

CONCEPTION D'UNE PASSERELLE CYCLO-PIETONNE SUR LE CHER, UN AMENAGEMENT DURABLE ET SECURITAIRE POUR LES HABITANTS

DESIGNING A CYCLE-PEDESTRIAN BRIDGE OVER THE RIVER CHER, A SUSTAINABLE AND SAFE FACILITY FOR INHABITANTS

Carla DI MONTE¹, Amine BEN YUSEF¹, Aishwarya PRABHAKARAN¹,
Soizic KERFONTAIN¹

¹ GEOS INGENIEURS CONSEILS, Rueil-Malmaison, France

RÉSUMÉ – Dans le cadre de sa politique de mobilités, la métropole de Tours a lancé un projet de franchissement pour cyclistes et piétons. Cette passerelle sera constituée de piles dans le Cher et de culées positionnées sur les digues existantes de protection contre les crues. Cet article présente le dimensionnement géotechnique des fondations profondes des appuis et leur impact sur la stabilité mécanique et hydraulique des digues.

ABSTRACT – As part of its sustainable mobility policy, the Tours metropolis has launched a project to cross the river for cyclists and pedestrians. This footbridge will be made up of piers in the Cher and abutments positioned on the existing flood protection dykes. This article presents the geotechnical design of the supports' deep foundations and their impact on the mechanical and hydraulic stability of the dykes.

1. Introduction

Dans le cadre de sa mise en œuvre d'un réseau cyclable, Tours Métropole Val de Loire souhaite améliorer les conditions de franchissement du Cher. A cet effet, elle prévoit la construction d'une passerelle sécurisée sur le Cher permettant de relier les communes de Tours et de Saint-Avertin. En effet, l'ouvrage de franchissement existant, le Pont d'Arcole, est emprunté par 450 cyclistes en moyenne par jour. Son aménagement (largeur réduite, proximité avec le trafic routier, etc.) n'offre pas les conditions optimales pour les cyclistes et pose aujourd'hui un conflit d'usage. Le projet prévoit donc la réalisation d'un cheminement vélos et piétons sécurisé sur le Cher, en parallèle du pont Arcole existant.

Geos Ingénieurs Conseils a participé aux études de conception de cette passerelle de franchissement sur le Cher, et plus particulièrement sur le dimensionnement géotechnique des fondations des piles et des culées de l'ouvrage dont la solution retenue à ce stade du projet, est un système de fondations profondes sous les appuis de la passerelle. Ces appuis reposeront sur des fondations permettant de transférer les charges de la superstructure vers le sol support et d'assurer la pérennité de l'ouvrage.

Les culées étant positionnées sur les digues existantes de protection contre les crues du Cher, la réalisation de la passerelle Arcole pourrait avoir un impact sur le fonctionnement des digues du Cher, que ce soit à court terme (en phase travaux) ou à long terme (en phase service). Les vérifications de stabilité mécanique et hydraulique des digues pour l'ensemble des phases du projet de réalisation des culées de l'ouvrage ont donc également été effectuées.

Les études de stabilité menées par Geos ont permis d'écartier tout risque d'impact sur les digues en rives gauche et droite du Cher. Des pieux assureront le report des charges de chaque culée au sol d'assise des digues. Ces études sont présentées par la suite dans cet article.

2. Présentation générale du projet

La passerelle Arcole envisagée est une passerelle indépendante à poutres de 252 m de long et de 5 m de largeur utile, destinée exclusivement aux piétons et aux cyclistes. Elle sera composée de 7 travées et sera donc posée dans le Cher sur 6 appuis, et aux extrémités sur 2 appuis terrestres. Elle sera divisée en deux pistes afin de séparer les flux piétons des flux cyclistes. La passerelle sera accolée mais totalement indépendante du tablier du pont d'Arcole.

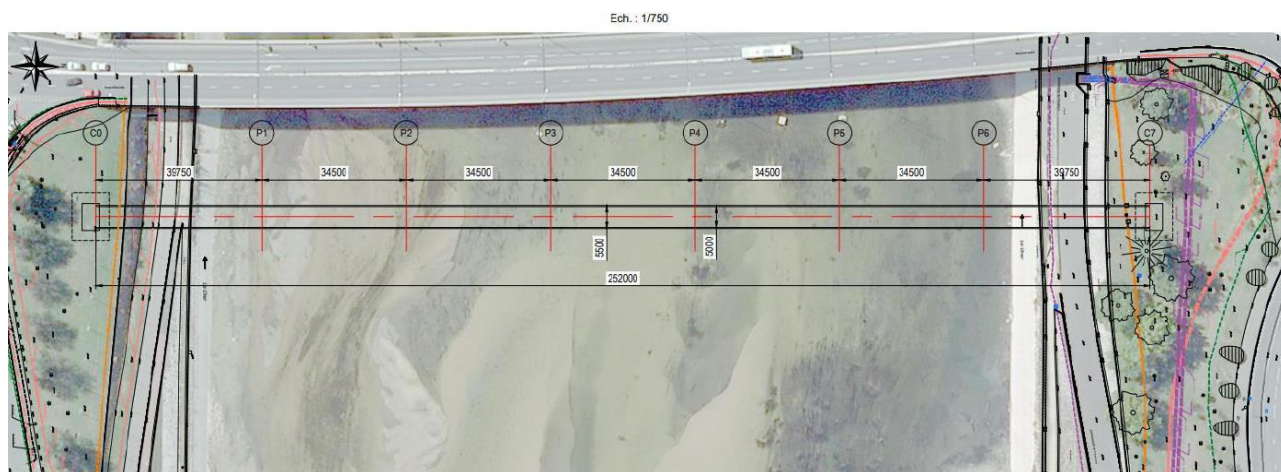


Figure 1. Vue en plan de la passerelle Arcole à proximité directe du pont d'Arcole (Ingérop)

En rive gauche et droite du Cher, la passerelle s'appuie sur des culées rectangulaires de largeur 1,9 m et de longueur 7,2 m. Ces appuis sont fondés sur des pieux et sont positionnés en crête de digue ; le système de fondations profondes ne devra donc pas altérer la stabilité de la digue.

La digue de protection en rive droite (nord du Cher) fait partie du système d'endiguement du Val de Tours créé au XIX^{ème} siècle suite à des crues successives ayant eu lieu en 1846, 1856 et 1866.



Figure 2. Vue de la digue en rive droite (Google Street View)

Cette digue a connu des rehaussements successifs suite à ces crues. A proximité du pont d'Arcole, le profil de la digue est non-renforcé. Le talus est protégé contre les érosions externes du Cher par un perré en pierres sèches soutenu par des pieux bois, et surmonté par une couche de terre végétale enherbée.

La digue en rive gauche (sud du Cher) a été construite entre les années 1960 et 1970 dans le cadre d'un projet d'aménagement de la vallée du Cher ayant pour but de rectifier le

tracé du Cher dans sa traversée de la commune de Tours, et ainsi de protéger les nouveaux quartiers du risque inondation par la mise en œuvre d'un système d'endiguement.



Figure 3. Vue de la digue en rive gauche (Google Street View)

Les deux digues sont formées par deux talus (supérieur et inférieur) et une risberme aménagée en une route. Les culées seront réalisées à quelques mètres de la crête des talus supérieurs des digues de protection. Aucun terrassement dans le corps des digues n'est donc prévu, et les parements déjà existants seront conservés.

3. Principe de dimensionnement des fondations de la passerelle

La passerelle sera établie sur des fondations de type profondes pour ses culées et ses piles. Ce mode de fondations permet de reprendre les efforts axiaux et latéraux transmis par la superstructure. Pour les culées, cela permet également de protéger et garantir la stabilité de la digue en phase de service, car les pieux permettent le transfert de charges verticales vers le substratum sans solliciter les sols constituant le corps de la digue. Par ailleurs, le dimensionnement des pieux se fait en supposant qu'il n'y a pas de frottement entre les remblais de la digue, les alluvions modernes et la surface latérale des pieux. Cette hypothèse devra être assurée en phase d'exécution avec l'emploi d'un tubage adapté sur la hauteur du remblai de la digue et des alluvions modernes. Un calcul de stabilité de la digue en phase service n'est donc pas nécessaire, car aucune évolution par rapport à l'état initial n'est attendue. Les pieux considérés sont des pieux forés à la boue (classe 1, catégorie 2) de diamètre 1000 mm, et espacés de 3 m.

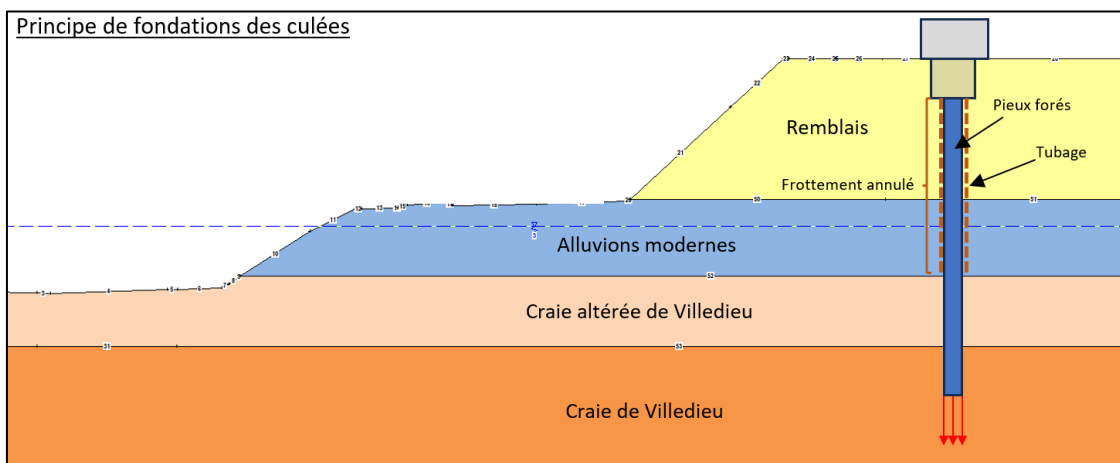


Figure 4. Principe de fondations des culées de la passerelle

Les modèles géotechniques retenus pour le dimensionnement des appuis sont les suivants.

Tableau 1. Modèle géotechnique retenu pour la digue en rive gauche

Formation	Lithologie	Cote toit (mNGF)	Cote base (mNGF)	Caractéristiques pressiométriques				Paramètres de cisaillement	
				E_M (MPa)	P_i^* (MPa)	P_f^* (MPa)	α	c' (kPa)	φ' (°)
Remblais	Sableux +/- argileux	52,4	47,2	3	0,5	0,3	0,5	15	20
Alluvions modernes	Argiles sableuses	47,2	43,9	3	0,5	0,3	0,5	20	25
Craie altérée	Altération crayeuse	43,9	40,9	22	2,8	1,6	0,5	5	35
Craie saine	Craie	40,9	30,0	76	4,9	3,9	0,5	20	35

Tableau 2. Modèle géotechnique retenu pour la digue en rive droite

Formation	Lithologie	Cote toit (mNGF)	Cote base (mNGF)	Caractéristiques pressiométriques				Paramètres de cisaillement	
				E_M (MPa)	P_i^* (MPa)	P_f^* (MPa)	α	c' (kPa)	φ' (°)
Remblais	Sableux +/- argileux	51,4	47,4	3	0,5	0,3	0,5	15	20
Alluvions modernes	Argiles sableuses	47,4	43,0	3	0,5	0,3	0,5	20	20
Craie altérée	Altération crayeuse	43,0	40,9	22	2,8	1,6	0,5	5	35
Craie saine	Craie	40,9	30,0	76	4,9	3,9	0,5	20	35

La capacité portante des pieux est vérifiée pour le pieu le plus sollicité de chaque appui. Les tassements et les déplacements sont déterminés au niveau du pieu le plus chargé (axialement et latéralement) pour la combinaison la plus défavorable, tout comme les moments fléchissant ainsi que les efforts tranchants. Ces vérifications permettent donc le dimensionnement des pieux pour les différents appuis de la passerelle.

4. Etude de stabilité de la digue

Les surcharges appliquées en crête des talus des digues, notamment les surcharges travaux, le poids propre de la structure et les charges d'exploitations sont considérées comme des surcharges susceptibles de provoquer des instabilités dans le corps de la digue.

4.1 Approche de calcul

Les digues du Cher ont fait l'objet d'un calcul de stabilité mécanique afin d'évaluer l'effet de la mise en œuvre de la future passerelle d'Arcole sur la stabilité au grand glissement et sur la stabilité locale des talus des digues.

Les calculs de stabilité sont réalisés à l'aide du logiciel GEOSTAB développé par GEOS, en définissant la géométrie de la digue, la stratigraphie du sol et en prenant en compte toutes les hypothèses établies en phase de conception du projet.

Pour toutes les phases, le calcul est mené selon les recommandations du Comité Français des Barrages et Réservoirs (CFBR, 2015), qui définit les coefficients de réduction

à appliquer aux paramètres de sols (Tableau 3). Pour les surcharges appliquées au modèle, les coefficients de pondération attribués sont donnés selon l'approche 3 de l'Eurocode 7.

Pour chaque coupe de calcul, le facteur de sécurité minimal toléré pour justifier la stabilité de l'ouvrage est $FS = 1$.

Tableau 3. Coefficients de réduction retenus pour le calcul (CFBR, 2015)

Situation	Coefficient partiel γ_m sur c' et $\tan\phi'$	Coefficient partiel γ_m sur le poids volumique	Coefficient du modèle γ_d
Normale d'exploitation	1,25	1	1,2
Extrême de crue	1	1	1,1

4.2 Phases étudiées

Les digues en rives gauche et droite du Cher sont vérifiées pour 4 situations :

- *Phase initiale* – Situation normale d'exploitation : consiste en l'étude de la stabilité mécanique de la digue dans son état actuel, avant l'excavation et la mise en place de la culée. La nappe est définie au niveau normal du Cher (46,35 mNGF) ;
- *Phase travaux* – Situation normale d'exploitation : consiste en l'étude de la stabilité mécanique de la digue durant les travaux (amenée des machines nécessaires à l'excavation et mise en place des appuis de la passerelle). La nappe est définie au niveau normal du Cher (46,35 mNGF) ;
- *Phase projet* – Situation normale d'exploitation : consiste en l'étude de la stabilité mécanique de la digue après réalisation de la passerelle, donc en tenant compte de l'effet du déplacement latéral des pieux sur la stabilité. Les charges verticales transmises par la superstructure à travers les pieux de la culée ne sont pas modélisées dans ce calcul, étant donné que les pieux permettent le transfert des charges vers le substratum crayeux sans solliciter verticalement le remblai de la digue. Toutefois, les charges horizontales induites par le déplacement horizontal des pieux doivent être représentées dans le modèle, car elles peuvent provoquer la déstabilisation du talus par déplacement du sol. A partir des déplacements horizontaux des pieux calculés (résultats du logiciel FoXta), des efforts horizontaux ponctuels en fonction de la raideur frontale du sol sont déterminés et appliqués le long du pieu. La nappe est définie au niveau normal du Cher (46,35 mNGF) ;
- *Phase accidentelle* – Situation extrême de crue : cas de décrue rapide du Cher avec saturation du remblai des digues. Ce cas est modélisé avec le niveau PHEC (50,70 mNGF) dans le talus supérieur, au sein des remblais en amont et il est rabattu selon le niveau normal du Cher en aval.

4.3 Calcul de stabilité selon la méthode de Bishop - GEOSTAB

Le calcul effectué sur le logiciel GEOSTAB montre que le facteur de sécurité obtenu est supérieur à 1 pour l'ensemble des phases de calcul, à l'exception des deux cas liés à la stabilité du talus supérieur de la digue en rive gauche, en phase projet et en phase accidentelle, où les charges induites par le déplacement des pieux sont introduites. Le calcul GEOSTAB n'a donc pas permis de confirmer la stabilité de la digue pour ces situations.

Tableau 4. Synthèse des facteurs de sécurité obtenus pour le calcul en rive gauche

Situation	Phase	Facteur de sécurité	Validation
Phase initiale	Stabilité interne – Talus inférieur	2,03	> 1,0
	Stabilité interne – Talus supérieur	1,60	
	Stabilité générale	1,99	
Phase travaux	Stabilité interne – Talus inférieur	2,03	> 1,0
	Stabilité interne – Talus supérieur	1,24	
	Stabilité générale	1,63	
Phase projet	Stabilité interne – Talus inférieur	2,03	> 1,0
	Stabilité interne – Talus supérieur	0,77	< 1,0
	Stabilité générale	1,16	> 1,0
Phase accidentelle – décrue rapide	Stabilité interne – Talus inférieur	2,64	> 1,0
	Stabilité interne – Talus supérieur	0,80	< 1,0
	Stabilité générale	1,25	> 1,0

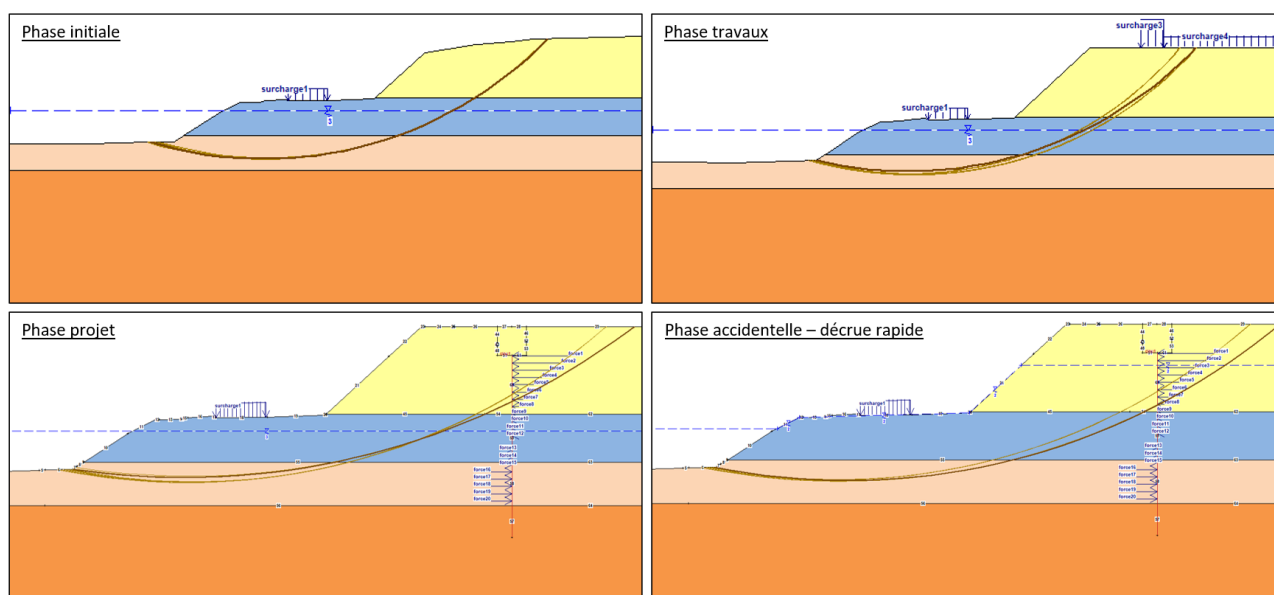


Figure 5. Modèles GEOSTAB en rive gauche selon chaque phase

Le calcul GEOSTAB est un calcul en 2D qui permet de bien modéliser les scénarios de rupture possible des talus, mais cette modélisation n'est pas la plus adaptée pour les cas où l'interaction sol-structure régit le comportement du talus, notamment car les pieux sont modélisés comme des éléments « clous » avec un fonctionnement qui n'est pas fidèle au comportement réel des pieux pour la diffusion des charges. De plus, la méthode employée pour modéliser les charges induites par le déplacement des pieux est défavorable dans le sens où les charges sont supposées infinies, alors que ces charges s'appliquent seulement autour des pieux. Afin de mieux évaluer le comportement de la digue par rapport aux sollicitations de l'ouvrage, nous avons effectué un second calcul aux éléments finis que nous présentons au §4.4.

4.4 Calcul de stabilité selon la méthode des éléments finis – Plaxis 2D

Une modélisation aux éléments finis 2D sur PLAXIS a été menée afin de calculer la stabilité de la digue en rive gauche pour les cas où la stabilité n'est pas vérifiée. La géométrie du modèle PLAXIS et ses données d'entrée sont identiques à celles du modèle GEOSTAB.

Afin de valider le modèle PLAXIS, un calcul de stabilité de la digue en rive gauche a tout d'abord été effectué pour les phases où la stabilité sur GEOSTAB étaient vérifiées : à l'état

initial et en phase travaux de manière à pouvoir comparer aux calculs avec GEOSTAB. Le calcul réalisé sur Plaxis ne tient pas compte des coefficients de réduction de l'Eurocode 7 et des recommandations du CFBR, il est ainsi nécessaire de diviser le facteur de sécurité obtenu par 1,5 (1,2 pour le coefficient de méthode x 1,25 pour les paramètres de cisaillement définis dans le Tableau 3).

Tableau 5. Comparaison des facteurs de sécurité obtenus sur GEOSTAB et sur Plaxis

Cas de stabilité (Rive gauche)	FS <i>Plaxis</i> (méthode unitaire)	FS <i>Plaxis</i> (EC7 et CFBR)	FS <i>GEOSTAB</i> (EC7 et CFBR)
Phase initiale	2,23	1,49	1,60
Phase travaux	1,73	1,15	1,24

Les facteurs de sécurité sont comparables pour les deux logiciels de calcul tout comme la forme des cercles de rupture. Le modèle PLAXIS est donc validé et conservé pour l'étude des phases projet et accidentelle.

En phase projet et en phase accidentelle, les charges sont appliquées en tête des pieux. Contrairement au calcul GEOSTAB, les charges horizontales et le moment fléchissant sont modélisés sur Plaxis comme des sollicitations linéiques calculées correspondant aux sollicitations déterminées à la base de la semelle de liaison des pieux et divisées par l'espacement des pieux (3 m).

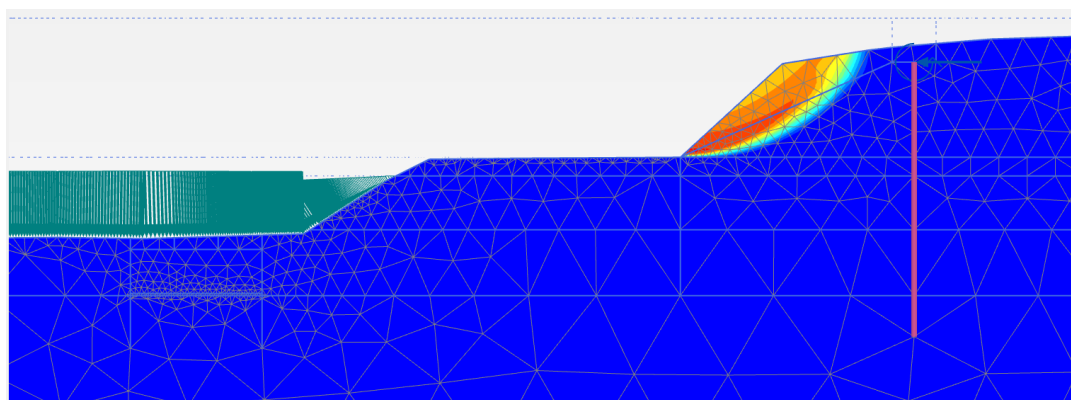


Figure 6. Modèle Plaxis en rive gauche – Phase projet (FS unitaire = 2,23)

Le calcul mené sur Plaxis conduit à obtenir un de facteur de sécurité en phase de service FS unitaire = 2,23, identique à celui obtenu en phase initiale (Tableau 5). Cela montre que l'application des efforts et moments en tête des pieux n'a pas d'impact sur la stabilité du talus supérieur de la digue en rive gauche. Le cercle de glissement le plus critique ne traverse pas les pieux comme le montre la Figure 6, ce qui explique le facteur de sécurité égal à celui en phase initiale.

Le cercle de glissement le plus critique se situe devant la culée de la passerelle (Figure 6). Afin de confirmer ce point, un calcul supplémentaire en phase de service a été effectué en imposant au talus supérieur un comportement élastique dans le but d'obtenir un cercle de glissement qui passe à travers les pieux. Le facteur de sécurité obtenu dans ce cas est FS unitaire = 3,16, soit un FS = 2,1 (selon l'EC7 et CFBR). Il s'agit d'un facteur de sécurité supérieur à celui obtenu lors du premier calcul Plaxis (FS unitaire = 2,23), prouvant ainsi qu'il ne s'agit pas de la situation la plus critique pour la stabilité des digues. Cela confirme également que la mise en œuvre de la culée et ses pieux n'ont pas d'impact sur le fonctionnement de la digue en rive gauche.

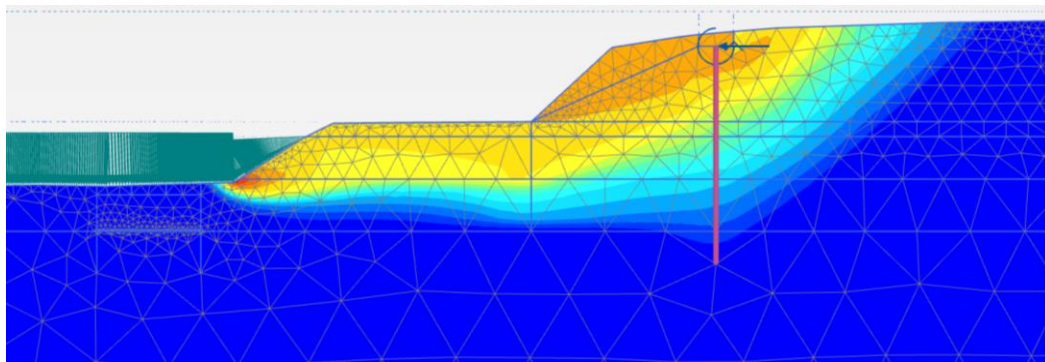


Figure 7. Modèle Plaxis en rive gauche – Phase projet, élastification du remblai de la digue (FS = 3,16)

Le calcul de stabilité Plaxis pour la phase accidentelle de décrue du Cher donne un FS unitaire de 2,18, confirmant ainsi la stabilité de la digue pour ce cas accidentel.

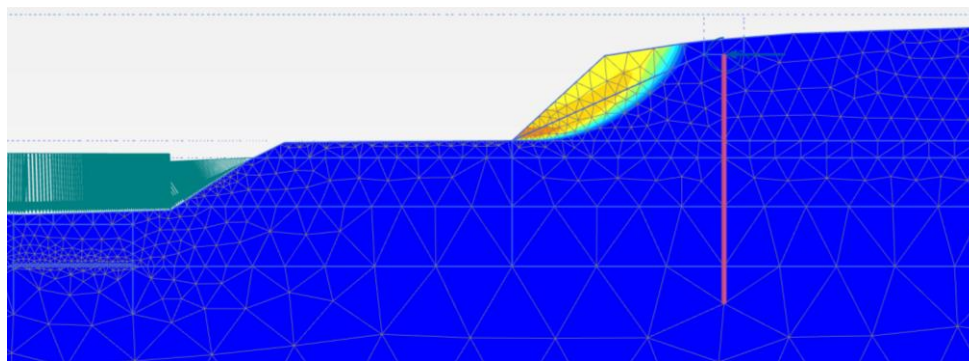


Figure 8. Modèle Plaxis en rive gauche – Phase accidentelle (décrue rapide du Cher) (FS = 2,18)

5. Conclusion

L'étude de la stabilité mécanique des digues à plusieurs phases du projet de réalisation des culées de l'ouvrage a été menée d'abord avec le logiciel GEOSTAB, et qui a montré que la stabilité des digues ne sera pas impactée, à l'exception de deux cas (en phase de service et en phase accidentelle pour la digue en rive gauche) où cette stabilité n'a pas pu être vérifiée par calcul. Il a donc été décidé de compléter cette étude avec une modélisation aux éléments finis pour tenir compte de l'interaction sol-structure et évaluer de façon plus précise les déformations induites par le déplacement horizontal des pieux de l'ouvrage. Le calcul mené sur Plaxis a permis de justifier la stabilité pour les deux phases non vérifiées sur GEOSTAB, pour en déduire que le fonctionnement mécanique des digues ne sera pas impacté par la création de la passerelle d'Arcole.

S'agissant des vérifications hydrauliques, en tenant compte du fait que les travaux de la passerelle se situent à une distance sécuritaire par rapport au bord des talus des digues, le fonctionnement hydraulique de la digue n'est pas altéré, et donc aucune vérification par calcul n'a été effectuée. Il convient toutefois, au moment des travaux, de veiller à ne pas impacter les différents ouvrages de la digue.

6. Références bibliographiques

- CFBR (2015). Recommandations pour la justification des barrages et des digues en remblais. Recommandations octobre 2015.
- AFNOR (2013). Justification des ouvrages géotechniques – Norme d'application nationale de l'Eurocode 7 – Fondations profondes – NF P94-262.