

BARRAGE DE LAGDO AU CAMEROUN : DEMARCHE DE MISE EN PLACE D'UN SYSTEME DE SURVEILLANCE ET DE GESTION DE LA SECURITE

LAGDO Dam in Cameroon: approach to setting up a monitoring and safety management system

Sylvie Durande DJIKAM PATIPE, Dieudonné BISSO

Université de Yaoundé 1, Département des sciences de la Terre, BP : 812 Yaoundé Cameroun
sylviesappi@gmail.com ; dbisso2002@yahoo.fr

Yasmina Boussafir

Université Gustave Eiffel, Laboratoire GERS/SRO, 14-20 Boulevard Newton, Champs-sur-Marne, France
yasmina.boussafir@univ-eiffel.fr

Guillaume Veylon

INRAE, Université Aix Marseille, Unité de Recherche RECOVER, Aix-en-Provence, France
guillaume.veylon@inrae.fr

MOTS CLEFS

Barrage, enrochement, sécurité, surveillance, inspection, auscultation, Cameroun

KEY WORDS

Dam, rip-rap, safety, monitoring, inspection, auscultation, Cameroon

RÉSUMÉ

Le barrage de Lagdo, construit en 1977 au nord du Cameroun, est la principale source d'énergie hydroélectrique du réseau Nord avec une capacité initiale de 72 MW, aujourd'hui réduite de moitié. Ce barrage en remblai, de 40 m de haut, 190 m de large à la base et 10 m en crête, contient 7.7 Mdm³ d'eau. Il est constitué de sable argileux pour le noyau, de filtres et drains horizontaux, et d'enrochements de granites et gneiss pour la protection des talus. Malgré son importance géographique, économique et sociale, et l'absence de réglementation officielle sur la sûreté des barrages au Cameroun, une inspection visuelle a révélé des signes de vieillissement : fissures, dégradation des talus, prolifération de végétation, termitières, traces d'érosion et fuites d'eau. Ces anomalies compromettent la sécurité de l'ouvrage. Les instruments d'auscultation sont présents dans le barrage. On note une fluctuation de la piézométrie dans le corps du barrage avec quelques pics en début d'exploitation, puis une diminution de cette piézométrie ces dernières années. En ce qui concerne les différents déplacements horizontaux et verticaux du barrage malgré une évolution conséquente les 20 premières années après sa mise en eau, on observe une tendance à la stabilisation ces 20 dernières années. Un projet financé par la Banque mondiale en 2016 vise à établir une réglementation basée sur les meilleures pratiques internationales. Actuellement, les inspections suivent les normes chinoises. Après une revue des pratiques de suivi pratiquées en Inde, Canada, Chine et France, l'article décrit les désordres observés et suggère un système de surveillance adapté aux standards internationaux.

ABSTRACT

The Lagdo dam, built in 1977 in northern Cameroon, is the main source of hydroelectric power for the northern network, with an initial capacity of 72 MW, now halved. This embankment dam, 40 m high, 190 m wide at the base and 10 m at the crest, holds 7.7 Mdm³ of water. It consists of clayey sand for the core, horizontal filters and drains, and granite and gneiss riprap to protect the embankments. Despite its geographical, economic and social importance, and the absence of official regulations on dam safety in Cameroon, a visual inspection revealed signs of ageing: cracks, degradation of the embankments, overgrowth of vegetation, termite mounds, traces of erosion and water leaks. These anomalies compromise the safety of the structure. Monitoring instruments are present in

the dam. Piezometry fluctuates in the body of the dam, with some peaks in piezometry levels at the start of operation, followed by a decrease in piezometry in recent years. With regard to the various horizontal and vertical displacements of the dam, despite significant changes in the first 20 years after impoundment, these have tended to stabilize over the last 20 years. A project funded by the World Bank in 2016 aims to establish regulations based on international best practice. At present, inspections follow China standards. The article proposes a classification of disorders and suggests a monitoring system adapted to international standards.

1. INTRODUCTION

Les barrages sont des ouvrages d'art placés en travers d'une vallée dont la fonction première est de retenir une réserve d'eau en amont de la vallée pour des utilisations multiples. Leur sécurité est primordiale pour prévenir les risques de rupture et garantir leur bon fonctionnement. Cela nécessite un système de surveillance rigoureux capable de détecter et de prévenir les dégradations structurelles (1). Dans plusieurs pays, tels que l'Inde, le Canada, la Chine et la France (2), (3), (4), des technologies avancées et des protocoles stricts ont permis de développer des systèmes de surveillance performants. Au Cameroun, cependant, la sécurité des barrages repose exclusivement sur les gestionnaires, en l'absence de normes ou de réglementations spécifiques. Le barrage de Lagdo est un barrage en remblai à étanchéité interne construit en 1982, composé en grande partie d'enrochements. Les données issues du processus d'actualisation du Plan Communal de Développement de Lagdo en 2015, évaluent la population de Lagdo à 205 838 habitants sur un territoire communal d'une superficie de 2 250 km², et un taux d'accroissement de 2.9% l'an. Aussi suivant la dernière révision des perspectives d'urbanisation mondiale de l'ONU, la population de Garoua est estimée à 379 793 habitants. Il présente par conséquent des défis uniques en raison de son âge, 40 ans, du volume de son réservoir et de la densité de population protégée. Les systèmes de surveillance actuels ont été mis en place par l'entreprise en charge de la construction et remis à jour après des inspections détaillées. Une classification adaptée et une méthodologie de surveillance de l'ouvrage plus efficace pourrait être suggérée prenant en compte la spécificité des désordres observés ces dernières années. La réhabilitation du barrage de Lagdo par la société d'état Electricity Development Corporation étant envisagée depuis quelques années, ce travail permet de proposer des propositions constructives quant à la mise en place d'une réglementation relative à la sécurité des barrages au Cameroun.

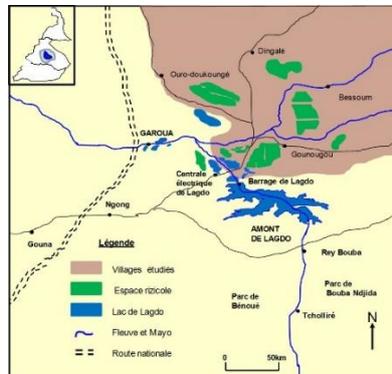


Figure 1 : Localisation du barrage de Lagdo

Cet article vise à :

- Présenter une revue des pratiques mondiales en termes de surveillance et de sécurité des barrages, notamment en Inde, au Canada, en France et en Chine.
- Décrire la méthodologie utilisée pour la surveillance du barrage de Lagdo, en classifiant les désordres observés.
- Proposer une réflexion sur l'implémentation d'un système de surveillance spécifique au Cameroun.

Cette étude représente une évaluation préliminaire rapide dont la présentation des désordres n'est qu'une première étape dans la recherche, le diagnostic et l'analyse des risques.

2. REVUE DES PRATIQUES MONDIALES : ANALYSE SUR LA GESTION DE LA SECURITE ET DES SYSTEMES DE SURVEILLANCE EN INDE, AU CANADA, EN FRANCE ET EN CHINE.

La sécurité des barrages, essentielle pour protéger les vies, les biens et l'environnement, repose généralement sur deux méthodes complémentaires : l'inspection visuelle (évaluation qualitative globale) et l'auscultation (analyse quantitative via instrumentation) (4), (5).

2.1. Analyse sur la gestion de la sécurité et des systèmes de surveillance en Inde (6)

En Inde, la sécurité des barrages est régie par les lignes directrices de 1987 de la Commission centrale des eaux, fondées sur des standards internationaux. Les barrages sont classés en trois catégories selon leur dangerosité : haut risque, risque important et faible risque. Pour assurer leur sécurité, un programme d'inspection structuré a été mis en place, comprenant des inspections approfondies tous les 10 ans, des inspections programmées annuelles après la mousson, des inspections spéciales après des événements imprévus, et des inspections informelles régulières par le propriétaire de l'ouvrage. Ces inspections reposent sur l'examen des données antérieures, des inspections visuelles et la préparation de rapports détaillés. Les instruments de surveillance comprennent de nombreux dispositifs, assurant le suivi des performances et des problèmes éventuels. Ces dispositifs, adaptés aux catégories de barrages, sont régulièrement inspectés pour garantir leur efficacité. Cette approche intégrée vise à protéger les populations et les biens en aval tout en assurant la stabilité des ouvrages. La formation des gestionnaires et des programmes d'inspections spécifiques (post-mousson) sont des particularités intéressantes à relever.

2.2. Analyse sur la gestion de la sécurité et des systèmes de surveillance au Canada (7) (8) (9)

Au Canada, la gestion de la sécurité des barrages est encadrée par la Loi sur la sécurité des barrages, adoptée au Québec en 2002, qui vise à protéger les populations et les biens. Les barrages sont classés en cinq catégories (A, B, C, D, E), selon leur contenance et leur niveau de risque, déterminé par leur vulnérabilité et les conséquences potentielles de leur rupture. Des normes minimales incluent la résistance aux crues (généralement décennales) et aux séismes (calculés sur une récurrence de 2 500 ans). Les barrages des classes A à C, présentant un risque moyen ou élevé, doivent être soumis à des évaluations régulières de sécurité, tous les 5 à 10 ans pour les plus critiques. Ces évaluations intègrent des plans d'urgence, des plans de gestion des eaux, des activités de surveillance spécifiques, un registre de l'exploitant et des travaux d'entretien. Les fréquences des activités varient selon la classe : les barrages de classe A nécessitent 12 visites de reconnaissance par an et une inspection annuelle, tandis que ceux de classe E requièrent une visite et une inspection tous les 10 ans. Enfin, les systèmes de monitoring sont adaptés à chaque type de barrage, mesurant des paramètres tels que pressions interstitielles, tassements, fissurations et débits de fuite.

2.3. Analyse sur la gestion de la sécurité et des systèmes de surveillance en France

L'analyse de la gestion de la sécurité et des systèmes de surveillance des barrages en France repose sur les dispositions du décret n°2015-526 du 12 mai 2015 et des arrêtés de 2017, 2018 et 2022. Les barrages sont classés selon leur hauteur et le volume de leur retenue, conformément à l'arrêté du 17 mars 2017. La surveillance inclut des inspections visuelles régulières, et post-événements après crues ou séismes, des visites techniques approfondies périodiques, et la vérification des équipements comme les vannes. Les exploitants doivent tenir un dossier technique, un registre d'exploitation et transmettre des rapports périodiques, leur fréquence variant selon la classe du barrage. En vertu de l'arrêté du 6 août 2018, une étude de dangers, axée sur l'identification des défaillances et des mesures préventives ou curatives, est obligatoire pour les barrages de classe A et B, avec des mises à jour respectives tous les 10 et 15 ans

2.4. Analyse sur la gestion de la sécurité et des systèmes de surveillance en Chine (10) (11)

La sécurité des barrages en Chine est encadrée par les "Régulations sur l'administration de la sécurité des barrages de réservoirs" (1991), qui ciblent les ouvrages de plus de 15 mètres ou d'une capacité supérieure à un million de mètres cubes. Ces barrages sont classés en trois catégories : grande (A), moyenne (B), et petite (C) selon leur taille et le risque potentiel. Les évaluations périodiques identifient les structures dangereuses nécessitant des mesures correctives, telles que le renforcement ou la reconstruction. La surveillance repose sur des inspections régulières et spéciales, incluant des contrôles visuels, tests structuraux et vérifications des dispositifs de surveillance. Toutefois, les inspections ne nécessitent pas obligatoirement des ingénieurs qualifiés, contrastant avec d'autres systèmes plus exigeants (11, 12).

3. SURVEILLANCE DU BARRAGE DE LAGDO : CLASSIFICATION DES DESORDRES ET APPROCHE METHODOLOGIQUE.

3.1. Présentation de la zone d'étude

Le barrage de Lagdo est situé dans le nord du Cameroun (Figure 1), où le climat tropical sahélo-soudanien se caractérise par une saison pluvieuse (avril à octobre) avec des précipitations moyennes annuelles de 1 031 mm, et une saison sèche de cinq à six mois (novembre à mars). L'altitude moyenne de la région est de 218 m, avec un réseau hydrographique dominé par la Bénoué et ses principaux affluents (Mayo Mbay, Mayo Bocki, Mayo Sala et Mayo Boulel) (13).

3.2. Description du barrage de Lagdo et de ses ouvrages connexes

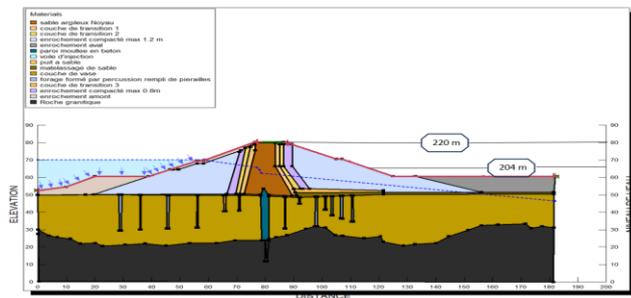


Figure 2 : Coupe transversale du barrage de Lagdo



Figure 3 : Vue Aérienne du barrage de Lagdo et ses ouvrages connexes

Le barrage de Lagdo est à buts multiples : production d'énergie, protection contre les crues, irrigation, pisciculture, maintien d'un débit d'étiage minimal pour la navigation et la salubrité. Le bassin versant a une superficie de 31 000 km², pour un débit moyen interannuel de 248 m³/s (1951-1975). Le débit maximum observé est de 4820 m³/s (1951-1975).

Il comporte un barrage principal (figure 2) et deux digues de col en remblai, une usine hydroélectrique et des ouvrages annexes pour l'évacuation des crues et la vidange du réservoir (figure 3). La retenue normale de stockage se situant à la côte 216,00 m, pour un niveau minimal d'exploitation de 206,00 m avec une côte des plus hautes eaux exceptionnelles à 218,18 m.

Le barrage principal est de type digue en enrochement à noyau argileux d'une hauteur maximale 40 m, longueur en crête 308,50 m, largeur en crête 10 m, avec une cote de crête à 220,00 m avec un parapet de 1,20 m de hauteur.

L'assise de fondation est constituée d'un substratum granitique surmonté d'un remplissage alluvionnaire de 15 à 45 m d'épaisseur. Une paroi moulée en béton armé complète le dispositif d'étanchéité interne au niveau de la fondation. Les parements du barrage principal ont des pentes de 1,8H/1V avec berme et risberme. Un dispositif filtre et drain d'une épaisseur horizontale d'environ 1,50 m encadre le noyau étanche argileux central. Les matériaux de remblais sont composés d'enrochement 10/1000 et 230/1400mm. L'épaisseur normale d'enrochement entre la cote 204,00m et la crête, est de 4 m.

La digue Est a une longueur de 672 m et une hauteur maximale de 14,7m avec largeur en crête de 5,5 m. La digue Ouest a une longueur de 1260 m avec hauteur maximale de 6,2 m et largeur en crête 5,5 m.

L'évacuateur de crue est de type latéral vanné. Il compte deux vannes de dimension LxH égale à 12x15,12 m, pour une cote seuil de 201,68 m et une capacité de 3012 m³/s sous une cote de plan d'eau à 218,18 m au passage de la crue décennale. Le tunnel de vidange et d'évacuation, d'une longueur de 350 m, est utilisé comme dérivation pendant les travaux.

L'usine est composée de 4 groupes Kaplan de 18MW de puissance installée chacun, pour un productible de 322 GWh.

3.3. Système de surveillance du barrage de Lagdo

Le barrage de Lagdo a été construit par l'entreprise China International Water and Electric Corps et est exploité par l'entreprise ENEO, dont la responsabilité a été confiée par l'Etat du Cameroun. C'est un barrage à forte contenance et de classe A au regard de ses caractéristiques géométriques selon le référentiel français. Dans le cadre de la gestion de la sécurité du barrage de Lagdo, un système de surveillance du barrage et de ses ouvrages connexes a été mis en place. Ce système de surveillance tient compte principalement, des études et travaux antérieurs du barrage réalisés entre 1978 et 1982, des inspections régulières par les exploitants et de la collecte et l'analyse des données d'auscultation du barrage.

En dehors des inspections de routine et quelques investigations, un diagnostic a été mené en 2007, 25 ans après la mise en service, par AES SONEL (Ancien ENEO) avec le bureau d'étude INGEMA, pour évaluer le tassement du barrage de Lagdo ; suivi quelques années plus tard en vue d'une réhabilitation, et enfin en 2021 dans le cadre d'une inspection du barrage réalisée pour des travaux de recherches.

3.3.1 Inspection visuelle et Classification des désordres observés

3.3.1.1. Inspection visuelle

Plusieurs types d'inspection sont faites :

- Les inspections visuelles régulières, deux fois par mois, réalisées par un technicien spécialisé ;
- Des inspections trimestrielles réalisées par un expert-ingénieur de l'entreprise ;
- Des inspections approfondies après les crues.

Les inspections visuelles régulières effectuées dans le cadre de la surveillance du barrage de Lagdo se font suivant un circuit précis. Elle consiste à relever toutes les anomalies observées au niveau de l'ouvrage et les consigner dans un rapport à transmettre au propriétaire. Pour chaque désordre détecté, les informations suivantes ont été notées : sa nature (classification du désordre), sa localisation ou position sur l'ouvrage.

3.3.1.2. Description des désordres

Plusieurs désordres ont été observés lors des inspections visuelles et sont tous illustrés en Figure 4.

Fissures au niveau de :

- La crête en béton : Fissures transversales (jusqu'à 4 m de longueur) sous forme de mosaïques localisées, surtout en rive droite. Certaines ont été colmatées au bitume.
- L'évacuateur de crue : Fissures de retrait (< 2 mm), traitées avec des produits hydrofuges.

Tassement de l'ouvrage :

- On note des déplacements verticaux (Figure 8) et horizontaux (Figure 9) enregistrés sur les risbermes aval et la crête du barrage, confirmés par INGEMA en 2007.

Dégradation des talus :

- On observe une dégradation significative des talus en enrochements, avec ségrégation et accumulation de blocs de roches vers les pieds de talus ainsi que des talus dénudés à certains endroits.

Détérioration du béton :

- On observe des traces d'humidité, d'efflorescences et la présence de microorganismes (mousses et lichens), notamment sur les murs de l'évacuateur et du tunnel de vidange.

Fuites d'eau :

- Elles se présentent sous forme de jet d'eau au niveau du clapet de la vanne de l'évacuateur de crues.

Point bas sur la crête du remblai et érosion externe anthropique :

- On observe des signes de dégradations des crêtes de digues, causées par l'utilisation des crêtes comme passages pour les populations et leurs troupeaux, malgré la présence de panneaux d'interdiction.

Sédimentation :

- Des dépôts significatifs de sédiments sont identifiés en aval, synonyme d'un engorgement depuis le réservoir amont, confirmés par une étude menée en 2004 par la mission d'aménagement de la région nord.

Présence de la Végétation :

- Talus envahis par une végétation arbustive (lors de la visite), atteignant plus de 1 m de hauteur.

Dégâts dus aux animaux fouisseurs :

- Formation de termitières sur les digues secondaires, atteignant en moyenne 20 cm de hauteur et 50 cm de largeur.



Figure 4 : Illustration des désordres observés sur les parties d'ouvrage. a) Fissures transversales de crête, b) Dégradation de talus avec ségrégation des enrochements, c) Détérioration du béton par efflorescence d) Fuite d'eau à travers les clapets de vanne, e) Point bas sur la crête et érosion anthropique, g) Sédimentation retenue aval, h) Développement de la végétation et dégradation du talus, i) Termitières

3.3.1.3 Gravité des désordres observés

A l'issue de l'inspection visuelle réalisée, les désordres présentés ci-dessous doivent être à notre sens sujets à des surveillances plus récurrentes et un diagnostic plus poussé. Sont détaillés ci-dessous l'analyse de 4 principaux désordres.

1-Fissures au niveau de la crête du barrage

Situées précisément sur la dalle de crête du barrage principal, elles sont de deux types :

- Les microfissures, fines et peu observables de profondeur et épaisseur inférieures à 2mm. Elles sont souvent qualifiées de peu dangereuses, toutefois elles peuvent impacter le vieillissement de l'ouvrage ;
- Les fissures profondes, lézardes, facilement reconnaissables, avec des épaisseurs et des profondeurs de plus de 2mm (Tableau 2). Toutes ces fissures sont de direction NE-SW, perpendiculairement au barrage, plus nombreuses et marquées en rive droite (f2, f3, f4) qu'en rive gauche (f1, f'1). La fissure f1 présente une plus grande ouverture avec une épaisseur centimétrique.

Fissure N°	Localisation	Dimensions		
		épaisseur (mm)	longueur (m)	profondeur (mm)
f 1	Rive Gauche de la crête	$2 \leq e \leq 10$	$3 \leq l \leq 4$	$Pf \geq 2$
f'1		$1 \leq e \leq 5$	$3 \leq l \leq 4$	$Pf \geq 2$
f 2	Rive Droite de la crête	$3 \leq e \leq 6$	$3,5 \leq l \leq 4$	$Pf \geq 2$
f 3		$1 \leq e \leq 8$	$3,5 \leq l \leq 4$	$Pf \geq 2$
f 4		$1 \leq e \leq 3$	$3,5 \leq l \leq 4$	$Pf \geq 2$

Tableau 2 : Récapitulatif des fissures de la chaussée de crête nettement observables

Ces fissures ont tendance à être évolutives et peuvent rapidement atteindre le centimètre. Les fissures transversales ouvertes pour certaines sur une épaisseur de plus de 5 mm peuvent parcourir en profondeur, toute l'épaisseur du revêtement et jouer un rôle important dans la saturation d'une frange de remblai lors d'un épisode pluvieux, avec des risques d'érosion interne par augmentation du gradient hydraulique dans le corps de l'ouvrage fissuré avec entrainement de particules fines. (14)

Il sera donc important de réaliser impérativement des diagnostics plus poussés sur ces désordres.

2-Dégradation des talus et chaussée de crête des digues

La détérioration des talus se manifeste précisément par la ségrégation des blocs d'enrochements. Le risque de ségrégation est d'autant plus grand que le matériau utilisé a une granulométrie étalée. L'hétérogénéité quant à elle prend donc sa source depuis le choix de la blocométrie à la carrière, jusqu'à la manutention lors de la mise en œuvre des enrochements. Les différentes mesures des dimensions effectuées sur les enrochements du barrage principale nous ont permis d'avoir une blocométrie allant de 5 cm à 1,8 m suivant le tableau ci-dessous :

Dimensions des enrochements (m)	1,800	1,500	1,00	0,6	0,5	0,4	0,3	0,1	0,05
Pourcentage (%)	2	3	10	25	20	10	15	10	5
Pourcentage cumulé	100	98	95	85	60	40	30	15	5

Tableau 3 : Dimension des enrochements du talus amont du barrage principal

Avec les données du tableau ci-dessus, on définit un rapport d_{60}/d_{10} de 5,6 ; soit un coefficient d'uniformité supérieur à 5, caractéristique d'une blocométrie très étalée et de ce fait non homogène, susceptible de favoriser la ségrégation.

Selon Danielle Lautrin (2002), les détériorations des talus protégés par un revêtement lourd comme il est observé dans le cas de ce barrage, correspondent souvent à des déplacements de blocs avec modification de profil initiaux (berme-risberme), mais aussi des pertes de matière et une plus grande sensibilité du talus mis alors à nu. Le corps de la digue étant ainsi exposé aux intempéries, des érosions plus prononcées et des ravinements se développent.

La détérioration de la chaussée de crête des digues secondaires quant à elle est sujet selon nos investigations à des actes de dégradation et érosion anthropique due au passage du bétail et autres trafics sur la crête des digues. On observe une crête autrefois recouverte par les enrochements, complètement dénudée, avec des granulats de roches enfouis dans le corps de la digue et quelques ornières.

Le tableau suivant présente les observations faites entre les données de conception et celles actuelles pour la digue Ouest

Paramètres de digue	Valeurs à la conception en m (1984)	Valeurs évaluées lors de l'inspection en m (2021)
Hauteur Digue	6,2	5
Epaisseur couche de chaussée en enrochement	0,3	0
Epaisseur totale Rip Rap talus	1,2	0- 0,3
Largeur de crête	5,5	4
Profil de la crête	Régulier	Irrégulier

Tableau 4 : Comparaison entre quelques valeurs de conception de la Digue en 1984 et celles évaluées lors des inspections en 2021

Le tableau ci-dessus, présente un entrainement considérable des matériaux constitutifs de la chaussée de crête et des talus. Dans ce cas, un diagnostic plus poussé des désordres observés serait indiqué, afin d'évaluer le déplacement des blocs et la modification du profil initial. La sensibilisation des populations sera également nécessaire pour réduire les dégradations d'origine anthropiques.

3-Sédimentation dans la retenue

L'étude commanditée par la mission d'étude pour l'aménagement et le développement de la province du Nord, visait à déterminer le niveau de sédimentation de la retenue de Lagdo et proposer les mesures nécessaires à la préservation du potentiel hydroélectrique. Pour ce faire, deux campagnes bathymétriques de 14 jours avaient été entreprises au cours des mois de mai (étiage) et octobre (crue). 2400 Waypoints ont été recoltés et 5 échantillons ont été prélevés dans l'optique de caractériser les matériaux sédimentaires contenus dans la retenue.

Les résultats obtenus révèlent qu'en 20 ans, 815 960 695 m³ de dépôts, constitués pour l'essentiel de sables grossiers, se sont accumulés dans la retenue. La conséquence de cet ensablement est une réduction de la capacité initiale de la retenue de 23%. Rendu 20 ans après cette étude, il ne serait pas illusoire de penser que les dépôts de sédiments dans la retenue aient dépassé les 1,5 milliards de m³ soit une réduction par déduction de la capacité de la retenue de deux fois plus, c'est-à-dire supérieur à 40%.

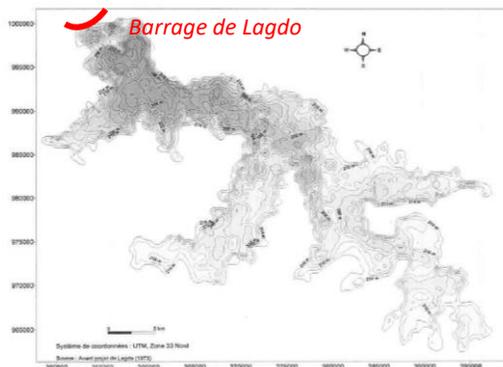


Figure 5 : Carte bathymétrique illustrant le plancher topographique de la retenue de Lagdo avant la mise en eau (1973)

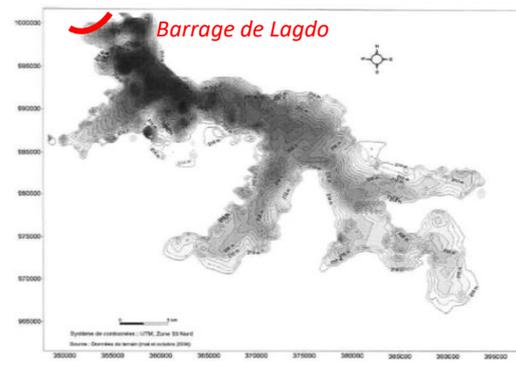


Figure 6 : Carte bathymétrique illustrant le plancher topographique de la retenue de Lagdo après la mise en eau (2004)

4-Dégâts dus aux animaux fouisseurs

Dans le cas de la digue Ouest du barrage, les animaux fouisseurs présents sont des termites, insectes de petites tailles (5 à 8 mm de longueur), formant des termitières. La termitière présente deux parties, une partie émergée composée d'une grande cheminée pouvant atteindre 9 mètres de hauteur et une seconde partie immergée, comprenant un système de canaux souterrains ainsi qu'une grande galerie directement reliée à une nappe phréatique par des puits très profonds pouvant aller de 15 à 20 m en général, et parfois jusqu'à 70 m pour atteindre les nappes phréatiques. (15)

Les termitières observées sur le talus aval, sont en formes de dôme, mais présentent plusieurs ouvertures de diamètres variables (5 à 10 cm) avec des emprises au sol allant à plus de 1 m. Notons que le sol environnant de certaines des termitières présentes en surface, un aspect poreux, remanié sur plus de 1 m à la ronde. Les dégâts souterrains n'ont pas encore été évalué, mais on peut observer à l'œil nu des ouvertures d'au moins 20 cm de profondeur.

Sébastien Lenz a réalisé une étude qui stipule que l'activité des termites modifie les propriétés physico-chimiques du sol sur une distance allant de 5 à 10 mètres de la termitière. (16)

3.3.2. Auscultation : Collecte des données et analyse

Le barrage de Lagdo dispose d'un système de surveillance mis en place lors de sa construction pour surveiller son comportement. Les instruments incluent des échelles limnimétriques, piézomètres, repères topographiques (mesures de déplacements), instruments météorologiques (pluviomètres, thermomètres, évaporomètres) et débitmètres.

3.3.2.1 Données de côte de retenue amont et aval

L'échelle limnimétrique est installée en amont et en aval du barrage. En amont, elle permet d'obtenir la cote d'eau dans la retenue et d'en déduire le volume d'eau théorique. Lors de l'inspection d'avril 2021, la cote de retenue amont était de 209,5 m et la cote aval de 186,36 m.

3.3.2.2. Données piézométriques

Les piézomètres surveillent le niveau d'eau dans le barrage. Une piézométrie élevée ou croissante est préoccupante (5). Les données piézométriques obtenues (Figure 7) montrent :

- Une corrélation avec le niveau de la retenue.
- Une augmentation les 12 premières années, suivie d'une stabilisation.
- Des anomalies (fortement corrélées avec les précipitations) notées sur les piézomètres H2 et H9 situés en appui gauche.

3.3.2.3. Données météorologiques

Ces données sont issues des stations météorologiques installées à la centrale de Lagdo. Elles concernent les informations sur l'évaporation en mm, la température ambiante en °C, les hauteurs de pluie en mm. La température moyenne ambiante à Lagdo durant ces 40 dernières années se situe autour de 30°C, avec une courbe de tendance assez constante. La courbe de tendance des hauteurs de pluie moyenne mensuelle cumulée par an présente une augmentation progressive de la pluviométrie depuis 1989.

3.3.2.4. Données topographiques (altimétriques et planimétriques)

Des bornes de repères topographiques ont été installés au niveau des risbermes aval et au niveau de la crête du barrage, afin de suivre les déplacements horizontaux (planimétriques, Figure 9) et verticaux (altimétriques, Figure 8) du barrage. Un tassement excessif de la crête entraîne une diminution de la revanche, ce qui diminue la sécurité du barrage vis-à-vis du risque de surverse. Ce tassement peut refléter une forte compressibilité de la fondation, ou un compactage insuffisant du corps du barrage (5). Dans le cas du barrage de Lagdo, on observe un tassement brusque de 12,3 cm au point maximum, les trois premières années suivant la mise en eau, et des tassements progressifs allant jusqu'à 18,5 cm pour certains repères de crête les 20 premières années. Par la suite, on observe une nette stabilisation des tassements ne dépassant pas les 6,5 cm les 20 dernières années (Figure 8).

En ce qui concerne la planimétrie, les déplacements se font de l'amont vers l'aval. On observe des déplacements dès les premières années qui suivent la mise en eau. Ces déplacements sont plus importants et progressifs allant pour certains repères jusqu'à 7,7 cm les 20 premières années et une nette stabilisation, avec des déplacements ne dépassant pas les 1,2 cm les 20 dernières années (Figure 9).

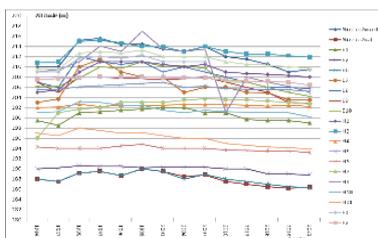


Figure 7 : Courbe piézométrique

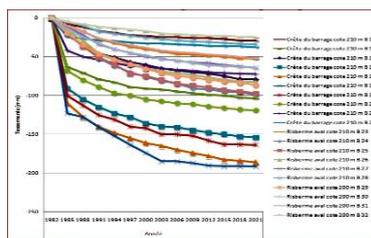


Figure 8 : Courbe de tassement du barrage

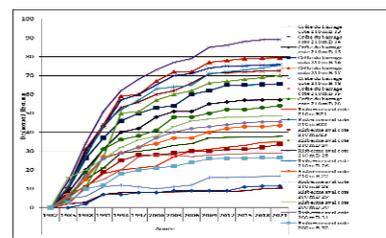


Figure 9 : Courbe de déplacement horizontal

4. REFLEXION SUR L'IMPLEMENTATION D'UN SYSTEME DE SURVEILLANCE : PROPOSITION D'UN SYSTEME

La surveillance des barrages étant basée sur deux principales méthodes complémentaires à savoir l'inspection visuelle et l'auscultation, notre réflexion sur l'implémentation d'un système de surveillance tiendra compte des pratiques internationales observées.

4.1. Les écarts entre la pratique actuelle sur le barrage de Lagdo et les pratiques internationales

Les pratiques internationales sont relativement proches dans l'esprit mais divergent sur les appellations ou le vocabulaire employé. On constate également des spécificités dans les pays, en lien avec la géographie, la culture du risque et le climat.

	Classification des barrages	Programme de suivi dans le temps	Éléments particuliers du suivi et qualification du personnel en charge du suivi
Inde	La classification dépend des enjeux humains, économiques et matériels	Programme basé sur 4 types d'inspections, définit par des textes législatifs	<ul style="list-style-type: none"> • Formation des gestionnaires • Inspection post-mousson • Techniciens, Ingénieurs, experts qualifiés et spécialistes des barrages
Canada	Classification intégrant à la fois les critères géométriques du barrage et les enjeux (vulnérabilité et conséquences)	Le programme comprend des visites, des inspections, des auscultations et fait référence à des normes et des textes législatifs	<ul style="list-style-type: none"> • Evaluation de la sécurité avec un plan d'urgence • Connaissance des modes de gestion des eaux dans la retenue • Tenue d'un registre d'exploitation et de travaux d'entretien • Techniciens expérimentés dans les barrages et Ingénieurs spécialisés
France	La classification est basée sur des critères géométriques du barrage et de la retenue	Le programme comprend des visites, des inspections, des auscultations et fait référence à des textes législatifs	<ul style="list-style-type: none"> • Rédaction d'une étude de danger • Vérification des vannes • Tenue d'un registre d'exploitation • Techniciens, ingénieurs spécialisés et experts en sécurité et environnement
Chine	La classification est basée selon leur taille, leur fonction et les risques potentiels qu'ils présentent	Programme basé sur des inspections régulières, tests structuraux, surveillance par des technologies innovantes, conformément aux normes nationales	<ul style="list-style-type: none"> • Evaluation périodique de la sécurité avec contrôle des résistances aux crues et séismes • Plan d'urgence • Professionnels qualifiés
Cameroun	La classification est inexistante à ce jour	Des inspections visuelles et des inspections approfondies	<ul style="list-style-type: none"> • Rapport d'inspection et d'auscultation / Maintenance • Mise en place de règles de sécurité au travail • Techniciens et ingénieurs formés en sécurité des barrages

Tableau 5 : Pratiques internationales relatives à la sécurité des barrages

4.2. Gestion de la sécurité et système de surveillance : Proposition pour le barrage de Lagdo

De façon générale, les approches de gestion des risques destinées à assurer la sécurité des barrages incluent généralement l'analyse des risques, l'évaluation des risques, la prise de décision concernant les mesures de contrôle et de réduction des risques, et le suivi et évaluation.

4.2.1. Niveau de sécurité du barrage de Lagdo

Au regard des observations faites, relatives aux procédures de gestion de la sécurité, au système de surveillance en place, au mode d'entretien et de réhabilitation, le niveau de sécurité du barrage de Lagdo s'avère insuffisant.

A cet effet quelques axes d'amélioration sont proposés.

4.2.2. Axes d'amélioration relatifs à la Gestion de la sécurité

Au regard des désordres observés et afin d'améliorer les aspects relatifs à la sécurité au barrage de Lagdo, nous suggérons pour une meilleure gestion de la sécurité de procéder de façon méthodique comme suit par :

- Analyse de la documentation existante et des études techniques antérieures réalisées, puis numérisation de ces données du barrage afin d'avoir une meilleure connaissance de cet ouvrage ancien, des enjeux et des éléments conséquents pour un diagnostic puis une réhabilitation ;
- Analyse de l'exploitation et de la sécurité des ouvrages vis-à-vis des crues ;
- Diagnostic minutieux des parties d'ouvrage, des dispositifs d'auscultation et des équipements hydro électromécaniques en se basant sur les anomalies observées (inspections de sécurité, monitoring, prélèvements, essais, analyses, sondages et études (bathymétrie, fracturation...)) ;
- Actualisation de l'étude de danger comprenant une étude de l'onde de submersion en cas de rupture du barrage avec simulation des zones susceptibles d'être impactées permettant de déterminer le nombre de personnes et de biens risquant d'être impactés par la rupture ;
- Mise en place d'un Plan de mesure d'urgence ;
- Mise en place d'un Plan de Gestion Environnemental et Social ;
- Evaluation et mise à jour du registre de l'exploitation s'inspirant d'autres pratiques internationales. Ce registre permettra de relater chronologiquement les actions posées et les événements importants qui se rapportent à la sécurité du barrage ;
- Réhabilitation de l'ouvrage avec mise sur pieds d'un plan de supervision des travaux et contrôle qualité ;
- Etablissement d'un Plan d'instrumentation ;
- Organisation de l'exploitation et recommandations (mise en place d'un Plan d'exploitation et d'entretien).

4.2.3. Axe d'amélioration relatif au Système de surveillance : Inspection et monitoring

Selon cette structuration, la surveillance du barrage pourrait reposer sur : • une surveillance de premier niveau réalisée par l'équipe sur site, avec l'appui du service Inspection et Auscultation • Une surveillance de deuxième niveau réalisée par les ingénieurs spécialistes en sécurité des barrages du service Inspection et Auscultation avec l'assistance des ingénieurs experts en sécurité des barrages d'un bureau d'études • Une surveillance de troisième niveau par des ingénieurs experts en sécurité des barrages d'un bureau d'études.

4.2.1.1 Inspection de sécurité

Au regard des méthodologies d'inspections observées, les activités d'inspections issues de l'expérience indienne dénommée « inspection de sécurité des barrages » présentent un vif intérêt. La méthode d'inspection indienne met en exergue sous forme de programme, un canevas approprié à tout type de barrage. Le programme qui pourrait être adapté de l'expérience indienne pourrait être basé sur :

- Les inspections informelles, permanentes et régulières, mais peu détaillées, comme elles sont déjà pratiquées sur le barrage de Lagdo,
- Les inspections programmées qui peuvent être réalisées après chaque saison des pluies dans notre cas (la mousson en Inde), soit une fois par an, et qui seront plus détaillée,
- Les inspections spéciales après des événements naturels (crue, séisme, etc.),
- Les inspections complètes approfondies tous les 10 ans, au lieu de 20 actuellement.

Ces inspections fourniront des données qui seront consignées sur une fiche d'inspection puis dans le rapport d'inspection et doivent se faire au minimum par le personnel exploitant ayant une bonne connaissance de l'ouvrage et de préférence par des ingénieurs spécialisés.

Le contenu du processus décisionnel qui fait suite à l'établissement de ces documents reste à définir.

4.2.1.2. Monitoring

La surveillance via des outils d'auscultation, inspirée des pratiques internationales (5, 11), comprend :

- Mesures de sollicitations :
 - Cote du plan d'eau (amont/aval) mesurée par échelle limnimétrique ou limnimètre enregistreur,
 - Précipitations mesurées par pluviomètre (précision : millimètre/jour).
- Mesures de réponse de l'ouvrage :
 - Déplacements,
 - Pressions interstitielles et débits journaliers.

Des technologies innovantes peuvent être introduites, comme la surveillance par satellite, radar, cartographie thermique, ou logiciels de maintenance prédictive.

Le rapport d'examen de la sécurité du barrage doit être disponible tous les 5 à 10 ans et un rapport d'auscultation a réalisé pour un barrage de classe A, au moins 1 fois tous les 2 ans

4.2.3. Perspective d'implémentation d'autres outils de gestion de la sécurité

Dans le cadre des activités relatives à la gestion de la sécurité du barrage de Lagdo, l'utilisation de certains outils innovants peut être envisagée.

Outils/méthodes	Présentation	Références
Analyse probabilistique par la méthode des éléments finis Stochastiques (SFEM)	Outil pour évaluer la stabilité des barrages en terre de manière plus réaliste, en tenant compte des incertitudes. Elle est recommandée pour des projets critiques où la sécurité et l'optimisation des ressources est primordiales. Toutefois sa mise en œuvre nécessite des ressources importantes et une expertise avancée.	(17)
Analyse des modes de défaillance et leurs effets (ADME)	Simple et flexible pour une gestion proactive des risques, c'est une méthode efficace pour une évaluation qualitative et systématique des risques des barrages. Toutefois, elle doit être complétée par des analyses quantitatives ou d'autres outils.	(18)
Analyse qualitative de description des données historiques de vieillissement des barrages	Cette méthode permet une représentation des tendances en matière de perte de performance des barrages dont le résultat des travaux vise à l'organisation des informations sur le vieillissement des barrages sous forme de scénarios utilisant trois variables (fonctions, phénomènes, et symptômes)	(18)
Analyse qualitative pour évaluer la criticité	C'est une méthode évaluant les pertes de performance des barrages et de leurs composants en se basant sur la mesure de conséquence et le score d'occurrence	(18)

Tableau 6 : Présentation de quelques outils et méthodes innovants concourant à la gestion de la sécurité

4.3. Utilisation de technologies avancées et centralisation des données

L'intégration de capteurs de déformation, de systèmes de télémétrie et de technologies de détection précoce est essentielle. Ces dispositifs permettent une surveillance en temps réel et une analyse continue des données.

La centralisation des données collectées par les différents capteurs et systèmes de surveillance permet une analyse globale et cohérente. Un système informatique dédié pourrait aider à identifier les tendances et les anomalies de manière proactive.

4.4. Formation et sensibilisation

La formation des personnels en charge de la surveillance et de la maintenance du barrage est cruciale. Des sessions de formation régulières et des exercices de simulation peuvent améliorer la réactivité et l'efficacité en cas de problème.

4.5. Etude de Danger, Plans d'urgence et communication

La réalisation d'une étude de danger est cruciale tous les 10 ans le cadre d'un barrage de Classe A, tel que celui de Lagdo. L'établissement de plans d'urgence détaillés, incluant les niveaux d'alerte (Figure12), des scénarios variés et des procédures claires, est indispensable. Une communication efficace avec les autorités locales et les populations avoisinantes doit être assurée pour minimiser les risques en cas d'incident.

	désignation	description
niveau 0	« velle »	aucun risque avéré de rupture
alerte 1	« danger potentiel »	dès qu'un danger potentiel pour le barrage est identifié
alerte 2	« risque de rupture avéré »	lorsque les mesures normales de gestion des dangers ne suffisent plus mais qu'il reste une marge de manœuvre pour d'autres mesures
alerte 3	« rupture imminente ou en cours »	lorsqu'aucune mesure ne peut plus permettre d'éviter la rupture, ou lorsque la rupture est en cours

Figure 10 : Définition des niveaux d'alerte du plan d'urgence

5.CONCLUSION : SYNTHÈSE DES RESULTATS ET RECOMMANDATIONS POUR LES FUTURES RECHERCHES ET PRATIQUES.

Les inspections visuelles du barrage de Lagdo révèlent divers signes de vieillissement, notamment des fissures en crête, des dégradations du talus amont, la sédimentation dans la retenue, des détériorations du béton avec traces d'humidité, des fuites d'eau au niveau du clapet de l'évacuateur de crue, la présence des termitières, ainsi que l'érosion des crêtes et talus des digues Ouest et Est, aggravée par des facteurs anthropiques. L'auscultation montre une piézométrie fluctuante suivant le niveau de la retenue, avec une stabilisation progressive depuis les 20 premières années. Les déplacements horizontaux (7,7 cm) et verticaux (18,5 cm) observés initialement ont également tendance à se stabiliser à 1,2 cm et 6,5 cm respectivement ces 20 dernières années. Par ailleurs, si les températures sont constantes, on observe une augmentation des précipitations.

Pour un barrage de classe A (au sens de la réglementation française) âgé de plus de 40 ans et présentant des anomalies, le système de surveillance de Lagdo doit se conformer aux standards internationaux. Outre les inspections de routine, il est crucial d'intégrer des inspections programmées, spéciales et approfondies. Ces données doivent être complétées par une auscultation renforcée, incluant l'installation de nouveaux piézomètres, des campagnes topographiques et géophysiques (de type insar ou avec thermosonde), une étude de la fracturation des appuis et une analyse bathymétrique des retenues amont et aval. Ces actions permettront un diagnostic complet de l'état de l'ouvrage.

Le diagnostic de la fissuration et son origine, l'évaluation des dégâts liés à la dégradation des talus et autres crêtes de digues", la vérification des vannes, et le contrôle des effets des termites et végétaux doivent être prioritaires. Un registre de l'exploitant consignait les actions réalisées doit également être mis à jour.

En s'appuyant sur les meilleures pratiques mondiales, des outils innovants d'évaluation de la stabilité des barrages (SFEM), des méthodes d'analyse et de diagnostic des barrages à l'instar de la méthode ADME, il est possible d'élaborer un système robuste. Une gestion proactive et globale de la sécurité des barrages repose sur la combinaison d'inspections régulières, de surveillance avec technologies avancées, de programmes de sécurité, d'études de danger et de plans d'urgence. Enfin, il est "impératif" de développer des normes spécifiques au Cameroun pour améliorer la classification, la surveillance et la gestion des risques liés aux barrages.

REMERCIEMENTS

Ce travail n'aurait pas été possible sans le soutien de :

Monsieur le Directeur général de Electricity Development Corporation, Dr Théodore Nsangou, pour son soutien indéfectible dans le renforcement des capacités des ingénieurs spécialisés dans la sécurité des barrages ;

Messieurs les responsables de la société ENEO, gestionnaire du barrage de Lagdo, pour les accès au site et aux données, ainsi que pour leur accompagnement dans la réalisation de ces travaux ;

Qu'ils en soient ici remerciés.

RÉFÉRENCES ET CITATIONS

1. Comité Français des Barrages et Réservoirs (CFBR). Recommandations pour la justification des barrages et des digues en remblai. Recommandations Octobre 2015. s.l. : CFBR, 2015.
2. Décret n° 2015-526 du 12 mai 2015 relatif aux règles applicables aux ouvrages construits ou aménagés en vue de prévenir les inondations et aux règles de sûreté des ouvrages hydrauliques.
3. Loi sur la sécurité des barrages au Canada, chapitre S-3.1.01, r. 1 de Janvier 2024 relatif au règlement sur la sécurité des barrages.
4. Government of India Central Water Commission Central Dam Safety Organization. Guidelines for Safety Inspection of Dams. 2018.
5. Stéphane Bonelli, K. Radzicki, J. Szczesny, R. Tourment, H. Felix. L'auscultation des barrages en terre : une nécessité. Avril 2010, HAL open science, p. 11.
6. Central water commission, Dam Safety Rehabilitation Directorate. Guidelines for safety inspection of Dams. New Dehli : s.n., 2018.
7. Ministère de l'Environnement, de la Lutte contre les changements climatiques, de la faune et des parcs, Direction de la sécurité des barrages. Sommaire des règlements sur la sécurité des barrages au Quebec. Janvier 2024, p. 10.
8. Le Ministère de l'Environnement, de la Lutte contre les changements climatiques de la faune et des parcs. Règlement sur la sécurité des barrages, Loi sur la sécurité des barrage. 2024, p. 46.
9. Hydroquebec. Surveillance des barrages: Procédures, pratiques, normes, méthode et guide. Quebec : s.n., 2003. p. 12.
10. GKM Consultants. Surveillance géotechnique pour la sécurité.
11. UNEP (Programme des nations unies pour l'environnement). Regulations administration reservoir dam safety. . 1991.
12. Chunhui Ma, Xiaoyan Xu, Jie Yang, Lin Cheng. Surveillance et gestion de la sécurité des réservoirs et des barrages. MDPI, Mars 2023, Vol. 15, 6.
13. Abdoulay, Mfewou. Migrations, dynamiques agricoles et problèmes fonciers dans le Nord-Cameroun-Le périmètre irrigué de Lagdo. s.l. : L'Harmattan, 2011. p. 210.
14. Lautrin, Danielle. Vieillesse et réhabilitation des petits barrages en terre. 2002. p. 239 P.
15. Groupe de TPE, Lycée général Saint-Sermin. TPE Biomimetisme: Les termites. . Toulouse : s.n., 2018-2019.
16. Lenz, Sebastien. Impact des termitières sur les propriétés des sols forestiers tropicaux humides : application au dispositif dynaffor de loundoungou (république du congo). Paris : s.n., 2018. p. 64 P.
17. A. Mouyeaux, C. Carvajal, P. Bressolette, L. Peyras, P. Breul, C. Bacconnet. Analyse probabiliste de la stabilité d'un barrage en terre par éléments finis stochastiques, méthode basée sur les données de terrain. 2018, p. 14.P.
18. Laurent Peyras, Paul Royet et Daniel Boissier. Diagnostic du vieillissement des barrages et analyse des risques : Développement de méthodes pour soutenir le jugement des experts. 2011, p. 38.P.

19. Cemagref. La surveillance et l'entretien des petits barrages. [auteur du livre] Paul Royet. 2006, p. 86.
20. Thomas ADELIN, Michel LINO, Adrien TOWA. Barrage-réservoir de lom pangar : un cas concret d'application de la politique de la banque mondiale en matière de sécurité. Colloque CFBR "Sûreté des barrages et enjeux", Chambéry, 23 & 24 Novembre 2016, 2016.
21. Cemagref. Pathologie des barrages en service et orientation pour la recherche. [auteur du livre] Paul Royet. 2021, p. 21.
22. Chinese dam safety: philosophy and practice. construction, International water power and dam. 1999.
23. Groupe de TPE, Lycée général Saint-Sermin. TPE Biomimétisme: Lest termites. Toulouse : s.n., 2018-2019.