

Analyse de stabilité d'un batardeau en remblai d'enrochements et d'argile pendant la période de construction et en cas d'événement sismique

Charles ABESSOLO ELOUMA¹, Patrick EYOGHE NNANG²

1. Ecole Normale Supérieure, Département des Sciences de la Vie et de la Terre, Laboratoire des Sciences de la Vie et de la Terre (LaSciViT), BP 17009, Libreville, Gabon.

abessoloc@yahoo.fr

2. Sinohydro, BP 2248, Libreville, Gabon.

redaction@paralia.fr

Résumé :

L'étude porte sur l'analyse de l'infiltration et de la stabilité de la pente du batardeau en remblai d'enrochements et d'argile pendant les phases de construction et d'achèvement, et en cas d'évènement sismique. Elle s'inscrit dans le cadre du projet d'aménagement hydroélectrique Kinguéle aval. Il s'agit de la construction d'un barrage de basse chute qui fournira annuellement au Gabon, 200 gigas watts heure d'énergie électrique renouvelable. Cette contribution vise à connaître le comportement du batardeau pendant ces phases critiques. A partir de l'analyse des données obtenues des deux anciens barrages (Tchimbélé et Kinguéle) construits en amont, et des résultats des essais géotechniques sur les matériaux de remblai, la stabilité de la pente du batardeau de terre-pierre est calculée par la méthode Bishop. Les résultats montrent une élévation de la crête à +27.00 m et celle de l'inondation à +25.36 m. Les facteurs de sécurité de stabilité à l'extérieur (amont) pendant les périodes de construction, d'achèvement et d'infiltration sont de 1,408 ; 1,398 et 1,412 c'est-à-dire supérieurs à la valeur limite de la spécification (1,30). A l'intérieur (aval), ils ont des valeurs encore plus grandes, égales à 3,469 ; 2,398 et 3,292. Le prédimensionnement des enrochements basé sur une application de la formule d'Isbach conduit à des tailles de 0,50 m pour la minimale et 1,5 m pour la maximale avec des masses respectives égales à 160 kilogrammes et 4415 kilogrammes.

Mots-clés : Batardeau, Pente, Stabilité, Barrage, Kinguéle aval, Remblai.

Abstract:

The study focuses on the analysis of the infiltration and slope stability of the cofferdam in riprap and clay backfill during the construction and completion phases, and in the event of a seismic event. It is part of the Kinguéle downstream hydroelectric development project. This involves the construction of a low-head dam that will provide Gabon with 200 gigawatt hours of renewable electricity annually. This contribution aims to understand the behavior of the cofferdam during these critical phases. Based on the

Thème 4 – Ouvrages portuaires, offshore et de plaisance

analysis of the data obtained from the two old dams (Thimble and Kingué) built upstream, and the results of the geotechnical tests on the backfill materials, the stability of the slope of the earth-stone cofferdam is calculated by the Bishop method. The results show a ridge elevation at +27.00 m and a flood elevation at +25.36 m. The safety factors of outdoor (upstream) stability during the construction, completion, and infiltration periods are 1.408; 1.398 and 1.412, i.e. above the limit value of the specification (1.30). Inside (downstream), they have even larger values, equal to 3.469; 2.398 and 3.292. The pre-design of riprap based on an application of the Isbach formula leads to sizes of 0.50 m for the minimum and 1.5 m for the maximum with respective masses equal to 160 kilograms and 4415 kilograms.

Keywords: Cofferdam, Slope, Stability, Dam, Kingué downstream, Embankment.

1. Introduction

Pour être en phase avec les politiques de réduction des gaz à effet de serre qui prônent entre autres la production des énergies renouvelables (GAFFURI & HOYER, 2021) ; et dans un souci de répondre à la forte demande énergétique pour son industrialisation, le gouvernement gabonais à travers le fond d'investissement stratégique a initié avec le groupe français Méréidiam, le projet de construction d'un barrage hydroélectrique sur les dernières chutes de la rivière Mbei, en aval des centrales existantes de Kingué et de Tchimbélé. Ce projet dénommé « Kingué Aval » produira annuellement 200 GWh d'énergie électrique renouvelable. Il s'effectue dans le département du Komo Kango, à 90 kilomètres de Libreville, capitale de la république gabonaise. La durée du projet est de trois ans et demi. Lors de la réalisation du batardeau en remblai d'enrochements et d'argile de ce projet, il a été demandé d'analyser l'infiltration et la stabilité de la pente pendant les périodes critiques c'est-à-dire durant la phase de construction et en cas d'événement sismique. La complexité des problèmes d'infiltrations et de stabilité des pentes des ouvrages maritimes tels que les batardeaux et digues fait que, de nos jours, l'analyse à l'aide de modèles numériques a pris le pas sur des approches purement théoriques (BOCOVE, 1991 ; BOUAFIA, 2011 ; AGRESTI *et al.*, 2018). Aussi, l'examen du comportement des modèles du génie géotechnique tels que GeoStudio permet de mieux comprendre et surtout d'appréhender les subtilités non perceptibles par des approches purement théoriques (CFBR, 2015 ; NERINCX *et al.*, 2018).

L'intérêt de ce travail est d'étudier à l'aide de modèles mathématiques, les infiltrations et la stabilité d'ensemble du batardeau en remblai d'enrochements et d'argile du barrage hydroélectrique Kingué Aval pendant les phases de construction et d'achèvement, et en cas d'événement sismique. Pour l'étude, la stabilité de la pente du batardeau de terre-pierre est calculée par la méthode Bishop en s'appuyant sur les données obtenues des deux anciens barrages Kingué et Tchimbélé construits respectivement à 10 et 50 kilomètres en amont, et sur les résultats des essais géotechniques réalisés sur les

matériaux de remblai. Le prédimensionnement des enrochements est basé sur une application de la formule d'Isbach.

2. Matériel et méthodes

2.1 Base de calculs

La base de calcul comprend l'ensemble des documents liés au projet, les données hydrologiques, géologiques et géotechniques, les paramètres de matériaux et les critères de conception de la sécurité de la pente.

2.1.1 Codes et références

- (1) Analyse et contrôle des infiltrations pour les barrages, EM1110-2-1901.
- (2) Stabilité de la pente, EM 1110-2-1902.
- (3) Gabon Hydroélectrique de Kinguéle Aval Document d'Appel d'Offres - Exigences du Maître d'Ouvrage.
- (4) Dessins de conception et rapport géologique.
- (5) Critères de conception hydraulique du corps des ingénieurs.
- (6) Recommandations pour la justification de la stabilité des pentes de barrages et de digues en remblai (CFBR, 2015).

2.1.2 Données hydrologiques

La rivière où se construit la centrale hydroélectrique de Kinguéle Aval appartient au climat équatorial c'est-à-dire chaud et humide. La température moyenne annuelle varie entre 21°C et 30 ° C (ASECNA, 2015). Les saisons de pluies et de sécheresses alternent annuellement entre grandes et petites. Le Bulletin 108 de la CIGB « *Maitrise des crues pendant la construction du barrage* » apporte des éléments pour le dimensionnement de la capacité des ouvrages de dérivation provisoire. La phase « à risque » de la dérivation provisoire, jusqu'à ce que la cote du barrage dépasse la crête du batardeau durera moins d'un an selon les prévisions du planning des travaux. Il semble a priori raisonnable de dimensionner la capacité des ouvrages de dérivation provisoire pour une crue de temps de retour 10 ans. La détermination de la crue de retour après 10 ans se base sur les conclusions de l'étude hydrologique réalisée en phase A du projet.

On décompose la Q10 sur le BV de Kinguéle aval comme la somme des Q10 de BV en amont (BV de Tchimbélé + BVI entre Tchimbélé et Kinguéle + BVI entre Kinguéle et Kinguéle Aval). Soit : $Q10_{BV \text{ Kinguéle aval}} = Q10_{BV \text{ Tchimbélé}} + Q10_{BVI \text{ Kinguéle/Tchimbélé}} + Q10_{BVI \text{ Kinguéle aval/Kinguéle}}$. Avec BV bassin versant et BVI bassin versant intérieur. On évalue les 3 composantes de l'équation. Estimation du volume de la crue décennale à Tchimbélé : Débit moyen journalier de temps de retour 10 ans = 175 m³/s (issue du rapport hydrologie). L'hydrogramme fictif a une durée d'environ 2 à 3 jours, soit un volume d'eau pendant la crue, égal : $V = 175 \text{ m}^3/\text{s} * 3 \text{ j} * 24 \text{ h} * 3600$

Thème 4 – Ouvrages portuaires, offshore et de plaisance

s = 45 hm³ arrondi à 50 hm³. 50 hm³ correspond à une estimation conservatrice du volume de la crue décennale à Tchimbélé. La courbe de la Figure 1 ci-dessous (hauteur volume de la retenue de Tchimbélé) montre que ce volume peut être stockée dans les 2,5 m de tranche supérieure du réservoir (entre les cotes RN.531.00NGG et 528.50NGG).

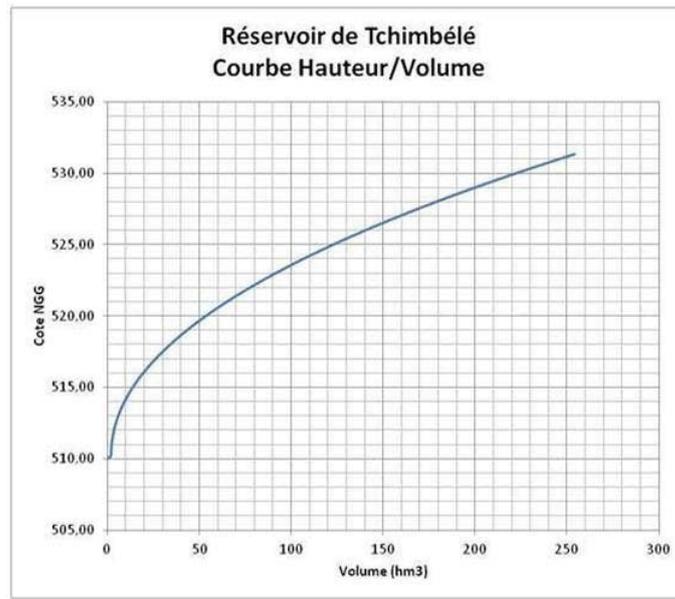


Figure 1. Courbe hauteur volume d'eau du réservoir du barrage Tchimbélé.

On constate que l'évacuateur de crue du barrage de Tchimbélé n'a jamais déversé depuis la mise en service de l'aménagement (soit plus de 40 ans). Cela s'explique par le fait que la Société d'Énergie et d'Eau du Gabon optimise la gestion du réservoir de Tchimbélé pour limiter les déversements par l'EVC (perte de production). De fait, le niveau de la retenue est bas en début de saison humide (soutient d'étiage pendant la saison plus sèche) permettant ainsi d'absorber intégralement le volume des crues pour reconstituer le stock du réservoir sans déversement sur l'EVC. On fait donc l'hypothèse que pendant la durée du chantier de Kinguéle aval, il n'y aura pas de déversement sur l'EVC de Tchimbélé. Le débit sortant de Tchimbélé est donc réduit au débit moyen turbiné à l'usine, soit 40 m³/s. On a donc, Q10 BV Tchimbélé = 40 m³/s. D'après les données d'hydrologie obtenues des exploitants du barrage Tchimbélé, on a : Q10 BVI Kinguéle/Tchimbélé = 133 m³/s ; Q10 BVI Kinguéle aval/Kinguéle = 25 m³/s. D'où Q10 BV Kinguéle aval = 40 + 133 + 25 = 198 m³/s qu'on arrondit à 200 m³/s.

2.1.3 Géologie et conditions géotechniques

Le batardeau en remblai d'enrochements et d'argile est principalement disposé dans le lit de la rivière, avec un terrain plat et un ravin non développé. Les rives aux deux extrémités du batardeau présentent un gradient topographique d'environ 10° à 15°. La fondation le

long du batardeau est principalement constituée de gneiss granitique recouvert par de mort-terrain de nature argileuse à certains endroits. L'épaisseur de la couche très altérée de gneiss granitique est de 2 à 3 mètres et la partie intérieure est modérément altérée. La couche altérée du lit de la rivière peut être utilisée comme fondation du batardeau de terre-pierre, et la zone fracturée avec une perméabilité localement élevée doit être traitée contre les infiltrations. Sur les pentes des rives aux deux extrémités du batardeau, le sol cultivé en surface doit être enlevé, et après un roulement et un nivellement, appropriés, l'argile limoneuse inférieure peut être utilisée comme fondation du batardeau de terre-pierre.

2.1.4 Conception du batardeau

Le batardeau faisant l'objet de l'étude est construit sur la rive droite de la rivière Mbei. Il a une longueur totale de 421 m et une largeur de 5,6 m. Les élévations de crête sont de 27,00 m en amont et de 23,50 m en aval. La structure adoptée est du type terre-pierre. Un coussin arrière de 0,4 m est placé entre la protection de la pente et l'argile (Figure 2). Le matériau de remblayage est un sol résiduel prélevé près du site du barrage. Les sols résiduels sont de classe A3 suivant la classification NF P 11 300. Le coefficient de perméabilité est inférieur à 1×10^{-4} cm/s après compactage. La densité sèche et la teneur en humidité du matériau de remplissage sont déterminées selon l'essai de roulement effectué sur le terrain

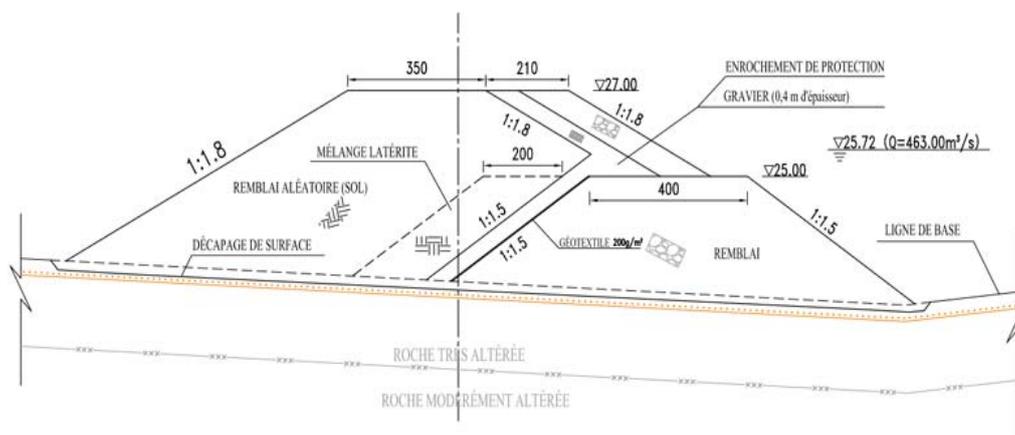


Figure 2. Section transversale typique du batardeau construit à Kinguélé aval.

Les différents enrochements utilisés sont de nature granito gneissique de densité sèche supérieure $2,05 \text{ g/cm}^3$ et le coefficient de perméabilité contrôlé à $A \times 10^{-1} \text{ cm/s}$.

2.1.5 Paramètres des matériaux

Selon le rapport géologique du projet, les valeurs des paramètres des matériaux dans le modèle de calcul sont indiquées dans le Tableau 1 ci-dessous.

Thème 4 – Ouvrages portuaires, offshore et de plaisance

Tableau 1. Paramètres physiques des matériaux dans le modèle.

Élément	État	Poids unitaire (kN/m ³)	Cohésion c' (kPa)	Friction Interne ϕ' (°)	Perméabilité K (cm/sec)	Volume requis (m ³)
Enrochement	Déversé	19.0	0	36	1.0	2,336
Gravier	Compacté	21.0	0	35	0.5	1,731
Sol résiduel	Nature	18.0	22.48	32.06	10 ⁻⁴	/
Roche très altérée	Nature	23.0	160	26	10 ⁻⁴	/
Roche modérément altérée	Nature	28.0	450	36	5×10 ⁻⁵	/
Remplissage aléatoire (sol résiduel ou roche complètement altérée)	Compacté	20.2	18.47	29.28	10 ⁻⁴	16,950
Remplissage aléatoire (sol résiduel ou roche complètement altérée)	Non drainé	20.2	Su=100	0	10 ⁻⁵	/
Remplissage aléatoire (sol résiduel ou roche complètement altérée)	Uncompacté	20.3	15	23	5×10 ⁻⁴	/

2.1.6 Critères de conception de sécurité de la pente

Les batardeaux sont généralement des structures temporaires, mais peuvent également être incorporés dans la section transversale finale d'un barrage en terre.

Pour les structures temporaires, les calculs de stabilité ne doivent être effectués que lorsque les conséquences d'une défaillance sont graves (RIGO & T LIZIN, 2007 ; TERRASOL-SETEC, 1990). Sur la base de ce code, les facteurs de sécurité minimums requis pour le batardeau sont présentés sur le Tableau 2.

Tableau 2. Exigences minimales relatives au facteur de sécurité de la pente.

Conditions de travail	Facteur de sécurité
Période de construction	1.3
Période d'infiltration stable	1.3
Période d'infiltration stable + CE	1.1

2.2 Processus de calcul

2.2.1 Principe et conditions de calcul

La stabilité de la pente du batardeau de terre-pierre est calculée par la méthode Bishop. L'infiltration et la stabilité de la pente du batardeau sont examinées respectivement, la condition de calcul choisie est que le niveau d'eau en avant du caisson est de 26,00 m ASL. La hauteur de chute du côté de la rivière est inférieure à 2,0 mètres, donc la condition de rabattement rapide ne sera pas considérée. Dans ce calcul, 4 conditions de travail sont considérées pour contrôler la stabilité anti-glissement : la période de construction (compris l'achèvement), période d'achèvement (condition non drainée), la période d'infiltration stable et le fonctionnement pendant le tremblement de terre. Les détails de chaque condition de travail mentionnés précédemment sont présentés dans le

Tableau 3. La méthode quasi-statique est utilisée pour simuler les conditions de tremblement de terre. L'accélération horizontale de la gravité est de 0,08g, ce qui représente une fréquence de 10 % en 50 ans. Des charges de trafic de 10 kPa sont considérées pour les conditions de fonctionnement.

Tableau 3. Conditions de travail utilisées pour l'étude.

Conditions de travail	Niveau d'eau extérieur (m)	Niveau d'eau intérieur (m)	Charges de trafic (kPa)	PGA(g)
Période de construction (y compris l'achèvement)	23.50	/	/	/
Période d'achèvement (condition non drainée)	23.50	/	/	/
Période d'infiltration stable	25.72	/	10	/
Période d'infiltration stable + CE	19.86	/	10	0.08

2.2.2 Modèles géométriques

La section transversale du batardeau sélectionnée est calculée dans le rapport avec le principe de sélection de la position maximale (voir Tableau 4).

Tableau 4. Caractéristiques de la section transversale calculée.

Sections	Section Transversale du Batardeau	Élévation de la crête	Niveau d'inondation
Section transversale typique	Phase I batardeau	27.00	25.36

Le modèle de calcul du batardeau longitudinal de Kingulé Aval est montré sur la Figure 2.

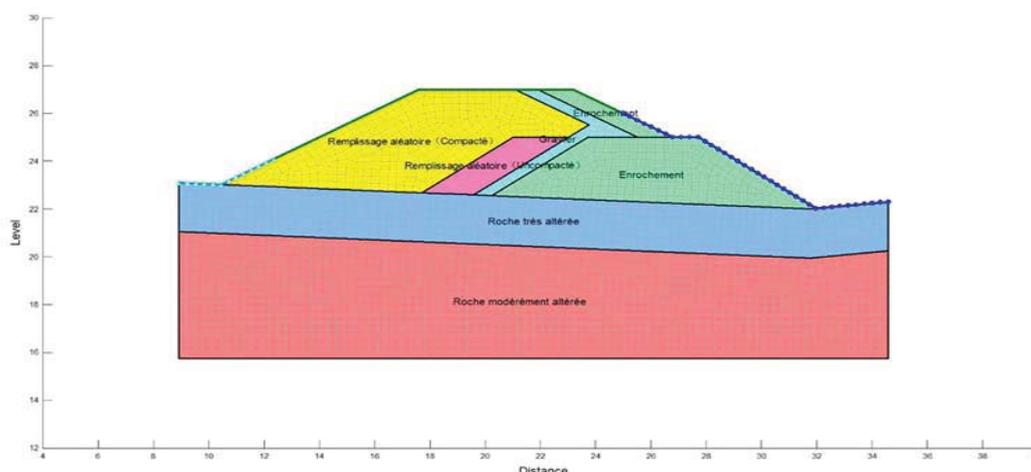


Figure 2. Modèles par éléments finis du batardeau.

Thème 4 – Ouvrages portuaires, offshore et de plaisance

Les Tableaux 5 et 6 indiquent respectivement les données d'entrée du calcul de la page les conditions aux limites.

Tableau 5. Données d'entrée du calcul de la page.

Name	Material model	Saturated Kx (cm/s)	Ky' /Kx	Hydraulic Conductivity Fn	Vol. Water Content Fn
	SEEP				
Remplissage aléatoire (SOL)	Saturated/Unsaturated	10^{-5}	0.5		
Gravier	Saturated/Unsaturated	0.5	1		
Rockfill	Saturated/Unsaturated	1	1		
Roche très altérée (G0f)	Saturated Only	10^{-4}	1		
Roche légèrement altérée (G0r)	Saturated Only	5×10^{-5}	1		
Remblai aléatoire	Saturated/Unsaturated	1	1		

Tableau 6. Conditions aux limites de l'étude.

Name	Type	Upstream Function	Downstream Function
Période de construction	H	H = 23,5 m	Q= 0 m ³ /s
Période d'infiltration stable	H	H = 25,72 m	Q= 0 m ³ /s

3. Résultats

3.1 Résultats du calcul de l'infiltration

Le Tableau 7 résume les résultats du calcul d'infiltration pour le corps du batardeau à la crue de 10 ans.

Tableau 7. Résultats de calcul d'infiltration.

Élément	Phase I batardeau longitudinal
Infiltration à largeur simple (m ³ /d.m)	0.056
Gradient hydraulique du corps imperméable	0.56
Gradient de sortie de la pente de remplissage aléatoire	0.46
Élévation de sortie de la pente de remplissage aléatoire (m)	24.09

La situation d'infiltration du batardeau longitudinal est illustrée à la Figure 3 suivante. La longueur du batardeau de la phase 1 est d'environ 421,51 m, le débit total d'infiltration est d'environ 23,60 m³/j, ce qui est très limité. Une pompe simple commune à eau peut facilement drainer le flux d'infiltration, par conséquent le flux d'infiltration peut être accepté. La plus grande vitesse d'écoulement d'infiltration est de $4,55 \times 10^{-7}$ m/s, ce qui se produit à l'interface du remplissage aléatoire et des alluvions.

Thème 4 – Ouvrages portuaires, offshore et de plaisance

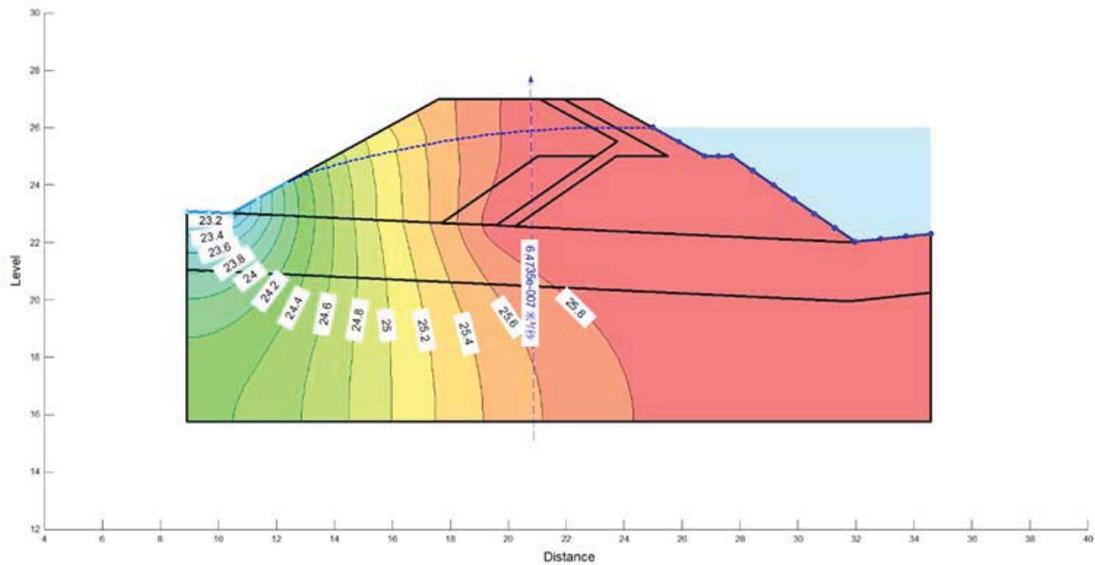


Figure 3. Résultats d'infiltration du batardeau à la crue 10 ans.

Les résultats de la Figure 4 ci-dessous montrent que le gradient hydraulique de sortie de la pente à l'intérieur est d'environ 0,46. Celui-ci se produit à la sortie de la surface phréatique sur une élévation d'environ égale à 24,09 m.

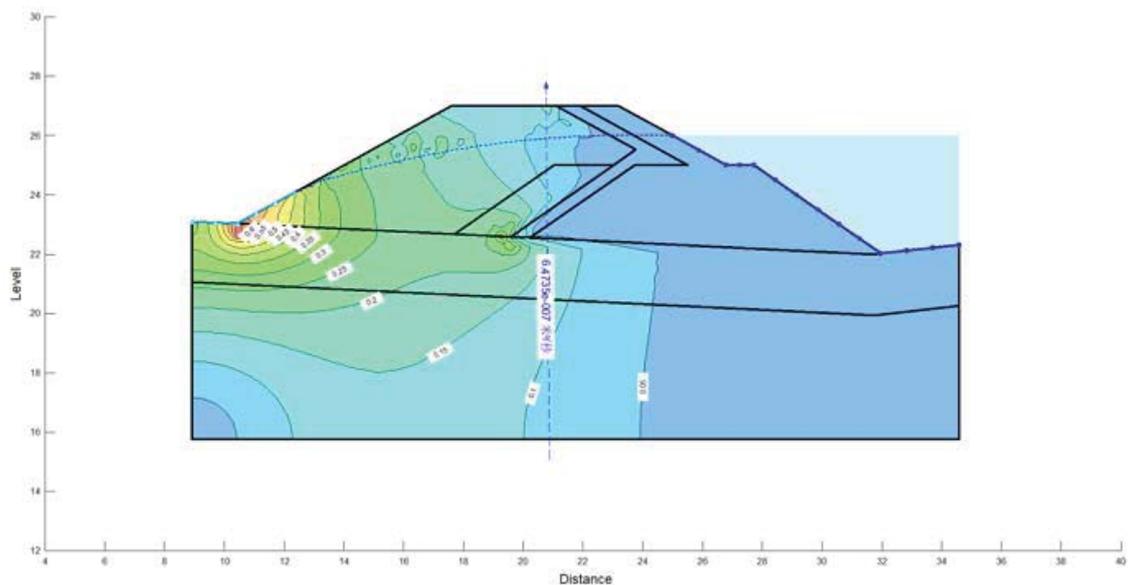


Figure 4. Gradient hydraulique à la crue 10 ans.

De même, le gradient hydraulique du corps de remplissage aléatoire est d'environ 0,56. Compte tenu de la faible hauteur du batardeau et les résultats d'infiltration, l'ouvrage n'aura pas de défaillance d'introduction d'eau.

3.2 Résultats du calcul de la stabilité de la pente

La méthode Bishop est utilisée pour le calcul de la stabilité. Les résultats sont indiqués sur le Tableau 8 ci-dessous.

Tableau 8. Résumé des calculs de la stabilité.

Section transversale calculée	Facteur de Sécurité de Stabilité		Exigence de la Spécification
	Extérieur (amont)	Intérieur (aval)	
Période de construction	1.408	3.469	≥ 1.3
Période d'achèvement (non drainé)	1.398	2.398	≥ 1.3
Période d'infiltration stable	1.412	3.292	≥ 1.3
Période d'infiltration stable + CE	1.153	2.510	≥ 1.1

Les résultats calculés par la méthode Bishop pour la pente du batardeau sont illustrés sur les Figures 5, 6, 7 et 8 suivantes.

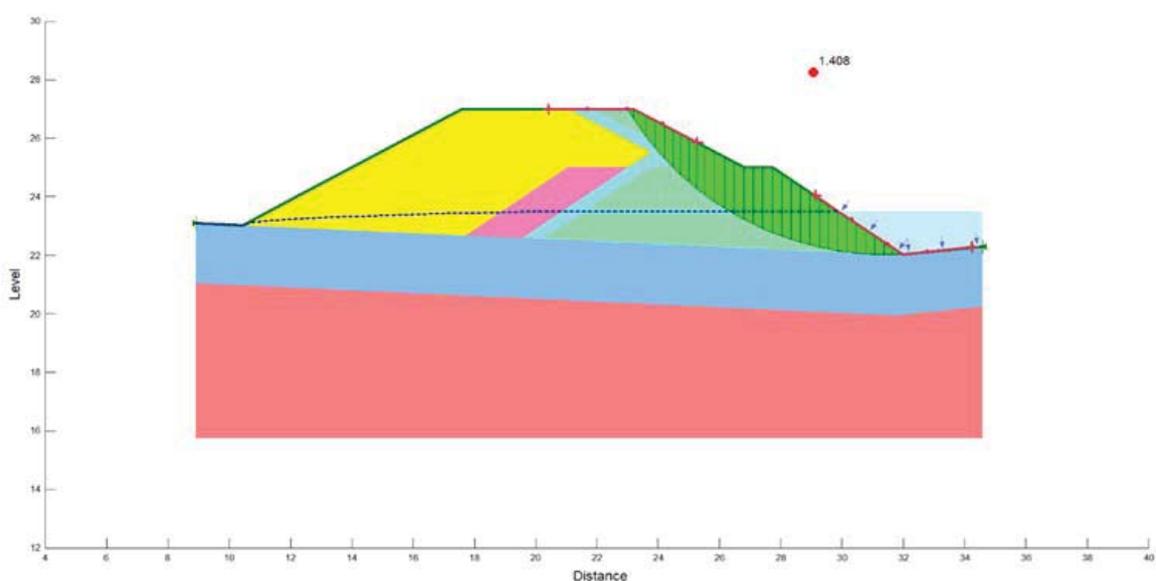


Figure 5. Mode de glissement de la pente extérieure du batardeau lors de la phase de construction.

Thème 4 – Ouvrages portuaires, offshore et de plaisance

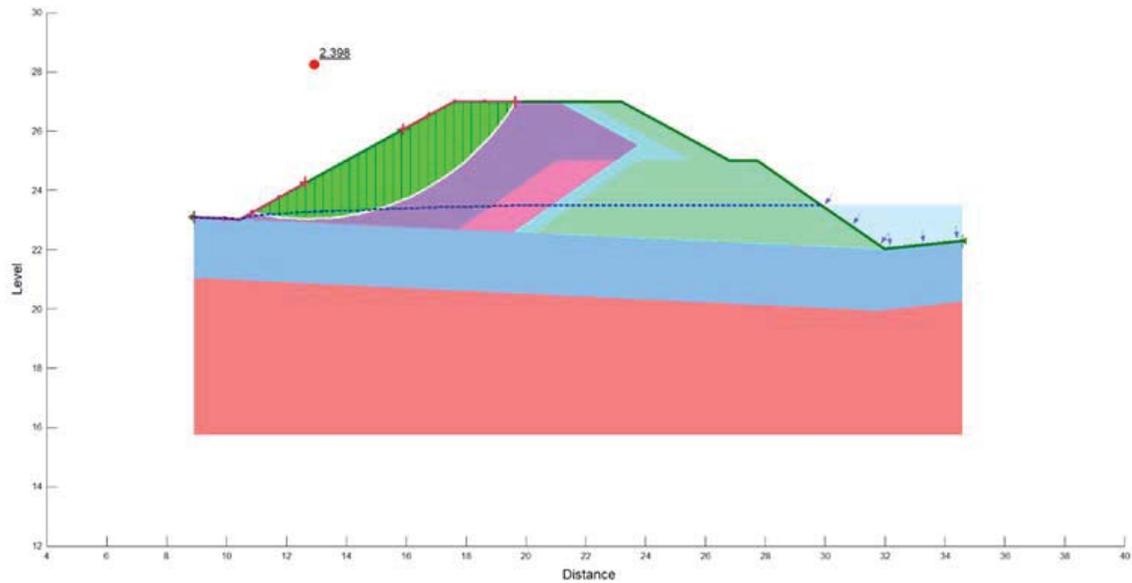


Figure 6. Mode de glissement de la pente intérieure du batardeau en période d'achèvement.

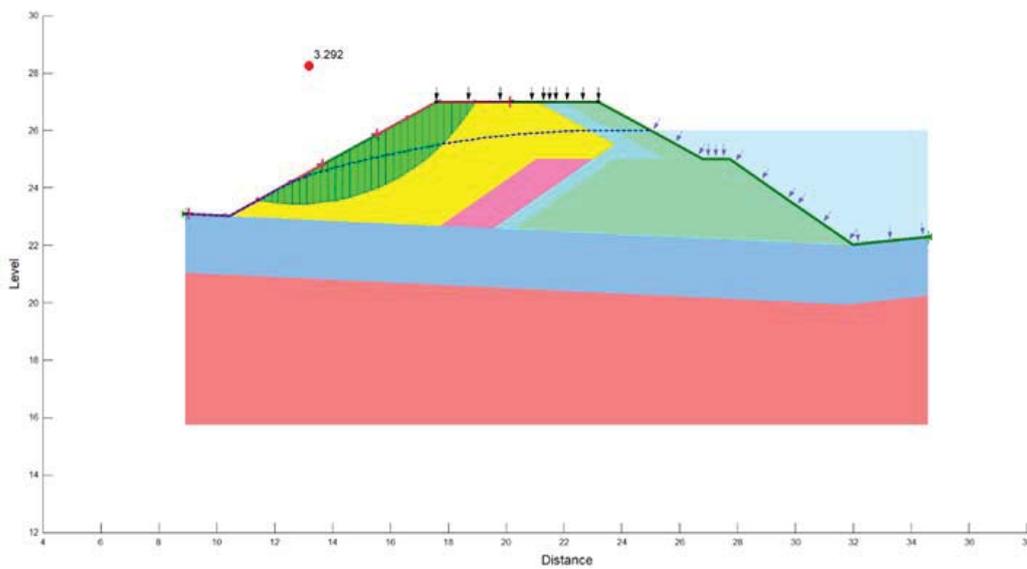


Figure 7. Mode de glissement de la pente intérieure du batardeau lors d'infiltration stable.

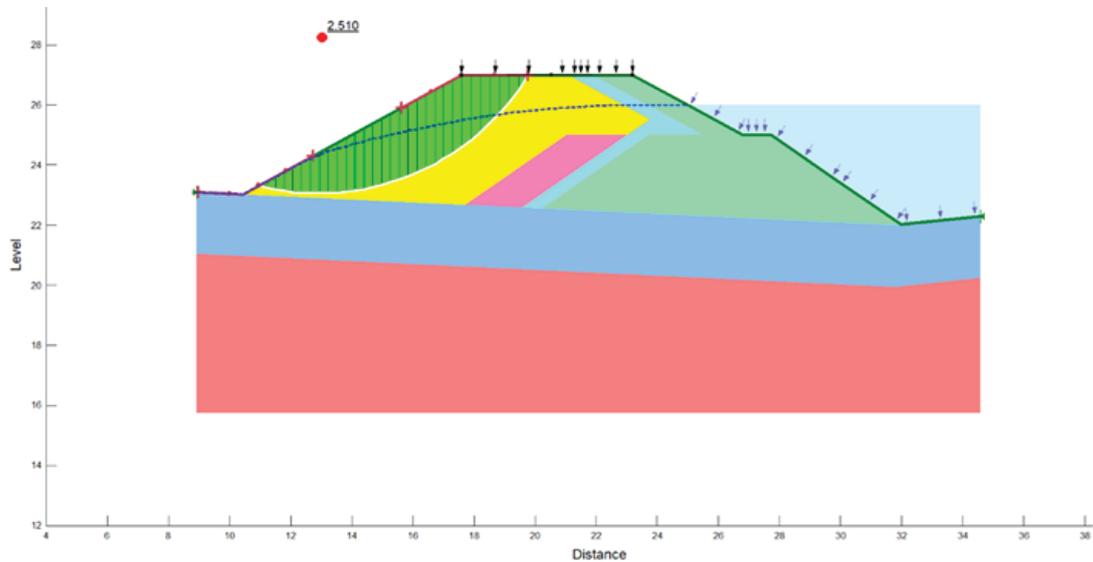


Figure 8. Mode de glissement de la pente intérieure du batardeau (état sismique).

3.3 Tenue des blocs aux forces d'arrachement

Le batardeau obstrue partiellement la RD du lit de la rivière Mbei. Les écoulements se concentrent donc sur la largeur résiduelle en RG provoquant ainsi une mise en vitesse de l'écoulement. Les calculs hydrauliques montrent que la vitesse maximale de l'écoulement dans la section réduite est de 4,93 m/s. Les vitesses dans la plupart des zones sont inférieures à 4 m/s. Il s'agit maintenant de calculer la taille minimale des enrochements à mettre en place pour former la carapace extérieure du batardeau pour que ces derniers ne soient pas arrachés par l'écoulement lors des crues exceptionnelles. Le prédimensionnement des enrochements basés sur une application de la formule d'Isbach conduit à sélectionner :

$$d_{50} = v^2 / 2gC^2(Gs-1) \quad (1)$$

où d_{50} est la taille moyenne des blocs, v vitesse moyenne du canal, Gs gravité spécifique du bloc, g constante gravitationnelle, $C = 0,7$ selon le contrat. Le poids moyen des enrochements, P_{50} exprimé en Newtons, est obtenu à partir de D_{50} selon la formule :

$$P_{50} = \pi/6 \times g \times \rho_r \times D_{50}^3 \quad (2)$$

avec ρ_r la masse volumique apparente exprimée en kg.m^{-3} . On propose donc de conserver une granulométrie classique (dite 160-4,415 kg) déterminée par le fuseau montré sur le Tableau 9.

Thème 4 – Ouvrages portuaires, offshore et de plaisance

Tableau 9. Taille des enrochements adaptés pour le batardeau de Kinguélé aval.

$d_{\min} = 0,50 \text{ m}$	$P_{\min} = 160 \text{ kg}$
$d_{15} = 0,90 \text{ m}$	$P_{15} = 954 \text{ kg}$
$d_{50} = 1,11 \text{ m}$	$P_{50} = 1,789 \text{ kg}$
$d_{85} = 1.30 \text{ m}$	$P_{85} = 2,874 \text{ kg}$
$d_{\max} = 1,50 \text{ m}$	$P_{\max} = 4,415 \text{ kg}$

4. Conclusions

Une élévation de la crête du batardeau à 27,00 m et de celle de l'inondation à 25,36 m est conforme avec les résultats obtenus.

Les calculs effectués permettent de confirmer que l'infiltration et la stabilité de la pente du batardeau longitudinal de la phase I du projet hydroélectrique Kinguélé Aval respectent les exigences de la spécification.

5. Références bibliographiques

- AGRESTI P., BONELLI S., COCHET P., FRY J.-J., HERRIER G., LINO M., MOUY V., NERINCX N., PUIATTI D., TOUILEB B. (2018). *Petits barrages et digues en sols traités : matériaux, concepts, comportement, retours d'expérience et innovation*, Q.103-R.27, 26ème Congrès des Grands Barrages, Vienne, Juillet 2018. 12 p.
- ASECNA (2015). Répertoire des aérodromes et pistes du Gabon. Document Technique, 4 p.
- BOCOVE M. (1991). *Barrage-voute : Analyse statistique et dynamique des contraintes internes par éléments finis (logiciel image-3D)*. Projet de fin d'études, Ecole polytechnique de Thiès, 192 p.
- BOUAFIA A. (2011). *Conception et calcul des ouvrages géotechniques. Cours et applications*. Pages Bleues Internationales, 33 p.
- CFBR (2015). *Recommandations pour la justification des barrages et des digues en remblai*. Edition CFBR, 10 p.
- GAFFURY A.-L., HOYER B. (2021). *Action en faveur du climat et durabilité environnementale*. Groupe Banque européenne d'investissement, 8 p.
- RIGO P., LIZIN S. (2007). *Catalogue des batardeaux de maintenance et de secours*. Catalogue des batardeaux, ANAST Université de Liège, 162 p.
- TERRASOL-SETEC (1990). *Calcul de la stabilité des ouvrages de géotechniques*. Notice technique Talren v5, 106 p.