



Analyse des mesures d'efforts dans les tirants d'ancrage passifs d'un quai sur pieux

Luc Verdure, Pascal Casari, Franck Schoefs

*GéM, Faculté des Sciences et Techniques de Nantes,
BP 92208 - 44322 Nantes cedex 3, France
Email : luc.verdure@physique.univ-nantes.fr
Tel : 02 51 12 55 24 Fax : 02 51 12 55 57*

Résumé:

Ce travail concerne la présentation et l'analyse des résultats d'une instrumentation de tirants d'ancrage passifs dans un quai sur pieux. Ces investigations sont menées afin d'identifier les phénomènes physiques responsables du niveau des efforts mesurés ainsi que l'origine de leurs variations. Les résultats sont présentés du point de vue des évolutions spatiales et temporelles à court et moyen terme. Une corrélation avec la marée est notamment mise en évidence. En revanche, les efforts dans les tirants et leurs variations à court terme présentent une forte variabilité spatiale. Un calcul géotechnique simple a permis d'estimer correctement les valeurs moyennes, mais n'a pu rendre compte de la variabilité spatiale.

Abstract:

In this work, results from the instrumentation of anchoring rods on a container wharf are presented. This study is conducted in order to identify the main physical phenomena responsible for the loads values and their corresponding scatter. In order to gain confidence in the tests results, wharf construction and setup of sensors are particularly observed. Results are spatially and temporally presented. A correlation of the load variations and the tide level is noticed. Then a simple geotechnical model allows to model the average of the measured loads, but cannot explain the high scatter in the spatial distribution of those loads.

Mots-clés: Quai sur pieux, tirants d'ancrage passifs, extensomètres à corde vibrante.

1.Introduction

Le suivi en service des structures de génie civil est un enjeu majeur pour l'optimisation des programmes d'inspection, de maintenance et de réparation. Il permet en outre d'améliorer les connaissances sur le comportement des ouvrages innovants ou complexes, en particulier les ouvrages portuaires.

Plusieurs instrumentations de quais ont déjà été réalisées et publiées. On peut notamment citer le quai Bougainville au Havre¹ (paroi moulée avec une nappe de tirants d'ancrage précontraints), le quai en eau profonde du port de Calais² (paroi moulée avec deux nappes de tirants d'ancrage passifs) et le terminal à conteneurs Altenwerder à Hambourg³ (quai hybride, avec paroi de soutènement et pieux, ainsi qu'une nappe de pieux d'ancrage inclinés). Les instrumentations, plus ou moins complètes, permettent toujours de mesurer les efforts normaux dans les ancrages. On rencontre dans certains cas des mesures de pression totale du sol, des mesures inclinométriques et tassométriques et des mesures de déformations dans la paroi de soutènement.

Cet article présente l'instrumentation réalisée sur le Terminal à Marchandises-Diverses et à Conteneurs 4 (T.M.D.C. 4) du Port Atlantique de Nantes – Saint-Nazaire (P.A.N.S.N.). L'ouvrage et son instrumentation sont présentés. Les mesures obtenues, confrontées aux hypothèses et résultats de calcul, révèlent un fonctionnement complexe des tirants d'ancrage. Une analyse fine, via une modélisation et une interprétation du phasage chantier et des choix technologiques réalisés est évoquée. Elle est indispensable à la compréhension de certains phénomènes liés à la marée notamment.

2.Présentation de l'ouvrage étudié : le T.M.D.C. 4 à Montoir (44)

2.1.Présentation générale

Le T.M.D.C. 4 est un quai sur pieux de 255 m de longueur et de 43 m de largeur. Il est situé sur la commune de Montoir (44), à deux kilomètres en aval du pont de Saint-Nazaire, sur la rive nord de l'embouchure de la Loire. Ce terminal est prévu pour recevoir des navires de fort tonnage (50 000T), de type over-panamax, et d'un tirant d'eau maximal de 14 m, ce qui est le cas des portes-conteneurs à l'usage desquels il est principalement destiné.

2.2.Caractéristiques structurelles.

Les principaux éléments structurels du T.M.D.C. 4 sont les suivants :

- les pieux : tubes d'acier, d'une épaisseur de 10,3 ou 12 mm, remplis de béton, battus au refus jusqu'au toit rocheux à 45 m de profondeur,
- la plate-forme : reprise des efforts verticaux (conteneurs, grue mobile de 335 T et portiques de 1 100 T) et lien structurel entre les pieux. Elle est formée d'un réseau triangulaire, visible figure 2, de poutres en béton armé (B.A.) de 75 cm de hauteur et d'une dalle B.A. de 25 cm d'épaisseur.
- le mur d'arrière-quai (4,35 m de hauteur), solidaire de la plate-forme : appui latéral sur le remblai et répartition d'importantes charges ponctuelles (introduites par les pieux et les tirants) dans la plate-forme, sous lequel se trouve un rideau parafouille en palplanches (5 m de hauteur).
- les ancrages passifs : tirant cylindrique en acier de 85 mm de diamètre et de 20 m de longueur, et plaque d'ancrage en B.A. Chaque tirant est relié au mur d'arrière-quai à une de ses extrémités, à la plaque d'ancrage à l'autre extrémité. Dans les deux cas ces liaisons sont de type rotule unilatérale.

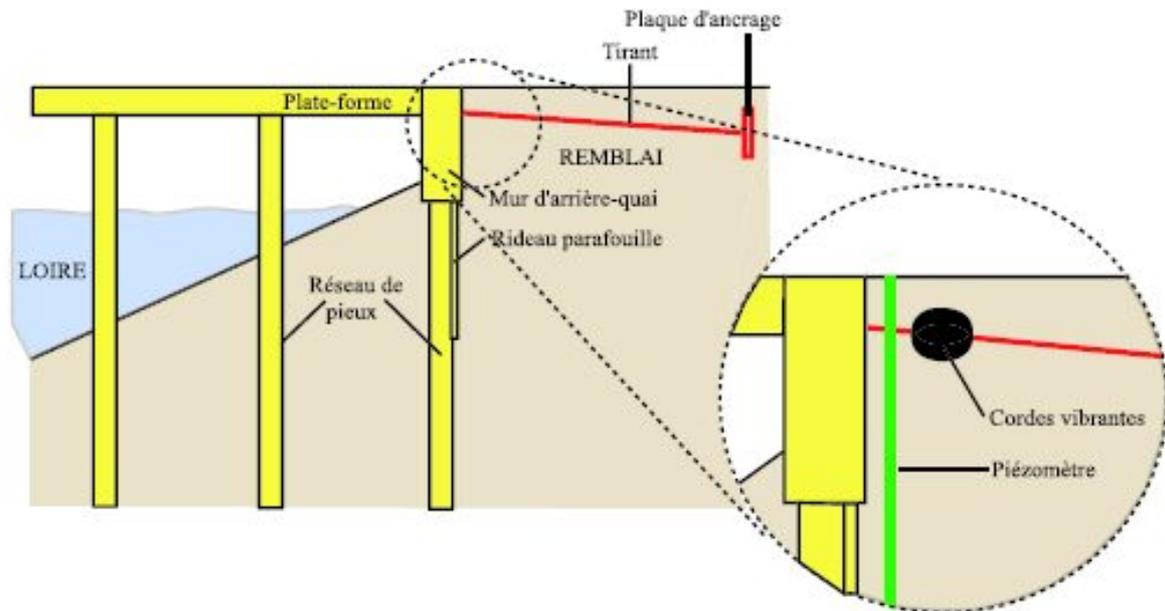


Figure 1 : Vue en coupe schématique du T.M.D.C. 4.

L'ensemble de ces éléments de la structure est représenté par le schéma figure 1 (les capteurs représentés sur le schéma sont présentés au § 3). Le sol en place est composé d'une couche de sables surplombant des silts argileux. Le remblai d'apport, au dessus de la base du mur d'arrière-quai, est un gravier concassé 0/180.

2.3.Principales phases d'exécution

La construction du T.M.D.C. 4 s'est étalée sur 1 an et 4 mois, de novembre 2000 à février 2002. Les différentes étapes, réalisées à l'avancement de l'amont vers l'aval, sont les suivantes : travaux de terrassement préliminaires et réalisation d'inclusions en partie aval, battage des pieux, battage du rideau parafouille, coffrage du mur d'arrière-quai, pose des chapiteaux et clavage des éléments préfabriqués, pose des tirants et remblayage, travaux de terrassement finaux et installation des équipements.

La figure 2 est une photographie aérienne qui regroupe plusieurs des principales phases du chantier : bétonnage des pieux, pose des chapiteaux, pose des éléments triangulaires préfabriqués, nœud avant coulage du béton, finition du mur d'arrière-quai

3.L'instrumentation réalisée

Les mesures d'effort normal dans les tirants sont effectuées par des couples d'extensomètres à corde vibrante (CV), fixées aux tirants par l'intermédiaire de brides. Les mesures de déformation permettent de déduire l'effort normal. 12 tirants ont été instrumentés : 10 tirants en partie courante, soit 1 sur 4, compromis entre le coût global et la quantité d'information, et les 2 tirants aux extrémités amont et aval, pour l'étude des effets de bord.

D'autre part deux piézomètres (sonde de pression hydrostatique dans un tube crépiné) ont été installés, afin de suivre le niveau d'eau dans le remblai. Ce choix a été fait pour déterminer l'influence de la nappe sur les efforts dans les tirants.

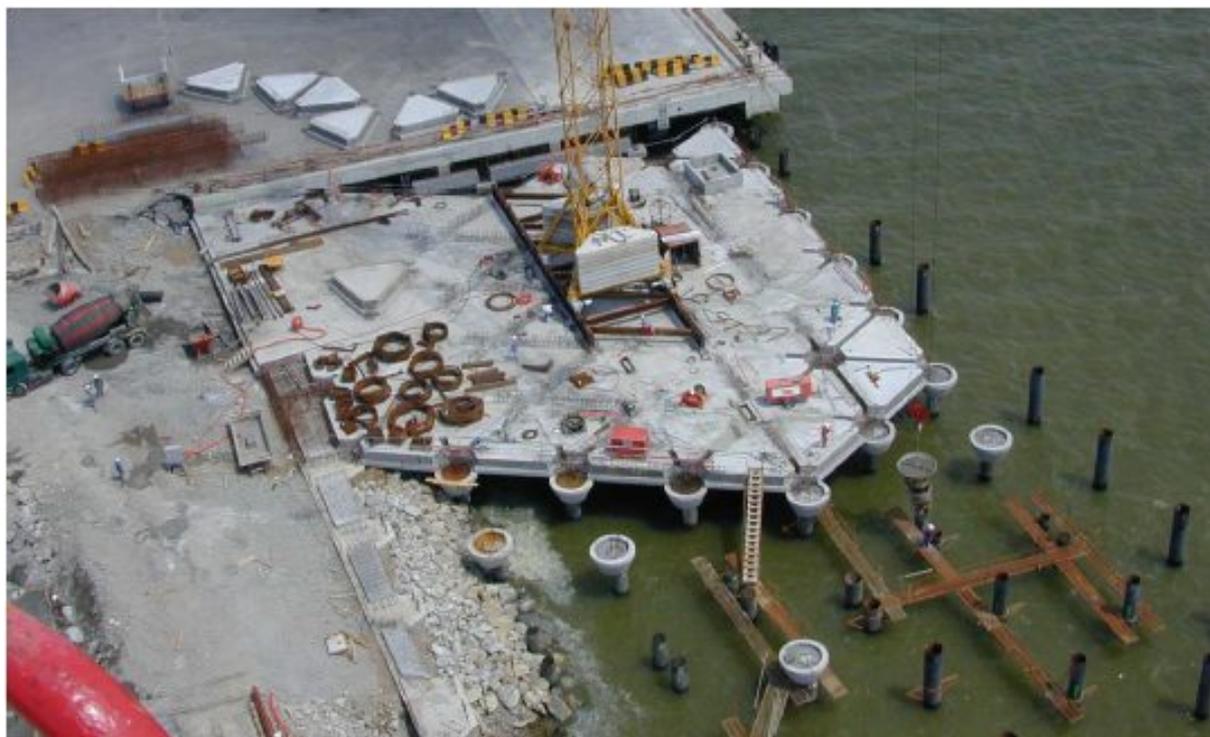


Figure 2 : Vue aérienne du chantier

La répartition des CV et des piézomètres est représentée sur la vue en plan figure 3 et sur la vue en coupe figure 1. Enfin, une centrale d'acquisition permet d'effectuer la totalité des mesures toutes les demi-heures et de stocker ces données.

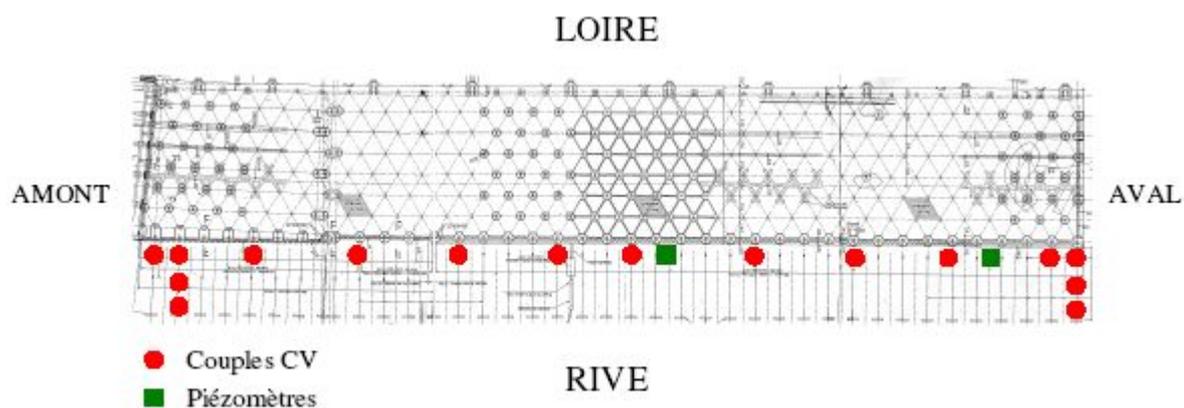


Figure 3 : Répartition des couples de cordes vibrantes et piézomètres

4.Présentation des mesures effectuées

4.1 Evolution temporelle de l'effort dans un tirant représentatif

La figure 4 présente les mesures d'efforts obtenues sur le tirant T63 sur une durée de 3 mois, entre le 01/12/02 et le 01/03/03. On peut distinguer deux types d'évolutions, à court terme et à moyen terme. Les évolutions à court terme des efforts normaux sont principalement dues à la marée, dont l'influence est étudiée plus en détail au § 4.4.

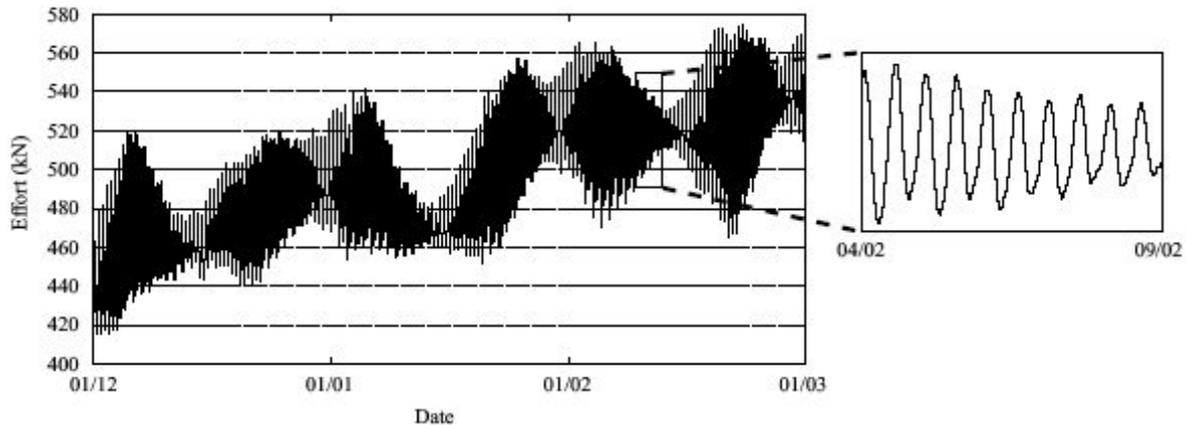


Figure 4 : Mesures fournies par le couple T63.

Sur la figure 4, on peut retrouver les premières périodes caractéristiques de ce phénomène : la période semi-diurne (environ 12 h), la période diurne (léger décalage d'amplitude entre deux périodes semi-diurnes) et la période dite « lunaire » (environ 14 jours), qui correspond aux grandes variations d'amplitude de période semi-diurne. Ce résultat contredit partiellement les conclusions de l'étude du terminal Altenwerder³, qui indiquaient que l'influence de la marée n'était pas perçue au niveau des tirants. Cette conclusion se basait toutefois sur des interprétations de mesures de contraintes totales et de pressions interstitielles le long de la paroi, et non de mesures directes d'effort ou de déformation de l'ancrage. Ceci souligne l'importance de l'identification, en vue d'instrumentation, d'éléments sensibles et révélateurs du fonctionnement d'une structure.

4.2. Répartition spatiale

Les profils d'efforts représentés figure 5 (moyenne sur une marée) correspondent aux premières mesures effectuées (à la date du 20/09/02) et à deux autres dates à six mois d'intervalle. On constate une grande variabilité d'un tirant à l'autre, sans qu'une logique mécanique apparaisse. Certains tirants (T90, T136) ne sont pas chargés, alors que les tirants instrumentés les plus proches sont chargés. D'autre part les variations temporelles sont plutôt faibles relativement aux valeurs à la date du 20/09/02 (la forte augmentation du tirant T90 correspond à une intervention extérieure non décrite dans cet article).

Cette répartition spatiale d'efforts est comparée à la valeur calculée par analyse limite^{4,5} : il s'agit d'un calcul poussée-butée pour un écran (mur + parafoille) ancré simplement buté en pied. Les enrochements sont pris en compte dans la butée par une surcharge de type Caquot. La raideur latérale des pieux n'est pas prise en compte, ce qui permet néanmoins d'obtenir un ordre de grandeur. Excepté pour le tirant T256, cette valeur de calcul s'avère une bonne estimation pour les tirants chargés.

4.3. Mesures des variations de niveaux d'eau

Nous disposons de trois mesures de niveaux d'eau (exprimés en cotes cartes marines (C.M.)) : les mesures fournies par les deux piézomètres P147 et P226 et la moyenne des mesures fournies par les marégraphes du P.A.N.S.N., qui se situent à Donges (4 km en amont) et à Saint-Nazaire (2 km en aval).

L'estuaire de la Loire étant très peu sensible aux surcotes fluviales (crues, sécheresse) au niveau de Saint-Nazaire, on retrouve parfaitement, pour le niveau de la Loire, les différentes périodes de la marée énoncées au § 4.1 : semi-diurne, diurne et lunaire.

Deux aspects importants sont visibles sur les courbes fournies par les piézomètres (figure 6 (a)) :

- pour les marées hautes, le piézomètre P226 suit parfaitement le niveau de la Loire, ainsi que le P147 avec un léger décalage, en-dessous,
- pour les marées basses, les niveaux des deux piézomètres sont bloqués à des valeurs quasi constantes d'une marée sur l'autre, 3,4 m pour P226, 3,6 m pour P147.

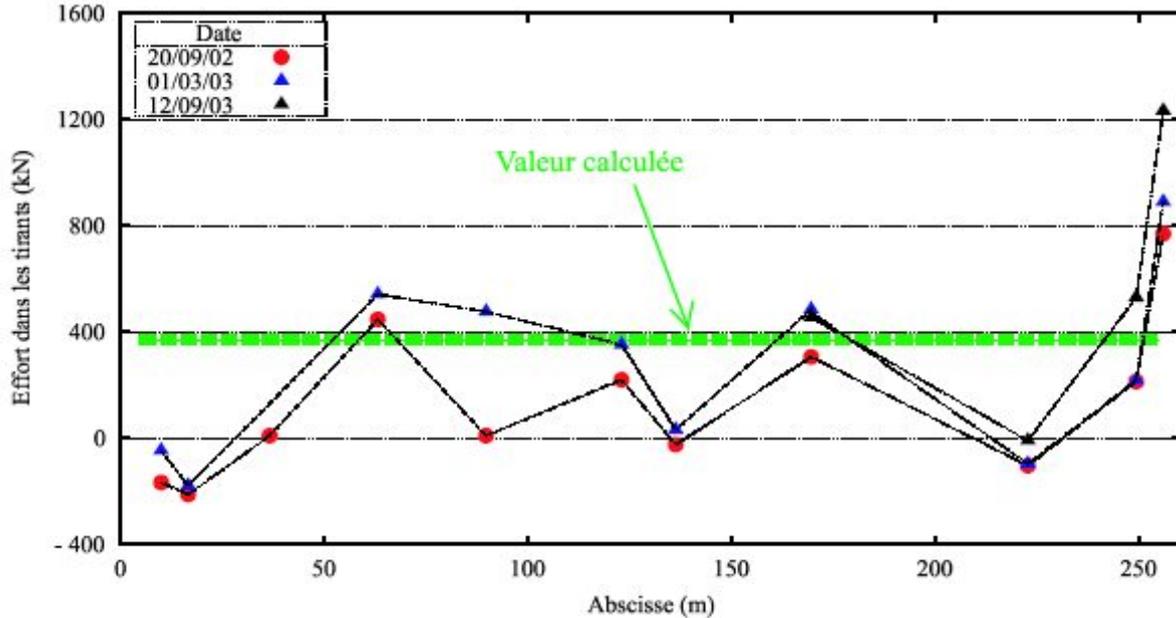
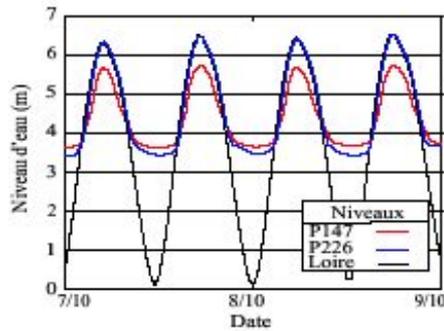
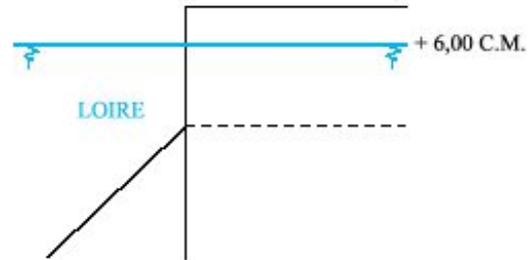


Figure 5 : Evolution des profils d'efforts selon l'abscisse

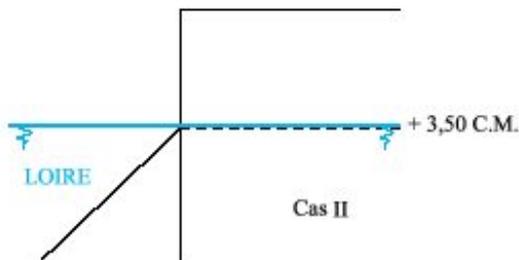
Ces courbes mettent en évidence les transferts hydrauliques entre les deux parties du mur d'arrière-quai. Ce dernier est traversé par des barbicanes qui se situent à une hauteur de 3,5 m. Ainsi lorsque le niveau dans la Loire est supérieur à 3,5 m, les barbicanes égalisent les niveaux de part et d'autre du mur d'arrière-quai, en raison de la forte perméabilité du remblai. Lorsqu'il est inférieur, l'eau est captive dans le remblai, car le terrain naturel est trop peu perméable pour permettre une évacuation sous le rideau parafouille sur l'échelle de temps considérée (environ 6 h). Les figures 6(b), 6(c) et 6(d) représentent schématiquement l'évolution des niveaux d'eau de part et d'autre du mur d'arrière-quai.



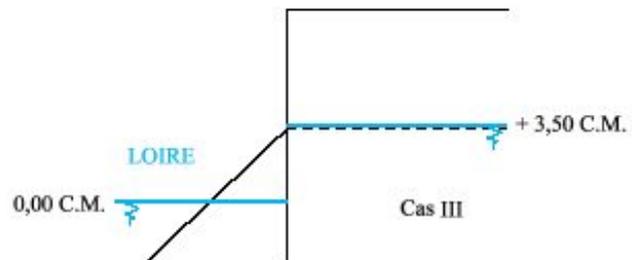
(a) hauteurs d'eau



(b) Loire + 6,00 C.M.



(c) Loire + 3,50 C.M.



(d) Loire + 0,00 C.M.

Figure 6 : Configurations et mesures des niveaux d'eau.

4.4. Corrélation des efforts dans les tirants avec la marée

La figure 4 a mis en évidence l'influence de la marée sur le comportement du tirant T63. Il s'agit de savoir si cette influence est présente sur tous les tirants, et à tout moment. Dans cette optique on s'intéresse maintenant aux variations d'effort et non aux efforts « absolus ». Cela revient à changer l'instant de l'état zéro. Cette étude⁶, est faite sur trois tirants représentatifs de la diversité de comportement, pour une marée de fort coefficient, dans la partie montante de la marée. La figure 7 met en évidence plusieurs points importants :

- une forte corrélation, quasi linéaire, existe entre les efforts dans les tirants et le niveau d'eau dans la Loire,
- les variations de ces deux paramètres sont de sens opposés, à savoir que l'effort diminue quand le niveau de la Loire augmente,
- la sensibilité aux variations du niveau de la Loire des efforts dans les tirants est variable d'un tirant à l'autre.

Ces constatations sont valables pour tous les tirants instrumentés, et pour toutes les marées, aussi bien montantes que descendantes.

Deux phénomènes peuvent expliquer cette dépendance des efforts dans les tirants à la marée :

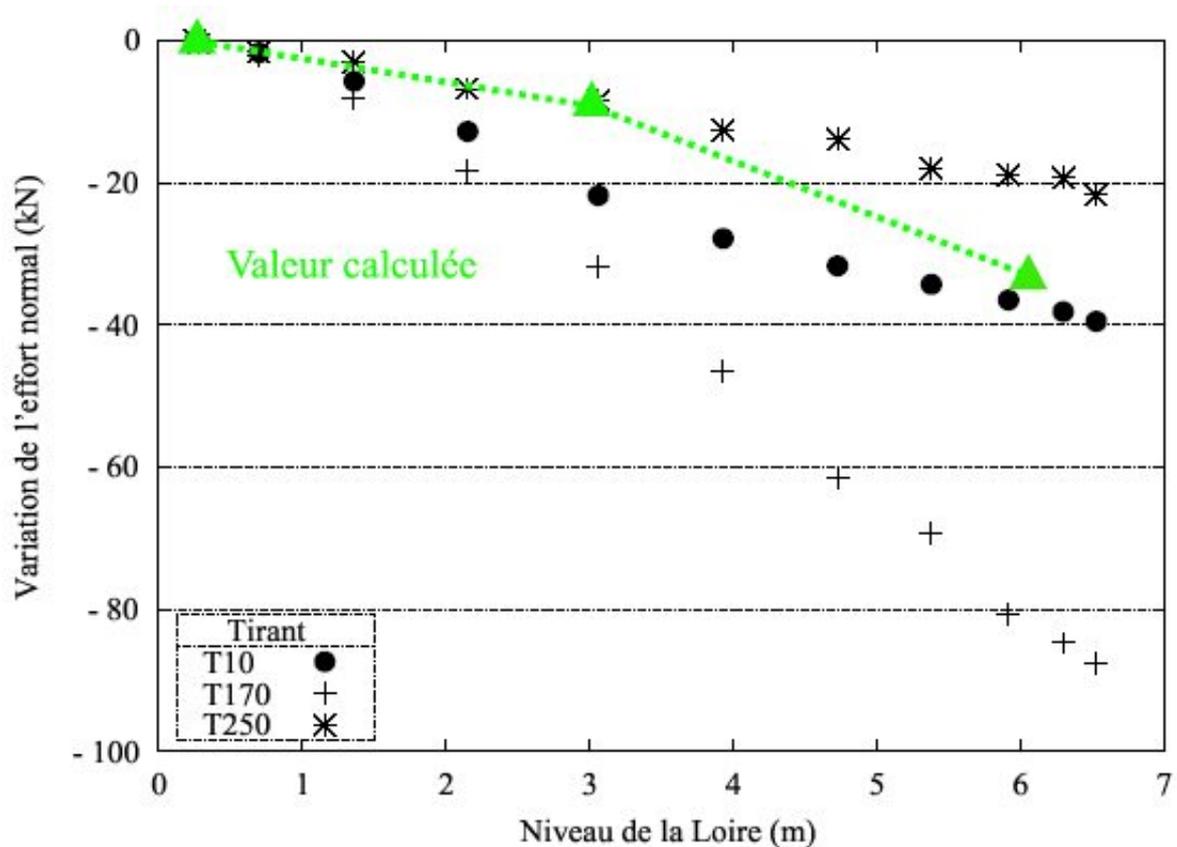


Figure 7 : Variation des efforts dans 3 tirants au court d'une marée montante (le 08/10/02, de 12h00 à 17h30, marée de coefficient 114).

- A marée basse, le niveau reste à environ 3,5 m dans le remblai, alors qu'il descend plus bas dans la Loire. Il se crée ainsi une résultante des pressions de part et d'autre du mur d'arrière-quai dans le sens remblai-Loire.
- A marée haute, les niveaux sont identiques de chaque côté, la résultante est donc nulle. En revanche le sol du remblai se trouve déjaugé par l'eau, alors que du côté Loire, au-dessus de 3,5 m, il n'y a pas de sol, donc pas d'effet de déjaugage.

Le calcul équilibre limite (voir 4.2) permet de conforter ces deux hypothèses. Le résultat est comparé, figure 7, aux mesures. Une bonne correspondance est visible entre les valeurs calculées et la tendance moyenne des efforts mesurés. Néanmoins une forte disparité entre les tirants est présente, alors que les deux phénomènes expliquant l'influence de la marée sur les tirants sont peu variables spatialement. Leur influence sur les tirants devrait donc être relativement uniforme d'un tirant à l'autre. Or la figure 8 montre que ce n'est pas le cas. Comme pour les efforts « absolus », on retrouve ici un profil saccadé. Il s'agit, pour les deux marées montantes, des variations d'efforts dans les tirants, qui sont de fait négatives.

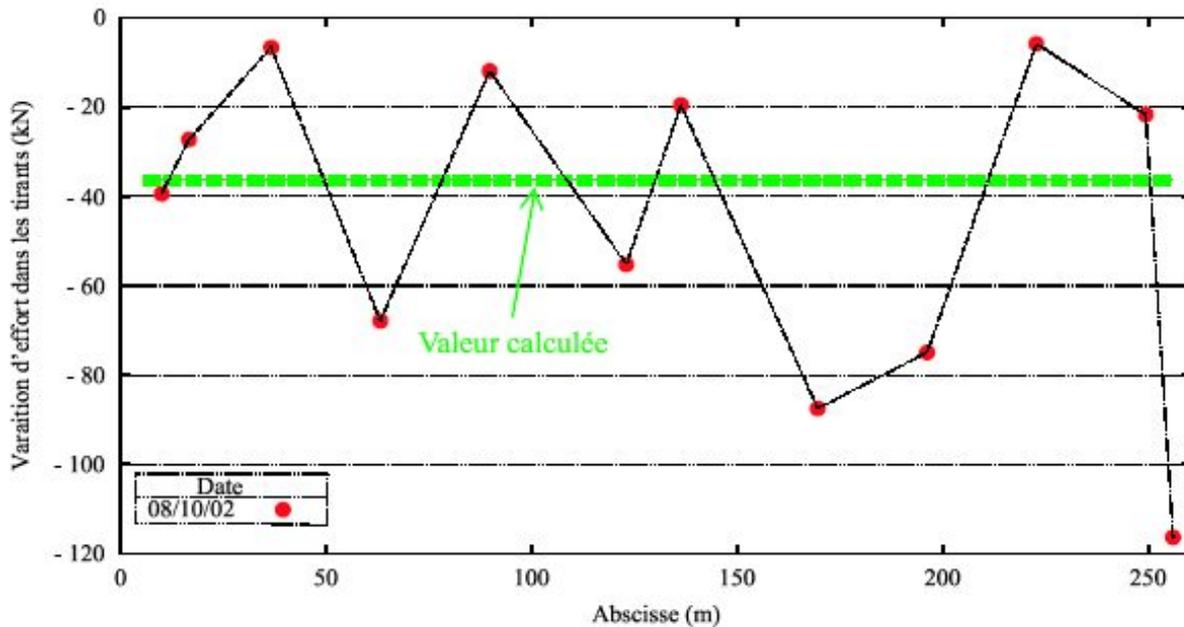


Figure 8 : Variations spatiales des efforts dans les tirants au cours d'une marée montante (le 08/10/02, de 12h00 à 17h30, marée de coefficient 114).

5. Analyse

Parmi tous les points abordés dans ce travail, on distingue plusieurs domaines tels que le suivi du chantier, le type de mesures réalisées, la présentation des résultats et les modélisations associées. Chaque composante est nécessaire pour dégager un progrès dans la connaissance du comportement de l'ouvrage. Le suivi de la phase de chantier a permis de mieux cerner les sources potentielles de variabilité. En effet les conditions de mise en œuvre entraînent souvent une modification de l'ouvrage par rapport à sa conception « théorique », telle que prévue sur les plans d'exécution. C'est le cas notamment pour la position des têtes de pieux. Les principales constatations concernent les tirants d'ancrage. L'observation précise de la pose des tirants permet de dégager deux points importants :

- les tirants ne sont pas dans un état « au repos » après leur pose, du fait d'une précontrainte de mise en œuvre, ou, à l'inverse, d'un jeu dans le dispositif d'ancrage (effort normal), ainsi que de tassements différentiels constatés sur chantier, même dans la zone avec inclusions (moment fléchissant),
- cet état initial est variable d'un tirant à l'autre, l'observation permettant uniquement de dire que cette variabilité est importante.

Concernant les résultats des mesures, on note que la valeur moyenne des efforts dans les tirants est estimée de manière acceptable par un calcul géotechnique classique, mais la variabilité importante n'est pas expliquée par ce type de modèle. Une représentation de cette variabilité a été proposée par Verdure⁶, et fournit des pistes pour expliquer la réponse également variable des tirants au simple chargement cyclique de la marée. La démarche a été de résoudre un problème inverse d'équilibre global du quai modélisé par éléments finis comprenant des entrées variables et ajustées en termes de moyenne et de coefficient de variation aux niveaux d'efforts mesurés dans les tirants.

6. Conclusions

L'instrumentation des tirants d'ancrage passifs sur un quai sur pieux a donné lieu à la présentation des résultats en termes de valeur moyenne spatiale et temporelle, ainsi qu'en termes de variations avec le phénomène périodique de la marée. Il est montré l'importance d'étudier la tendance moyenne des enregistrements, mais aussi les variations périodiques. De plus, une analyse approfondie des causes pouvant engendrer ces résultats de mesures est menée en portant une attention particulière à la mise en place des tirants lors du chantier. Il apparaît que des estimations des effets moyens tels que le niveau d'effort dans les tirants dû à la poussée du remblai et aux variations de hauteur d'eau sont satisfaisantes. Cependant, la forte variabilité observée n'est pas expliquée par ces modélisations. Les causes sont en effet à rechercher dans des dispersions d'ordre technologique avec l'influence des dispositifs d'ancrage des tirants ou pratique avec d'éventuelles simulations du phasage de remblayage et du mode de mise en place des tirants. Cela n'est possible qu'au moyen d'une modélisation plus fine du problème de structure et de géotechnique⁶.

Les auteurs tiennent à remercier B. Marsset, P. Lijour et J.-F. Tréhondat du P.A.N.S.N..

Références

1. Blivet J.-C., Bonafous P., Franck R. et Josseume H., (1981) Comportement d'un quai en paroi moulée au port du Havre. *Bull. liaison Labo. P. et Ch.*, **113**, 109-134.
2. Delattre L. et Mespoulhe L., (1999) Etude expérimentale du quai en eau profonde du port de Calais. *GT 65, Etudes et recherches des laboratoires des ponts et chaussées*, 193p.
3. Gattermann J., Bergs T. et Rodatz, W., (2001) Modified instrumentation and results of stress and deformation monitoring at the new quay wall construction – Container Terminal Altenwerder, Port of Hamburg. *Proc. 8th Inter. Conf. on Structural Safety and Reliability – ICOSSAR 2001*, IASSAR, Newport Beach, California, USA.
4. Budhu M., (2000) Soil mechanics and foundations. *John Wiley & Sons*
5. Soubra A.-H. et Macuh B., (2002) Active and passive earth pressure coefficients by a kinematical approach. *Geotechnical Engineering* 155, **2**, 119-131.
6. Verdure L. (2004) Cadre statistique du suivi en service des ouvrages de génie civil : application à un quai sur pieux. *Mémoire de thèse provisoire – Soutenance prévue le 29/06/04*, Université de Nantes, 232 p.