



---

## **VERIFICATION DE LA STABILITE DU BARRAGE ZONGO II ET DE SES ANCRAGES APRES SA PREMIERE MISE EN EAU**

NTEME Mpio Cicéron<sup>1</sup>, MANTEKO Matondo Emmanuel<sup>1</sup>, MUKE Dévoué<sup>1</sup>, MAKAYA Lutua Ange<sup>1</sup>, DINGADIA Wasam Bertin<sup>2</sup>, MABWA Kingoma Christian<sup>1</sup>, Okondo Nkoso Michel<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> Centre de Recherche Géologiques et Minières (CRGM), B.P. :898, Kinshasa I, Ministère de la Recherche Scientifique et Innovation Technologique, République Démocratique du Congo.

<sup>2</sup> Centre de Recherche Eaux et Environnement (CREE), Ministère de la Recherche Scientifique et Innovation Technologique, Kinshasa, République Démocratique du Congo.

**Abstract :** Any dam must be stable to function normally because a failure can have serious consequences on the environment. This is why the aim of this work is to evaluate the stability of the Zongo II dam and its anchors after its first impoundment. This evaluation is done according to the results of the auscultation and to achieve this, we had adopted the techniques for evaluating the stability of gravity dams, in particular the analytical calculation method. Geologically, there is an alternation of clay and sandstone layers affected by faults on its right bank, which is one of the anchoring areas of the dam followed by clay sand. These sandstones have a good resistance to wear (28 and 30) and a good resistance to simple compression (88.1 Mpa) so good bearing capacity but also very good building materials although they are good aquifers. According to the results of the auscultation obtained, the Zongo II dam is in good condition, which reflects a judicious choice of the site in relation to its location because at the current time when it is subjected to excessive stresses, the changes observed do not exceed 5 mm. With regard to the values of the SR rollover safety of 1.9 and slip of 8.17; The risk of ruptures is low and far from being envisaged, but auscultation must be regular. Factors contributing to this good geological and geotechnical stability include the anchoring of the foundation to a depth of 5 m and the minimization of underpressure through the sealing of faults with grout injections and waterproofing work (waterproofing walls) and drainage. Of course, to understand this stability, it is a question of comparing the initial auscultation values, as references, and those after the first impoundment that the dam is then subjected to stresses such as water pressure, underpressure, etc. The suggestions boil down to promoting and financing scientific research for the monitoring of the right bank, which has already been capricious since the construction and confederation of the gravity dam at this site.

**Keywords :** Inking, Auscultation, Lift.

**Résumé :** tout barrage doit être stable pour fonctionner normalement car une rupture peut avoir des graves conséquences sur l'environnement. C'est pourquoi le but de ce travail est d'évaluer la stabilité du barrage Zongo II et de ses ancrages après sa première mise en eau. Cette évaluation se fait en fonction des résultats d'auscultation et pour y arriver, nous avons adopté les techniques d'évaluation de la stabilité des barrages poids notamment la méthode de calcul analytique. Géologiquement, on a une alternance des couches argileuses et gréseuses affectées par des failles à sa rive droite qui est l'une des zones d'ancrages du barrage suivi de sable argileux. Ces grès ont une bonne résistance à l'usure (28 et 30) et une bonne résistance à la compression simple (88.1 Mpa) donc une bonne portance mais aussi de très bons matériaux de construction bien qu'ils soient des bons aquifères. En vertu des résultats d'auscultation obtenus, le barrage Zongo II est en bon état, ceci traduit un choix judicieux du site par rapport à son emplacement car au moment actuel qu'il est soumis aux contraintes excessives, les modifications observées ne dépassent pas 5 mm. Au regard des valeurs des sécurités au renversement  $S_R$  de 1,9 et au glissement de 8,17 ; les risques de ruptures sont faibles et loin d'être envisagées mais l'auscultation doit être régulière. Les facteurs favorisant cette bonne stabilité sur les plans géologique et géotechnique sont notamment l'ancrage de la fondation

à une profondeur de 5 m et la minimisation de la sous-pression par le colmatage de failles avec injections de coulis et les travaux d'étanchéité (voiles d'étanchéité) et le drainage. Certes, pour comprendre cette stabilité, il s'agit ici d'une comparaison des valeurs initiales d'auscultation, comme références et celles après la première mise en eau que le barrage est alors soumis aux contraintes telles que la poussée d'eau, la sous-pression etc. Les suggestions se résument à favoriser et financer la recherche scientifique pour le suivi de la rive droite déjà capricieuse depuis la construction et confédératrice du barrage de type poids à ce site.

**Mots clés :** Ancrage, Auscultation, Portance.

**Digital Object Identifier (DOI):** <https://doi.org/10.5281/zenodo.17687970>

---

## 1 Introduction

Vue les problèmes majeurs d'étanchéité et vieillissement des structures hydrauliques ou d'autres paramètres, les conséquences désastreuses que peuvent causer les ruptures des barrages dans l'environnement, où on note les pertes matérielles et en vies humaines, leurs aspects statiques intéressent les scientifiques pour la sécurité en général donc la nécessité d'auscultation régulièrement. C'est pourquoi, le choix du présent travail poursuit comme objectif de revoir les conditions de stabilité du barrage Zongo II et des roches environnantes tout en s'appuyant sur l'auscultation dans le souci de détecter et prévenir les risques de rupture, de renversement, de basculement et de glissement s'ils se présentent.

Les plus grandes motivations s'expliquent du fait que plus tôt une anomalie est détectée, moindres en sont les conséquences en termes de travaux ou de coût d'exploitation, ces informations associées à d'autres études pourront répondre aux attentes des responsables de la SNEL, car l'aspect sécurité du barrage prime avant toute considération.

En ce qui concerne le barrage Zongo II, avec sa longueur de la crête de 196 m, une hauteur maximale de 25 m, volume de 13 000 000 m<sup>3</sup> et un débit très important dont les roches présentent de discontinuités comme le cas de Malpasset et sont en contact d'une nappe phréatique ; les mêmes scénarios peuvent se produire ?

Face à toutes ces préoccupations, ces différents obstacles surtout ceux de l'accident du Malpasset en France et de Solai dernièrement au Kenya, suscitent des questions pertinentes ci-après auxquelles nous avons répondu dans ce travail :

- existe-t-il une stabilité au sein du bassin de retenue d'eau Zongo II et de ses zones d'ancrage, quels sont les comportements actuels de ce massif rocheux environnant le barrage Zongo II face aux pressions diverses, qu'elles soient interstitielles ou hydrostatiques après sa première mise en eau ?
  - comment la sous-pression est-elle gérée pour réduire les forces à la fondation du barrage Zongo II et au contact barrage-ancrages ?
  - y a-t-il des mécanismes de détections de comportement anormal du barrage et de ses fondations, de tous dégâts particuliers et des conditions exceptionnelles dans les environs ?
- Outre ces questions importantes, une étude sur le problème de soutènement des rives du barrage a été faite pour la protection de ces dernières et pour vérifier s'il y a évolution depuis l'accident survenu à la construction.

### 1 2. Zone d'étude

#### 2.1. Aspects géographiques du secteur d'étude

L'aménagement hydroélectrique de Zongo II se trouve dans la province du Kongo-central en République Démocratique du Congo entre 4° 46'16" de latitude du Sud et 14°52'40" de longitude Est

avec l'altitude de 200m à 500 m. Il est érigé dans le lit de la rivière Inkisi qui, avec sa forme en « V » à la proximité de la centrale hydroélectrique, des flancs abrupts avec la coulée d'eau torrentielle est un affluent du fleuve Congo. Il prend son origine au Nord de l'Angola tout en se convergeant au Sud de la R.D.C. Cette rivière étroite a comme altitude en amont qui se trouve entre 800 et 1200m et entre 300 et 800m d'altitude en aval. La surface du bassin versant en amont de cette centrale est d'environ 14 600Km<sup>2</sup> et le barrage Zongo II se sépare de celui de Zongo I à une distance de 1,4 Km en amont construit à des années soixante et à 1,9 Km par rapport à la cascade Zongo de cette même rivière Inkisi qui constitue un très bon cadre touristique renommé SELI SAFARI CHUTE. L'aval du barrage se trouve environ par rapport à l'embouchure entre le fleuve Congo et son affluent Inkisi.

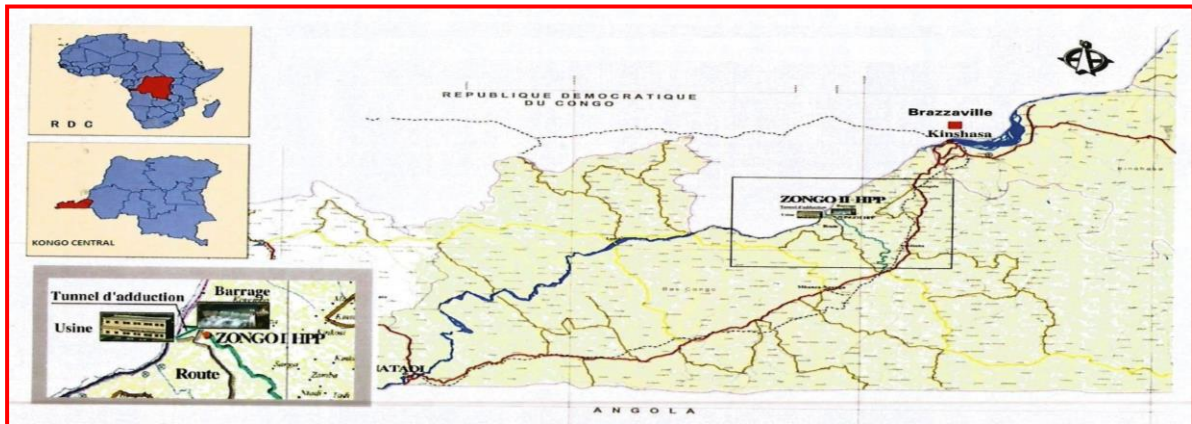


Fig. 01 : Situation géographique de la Centrale hydroélectrique Zongo II.

## 2.2. Aspects géologiques

La plupart des roches qui affleurent sur le site de Zongo sont des grès de couleur rose en grain moyen ou fin et les dépôts meubles ou communément appeler du grès Arkosique ou grès d'Inkisi. A certains endroits les roches sont dures, faiblement altérées et très fortement altérées au fur et à mesure qu'on s'éloigne de la profondeur vers la surface et certaines sont épaisses. Les couches de la zone sont paléozoïques, mésozoïques et cénozoïques. Parmi lesquelles, les couches paléozoïques sont apparues à l'ouest et au sud, y compris les roches d'Inkisi et de Mpioka (Fig. 02)

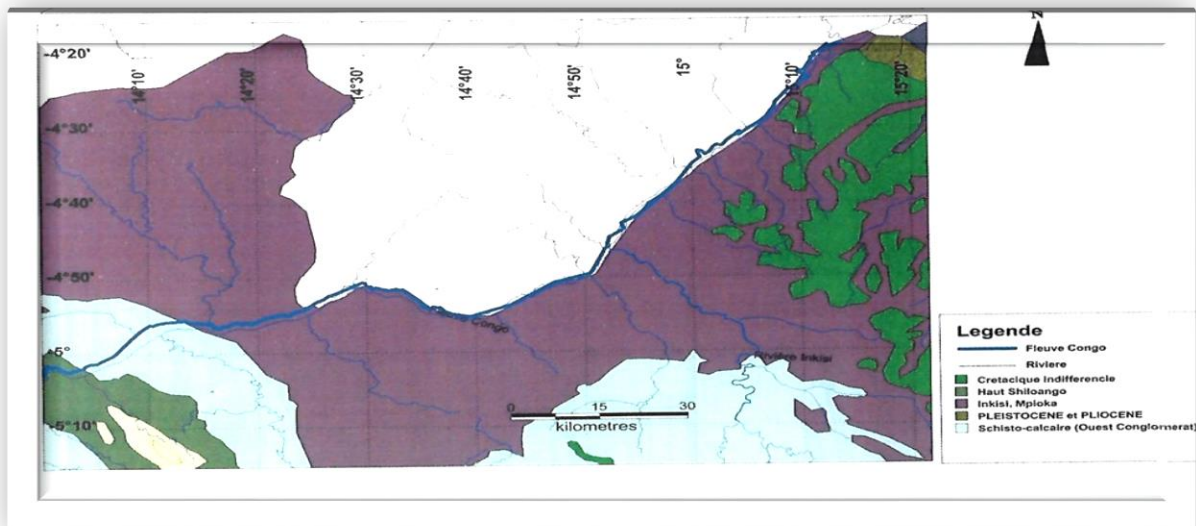


Fig. 02 : Carte géologique de Zongo et ses environs (KAMBALE et MWESHI, 2014).



### 2.3. Aspect pétrographique

Après un levé détaillé de l'aménagement hydroélectrique mais surtout dans la zone environnante du barrage Zongo II, une étude systématique de la zone d'ancrage de l'ouvrage et ses périphéries avec comme finalité l'examen de la morphologie et l'état des roches. Les échantillons prélevés ont été ramenés au laboratoire pour la confection des lames minces.

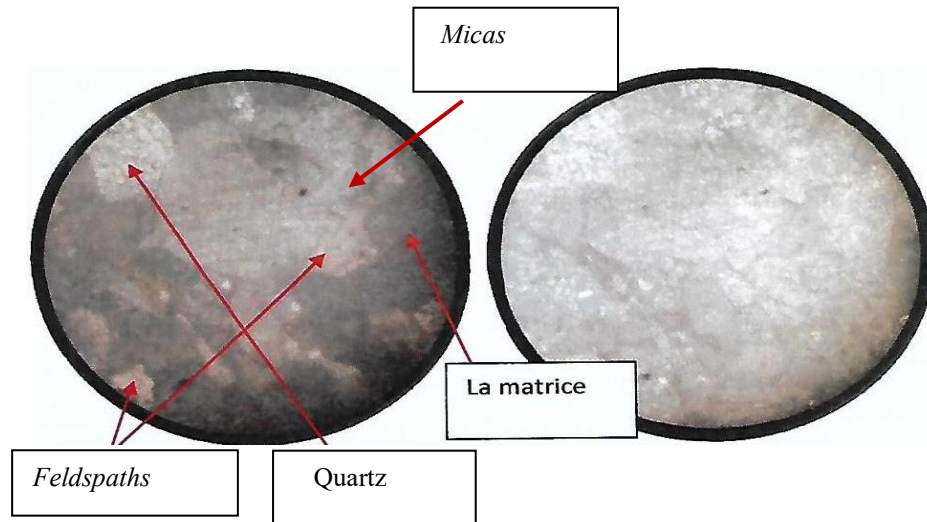


Fig. 03 : Lame mince en lumière polarisée et naturelle.

### 2.4. Aspects géotechniques

Tout projet de barrage commence par une étude géologique, géophysique et géotechnique qui est progressivement affinée au fur et à mesure que le projet se développe et que les choix se précisent sur le type et la hauteur du barrage. Ces études aboutissent à la détermination de la nature de différentes formations (meuble ou cohérente) présentes sur le site, leurs extensions géométriques, leurs propriétés mécaniques (perméabilité, déformabilité, résistance mécanique, altérabilité à l'eau) et la recherche de discontinuités (failles, fracture, diaclase, zone de dissolution ou karsts) (NZAU Mbudi, 2017). En ce qui concerne le cas de Zongo II, vu l'accident de la rive droite du barrage qui s'était produit au moment de la réalisation ; les géologues avaient proposé de réaliser des forages géotechniques dans le cadre de la reconnaissance du terrain pour la lithologie en profondeur dont ci-après la carte présente dans la figure 03 et les informations relatives dans le tableau 01.



Fig. 04 : La carte de forages exécutés au site du barrage Zongo II.

## 2.5. La résistance à la compression uni-axiale ou la compression simple

Voici Donc le résultat de l'essai à la compression simple effectué sur l'échantillon prélevé au niveau de la carrière ayant servi à la production de matériaux pour la construction du barrage de Zongo II.

Tableau 01 : Essai de compression simple.

ESSAI DE COMPRESSION SIMPLE SUR UN ECHANTILLON DE GRES D'INKISI	
Opérateur :	Laboratoire SINOHYDRO ZONGO II
Type d'Éprouvettes :	Cylindrique
Provenance de l'échantillon	Zongo
Éprouvette n°	1
Nature de la roche :	Grès feldspathique
Date de prélèvement :	07/07/2017
Date d'écrasement :	15/01/2018
Diamètre (Cm)	5
Hauteur (Cm)	10
Élancement	2
Surface comprimée (Cm <sup>2</sup> )	19.6
Poids (kg)	0,359
Densité	2,51
Charge de rupture (Kg)	1726,76
Contrainte de rupture (Kg /m <sup>2</sup> )	881
Contrainte de rupture (N/mm <sup>2</sup> )	88.1
Contrainte de rupture (Mpa)	88.1

Avec  $1\text{N/mm}^2 = 1\text{Mpa}$

Selon les résultats de cet essai sur l'échantillon de la roche prélevée au niveau de la carrière (pour la construction du barrage Zongo II), la résistance à la Compression uni axiale est de 88.1MPa, c'est donc une roche dure car sa résistance à la compression se trouve dans la fourchette de 40 à 110 MPa pour une roche dure (KELLER, 2000). En considérant la qualité de roche et l'exigence du barrage et vu que cette résistance à la compression est élevée dans le sens que cette valeur se trouve entre 60 et 200 MPa (wikigeotech consulté 10/03/2018). Nous pouvons déclarer que cet échantillon possède des très bonnes caractéristiques du point de vu résistance à la compression simple. Ce sont aussi donc de bon matériaux de construction.

## 2.7. Essai los Angeles

Le coefficient de Los Angeles qui est en rapport avec la fracturabilité d'une roche, est la manière dont celle-ci se comporte contre la fragmentation et l'usure. L'essai Los Angeles permet donc de mesurer la résistance combinée entre la fragmentation par chocs et l'usure par frottements réciproques des éléments d'un granulat. Nous avons effectué l'essai Los Angeles sur l'échantillon prélevé au LN et TP dont les résultats sont le suivant :

Tableau 02 : Résultat de l'essai Los Angeles.

Échant	Opérateur	Classe granulométrique (ASTM; AFNOR)	Nombre de boulets	Poids de la prise d'échant en g(P)	Nombre de tours	Refus au Tamis n° 12,5 en g(P)	p p'p	Coefficient Los Angeles (p/p) 100
N°1	LB. SINOHY DRO	B	11	5000	500	3570	1430	30

Étant donné que la valeur du coefficient de Los Angeles varie de 20 à 50% pour des bons matériaux et plus de 50% de coefficient pour les mauvais matériaux (HABIB, 1983), nous pouvons dire avec certitude que l'échantillon qui a servi comme matériaux de construction est un bon matériau.

## 2.8. CARACTERISTIQUES HYDROGEOLOGIQUES

Pour le mécanicien des roches, l'eau est en général une nuisance, dont il faut comprendre et minimiser ses effets. La perméabilité (ou conductivité hydraulique) caractérise l'aptitude du milieu solide à laisser circuler des fluides (liquide ou gaz) au sein de son espace poreux (LARIVE ; 2002). Les eaux souterraines contenues dans la zone d'étude se comportent de deux manières : l'eau interstitielle de la couche meuble et l'eau circulant dans les failles du Quaternaire, alimentée par les précipitations atmosphériques puis évacuée vers la vallée ; le débit n'est pas grand. Les eaux qui circulent dans les discontinuités des roches sont alimentées par les précipitations atmosphériques. Ces eaux sont également évacuées vers la vallée mais aussi vers la rivière Inkisi (SYNOHYDRO, 2014). En général, la perméabilité des roches dans cette zone varie de 0,04 à 2,8 Lu, donc ce sont les roches faiblement perméables. Les valeurs le plus élevées, nous ont conduits à conclure qu'il y a bel et bien présence des failles.

## 3. Méthodologie

### 3.1. Étape de terrain

Hormis les différents dispositifs d'auscultation, les matériels d'investigation géologique utilisés comprennent une boussole de géologue, marteau de géologue, une masse, GPS, des sachets, marqueurs, une machette, un carnet de terrain, un appareil photo numérique, des stylos, crayons, feutres, lattes, une carte géologique et plusieurs autres accessoires.

### 3.2. Étape de laboratoire :

Cette étape a consisté à :

- Confectionner et analyser les lames minces pour préciser la nature pétrographique des roches prélevées par la vérification ;
- Essais géotechniques pour la vérification de comportement géo mécanique ;
- Traitement statistique des données d'auscultation.

### 3.3. Travail documentaire :

La revue de la littérature a été adoptée sur :

- la géologie du site et conditions géotechniques de ce dernier ;
- les techniques d'évaluation de la stabilité des barrages poids notamment : le calcul analytique et principalement l'utilisation des logiciels Cadam ;
- les techniques d'auscultation.

Signalons la pertinence de microscope optique polarisant et plusieurs autres accessoires qui ont servi à analyser les lames minces tout en ajoutant l'apport des logiciels tels que Win-tensor, Arc Gis et l'ordinateur portable pour le traitement de ces données.

### 3.4. Interprétation

Les travaux de traitement et d'interprétation a conduit à :

- La vérification des conditions géologiques et géotechniques en utilisant les techniques traditionnelles de levé en phase d'exploitation, d'où l'absence des cartes. Le levé était constitué de la description in situ de différents lithofaciès, avec prélèvement des échantillons ;
- La prise de mesure sur la géométrie du barrage et de l'interface barrage-colonne d'eau ;
- La prise de mesure d'auscultation du barrage et de ses ancrages lors du contrôle mensuel sur la surveillance de sureté pour le mois de juillet 2017 comportant la récolte des données d'auscultation.

*Tableau 04 : Statistique du déplacement inclinométriques sur le talus de la rive gauche du mois d'avri d'AVRIL (altitude : m déplacement : mm).*

DS-IN1		DS-IN2		DS-IN3		DS-IN4		DS-IN5		DS-IN6		DS-IN7		DS-IN8	
Alt	Dép	Alt	Dép	Alt	Dép	Alt	Dép	Alt	Dép	Alt	Dép	Alt	Dép	Alt	Dép
388	0,0	378	0,0	365	-0,1	357	-0,1	388	-0,1	378	-0,1	365	0,0	357	0,0
390	0,0	380	0,2	367	-0,4	359	-0,1	390	0,0	380	-0,4	367	-0,1	359	-0,1
392	-0,1	382	0,1	369	-0,4	361	-0,1	392	0,1	382	-0,3	369	-0,1	361	-0,1
394	-0,1	384	0,1	371	-0,3	363	0,1	394	0,1	384	-0,1	371	-0,2	363	0,1
396	-0,1	386	0,2	373	-0,3	365	-0,1	396	0,1	386	0,0	373	-0,3	365	0,2
398	-0,1	388	0,2	375	-0,3	367	-0,1	398	0,0	388	0,0	375	-0,4	367	0,2
400	-0,1	390	-	377	-0,2	369	-0,3	400	-0,2	390	-	377	-0,5	369	-0,1
402	-0,5	392	-	379	-0,1	371	-	402	-0,1	392	-	379	-0,4	371	-



#### 4. Résultats

##### 4.1. Vérification de la stabilité du barrage zongo II et de ses ancrages après sa première mise en eau

###### 4.1.1. Sollicitations

###### 4.1.2. Forces et actions à considérer

Lorsque le barrage est rempli au niveau des plus hautes eaux (cas de dimensionnement), les principales forces à considérer sont : la poussée de l'eau ( $E_{am}$ ), le poids propre ( $P$ ), la poussée des terres ( $F_T$ ), la sous-pression ( $S$ ) illustrées dans la figure 05 (CARRERE, 1991).

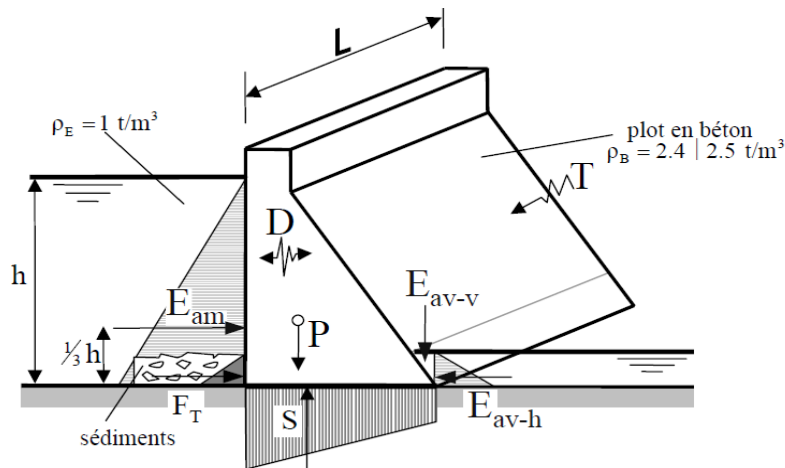


Fig. 05 : Forces et actions à considérer.

D'autres charges ont également un effet, soit sur la stabilité du barrage, soit sur l'état de contraintes internes :

$E_{av}$  : la poussée de l'eau à l'aval, selon les conditions de submersion du pied aval,

$D$  : les effets sismiques dynamiques,

$T$  : les effets thermiques.

D'autre part, ce système statique très simple implique des conditions précises à la fondation : la fondation doit être rocheuse, son module d'élasticité doit être élevé (peu déformable) et sa perméabilité faible (étanchéité).

###### 4.1.3. Sécurité au renversement

Le facteur de sécurité au renversement généralisé du profil autour du point aval de la fondation peut être calculé :

$$S_R = \frac{\sum_{stab}}{\sum_{Mobil}} = \frac{Mp}{ME + MS} = \frac{P \cdot \frac{2}{3}b}{E \cdot \frac{1}{3}h + S \cdot \frac{2}{3}b}$$

Avec  $b = m \cdot h$  et  $m = \sqrt{\frac{\rho \cdot E}{\rho \cdot B - K \rho E}}$ , on obtient  $S_R = \frac{2}{1 + K(\frac{\rho E}{\rho_B})}$

Lorsqu'on applique cette formule pour trouver le facteur de sécurité pour le renversement dans le cas de Zongo II, avec :

- $\lambda$  ou  $K$  : coefficient de sous-pression : 0,85 ;
- $\rho_E$  : masse spécifique de l'eau :  $10\text{KN}/\text{m}^3$  ;
- $\rho_B$  : masse spécifique du béton :  $250\text{KN}/\text{m}^3$  ;

$$m = \sqrt{\frac{10}{250 - 0,85(10)}} = 0,20$$

$$S_R = \frac{\frac{2}{1 + 0,85(\frac{10\text{KN}/\text{m}^3}{250\text{KN}/\text{m}^3)}}}{\frac{2}{1 + 0,85(0,04)}} = \frac{2}{1,034} = 1,9$$

#### 4.1.4. Sécurité au glissement

La sécurité au glissement est définie comme le rapport entre les forces résistantes et les forces poussantes :

$$S_G = \frac{\text{forces résistantes}}{\text{forces poussantes}} = \frac{R}{E}$$

Or la résistance au glissement sur une surface s'exprime par la relation de Coulomb issue de la mécanique des sols :

$$R = \sum V \tan \phi' + c' A$$

Où :  $V$  : est la résultante des forces perpendiculaires à la fondation,

$\phi$  : est l'angle de frottement interne effectif de la surface de glissement considérée,

$C$  est la cohésion effective sur la surface de glissement considérée.

$$\text{Il en résulte la relation : } S_G = \frac{(P-S) \tan \phi' + c' b}{E}$$

Or, avec  $A = m \cdot h$  et les relations décrivant les forces  $P$ ,  $E$  et  $S$ , on en déduit :

$$S_G = m \left[ (\rho_B - K \rho_E) \tan \phi' + \frac{2C'}{\rho_E g h} \right]$$

En appliquant la règle de Lévy pour évaluer la sécurité au glissement :

$$m = \sqrt{\frac{\rho \cdot E}{\rho \cdot B - K \rho E}}$$

$$\text{ce qui nous donne } S_G = m \left( \frac{\rho_B - K \rho_E}{\rho_E} \tan \phi' \right) S_G = \frac{1}{m} \tan \phi'$$

par conséquent, la sécurité au glissement est assurée si  $S_G \geq 1$ , ce qui implique que  $\tan \phi' \geq m$ .

La sécurité au glissement dans le cas de Zongo II, se résume par ce qui suit avec :  $\phi = 59^\circ$  où on a le grès, roche de bonne qualité ;

$$m = \sqrt{\frac{10}{250 - 0,85(10)}} = 0,2034892319$$

$$m = 0,2034892319 ;$$

$$S_G = \frac{1}{250 - 0,85(10)} \tan 59^\circ = \frac{1}{0,2034892319} * 1,6642427948$$

$$S_G = 8,1787$$

#### 4.1.5. Amélioration de la sécurité au glissement

Avec une roche de mauvaise qualité, ce facteur peut descendre jusqu'à 0.6, auquel cas la sécurité au glissement n'est pas assurée. Dans ce cas, des dispositions particulières doivent être apportées pour améliorer cette sécurité au glissement.

En observant la relation qui décrit le coefficient de sécurité au glissement,

$$S_G = \frac{(P-S)\tan\phi'}{E}$$

Ainsi, pour un glissement le long du plan de fondation, l'expression du coefficient de sécurité devient :

$$S_G = \frac{(P \cos\beta + S \sin\beta)\tan\phi'}{E \cos\beta - P \sin\beta}$$

En règle générale, la pente de la fondation ne dépasse pas 10%, de sorte que  $\sin\beta = \tan\beta$  et  $\cos\beta = 1$ . La relation devient alors :

$$S_G = \frac{(P + E \tan\beta - S)\tan\phi'}{E - P \tan\beta}$$

Le cas de Zongo II est celui de la faible réduction d'ordre millimétrique des forces poussantes E, il est bien entendu possible de réduire la poussée de l'eau sur le barrage en diminuant le niveau du plan d'eau (ce qui est le but). Et également un artifice permet d'obtenir un résultat comparable en inclinant légèrement vers l'amont la fondation du barrage car le barrage Zongo II est bien droit mais légèrement incliné.

Avec les valeurs admises pour  $K = 0.85$  et  $m = 0.20$ , on obtient un facteur de sécurité au renversement  $S_r = 1.9$  et celui de glissement  $S_G = 8.17$  ; sachant que la sécurité au glissement est assurée si  $S_G \geq 1$  (CARRERE, 1991). Par conséquent les risques de rupture du barrage Zongo II sont loin d'être envisagées sauf accidentellement autant plus que c'est un ouvrage humain et pas éternel, mais surtout les autres facteurs pouvant évoluer dans le temps notamment l'eau contenue dans ces formations gréseuses bien que maîtrisée à présent.

Ceci signifie que géologiquement, le terrain résiste aux contraintes et surtout les travaux de la stabilité du barrage et de ses ancrages étaient très bien faits :

- Le poids de l'ouvrage est grand par rapport à la poussée de l'eau, avec son épaisseur de la fondation encreée de 5m, une largeur variant selon la géologie du terrain rencontré ;
- la minimisation de la sous-pression par le colmatage de fissures avec injections de coulis et les travaux d'étanchéité (voiles d'étanchéité) au niveau du bassin de retenue et des ancrages.

#### 4.1.6. Auscultation du barrage zongo II et de ses zones d'ancrage

Connaissant le barrage Zongo II (Figure 06), du type poids, d'une hauteur maximale de 25m environs sur la fondation et une longueur au couronnement de la crête 196 m, séparé en sections, un volume au moins de 1300000 m<sup>3</sup>. Il est important de prévenir toutefois, les différents scénarios surtout toutes formes de rupture liées à des forces diverses qui peuvent se produire en moins de temps sans qu'elles soient révélées ou détectées lors de l'inspection visuelle qui peut toutefois éprouver des difficultés surtout si l'anomalie est de petite taille.



Fig. 06 : Le barrage Zongo II.

#### 4.1.7. Les dispositifs d'auscultation

Les informations liées aux appareils d'auscultation du barrage et de ses rives en général sont résumées dans le tableau ci-après :

Tableau 03 : Statistique de l'installation et l'évolution dans le temps des appareils de surveillance au barrage.

Position	Appareils	Unité	Quantité installée	Normal	Abimé	Taux de fonctionnement
Barrage	Indicateur de déplacement à plusieurs points	U	21	20	1	95%
	Jauge à tige	U	12	12	0	100%
	Fissuomètre	U	18	16	2	+90%
	Piézomètre	U	13	13	0	100%
	Point de mesure du déplacement horizontal	P	54	54	0	100%
	Repère du déplacement perpendiculaire	P	23	23	0	100%
	Inclinomètre	M	268	268	0	100%
	Fissuomètre en trois directions à plaque	U	4	4	0	100%

De tous ces dispositifs, les mesures d'auscultation accessibles sont essentiellement les mesures géodésiques, inclinométriques et les mesures de déplacements en trois directions (vainchons). Toutes les autres mesures sont transmises à l'aide des câbles qui permettent leurs enregistrements au niveau des logettes là où on les prélève pour analyser et prédire l'état de santé des ouvrages géotechniques. Le barrage est muni d'organe de vidange pour la décharge totale du réservoir. Signalons que la révision des mesures piézométriques, montre que l'évolution est grande avec la mise en eau de la retenue d'où la montée du niveau piézométrique (SINOHYDRO, 2017).

#### **4.2. Les mesures topographiques**

Ces mesures s'effectuent à travers les visées à un point de référence sur la crête du barrage ou à l'une des rives de ce dernier.

A Zongo II, les mesures topographiques sont assurées pour savoir :

- le déplacement horizontal du talus de la rive droite et de la crête du barrage ;
- le déplacement d'affaissement à la crête du barrage ;

#### **4.3. Les mesures inclinométriques**

Différemment de la rive droite, la rive gauche présentait et présente moins de danger pour ce barrage, suite à sa géologie à prédominance gréseuse moins fracturée et la stabilisation de cette dernière par un coulis et le drain de sous-pression ; d'où le nombre réduit de dispositifs d'auscultation en totalité 8 inclinomètres pour le suivi de déplacement vers le barrage.

Ces mesures inclinométriques sont prises à la rive gauche dans les inclinomètres placées dans les trous des forages de reconnaissances géotechniques suite à leurs accessibilités afin de détecter s'il y a déplacement des rives vers le barrage à la différence des inclinomètres placées à la rive droite où les déplacements enregistrés par les dispositifs enfouis avant (Février) et après la mise en eau (Avril) ne présentent pas un très grand changement. Le déplacement est au moins de 2 mm la moyenne. La détection de ce déplacement est connue lorsque les trous se trouvent inclinés sachant qu'ils sont verticaux. Les valeurs de déplacements inclinométriques avant et après la mise en eau et les coupes relatives à ces 8 inclinomètres de l'épaulement gauche sont résumées dans les tableaux ci-dessous.

#### **4.4. Les mesures de déplacement à plusieurs points**

Parmi les 16 fissuromètres installés au corps du barrage, 7 pièces servent à surveiller les ouvertures et les fermetures entre les sections du barrage, les valeurs de surveillance après la mise en eau présentent une tendance d'augmentation de l'ouverture entre les sections du barrage, actuellement la grandeur d'ouverture est petite, d'où la pertinence des activités d'auscultation.

Les mesures sont prises par un pied à coulisse vérifiant trois mouvements notamment celui de la poussée d'eau ; de la sous pression et de poids de l'ouvrage tandis que celui de poussée latérale est simplement vérifié par la grandeur de l'ouverture du joints entre sections. Les autres mouvements tendant à renverser, glisser ou basculer le barrage hormis ceux cités ci-haut sont difficiles à contrôler à cause d'inaccessibilité des dispositifs d'auscultation enfouis ou placés en profondeur dans la fondation. Ces mouvements seront contrôlés par les dispositifs qui transmettent à travers les câbles vers les appareils enregistreurs au niveau de logette (Figure 07) et à ce niveau, les mesures sont prises et analysées par les experts d'auscultation pour évaluer l'état de santé du barrage.





*Les cables*

*Fig. 07 : Les logettes et appareils enregistreurs des mouvements du barrage en profondeur.*

#### **4.5. Les mesures de déplacement à trois points**

Également comme les autres dispositifs inaccessibles, ces dispositifs sont dans le talus à la rive droite ou ancrage droit ; les mesures sont prises à travers les câbles vers les logettes dans la figure 35 que voici :



*Fig. 08 : Les logettes et appareils enregistreurs des mouvements à la rive droite.*

Les déplacements observés après la mise en eau comparativement à ceux observés avant comme référence ne présentent pas de grande différence.

Les statistiques des mouvements des déplacements à trois points à la rive droite sont résumées dans le tableau suivant :

Tableau 05 : Les valeurs cumulées des déplacements observés par les indicateurs de déplacements à plusieurs points avant, pendant et après la mise en eau à la rive droite point.

			ANNEE 2017						
			DS-M1 (400 m)	DS-M2 (382m)	DS-M3 (374 m)	DS-M4 (400 m)	DS-M5 (382 m)	DS-M6 (374 m)	DS-M7 (400 m)
DEPLACEMENTS (mm)	A V A N T M.E	JANVIER	0.3	0.09	0.06	0.27	3.36	0.46	0.23
		FEVRIER	0.51	0.2	0.24	0.74	4.39	1.03	0.93
	P E N D A N T	MARS	0.87	0.33	0.42	0.88	5.42	1.6	1.16
		AVRIL	1.22	0.46	0.6	0.91	5.52	1.62	1.4
	A P R E S L A M I S E E N E A U	MAI	1.54	0.58	0.65	0.93	5.62	1.65	1.64
		JUIN	1.75	0.7	0.68	0.93	5.8	1.73	1.93
		JUILLET	2	0.82	0.71	0.93	6	1.82	2.22

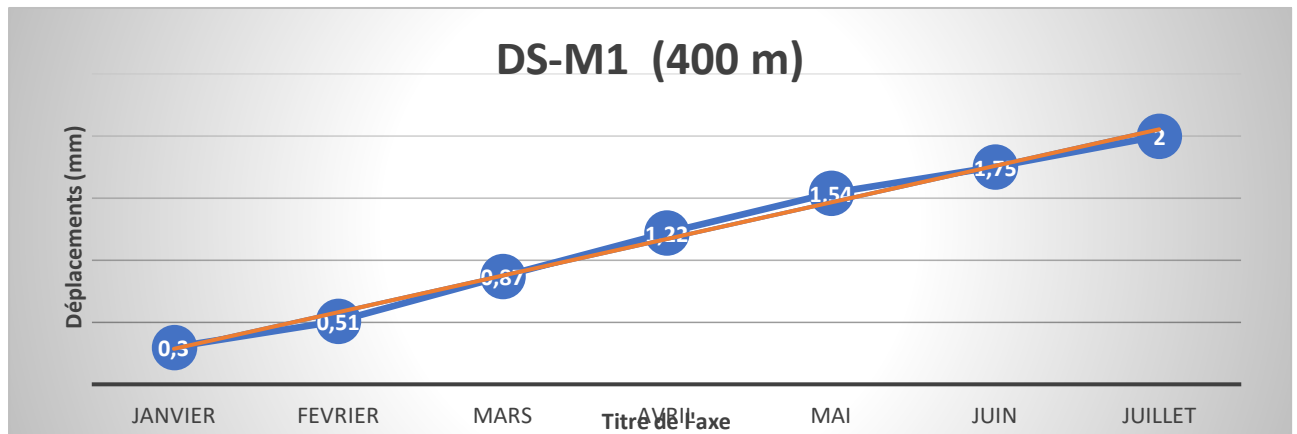


Fig. 09 : Les déplacements avant, pendant et après la mise en eau au point DS-M1 à la rive droite.

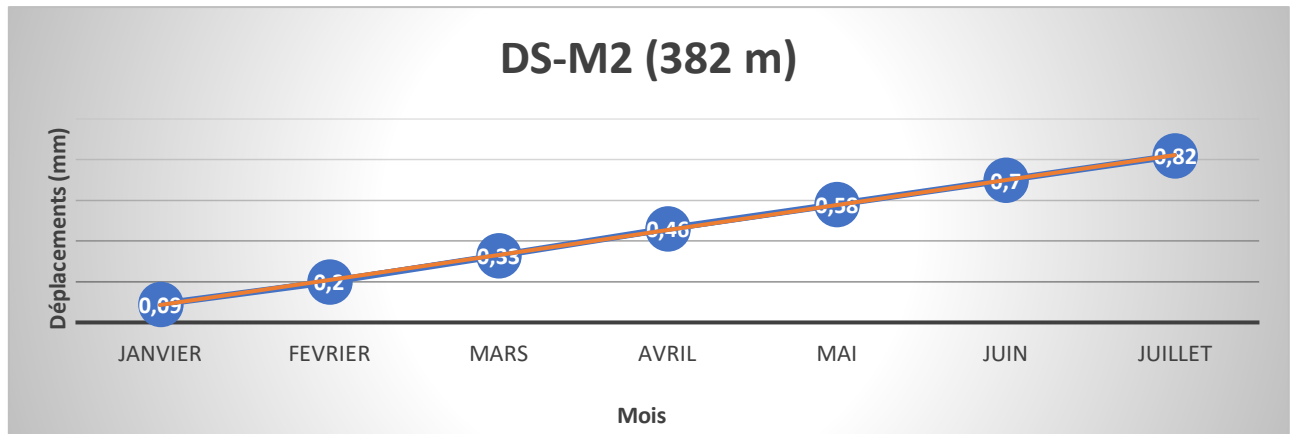


Fig. 10 : Les déplacements avant, pendant et après la mise en eau au point DS-M2 à la rive droite.

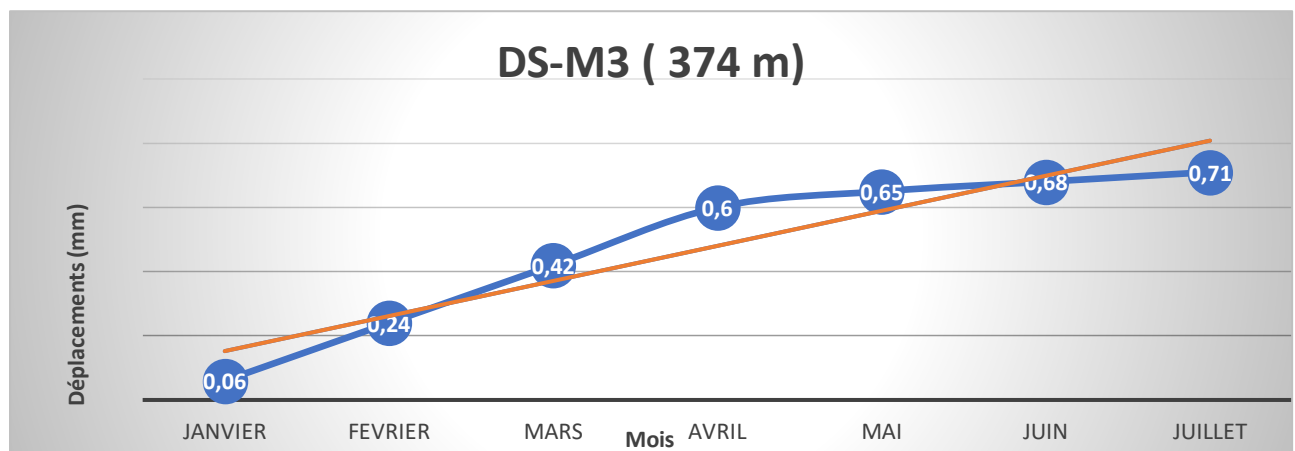


Fig.11 : Les déplacements avant, pendant et après la mise en eau au point DS-M3 à la rive droite.

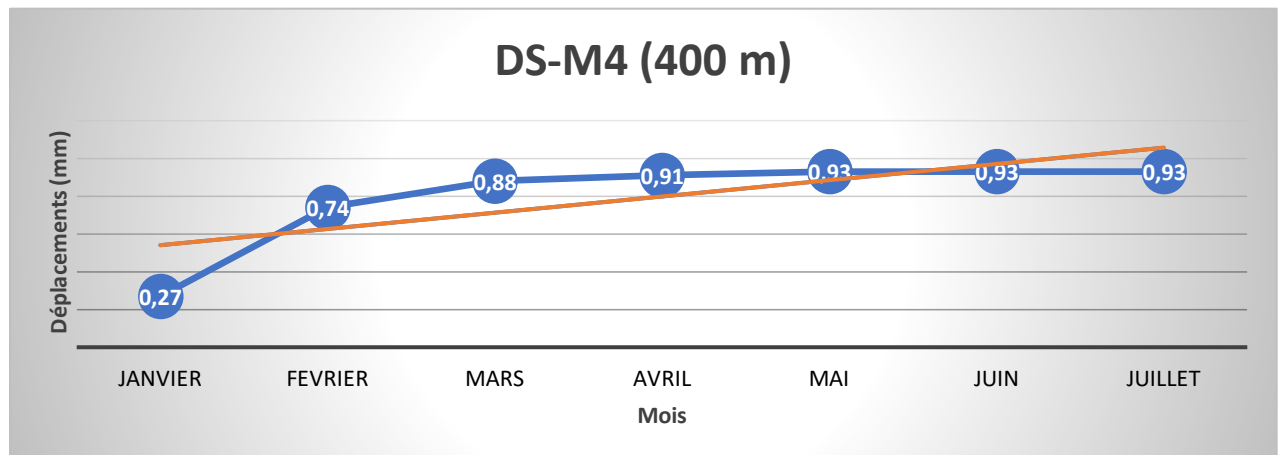


Fig. 12 : Les déplacements avant, pendant et après la mise en eau au point DS-M4 à la rive droite

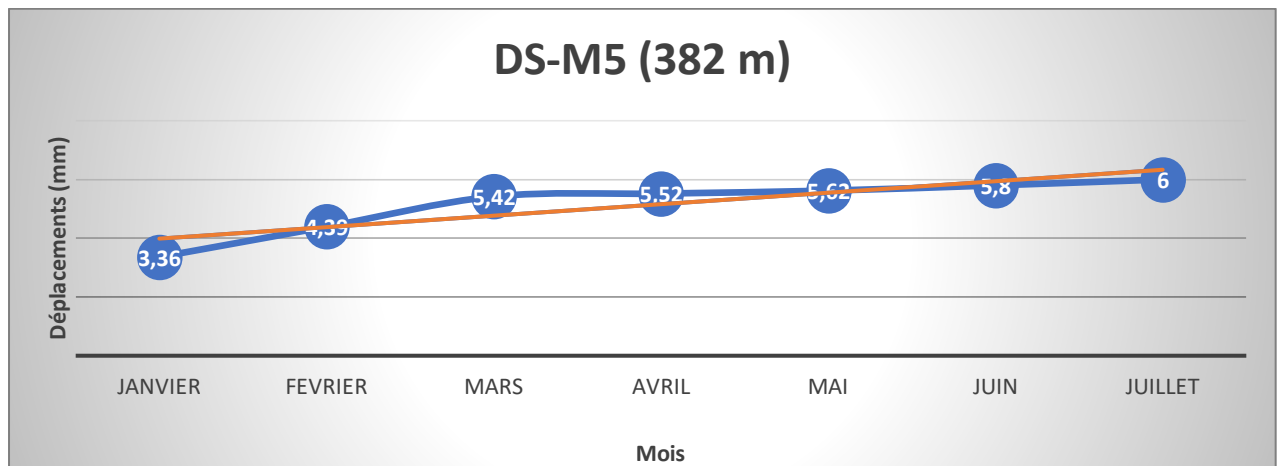


Fig. 13 : Les déplacements avant, pendant et après la mise en eau au point DS-M5 à la rive droite.

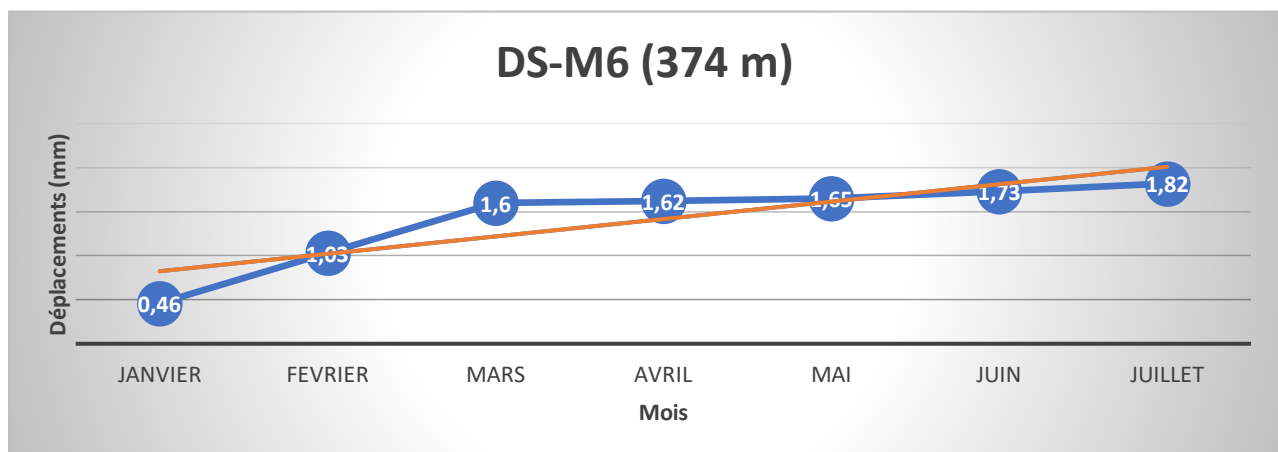


Fig. 14 : Les déplacements avant, pendant et après la mise en eau au point DS-M6 à la rive droite.

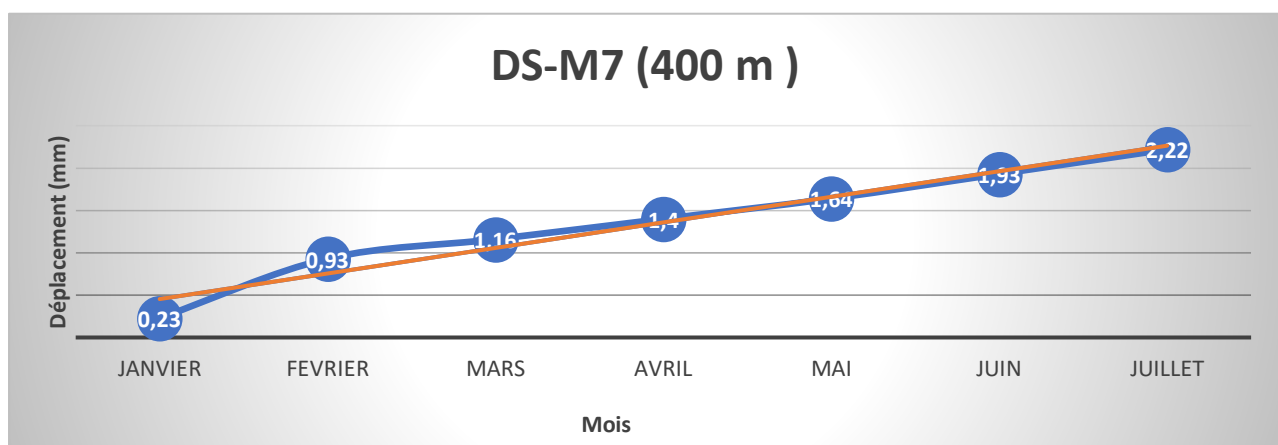


Fig. 15 : Les déplacements avant, pendant et après la mise en eau au point DS-M7 à la rive droite.

Toutes ces graphiques illustrent les déformations mesurées au niveau des vainchons. Lors de l'analyse de celles-ci, les leçons sont les suivantes :

- la rive droite ne se déplace pas totalement mais certaines zones sous l'influence de la mise en eau du barrage, suscitent une bonne observation et présentent de modifications bien que petite ;
- bien que l'endommagement de certains dispositifs d'auscultation, le maximum de déplacement est autour de 3 mm ;
- à la différence de la rive gauche, celle-ci est toujours spéciale car les autres types de dispositifs d'auscultation enregistrent aussi des déplacements.

## 5. Discussion

Tout projet de barrage commence par une étude géologique, géophysique et géotechnique qui est progressivement affinée au fur et à mesure que le projet se développe et que les choix se précisent sur le type et la hauteur du barrage. Ces études aboutissent à la détermination de la nature de différentes formations (meuble ou cohérente) présentes sur le site, leurs extensions géométriques, leurs propriétés mécaniques (perméabilité, déformabilité, résistance mécanique, altérabilité à l'eau) et la recherche de discontinuités (failles, fracture, diaclase, zone de dissolution ou karsts) (NZAU Mbudi, 2017).

De ce fait, une analyse a porté sur les observations de tous ces aspects géologiques, hydrogéologiques, et les comportements géotechniques sur l'ensemble du terrain et particulièrement au niveau du barrage et sur le déplacement de ses zones d'ancrage. Après un levé détaillé de l'aménagement hydroélectrique mais surtout dans la zone environnante du barrage Zongo II, une étude systématique de la zone d'ancrage de l'ouvrage et ses périphéries avec comme finalité l'examen de la morphologie et l'état des roches. Les échantillons prélevés ont été ramenés au laboratoire pour la confection des lames minces.

L'essai de compression uniaxiale ou de compression simple consiste donc à comprimer un échantillon de roche ou de béton, de forme normalisé, entre deux plateaux parallèles d'une presse rigide. Selon les résultats de cet essai sur l'échantillon de la roche prélevée au niveau de la carrière (pour la construction du barrage Zongo II), la résistance à la Compression uniaxiale est de 88.1 MPa, c'est donc une roche dure car sa résistance à la compression se trouve dans la fourchette de 40 à 110 MPa pour une roche dure (KELLER, 2000). En considérant la qualité de roche et l'exigence du barrage et vu que cette résistance à la compression est élevée dans le sens que cette valeur se trouve entre 60 et 200 MPa (wikigeotech consulté 10/03/2018). Nous pouvons déclarer que cet échantillon possède de très bonne caractéristique du point de vue résistance à la compression simple.

Ce sont aussi de bon matériaux de construction.

La résistance aux chocs et à l'usure dépend de la nature de grains et de celle du ciment. Elle est mesurée au laboratoire par l'essai Los Angeles. Étant donné que la valeur du coefficient de Los Angeles varie de 20 à 50% pour des bons matériaux et plus de 50% de coefficient pour les mauvais matériaux (HABIB, 1983), nous pouvons dire avec certitude que l'échantillon qui a servi comme matériaux de construction est un bon matériau.

Quant à la stabilité qui est la capacité d'un ouvrage à résister à des forces qui tendent à le renverser, glisser ou à la rupture Lors de la réalisation des barrages, il faut mentionner que quel que soit le type de barrage, les exigences relatives à la sécurité sont primordiales durant toute la vie de l'ouvrage. Le barrage doit être continuellement ausculté et soumis à une surveillance attentive (ROLAND, 2010).

Avec les valeurs admises pour  $K = 0.85$  et  $m = 0.20$ , on obtient un facteur de sécurité au renversement  $S_r = 1.9$  et celui au glissement  $S_G = 8,17$  ; sachant que la sécurité au glissement est assurée si  $S_G \geq 1$  (CARRERE, 1991). Par conséquent les risques de rupture du barrage Zongo II sont loin d'être envisagées sauf accidentellement étant donné que c'est un ouvrage humain et pas éternel, mais surtout les autres facteurs pouvant évolués dans le temps notamment l'eau contenue dans ces



formations gréseuses bien que maîtrisée à présent. Ceci signifie que géologiquement, le terrain résiste aux contraintes et surtout les travaux de la stabilité du barrage et de ses ancrages étaient très bien faits.

La sécurité d'un barrage en exploitation repose essentiellement sur sa surveillance permanente. L'interprétation des mesures d'auscultation doit être effectuée en concertation avec le projecteur de l'ouvrage qui sera mieux à même de déterminer la gravité des anomalies éventuellement constatées (dans plusieurs pays le projecteur est obligatoirement impliqué dans cette opération). Afin de s'assurer de sa viabilité dans le futur, une analyse sur les résultats obtenus de l'auscultation du barrage Zongo II et de ses zones d'ancrage a été faite pour évaluer sa stabilité après sa première mise en eau ; ceci est un examen sur l'état de santé de ce dernier.

En matière de la surveillance sécuritaire, l'aménagement hydroélectrique Zongo II peut être le premier en R.D.C. parce qu'il est bien surveillé et compte au total plus de 700 appareils d'auscultation installés et en fonctionnement depuis sa construction jusqu'à nos jours ; repartis en trois dont 413 sont installés dans le barrage ; 258 dans la galerie et 62 dans l'usine. Les trous d'inclinomètre sont de 418 m de profondeur et équipés à eux seuls à 418 appareils dont les inclinomètres et le taux d'installation des appareils atteint 100 %, parmi lesquels 98 % fonctionnent normalement.

## 6. Conclusion et recommandations

Au terme de cette étude qui est une contribution au stade de l'exploitation de l'ouvrage pour sa survie, la finalité est de présenter les aspects géologiques, géotechniques ainsi que comprendre les comportements de ces roches qui supportent et constituent les matériaux de construction pour l'ouvrage à travers l'auscultation afin d'estimer l'état de santé du barrage pendant qu'il est soumis aux contraintes de la première mise en eau. Ici, nous cherchions l'impact négatif que peut avoir la géologie lorsqu'il y a rupture d'un barrage dans le souci de la prévenir si le risque se présente.

A cet effet, les informations recueillies renseignent que la géologie du site est constituée de formations gréseuses à différents faciès, surtout faillées débitant en plaquette et compactes en alternance avec les shales mais en surface on remarque un dépôt sablo-argileux.

Le barrage Zongo II a encore tous ces dispositifs d'auscultation par rapport aux autres barrages de la région de Zongo notamment N'sanga et Zongo I (SNEL, 2017), nous remarquons qu'après sa première mise en eau, celui-ci bouge mais le risque de rupture est loin d'être envisagée car les fissuromètres installés à son sein ne montrent pas de grand déplacement (ne dépassant pas 5 mm). Par contre, les valeurs de chute d'eau de certains piézomètres changent selon le niveau d'eau de la retenue en comparaison de celles avant la mise en eau tandis que d'autres valeurs ne présentent pas un grand changement. Les jauges à armature installées aux vannes de chasse de la crue, les valeurs relevées après la mise en eau montrent un très petit changement de charge.

En vertu des résultats d'auscultation obtenus après analyse générale des données, le barrage Zongo II est en bon état, ceci traduit un choix judicieux du site par rapport à son emplacement car au moment actuel qu'il est soumis aux contraintes excessives, les modifications observées ne dépassent pas 5 mm.

Mentionnons que les facteurs favorisant cette bonne stabilité du barrage Zongo II géologiquement et géotechniquement sont :

- la résistance du poids de l'ouvrage aux contraintes qui est grande par rapport à la poussée de l'eau avec son épaisseur de la fondation encrée de 5 m, une largeur variant selon la géologie du terrain ;

- la minimisation de la sous-pression par le colmatage des failles avec injections de coulis et les travaux d'étanchéité (voiles d'étanchéité) ainsi que le drainage du bassin de retenue et de ses ancrages.

Au niveau des ancrages à la rive droite, déjà problématique depuis la construction du barrage, celle-ci mérite encore une surveillance importante ; c'est pourquoi le nombre important des dispositifs d'auscultation notamment les indicateurs de déplacement en trois direction et les inclinomètres. Après la mise en eau du barrage, les déplacements observés à partir des indicateurs de déplacement à trois points (DS-M1 à DS-M7) sont généralement faible d'ordre millimétrique avec une valeur maximale autour de 3,5 mm.

Pour les quatre ensembles d'inclinomètres installés sur le talus de cette rive, pendant la mise en eau, le changement observé était de l'ordre de 2,00 mm, presque le même après la mise en eau. A la rive gauche depuis le début des travaux de construction du barrage, la rive gauche présente moins de danger que celle de droite ; c'est pourquoi elle n'a que 8 séries d'inclinomètres afin de surveiller son déplacement latéral vers le barrage. Suivant la même logique, le déplacement maximal observé après la mise en eau du bassin de retenue n'est que d'un millimètre (1 mm).

**Compte tenu de ce qui précède, nous recommandons :**

1. De mettre à jour les dispositifs d'auscultation car tôt une anomalie est observée moins en serait les conséquences ;
2. Une étude géologique approfondie pour l'évolution de la rive droite déjà interpellatrice pendant la construction ;
3. De faciliter la communication avec les scientifiques congolais en apprenant la langue officielle de la R.D.C et d'utiliser la même nomenclature des dispositifs d'auscultation ;
4. Changer les dispositifs abimés notamment les indicateurs de placements en trois directions notés DS-M à la rive droite ;
5. Suivre l'évolution du niveau piézométrique car à partir de la mise en eau, il y a une augmentation comparativement aux valeurs observées avant cette dernière surtout que la zone du barrage présente les roches faillées même si ces discontinuités ont été colmater par les injections des coulis et de voiles d'étanchéité ;
6. Une étude de mécanique des structures détaillée du barrage poids de Zongo, en utilisant le logiciel pour stabilité des barrages poids CADAM de l'école polytechnique de Montréal.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- 1) CAHEN L., DELHAL, LEDENT, D. et REINHARRZ, M. (1963) ; L'âge des migmatites de Boma et l'orogénèse Ouest-Congolienne, Indications préliminaires sur l'âge des formations Muyumbiennes et antérieures. Ann. Soc. Géol. Belg. T. LXXXXVI, pp. 229-263 ;
- 2) CARRERE, A (1991) : Barrages, publication de la commission internationale des grands barrages ;
- 3) CIBAMBULA CIA MWAU. (2016) : Le Sous-groupe de la Mpioka : Une molasse de la chaîne Panafricaine West Congo dans le Kongo Central(R.D.Congo). Thèse, Unikin, Sciences ;
- 4) CSB (2005) Dispositif d'auscultation des barrages, concept, fiabilité, redondance ;
- 5) DUFFAUT (2010) : Morphographie de la rupture du barrage de Malpasset ;
- 6) HABIB, P. (1983) : Mécanique appliquée au génie civil, Ed. Eyrolles, Paris ;
- 7) [http://. Wikigéotech](http://.Wikigéotech) consulté le 02/03/2018 ;
- 8) ICM (Infra-Consult-Munchen GMBH) Contrôle et auscultation des barrages, programme de formation option B ;
- 9) KAMBALE et MWESHI (2014), Conditions géologiques et géotechniques des sites hydroélectriques ZONGO I et ZONGO II, Mémoire, géologie, fac. des Sciences, Unikin ;
- 10) KANIKA M.T. (2015) : Cours de géologie structurale, G3 géol / Unikin, Inédit.
- 11) KELLER E.A. (2000) Environmental geology. Prentice Hall;
- 12) LARIVE E. (2002) Etude expérimentale des roches à très faible perméabilité par la mise en œuvre d'un perméamètre de précision. Thèse de doctorat. 191p ;
- 13) NZAU MBUDI C. (2017) Cours des structures hydrauliques L2 Géotechnique et hydrogéologique, Géosc, Sciences, Unikin, Inédit ;
- 14) OFEG (2002), Sécurités des ouvrages d'accumulation, documentation de base relative à la surveillance et entretien, version 1.1 ;
- 15) ROLAND V. (2010) Auscultation d'ouvrages hydrauliques, études des normes pour la sécurité des ouvrages hydrauliques et création d'un programme interne de suivi, INSA-Strasbourg, STYCKY France ;
- 16) SINOHYDRO CORPORATION (2014), Rapport de l'analyse de stabilité du tunnel d'adduction. Version révisée ;
- 17) SINOHYDRO CORPORATION (2017), Rapport mensuel sur la surveillance de sûreté ;
- 18) Société Nationale d'Électricité(SNEL) (2017), Présentation du projet Zongo II.