

RENFORCEMENT D'UN QUAI EN MACONNERIE : APPORT DE MODELISATIONS COMPLEMENTAIRES

GEOTECHNICAL REINFORCEMENT OF A MASONRY QUAY WALL: USE OF SEVERAL GEOTECHNICAL MODELS

Laurent VENARD¹, Jonas VERSCHUERE²

¹ Hydrogéotechnique Centre, Fontaines (71), France

² Hydrogéotechnique Sud Est, Sainte Hélène du Lac (73), France

RÉSUMÉ – Cet article présente plusieurs modélisations géotechniques réalisées pour le dimensionnement du renforcement géotechnique d'un quai par tirants et rideau de palplanches à Chalon-sur-Saône. L'aspect complémentaire de ces modélisations, qui permettent de dimensionner un confortement adapté dans un contexte géotechniquement complexe d'interactions entre ouvrages est mis en lumière.

ABSTRACT – This paper presents several geotechnical models built for the design of the geotechnical reinforcement of a quay wall by anchors and sheet piles at Chalon-sur-Saone, France. It highlights the fact that these models complement each other and give confidence in the proposed design in a complex situation with many uncertainties regarding geotechnical conditions and current status and geometry of the quay wall.

1. Introduction

Le Quai des Messageries, qui a été construit au XVIII^{ème} siècle et réhaussé au XX^{ème} siècle, se situe le long de la Saône, à Chalon sur Saône (71). Il comporte deux murs parallèles en maçonnerie de hauteur variable séparés par une voie qui passe sous le pont de l'île Saint Laurent. Du fait de l'apparition de désordres en surface et sur le mur aval, cette voie est actuellement fermée.

Dans le cadre d'un projet plus global de réaménagement des quais, la communauté urbaine du Grand Chalon souhaite réhabiliter ce quai et rouvrir la voie basse aux mobilités douces.

Suite à la réalisation de sondages géotechniques permettant d'obtenir des données sur la géométrie du quai ainsi que sur la stratigraphie locale, d'importants travaux de renforcement par l'installation de tirants d'ancrage et d'un rideau de palplanches en pied de quai ont été envisagés au stade AVP par le bureau d'études PMM, puis dimensionnés en détail dans le cadre d'une mission G2 PRO réalisée par HYDROGEOTECHNIQUE.

Pour permettre le dimensionnement de ce confortement complexe, diverses modélisations géotechniques ont été réalisées : modélisation de type « Ecrans » par la méthode des coefficients de réaction, modélisation Eléments Finis 2D et calcul de stabilité globale.

Dans cet article, après une présentation du contexte historique et géotechnique, les modélisations réalisées seront détaillées, et leurs résultats analysés et comparés.

2. Contexte historique et géotechnique du Quai des Messageries

2.1. Historique du quai

Selon les informations fournies par la communauté urbaine du Grand Chalon, un premier quai en maçonnerie d'environ 12 m de haut a été construit en 1773 par DUMOREY-GAUTHEY. En 1839-1844, une banquette de halage d'environ 5 m de haut a été construite

par M. MOREAU environ 5 m devant ce quai. Il est intéressant de noter que le niveau de la Saône était environ 2 m plus bas qu'aujourd'hui à cette époque, ce qui a permis la réalisation des travaux quasiment à sec.

Durant la seconde guerre mondiale, le pont de l'île Saint Laurent et le quai ont été bombardés, et par la suite réparés, avec construction d'une passerelle provisoire au droit du pont (voir Figure 1 ci-dessous)



Figure 1. Vue du quai en 1950 avant réhausse et du pont provisoire de l'île Saint Laurent

En 1952, ces quais ont été profondément remodelés, en arasant le quai DUMOREY-GAUTHEY, que nous appellerons par la suite « quai amont », et en réhaussant la banquette de halage, que nous appellerons par la suite « quai aval », pour former deux rampes vers le pont de l'île Saint Laurent : une rampe ascendante permettant de passer au-dessus du pont, et une rampe descendante permettant de passer en dessous (voir Figure 2 ci-dessous)

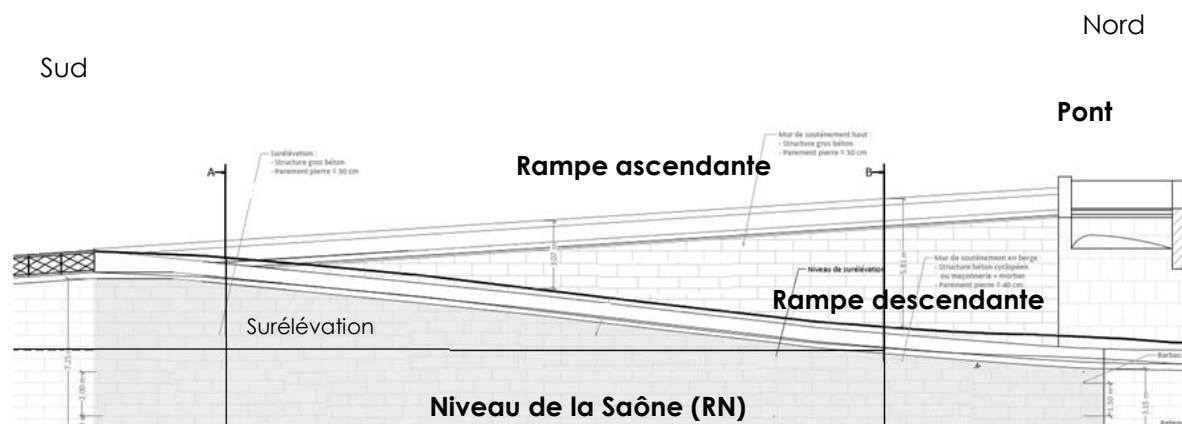


Figure 2. Elévation du quai actuel

Bien que peu d'informations détaillées soient disponibles sur leurs fondations, ces quais en maçonnerie ont très probablement été fondés sur pieux bois battus comme l'ensemble des autres quais réalisés le long de la Saône, ce qui a été confirmé par les reconnaissances géotechniques (voir plus bas).

Aujourd'hui, les désordres apparus sur le quai et ayant entraîné la fermeture de la voie passant sous le pont de l'île Saint Laurent sont les suivants :

- Bombement du parement avec dé-jointoiement des pierres,
- Fissuration de la chaussée.

Enfin, les informations disponibles sur l'évolution du lit de la Saône (voir Figure 4 ci-dessous) montrent que la zone a subi un affouillement entre 1760 et aujourd'hui ayant pu contribuer à la déstabilisation du quai existant.

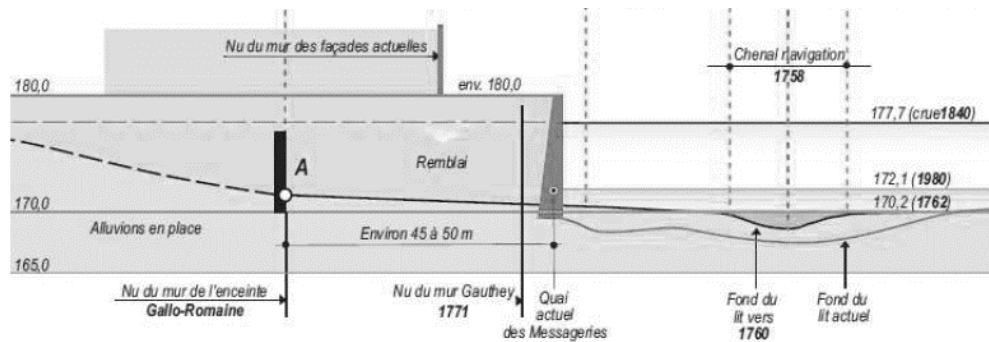


Figure 3. Evolution du niveau de la Saône au droit du Quai des Messageries

2.2 Résultats des reconnaissances géotechniques

De nombreux sondages géotechniques carottés et pressiométriques verticaux, inclinés et horizontaux ont été réalisés par HYDROGÉOTECHNIQUE au droit du quai en 2019, 2021 et 2022, à la fois pour identifier le contexte géotechnique et tenter de reconnaître la géométrie du mur de quai.

Le contexte géotechnique est le suivant :

- Jusqu'au pied du mur de quai aval, soit sur une hauteur pouvant localement dépasser 10 m, nous trouvons des Remblais (couche 0.2) comportant des sables, limons, cailloux et débris anthropiques divers (briques, mâchefers), peu compacts
- En dessous, nous rencontrons les Alluvions Sablo-limoneuses à Sablo-graveleuses de la Saône, de compacité moyenne à élevée en tête (couche 1.1), devenant élevée à très élevée en profondeur (couche 1.2) environ 5 m sous le niveau du lit de la Saône en pied de quai
- Enfin, environ 10 m sous le lit de la Saône, nous rencontrons des Argiles et des Sables (couche 2) pouvant correspondre à des alluvions de la Saône ou au toit altéré des Marnes de Bresse, qui sont le substratum local

Les paramètres géotechniques des couches rencontrées sont récapitulés dans le Tableau 1 ci-dessous :

Tableau 1. Paramètres géotechniques des couches rencontrées

Lithologie	Remblais	Alluvions 1	Alluvions 2	Alluvions ou Marnes de Bresse ?
Cote du toit (approx.)	+180	+170	+164	+159
Pression limite Pl^* (MPa)	0.3	1.1	3.2	3.2
E_m (MPa)	4	10	40	50
Coeff. rhéologique α	0.50	0.33	0.33	0.50
Poids volumique γ (kN/m ³)	19	19	20	21
Cohésion drainée c' (kPa)	0	0	0	5
Angle de frottement drainé Φ' (°)	25	30	35	25

Le contexte hydrologique est assez simple, avec la présence de la nappe d'accompagnement de la Saône ayant un niveau sensiblement égal à celui de la Saône, et variant entre un niveau de retenue normale à 172,07 m NGF et un niveau de crue centennale à 178,19 m NGF.

Les reconnaissances ont aussi permis de repérer la présence de pieux en bois sous le mur de quai aval, et de reconnaître des épaisseurs assez faibles de maçonnerie pour ce même mur, d'environ 1,2 m en partie basse. Cette faible épaisseur contraste avec la grande hauteur du mur. Sur ce point, il est important de noter que, malgré la réalisation de

nombreux sondages, les reconnaissances ne sont que ponctuelles et ne peuvent pas établir en détail la géométrie du mur ainsi que les dimensions de ses fondations.

La Figure 4 ci-dessous présente un profil géotechnique type au droit du quai.

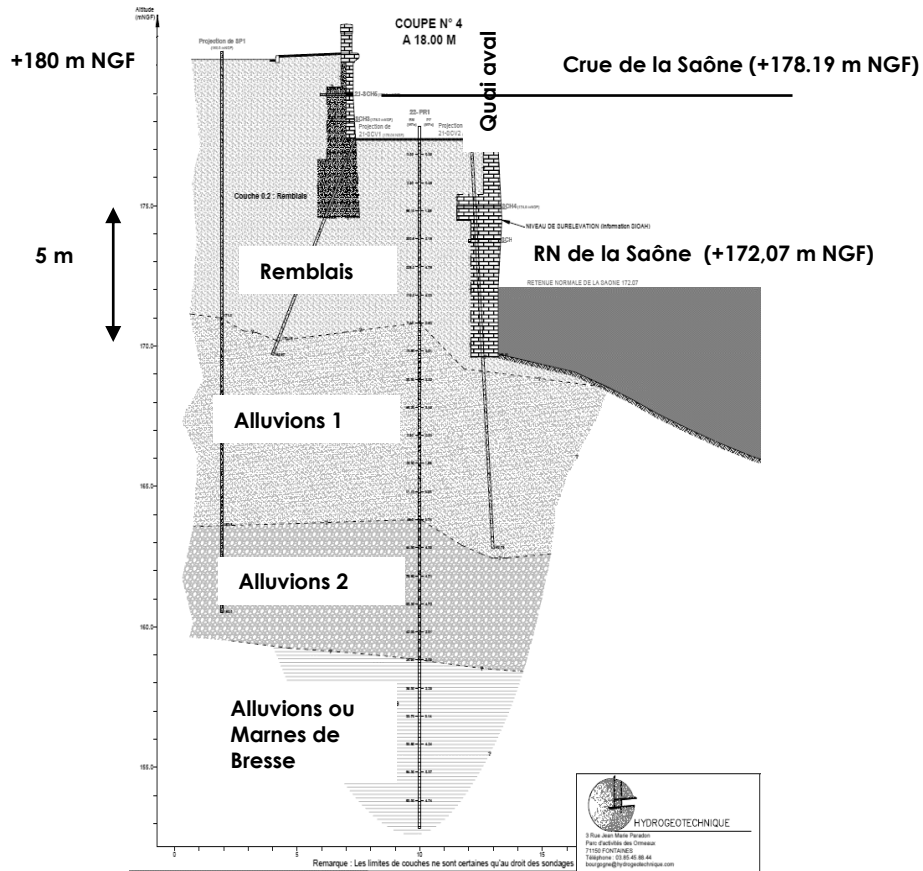


Figure 4. Profil géotechnique au droit du quai

3. Confortement proposé et modélisations

3.1. Hypothèses retenues et principe de confortement

Les origines des désordres observés sur ce quai ne sont à ce jour pas clairement établies, mais combinent probablement une dégradation importante de l'ouvrage (mortier, pieux bois...), un affouillement progressif des pieux du quai et un dimensionnement initial insuffisant au vu des standards actuels.

Les reconnaissances géotechniques n'ayant pas permis de définir précisément la géométrie du quai, qui est potentiellement très complexe du fait de nombreux travaux réalisés, il a fallu faire des hypothèses pour dimensionner le confortement. Nous avons supposé qu'à long terme les pieux bois pouvaient se dégrader au point ne plus contribuer à la stabilité du mur de quai et que la largeur de sa semelle de fondation pouvait se limiter à celle du mur reconnu, soit environ 1,2 m. Dans ces conditions, il est évident que la stabilité de ce mur très élancé n'est pas assurée sans confortement. Le dimensionnement du confortement est réalisé pour obtenir une sécurité satisfaisante même dans cette hypothèse très défavorable.

Après confortement, les conditions subies par le quai sont les suivantes :

- Niveau de la Saône identique à 172,07 m NGF des 2 côtés,

- Crue centennale à +178,19 m NGF,
- Décrue avec un dénivelé de 50 cm entre la nappe amont et le niveau de la Saône.

Le principe de confortement retenu lors de la phase AVP est le suivant :

- La réalisation de 2 à 3 lits de tirants passifs (barres GEWI diamètre 40 mm), scellés IGU, de grande longueur (18 m à 22 m) au-dessus du niveau de la Saône
- La mise en place d'un rideau de palplanches devant le pied du quai servant à le bloquer, avec coulage de gros béton entre le quai et ce rideau.

Ces éléments sont présentés sur la Figure 5 ci-dessous.

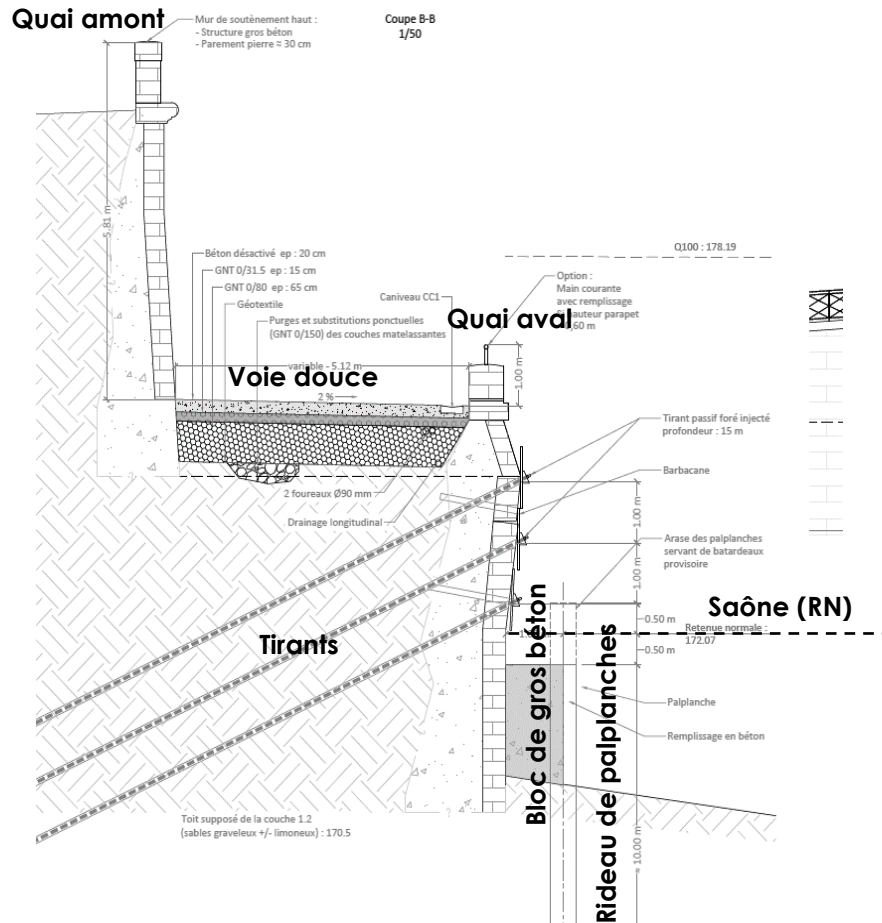


Figure 5. Principe de confortement

Lors de la mission G2 PRO, les premiers calculs ont montré que la butée assurée par le rideau de palplanches en pied de quai ne suffisait pas pour le stabiliser sans grands déplacements de ce rideau du fait des relativement faibles caractéristiques des Alluvions de la Saône, même avec des palplanches de forte inertie. Il s'est donc révélé nécessaire de recréer un « encastrement » entre le mur de quai et le rideau de palplanches, en ajoutant une rangée de barres en acier scellées dans la maçonnerie du quai et soudées au rideau de palplanches, pour transmettre des tractions alors que le gros béton transmet uniquement des compressions. Dans ces conditions, le confortement proposé permet de stabiliser le quai sans déplacements excessifs.

3.2. Modélisations réalisées

Du fait de la complexité des interactions entre le mur de quai, les tirants et le rideau de palplanches, nous avons choisi de réaliser trois modélisations du quai, et de dimensionner le confortement en considérant l'enveloppe des résultats obtenus

- Une modélisation « Ecrans » à l'aide du logiciel K-Rea ®
- Une modélisation « Eléments Finis 2D » à l'aide du logiciel PLAXIS 2D 2016 ®

- Une modélisation « Stabilité » à l'aide du logiciel TALREN® servant uniquement à vérifier le coefficient de stabilité à la rupture mixte du quai après confortement, qui ne sera pas présentée ici.

3.2.1. Modélisation « Ecran »

Cette modélisation a été réalisée par la méthode des coefficients de réaction (logiciel K-REA®, module double écran), en considérant le mur de quai aval comme un premier écran (écran 1) et le rideau de palplanches comme un deuxième écran (écran 2). Les raideurs sol/écran sont calculées par la formule de Schmitt à partir des paramètres pressiométriques conformément à l'usage.

Nous considérons initialement l'écran 1 encastré en pied et supportant les poussées du remblai arrière du quai, ce qui correspond à la situation actuelle. Par la suite des tirants sont installés pour stabiliser cet écran, et il est connecté à l'écran 2 par un buton représentant le bloc de gros béton, et un tirant représentant les barres qui relieront palplanches et maçonnerie. Enfin, l'encastrement en pied de l'écran 1 est désactivé, pour simuler la dégradation des pieux en bois.

Dans cette modélisation, l'interaction entre l'écran 1 et l'écran 2 se limite au buton et au tirant précités, ainsi qu'à la prise en compte du poids des terres retenus par l'écran 1 et supposé uniforme en amont de l'écran 2, sans concentration de contrainte en pied d'écran 1. Nous verrons plus loin qu'il s'agit d'une hypothèse simplificatrice qui impacte les résultats.

Les vues du modèle dans la situation actuelle et dans la situation future (après confortement et désactivation des pieux bois) sont présentées dans la Figure 7 ci-dessous.

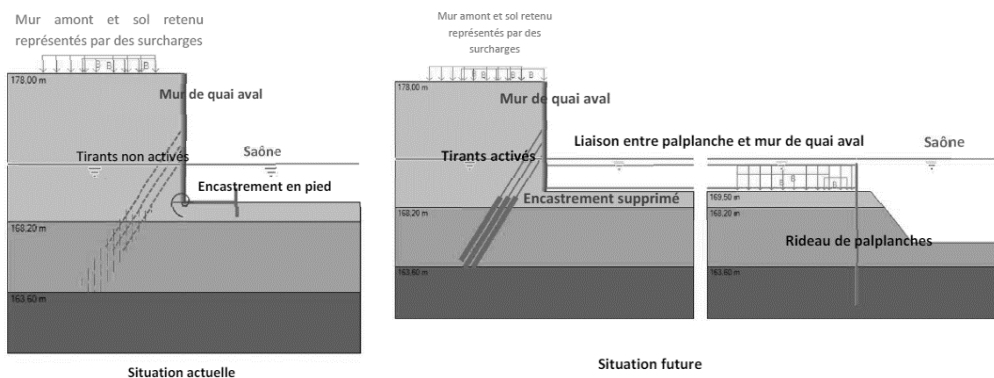


Figure 6. Vues du modèle « Ecran »

3.2.2. Modélisation « Eléments Finis »

Une deuxième modélisation a été réalisée à l'aide du logiciel Eléments Finis PLAXIS 2D 2016®. Cette modélisation a pour avantage de pouvoir tenir compte de l'ensemble des interactions complexes entre les différents éléments, cependant elle nécessite davantage d'hypothèses que la modélisation « Ecrans » présentée plus haut, entre autres celles liées à la situation initiale et au modèle de comportement du sol :

- Concernant la situation initiale, nous définissons un maillage arbitraire de pieux bois sous le mur de quai, qui sont ensuite désactivés après installation du renforcement.

- Concernant le modèle de comportement du sol, il est généralement conseillé d'utiliser un modèle de sol élaboré de type « Hardening Soil Model » ou similaire pour modéliser des soutènements. Cependant, ici, il nous a paru illusoire de caler correctement les paramètres d'un tel modèle au vu des informations limitées disponibles, en particulier dans les remblais. Nous nous sommes donc limités à des modèles élastiques avec critère de plasticité de Mohr Coulomb, en définissant un module de Young E_y à partir du module pressiométrique E_m

comme $E_y = k.E_m$ avec $k = 4$ dans les sols de compacité faible à intermédiaire et $k = 3$ pour les sols de compacité élevée à très élevée.

Les vues du modèle dans la situation actuelle et dans la situation future (après confortement et désactivation des pieux bois) sont présentées dans la Figure 7 ci-dessous.

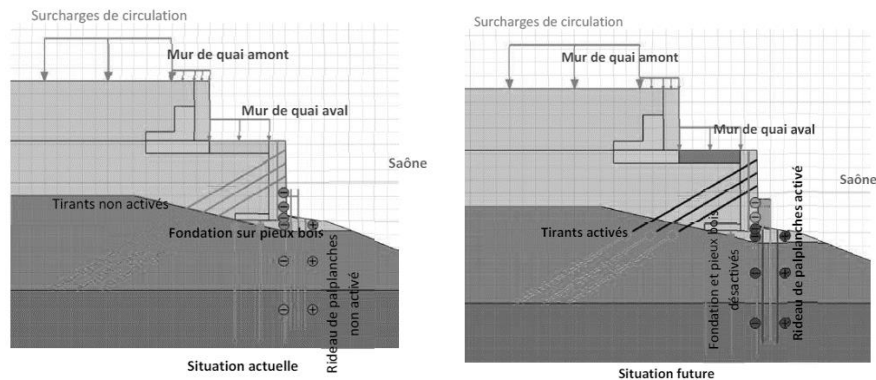


Figure 7. Vues du modèle « Eléments Finis »

Dans ce modèle Eléments Finis, nous avons dans un premier temps modélisé les tirants et le rideau de palplanches pré-dimensionnés lors de la modélisation « Ecrans », soit 3 rangées de tirants de diamètre 40 mm tous les 2 m (traction ELU admissible après corrosion de l'ordre de 380 kN dans chaque tirant), et des palplanches PU18 (moment ELU admissible après corrosion de l'ordre de 580 kN.m/m).

Nous verrons plus bas que les résultats de ce modèle ont permis de voir que les palplanches sont beaucoup plus sollicitées que prévu après disparition des pieux bois, ce qui a conduit à préconiser des palplanches ayant une plus forte résistance à la flexion, soit des palplanches PU28 (moment ELU admissible après corrosion de l'ordre de 930 kN.m/m).

4. Comparaison des résultats des modèles

4.1 Déplacement du quai après confortement

Les déplacements calculés après confortement et dégradation de la fondation du quai sont les suivants :

Tableau 2. Déplacements calculés

Modèle	Déplacement horizontal en tête de quai aval	Déplacement horizontal en pied de quai aval	Tassement à l'arrière du quai
Ecrans	20 mm	20 mm	-
Eléments finis	22 mm	40 mm	30 à 40 mm

Nous pouvons voir que les déplacements en tête du quai aval, gouvernés par la raideur des tirants de confortement, sont similaires dans les deux modèles, avec au plus 2 mm de différence. Du fait de la longueur des tirants, l'hypothèse du « point fixe » à mi-longueur ancrée prise dans les modèles « Ecrans » est confirmée par les modèles « Eléments Finis ».

Par contre, le déplacement en pied de quai aval est deux fois plus élevé dans les modèles « Eléments Finis ». Ce déplacement dépend principalement de la raideur du rideau de palplanches. Cette différence provient vraisemblablement des phénomènes suivants :

- La présence d'une concentration de contraintes juste derrière le rideau de palplanches en pied du mur de quai aval, qui influence fortement le déplacement de la tête du rideau de palplanches
- L'influence plus grande de la « fosse d'érosion » présente dans la Saône devant le rideau de palplanches sur la mobilisation de la butée devant ce rideau dans les

modèles « Eléments Finis ». En effet, la présence d'un talus en aval d'un soutènement n'est modélisée que par une diminution du palier plastique en butée dans les modèles « Ecrans », sans diminution de la raideur sol/écran, alors que la raideur en butée est nécessairement réduite du fait du talus.

4.3 Moments de flexion dans le rideau de palplanches

Les moments de flexion calculés dans le rideau de palplanches après confortement et dégradation de la fondation du quai sont les suivants :

Tableau 3. Moments de flexion dans le rideau de palplanches (ELU)

Modèle	Moment maximum dans le rideau de palplanches
Ecrans	285 kN.m
Eléments finis	679 kN.m

Les modèles « Eléments Finis » donnent des valeurs de moment dans le rideau de palplanches plus de deux fois supérieures à celles obtenues dans les modèles « Ecrans », de manière cohérente avec les valeurs de déplacement exposées plus haut, pour des raisons a priori similaires. Comme indiqué plus haut, cela conduit à la nécessité de prévoir des palplanches plus rigides (PU28 ici), pour résister aux moments calculés tout en limitant les déplacements.

4.2 Effort dans les tirants de confortement

Les efforts calculés dans les tirants après confortement et dégradation de la fondation du quai sont les suivants :

Tableau 4. Tensions dans les tirants (ELU)

Modèle	Tirant supérieur	Tirant médian	Tirant inférieur
Ecrans	275 kN	290 kN	350 kN
Eléments finis	225 kN	280 kN	365 kN

Les efforts dans les tirants sont très similaires quel que soit le modèle. Les simplifications réalisées dans le modèle « Ecrans » sont acceptables pour leur dimensionnement.

5. Conclusions

Le dimensionnement du confortement d'un ouvrage ancien subissant des désordres, comme le mur de quai étudié ici, est un exercice délicat, car les informations disponibles sur sa géométrie sont souvent très parcellaires en dépit d'investigations détaillées, et car cet ouvrage ne rentre généralement pas dans un des « cas types » où la méthode de dimensionnement est clairement établie dans les normes usuelles.

Ici, nous avons proposé une approche fondée sur la prise en compte d'hypothèses simples et sécuritaires et sur la réalisation de plusieurs modèles géotechniques basés sur des hypothèses simplificatrices différentes permettant de proposer un dimensionnement pertinent du confortement, en considérant l'enveloppe des résultats des modèles.

Pour cet ouvrage, les travaux n'ont pas encore été réalisés, cependant il nous paraît important d'insister sur la nécessité d'instrumenter des éléments de confortement (cibles topographiques, mesure de tension dans les tirants). Cette instrumentation a les objectifs suivants :

- Pendant les travaux, s'assurer que ces derniers n'entraînent pas de déstabilisation de l'ouvrage,
- Après les travaux, valider le bon comportement du renforcement sur la durée de vie de l'ouvrage, au fur et à mesure de la dégradation probable des pieux bois.