

Mise en sécurité du barrage de Massingir

Safety improvement of Massingir dam

Franck Del Rey

Hydroplus ® - 5, cours Ferdinand-de-Lesseps – 92 851 Rueil-Malmaison Cedex - FRANCE
Téléphone : +33 (0)1 47 16 39 84, Fax : +33 (0)1 47 16 33 00, Courriel : franck.delrey@hydroplus.com

Vasco Munguambe

ARA Sul – 30, avenida Samora Machel – Caixa postal 4033 – Maputo - MOZAMBIQUE
Téléphone : +258 21 31 00 13, Fax : +258 21 30 63 42, Courriel : vmunguambe@tv cabo.co.mz

Louise Moquet

Tractebel Engineering France – Héliopole Bât.G – 33 avenue Georges Pompidou - BP 33 175
31131 Balma Cedex - FRANCE
Téléphone : +33 (0)5 61 24 80 22, Fax : +33 (0)1 41 85 03 74, Courriel : louise.moquet@gdfsuez.com

MOTS CLÉS

Mise en sécurité, réhabilitation, évacuateur de crues, hydraulique, Fusegates®.

RÉSUMÉ

Mise en sécurité du barrage de Massingir

Situé sur la rivière Olifants, un affluent du fleuve Limpopo au Mozambique, le barrage de Massingir fut construit dans les années 1970 principalement pour l'irrigation. ARA-Sul en assure l'exploitation depuis sa mise en service. Suite aux inondations exceptionnelles particulièrement dévastatrices qu'a connues le Mozambique, en février 2000, une révision de l'hydrologie et une mise en sécurité de l'ouvrage se sont avérées indispensables pour exploiter pleinement la capacité du réservoir. La nouvelle crue de projet ne pouvant être évacuée par le déversoir existant, la construction d'un évacuateur auxiliaire devient nécessaire. Différentes conceptions ont été étudiées et comparées pour déterminer celle ayant la plus grande fiabilité, les coûts d'exploitation les plus faibles et les coûts d'investissement les moins importants. Les auteurs se proposent de présenter les avantages et les inconvénients des différents types d'évacuateurs (vanné, à seuil libre, à seuil labyrinthe, digue fusible et hausse fusible). La solution hausse fusible (Fusegates®²) a été retenue par ARA-Sul. Elles basculent, à un niveau d'eau déterminé, uniquement grâce à la force hydrostatique et ne nécessitent ni d'autre source d'énergie, ni d'intervention humaine. Elles combinent donc les avantages du seuil libre, tout en minimisant le niveau des Plus Hautes Eaux. Un seuil équipé de 14 Fusegates est en cours de construction en rive gauche du barrage de Massingir.

ABSTRACT

The Massingir dam is located on the Olifants River, a tributary of the Limpopo River in Mozambique. It was built in the 1970's, primarily to provide water for irrigation of the Lower Limpopo Valley. ARA-Sul operates the scheme since its commissioning. Exceptional floods occurred in Mozambique in February 2000 and caused consequent damages in the Lower Limpopo Valley. A review of hydrology was performed and a dam safety improvement in relation with floods was deemed necessary to allow operating the reservoir at its full capacity. The existing spillway was not able to discharge the new design flood. Therefore the construction of an auxiliary spillway was deemed necessary. Different designs were studied and compared according to the technical feasibility, the reliability, the operating costs and the investment costs. The authors propose to present the advantages and disadvantages of different types of spillways (gated spillway, surface spillway, labyrinth spillway, fuseplug and fusegate). The Fusegates alternative was selected by ARA-Sul. For a determined water level, they overturn by the only hydrostatic force and do not require other energy source or human intervention. They combine the advantages of surface spillway, while minimizing the maximum water level. A weir with 14 Fusegates ® is currently being built on the left bank of the Massingir dam.

² Les noms Hydroplus ® et Fusegates ® sont des marques déposées. Cependant, ils seront écrits sans le ® dans le corps de l'article pour plus de lisibilité.

1. INTRODUCTION

Le barrage de Massingir, exploité par ARA-Sul, a une capacité de plus de 2,8 milliards de m³. Les crues exceptionnelles de 2000 ont mis en évidence la nécessité de mettre à jour l'étude hydrologique au droit du barrage. Cette étude a conclu que l'évacuateur de crues principal était sous-dimensionné par rapport aux crues de dimensionnement mises à jour et qu'il existait un risque important de non-fonctionnement des vannes.

Pour remédier à cette situation, une solution innovante a été retenue visant à construire un évacuateur auxiliaire équipé de Fusegates.

Les auteurs vont, dans un premier temps, présenter l'aménagement de Massingir et, dans un second temps, les différentes solutions étudiées.

2. BARRAGE DE MASSINGIR

Le barrage de Massingir est situé sur la rivière Olifants, un affluent du fleuve Limpopo au Mozambique. Sa construction a débuté en 1972 et a dû être arrêtée en 1977 à cause d'évènements politiques (guerre civile de 1976 à 1992).



Photo 1 : Photo du barrage de Massingir depuis la rive gauche avec vue sur l'évacuateur de crues principal



Photo 2 : Photo du barrage rive droite de Massingir avec vue sur le parement amont

Constitué d'un remblai à noyau argileux, il a une hauteur maximale de 50 m et une longueur d'environ 4 500 m. Sa capacité est de 2,8 milliards de m³ sous la cote de Retenue Normale (125 masl). Il est fondé principalement sur des alluvions en rive droite et sur des grès et des conglomérats de qualité moyenne dans le lit de la rivière en rive gauche.

Il est équipé d'un évacuateur de crues vanné en rive gauche d'une capacité de 6 830 m³/s sous la cote de Retenue Normale (RN). Cet évacuateur est composé de 6 passes de 18 m de large, chacune fermée par une vanne secteur de 11 m de hauteur.

La vocation première du réservoir est de satisfaire la demande agricole située à l'aval et de permettre le développement de nouveaux périmètres irrigués pour une surface totale de 90 000 ha. Le barrage est équipé pour cela de deux conduites sous remblais jouant le double rôle de vidange de fond et de restitution des débits pour la demande aval. La capacité d'évacuation de ces deux conduites est d'environ 1 560 m³/s sous la cote de RN.

Une troisième conduite traverse le remblai en prévision de l'installation d'une usine hydroélectrique.

Dès sa mise en eau, d'importantes percolations ont été observées à travers la fondation en rive droite. Il a alors été décidé de maintenir la retenue à un niveau bas le temps de mettre en œuvre des mesures correctives. Les vannes de l'évacuateur n'ont volontairement pas été installées pour contrôler le réservoir à la cote 115, soit 10 m sous la cote de RN (capacité du réservoir réduite de 1,3 milliards de m³). Le pays étant entré en guerre civile, cette situation a duré une trentaine d'années.

A l'issue de la guerre civile, des études de réhabilitation ont été effectuées avec pour objectif la définition des mesures permettant le rétablissement de la sécurité du barrage et l'exploitation de la capacité totale du réservoir.

Suite à ces études, des travaux de réhabilitation ont été réalisés entre 2004 et 2007 :

- Injection de la fondation du barrage dans certaines zones critiques afin de réduire les infiltrations d'eau;
- Confortement du barrage rive droite par la construction d'un remblai en pied aval avec une ligne de puits de décompression;
- Réhabilitation et montage des vannes de l'évacuateur de crues permettant l'exploitation du réservoir à la RN.



Photo 3 : Photo des vannes de l'évacuateur de crues principal du barrage de Massingir (vue de l'aval)



Photo 4 : Photo des puits de décompression mis en place en pied aval

3. HYDROLOGIE

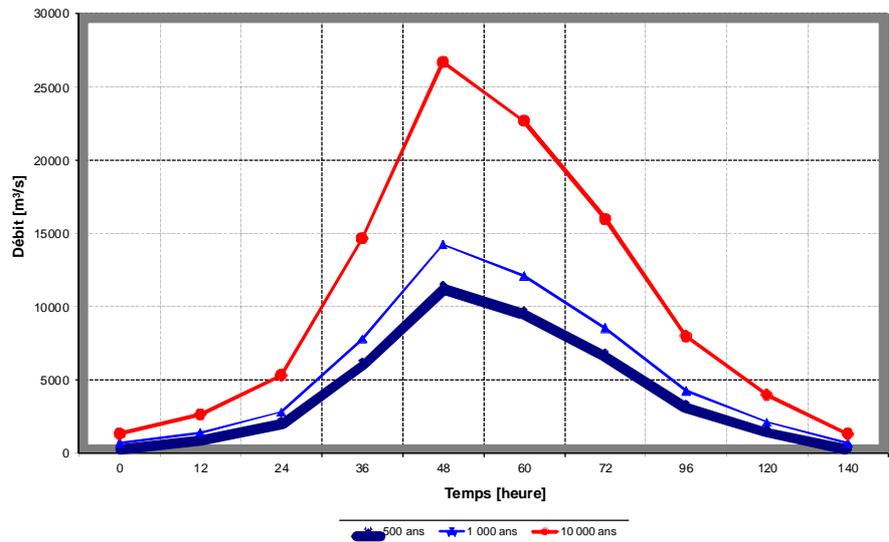
En février 2000, le Mozambique a connu des inondations exceptionnelles particulièrement dévastatrices pour le pays. Un débit de pointe de 15 800 m³/s fut relevé au droit du barrage, valeur nettement supérieure aux 7 700 m³/s de la précédente crue historique de 1977. En l'absence de vanne, le niveau du réservoir était alors très bas ce qui a permis d'amortir considérablement la crue dans le réservoir.

Suite à cet événement, une révision de l'hydrologie s'est avérée indispensable. Cette analyse fut réalisée en 2002 par Coyne et Bellier, préalablement aux travaux de réhabilitation du barrage de Massingir.

Cette mise à jour de l'hydrologie a conduit à des débits de pointe deux fois plus importants que ceux considérés pour le dimensionnement initial. Les hydrogrammes de crues et les nouvelles valeurs sont présentés ci-après :

T ans	Q(T) m ³ /s	V(T) Mm ³
2	660	129
5	1 550	304
10	2 390	468
20	3 390	664
50	5 070	993
100	6 650	1 302
200	8 540	1 672
500	11 540	2 260
1 000	14 260	2 793
2 000	17 420	3 412
5 000	22 340	4 375
10 000	26 710	5 231
20 000	31 700	6 391
Max (PMF)	34 000	6 854

Tableau 1 : Débits de pointe des crues à Massingir



Graphique 1 : Hydrogramme de crues à Massingir pour les périodes de retour 500 ans, 1 000 ans et 10 000 ans.

4. ANALYSE DE LA SECURITE DU BARRAGE

L'actualisation hydrologique a nécessité de réviser la sécurité du barrage vis-à-vis des crues, en tenant compte des recommandations du comité national sud-africain des grands barrages (SANCOLD : South African National Committee on Large Dams). Celles-ci s'appliquent en Afrique Australe et en particulier aux pays frontaliers avec l'Afrique du Sud.

Selon ces recommandations, la vérification du dimensionnement d'un évacuateur de crues doit respecter à minima deux critères :

- Situation exceptionnelle de crue (crue décennale) conduisant à une cote correspondant à la cote des Plus Hautes Eaux (PHE) laissant une revanche pour se protéger des vagues, pouvant être partiellement absorbée. L'évacuateur de crues doit alors répondre à tous les standards de sécurité sur le plan structural comme hydraulique.
- Situation extrême de crue (crue correspondant à la crue maximale probable) conduisant à une cote considérée comme la cote de danger de l'ouvrage. Cette cote doit être inférieure à la cote de crête du barrage pour un barrage en remblais, comme le barrage de Massingir. L'évacuateur de crues ainsi que certaines parties du barrage peuvent alors être endommagés à condition que cela ne mette pas en cause la fonctionnalité de l'évacuateur de crues ni n'amène à la ruine de l'ouvrage.

En prenant en compte les nouveaux éléments hydrologiques, cette vérification a conduit aux recommandations suivantes :

- Rehausse de la cote des PHE à 129,5 m (soit une augmentation de 3,05 m) ;
- Mise en place d'un mur parapet permettant d'augmenter la cote de danger à 131,5 m (soit une augmentation de 1,5 m) ;
- Rehausse du noyau et du filtre/drain afin de garantir l'intégrité du corps du barrage lors d'évènements extrêmes ;
- Construction d'un évacuateur de crues auxiliaire d'une capacité de 9 000 m³/s environ sous la cote des PHE.

5. EVACUATEUR AUXILIAIRE

5.1 Introduction

L'analyse de la sécurité du barrage conduit à recommander la construction d'un évacuateur de crues auxiliaire. Différentes conceptions ont été étudiées en prenant en compte leur fiabilité, leurs coûts d'exploitation et leurs coûts d'investissement.

La comparaison porte sur les solutions d'évacuation des crues, listées ci-dessous et présentées dans les paragraphes suivants :

- Dignes fusibles,
- Fusegates.

Les solutions évacuateurs vannés ou évacuateurs à seuil libre (simple ou labyrinthe) ont été écartées dès la phase préliminaire pour les raisons explicitées ci-après.

5.2 Evacuateurs vannés

Les évacuateurs vannés fournissent une plus grande flexibilité dans la gestion d'une retenue que les évacuateurs non vannés. Lors d'une crue, ils permettent en effet de maintenir le niveau d'eau dans le réservoir proche des PHE et de relâcher progressivement à l'aval le débit excédentaire.

Pour cela, la mise en place d'un système de mesure à l'amont du bassin versant et de procédures strictes pour la gestion de l'évacuateur de crues est nécessaire pour que l'opérateur en charge de l'ouvrage puisse prendre les bonnes décisions en temps réel.

Cependant, ce type d'évacuateur présente une fiabilité moins importante que celle des évacuateurs non vannés. Les principales causes de défaillances peuvent être :

- L'opérateur n'est pas présent dans la salle de commande lors de la crue, car il n'a pu y accéder (inondations, routes bloquées ...),
- Les vannes ne peuvent pas s'ouvrir en raison d'un problème mécanique (éléments endommagés, gonflement du béton, corrosion ...), ou en l'absence d'énergie électrique.

Ce type d'évacuateur est également associé à des coûts de maintenance et d'exploitation relativement élevés.

Cette solution n'est pas recommandée pour l'évacuateur auxiliaire du barrage de Massingir pour lequel un évacuateur de crues indépendant de toute intervention humaine ou mécanique est préférable.

5.3 Evacuateurs à seuil libre

Les évacuateurs à seuil libre offrent la meilleure sécurité vis-à-vis des crues. Ils commencent à fonctionner dès que le niveau d'eau dépasse la cote du seuil fixée à la cote de RN. Le débit est alors fonction de la hauteur d'eau sur le seuil et de la largeur du seuil de l'évacuateur.

La conception initiale du barrage de Massingir a prévu un évacuateur vanné pour optimiser la capacité de stockage en fonction de la hauteur du barrage. Cela se traduit par une différence faible entre le niveau des PHE et le niveau de la RN.

La construction d'un évacuateur auxiliaire à seuil libre aurait nécessité une longueur déversante extrêmement importante et un canal d'évacuation très large pour permettre l'évacuation des crues de dimensionnement. C'est pourquoi, cette solution n'a pas été recommandée pour le barrage de Massingir.

5.4 Evacuateurs labyrinthes

Les évacuateurs labyrinthes consistent en des murs verticaux ayant une géométrie trapézoïdale, permettant d'avoir une longueur développée importante et augmentant ainsi de deux à trois fois la capacité d'évacuation par mètre linéaire d'emprise de l'évacuateur de crues par rapport à un évacuateur de crues à seuil libre classique.

Pour qu'ils puissent fonctionner de manière optimale, les seuils labyrinthes ne doivent pas être noyés (lame déversante trop importante) et nécessitent une base ayant une largeur importante. En effet, à partir du moment où ils sont noyés, leur fonctionnement s'apparentent à celui des évacuateurs de crues à seuil droit.

Cette solution n'a pas été retenue pour le barrage de Massingir du fait de son coût d'investissement.



Schéma 1 : Vue en plan de l'évacuateur labyrinthe projeté (niveau faisabilité)

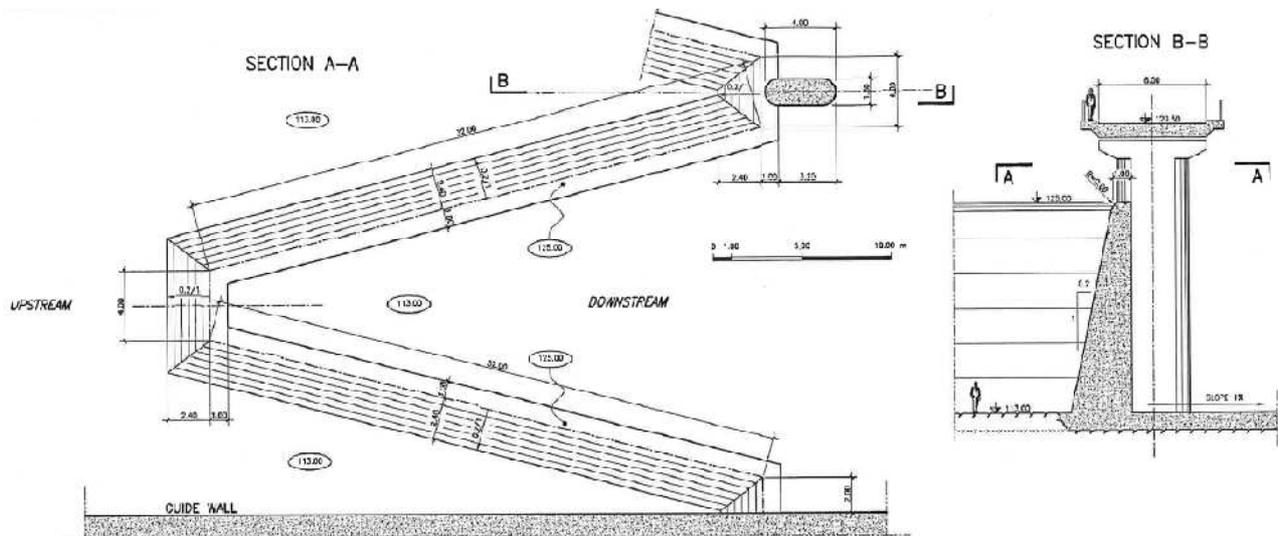


Schéma 2 : Détails (coupe et vue en plan) de l'évacuateur labyrinthe projeté (niveau faisabilité)

5.5 Digos fusibles

Les diges fusibles sont des barrages en remblai censés s'éroder lorsqu'une lame d'eau déverse sur leur crête. Ils sont constitués de matériaux érodables et leur fondation repose sur une dalle béton (pour permettre la reconstruction de la dige après effacement). Des murs peuvent séparer le remblai en différentes parties pour s'assurer que lors d'une rupture, le débit soit relâché progressivement à l'aval.

Un noyau argileux garantit leur étanchéité et s'arrête généralement avant le niveau de la crête de la dige. Le fonctionnement de ces ouvrages repose sur la forte érodabilité du matériau constituant le corps du barrage. Les diges fusibles sont sensibles aux vagues, et des ruptures prématurées peuvent se produire en cas de défaut de l'étanchéité générant un entrainement des matériaux. A contrario, en cas de crues, la dige peut mettre plus de temps que prévu à céder, impliquant ainsi un niveau d'eau plus haut dans le réservoir et des risques de surverse sur le barrage principal.

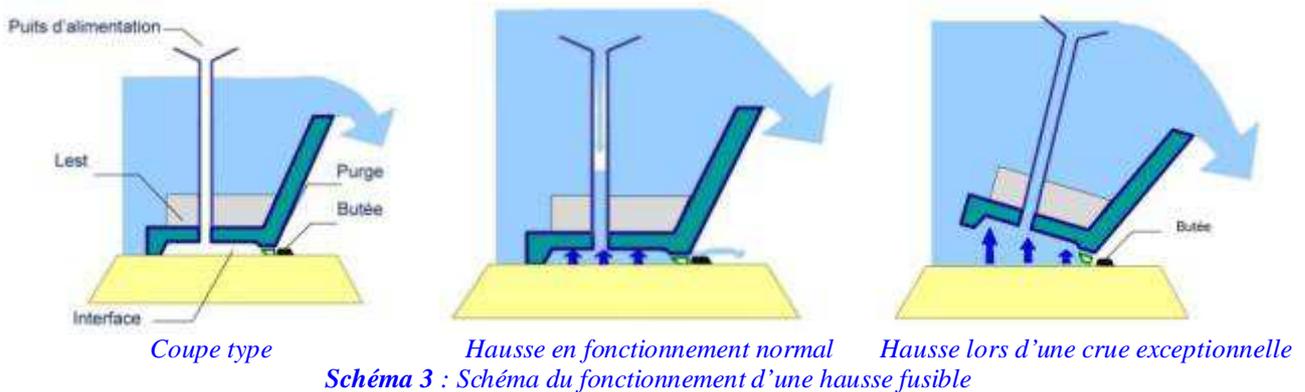
5.6 Hausses fusibles

Une solution couplant les avantages du seuil libre tout en minimisant le niveau des PHE a été élaborée par Hydroplus : le Système Fusegate.

Les Fusegates basculent, à un niveau d'eau déterminé, uniquement grâce à la force hydrostatique et ne nécessitent ni d'autre source d'énergie, ni d'intervention humaine. Elles permettent donc de combiner les avantages des évacuateurs vannés et des évacuateurs à seuil libre.

Pour cela, des modules jointifs et indépendants sont juxtaposés sur le seuil libre du déversoir de manière à former un écran étanche. Les modules sont munis d'une butée à l'aval et lestés afin de rester stables sous la poussée de l'eau. Des purges drainent leurs interfaces avec le seuil évitant ainsi une mise en pression accidentelle. Cette interface est alimentée par un puits. Lorsque le niveau de l'eau dépasse les lèvres du puits, elle met en pression l'interface, apportant ainsi une discontinuité dans l'évolution du rapport des forces. Cela conduit au déséquilibre du module et à son basculement vers l'aval, où il est emporté par le courant.

Les schémas ci-dessous résument ce fonctionnement :



6. COMPARAISON DES DIFFERENTES SOLUTIONS

Dès la phase préliminaire, les solutions évacuateurs vannés et évacuateurs à seuil libre ont été écartées. Les autres solutions étudiées sont présentées ci-après.

6.1 Digues fusibles

6.1.1 Alternative 1 : la digue fusible remplace le barrage de col existant

La digue fusible sera fondée sur des couches d'alluvions et de sables nécessitant un compactage et des injections importantes. Une dalle de 80 cm d'épaisseur garantira la capacité de l'évacuateur après le déclenchement de la digue.

Un canal d'amenée de 600 m de long sera nécessaire pour assurer une section hydraulique critique au droit de la digue. Le canal de fuite, quant à lui, aura une pente de 1% et sera non revêtu. Les schémas ci-après montrent l'implantation de cet ouvrage.

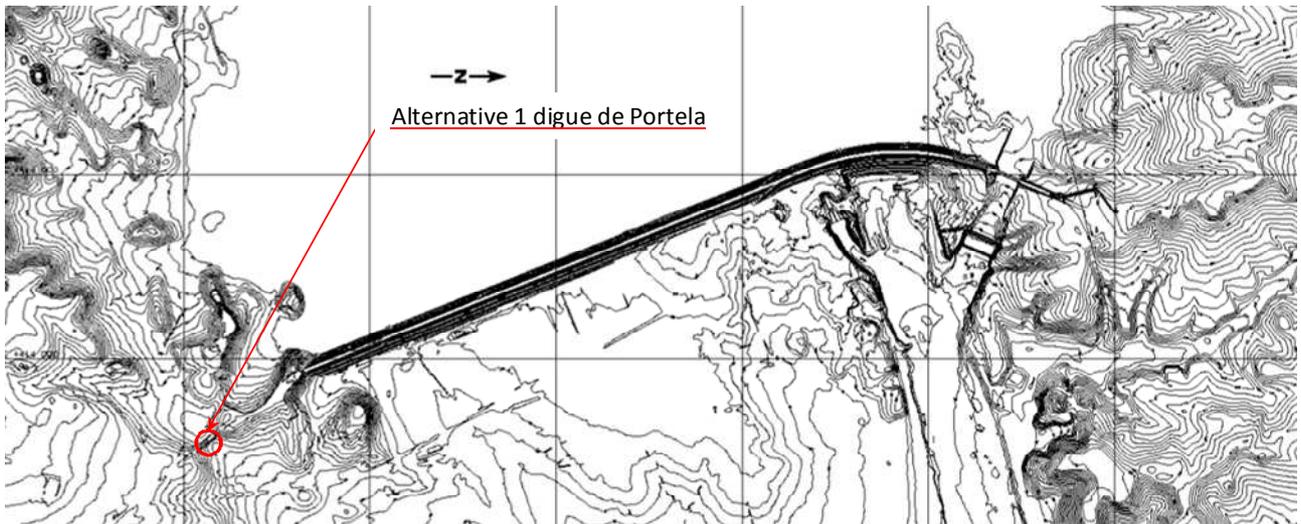


Schéma 4 : Vue en plan de la digue fusible projetée (alternative 1)

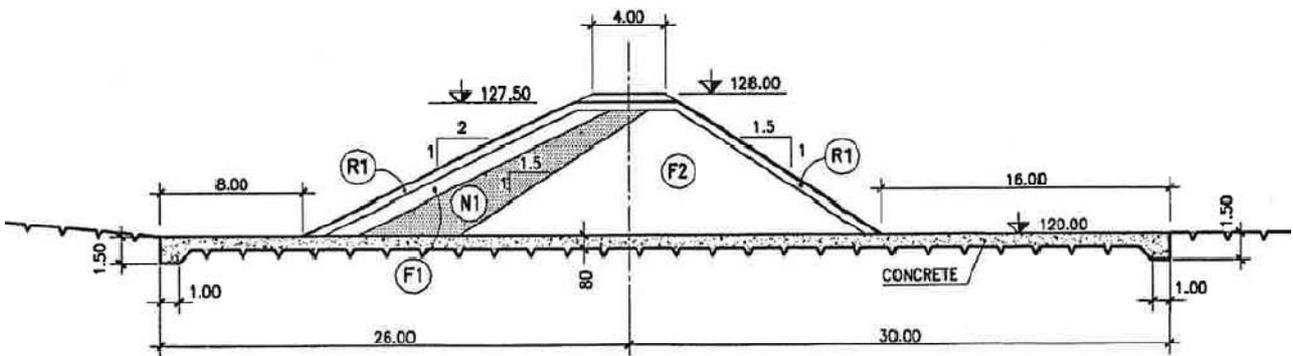


Schéma 5 : Coupe type de la digue fusible projetée (alternative 1 - niveau faisabilité)

6.1.2 Alternative 2 : la digue fusible est positionnée entre la digue de col existante et le barrage

Cette localisation offre des conditions géotechniques meilleures et des volumes d'excavation plus faibles que l'alternative précédente. La digue fusible pourra être fondée directement sur le grès. Les schémas ci-dessous montrent l'implantation de cet ouvrage.

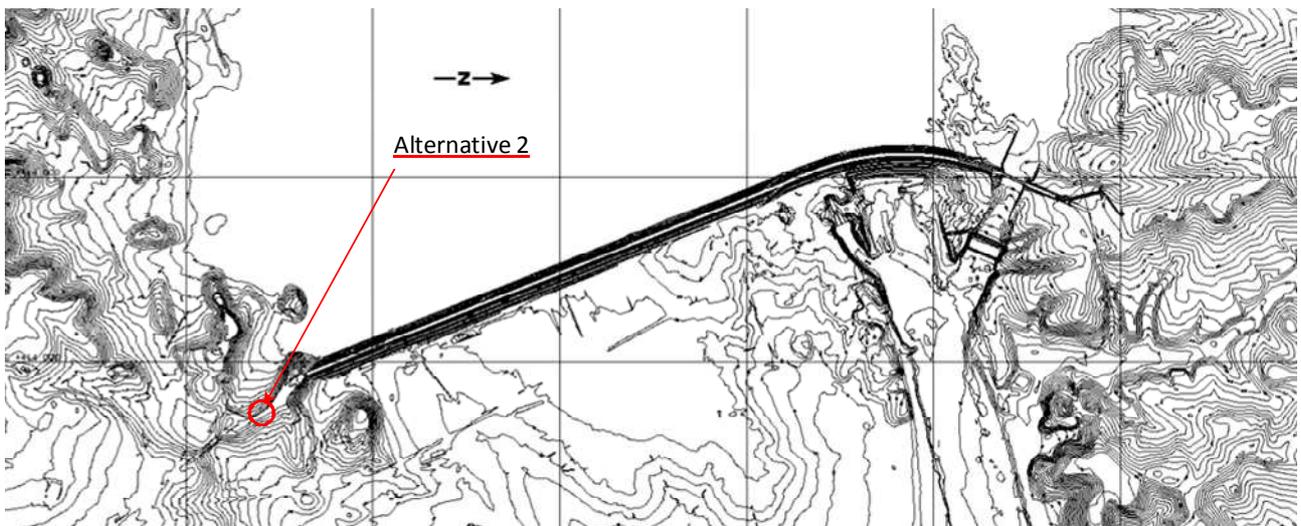


Schéma 6 : Vue en plan de la digue fusible projetée (alternative 2)

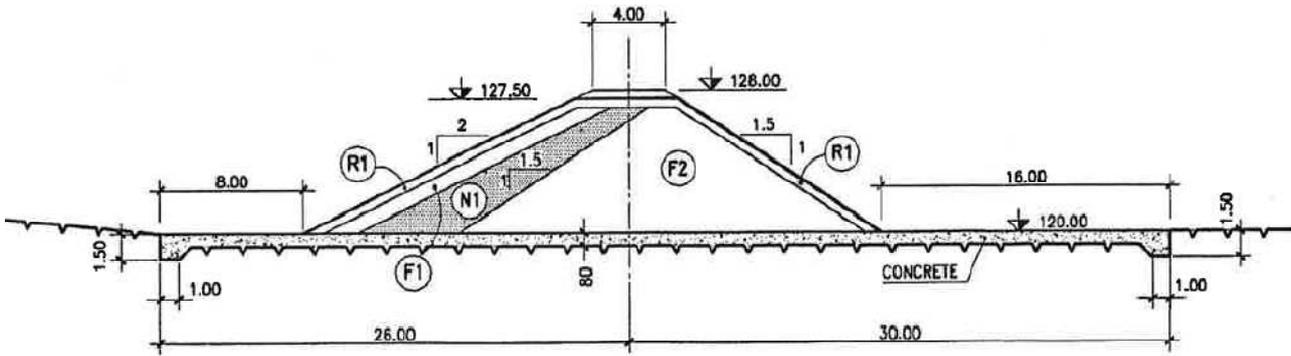


Schéma 7 : Coupe type de la digue fusible projetée (alternative 2 - niveau faisabilité)

6.2 Fusegates

Un déversoir auxiliaire, situé à la cote 120 m, équipé de 14 Fusegates, de 10,85 m de large et de 5,80 m de haut est construit en rive gauche du barrage existant (le choix du positionnement en rive gauche et du pont au-dessus des hausses s'est fait postérieurement au choix du type d'évacuateur de crues). Les Fusegates basculent de manières indépendantes pour des niveaux d'eau déterminés.

Le schéma ci-dessous montre une coupe type du seuil :

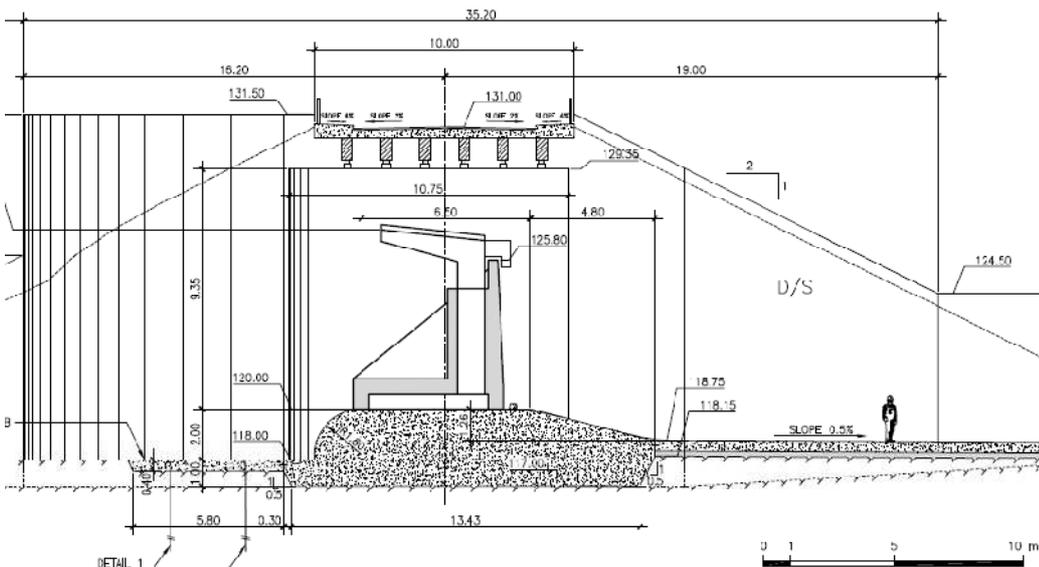


Schéma 8 : Coupe d'une des hausses fusibles projetées (niveau faisabilité)

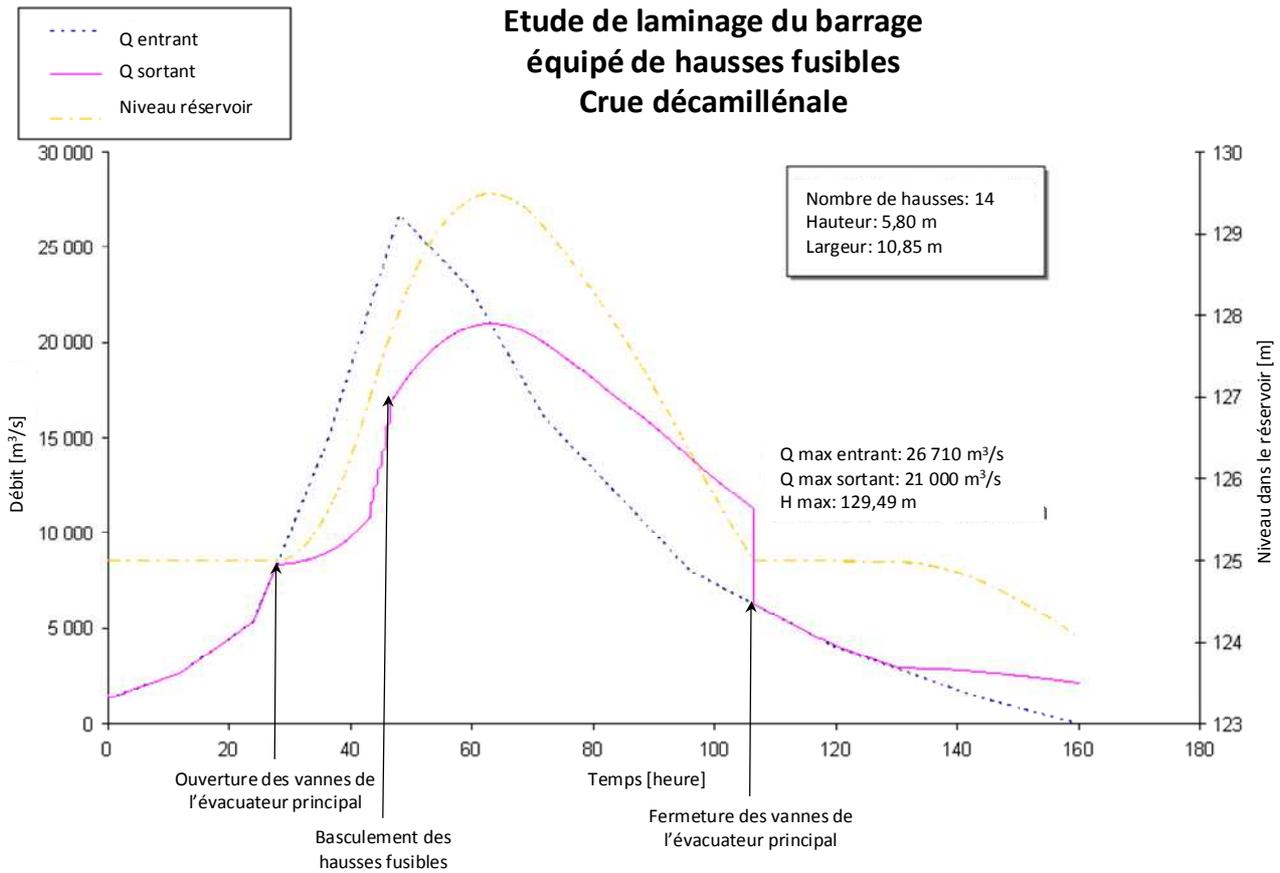
Cette conception permet d'avoir un déversement au-dessus des Fusegates pour les crues ayant une faible période de retour. Pour des crues exceptionnelles, les hausses basculent par groupes permettant ainsi une augmentation progressive du débit évacué à l'aval du barrage.

Quatre séquences de basculements sont prévues :

Séquence de basculement	Niveau de basculement	% du débit relâché après basculement
1	127,00	44% du débit de pointe de la crue maximale probable
2	127,15	46% du débit de pointe de la crue maximale probable
3	127,30	48% du débit de pointe de la crue maximale probable
4	127,45	50% du débit de pointe de la crue maximale probable

Tableau 2 : Description des séquences de basculement des hausses fusibles

L'hydrogramme de la crue maximale probable est le suivant :



Graphique 2 : Résultats de l'étude de laminage pour la crue décennale

6.3 Synthèse

Comme expliqué dans les paragraphes précédents, les solutions de construction d'un évacuateur vanné et d'un évacuateur à seuil libre (simple ou labyrinthe) ont été écartées dès la phase préliminaire.

La digue fusible, quant à elle, n'a pas été jugée, dans le cas qui nous occupe, comme présentant un niveau de fiabilité suffisant.

Le tableau ci-dessous résume la comparaison effectuée entre les différentes alternatives étudiées.

Description	Digue fusible –alt. 1	Digue fusible –alt. 2	Hausse fusible
Estimation du temps de travaux	9 à 12 mois	9 à 12 mois	9 à 12 mois
Maintenance	Moyenne	Moyenne	Moyenne
Fiabilité	Moyenne	Moyenne	Haute
Coût des réparations	Moyen	Moyen	Moyen
Risque géologique	Moyen	Faible	Faible
Coût d'investissement	Moyen	Faible	Moyen

Tableau 3 : Synthèse des alternatives d'évacuateur de crues auxiliaire étudiées

C'est pourquoi, la solution retenue dans le cadre de la mise en sécurité du barrage de Massingir vis-à-vis des crues est la solution de hausses fusibles qui associe un fonctionnement sans intervention humaine lors des crues, une emprise, un coût et des temps de travaux acceptables.

7. CONCLUSIONS

Une comparaison approfondie des différentes solutions a montré que la mise en place de Fusegates permettait la mise en sécurité du barrage de Massingir en répondant tant aux enjeux de fiabilité qu'aux contraintes économiques.

Dans le cadre de ce projet, 14 Fusegates de 5,80 m de haut, surplombés par un pont, équiperont le futur évacuateur. Les interfaces - créant la sous pression nécessaire au déclenchement de la Fusegates - seront alimentées par des puits déportés, disposés sur les bajoyers afin d'améliorer la précision du basculement et de minimiser le risque d'obstruction des passes par des embâcles.

Les photos ci-après montrent les maquettes des futures Fusegates :



Photo 5 : Présentation du modèle physique hydraulique réalisé par Hydroplus