

## ST-FERREOL : LE PLUS VIEUX BARRAGE DE FRANCE CHALLENGE PAR L'ATB 2018

### *St Ferréol: the oldest dam in France challenged by the technical decree on dams dated 6 August 2018*

**Romain THURIOT, Marc-Henri PROST,**

ISL ingénierie, 65 avenue Clément Ader, 34000 Castelnau-le-Lez  
[thuriot@isl.fr](mailto:thuriot@isl.fr) ; [prost@isl.fr](mailto:prost@isl.fr)

**Laurence BARRERE,**

VNF Toulouse,  
[laurence.barrere@vnf.fr](mailto:laurence.barrere@vnf.fr)

## MOTS CLEFS

Barrage mixte remblai/maçonnerie, Etude de Dangers, Arrête Technique Barrage, étude de stabilité, marges de sécurité, érosion

## KEY WORDS

Mixed embankment/masonry dam, Danger Study, technical decree on dams, stability study, safety margins; erosion

## RÉSUMÉ

*Le barrage de Saint Ferréol a connu de nombreux désordres dès sa construction, notamment des fuites dues à des gradients hydrauliques élevés, compromettant sa sécurité dès 1691. Des réparations ont été nécessaires au XVIIIe siècle, comme le déplacement des robinets de prise et des renforcements sur le mur. Malgré ces interventions, le barrage a continué à présenter des instabilités et des défauts d'étanchéité. Des travaux supplémentaires ont été effectués au XIXe siècle et en 2005 pour améliorer l'étanchéité. Les modifications successives étaient souvent des mesures d'urgence, reflétant un manque de connaissances hydrauliques à l'époque.*

*L'Etude de dangers de 2013 et sa mise à jour en 2024 ont révélé des insuffisances de sécurité. Plusieurs parties du barrage ne respectent pas les recommandations du CFBR, notamment en cas de crue exceptionnelle, en situation normale, ou lors de la vidange. Bien que le barrage présente des faiblesses, il a résisté pendant près de quatre siècles sans ruine partielle ou totale, malgré les désordres traités au fil du temps, il est donc apparu nécessaire de prendre en considération cette longévité dans l'analyse de conformité à l'Arrêté Technique Barrages, réalisée dans le cadre de l'Etude de Dangers de 2024.*

*L'une des principales faiblesses est la stabilité du remblai aval du barrage. Les marges de sécurité ont été évaluées par rétrocalage sur l'historique de l'ouvrage, ce qui a permis d'évaluer les probabilités annuelles de rupture actuelles (après confortement par mise en place d'une paroi moulée). La probabilité de glissement du remblai demeurant supérieure à la probabilité de rupture maximale imposée par l'Arrêté Technique Barrage, une approche de la probabilité de rupture de l'ouvrage par la méthode des nœuds papillon a été menée. Des investigations ont également été conduites pour déceler d'éventuelles marges de sécurité cachées sur le mur aval.*

*L'analyse des risques a conduit à estimer que la criticité du scénario de rupture du barrage par instabilité était supérieure à ce qui est imposé dans l'ATB et à définir des mesures de réduction des risques, la principale étant la mise en place d'un dispositif de suivi des déformations du remblai aval. L'application des mesures de réduction des risques définie permettrait de réduire la criticité du scénario de rupture du barrage par instabilité à un niveau acceptable et de se conformer au cadre réglementaire.*

## ABSTRACT

*The Saint Ferréol Dam has faced numerous issues since its construction, including leaks caused by high hydraulic gradients, compromising its safety as early as 1691. Repairs were necessary in the 18th century, such as relocating intake valves and reinforcing the wall. Despite these interventions, the dam continued to experience sealing defects. Additional work was carried out in the 19th century and in 2005 to improve its waterproofing. These successive modifications were often emergency measures, reflecting a lack of hydraulic knowledge at the time.*

*The 2013 Risk Assessment Study and its 2024 update revealed significant safety deficiencies. Several parts of the dam do not meet the CFBR recommendations, especially during exceptional floods, normal operations, or during drawdowns. Although the dam exhibits weaknesses, it has withstood nearly four centuries without partial or total failure. This longevity was considered in the 2024 Risk Assessment Study's analysis of compliance with the Technical Dam Decree (ATB).*

*One of the primary weaknesses identified is the stability of the dam's downstream embankment. Safety margins were evaluated through back-calculations based on the dam's historical performance, allowing an assessment of the current annual probabilities of failure (following reinforcement with a diaphragm wall). Despite this, the probability of embankment sliding remains higher than the maximum allowable probability of failure under the ATB. A fault tree analysis was conducted to estimate the overall failure probability of the structure. Investigations were also carried out to identify potential hidden safety margins in the downstream wall.*

*The risk analysis concluded that the criticality of the dam's failure scenario due to instability exceeds the ATB requirements, leading to the definition of risk mitigation measures. The main recommendation is to implement a monitoring system for deformation in the downstream embankment. Applying these risk reduction measures would reduce the criticality of the dam's failure scenario to an acceptable level, ensuring compliance with regulatory standards.*

### 1. PRESENTATION DU BARRAGE DE SAINT FERREOL

Le barrage de St Ferréol est le plus ancien des barrages français. Les ouvrages furent exécutés sous la direction même de Riquet, probablement de 1667 à 1675. Il a été conçu pour alimenter le canal du Midi depuis la loi du 27 novembre 1897 qui acte le rachat du canal du Midi par l'Etat et rentrant en application le 1 juillet 1898. Le service des canaux du Midi et du canal latéral sera créé et aura la gestion du canal.

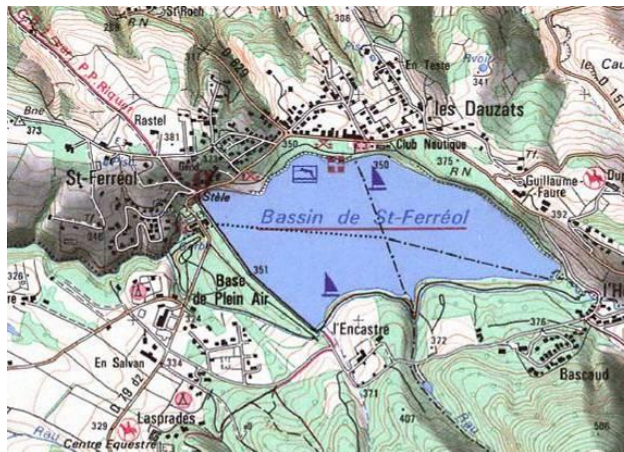
Le barrage de Saint Ferréol est une digue en terre dont l'étanchéité était initialement assurée par un mur central en maçonnerie, dénommé Grand Mur. L'ouvrage comporte également un mur amont (immergé) et un mur aval qui joue un rôle de soutènement des remblais.

L'ouvrage barre la vallée du Laudot sur une largeur de 786 m. La vallée comporte une partie encaissée, le Goulet du Laudot ; la hauteur maximale du barrage sur le thalweg est égale à 32 m sur le terrain naturel et 35 m sur sa fondation.

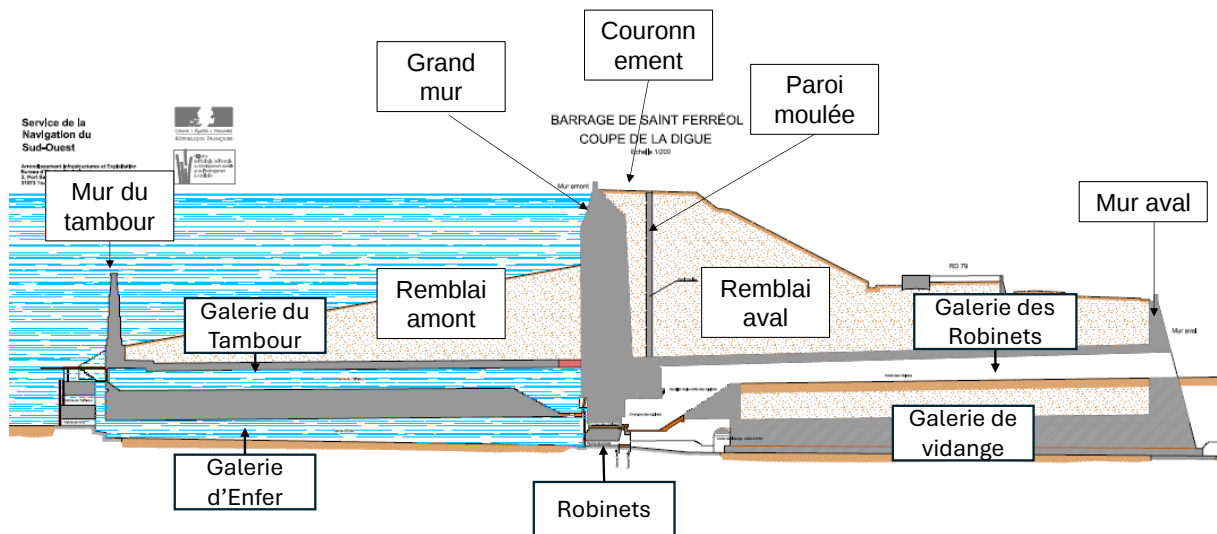
Sous la cote de retenue normale (347,20 m NGF), il permet de constituer une retenue de 58 ha correspondant à un volume de 5,1 millions de m<sup>3</sup>. Il contrôle un bassin versant de 10,7 km<sup>2</sup>.

Le barrage est équipé de plusieurs ouvrages hydrauliques qui assurent les rôles de prise d'eau (vannes de Labadorque) et de vidange (vannes de fond dites AMRI et NELES). Ces ouvrages concourent également à l'évacuation des crues en compléments d'un évacuateur de crues de surface vanné en rive droite.

Les illustrations suivantes présentent la localisation du barrage et de sa retenue, quelques photographies de l'ouvrage et sa structure au droit du goulet du Laudot.



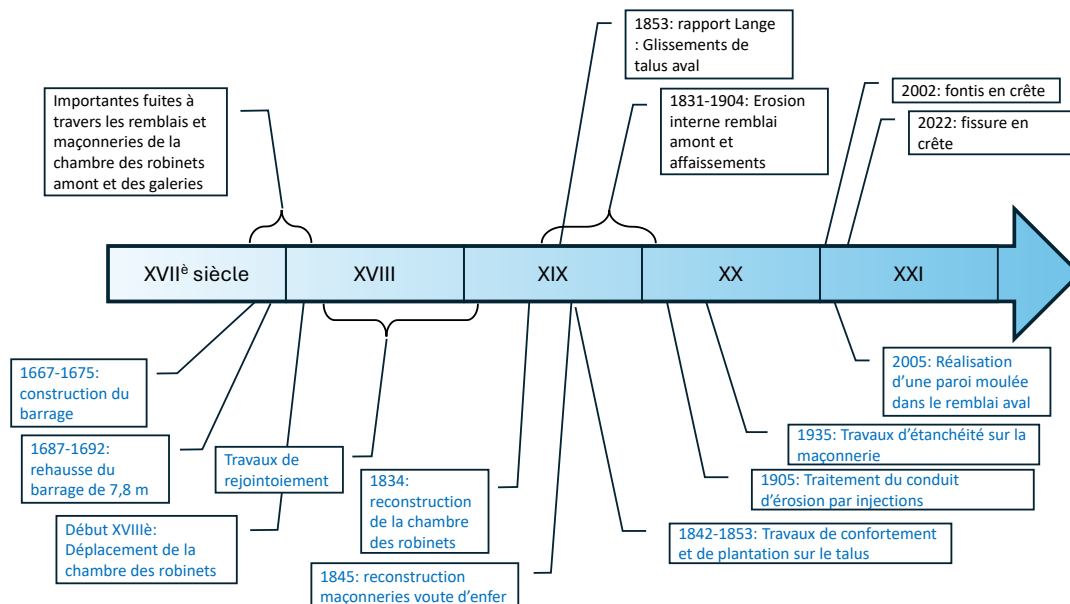
Localisation du barrage



Coupe type du barrage dans sa configuration actuelle

## 2. UN OUVRAGE EN EVOLUTION DEPUIS SA CONSTRUCTION

La frise ci-dessous illustre les principaux désordres observés sur le barrage (en partie haute) ainsi que les campagnes de travaux les plus significatives qu'il a connues au cours de son histoire.



Le barrage a connu de nombreuses pathologies dès sa construction, qui ont conduit à modifier la coupe type même de l'ouvrage.

Le barrage a été construit avec des robinets de prise d'eau situés à l'amont des galeries, ce qui conduisit à des gradients hydrauliques très importants au travers du remblai amont et des fuites conséquentes dans les galeries. Peu après la première mise en eau, la sécurité même des ouvrages s'est-elle trouvée compromise : un document d'archives, daté de 1691, fait état de « réparations qui sont à faire à Saint-Ferréol », précisant « qu'il est de toute nécessité de travailler à déblayer les terres qui sont sur la voûte de vidange depuis la partie muraille du tambour pour pouvoir raccommoder plusieurs endroits où il y a de grandes transpirations, que les piédroits de la voûte ne viennent à crouler et ne causent de grands fracas ».



Figure 1 : Coupe initiale de la digue (Bibliothèque d'Etude et du Patrimoine, Toulouse)

La situation est allée en s'aggravant, car à la date du 25 octobre 1710, nous trouvons le devis d'un entrepreneur « pour la réparation qu'il est nécessaire de faire au mur des robinets de Saint-Ferréol dont les transpirations sont si abondantes qu'elles vident le réservoir ».

Ces désordres ont conduit, au début du XVIII<sup>e</sup> siècle, à déplacer les robinets de prise à l'axe du barrage, au droit du Grand Mur, comme illustré sur la coupe du barrage ci-dessous dont la date d'édition est estimée aux alentours de 1770.

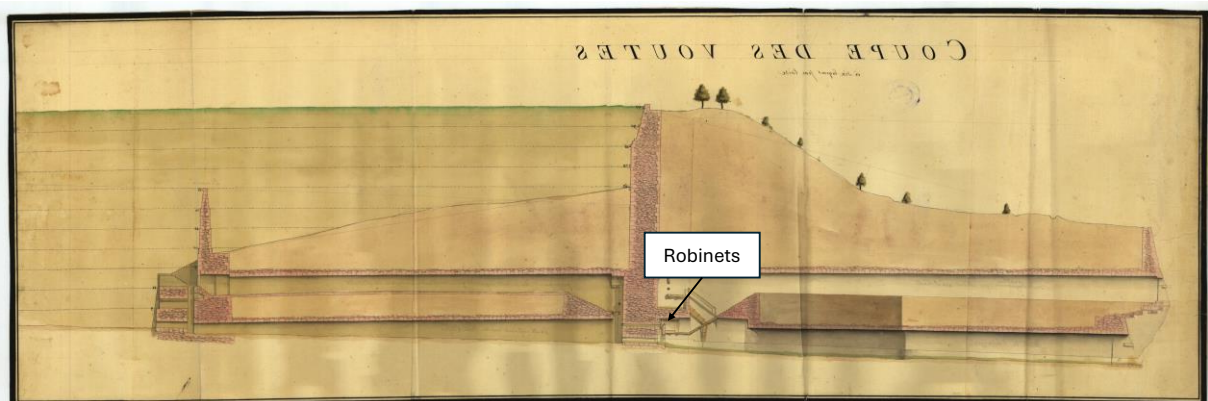


Figure 2 : Coupe du barrage vers 1770 (ACM, Fat402-13, Voies navigables de France, archives des canaux du Midi. [3])

Le rapport Lange de 1853 rappelle les importantes réparations effectuées dans la première partie du XIX<sup>e</sup>me, sur les maçonneries de la chambre et du mur des robinets, motivées par les fuites à travers ce mur. Conformément aux propositions de M. Lange, on a soigneusement rejointoyé ou enduit en ciment tous les parements qu'il a été possible d'atteindre sans déblais et notamment le parement amont du Grand Mur dans toute la partie apparente. Ce travail a été fait progressivement jusque vers 1883.

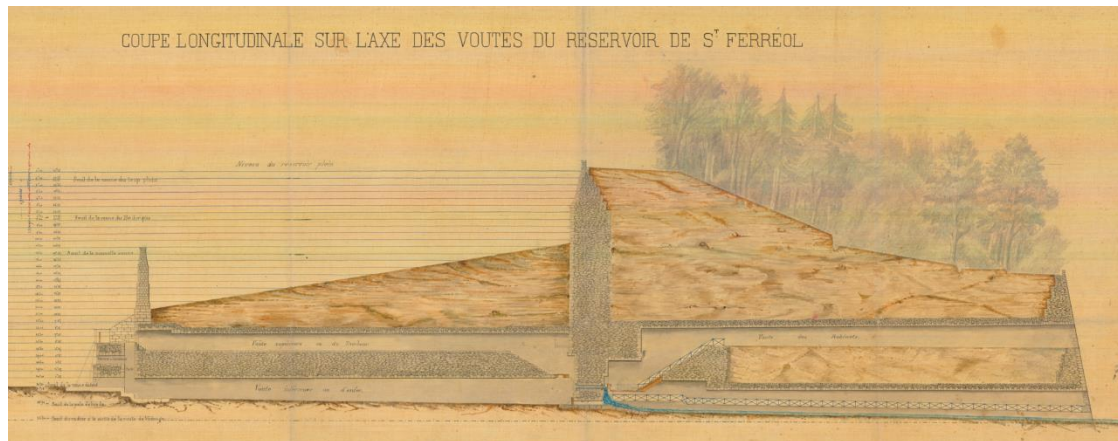


Figure 3 : Coupe type du barrage vers 1860 (ACM, Fat402-28), Voies navigables de France, archives des canaux du Midi. [3])

Le mauvais fonctionnement du barrage s'est également manifesté de façon chronique par des instabilités du talus aval et des effondrements dans le talus amont, sous l'action des écoulements internes et d'une piézométrie élevée dans le remblai aval.

Des travaux de soutènement et de remblaiement, ainsi que des plantations, ont été réalisés de 1842 à 1853 suivant les propositions de M. Lange qui, dans son rapport reste réservé sur le comportement ultérieur du talus aval.

Le défaut avéré d'étanchéité du Grand Mur a finalement conduit VNF à engager des travaux visant à améliorer l'étanchéité de l'ouvrage en 2005. Une paroi moulée a ainsi été mise en œuvre en arrière du Grand Mur au sein du remblai qui épaula le mur à l'aval. La crête de cette recharge en remblai est calée au même niveau que celle du Grand Mur (hors parapet maçonné). Le dispositif d'auscultation présent sur le barrage a permis de vérifier que cette paroi moulée rabattait efficacement les sous-pressions dans le remblai aval.

En conclusion, bien que certains grands travaux sur l'ouvrage aient été destinés à en améliorer l'exploitation (augmentation du niveau de la crête en 1687 ; reconstruction de la chambre des robinets en 1834 pour la rendre plus spacieuse), il apparaît que dans les premiers siècles de la vie de l'ouvrage, ses évolutions successives ont principalement été motivées par l'apparition de désordres qui nécessitaient des travaux d'urgence curatifs, plus que par la volonté de se conformer à un état de l'art et encore moins un contexte normatif. Ces ajustements résultent vraisemblablement de l'absence de connaissances bien établies sur le comportement hydraulique des barrages (à fortiori sur ce type d'ouvrage « mixte » mêlant la maçonnerie et le remblai). Cet historique est l'une des raisons expliquant la difficulté à justifier la sûreté de l'ouvrage à travers le prisme du contexte normatif actuel.

### 3. DIFFICULTES A S'INSCRIRE DANS LE CADRE NORMATIF DEFINI PAR L'ARRETE TECHNIQUE BARRAGE (ATB) DU 6 AOUT 2018

La première Etude de Dangers (EDD) du barrage de Saint Ferréol a été réalisée en 2013 [4]. Dans le cadre de l'actualisation de l'EDD réalisée en 2024 [6], une analyse de la conformité à l'ATB a été menée.

D'après l'ATB, la stabilité du barrage doit être assurée « avec des marges suffisantes » dans l'ensemble des situations de projet concernant l'ouvrage. Le barrage de Saint Ferréol étant un ouvrage mixte en maçonnerie et remblai, les marges de sécurité ont été comparées à celles recommandées dans les ouvrages du CFBR ([1] ; [2])

Les études de stabilité menées ont montré que plusieurs parties d'ouvrage présentaient des marges de sécurité en-deçà des recommandations du CFBR pour certaines situations de projet, notamment :

- A son niveau de Retenue Normale historique (anciennement à 348,90 m NGF jusqu'en 2005), le barrage ne respectait pas les critères de revanche en crue exceptionnelle.
- En situation normale d'exploitation et en situation exceptionnelle de crue, la stabilité du talus ainsi que celle du mur aval est insuffisante

- En situation transitoire de vidange, la marge de sécurité du Grand Mur est en deçà des recommandations en ce qui concerne l'état limite de résistance à la compression (limité par la résistance à la compression de la maçonnerie). Selon la vitesse de vidange, la stabilité d'ensemble du Grand mur est par ailleurs insuffisante en comparaison aux marges de sécurité recommandées.
- La situation de dégradation de l'étanchéité a été évaluée en considérant une perte de l'étanchéité de la paroi moulée mise en œuvre en 2005. En l'absence de ce composant, on retrouve les conditions défavorables de piézométrie dans le talus qui conduisent à dégrader d'avantage la stabilité d'ensemble de cette partie d'ouvrage.

Concernant la stabilité des remblais, sa justification est pénalisée par le caractère très hétérogène du remblai (tant en compacité qu'en nature de matériau), qui conduit à retenir des hypothèses sécuritaires sur les caractéristiques mécaniques en grand du matériau.

Il apparaît donc que la connaissance actuelle de l'ouvrage ne permet pas de démontrer la conformité aux règlements et recommandations actuelles servant de base à l'appréciation de la conformité aux exigences de l'ATB. Il serait toutefois réducteur de s'arrêter à cette conclusion, sans avoir pris en considération les raisons qui ont assuré à l'ouvrage sa longévité : en effet, bien que plusieurs instabilités localisées et désordres significatifs liés à l'érosion interne aient été observés et traités au cours de sa vie, ces derniers n'ont jamais conduit à la ruine partielle ou totale du barrage en près de 4 siècles.

## **4. APPROCHES MENEES POUR EVALUER LA CONFORMITE DE L'OUVRAGE AU CADRE REGLEMENTAIRE**

### **4.1. Etudes de stabilité du talus aval**

Les études de stabilité menées en 2017 sur le talus aval [5], en employant les recommandations CFBR, ont mis en évidence une stabilité en retrait des attentes. Basées sur l'ensemble des reconnaissances géotechniques réalisées depuis 1993, les caractéristiques mécaniques à long terme des matériaux considéraient une cohésion de 10 kPa et un angle de frottement interne de 28°. Le facteur de sécurité ainsi obtenu pour la situation normale d'exploitation (avec la paroi moulée) était de 0,96 pour une cible de 1,2.

Afin de pouvoir apprécier la marge disponible, le calcul avait également été mené sans prendre en compte de coefficient partiel et conduisait à un facteur de sécurité de 1,2.

Conformément aux recommandations du CFBR [2], §4.4.4, il a été tenu compte du REX sur la durée de vie de l'ouvrage pour moduler l'évaluation de la stabilité du talus :

- Par évaluation du gain sur le facteur de sécurité apporté par les travaux de confortement,
- Par rétro-calage des caractéristiques mécaniques des matériaux,
- Par l'évaluation des probabilités de rupture déduite du REX.

Ces points sont détaillés ci-après.

#### Gain sur le facteur de sécurité apporté par les travaux de confortement

Le gain apporté par les travaux de mise en œuvre de la paroi moulée en 2004 a été apprécié en calculant (sans coefficient partiel) le facteur de sécurité associé à la situation sans paroi. Ce dernier était de 0,95 ce qui permettait d'associer un gain en stabilité pour le talus aval de l'ordre de 20% grâce aux travaux.

#### Tentatives de rétrocalage

Dans le cadre de l'actualisation de l'EDD, les études de stabilité ont été reprises pour essayer de mieux qualifier le niveau de stabilité de l'ouvrage ainsi que la sensibilité à la nature des matériaux (cohésifs ou frottants).

Un premier rétrocalage a été mené sans prendre en compte de coefficient partiel en essayant d'obtenir un coefficient de sécurité de 1,2 censé rendre compte de la stabilité historique de l'ouvrage au fil des ans. Cette démarche conduit à 3 couples de valeurs possibles pour les caractéristiques mécaniques des matériaux :

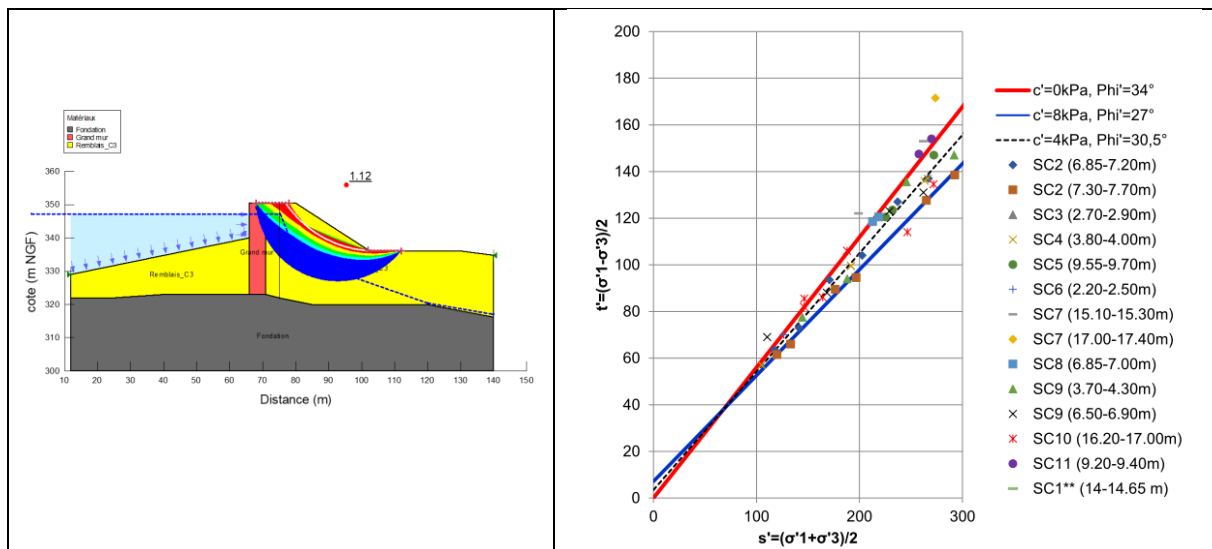
| Jeu de paramètre | Cohésion long terme (kPa) | Angle de frottement long terme (°) |
|------------------|---------------------------|------------------------------------|
| Cohésif          | 17                        | 28                                 |
| Intermédiaire    | 9                         | 33                                 |
| Frottant         | 0                         | 39,5                               |

Ces caractéristiques mécaniques sont globalement bien trop élevées pour pouvoir correspondre aux matériaux observés dans les carottes.

La même démarche menée avec pour objectif un facteur de sécurité de 1 conduit aux résultats suivants :

| Jeu de paramètre | Cohésion long terme (kPa) | Angle de frottement long terme (°) |
|------------------|---------------------------|------------------------------------|
| Cohésif          | 8                         | 27                                 |
| Intermédiaire    | 4                         | 30,5                               |
| Frottant         | 0                         | 34                                 |

Ces paramètres s'accordent plutôt bien aux résultats des essais triaxiaux disponibles. Ces derniers sont présentés sur le graphique suivant dans un diagramme de Lambe (centré sur les niveaux de contraintes correspondant à la hauteur de l'ouvrage) avec les droites correspondant aux trois jeux de paramètres modélisés.



#### Prise en compte du REX de la durée de vie de l'ouvrage

Le REX positif sur la durée de vie de l'ouvrage implique une probabilité annuelle d'instabilité de talus qui peut être approchée en utilisant les fréquences empiriques.

Ainsi en considérant une probabilité annuelle  $P_a$  de survenue d'un événement, sur une durée de vie de  $T$  années, la probabilité  $P_{sur T}$  que le dit événement survienne s'exprime par la formule suivante :

$$P_{sur T} = 1 - (1 - P_a)^T$$

En considérant une durée de 320 ans (de la construction du barrage à la réalisation des travaux de paroi moulée) il vient donc :

- Si on considère  $P_a = 2.10^{-3}$  alors la probabilité d'avoir déjà eu un glissement sur 320 ans est de 47% (on avait 1 chance sur 2 de ne pas avoir eu de glissement)
- Si on considère  $P_a = 10^{-2}$  alors la probabilité d'avoir déjà eu un glissement sur 320 ans est de 96% (on avait 1 chance sur 20 de ne pas avoir eu de glissement)

On peut donc considérer en première approche une fourchette plausible et prudente de la probabilité de glissement de talus entre  $10^{-2}$  et  $2.10^{-3}$ .

Ces valeurs s'écartent des objectifs poursuivis pour des ouvrages de classe A existant. Une probabilité annuelle de rupture inférieure à  $10^{-4}$  étant recherchée dans l'ATB (item 24).

Le SYMADREM a proposé pour ses systèmes d'endiguement une approche qui peut être adoptée pour la présente étude (après adaptation). Cette approche consiste à évaluer la probabilité de rupture associée aux facteurs de sécurité totaux obtenus, en s'appuyant sur l'hypothèse que la probabilité de rupture recherchée dans les différents cas de charge proposée par le CFBR est de  $10^{-4}$  pour les digues.

Cette approche est transposée aux barrages en considérant une probabilité de rupture recherchée au plus de l'ordre de  $10^{-5}$  (en cohérence avec l'ATB, qui impose une probabilité de  $10^{-4}$  de la crue exceptionnelle pour les barrages de classe A en remblai, avec une marge de sécurité dans cette situation).

Les facteurs de sécurité obtenus par l'analyse sans coefficients partiels peuvent être comparés aux facteurs de sécurité ci-dessous, obtenus par multiplication des coefficients partiels et de modèle préconisés par le CFBR. Si l'approche n'est pas mathématiquement exacte, elle conduit à une approximation pertinente.

Une probabilité conditionnelle est ensuite affectée à chaque facteur de sécurité afin d'obtenir une probabilité totale de  $10^{-5}$  pour chaque situation.

| Situation                     | Facteur de sécurité | Probabilité de la situation <sup>1</sup> | Probabilité associée au facteur de sécurité |
|-------------------------------|---------------------|------------------------------------------|---------------------------------------------|
| <b>Normale</b>                | 1,50 (1,25 x 1,20)  | 1                                        | $10^{-5}$                                   |
| <b>Rare</b>                   | 1,44 (1,20 x 1,20)  | $10^{-1}$                                | $10^{-4}$                                   |
| <b>Exceptionnelle de crue</b> | 1,32 (1,2 x 1,1)    | $10^{-4}$                                | $10^{-1}$                                   |
| <b>Extrême de crue</b>        | 1,10 (1,1 x 1)      | $10^{-5}$                                | $>10^{-1}$                                  |

Tableau 1 : Estimation des probabilités associées aux situations de calcul du CFBR

L'analyse du retour d'expérience a conduit à borner la probabilité de glissement de talus de l'ouvrage entre  $10^{-2}$  et  $2.10^{-3}$ . Ce retour d'expérience conduirait, d'après le tableau précédent, à estimer le coefficient de sécurité compris entre 1,32 et 1,44 pour le calcul mené pour la RN historique.

Cela confirme le décalage entre les résultats des calculs selon les recommandations CFBR et le retour d'expérience sur l'ouvrage. En dépit de ce décalage, on peut toutefois noter qu'une augmentation de 20% du facteur de sécurité correspond à un gain de probabilité d'au moins un ordre de grandeur.

L'ajout de la paroi moulée a amélioré de l'ordre de 20% le facteur de sécurité associé au glissement du talus du profil 2. A partir des éléments du Tableau 1, on peut estimer que cette augmentation permet de réduire d'un ordre de grandeur la probabilité de glissement du talus.

En appliquant cette réduction à la fourchette de probabilité empirique estimée précédemment, il vient que la probabilité de glissement du talus aval peut être estimée comprise<sup>2</sup> entre  $10^{-3}$  et  $2.10^{-4}$ . Cette situation de défaillance rentre donc dans le cadre de l'item 24 de l'ATB « L'étude de dangers du barrage justifie la sécurité de celui-ci pour les situations anormales rares suivantes dès lors que de telles situations ont une probabilité de se produire chaque année qui est supérieure à  $10^{-4}$  si le barrage est de classe A ». Il est donc nécessaire

<sup>1</sup> Les probabilités des situations exceptionnelle et extrême de crue reportées dans le tableau sont déduites de l'ATB, pour un barrage en remblai de classe A (période de retour de la crue exceptionnelle de 10 000 ans, période de retour de la crue extrême de 100 000 ans).

<sup>2</sup> Compte tenu des incertitudes, la classe de probabilité correspondant à la borne supérieure de probabilité ( $10^{-3}$ ) a été retenue dans les analyses de l'Etude de Dangers, de façon sécuritaire (classe F3, cf. §0)

d'approfondir l'analyse notamment en évaluant l'impact d'un glissement du talus aval sur la sûreté du barrage, comme exposé au chapitre suivant.

#### 4.2. Appréciation des réserves de sécurité

Il est apparu nécessaire de prendre en considération l'historique de l'ouvrage pour en justifier la pérennité, dans sa configuration actuelle. Le problème a été étudié selon plusieurs échelles :

- A l'échelle du barrage vu comme la somme de ses composants ;
- A l'échelle du composant de l'ouvrage

A l'échelle du barrage vu comme la somme de ses composants, une « réserve de sécurité » supplémentaire a été mise en évidence. Bien que les différents composants du barrage soient dépendant les uns des autres pour assurer leur stabilité (par exemple, le remblai aval assure une butée au grand mur, et est lui-même soutenu par le mur aval), les mécanismes de rupture les plus probables des différents composants ne conduisent pas nécessairement à la ruine totale de l'ouvrage :

- Grâce à la largeur du remblai aval, le mécanisme de glissement du remblai aval évoqué au paragraphe 0 laisse un volume significatif de remblai en butée du grand mur ;
- La rupture totale du mur aval condamne l'accès aux galeries et donc à la vidange, mais n'entraîne vraisemblablement qu'une partie du remblai aval (coin de poussée soutenu) situé en arrière de celui-ci et la ruine du barrage est estimée peu probable ;
- Le risque de rupture du Grand Mur n'est significatif qu'en vidange et en cas de rupture (basculement vers l'amont), seul le coin de poussée correspondant du remblai aval serait vraisemblablement emporté, laissant une section suffisante de remblai pour ne pas conduire à la ruine de l'ouvrage (Figure 4) ;
- La rupture d'une ou plusieurs galeries entraînerait probablement des désordres sur les remblais sus-jacents mais la probabilité que cela entraîne la rupture du Grand Mur est estimée très faible.

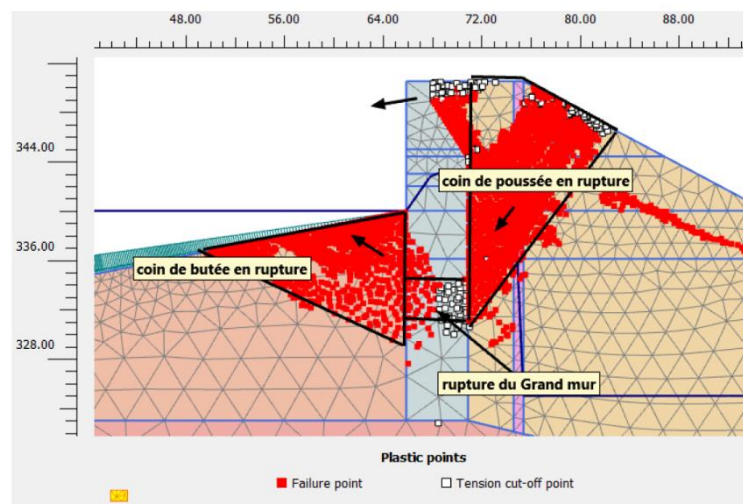


Figure 4 : Mécanisme de rupture du Grand mur le plus probable en situation de vidange

Ce point est corroboré par la longue liste de désordres graves ayant affecté l'ouvrage au cours de sa vie, sans que ces deniers ne conduisent à la formation d'une brèche (conduit d'érosion dans le remblai amont débouchant en galeries, glissements de talus aval à la suite d'une érosion interne, ...).

Ces considérations ont été traduites en probabilités de rupture dans le cadre de l'analyse de risque de l'Etude de Dangers actualisée en 2024 [6], en utilisant la méthode des nœuds papillons. Le nœud papillon illustré en Figure 5 traduit l'analyse du risque de rupture du barrage conduisant à une onde de submersion à l'aval. Bien que le détail des justifications des probabilités conditionnelles des événements intermédiaires ne soit pas donné ici, on notera que la défaillance de plusieurs composants du barrage est nécessaire pour provoquer une brèche et libération incontrôlée d'eau à l'aval.

A titre informatif, les cotations utilisées pour les probabilités sont les suivantes :

| Classe de probabilité | Traduction quantitative                |
|-----------------------|----------------------------------------|
| F0                    | Probabilité annuelle d'environ 0,5 à 1 |
| F1                    | P annuelle d'occurrence < 0,5          |
| F2                    | P annuelle d'occurrence < 0,1          |
| F3                    | P annuelle d'occurrence < $10^{-2}$    |
| F4                    | P annuelle d'occurrence < $10^{-3}$    |
| F5                    | P annuelle d'occurrence < $10^{-4}$    |

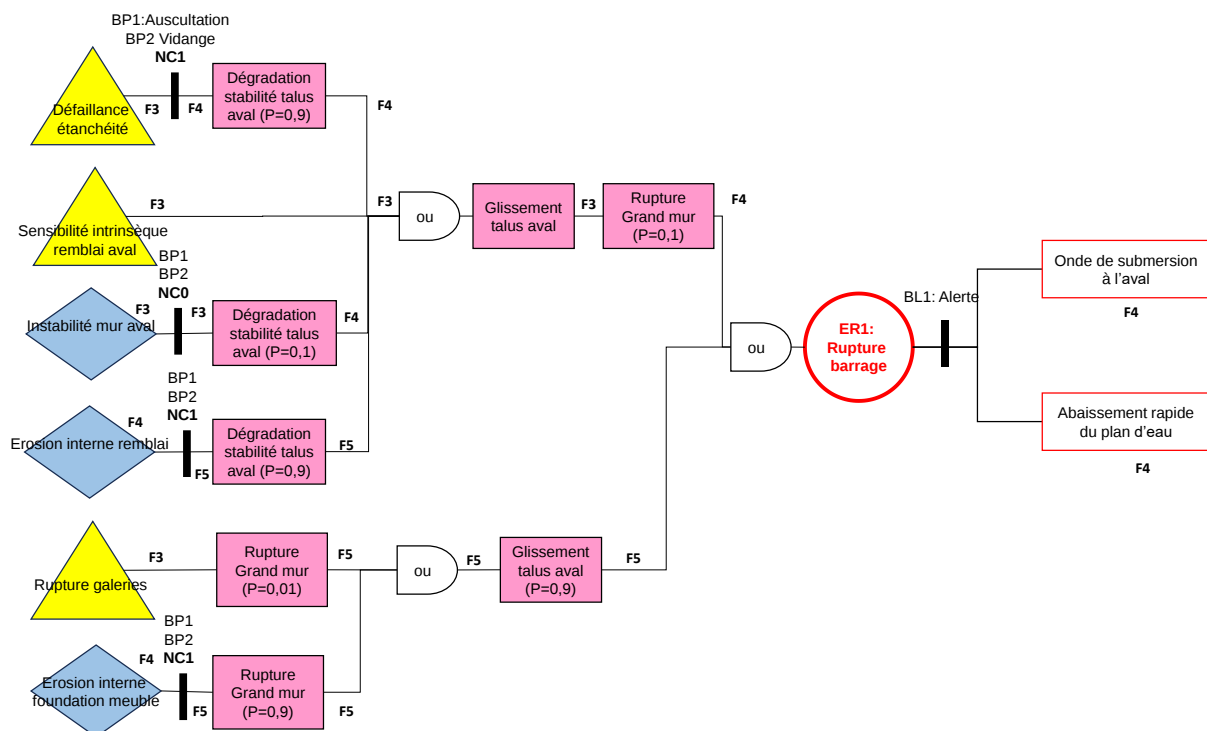


Figure 5 : Nœud papillon de l'évènement redouté 1 de rupture du barrage conduisant à une onde de submersion à l'aval

In fine, la probabilité annuelle de rupture du barrage par instabilité a été classée F4 soit «  $< 10^{-3}$  », ce qui nécessite la mise en place de mesures de réduction du risque pour réduire la criticité et se conformer à l'ATB.

A l'échelle du composant de l'ouvrage (mur aval, remblai aval, grand mur, ...), il a été fait l'hypothèse que des marges de sécurité étaient cachées et par conséquent non considérées dans les calculs de stabilité.

Certains plans d'archive font état de contreforts en arrière du mur aval, qui n'ont pas encore été pris en compte dans les calculs de stabilité car non avérés. Ces contreforts sont illustrés sur l'extrait du plan d'origine ci-dessous.

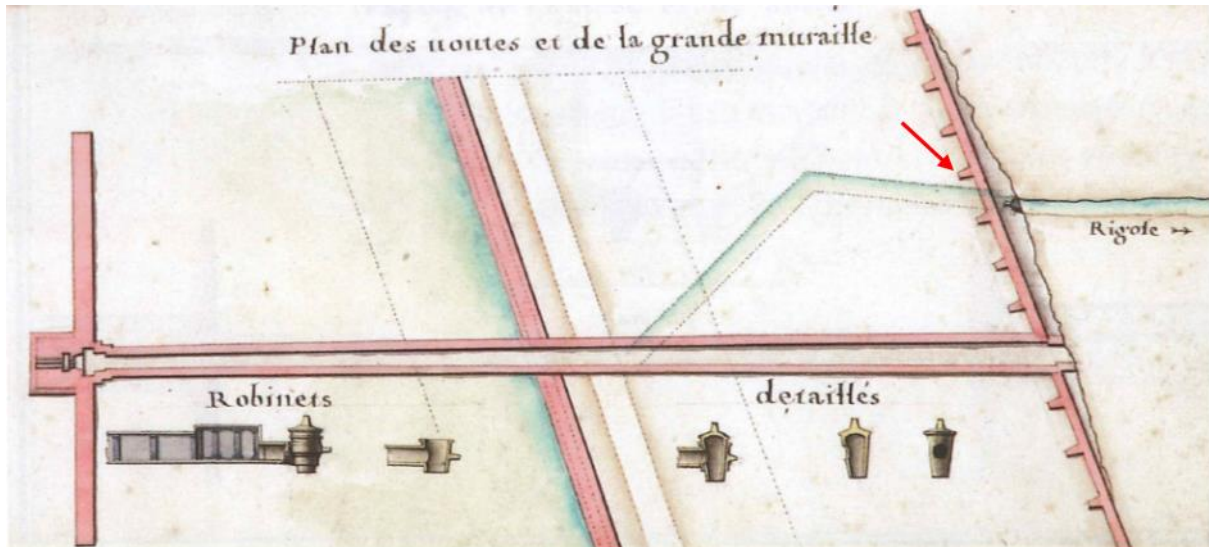


Figure 6 : Vue en plan d'origine faisant apparaître des contreforts en arrière du mur aval (Bibliothèque d'Etude et du Patrimoine, Toulouse)

Une campagne de reconnaissance géophysique a été entreprise en 2023 [9] pour vérifier la présence de ces contreforts. Bien que des « anomalies » aient été détectées en arrière du mur, ces résultats ne sont pas conclusifs quant à la présence systématique de contreforts (Figure 7) ; une campagne de reconnaissance complémentaire par sondages est prévue.

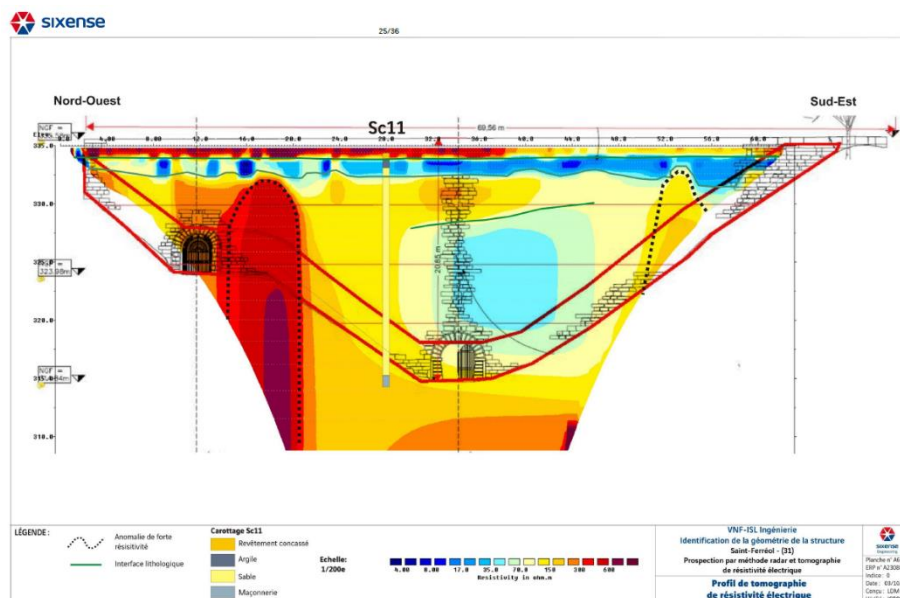


Figure 7 : Tomographie de résistivité électrique faisant apparaître des anomalies en arrière du mur (source [9])

La présence des galeries maçonnées qui débouchent dans le mur et l'encaissement de la vallée sont également des éléments stabilisateurs du mur aval qui n'ont pas été pris en compte à ce jour dans les études de stabilité bidimensionnelles.

## 5. MESURES DE REDUCTION DES RISQUES

Comme vu au paragraphe précédent, la probabilité du scénario de rupture du barrage par instabilité est supérieure à ce qui est imposée par l'ATB et la criticité de ce scénario impose de prendre des mesures de réduction des risques.

### 5.1. Mesures déjà en application

L'exploitant a mis en œuvre les mesures suivantes pour mieux maîtriser les risques :

- Abaissement de la cote de retenue normale : cette dernière, anciennement à 348,90 m NGF, a été abaissée, au gré des révisions des études hydrologiques, des évolutions réglementaires et des modélisations du laminage offert par la retenue, à la cote 347,57 m NGF en 2005 puis à 347,20 m NGF en 2013, afin de se conformer avec les critères de revanche en situation de crue exceptionnelle. De nouvelles études ont été récemment menées pour maximiser la cote d'exploitation de Retenue Normale, avec ou sans travaux de construction d'un évacuateur de crues supplémentaire ([7], [8]).
- Suivi des déformations du mur aval : En aout 2021, un dispositif de suivi topographique du mur aval a été mis œuvre. Il comprend 12 prismes installés sur 2 lignes verticales du parement du mur et 5 références de types palets métrologiques fixées sur des structures stables aux alentours du mur.

### 5.2. Mesures de réduction des risques recommandées dans l'Etude de Dangers de 2024

Les mesures de réduction des risques supplémentaires suivantes ont été définies dans l'Etude de Dangers actualisée en 2024 :

- Mise en place d'un dispositif de suivi des déformations du remblai aval : Il n'existe pas actuellement de dispositif permettant de suivre les déformations du remblai. L'objectif est d'ajouter une barrière de sécurité type auscultation sur la branche la plus critique du nœud papillon illustré en Figure 5, liée à la sensibilité intrinsèque du remblai aval aux glissements.
- Modification des consignes écrites, notamment pour intégrer une consigne sur la vitesse maximale d'abaissement du plan d'eau en vidange ;
- Poursuite des investigations sur le mur aval : pour identifier avec certitude la présence éventuelle de raidisseurs ;
- Fiabilisation de l'auscultation piézométrique du remblai aval, par la mise en place de piézomètres ouverts complémentaires pour contrôler le fonctionnement de cellules de pression interstitielles ;
- Amélioration du fonctionnement de la vidange en mode dégradé (l'accès à la galerie et au système de commande étant compromis à pleine ouverture de la vidange).

Il a été démontré, dans le cadre de l'Etude de Dangers, que l'application de ces mesures de réduction des risques permettrait de réduire la criticité du scénario de rupture du barrage par instabilité à un niveau acceptable et de se conformer au cadre réglementaire de l'Arrêté Technique Barrage.

## RÉFÉRENCES ET CITATIONS

- [1] « Recommandations pour la justification de la stabilité des barrages poids » (CFBR groupe de travail « Justification des barrages poids » - Octobre 2012),
- [2] « Recommandations pour la justification de la stabilité des barrages et des digues en remblai » (CFBR, octobre 2015),
- [3] Plans et documents des archives des canaux du Midi
- [4] Etude de Dangers du barrage de Saint Ferréol, ISL ingénierie, 2013
- [5] Etude de stabilité du barrage de Saint Ferréol, Rapport 17F-121-RM1 C, ISL Ingénierie, 2017
- [6] Etude de Dangers du barrage de Saint Ferréol, ISL ingénierie, 2024
- [7] Barrage de Saint Ferréol : Etude de faisabilité pour utiliser la rigole comme EVC, Tractebel, 2021
- [8] Addendum à l'Etude de Dangers du barrage de Saint Ferréol : rehausse de la RN, ISL ingénierie, 2024
- [9] Barrage de Saint-Ferréol : Reconnaissance par méthode radar et Tomographie de résistivité électrique, SIXENSE Engineering, 2024