



Caractérisation pétrographique et évaluation géomécanique des formations rocheuses du complexe hydroélectrique Grand Inga (RDC)

MAYINZA NGIMBILA BIENVENU

Géologue de formation, faculté des sciences, Mention Géosciences-Université de Kinshasa ;
Assistant de Recherche à l'Institut Géographique du Congo

RESUME

Le projet de construction du complexe hydroélectrique de Grand Inga (centrales Inga 3 à 8), en République Démocratique du Congo, constitue un enjeu infrastructurel et énergétique majeur pour le continent africain. La pérennité de ces ouvrages monumentaux repose sur la compétence géomécanique de leurs fondations. Cette étude présente une caractérisation pétrographique et géotechnique systématique des formations rocheuses du site, s'appuyant sur des levés cartographiques de surface, l'analyse microscopique de 45 lames minces issues de carottages de reconnaissance, et des résultats d'essais mécaniques standardisés menés jusqu'à 125 mètres de profondeur. Les résultats révèlent un socle cristallophyllien hétérogène, dominé par des micaschistes à biotite, des gneiss injectés, des granites syn-tectoniques et des métarhyolites quartzitiques. Les essais de compression uniaxiale mettent en évidence une forte hétérogénéité des propriétés mécaniques, avec des résistances à la compression simple (UCS) oscillant entre un pôle faible à moyen pour la matrice des micaschistes (28 à 55 MPa) et un pôle hautement compétent pour les métarhyolites et granites (120 à 165 MPa). L'analyse pétrographique souligne une forte concentration de minéraux phylliteux (biotite et muscovite) au sein des micaschistes, induisant un risque d'anisotropie mécanique marqué et de dégradation au contact prolongé de l'eau. En conclusion, bien que le socle global présente une capacité portante admissible satisfaisante, l'abondance des minéraux phylliteux associés à une fissuration locale profonde exige des purges ciblées et un traitement systématique des zones de contact lithologique pour garantir l'étanchéité et la stabilité à long terme des appuis des barrages.

Mots-clés : Grand Inga, pétrographie, barrages, hétérogénéité lithologique, compression uniaxiale, anisotropie foliaire.

Digital Object Identifier (DOI): Digital Object Identifier (DOI): <https://doi.org/10.5281/zenodo.23433563>

1. Introduction

Le projet de construction du complexe hydroélectrique de Grand Inga en République Démocratique du Congo (RDC) se présente comme une réponse stratégique majeure pour combler le déficit énergétique national, stimuler le développement industriel de l'Afrique australe et alimenter les interconnexions des réseaux électriques régionaux à l'échelle du continent (via le Pool Énergétique d'Afrique Centrale et le *Southern African Power Pool - SAPP*) (*BAD/AfDB, 2024*). Le site d'Inga, localisé dans la province du Kongo Central, concentre l'un des plus grands potentiels hydroélectriques mondiaux grâce à la puissance hydraulique exceptionnelle du fleuve Congo. Actuellement, ce potentiel n'est exploité qu'à travers deux centrales, Inga 1 et Inga 2, délivrant une puissance installée d'environ 1 775 MW. Le projet "Grand Inga", qui prévoit six phases d'extension successives (configurations Inga 3 à Inga 8), ambitionne de mobiliser la totalité du débit résiduel du fleuve (*Snel, 2015*), imposant de ce fait des contraintes hydro-structurales et mécaniques sans précédent sur le plancher rocheux d'assise.

La pérennité de ces infrastructures monumentales dépend de manière critique des conditions géologiques et géotechniques du terrain de fondation. Les modèles d'aménagement initiaux issus des campagnes de 1974 présentaient des vulnérabilités structurelles majeures, notamment l'impossibilité d'assurer une étanchéité efficace des fondations au niveau de l'île de Sikila, ainsi qu'un risque élevé d'instabilité lié au contact lithologique franc entre les formations de Gangila et de Sikila (*Tack, 1983*). Face à ces contraintes, une nouvelle configuration d'implantation a été adoptée, s'appuyant sur une morphologie de vallée plus avantageuse et un relief de berge optimisé pour l'assise des futurs barrages.

Cette analyse historique explique la nécessité d'une réévaluation géotechnique complète face aux défis techniques inhérents au nouveau tracé du schéma directeur de Grand Inga (*Tali & Mwamba, 2023*).

Sur le plan structural, ce nouveau secteur s'inscrit dans le contexte géologique complexe du socle précambrien de la chaîne ouest-congolienne (Mayumbien). Le site présente une forte hétérogénéité lithologique où se côtoient, au droit du lit du fleuve Congo, des bandes de gneiss, de micaschistes, de métarhyolites et de granites migmatitiques intensément affectées par l'anisotropie tectonique (**Figure 1**). La compréhension fine de cette mosaïque géologique locale constitue un prérequis impératif pour évaluer la réponse géomécanique des fondations sous les futures centrales.

L'objectif principal de cette étude est de caractériser les propriétés pétrographiques et mécaniques de ce nouveau site d'implantation afin d'évaluer l'aptitude du socle à supporter les charges statiques et dynamiques du complexe.

L'hétérogénéité lithologique observée pose le problème critique de la distribution et de la concentration des contraintes sous les structures de rétention. En nous appuyant sur la cartographie de 123 stations d'observation structurale et sur la réalisation d'essais de compression uniaxiale (UCS) sur carottes de sondages, ce travail explore l'hypothèse selon laquelle la variabilité minéralogique microscopique, spécifiquement le taux de phyllosilicates au sein des textures lépidoblastiques et le degré d'altération localisé, contrôle directement la chute des performances mécaniques et l'anisotropie des massifs d'appui.

L'évaluation de ces couplages pétro-mécaniques s'avère indispensable, car l'interaction entre la matrice rocheuse et les sollicitations hydrauliques exceptionnelles détermine la sécurité globale des fondations (*Antoine, 2005*).

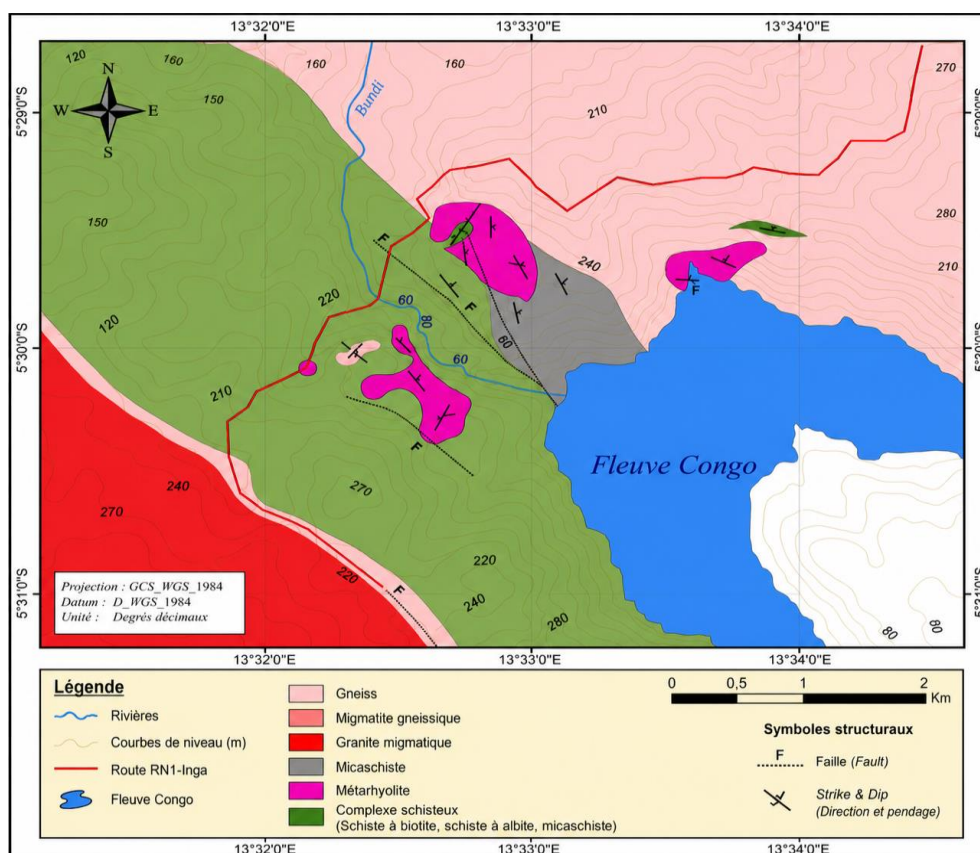


Figure 1 : Esquisse géologique locale du site du complexe hydroélectrique de Grand Inga (RDC). Carte structurale montrant la répartition des grandes unités lithologiques du socle précambrien

2. Cadre d'étude et méthodologie

Pour répondre aux objectifs de cette étude, une approche multi-échelle a été adoptée :

2.1. Échantillonnage et cartographie numérique

La méthodologie adoptée pour cette étude repose sur un couplage entre des investigations géologiques de surface et des analyses géotechniques en laboratoire, spatialisées à l'aide d'outils numériques.

L'inventaire des structures et des faciès lithologiques a été réalisé à travers un réseau de 123 stations d'observation réparties sur le site d'implantation de la nouvelle configuration du complexe (Inga 3 à Inga 8). Afin de corréliser spatialement chaque station avec les futures infrastructures monumentales, le plan d'aménagement technique du projet initialement extrait sous format vectoriel KMZ a été intégré et projeté au sein d'un Système d'Information Géographique (SIG). La superposition des coordonnées géoréférencées des stations de terrain et du plan directeur des futurs barrages a permis d'attribuer avec précision chaque station d'observation à l'emprise spécifique de l'ouvrage correspondant.

Pour l'étude des caractéristiques en profondeur, la reconnaissance s'est appuyée sur les campagnes géotechniques antérieures de l'Office des Routes ainsi que sur les données de forages de reconnaissance réalisées par la SYDELCO. Au total, les carottes issues de 9 sondages mécaniques profonds ont fait l'objet d'un échantillonnage systématique. Les échantillons de carottes sélectionnés ont été préparés et conditionnés pour être soumis aux analyses pétrographiques et aux essais de caractérisation mécanique en laboratoire.

2.2. Analyses pétrographiques en lames minces

Afin de caractériser la minéralogie microscopique, la texture et le degré d'altération des formations d'appui, une campagne d'échantillonnage ciblée a été menée sur le terrain. La sélection des échantillons a été dictée par la complexité géologique révélée au droit de chaque futur ouvrage après superposition SIG. Ainsi, pour les sites de barrage présentant un faciès lithologique homogène, un échantillon représentatif unique a été prélevé. Inversement, pour les zones d'implantation caractérisées par une variabilité lithologique ou des contacts de formations, plusieurs échantillons ont été systématiquement collectés afin de couvrir l'ensemble des variations pétrographiques.

Les échantillons rocheux ainsi sélectionnés ont été transmis aux laboratoires du Centre de Recherches Géologiques et Minières (CRGM) à Kinshasa pour la confection de lames minces standardisées. L'analyse de ces lames a été réalisée par microscopie polarisante (en lumière naturelle et polarisée) dans le but d'identifier précisément les assemblages minéralogiques primaires, d'évaluer la proportion volumique des minéraux phylliteux altérables (biotite, muscovite, chlorite) et de caractériser le réseau microfissural influençant le comportement mécanique global du massif.

2.3. Compilation et exploitation des données géotechniques et mécaniques

Pour compléter l'approche microscopique et évaluer le comportement macro-mécanique des fondations, cette étude s'appuie sur l'exploitation et la réévaluation critique des données issues des rapports de forages historiques et des campagnes géotechniques de la SYDELCO et de l'Office des Routes.

Les propriétés physiques et mécaniques analysées proviennent des essais standardisés exécutés sur les carottes des 9 sondages mécaniques profonds (densité apparente, porosité ouverte par pesée hydrostatique et résistance à la compression uniaxiale simple).

En parallèle, l'état de fracturation macroscopique et les orientations des réseaux de cassures (diaclasses, failles et plans de discontinuité) ont été systématiquement relevés au droit des 123 stations d'observation. Si la caractérisation géomécanique de la matrice rocheuse saine fait l'objet de ce présent volume (Volume 1), la distribution spatiale fine de ces cassures ainsi que leur traitement cinématique et dynamique par inversion numérique réalisé sous le logiciel Win-Tensor pour la détermination des tenseurs de contraintes sont intégrés et développés dans le volet structural de cette recherche (Volume 2).

La compilation rigoureuse de ces résultats textuels et tabulaires a permis d'établir une base de données corrélant les propriétés géomécaniques macroscopiques avec les observations minéralogiques microscopiques obtenues au CRGM.

Les stations de prélèvements des horizons rocheux analysés au droit des différents axes du complexe (Inga 3 à Inga 8) sont localisées sur la carte d'échantillonnage de la figure 2.

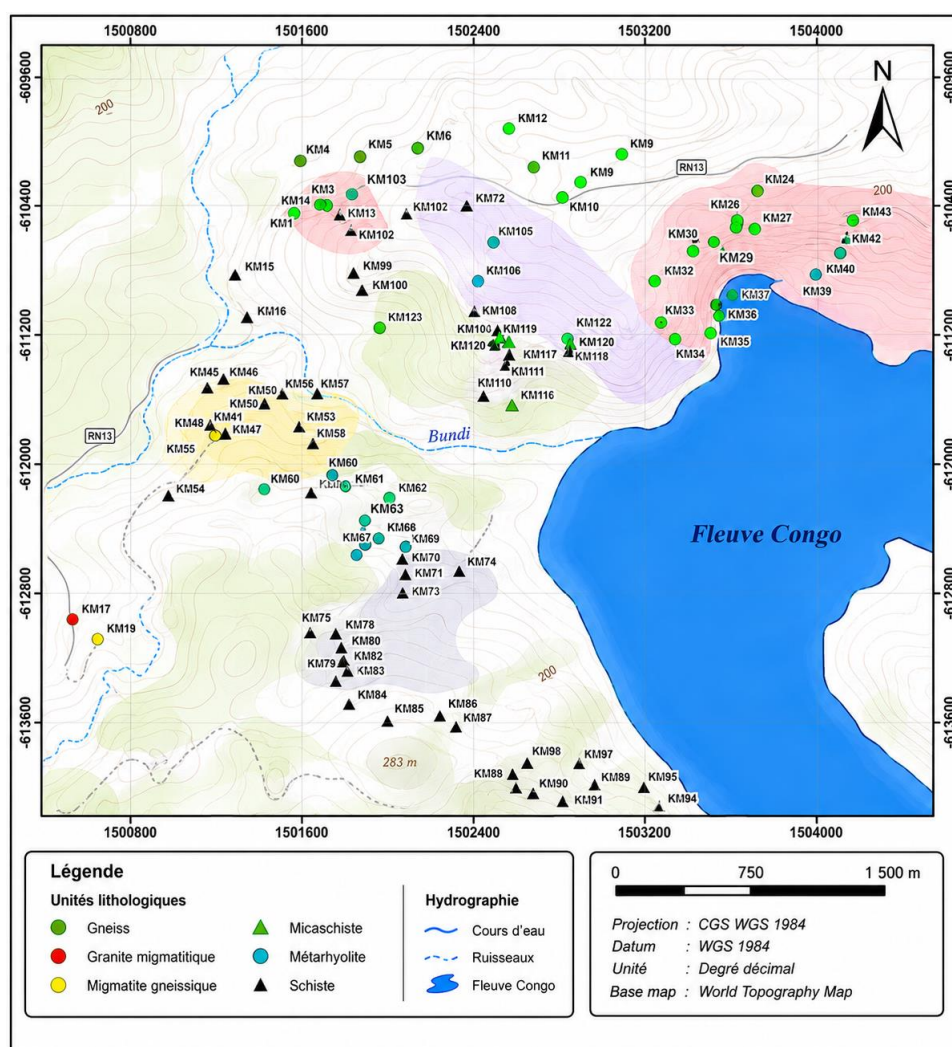


Figure 2 : Carte d'échantillonnage et localisation des stations de prélèvements lithologiques.

Cette carte montre la représentation spatiale des points d'échantillonnage (faciès pétrographiques des horizons rocheux analysés) au droit du complexe hydroélectrique de Grand Inga (RDC). La carte met en évidence la répartition des stations de mesures (Gneiss, Micaschistes, Métarhyolites, Granites

migmatitiques, Migmatites gneissiques et Schistes) couvrant les configurations prévues pour les aménagements Inga 3 à Inga 8. Le canevas de coordonnées est exprimé en projection CGS WGS 1984.

3. Résultats et Discussion

3.1. Résultats

3.1.1. Caractérisation Pétrographique et Mécanique

1. L'Unité des Micaschistes (Faciès Inga 3, 5, 6, 7)

- Pétrographie microscopique : Cette unité est caractérisée par une texture lépidoblastique à porphyroblastique et une foliation/schistosité très marquée. La composition minéralogique moyenne révèle une prédominance de minéraux phylliteux, notamment la biotite et la muscovite (30% à 60%), associées au quartz (15% à 35%) et à des traces de grenat ou de sillimanite.
- Comportement Mécanique (UCS) : Les essais de compression uniaxiale simple (UCS) sur cette unité révèlent les performances les plus faibles du site, avec des résistances oscillant entre 28 et 55 MPa (résistance modérée à faible selon l'ISRM).

2. L'Unité des Gneiss injectés (Faciès Inga 4, 6, 7)

- Pétrographie microscopique : Présente une texture porphyroblastique à granoblastique avec une foliation nette marquée par l'alternance de rubans quartzofeldspathiques et de lits de micas. Minéralogie : Quartz (25 à 30%), Feldspaths (Orthose/Plagioclase : 20 à 25%) et Micas (30%).
- Comportement Mécanique (UCS) : Les essais mécaniques affichent des valeurs de résistance intermédiaires à bonnes, se situant globalement entre 60 et 95 MPa.

3. L'Unité des Granites Syn-tectoniques et Migmatitiques (Inga 3, 4, 6)

- Pétrographie microscopique : Présente une texture grenue à granoblastique, zonaire et massive. Sa composition microscopique est dominée par le Plagioclase altéré en Damourite (50%) et le Quartz (35%), complétés par de la biotite et des traces de pyroxène.
- Comportement Mécanique (UCS) : En raison de leur architecture grenue imbriquée et massive, ces structures granitiques offrent une haute compétence géomécanique, avec des résistances UCS s'étendant de 110 à 140 MPa.

4. L'Unité des Métarhyolites et Quartzites (Faciès Inga 6, 8)

- Pétrographie microscopique : Texture granoblastique pure, hautement consolidée. Composition ultra-siliceuse dominée par le Quartz (40%) associé à des feldspaths et des traces d'altération en épidote ou chlorite.
- Comportement Mécanique (UCS) : C'est le niveau le plus dur et le plus compétent du socle rocheux de Grand Inga, atteignant des pics de résistance mécanique allant jusqu'à 120 à 165 MPa.

Tableau 1 : Caractéristiques physiques, pétrographiques et mécaniques synthétiques du socle de Grand Inga

Unité Lithologique	Texture Microscopique Principale	Minéraux Index Majeurs (% moyen)	Plage de Résistance UCS (MPa)	Classe de Compétence Géomécanique (ISRM)
Micaschistes à biotite	Lépidoblastique	Biotite + Muscovite (35-60%)	28 – 55	Faible à Modérée
Gneiss injectés	Porphyroblastique	Quartz + Feldspaths + Micas	60 – 95	Moyenne à Bonne
Granites	Grenue massive	Plagioclase (50%) + Quartz (35%)	110 – 140	Haute résistance
Métarhyolites / Quartzites	Granoblastique	Quartz prédominant (40%)	120 – 165	Très Haute résistance

3.1.2. Architecture structurale et profils géologiques des axes d'aménagements

La caractérisation mécanique globale obtenue en laboratoire doit être spatialisée au droit de chaque ouvrage projeté pour en apprécier l'impact sur le plan du génie civil. L'établissement des profils géologiques transversaux le long des différents axes d'implantation met en évidence une hétérogénéité lithologique tridimensionnelle et asymétrique sous le lit du fleuve Congo.

3.1.2.1. Axe de l'aménagement d'Inga 3

Le profil transversal synthétique au droit d'Inga 3 (**Figure 3**) montre un secteur géométriquement dominé par le synclinal de micaschistes à chlorite de l'Unité Mayumbienne (faciès de faible résistance, 28 à 55 MPa). Cette matrice tendre se retrouve flanquée et recoupée de manière abrupte par des injections de métarhyolites hautement compétentes (120 à 165 MPa) en berge droite (SW) et berge gauche (NE).

Du point de vue de l'ingénieur, ce contact lithologique franc introduit une forte anisotropie de déformabilité sous les fondations de la future digue. La transition soudaine entre un horizon rocheux ductile, sujet à l'altération, et une masse rigide siliceuse induit un risque critique de redistribution asymétrique des contraintes et de tassements différentiels lors de la mise en charge hydraulique.

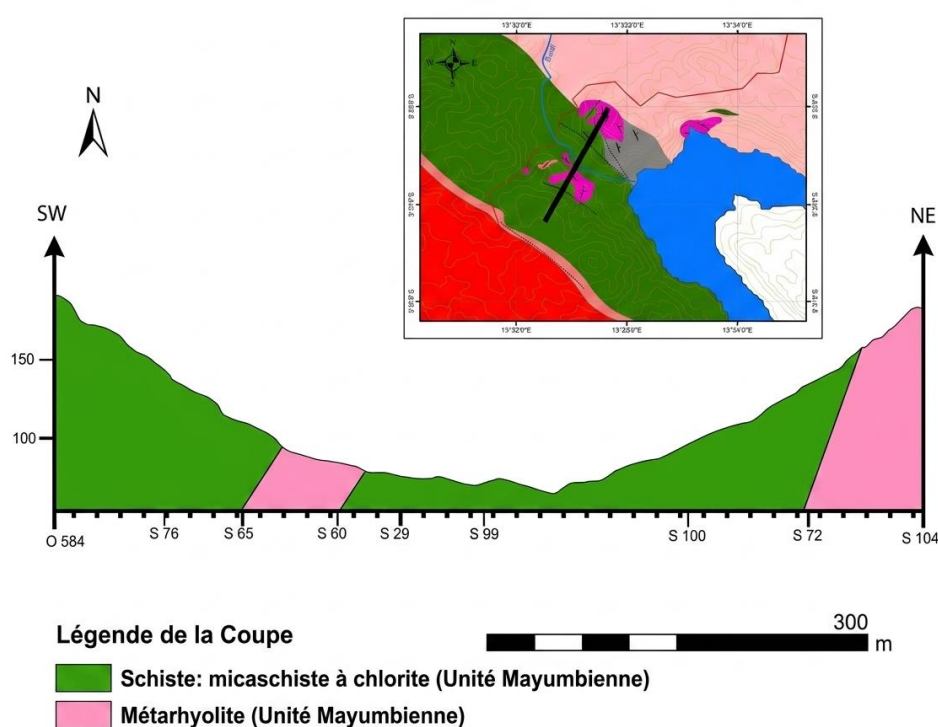


Figure 3 : Coupe géologique transversale synthétique au droit de l'axe du barrage Inga 3.

Représentation de l'hétérogénéité du sous-sol mettant en évidence le contact entre le synclinal de micaschistes à chlorite et les massifs de métarhyolites de l'Unité Mayumbienne sous le lit de fondation.

3.1.2.2. Axe de l'aménagement d'Inga 4

Au niveau de l'axe d'Inga 4 (**Figure 4**), la coupe transversale révèle une complexité lithologique accrue par rapport à l'aménorçestré en amont. Le fond du lit du fleuve Congo repose ici sur une alternance serrée de gneiss injectés (60 à 95 MPa) et de bandes de micaschistes à chlorite (28 à 55 MPa), tandis que la berge droite (SW) est massivement occupée par l'intrusion des granites (110 à 140 MPa).

Cette configuration implique une compartimentation mécanique de l'assise. Le passage répété des horizons de micaschistes aux gneiss injectés crée des plans de faiblesse locaux parallèlement à la foliation. Bien que la présence du granite en berge droite offre un excellent point d'appui pour les structures lourdes de l'usine, la zone de transition entre le massif granitique et les gneiss lités devra faire l'objet d'une attention géotechnique particulière en raison des contrastes de modules d'élasticité.

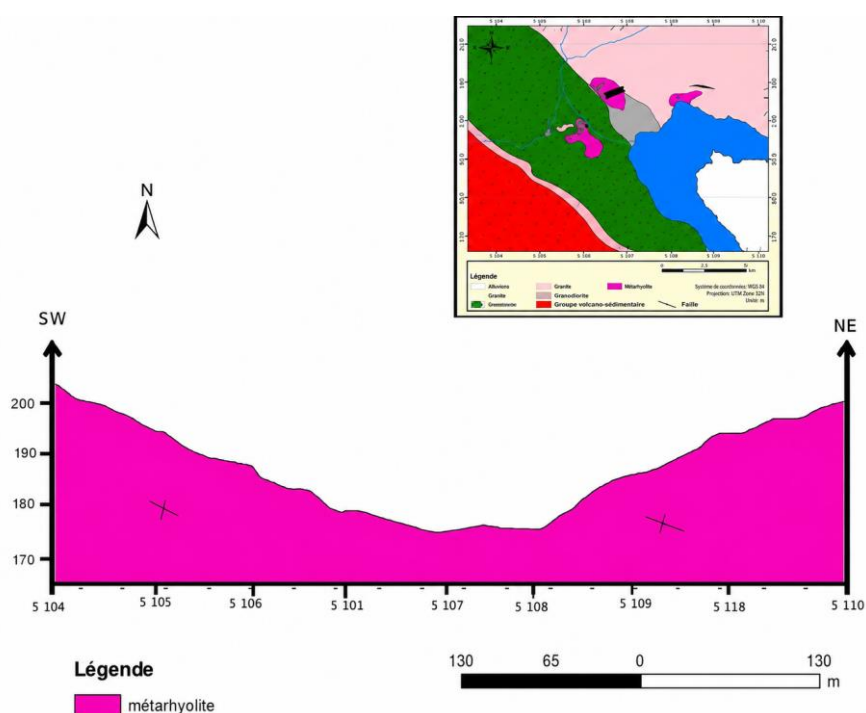


Figure 4 : Coupe géologique transversale synthétique au droit de l'axe du barrage Inga 4.

3.1.2.3. Axe de l'aménagement d'Inga 5

L'axe du barrage Inga 5 (**Figure 5**) traverse un secteur d'une grande hétérogénéité lithologique où s'observent presque toutes les unités du socle. La berge droite (SW) s'appuie sur le massif de granites massifs (110 à 140 MPa) qui passe latéralement, via une zone de contact nette, à une alternance de micaschistes à biotite (28 à 55 MPa) et de gneiss injectés (60 à 95 MPa) occupant la majeure partie du lit fluvial. La berge gauche (NE) montre une réapparition des micaschistes sous une couverture topographique plus abrupte.

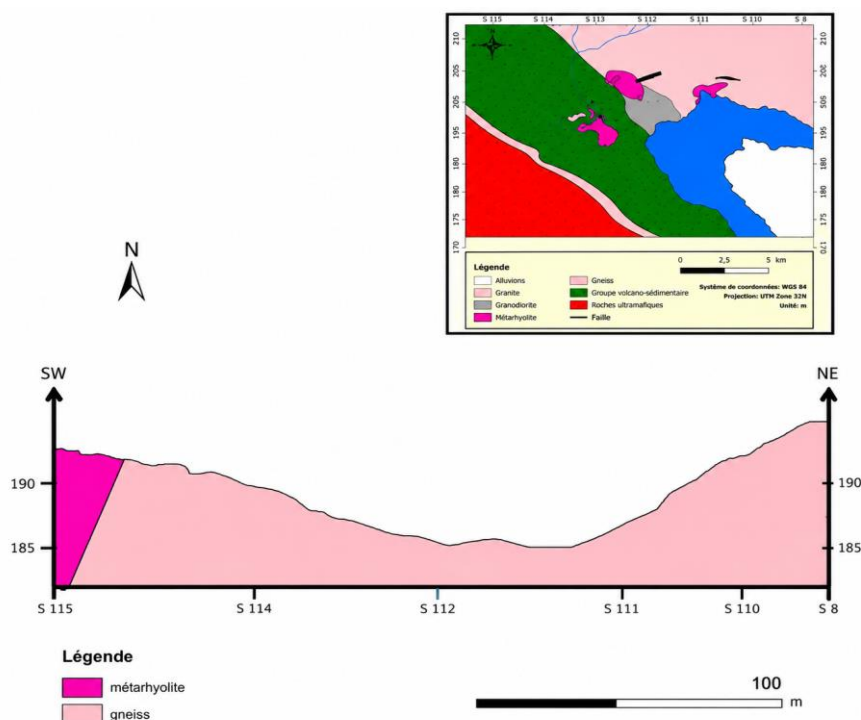


Figure 5 : Coupe géologique transversale synthétique au droit de l'axe du barrage Inga 5.

La prédominance des micaschistes dans la zone centrale de forte charge hydraulique représente la principale contrainte de cet axe. Le contraste de rigidité entre le flanc SW granitique et le centre érodable en micaschistes exige des travaux de purge importants et une étanchéification profonde par un voile d'injection dense pour prévenir l'érosion interne le long des plans de schistosité.

3.1.2.4. Axe de l'aménagement d'Inga 6

Le profil de l'axe Inga 6 (**Figure 6**) montre une géométrie structurale remarquable. Le sous-sol est caractérisé par de puissantes structures plissées où les micaschistes à chlorite et à biotite (28 à 55 MPa) alternent avec les gneiss injectés (60 à 95 MPa). Ce complexe métamorphique est recoupé verticalement par de larges filons et apophyses de métarhyolites et de quartzites (120 à 165 MPa), ainsi que par des corps granitiques isolés.

Sur le plan géomecanique, l'asymétrie est ici contrôlée par ces structures filoniennes hautement rigides qui traversent la matrice schisteuse tendre. Ces hétérogénéités abruptes agissent comme des points durs structuraux. Lors de la poussée des eaux, les micaschistes environnants tendront à se déformer de manière plastique, reportant de fortes contraintes déviatoriques sur les masses de métarhyolites et de granites, augmentant le risque de cisaillement localisé aux contacts géologiques.

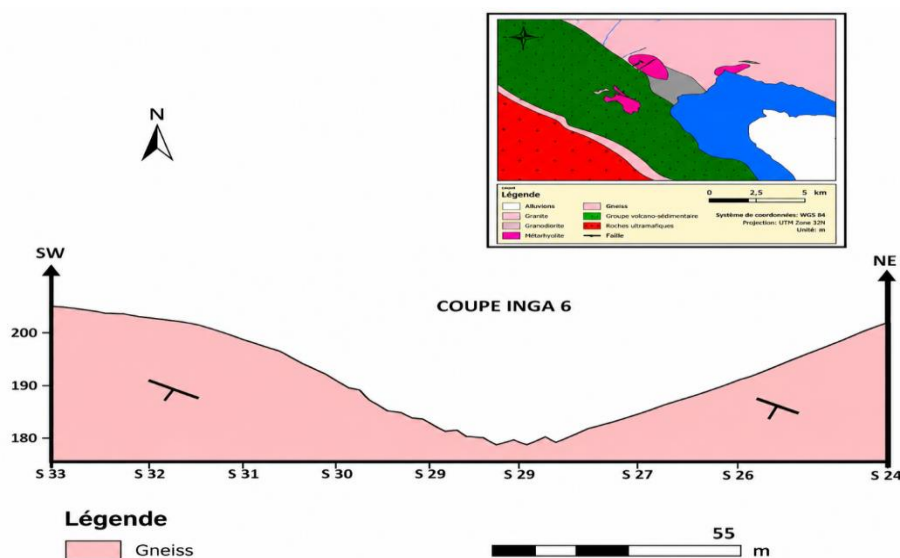


Figure 6 : Coupe géologique transversale synthétique au droit de l'axe du barrage Inga 6.

3.1.2.5. Axe de l'aménagement d'Inga 7

Au droit de l'axe Inga 7 (**Figure 7**), le lit du fleuve Congo subit une réduction de la largeur du faciès granitique au profit des micaschistes et des gneiss injectés. La berge droite (SW) conserve un ancrage sur le massif de granite (110 à 140 MPa), mais le fond du lit est presque exclusivement entaillé dans une puissante série de micaschistes à chlorite (28 à 55 MPa). La berge gauche (NE) remonte rapidement dans les niveaux de gneiss injectés stables (60 à 95 MPa).

Cette coupe met en lumière un fond de vallée mécaniquement faible et déformable, encadré par deux berges rocheuses de bonne compétence (granite et gneiss). Une telle configuration de vallée souple impose des contraintes sévères sur la géométrie du barrage, car le centre de la digue reposera sur une formation à faible module de déformation (UCS maximale de 55 MPa), ce qui nécessite des dispositions constructives pour absorber les flexions structurales de l'ouvrage.

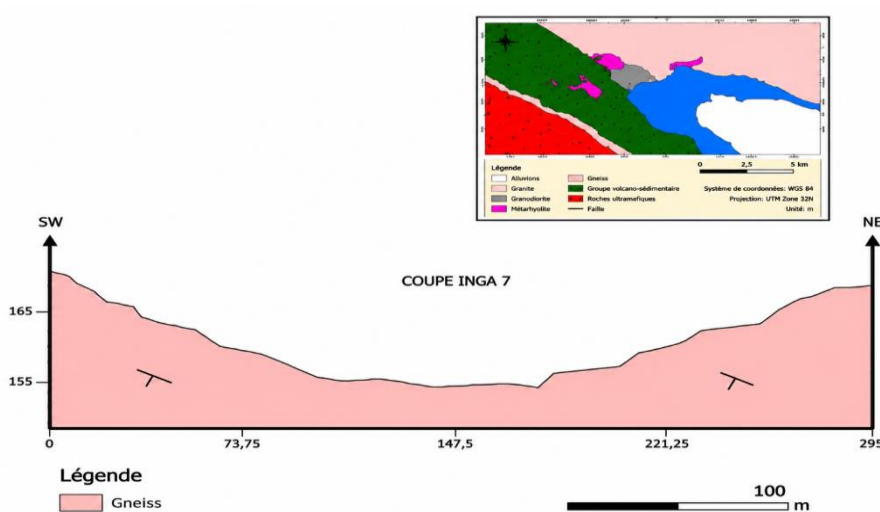


Figure 7 : Coupe géologique transversale synthétique au droit de l'axe du barrage Inga 7.

Section transversale montrant l'important creusement du lit fluvial au sein de la matrice tendre des micaschistes, encadrée par des berges saines.

3.1.3. Axe de l'aménagement d'Inga 8

Le profil structural de l'aménagement terminal Inga 8 (**Figure 8**) se distingue par une nette amélioration de la compétence globale du socle rocheux. Le lit du fleuve et la berge gauche (NE) sont massivement ancrés dans l'unité ultra-siliceuse des métarhyolites et quartzites (120 à 165 MPa). Les micaschistes à chlorite (28 à 55 MPa) restent confinés sous forme de bandes limitées en berge droite (SW), flanquées par les gneiss injectés (60 à 95 MPa).

Du point de vue de la sécurité des fondations, l'axe d'Inga 8 présente les conditions géomécaniques les plus favorables de tout le complexe. L'ancrage de la majeure partie de l'ouvrage sur un horizon granoblastique pur à quartz prédominant garantit une excellente résistance à la rupture uniaxiale et une faible perméabilité matricielle. Seule l'extrémité occidentale (SW) en micaschistes nécessitera un traitement classique par excavation des horizons superficiels altérés.

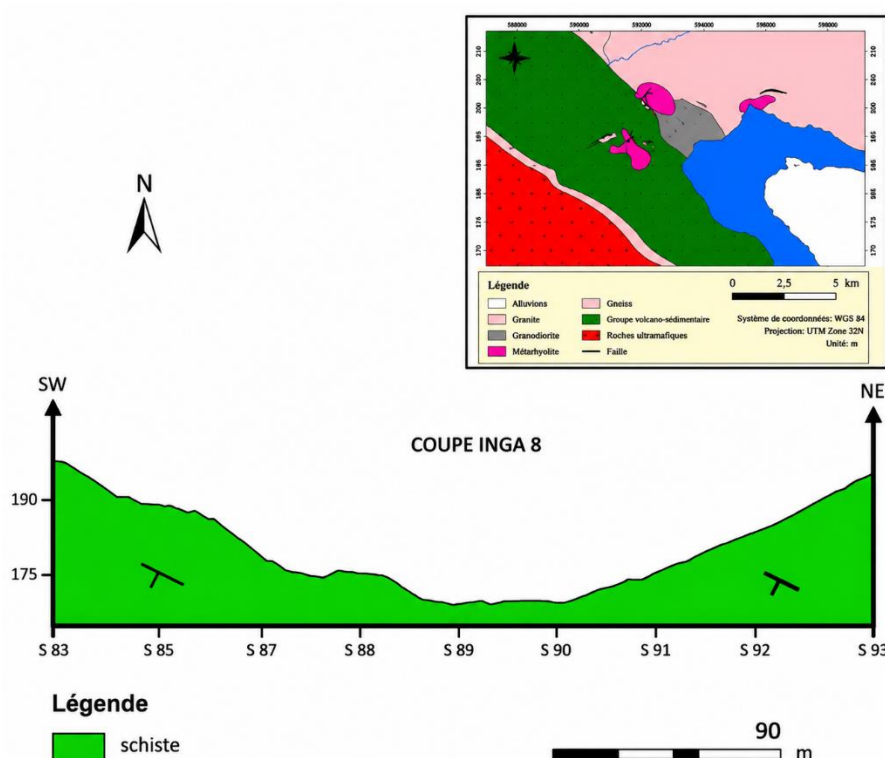


Figure 8 : Coupe géologique transversale synthétique au droit de l'axe du barrage Inga 8.

Coupe mettant en valeur la dominance de l'unité compétente des métarhyolites et quartzites sous la majorité de l'emprise de l'ouvrage.

3.2. Discussion

3.2.1. Corrélation entre Constitution Minéralogique et Comportement Géomécanique du Socle

L'analyse croisée des textures microscopiques et des essais de compression uniaxiale (UCS) permet de dépasser le stade de la simple description pétrographique pour caractériser le comportement mécanique intrinsèque du socle rocheux face aux sollicitations d'un aménagement hydroélectrique de grande envergure (Inga 3 à Inga 8). Bien que le socle global présente structurellement des propriétés mécaniques globalement admissibles à l'échelle régionale, les variations locales de résistance mettent en évidence une forte anisotropie mécanique induite par les facteurs pétrogénétiques.

3.2.2. Vulnérabilité minéralogique et anisotropie des micaschistes

Les micaschistes à biotite et muscovite présentent les résistances les plus critiques du site (28 à 55 MPa). L'examen des lames minces montre que ce comportement défavorable est dicté par leur texture lépidoblastique, où les lits de phyllosilicates (jusqu'à 60 % de la matrice) forment des plans de foliation continus et parallèles. Sur le plan géotechnique, sous l'effet des contraintes déviatoriques, ces feuillets micacés agissent comme des surfaces de moindre résistance, favorisant le cisaillement microstructural et le glissement. Ce phénomène mécanique d'anisotropie foliaire est une cause classique d'instabilité bien documentée dans la littérature (**Deere, 1973**). Les recherches récentes confirment que le ratio de phyllosilicates mesuré en lame mince permet de prédire quantitativement cette chute de résistance et le mode de rupture macroscopique des massifs métamorphiques (**Martinez-Martinez & Eberhardt, 2024**).

De plus, le contact prolongé de cette matrice micacée avec les eaux d'infiltration sous pression, dans le contexte du réservoir hydroélectrique, expose ces horizons à un risque de dégradation physique accélérée par hydrolyse et fluage. L'histoire des grands barrages rappelle la sévérité de ce risque : les ruptures historiques des barrages de St. Francis en 1928 (USA) et de Malpasset en 1959 (France) étaient directement liées à l'infiltration d'eaux sous pression dans des fondations d'appui dominées par des micaschistes et des gneiss foliés, entraînant une chute fatale de la résistance au cisaillement (**Rogers, 1995 ; CFBR, 2018 ; Bennett, 2025**).

Ce comportement anisotrope des roches métamorphiques riches en phyllosilicates n'est pas spécifique au site de Grand Inga. Des observations comparables ont été rapportées dans plusieurs grands aménagements hydroélectriques mondiaux implantés sur des socles cristallins ou métamorphiques. Par exemple, les investigations géotechniques menées lors de la construction du barrage des Trois-Gorges en Chine ont mis en évidence qu'une schistosité marquée et la présence de zones de cisaillement induisent une anisotropie mécanique significative, laquelle influence directement la propagation des fractures et la stabilité des fondations sous chargement hydraulique (**Chen & Zhao, 2010 ; Zhang et al., 2001**). Des comportements similaires ont été documentés pour le Grand barrage de la Renaissance éthiopienne (GERD), où la variabilité pétrographique du socle précambrien contrôle de manière critique les propriétés mécanico-hydrauliques du massif rocheux, imposant des traitements de consolidation hautement spécifiques (**Alemu et al., 2017 ; Berhane et al., 2020**). Ces analogies internationales confirment que l'anisotropie minéralogique observée dans les micaschistes d'Inga constitue un facteur critique universel, devant impérativement guider l'évaluation géomécanique et le dimensionnement des fondations du complexe.

3.2.3. Haute compétence des massifs granito-quartzitiques

À l'opposé, les granites syn-tectoniques, les métarhyolites et les quartzites développent des performances optimales (jusqu'à 165 MPa), classant ces roches parmi les matériaux à très haute résistance selon les standards de l'ISRM. Microscopiquement, cette rigidité structurelle s'explique par leurs textures grenues massives ou granoblastiques microgranulaires, caractérisées par un

enchevêtrement tridimensionnel strict des cristaux de quartz (30 % à 40 %) et de feldspaths. L'absence de foliation continue au sein de ces faciès limite le développement de microfissures orientées, conférant ainsi au plancher rocheux une capacité portante remarquable pour l'ancrage des structures lourdes et des évacuateurs de crue. Ce comportement isotrope et hautement compétent s'explique par l'enchevêtrement tridimensionnel des cristaux qui bloque la propagation des fractures sous charge axiale, répondant ainsi aux critères géomécaniques les plus exigeants pour les fondations de grands barrages (**Zhang, 2022 ; Zhou et al., 2023**).

3.2.4. Le défi technique de l'hétérogénéité lithologique et contacts de structures

L'implication la plus cruciale pour la sécurité des configurations d'Inga 3 à Inga 8 réside dans la distribution spatiale de ces faciès. La juxtaposition ou le chevauchement direct de formations hautement rigides (granites/quartzites) et de formations déformables (micaschistes) créent de violents contrastes de rigidité (passant brusquement de 32 MPa à plus de 110 MPa) au droit d'un même ouvrage. Sous l'effet des charges hydrauliques colossales et des poussées d'eau exceptionnelles du fleuve Congo, ces zones de contact lithologique constituent des discontinuités majeures sujettes à des concentrations de contraintes et à des tassements différentiels potentiels au niveau des fondations. En mécanique des roches, cette redistribution asymétrique des contraintes au sein d'une fondation composite (rigide/déformable) représente l'un des problèmes majeurs de l'ingénierie des grands ouvrages (**Brady & Brown, 2023**).

Un défi strictement identique a été rencontré lors de la construction du barrage de Les Toules en Suisse, où l'ouvrage traversait en alternance des bandes de gneiss rigides et de micaschistes médiocres, générant de violents contrastes de déformabilité (**Müller, 2010**). De même, le barrage de Batu en Malaisie a mis en évidence la complexité structurelle des zones de contact franc entre un quartz-micaschiste et un massif granitique intrusif (**Saim Suratman, 1987**).

3.2.5. Implications pour l'ingénierie et recommandations de stabilisation

Afin de garantir la pérennité et la sécurité des futures infrastructures face à ces contraintes pétro-mécaniques, trois mesures d'ingénierie spécifiques et rigoureuses sont préconisées :

- **Purge systématique des horizons superficiels** : L'élimination complète par décapage rigoureux des horizons superficiels de micaschistes altérés est impérative pour asseoir les fondations exclusivement sur un socle sain.
- **Densification des reconnaissances géotechniques locales** : Compte tenu de la forte hétérogénéité lithologique, des campagnes complémentaires de sondages à maillage serré doivent être menées au droit de chaque axe de barrage pour cartographier précisément l'extension géométrique tridimensionnelle des horizons médiocres.
- **Traitements de consolidation et d'étanchéité** : La mise en œuvre de voiles d'injection systématiques de coulis de ciment à haute performance est indispensable au niveau des zones de contact, de perméabilité résiduelle et de fracturation microscopique. À l'instar des solutions appliquées à Les Toules (**Müller, 2010**) et à Batu (**Saim Suratman, 1987**), cela permettra d'homogénéiser la rigidité du plancher rocheux, de sceller les plans de foliation ouverts et de bloquer les circulations d'eau fluides responsables de l'altération minéralogique continue. Ces méthodologies de confortement et le choix des coulis modernes s'alignent sur les lignes directrices internationales les plus récentes en matière de traitement des fondations rocheuses hétérogènes (**CIGB/ICOLD, 2022 ; Bruce, 2023**).

Ainsi, l'intégration des observations pétrographiques et des données géomécaniques met en évidence que la variabilité minéralogique et texturale du socle rocheux constitue un facteur déterminant dans le comportement mécanique des fondations. Cette hétérogénéité doit être intégrée dans la conception et la

stabilisation des ouvrages du complexe hydroélectrique de Grand Inga afin de garantir leur stabilité à long terme.

4. Conclusion

L'évaluation pétro-mécanique du socle rocheux du complexe hydroélectrique de Grand Inga a permis de jeter les bases géologiques et géotechniques indispensables à la sécurisation des futures infrastructures (configurations Inga 3 à Inga 8). En s'affranchissant d'une approche purement descriptive, cette étude a mis en évidence le lien de causalité direct entre les microtextures cristallines et les propriétés mécaniques macroscopiques des massifs de fondation.

1. Synthèse des acquis pétro-mécaniques :

Trois conclusions majeures ressortent des investigations couplées en microscopie optique et en mécanique des roches :

- Le contrôle microstructural de la rupture : L'hétérogénéité mécanique du site est dictée par la nature des textures minérales. Les faciès granito-quartzitiques et métarhyolitiques, forts de leur texture granoblastique et grenue imbriquée riche en quartz, affichent une haute compétence mécanique. À l'inverse, l'omniprésence d'une texture lépidoblastique au sein des micaschistes, caractérisée par des lits continus de phyllosilicates, induit une forte anisotropie mécanique et réduit la résistance uniaxiale à des valeurs critiques (28 à 55 MPa).
- Le risque rhéologique lié à l'eau : La sensibilité des micaschistes à l'hydrolyse et au fluage sous pression d'eau résiduelle constitue un facteur de vulnérabilité à long terme pour le plancher rocheux, rappelant les grands sinistres géotechniques de l'histoire des barrages mondiaux.
- Le défi de la juxtaposition lithologique : Le risque principal au droit des fondations réside dans les violents contrastes de rigidité spatiale provoqués par le contact direct ou le chevauchement entre massifs rigides et horizons foliés tendres.

2. Portée pratique pour l'ingénierie

Face aux vulnérabilités microstructurelles et aux contrastes de rigidité mis en évidence, la viabilité du projet de Grand Inga dépendra de la mise en œuvre de solutions d'ingénierie ciblées. Les hétérogénéités locales identifiées imposent ainsi une adaptation des méthodes de reconnaissance et de traitement du socle, passant par des purges systématiques des horizons altérés, une densification des sondages au droit des ouvrages et des campagnes d'injection de consolidation rigoureuses.

En intégrant ces paramètres géologiques fondamentaux aux critères de conception technique, cette étude fournit des données d'entrée fiables pour garantir la pérennité et la stabilité de ce mégaprojet face aux sollicitations hydro-structurales exceptionnelles du fleuve Congo.

REFERENCES

- Alemu, M., Kebede, T., & Abebe, B. (2017). Engineering geological assessment of the foundation rocks of the Grand Ethiopian Renaissance Dam project. *Journal of African Earth Sciences*, 129, 746–758.
- Antoine, P. (2005). Le rôle du géologue dans l'étude des projets de barrages. *Géologues*, (145), 39–43.
- Antoine, P., Fabre, D., & Denis, A. (2005). Introduction à la géologie de l'ingénieur (2e éd.). Éditions Tec & Doc.

- Banque Africaine de Développement. (2024). African hydropower outlook: Regional integration, SAPP interconnections, and the strategic role of the Congo River basin (Rapport macroéconomique). BAD.
- Bennett, K. A. (2025). Revisiting the St. Francis Dam failure: Modern geomechanical analysis of micaschist foliation and pore pressure. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 151(4), 112–127.
- Berhane, G., Gebrehiwot, K., & Tesfaye, S. (2020). Geological and geotechnical investigations for large dam foundations in metamorphic terrains: the case of GERD. *Engineering Geology*, 271, 105602.
- Bertossa, A., & SICAI. (1955). Étude géologique générale de la région d'Inga en vue du captage du fleuve Congo pour des fins hydro-électriques. Congo Belge.
- Bertossa, A., & Thonnard, R. (1957). Études géologiques de la région Matadi-Inga Monolyte avec une carte au 1/100 000. Bulletin du Service Géologique du Congo Belge et du Ruanda-Urundi.
- Brady, B. H., & Brown, E. T. (2023). *Rock mechanics for underground mining and foundation engineering* (5e éd.). Springer Nature.
- Bruce, D. A. (2023). *Specialty construction techniques for dam foundation engineering and stabilization*. CRC Press.
- Buron, A., & Meilhac, A. (1995). Cours de barrage. Lycée Pierre Caraminot.
- Cahen, L. (1948). *Géologie du Congo-Belge*. Vaillant-Carmanne.
- Cahen, L. (1978). La stratigraphie et la tectonique du super-groupe Ouest-Congolien dans la zone médiane et externe de l'orogénèse Ouest-Congolienne (Panafricaine) du Bas-Congo et dans les régions voisines. *Annales de la Société Géologique de Belgique*, 90–146.
- Cahen, L., & Lepersonne, J. (1966). Existence de trois orogénèses dans le Précambrien du Bas-Congo antérieures à la tillite du Bas-Congo antérieures à l'Ouest-Congolienne. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences*, 262.
- Cahen, L., Delhal, J., Ledent, D., & Reinharz, M. (1963). L'âge des migmatites de Boma et l'orogénèse Ouest-Congolienne : Indications préliminaires sur l'âge des formations Mayumbiennes et antérieures. *Annales de la Société Géologique de Belgique*, 86, 229–263.
- Cahen, L., Ledent, D., & Tack, L. (1976). Chronologie de l'orogénèse Ouest Congolienne (Panafricain) et comportement isotopique des roches d'alcalinité différente dans la zone interne de l'orogénèse au Bas-Congo. *Annales de la Société Géologique de Belgique*, 55.
- Carrene, A. (1991). Cours de techniques de l'ingénieur : Barrages. Bureau d'ingénieurs conseils Coyne et Bellier.
- Chen, S., & Zhao, J. (2010). Rock mass behavior and geomechanical assessment of the Three Gorges dam foundation. *Engineering Geology*, 114, 63–72.
- Comité Français des Barrages et Réservoirs & Coyne et Bellier. (2018). Le barrage de Malpasset : Enseignements géotechniques d'une rupture d'appui sur micaschistes (Rapport technique spécial). Commission Internationale des Grands Barrages.
- Commission Internationale des Grands Barrages. (2022). Grouting for dam foundations: Modern techniques and materials (Bulletin 179). CIGB-ICOLD.
- Couturier, B. (1985a). Géologie des barrages collinaires. *Bulletin de l'Association Internationale de Géologie de l'Ingénieur*, (31), 51–57.
- Couturier, B. (1985b). Les études géologiques dans les projets de barrages (Thèse de doctorat d'État). Université Grenoble I.
- Couturier, B., & G.T.C.F.G.B. (1982). La reconnaissance des sites de barrages : Difficultés rencontrées. Dans *Actes du 14e Congrès International des Grands Barrages* (p. 877–890). Commission Internationale des Grands Barrages.
- Deere, D. U. (1973). The foliation shear zone: An adverse engineering geologic feature. *Proceedings of the 14th Symposium on Rock Mechanics (ASCE)*, 241–248.
- Degoutte, G. (2002). *Petits barrages : Recommandations pour la conception, la réalisation et le suivi*. Éditions Cemagref / Comité Français des Grands Barrages.
- Delhal, J., & Ledent, D. (1976). Âge et évolution comparée des gneiss migmatitiques pré-Zadiniens des régions Boma et de Mpozo-Tombangadio (Bas-Zaïre). *Annales de la Société Géologique de Belgique*, 99, 165–187.

- EDF. (2011a). Étude de développement du site hydroélectrique d'Inga et des interconnexions électriques associées : Volume 1. Projections d'offre et de demande d'énergie électrique en RDC et dans les pools africains (Version provisoire). RSW International.
- EDF. (2011b). *Rapport de pré faisabilité (Volume 2) sur le projet Grand Inga*. RSWI/EDF.
- EDF. (2011c). Structuration du projet : Rapport d'orientation (Volume 5) (Version provisoire). AECOM RSWI/EDF.
- Giraud, A. (1986). Caractérisation géotechnique des massifs rocheux par étude structurale et essais in situ : Application aux sites de barrages (Thèse de doctorat d'État). Université de Grenoble I.
- Hossie, G. (1980). Contribution à l'étude structurale du Mayombe congolais (Thèse de 3e cycle). Université des Sciences et Techniques du Languedoc.
- Hossie, G., & Gaby, R. (1979). Unicité des formations et du métamorphisme d'âge panafricain dans la chaîne Ouest-Congolienne. Dans *Résumés du 10e Colloque de Géologie Africaine* (p. 50–51). Université de Montpellier.
- Kampunzu, A. B. (1985). Évolution géologique des chaînes Ubendiennes et Kibariennes avec référence spéciale au magmatisme. *13th Colloquium of African Geology - Centre International pour la Formation et les Échanges Géologiques*
- Kanika, M. (2012). Notes de cours de pétrologie métamorphique (Notes de cours inédites). Département des Géosciences, Université de Kinshasa.
- Lepersonne, J. (1969). La structure de l'anticlinal de Matadi et du synclinal de Palabala révélée par l'étude des photographies aériennes. *Musée Royal de l'Afrique Centrale - Archives de Géologie*, 26–29.
- Martinez-Martinez, V., & Eberhardt, E. (2024). Microstructural control on the geomechanical anisotropy of metamorphic rocks: From thin-section mineralogy to macro-scale failure. *Engineering Geology*, 312, Article 106940. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2023.106940>
- Müller, B. (2010). Geotechnical challenges in highly heterogeneous metamorphic foundations: The case of Les Toules Dam, Switzerland. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 69(3), 385–399. <https://doi.org/10.1007/s10064-010-0284-9>
- Ongendangenda, T., Mpiana, K., & Kampunzu, A. B. (1986). Caractérisation du volcanisme ouest-congolien à l'aide des clinopyroxènes : Cas des roches basiques de Sumbi au Bas-Congo. *UNESCO, Geology for Economic Development Newsletter*, 5, 153–162.
- Rogers, J. D. (1995). *A history of the St. Francis Dam disaster: Geological mechanics of a catastrophic foundation failure* (Special Publication No. 7). Association of Engineering Geologists.
- Roubault, M., Fabriès, J., & Weisbrod, A. (1963). *Détermination des minéraux des roches au microscope polarisant*. Lamarre-Poinat.
- Saim, S. [Suratman]. (1987). Engineering geology of the Batu Dam site, Kuala Lumpur, Malaysia: Foundation treatment on granitic and quartz-micaschist contacts. *Bulletin of the Geological Society of Malaysia*, 21, 149–165.
- Société Nationale d'Électricité, & Yon, B. (2015b). *Évaluation environnementale et sociale du projet Grand Inga*. AECOM RSWI/EDF.
- Société Nationale d'Électricité. (2015a). *Développement du complexe hydroélectrique de Grand Inga : Étude d'impact et perspectives de l'interconnexion régionale SAPP-PEAC* (Rapport technique interne). SNEL.
- Tack, L. (1983a). Extension du Mayumbien au Bas-Zaïre, le problème de sa délimitation cartographique et ses implications sur les concepts du cadre géologique général du Précambrien du Bas-Zaïre. *Musée Royal de l'Afrique Centrale - Archives de la Section de Géologie*, 100–132.
- Tack, L. (1983b). Le Massif du Mayumbe (Zaïre) dans le cadre de l'orogénèse ouest-congolienne : Données géologiques et structurales nouvelles. *Journal of African Earth Sciences*, 1(3-4), 243–250. [https://doi.org/10.1016/0899-5362\(83\)90011-2](https://doi.org/10.1016/0899-5362(83)90011-2)
- Tack, L., & Gaby, R. (1979). *Étude pétrographique du Mayumbien du Bas-Congo* (Annales du MRAC, n°84). Musée Royal de l'Afrique Centrale.
- Tali, J. M., & Mwamba, K. (2023). Renewable energy transitions in Sub-Saharan Africa: The geopolitics and engineering challenges of the Grand Inga scheme. *African Journal of Science, Technology, Innovation and Development*, 15(4), 412–428. <https://doi.org/10.1080/20421338.2023.2184567>

- Vellutini, P. J., Rocci, G., Vicart, J. P., & Gioan, P. (1983). Mise en évidence de complexes ophiolitiques dans la chaîne du Mayombe (Gabon, Congo, Zaïre, Angola). *Precambrian Research*, 36, 163–175.
- Zhang, L. (2022). Evaluation of rock masses for dam foundations: Geomechanical criteria and joint factor analysis. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 55(8), 4915–4932. <https://doi.org/10.1007/s00603-022-02910-y>
- Zhang, L., Einstein, H. H., & Dershowitz, W. (2001). Characterization of rock mass permeability and anisotropy in the Three Gorges reservoir area. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 38, 103–119.
- Zhou, Y., Sheng, Y., & Rutter, E. (2023). Quantitative microscopic characterization of crystalline rocks and its correlation with uniaxial compressive strength (UCS). *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 82(2), 74–91. <https://doi.org/10.1007/s10064-023-03100-w>