

09/04/2020



*Appui technique aux  
Services de Contrôle  
de la Sécurité  
des Ouvrages Hydrauliques*

---

## Ouvrage de Caussade (47)

**Avis INRAE sur le rapport géotechnique Geofondation en date du 27/03/2020**

Rédigé par [REDACTED]

### Cadre de l'avis INRAE

A la demande de la DGPR en date de 05/03/2020, le présent avis d'INRAE concerne l'étude suivante :

*GéoFondation, Rapport « PINEL HAUTERIVE (47) - Barrage de CAUSSADE - Pour le compte de la Chambre d'Agriculture », RAPPORT D'ÉTUDE GÉOTECHNIQUE n°AG191106, en date du 27/03/2020*

Notre avis vise à établir une analyse du rapport géotechnique établi par GéoFondation et une note synthétique relative à la sécurité de l'ouvrage sur les aspects structurels. A ce titre, notre avis établit une conclusion sur les risques géotechniques liés à cet ouvrage et son aptitude à être exploité durant la saison 2020 à la cote intermédiaire 82,60 m (permettant le stockage du volume de la crue millénaire).

Le rapport GéoFondation est un rapport de diagnostic géotechnique de type G5, et répond à la mission géotechnique attendue selon la norme NF P94-500 « Missions d'ingénierie géotechnique ». Le rapport analysé constitue la version finale du rapport provisoire en date du 31/01/2020, sur lequel nous avons formulé un premier avis par courriel le 12/02/2020.

Nous notons que le **bureau d'études GéoFondation n'est pas un bureau d'études agréé en tant qu'intervenant pour la sécurité des ouvrages hydrauliques**, ce qui n'empêche pas son intervention dans le cadre d'un diagnostic géotechnique, mais ne permettrait pas son intervention dans un projet de confortement de l'ouvrage.

### Contenu du diagnostic géotechnique

Le diagnostic géotechnique a comporté des investigations géotechniques in situ (3 sondages avec essais pressiométriques, 7 sondages à la tarière et pose de piézomètres, 1 carottage avec prélèvements d'échantillons intacts, 7 essais au pénétromètre dynamique) et des essais de laboratoire (40 essais de teneur en eau, 17 limites d'Atterberg et 4 essais de cisaillement rectiligne).

Sur la base de ces investigations, complétées par les investigations géophysiques du bureau ArkoGéos du 11/12/2019, le rapport GéoFondation produit une analyse géotechnique des sols constituant le remblai, du compactage du remblai, une vérification de la stabilité au glissement, et établit une conclusion sur la stabilité du remblai incluant des préconisations de confortement.

## Analyse du rapport géotechnique

Notre analyse du rapport géotechnique GéoFondation est la suivante :

### Analyse des matériaux constituant le remblai

- Les investigations géotechniques ont été menées à terme. Ce point est positif et est à souligner. Néanmoins, il manque des investigations importantes pour le diagnostic : i) une analyse granulométrique des sols par tamisage et sédimentométrie, ii) des essais Proctor permettant de connaître la teneur en eau de l'optimum qui aurait dû être la référence à suivre durant le chantier ; iii) éventuellement une analyse de la minéralogie des argiles et l'identification du type d'argile ;
- **La zone de construction du barrage est située dans une zone à aléa fort de retrait/gonflement des sols.** Ceci s'explique par la sensibilité à la teneur en eau des matériaux argileux présentés sur site, et qui ont été utilisés pour la constitution du remblai ;
- Les matériaux du remblai sont des argiles, essentiellement de la **classe A3** selon la classification GTR (argiles et argiles marneuses, limons très plastiques). **Ce sont des sols sensibles au gonflement et difficiles de mise en œuvre sur chantier ;**
- La teneur en eau des matériaux mis en œuvre dans le remblai présente une très forte variabilité, comprise entre 12 et 22% dans le mètre supérieur du remblai, et comprise entre 14 et 18% dans le reste du remblai. Cela est confirmé par la classification GTR des matériaux couvrant toute la gamme des états très sec « ts » à très humide « th ». Majoritairement, les essais montrent un état hydrique des sols humide à très humide, ce qui est corroboré par le degré de saturation se situant autour de 95% sur les 4 essais réalisés. La variabilité de la teneur en eau montre que **le contrôle de la teneur en eau n'a pas été maîtrisé lors de la conduite du chantier et que les sols sont majoritairement dans un état hydrique élevé ;**
- Les sondages mettent en évidence deux zones dans le remblai : i) une zone superficielle d'argile de compacité faible ; ii) le reste du remblai en argile un peu plus compacte avec des hétérogénéités de compacité entre la partie haute faiblement compacte et la partie basse plus compacte. Les essais au pressiomètre montrent des pressions-limites  $p_l$  faibles, le plus souvent inférieure à 1 MPa, correspondant à des *argiles molles* d'après le fascicule 62-5. L'étude fait ressortir également des passages sableux ou graveleux, montrant quelques hétérogénéités de matériaux. Globalement, **le remblai apparaît être constitué de matériaux argileux peu compacts, avec présence d'hétérogénéités ;**
- Les essais de cisaillement réalisés montrent des résultats homogènes pour les 4 essais réalisés, avec un angle de frottement faible (autour de 26°) ce qui est normal pour des argiles, mais une cohésion nulle ce qui est surprenant pour des matériaux argileux. La teneur en eau proche de la saturation est une explication à l'absence de cohésion. **Au final, la résistance au cisaillement des sols apparaît très limitée (sol sans cohésion et peu frottant).**

### Analyse de la stabilité

- La géométrie considérée pour l'ouvrage est issue du levé topographique d'Antéa réalisé en septembre 2019. Nous n'avons pas connaissance d'un relevé topographique effectué sur l'ouvrage réalisé. **Le profil est sensiblement différent de celui prévu au projet, avec du côté amont une risberme plus haute et donc un profil amont plus massif, et du côté aval une pente plus douce.** L'ouvrage réalisé apparaît au final présenter un profil plus massif, et donc plus favorable à sa stabilité. La qualité des plans fournis dans l'étude ne permet pas de mesurer la nouvelle pente aval, ni la cote de la risberme amont. Nous nous interrogeons sur cette modification de profil durant le chantier, conduisant à un

volume de matériaux plus important : y aurait-il eu des problèmes de stabilité de pente rencontrés lors de la construction conduisant l'entreprise à adoucir les pentes ? ;



*Extrait du rapport GéoFondation montrant l'élargissement du remblai en amont et aval réalisé en phase chantier*

- Les hypothèses de calcul sont une saturation complète du talus amont sous la cote RN et un rabattement de la nappe derrière le drain vertical (sans être sûr qu'il soit efficace) : cette hypothèse est correcte. Nous validons également les trois situations de projet considérées ;
- Le rapport GéoFondation analyse la stabilité au glissement du remblai à partir des règles de l'Eurocode 7-approche 3. **Cette approche n'est pas adaptée pour la justification des barrages**, car elle pondère les actions de l'eau par des coefficients partiels. Il convient d'utiliser les recommandations CFBR 2015 relatives à la justification des barrages et digues en remblai ou toutes autres standards s'appliquant aux ouvrages hydrauliques ;
- Le rapport GéoFondation ne fournit pas, ni dans le corps du rapport et ni en annexe, la note de calculs réalisée, mais seulement les résultats. Les facteurs de sécurité obtenus sont de 1.14, 1.12 et 1.08 pour les trois situations de projet, ce qui reste faible : l'application d'une démarche CFBR ne permettrait sûrement pas la justification de l'ouvrage. **Au final, l'étude de stabilité est à reprendre, avec une démarche adaptée à la justification des barrages ;**
- Lors des reconnaissances du projet initial, une couche de sable argileux en fondation (couche C2-1) de plus grande perméabilité, située en rive droite entre 69 et 66 m, avait été détectée. Pour permettre le contrôle des percolations en fondation, ISL avait prévu la réalisation d'un écran étanche par paroi de coulis sur toute la rive droite du barrage (150 ml). GéoFondation n'a pas pu apporter d'éléments confirmant la réalisation de cet écran ou la purge de ces matériaux. **Compte tenu de la présence potentielle de cet horizon sableux, il apparaît une incertitude importante sur la maîtrise du risque d'érosion interne en fondation liée au fait qu'il y ait eu ou pas un traitement de la fondation en rive droite.**

#### *Conclusion du rapport GéoFondation*

- Le rapport GéoFondation conclut sur la justification de la stabilité de l'ouvrage, sous réserve des conditions hydrauliques dans le remblai, non vérifiées ni investiguées. Ces réserves fortes ne permettent pas de considérer la justification de la stabilité de l'ouvrage, nonobstant notre remarque sur la méthode de justification à revoir ;
- Le rapport poursuit par des préconisations de confortement de principe, visant à prévoir une étanchéité amont du barrage (type géomembrane) et un renforcement du pied aval. Ces mesures visent à interdire les écoulements dans le remblai, dont la qualité ne permet aucun contrôle. Nous approuvons ces mesures. Selon notre analyse, il conviendrait également de les renforcer par l'étude de l'étanchéité de la fondation sur toute la longueur de rive à rive.

## Note synthétique

Le rapport de diagnostic établi par le bureau d'études GéoFondation est basé sur une campagne d'investigations géotechniques in situ et de laboratoire menée à terme, même si certains essais complémentaires (granulométrie, essais Proctor) auraient mérité d'être réalisés.

Les principales conclusions des investigations géotechniques sont les suivantes :

- La zone de construction du barrage est située dans une zone à aléa fort de retrait/gonflement des sols ;
- Les matériaux du remblai sont des argiles, essentiellement de la classe A3 selon la classification GTR. Ce sont des sols sensibles au gonflement et difficiles de mise en œuvre sur chantier ;
- La variabilité de la teneur en eau mesurée montre que le contrôle de la teneur en eau n'a pas été maîtrisé lors de la conduite du chantier et que les sols sont majoritairement dans un état hydrique élevé. Associés à des sols argileux à fort potentiel de retrait/gonflement, il y a un risque important de fissuration dans le remblai susceptible de créer des zones d'écoulement et d'érosion non maîtrisées ;
- Les sondages mettent en évidence que le remblai apparaît être constitué de matériaux peu compacts, avec des hétérogénéités de compactage et des passes sableuses. La couche superficielle (1,5 m) est de très mauvaise qualité et peu compacte ;
- Les essais de cisaillement réalisés montrent une résistance au cisaillement des sols très limitée, correspondant à un sol sans cohésion et peu frottant.

Notre analyse de l'étude de stabilité réalisée par GéoFondation est la suivante :

- Le profil du remblai réalisé est sensiblement différent de celui prévu au projet, avec du côté amont une risberme plus haute et un profil amont plus massif, et du côté aval une pente plus douce. L'ouvrage réalisé apparaît au final présenter un profil globalement plus massif ;
- L'étude de stabilité conduite a été réalisée à partir d'une démarche non adaptée aux ouvrages hydrauliques. Elle est à reprendre selon une démarche de type recommandations CFBR 2015. Nonobstant ce problème méthodologique, les facteurs de sécurité obtenus pour les situations de projet considérés sont faibles et l'application d'une démarche CFBR ne permettrait sûrement pas la justification de l'ouvrage ;
- Lors des reconnaissances du projet initial, une couche de sable argileux en fondation rive droite de plus grande perméabilité avait été détectée. Pour permettre le contrôle des percolations en fondation, ISL avait prévu la réalisation d'un écran étanche par paroi de coulis sur toute la rive droite du barrage. Malgré ses investigations, GéoFondation n'a pas pu apporter d'élément confirmant ou pas la réalisation de cet écran ou la purge de ces matériaux. Compte tenu de la présence potentielle de cet horizon sableux, il apparaît une incertitude importante sur la maîtrise du risque d'érosion interne en fondation liée au fait qu'il y ait eu ou pas un traitement de la fondation en rive droite.

Au final, le rapport de diagnostic géotechnique de GéoFondation apporte un éclairage assez précis sur les aspects géotechniques de la constitution de l'ouvrage de Caussade, avec les principales conclusions suivantes :

- Les matériaux utilisés pour le remblai présentent un fort potentiel au retrait/gonflement et étaient complexes à mettre en œuvre de par leur forte argilosité. De toute évidence, le contrôle de la teneur des matériaux lors du chantier n'a pas été maîtrisé, avec des matériaux globalement humides à très humides ;
- Les conséquences sont une faible compacité du remblai et des propriétés de résistance au cisaillement très limitées. La justification de la stabilité au glissement de l'ouvrage n'est pas acquise, et ce d'autant plus que les investigations n'ont pas concernées le dispositif de drainage et que nous disposons pas d'information sur son fonctionnement ;
- L'hétérogénéité du remblai (nature, densité, teneur en eau) se traduit par une hétérogénéité des propriétés hydromécaniques (résistance, déformabilité, perméabilité) qui pourraient se manifester à plus ou moins long terme par des désordres (déformations différentielles, fissuration, chemins de circulation d'eau préférentiels);
- La fondation présente une couche de sable-argileux en rive droite reconnue lors du projet. Le projet initial prévoyait la réalisation d'un écran étanche en rive droite pour contrôler les percolations dans cette couche. Les investigations n'ont pas permis de déterminer si le traitement de cette zone a été réalisé ou non.

Lors des études complémentaires à faire réaliser par un bureau d'études agréé, nous recommandons :

- D'analyser de façon détaillée l'efficacité du système de drainage en remblai (incluant des forages d'investigation) ;
- D'approfondir la question de l'étanchéité de la fondation en rive droite (incluant des forages d'investigation) ;
- D'étudier la justification de la stabilité au glissement selon les recommandations CFBR 2015 ;
- D'étudier la justification de la stabilité à l'érosion interne en remblai et dans la fondation ;
- De proposer un confortement de l'ouvrage.

La mise en état de fonctionnement d'un tel ouvrage passera certainement, comme le préconise GéoFondation, par la réalisation d'un écran étanche amont, et une recharge aval. Nous complétons sur la nécessité d'investiguer l'étanchéité de la fondation.

Au final, la mise en eau d'un tel ouvrage durant la saison 2020 ne devrait pas s'envisager à pleine charge car il n'y a pas de maîtrise des mécanismes de rupture par glissement et par érosion interne.

Une mise en eau à la cote 82,60 m, permettant le stockage du volume de la crue millénale, pourrait être envisagée moyennant une surveillance étroite et une réactivité de l'exploitant en cas d'anomalie constatée.