasa, B.P. 190 Kinshasa XI, République Démocratique du Congo, Adresse mail : *ivon.ndala@unikin.ac.cd et ivon.ndala@gmail.com* 

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup>Chercheur associé, Groupe de recherche Géo-Hydro-Energie, Mention Géosciences, Faculté des Sciences et Technologies, Université de Kinshasa, B.P. 190 Kinshasa XI, République Démocratique du Congo, Adresse mail : *musitujosephjo@gmail.com* 

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup>Chercheur associé, Groupe de recherche Géo-Hydro-Energie, Mention Géosciences, Faculté des Sciences et Technologies, Université de Kinshasa, B.P. 190 Kinshasa XI, République Démocratique du Congo, Adresse mail : *kabuya.brich@gmail.com* 

<sup>&</sup>lt;sup>4</sup>Professeur, Groupe de recherche Géo-Hydro-Energie, Mention Géosciences, Faculté des Sciences et Technologies, Université de Kinshasa, B.P. 190 Kinshasa XI, République Démocratique du Congo, Adresse mail : *clement.mbudi@unikin.ac.cd* 

<sup>&</sup>lt;sup>5</sup>Doyen, Faculté Polytechnique, Université d'Etat Président Joseph Kasa-Vubu, B.P. 314 Boma, Kongo Central, République Démocratique du Congo.

## **INTRODUCTION**

A travers le monde, la construction des grands ouvrages hydrauliques du génie civil tels que les barrages en béton ou en terre (digues) s'inscrit généralement dans une politique visant à prévenir et de mieux gérer les aléas naturels tels que les inondations pour protéger les vies humaines et limiter l'impact négatif sur l'environnement. Pour l'ensemble des acteurs évoluant dans l'industrie du génie civil, l'apparition d'aléas indésirables représente généralement un véritable danger dont il convient d'étudier la possibilité et la probabilité d'occurrence, d'envisager les conséquences et un éventail de solutions pour y remédier (LCPC, 2004). Ces évènements indésirables peuvent être en particulier des affaissements et des effondrements liés à la présence des cavités souterraines tels que celle d'un diamètre d'au moins 20 mètres ayant perturbé le bon déroulement de travaux, et menaçant la stabilité et l'intégrité structurale des ouvrages du site hydroélectrique de Kakobola de la province du Kwilu au SW de la République Démocratique du Congo (ANGELIQUE, 2011).

La caractérisation des phases minéralogiques par la diffraction X et la détermination des éléments chimiques majeurs des matériaux rocheux par la fluorescence X permettent de mieux connaitre les matériaux rocheux et ainsi de les utiliser en fonction de leurs compétences rhéologiques respectives dans le génie civil. Cette caractérisation minéralogique permettra d'anticiper certaines réactions éventuelles entre l'environnement et les matériaux rocheux et prévenir les risques potentiels pour la sécurité du barrage, ouvrages connexes et la protection des humains. La connaissance de la minéralogie des roches s'avère quasi indispensable tant en génie civil que dans la recherche minière.

En effet, des travaux de recherche initiés par notre groupe sur le site de l'aménagement hydroélectrique de Kakobola et ses environs incluent notamment ceux de LUSILU & MBANGILWA, (2015); KATUKU & MBOYO (2017) ; NDALA (2017) ; KAPITA & MBONGO (2019) ; et KALANGA & MUSITU (2020) mettent en évidence une zone instable avec une diversité des cavités souterraines au sein des formations gréseuses. Ces études ont notamment mis en doute les décisions prises pour le choix du site de cet aménagement hydroélectrique. En effet, ces problèmes de cavités pourraient générer l'instabilité des ouvrages hydrauliques et donc occasionner des frais réguliers de réhabilitation et d'entretien. A ce jour, le barrage hydroélectrique de Kakobola n'est toujours pas opérationnel, alors que toutes les constructions civiles sont quasi terminées. Dans le souci de mieux connaître les causes de ces cavités souterraines sur le site et ses environs, nous avons pensé mener des investigations minéralogiques sur ces formations gréseuses supportant les ouvrages et dont la stabilité et l'intégrité structurale sont menacées.

Ce travail vise donc à mettre en évidence la cause majeure pouvant expliquer les processus générateurs des cavités observées en profondeur. C'est dans cette optique que nous nous sommes trouvés dans l'obligation de mieux caractériser à différentes échelles ces roches de fondation en utilisant plusieurs méthodes dont la diffraction et la fluorescence X.



## **ZONE D'ETUDE**

Figure 1 : Carte de la localisation administrative de la zone d'étude

L'aménagement hydroélectrique de Kakobola se trouve dans la cuvette Centrale (KADIMA, 2011), précisément dans la province de Kwilu au SW de la RD Congo (Figure 1).

Il est situé à 70 km au Sud-Sud-Est de la ville de Kikwit et à 790 km Est-Sud-Est de la ville de Kinshasa (CORETI, 2008). Le projet de Kakobola est de 10,5 MW avec 3 unités de 3,5 MW chacune. Ce barrage est le premier et l'unique à être construit dans cette province depuis la colonisation. Il pourra alimenter trois villes : Kikwit, Gungu et Idiofa (MBANGILWA & LUSILU (2015) ; KATUKU & MBOYO (2017) ; NDALA (2017) ; MBONGO & KAPITA (2019)).

# **METHODOLOGIE**

Hormis, l'étape de la documentation, le présent travail passe par les différentes étapes des recherches en sciences géologiques ci-dessous :

# Etape de terrain :

Pour avoir une idée générale sur la géologie, la topographie et la morphologie de la zone d'étude, nous avions procédé à une exploration générale de toute la zone concernée, sur un rayon de 30 km centré sur le barrage, tout en procédant aux observations et aux descriptions des affleurements et processus géologiques, l'échantillonnage, ainsi qu'à la description macroscopique des échantillons. Nos travaux de terrain ont été évidemment orientés dans la perspective de la géologie du barrage pour avoir des éléments complémentaires et plus de détails pour l'élaboration du modèle conceptuel du site.

Les échantillons ont été attaqués à froid par l'acide chlorhydrique dilué à 10% pour déceler la présence des minéraux carbonatés (calcite). Signalons d'emblée que la détection des phases carbonatées avec le test d'effervescence à froid avec de l'acide chloridrique dilué à 10% n'était pas concluant pour certains échantillons. Ainsi, recourt a été fait aux méthodes spectroscopiques de diffraction et fluorescence X notamment pour détecter des phases carbonatées de type dolomite qui en effet ne fait effervescence qu'à chaud.

## Etape de laboratoire

#### Cette étape a consisté en :

- L'analyse et le traitement de données récoltées sur le terrain ont été réalisés à l'aide des logiciels tels que ArcGIS et MapInfo pour l'élaboration des cartes et Measure de PHYWE pour le traitement des données issues de la diffraction et de la fluorescence X. Outre ces logiciels, nous avons utilisé le « Panalytical Xpert panalytical plus highscore plus 2008 » pour l'interprétation des différents spectres au moyen des valeurs maximales de chaque pic du spectre. Ce dernier logiciel comporte une base de données de « International Center of Diffraction Data » (ICDD) dans sa base des données PDF-2 qui traite uniquement de minéraux. Ce logiciel de traitement nous permet en effet de réaliser une étude semi-quantitative des résultats ;
- Les spectres de diffraction au rayon X de nos échantillons ont été obtenus au moyen du diffractomètre à rayons-x de marque XR 4.0 EXPERT UNI du département de physique de l'Université de Kinshasa. L'analyse des spectres nous permet d'identifier les minéraux constitutifs de la roche de manière très précise en plus d'en déterminer leurs pourcentages respectifs. Cette analyse complète les observations microscopiques obtenues avec la confection des lames minces. Nous avons utilisé le diffractomètre de PHYWE en utilisant comme anticathode ou l'anode de Cu. Les matériels utilisés sont les suivants des flacons en plastique, un bécher, des spatules, un mortier et un pilon en porcelaine, une balance, l'eau distillée (H<sub>2</sub>0), un bassin (récipient), des gants, de l'acétone, une pommade vaseline, un pied gradué, une paire de ciseaux et de la colle (Figure 2).
- Quant à la fluorescence X : les éléments chimiques allant de Na à U sont systématiquement déterminés par la spectrométrie de fluorescence X à dispersion d'énergie (SHARMA, 2011). Elle permet la détermination qualitative ainsi que quantitative des éléments majeurs et traces dans une infinité de types d'échantillons. Pour bien mener cette analyse, nous nous sommes servis d'un marteau, d'un marqueur, des gants, d'un pied-à-coulisse, d'emballages pour les gros échantillons et d'un appareil photo. Nous nous sommes servis de petits fragments des roches. Les différentes étapes de la préparation des échantillons incluent le concassage et le mesurage des échantillons des roches (Figure 3a et b). La détection des métaux caractéristiques se fait en comparaison avec une base des données reprenant les informations relatives à chaque pic (Kalpha et Kbéta) faisant parti du logiciel utilisé afin d'identifier correctement les métaux correspondants.



Figure 2 : Présentation de quelques matériels de diffraction au rayon X utilisés. Source : Ivon NDALA, 10 Août 2021



Figures 3a et b : Echantillons des roches concassées (a) et mesures des monocristaux à l'aide du pied-à-coulisse (b) Source : Ivon NDALA, 10 Août 2021

# RESULTATS

# Analyse minéralogique par la diffraction et la fluorescence X

# Diffraction par rayons X

Les spectres issus de la diffraction par rayons X nous permettent de caractériser minéralogiquement les échantillons sous étude.

Nous présentons ci-dessous les spectres (A) : issus du logiciel Measure de PHYWE et (B) : issus de Panalytical Xpert Highscore caractéristiques des échantillons (Figure 4a et b) respectivement.













**Figures 4a et b :** Spectres des échantillons KM05, KM08, KM12, KM70 et KM246. (a) : Spectre issu du logiciel Measure de PHYWE et (b) : Spectre issu Panalytical Xpert Highscore.

Le tableau 1 ci – dessous synthétise les résultats d'analyse de nos échantillons par le logiciel Panalytical X pert Highscore Plus.

		Nom_	Nom_	Formule	Semi_	
Ech.	Ref. Code	minéral	Composé	chimique	Quantitatif	Couleur
	01-082-1404	Cristobalite	Oxyde de silicium	SiO <sub>2</sub>	2%	Gris
	01-087-0703	Quartz	Oxyde de silicium	SiO <sub>2</sub>	55%	Maron
	00-005-0682	Titan	Titan	Ti	10%	Bleu
KM05			Carbonate de			
	01-079-1346	Dolomite	Magnésium	Ca Mg (CO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	5%	Rose
	01-074-1886	Wuestite	Oxyde de Fer	Fe O	2%	Jaune
			Hydroxyde			
	01-074-119	Bayerite	d'aluminium	AI (OH) <sub>3</sub>	25%	Rouge
KM08	01-082-1407	Cristobalite	Oxyde de silicium	SiO <sub>2</sub>	13%	Bleu
	01-080-0886	Kaolinite	Silicate	$AI_2O_3.2SiO_2$	60%	Vert
			d'hydroxyde			
			d'aluminium			
	01-075-0638	Trydimite	Oxyde de silicium	SiO <sub>2</sub>	28%	Gris
KM12			Carbonate hydraté	(Mg <sub>6</sub> Fe <sub>2</sub> (OH) <sub>16</sub>		
	01-074-1513	Sjoegrenite	d'hydroxyde de Fer	(CO <sub>3</sub> ) (H <sub>2</sub> O) <sub>4</sub> ) <sub>25</sub>	24%	Blue
			et Magnésium			
	01-079-1915	Quartz	Oxyde Silicium	SiO <sub>2</sub>	11%	Vert
	01-079-1337	Garronite	Silicate de Ca Al	$Fe_4Ni_4S_8$	65%	Gris
			hydraté			
КМ70	01-079-1912	Quartz	Oxyde de silicium	SiO <sub>2</sub>	61%	Bleu
	01-083-2300	Trydimite	Oxyde de silicium	SiO <sub>2</sub>	23%	Vert
	01-075-0603	Nickéline	Nickel Arsénite	Ni As	6%	Gris
	01-077-0141	Chalcophani	Hydrate d'Oxyde de	ZnMn₃O7	10%	Maron
		te	Zinc de Manganèse			
KM246	01-074-1910	Magnétite	Oxyde de Fe	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	21%	Bleu
	01-079-1914	Quartz	Oxyde de silicium	SiO <sub>2</sub>	44%	Maron
	01-086-2279	Pentlandite	Sulfure de Fe-Ni	Fe <sub>4</sub> Ni <sub>4</sub> S <sub>8</sub>	35%	Bleu-vert

Tableau 1: Phases minérales présentes dans les échantillons KM05, KM08, KM12, KM70 et KM246

Ce tableau 1 présente la composition des échantillons analysés notamment :

- L'échantillon KM05 montre une abondance en quartz de 55 % suivi d'hydroxyde d'aluminium (25%) formant à eux seuls 80% de la composition de la roche. La dolomite (5%) et la cristobalite (2%) sont en traces, mais elles peuvent générer des réactions et contribuer à la fragilisation de la roche. Elles peuvent ainsi être responsables de certains dégâts. La cristobalite est un minéral métastable et peut donc à chaque instant chercher à retrouver son équilibre en réagissant avec d'autres composés. La dolomite est un minéral facilement altérable dans l'eau, et donc son altération contribue aussi à la fragilisation de la roche ;
- L'échantillon KM08 est composé majoritairement des silicates d'hydroxydes d'aluminium avec une proportion pondérale de 60% suivi de la silice métastable, la tridymite à 28% de même que la cristobalite avec 13%;
- Cet échantillon de roche KM12 est composé de silicates doubles de calcium et d'aluminium à 65 %, des carbonates hydratés d'hydroxyde de fer et d'aluminium à 24 % et du quartz à 11 %. Les phases silicatées représentent dans l'ensemble 76% contre les phases carbonatées ;
- Quant à l'échantillon KM70, il accuse une abondance en quartz 61% et 23 % en tridymite. Il met en évidence également la présence des phases minérales riches en quelques métaux tels que le Zinc, le manganèse et le Nickel;
- Le dernier échantillon KM246 est également riche en quartz à 44 %, pentlandite à 35% et en magnétite à 21%.

Les roches de la zone sous étude sont riches en quartz. On note aussi la présence de quelques minéraux carbonatés en proportion réduite tel que la dolomite et aussi d'un minéral argileux qu'est la kaolinite dans les roches analysées.

Cependant, ces minéraux facilement altérables peuvent être à la base de la fragilisation de ces grès par la genèse de certaines cavités au sein de la roche. Les parties siliceuses auront tendance à résister. Une fois la matrice argileuse détruite, nous pouvons clairement voir les grains des sables isolés résultant de cette altération suite à une attaque purement chimique de l'eau a pH moyen autour de 4.5 de la rivière Lufuku. Ces informations nouvelles constituent donc une riche base de données pour mieux comprendre les processus géologiques responsables de cavités observées sur des roches de fondation du site de Kakobola et environs.

### Fluorescence X

Les résultats issus de la fluorescence X sont representés dans les spectres et tableaux de la figure 5. Ces derniers sont élaborés à l'aide du tableau périodique de Mendeleïev en se servant des valeurs maximales à travers leurs raies c'est-à-dire la raie k\_alpha et celle de k\_bétha pour chaque pic du spectre. Ces échantillons des roches mettent en évidence un enrichissement des métaux.

Dans la figure 5 (a1, a2, a3, a4 et a5), nous présentons les spectres et les tableaux 5 (b1, b2, b3,b4 et b5) obtenus après avoir soumis nos échantillons au bombardement à l'aide de rayon X.







Υ

b3



Figures 5 (a1, a2, a3, a4 et a5) : Spectre des échantillons et tableaux 5 (b1, b2, b3, b4 et b5): éléments chimiques en fonction des différents niveaux d'énergie.

Les résultats issus de la fluorescence X sont caractérisés par une diversité des métaux. Ils montrent une abondance en nickel (Ni), Zinc (Zn) et (Ge) qui sont présents quasiment dans toutes les roches analysées suivis de manganèse (Mn).

### Comparaison minéralogique entre les grès polymorphes et les grès tendres

Les échantillons KM08, KM12 et KM70 représentent les grès tendres tandis que les échantillons KM05 et KM246 les grès polymorphes. Les résultats issus de la fluorescence X montrent une abondance en manganèse (Mn), nickel (Ni) et zinc (Zn) pour les échantillons des grès tendres.

Dans les grès polymorphes par contre, le manganèse a été substitué par le fer comme métal principal, le Ni et le Zn y sont présents également.

Du point de vue phases minérales, nous avons une abondance en quartz dans les deux types des roches, avec en particulier une abondance des minéraux riches en fer dans les grès tendres telles que la nickeline et la chalcophanite. Les grès polymorphes comportent des phases minérales riches en Fe et Ni, en plus de celles qui sont carbonatées telle que la dolomite.

Les pourcentages de ces phases minérales sont assez considérables que nous ne pourrons affirmer qu'il s'agit bel et bien des grès quartzitiques constitués à plus de 90 % des quartz essentiellement. Il pourrait en effet s'agir des grès ferrugineux. Ces minéraux accessoires confèrent à la roche différentes teintes dont le rouge dicté par la présence d'oxyde de fer tel que la wuestite ou la magnétite.

Les phases minérales détectées par diffraction aux rayons-x dans les formations gréseuses étudiées sont globalement consistantes avec les observations macroscopiques et microscopiques sur lames minces réalisées par

LUSILU & MBANGILWA, (2015) ; KATUKU & MBOYO (2017) ; NDALA (2017) ; KAPITA & MBONGO (2019) ; et KALANGA & MUSITU (2020).

## DISCUSSION

Les eaux de la rivière Lufuku sur laquelle est érigé le barrage hydroélectrique de Kakobola sont riches en nickel et en fer (KATUKU & MBOYO, 2017). Ceci est en accord avec nos résultats sur la fluorescence X réalises dans le cadre de cette étude.

Les cavités mises en évidence dans la zone sous étude se situent dans des roches non carbonatées. Des cavités similaires sont signalées dans les grès carbonatés du Luxembourg (BOTZEM, 1987); (KNUST & WEBER, 1987). Les cavités et les gouffres de diverses dimensions ont été découverts en Amérique du Sud et même sur le continent africain (TRULUCK, 1992). La genèse de différentes cavités et d'autres formes répertoriées dans les grès et les quartzites, se trouverait dans des phénomènes d'altération chimique (WILLEMS & al., 1993) ; (SPONHOLZ, 1994)) parmi lesquels des altérations hydrothermales (URBANI, 1981) ; (GALAN & LAGARDE, 1988)), la dissolution de la silice en grains ou sous forme de ciment et des processus d'hydrolyse alcaline (MARKER, 1976) sont avancés.

Selon certains chercheurs, l'apparition des cavités dans les grès est due aux joints de stratification, fractures, failles et diaclases, joints de décompression (CHABERT & BIGOT, 1993) ; (INGLESE & TOGNINI, 1993) ; (WILLEMS & VICAT, 1993)). La présence d'une couche plus résistante (de quartzite par exemple) (VITEK, 1987) ; (BIGOT, 1990)) ou plus imperméable (schiste) (CALLOT, 1981) ; (CRAFT, 1987)) peut provoquer une érosion différentielle qui serait à l'origine des formes souterraines (cavités, grottes, conduits, ...). Tel est le cas de la zone d'étude dans laquelle nous avons une couche des grès polymorphes résistante nécessitant énormément d'énergie pour être brisée à cause de leur silicification (KEENEN, 1983) contrairement aux grès tendres.

L'érosion par des cours d'eau souterrains ou des eaux de surface, la solifluxion et l'exfoliation (GALAN & LAGARDE, 1988), la déflation ou éolisation (VITEK, 1987), la suffosion (piping) (WILLEMS & al., 1996), la désagrégation granulaire (JOYCE, 1974), ... peuvent aussi être des processus à l'origine des formes souterraines. Les études menées sur la nature des eaux de surface et de percolation ont montré l'influence du caractère acide des eaux sur les karstifications ((ZAWIDZKI & al., 1976) ; (GORI & al., 1993)).

Le terrain sous étude étant gréseux, avec en effet une double porosité, l'eau de la rivière Lufuku se fraye un chemin au travers de ces fractures. La porosité étant grande, l'infiltration l'est aussi. Il en découle d'une part la naissance des rivières souterraines (MBOYO & KATUKU (2017)) et d'autre part l'assèchement de la rivière par infiltration au fil du temps.

L'eau de la rivière Lufuku ayant un pH inférieur à 5 en moyenne a un caractère acide. En effet, lors de son écoulement à travers les fissures et les grains des roches, l'eau occasionne le phénomène de dissolution chimique des minéraux constitutifs de la roche. Les minéraux se dissolvent dans l'eau en fonction de leur solubilité. Le degré de dissolution des minéraux des roches est fonction de la durée de contact eau-roche et de la composition chimique de chacune de roches. C'est ce qui pourrait expliquer le fait que les grès polymorphes soient moins touchés par la naissance des cavités en leur sein car ils sont observés en surface au-dessus des grès tendres. L'infiltration des eaux à travers les fractures sera beaucoup plus rapide sans provoquer un grand endommagement des grès polymorphes. Ceci est en accord avec l'altération hydrothermale dû au caractère acide des eaux ((URBANI, 1978); (MARTINI, 1987); (GALAN & LAGARDE, 1988)).

Par contre, favorisés par la porosité des fractures et la porosité intergranulaire, les grès tendres se trouvent imprégnés dans une eau acide. L'infiltration intergranulaire des eaux acides prend énormément de temps et de ce fait, l'eau acide endommage fortement la roche, générant ainsi des cavités souterraines.

Notre zone d'étude est donc une zone assez complexe qui est le siège d'une diversité des processus responsables de la genèse des cavités tant superficielles que souterraines observées dans la zone qui aboutissent à des formes similaires aux terrains karstiques.

# CONCLUSION

A l'issue de ce travail, nous pouvons retenir ce qui suit :

Résultats techniques :

La région de Kakobola et ses environs est un terrain gréseux riche en quartz mais les polymorphes de la silice tels que la tridymite et la cristobalite, et les minéraux argileux et carbonatés tels que la dolomite et sjoegrenite ne sont pas présents sur tout le site. Ces roches gréseuses sont aussi riches en fer, nickel et zinc.

- La diffraction X montre également une abondance en silice où le quartz est prépondérant. Les phases métastables de la silice, notamment la tridymite et la cristobalite, et les phases minérales carbonatées ont été observées.
- La fluorescence X révèle la présence des métaux les plus abondants dans notre zone d'étude. Il s'agit du zinc, du nickel et du fer.

#### Interprétation :

Notre première étude (Geo-Eco-Trop, 46,2, 2022 ; in press) avait pour objectif d'établir le contexte paléoenvironnemental des sédiments du site d'aménagement hydroélectrique de Kakobola et de ses environs. La présente étude révèle que la zone considérée est parsemée de cavités et de fractures avec des cours d'eaux longeant ces fractures. Ces cavités qui sont prédominantes dans les grès tendres plutôt que les grès polymorphes sus-jacents sont vraisemblablement causées par une combinaison de processus divers notamment l'érosion différentielle suite à la différence de résistance mécanique entre ces formations gréseuses, plus importante dans les grès polymorphes, ancrage du barrage de Kakobola et des autres ouvrages hydrauliques, comparée à celle de l'aquifère à double porosité que sont les grès tendres sous-jacents, l'élargissement par altération chimique des nombreuses discontinuités diverses telles que les joints de stratification, fractures, failles et joints de compression affectant surtout les grès tendres par les eaux acides de la rivière Lufuku. Le secteur étudié s'en trouve ainsi précarisé car constitué de matériaux rocheux de faible densité dans lesquels l'eau s'infiltre facilement, fragilisant ainsi le site sur lequel est érigé le barrage et les ouvrages hydrauliques de l'aménagement hydroélectrique de Kakobola, ce qui pourrait, à terme, être dommageable pour l'intégrité structurale de cet ensemble. Une voile d'étanchéité avec injection continue de coulis de ciment est recommandée, combinée avec un système d'auscultation et monitoring moderne en temps réel qui doit impérativement être mis en place pour ce premier ouvrage énergétique de la Province RD Congolaise du Grand Bandundu.

## **REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES**

- BIGOT, J. (1990). Les grottes de Coquibu cavités des grès de Fontainebleau (Milly-laforêt, Essone). L'Aven, 50: 39-61.
- BOTZEM, A. (1987). Grotte de la Petite Fleur. Vie souterraine.
- CAHEN, L., & LEPERSONNE, J. (1952). Equivalence entre le système du Kalahari du Congo belge et les Kalahari beds d'Afrique australe. *Mem. Soc. Belge Géol. Paléont. Hydrol.*(8°), 4:64.
- CALLOT, Y. (1981). Sur quelques formes souterraines pseudokarstiques en France. . Proceed, 8th I.C.S. Bowling Green:, 682-685.
- CHABERT, C., & BIGOT, J. (1993). A travers le grès des Vosges. Matériaux pour servir à la connaissance du Bas-Rhin. Grottes et Gouffres: 1993, 129:4-9.
- CORRE, O. (1979). Application de la Fluorescence X à la détermination analytique d'éléments trace dans les roches et les verres fluorés. Rennes: Université de Rennes I.
- CRAFT, F. (1987). Sandstone caves. J. Sydney Spel. Soc. 31, 10) :205-207.
- FEHR, S. (1994). Le climat d'une station des basses latitudes : Kikwit (Bandundu central Zaïre). Univ. Bordeaux 3. *Trav. Du L.G.P.A.* 12 : 69 83.
- GALAN, C., & LAGARDE, J. (1988). Morphologie et évolution des cavernes et formes superficielles dans les Quartzites du Roraima (Vénézuela). *Karstologia* 11-12: 49-60.
- GORI, S., INGLESE, M., TOGNINI, P., TREZZI, G., & RIGAMONTI, I. (1993). Auyantepuy, speleologia tropicale nelle quarciti. *Speleologia SSI* 14, 28 : 23-33.
- GRAVEREAU, P. (2012). Introduction à la pratique de la diffraction des rayons X par les poudres. Bordeaux 1: ICMCB-CNRS.
- JOYCE, E. (1974). The sandstone caves of Mt Moffatt Station, Southern Queensland, Australia. Speleogenesis, cave deposits and aboriginal occupation. Abh. 5. *Int. Kongr. Spelä*ol. Stuttgart 1969 (München). 2: 5 2/1-11.
- KAPITA, B., & MBONGO, D. (2019). Apport structural et vérification de la stabilité du barrage hydroélectrique de Kakobola (Province du Kwilu/RDC). Memoire de licence inédit, Faculté des sciences, Département des geosciences, Université de Kinshasa.
- KATUKU, G., & MBOYO, M. (2017). Apport à l'étude hydrogéologique et hydrogéochimique du site de l'aménagement hydroélectrique de Kakobola et environs (Province du Kwilu/RDC). Memoire de licence inédit, Faculté des sciences, Département des geosciences, Université de Kinshasa..
- KEENEN, J. (1983). Chalcedonic quartz and occurrence quartzine (length slow chalcedony) in pelagic sediments. *Sedimentology*, 30: 449 454.

- LUSILU, P., & MBANGILWA, J. (2015). Apports géologiques et géotechniques à la caractérisation du site hydroélectrique de Kakobola et environs (Province du Kwilu/RDC). Memoire de licence inédit, Faculté des sciences, Département des geosciences, Université de Kinshasa.
- MARKER, M. (1976). Note on some South African Pseudokarst. . Bol. Soc. Venez. Espeleol. (Caracas)., 5-12.

MARTINI, J. (1987). Les phénomènes karstiques des quartzites d'Afrique du Sud. Karstologia 9, : 45-52.

- NDALA, I. (2017). Apport à l'étude d'ingénierie géologique du site de l'aménagement hydroélectrique de Kakobola en cours (Province du Kwilu/RDC). Memoire de D.E.A. inédit, Faculté des sciences, Département des geosciences, Université de Kinshasa.
- SHARMA, K. (2011). X-Ray spectroscopy. Intech.
- SPONHOLZ , B. (1994). Silicate karst associated with lateritic formations (examples from eastern Niger). *Catena* 21: 269-278.
- TRULUCK, T. (1992). Deepest and Longest Caves In Africa and Southern Africa and the Deepest Sandstone Caves in the World. *Bull. South Africa Spel. Ass.*. 32: 99-101.
- URBANI, F. (1981). Karst development In siliceous rocks, Venezuelan Guiana Shield. Proceed 8th intern. Congress speleol. Bowling Green 1981: 548.
- VITEK, J. (1987). Pseudokarst forms in Carboniferous sediments northwest from Plzen. Ceskoslov. Kras 38:, 125-127.
- WETSHONDO, O. (2012). Caractérisation et valorisation des matériaux argileux de la Province de Kinshasa (RD Congo). Liège: Université de Liège.
- WILLEMS, L., LENOIR, F., LEVECQ, J., & VICAT, J. (1993). Evolution du relief au Niger occidental: rôle de la fracturation du socle précambrien et de la formation de pseudokarsts au sein de la lithomarge et de la couverture sédimentaire. *C.R. Acad. Sc. de Paris*, 317, Série II,:97-102.
- WILLEMS, L., POUCLET, A., LENOIR, F., & VICAT, J. (1996). Phénomènes karstiques en milieux noncarbonatés. Etudes de cavités et problématique de leur développement au Niger Occidental. Z. Geomorph. N.F. - Berlin - Stuttgart, Suppl.-Bd 103 : 193-214.