

PROJET DE REMPIÈTEMENT DU QUAI TERMINAL CROISIÈRE RIVE DROITE (TCRD) A ROUEN

DOCK ENCROACHMENT OF THE TERMINAL CROISIÈRE RIVE DROITE (TCRD) PIER IN ROUEN

Amine BEN YUSEF¹, Soizic KERFONTAIN¹, Jérôme VETILLARD²

¹ GEOS INGENIEURS CONSEILS, Rueil-Malmaison, France

² HAROPA Port, Rouen, France

RÉSUMÉ – Le projet de rempièvement du quai Terminal Croisière Rive Droite (TCRD) à Rouen fait partie des opérations pour le réaménagement des anciens quais afin de leur permettre d'accueillir des navires de plus grande taille. Les principaux travaux comprennent l'approfondissement de la souille et le renforcement de l'arrière du quai par des micropieux. Cette communication présente l'étude géotechnique de conception du quai renforcé, menée à l'aide d'une modélisation en éléments finis.

ABSTRACT – The layout of the TCRD pier in Rouen is part of several operations destined to old piers in order for them to be able to welcome larger ships. The main works include deepening the trench and reinforcing the back of the pier with micropiles. This paper presents the geotechnical design study of the reinforced pier, led by finite element modelling.

1. Introduction

Le quai TCRD à Rouen, construit il y a plus d'un siècle, nécessite de nombreux aménagements afin de pouvoir accueillir des navires avec un gabarit plus imposant. Ces opérations incluent entre autres l'approfondissement de la souille de 2 m environ et le prolongement du quai en sa partie arrière avec la réalisation d'une dalle en béton fondée sur deux files de micropieux.

L'étude menée sur l'ouvrage projeté consiste à s'assurer de la stabilité de pente sous le quai suite à l'approfondissement de la souille, à estimer les efforts générés dans les éléments structurels par ces travaux et à les comparer aux sollicitations initiales de l'ouvrage.

Au vu de la complexité de la structure, une modélisation aux éléments finis a été initiée afin notamment de pouvoir étudier et comparer le comportement du quai avant et après les opérations de renforcement et d'adaptation.

Cette étude est présentée par la suite avec les résultats obtenus par le calcul mené à l'aide du logiciel ZSoil.

2. Présentation générale du projet

2.1. Description de l'ouvrage

Le Terminal Croisière, destiné à l'accueil de paquebots de croisières maritimes fluviaux, se trouve au sud de Rouen, au pied du pont Flaubert, et s'étend sur un linéaire de 250 m au droit du quai Richard Waddington, situé sur la rive droite de la Seine.

L'ouvrage TCRD existant, réalisé en 1911 puis allongé en 1923, est composé d'un mur de quai constitué de caissons en maçonnerie fondés sur des pieux bois, et d'une plateforme en remblais supportée par un platelage en bois, fondé également sur des pieux bois. Les modifications des conditions de marnage de la Seine ont accéléré les dégradations des structures en bois et ont conduit le port de Rouen à limiter les capacités de ces ouvrages et

à mener des travaux de sécurisation dans les années 1990. Ces travaux ont constitué en la réalisation de pieux STARSOL® à l'arrière du platelage bois, complétés de deux files de micropieux scellés dans le caisson en maçonnerie à l'avant du quai et d'une dalle en béton armé.

Les limitations d'emprises foncières et les objectifs de réduction d'impact environnemental de l'activité conduisent HAROPA – Port de Rouen à valoriser ces ouvrages déclassés pour permettre le développement du port. Afin d'accueillir des navires et des outillages de plus grande taille, tout en assurant la sécurisation du terre-plein et la pérennité du quai existant, des travaux de rempiètement sont prévus et comprennent (cf. Figure 1) :

- l'approfondissement de la souille de 1 mètre,
- le réalignement du quai, par la réalisation en partie avant du mur de quai d'un nouveau front d'accostage en béton fondé sur deux files de pieux métalliques battus,
- la création dans le terre-plein d'une dalle béton indépendante fondée sur 2 files de micropieux.

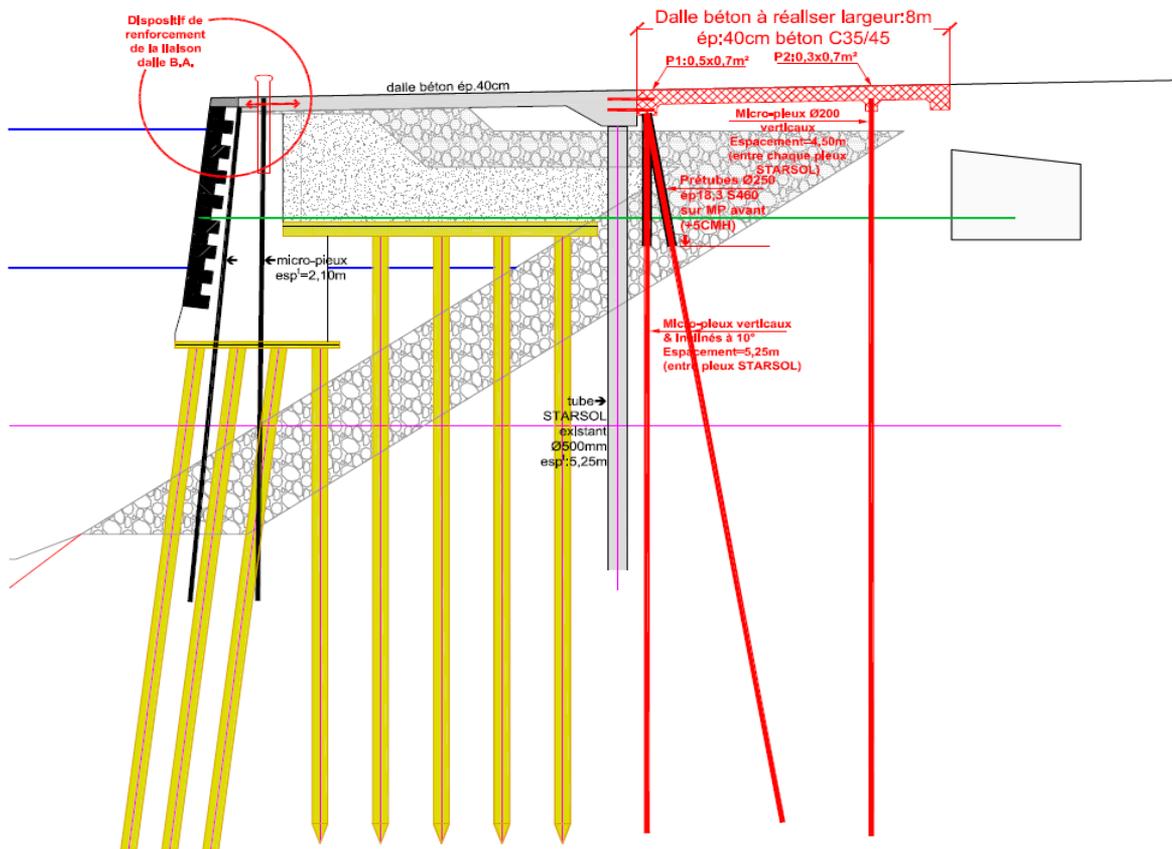


Figure 1. Plan du quai TCRD à l'état projeté après son renforcement par 2 files de micropieux

2.2. Contexte géotechnique

Le site d'étude, situé sur la presqu'île du Musoir, s'inscrit dans un contexte géologique de l'ouest du bassin sédimentaire parisien, caractérisé par une succession de formations alluvionnaires :

- la formation des alluvions modernes, de dominance limoneuse avec une éventuelle présence de graves, de sables et d'argiles,
- la formation des alluvions anciennes, provenant des silex de la craie, de nature graveleuse et sableuse.

Le substratum crayeux est situé à plus de 15 m sous le niveau du quai, altéré en sa partie supérieure sur une épaisseur de 1 à 4 m.

Tableau 1. Modèle géotechnique au droit du quai TCRD

Formation	Base (CMH)	γ (kN/m ³)	c_u (kPa)	C' (kPa)	Φ' (°)	E_M (MPa)	Pl^* (MPa)
Remblais	+5,2	19	-	0	30	4	0,5
Remblais crayeux	-	18	-	0	40	-	-
Alluvions modernes	-2,6	15	32	10	20	1,5	0,4
Alluvions anciennes	-6,3	20	-	0	35	10	1,5
Craie altérée	-9,9	20	-	10	35	15	1,5
Craie saine	-	20	-	20	35	50	4

Le site a connu de nombreuses campagnes de reconnaissances entre 1992 (lors des travaux de sécurisation) et 2021, comprenant entre autres des sondages carottés, des sondages pressiométriques et des sondages au pénétromètre statique (CPT). Des essais en laboratoire sur échantillons intacts ont également été réalisés.

L'interprétation de l'ensemble des sondages a permis d'établir le modèle géotechnique donné au tableau 1.

Les alluvions et la craie altérée possèdent des paramètres pressiométriques faibles, avec $E_M < 15$ MPa et $pl^* < 1,5$ MPa. La craie saine est nettement plus dure, avec un module pressiométrique moyen $E_M = 50$ MPa et une pression limite moyenne $pl^* = 4$ MPa.

Les essais en laboratoire mettent en évidence des paramètres de cisaillement reflétant la description de chaque formation, des alluvions modernes plus cohérentes de par leur nature limoneuse, et des alluvions anciennes plutôt frottantes. Les craies témoignent d'une cohésion et d'un angle de frottement élevés.

En plus des formations en place, les sondages ont mis en évidence sur une épaisseur importante les remblais du quai, formés de sables graveleux ou de graves et blocs de silex dans une matrice finement sableuse. Ils ont aussi traversé un masque en remblai crayeux mis en œuvre sur la pente du talus sur une épaisseur d'environ 1,6 m, composé de blocs de craie indurée et de silex et d'une matrice argileuse.

3. Etude de stabilité du quai

3.1. Principe de l'étude

L'étude de stabilité menée a pour but de vérifier le gain de sécurité obtenu vis-à-vis du grand glissement entre l'état actuel et l'état projeté du quai. La configuration complexe de l'ouvrage, composé d'un grand nombre d'éléments structurels en interaction, a conduit à s'orienter sur une modélisation aux éléments finis avec le logiciel ZSoil.

Le mode de calcul de stabilité de ZSoil est basé sur le critère de Mohr-Coulomb (figure 2), en supposant que la cohésion et l'angle de frottement du sol sont réduits d'un facteur SF que l'on incrémente jusqu'à ce que la stabilité générale ne soit plus assurée. On admet donc que le facteur de sécurité est le plus grand facteur SF avant la divergence du modèle.

Algorithm:

1. set $c^* = \frac{c}{SF}$
 $\tan \phi^* = \frac{\tan \phi}{SF}$
2. increase SF until instability occurs

Figure 2. Principe du calcul ZSoil

Il s'agit d'un modèle 2D plan, où le quai est modélisé suivant un maillage approprié, qui s'affine au niveau des intersections entre les différents éléments du quai et reste plus grossier aux extrémités. La modélisation a été effectuée sur trois profils du quai, nommés G, K1 et K2 :

- Le profil G a une souille actuelle au niveau -4,50 CMH. A l'état projeté elle est approfondie à -5,50 CMH. La dalle béton à réaliser derrière le quai aura une largeur de 8 m, et sera liée à deux files de micropieux. Dans la file avant s'intercalent des micropieux verticaux et inclinés à 10°, espacés de 5,25 m. La file arrière est composée uniquement de micropieux verticaux espacés de 5,25 m. Tous les micropieux ont un diamètre de 200 mm pour longueur de 20 m, et contiennent un tube métallique de 139 mm de diamètre et de 10,5 mm d'épaisseur. Cette section du quai sera sollicitée par un effort d'amarrage estimé à 24 kN/ml.

- Le profil K1 correspond à une souille au niveau -6,50 CMH. Les éléments de renforcement sont les mêmes dalles que pour le quai G, mais l'espacement entre les micropieux est réduit à 4,5 m. L'effort d'amarrage est t égal à 48 kN/ml.

- Le profil K2 est identique au profil K1, sauf pour les micropieux inclinés de la file avant qui ont une inclinaison de 30° et qui s'insèrent tous les 9 m dans la fille avant de micropieux verticaux espacés entre eux de 4,50 m.

La disposition des micropieux pour les trois profils est présentée en figure 3.

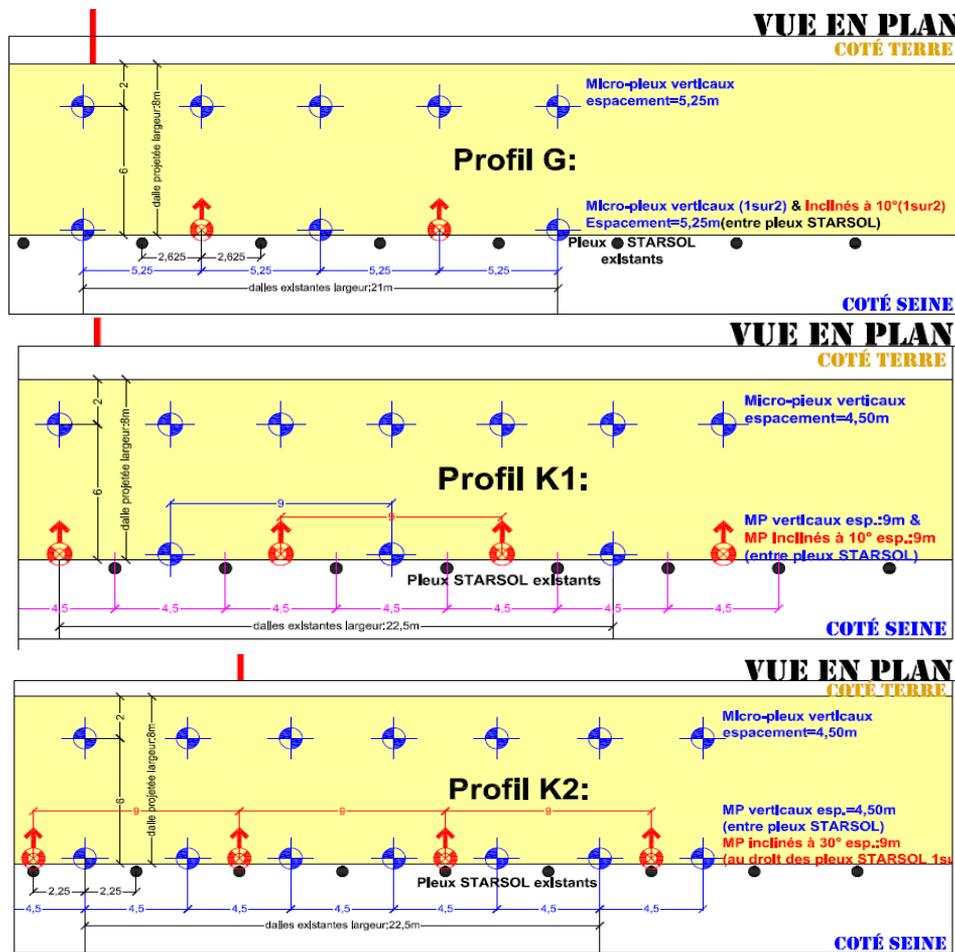


Figure 3. Disposition des micropieux pour les profils G, K1 et K2 du quai TCRD

Les niveaux d'eau considérés sont basés sur une étude piézométrique réalisée au niveau du quai TCRD. Les trois situations retenues pour l'étude sont : Haute Eau Equilibre (Nappe et Seine à 8,40 CMH), Basse Eau Transitoire (Nappe à 5,00 CMH, Seine à 4,00 CMH) et Haute Eau Transitoire (Nappe à 7,40 CMH, Seine à 8,40 CMH).

3.2. Résultats de l'étude

Le calcul est lancé sur ZSoil en incrémentant le facteur SF par pas de 0,05 jusqu'à ce que le modèle diverge, et ceci pour l'ensemble des cas de calcul à l'état actuel et l'état final.

Tableau 2. Résultats du calcul de stabilité sur ZSoil (facteur de sécurité)

Profil G			
	Haute eau équilibre	Basse eau transitoire	Haute eau transitoire
Etat actuel	1,20	1,10	1,20
Etat projeté	1,50	1,35	1,60
Gain	25%	23%	33%
Profil K1			
	Haute eau équilibre	Basse eau transitoire	Haute eau transitoire
Etat actuel	1,05	1,00	1,10
Etat projeté	1,20	1,10	1,25
Gain	14%	10%	14%
Profil K2			
	Haute eau équilibre	Basse eau transitoire	Haute eau transitoire
Etat actuel	1,05	1,00	1,10
Etat projeté	1,20	1,20	1,35
Gain	14%	20%	23%

Les résultats, synthétisés dans le tableau 2, montrent que le gain de sécurité est supérieur à 10% entre l'état initial et l'état projeté pour l'ensemble des cas étudiés. Il est également possible d'apprécier l'évolution du cercle de glissement du sol autour du quai sur l'interface des résultats de la modélisation ZSoil, comme illustré sur la figure 4.

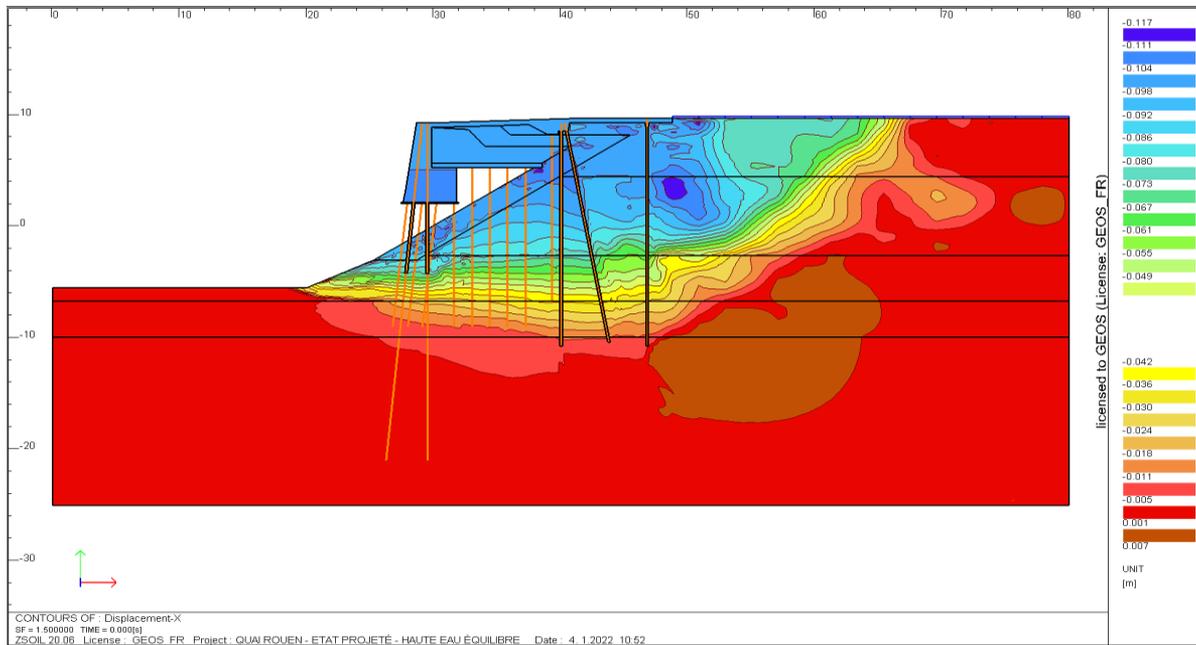


Figure 4. Cartographie des déplacements horizontaux au niveau du profil G à l'état projeté

4. Vérification des éléments structurels du quai

4.1. Pieux STARSOL®

Les micropieux ajoutés à l'arrière du quai vont contribuer à reprendre en partie les charges appliquées au quai et ainsi éviter que les pieux existants Starsol® soient sollicités au-delà de leurs résistances limites à l'état projeté, voir même moins par rapport à l'état initial. Sur ZSoil, il est possible de vérifier et comparer ces sollicitations au niveau des différents éléments structurels représentés dans le modèle.

Le tableau 3 synthétise les valeurs de moments se développant dans les pieux STARSOL®. La comparaison de ces valeurs entre l'état initial et l'état final montre que les pieux sont bien moins sollicités une fois les micropieux ajoutés, permettant ainsi de soulager ces pieux et réduire le moment fléchissant.

Tableau 3. Moments maximaux dans les pieux STARSOL® en kN.m

Profil G			
	Haute eau équilibre	Basse eau transitoire	Haute eau transitoire
Etat actuel	124,7	137,4	170,3
Etat projeté	17,7	25,4	14,6
Profil K1			
	Haute eau équilibre	Basse eau transitoire	Haute eau transitoire
Etat actuel	160,9	215,9	160,3
Etat projeté	24,3	24,1	30,8
Profil K2			
	Haute eau équilibre	Basse eau transitoire	Haute eau transitoire
Etat actuel	160,9	215,9	160,3
Etat projeté	26,2	34,1	32,1

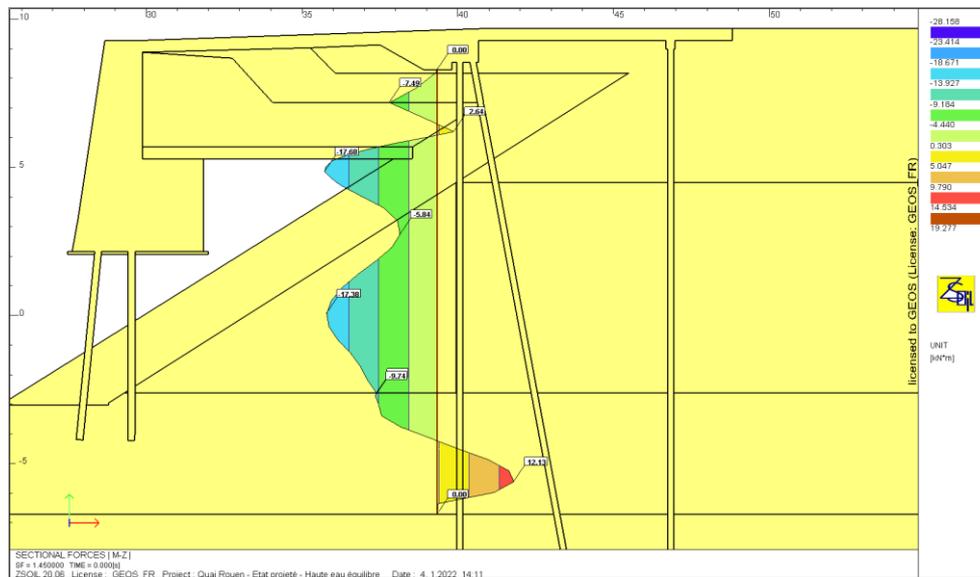


Figure 5. Diagramme des moments dans le pieu STARSOL® (Profil G – Etat projeté – Haute Eau Equilibre)

4.2. Micropieux en arrière du quai

De la même façon, il est possible d'obtenir les sollicitations dans les micropieux implantés sous la dalle béton en prolongement du quai. Ces éléments structurels contribuent largement à la stabilité du quai vis-à-vis des sollicitations induites par l'amarrage des nouveaux navire de croisière. Il est donc important de s'assurer que les micropieux soient résistants à tout type de sollicitation (effort normal, effort tranchant et moment fléchissant).

Le tableau 4 récapitule l'ensemble des valeurs de sollicitations se développant dans les nouveaux micropieux. Il s'agit des valeurs maximales par rapport aux deux files de micropieux. Ces sollicitations ne présentent aucun risque de rupture pour les micropieux, d'après la vérification effectuée selon les règles de l'Eurocode.

Tableau 4. Sollicitations maximales dans les micropieux en arrière du quai

Profil G			
	Haute eau équilibre	Basse eau transitoire	Haute eau transitoire
Moment (kN.m)	10,2	18,1	10,0
Effort tranchant (kN)	19,9	23,76	20,9
Effort normal (kN)	130,1	148,0	130,2

Profil K1			
	Haute eau équilibre	Basse eau transitoire	Haute eau transitoire
Moment (kN.m)	23,3	31,4	29,3
Effort tranchant (kN)	36,2	50,5	50,9
Effort normal (kN)	167,5	187,6	191,0
Profil K2			
	Haute eau équilibre	Basse eau transitoire	Haute eau transitoire
Moment (kN.m)	22,8	27,9	23,4
Effort tranchant (kN)	178,6	115,1	98,8
Effort normal (kN)	204,7	223,6	205,7

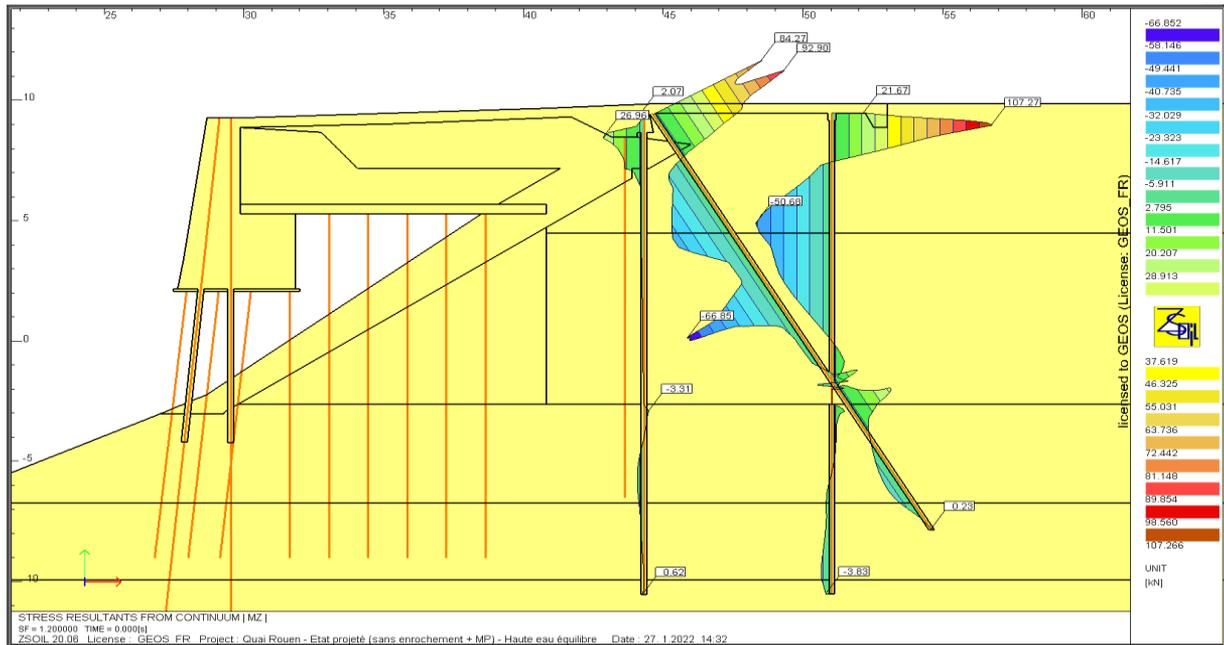


Figure 6. Diagramme des moments « linéiques » dans les micropieux (Profil G – Etat projeté – Haute Eau Equilibre)

5. Analyse de risque d'affouillement des remblais crayeux sur les éléments structurels du quai (cas accidentel)

L'affouillement des remblais crayeux du au pourrissement du platelage en bois présente un risque à étudier, cette configuration pouvant engendrer au niveau des micropieux et des pieux du quai des efforts supplémentaires dus à la perte de butée derrière ces éléments.

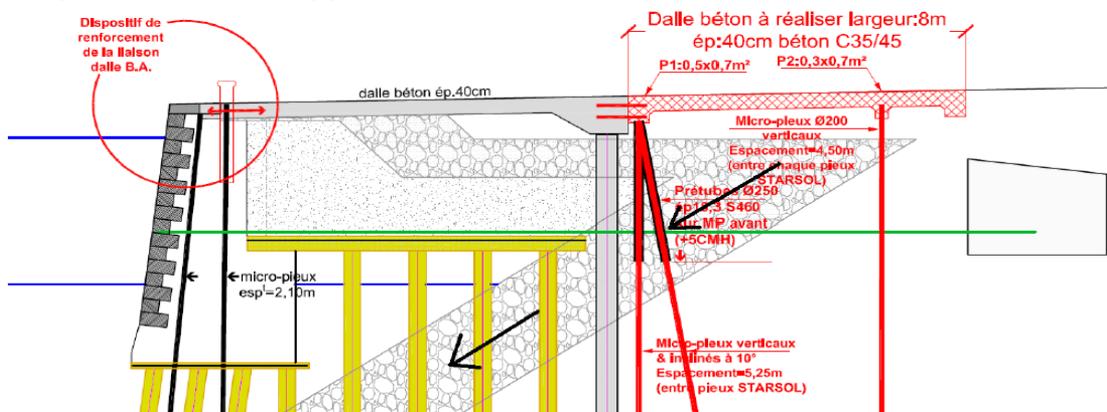


Figure 7. Illustration de l'affouillement des remblais crayeux (Profil G)

Afin de pouvoir prendre en compte cet effet, il a été retenu d'assimiler la perte de butée derrière un élément structurel à une contrainte supplémentaire appliquée devant cet élément. Un calcul analytique a donc été mené dans le but de définir l'effort horizontal supplémentaire qui sera appliqué à l'élément dans la modélisation.

5.1. Pieux STARSOL®

L'effort horizontal supplémentaire est appliqué en tête des pieux STARSOL®, auquel nous avons ajouté le moment maximal donné par le modèle ZSoil, présenté dans le tableau 3. Le calcul analytique des nouveaux efforts dans les pieux a été mené avec le logiciel GEOFOND développé par GEOS, et permet de déduire le nouveau moment maximal dans les pieux pour chaque cas de calcul (tableau 5), légèrement supérieur à celui du tableau 3, mais qui reste acceptable et ne conduit donc pas à la rupture du pieu.

Tableau 5. Moments dans les pieux STARSOL® en kN.m (cas accidentel)

Profil G (sans prise en compte de l'affouillement)			
	Haute eau équilibre	Basse eau transitoire	Haute eau transitoire
Etat actuel	124,7	137,4	170,3
Etat projeté	17,7	25,4	14,6
Profil G (avec prise en compte de l'affouillement)			
	Haute eau équilibre	Basse eau transitoire	Haute eau transitoire
Etat actuel	142	153	201
Etat projeté	18	26	18

5.2. Micropieux en arrière du quai

L'effort horizontal supplémentaire est appliqué de la même façon en tête des micropieux, et s'ajoute à l'effort tranchant calculé sur ZSoil, présenté dans le tableau 4. Bien que le suivi réalisé dans le cadre de la gestion de patrimoine du port, suivi bathymétrique, subaquatique et superficielle indique, localement, la présence d'affouillement des remblais du quai, ces efforts supplémentaires, calculés au niveau du profil G uniquement, ont été ajoutés aux efforts résultants du calcul ZSoil sur tous les profils afin de constituer une structure homogène. La vérification, présentée par la suite pour le profil K2, est donc plus défavorable et enveloppe l'ensemble des profils du quai.

Les nouvelles sollicitations, synthétisées dans le tableau 6, ne présentent pas de risque de rupture pour les micropieux.

Tableau 6. Sollicitations maximales dans les micropieux en arrière du quai (cas accidentel)

Profil K2			
	Haute eau équilibre	Basse eau transitoire	Haute eau transitoire
Moment (kN.m)	22,8	28	23,4
Effort tranchant (kN)	195,0	132,8	121,7
Effort normal (kN)	204,9	223,6	205,7

6. Conclusion

Les travaux du quai TCRD à Rouen ont nécessité une étude aux éléments finis permettant de vérifier les sollicitations et les interactions entre les différents éléments de structure, existants et futurs, composant la configuration projetée du quai. La modélisation a permis également de s'assurer du gain de sécurité recherché entre l'état actuel et l'état projeté, afin notamment d'éviter de solliciter l'existant plus qu'il ne l'est actuellement.

La valorisation des connaissances de l'existant, des inspections et suivis réalisés dans le cadre de la gestion de patrimoine associées à une campagne d'investigations géotechniques ont permis de fiabiliser les paramètres du modèle géotechnique, valider la solution consistant à prolonger le quai par le biais d'une dalle en béton reposant sur deux files de micropieux et s'assurer de la stabilité long terme de l'ouvrage.

La réutilisation d'éléments de structures anciennes dans des nouveaux ouvrages offre aux gestionnaires de patrimoine une solution d'optimisation du foncier, permettant d'associer développement d'activité et pérennisation des infrastructures.