



HAL
open science

Actions de tempêtes sur des ouvrages portuaires en service : intérêt de l'instrumentation pour le calcul en fiabilité des structures

Humberto Yáñez-Godoy, Franck Schoefs, Anthony Nouy, Mustapha Rguig,
Dimitri Voisin, Pascal Casari

► To cite this version:

Humberto Yáñez-Godoy, Franck Schoefs, Anthony Nouy, Mustapha Rguig, Dimitri Voisin, et al.. Actions de tempêtes sur des ouvrages portuaires en service : intérêt de l'instrumentation pour le calcul en fiabilité des structures. 4e Conférence Nationale "Fiabilité de matériaux et des structures" (JNF'05), Dec 2005, Clermont-Ferrand, France. hal-01007835

HAL Id: hal-01007835

<https://hal.science/hal-01007835>

Submitted on 10 May 2023

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial 4.0 International License

Actions de tempêtes sur des ouvrages portuaires en service : intérêt de l'instrumentation pour le calcul en fiabilité des structures.

In-service wharf submitted to storm loading : benefit of monitoring for reliability analysis.

H. Yanez-Godoy, F. Schoefs, A. Nouy, M. Rguig, D. Voisin, P. Casari
Institut de Recherche en Génie Civil et Mécanique – Université de Nantes-Ecole Centrale de Nantes – UMR CNRS 6183, Faculté des Sciences, 2 rue de la Houssinière, B.P. 92208, 44322 Nantes Cedex 3.

RÉSUMÉ – Cet article présente un calcul complet de probabilité de défaillance d'une structure portuaire en présence de tempêtes. Une modélisation probabiliste des actions de tempêtes sur un portique et des conditions aux limites sont considérées. Les paramètres de ces dernières sont obtenus à partir d'une analyse inverse des statistiques d'efforts mesurés. Une fonction d'état performantielle en déplacement est introduite pour la fiabilité.

ABSTRACT – *This paper presents a complete reliability study of an on pile-wharf loaded by storms. Both stochastic storm loading and probabilistic boundary conditions are considered. The latter comes from a probabilistic inverse analysis of instrumented rods. A performantial limit state, based on maximum displacement of wharf is introduced for failure probability computation.*

1. Introduction

Les structures portuaires tels que les quais sont dimensionnées avec des situations de chargement vertical (poids propre, stockage, appareillages (portiques)) mais aussi horizontal (accostage/amarrage des navires, vent sur les portiques). Les situations de tempête jouent un rôle prépondérant dans ce second cas dans la mesure où elles exercent des efforts sur les portiques (voir figure 1) ; elles constituent par ailleurs un enjeu important dans le cas d'ouvrages anciens. En effet, devant les événements climatiques de ces dernières décennies, notamment sur la façade maritime Atlantique, il paraît important d'analyser si les situations envisagées lors du dimensionnement permettent de respecter la sécurité visée initialement. L'analyse en fiabilité fournit les outils nécessaires à ce type de calcul si les conditions aux limites du problème sont convenablement posées.

Après une présentation du quai étudié et de son instrumentation, l'article se propose d'aborder la modélisation du chargement de tempête sur des portiques par des surfaces de réponse dites physiques (résultant de l'extension de lois physiques au cadre probabiliste), transférant le champ cinématique du vent par des modèles physiques appropriés.

L'application se concentre ensuite sur des ouvrages de type quai sur pieux. Une description probabiliste des aléas de chantier et des effets temporels est réalisée sur la base d'une instrumentation d'investigation réalisée en 2002, dont les résultats sont encore analysés aujourd'hui. Pour cela, le champ stochastique d'efforts dans les tirants est d'abord décrit par une analyse de ses trajectoires en temps et en espace. Une période de temps, dans la quelle on s'autorise à considérer le champ comme stationnaire, est alors choisie pour analyser plus en détail l'effet des différentes marées et la modélisation probabiliste envisagée. On insiste en particulier sur l'existence d'un jeu dans un dispositif technologique

de rotule à l'extrémité d'un tirant qui induit une dispersion dans les efforts repris. Un modèle global non linéaire « sol-tirant-plaque d'ancrage » est alors choisi pour représenter cette complexité en situation de tempête, par forts coefficients de marée. Deux paramètres sont identifiés par analyse inverse reposant sur la méthode du simplexe (méthode d'ordre 0).

Différents modèles aux éléments finis permettent alors de déterminer la probabilité de défaillance du quai, selon un critère de déplacement du front d'accostage, en situation de tempête et en fonction de la position du portique. L'intérêt de l'instrumentation est illustré.

2. Présentation de la structure étudiée et de son instrumentation

2.1. Caractéristiques structurelles

D'une manière générale, les quais sont des structures portuaires destinées à accueillir des navires et les dispositifs de déchargement et de stockage de marchandises. L'Institut de Recherche en Génie Civil et Mécanique analyse actuellement les données d'instrumentation de tirants passifs sur 4 structures du Port Autonome de Nantes Saint Nazaire dont deux quais sur pieux. Cet article se concentre sur les résultats obtenus sur l'un d'entre eux appelé TMDC 4 pour Terminal à Marchandises Diverses et Conteneurs n°4 ; il fait 255 m de longueur et 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 (50 000 T), de type over-panamax, et d'un tirant d'eau maximal de 14 m, ce qui est le cas des porte-conteneurs à l'usage desquels il est principalement destiné.

Les principaux éléments structurels du TMDC 4 sont les suivants (fig. 2) :

- les pieux au nombre de 332 : tubes d'acier de 711, 720, 813, 914 mm de diamètre et 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 : elle assure la reprise des efforts verticaux (conteneurs, grue mobile de 335 T et portiques de 1 100 T) et le lien structurel entre les pieux. Elle est formée d'un réseau triangulaire, visible figure 1, 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 : fonction d'appui latéral sur le remblai et de répartition d'importantes charges ponctuelles (introduites par les pieux sous le mur et les tirants), sous le mur se trouve un rideau para fouille en palplanches (5 m de hauteur).
- les ancrages passifs au nombre de 38 : tirants cylindriques 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 ».

On trouve en figure 1, une vue aérienne de ce quai en phase de construction (pieux battus et plateforme préfabriquée en cours d'exécution) ainsi qu'une photographie du portique considéré pour les actions de tempête.

2.2. Principales phases d'exécution

La construction du TMDC 4 s'est étalée sur 16 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 (micro-pieux surmontés d'une dalle en béton armé et destinés à limiter les tassements), battage des pieux, battage du rideau para fouille, coffrage du mur d'arrière quai, pose des chapiteaux et clavage des éléments préfabriqués, pose des tirants et remblayage, travaux de

terrassément finaux et installation des équipements. La figure 1 est une photographie aérienne qui regroupe plusieurs des principales phases du chantier : bétonnage des pieux, pose des chapiteaux, pose des éléments triangulaires préfabriqués, nœud de connexion entre les poutres avant coulage du béton, finition du mur d'arrière quai.

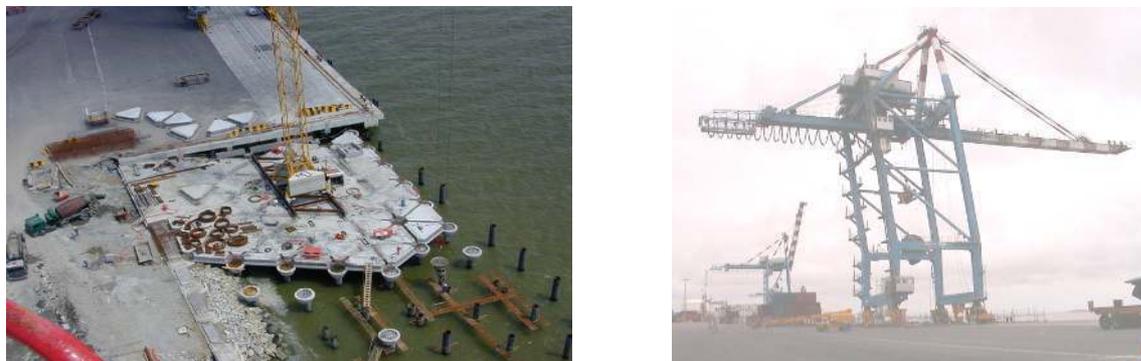


Figure 1. Vue aérienne du quai en construction et photographie du portique

2.3. Mode de dimensionnement et aléas

Ces quais sont dimensionnés en quasi-statique à partir :

- des chargements verticaux dus au stockage et aux portiques.
- De la résultante horizontale, projection dans le plan du quai des chargements du remblai, d'accostage et d'amarrage des navires et des actions du vent sur les portiques.

Pour plus de détails, on pourra se reporter à (Verdure 2004). On se concentre ici sur les chargements présentant le plus d'aléas : les chargements horizontaux et plus particulièrement, ceux occasionnant des déplacements du quai de la berge vers le fleuve. En effet, ce type de chargement est la cause des pathologies les plus importantes notamment des déformations importantes au niveau de la liaison remblai-plate forme béton armé. Les efforts d'amarrage des navires seront négligés ici à cause de leur ordre de grandeur. Pour la situation de calcul correspondante (solicitation du quai par le remblai et les portiques soumis au vent), les tirants d'ancrage et la capacité latérale des pieux sont sollicités en premier lieu. Compte tenu de la rigidité importante de la dalle, des études de sensibilité ont montré une importante réduction de variance : les aléas sur le comportement des pieux, supposés indépendants, sont lissés. Seules des données précises de corrélation et une longueur de corrélation importante pourraient mettre en perspective cette hypothèse. De même, la poussée du remblai certes incertaine voit sa variance diminuer voire s'annuler à cause de l'inertie importante du mur d'arrière quai. En revanche, un aléa important réside dans le calcul des actions de tempête sur le portique et dans le comportement des tirants d'ancrage. C'est pourquoi une instrumentation des tirants d'ancrage a été réalisée en phase de chantier.

2.4. Instrumentation

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. Un total de 12 tirants a été instrumenté : 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 et de variation des efforts le long des tirants (trois couples par tirant d'extrémité).

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 permet de déterminer l'influence de la poussée de la nappe sur les efforts dans les tirants.

La répartition des CV et des piézomètres est représentée sur la vue en plan et en coupe en figure 2. Enfin, une centrale d'acquisition permet d'effectuer la totalité des mesures toutes les demi-heures et de stocker ces données.

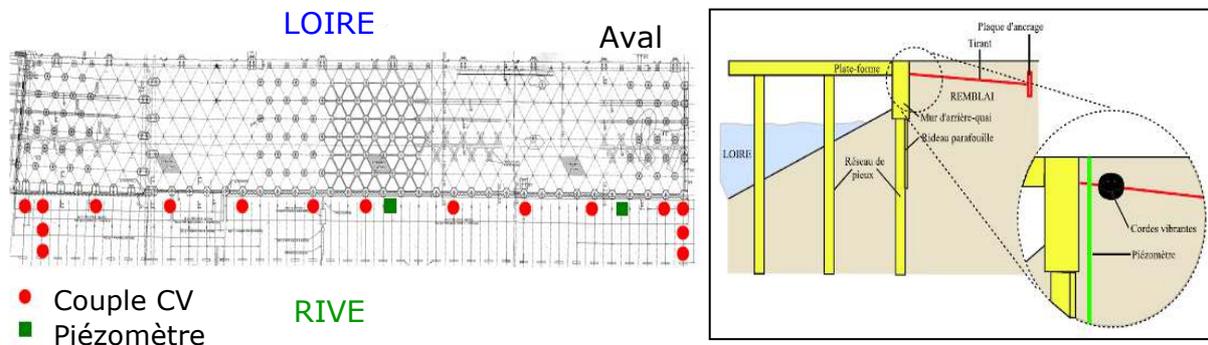


Figure 2. Vue en plan et en coupe du quai et de son instrumentation

3. Collecte des données pour un calcul de fiabilité

3.1. Résultats de l'instrumentation et modélisation probabiliste du comportement du complexe «sol-tirant-plaque d'ancrage»

La modélisation du comportement de tirants passifs dans des remblais reste un sujet d'investigation en géotechnique. Certains calculs par éléments finis permettent de répondre en partie mais la question de l'ajustement des paramètres reste délicate. Avec l'instrumentation, on cherche donc à caractériser un comportement global du complexe « sol-tirant-plaque d'ancrage ». Plusieurs niveaux d'analyse statistique sont alors nécessaires pour répondre :

- quelle est la distribution spatiale (champ aléatoire) des efforts ?
- quel est le rôle de la marée ?
- quelle est la structure (lois marginales, auto-corrélation) du champ stochastique temporel « efforts dans les tirants » ?

Une analyse sur trois ans a montré deux phases de comportement des tirants : une première phase sans corrélation temporelle importante et une seconde phase, débutant après deux ans, au comportement encore méconnu mais à la corrélation temporelle significative. Cet article se focalise sur l'étude de la première phase.

Parmi les résultats importants (Verdure et al. 2003, 2004a), on a constaté une forte dispersion dans l'espace et le temps :

- des profils d'efforts repris par les tirants le long du quai,
- de la sensibilité des tirants à la marée.

Le premier point renvoie au paragraphe 2.2 sur l'exécution du remblai en plusieurs phases et à la variété importante des conditions d'installation des tirants. Ces éléments expliquent la dé-corrélation spatiale du champ stochastique des efforts comme le suggère le profil d'efforts présenté en figure 4. Par ailleurs, on peut ajouter le choix du dispositif technologique d'ancrage derrière le mur d'arrière quai : en effet pour limiter les moments, une rotule est installée (voir figure 3). Au cas où le tirant n'est pas suffisamment « pré-chargé », le jeu, partiellement comblé par des boues et des fines, apparaît et peut conduire à des efforts très faibles dans les tirants lors du déplacement du mur d'arrière quai.

Concernant les effets temporels, on considère durant cette première phase que l'on a un processus stochastique en temps de type bruit blanc. Des profils sont ainsi tracés pour des moyennes mensuelles qui lissent les effets dus à la période lunaire ; chaque moyenne mensuelle correspond alors à un tirage d'efforts indépendant des précédents.



Figure 3. Schéma de rotule d'arrière quai et modèle mécanique retenu

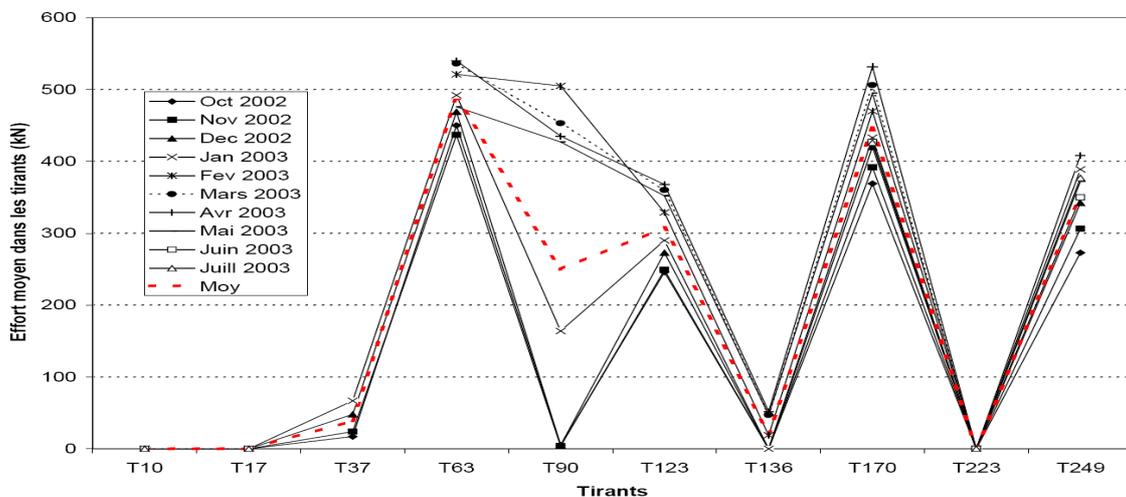


Figure 4. Profils d'efforts dans la phase 1 à plusieurs dates

La densité de distribution des efforts moyens mensuels est présentée en figure 5. On choisit une loi de densité $f(x)$ bi-modale (1) pour représenter cette dispersion.

$$f(0) = 0,51 ; f(x) = 0,49 \sigma^{-1} \exp\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right) \exp\left(-\exp\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)\right) \text{ si } x > 0 \quad (1)$$

On fait alors l'hypothèse d'efforts nuls lorsque inférieurs à 20 kN, valeur qui correspond à une limite supérieure de l'incertitude de mesure ; la densité de probabilité associée étant de 0,51. Les autres efforts suivent la loi des valeurs extrêmes, de paramètres obtenus à partir de l'ajustement de l'approximation sur la fonction de répartition et réalisé sous Matlab ; $m = 440$ et $\sigma = 80$. Pour information les valeurs déduites directement des statistiques des tirants chargés sont $m_{F_{mes}} = 393$ kN et $\sigma_{F_{mes}} = 104$ kN. La différence entre les valeurs issues du traitement statistique direct et de celles issues de l'ajustement provient de la taille modeste des échantillons et de la mauvaise représentation des queues de distribution.

Le second point (sensibilité des tirants) est directement lié à la raideur du complexe « sol-tirant-plaque d'ancrage ». On a montré (Yanez 2004), qu'en présence de forts

coefficients de marée (supérieurs à 90), le comportement de chaque tirant pouvait être représenté par un coefficient de sensibilité à la marée, défini comme le ratio entre la variation des efforts au cours d'une marée et la variation de hauteur d'eau dans le remblai correspondante. Ici, en situation de tempête, on se trouve en général dans la situation de forts coefficients et on analyse les valeurs de sensibilité obtenues avec un coefficient de marée de 94, sous la même hypothèse de processus stochastique de type bruit blanc. Les profils d'augmentation d'efforts durant une telle marée sont présentés en figure 6 et la densité de probabilité correspondante en figure 7 (loi log-normale).

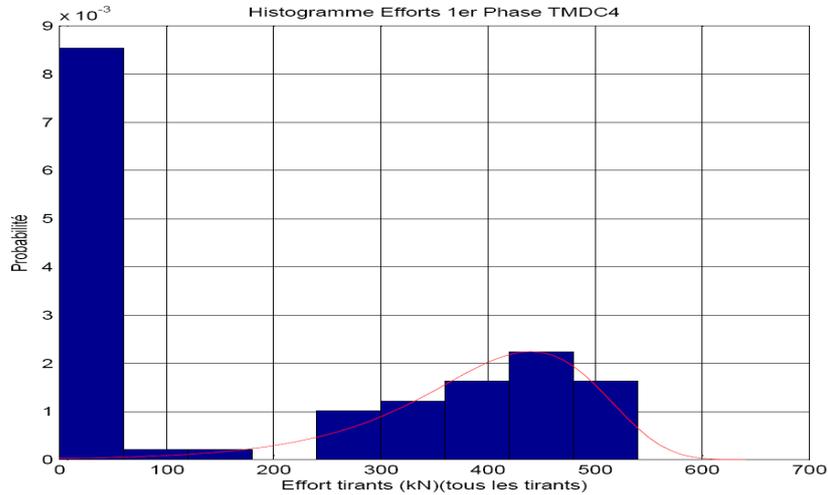


Figure 5. Histogramme des efforts durant la phase 1

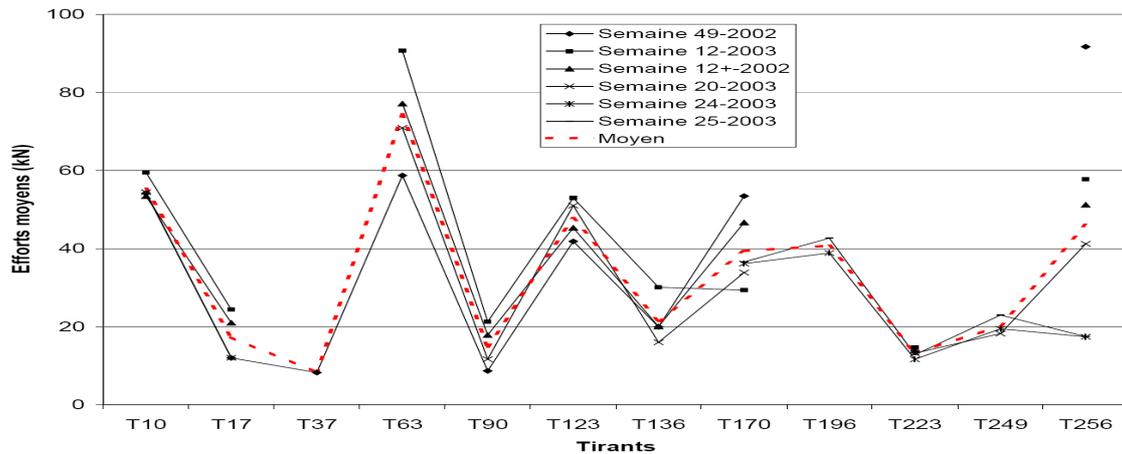


Figure 6. Profil des augmentations d'effort durant une marée

Pour représenter cet aléa en terme d'effort à la marée étale et de sensibilité d'effort à la marée, on choisit un modèle de comportement unilatéral du complexe « sol-tirant-plaque d'ancrage » de type fil (voir figure 3) de paramètres le jeu δ_0 et la raideur K_t .

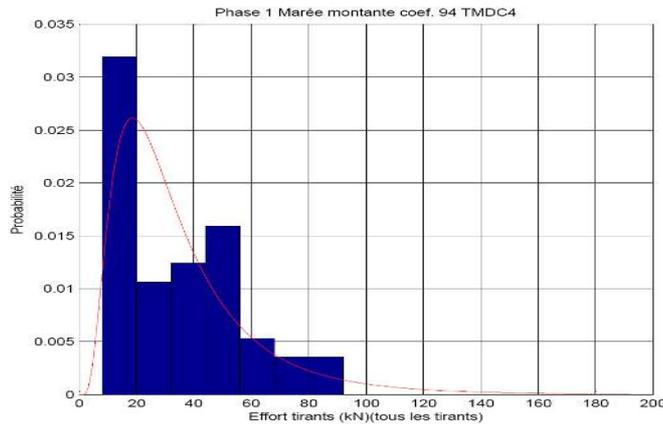


Figure 7. Densité des augmentations d'effort durant une marée

3.2. Situations de tempête et modélisation des actions de vent

On concentre l'aléa sur les vitesses de rafales de vent (plus forte rafale quotidienne mesurée en quasi-instantanée (3 s) à l'anémomètre). La modélisation du champ aléatoire de vitesse repose sur l'analyse statistique de vitesses à 10 mètres d'altitude (vitesses de référence) et la connaissance de la fonction profil de la vitesse à la cote z , en fonction de la vitesse de référence. Seule la direction Nord-Ouest, la plus critique, est considérée et la distribution des vitesses de référence du vent (à 10 m d'altitude), déterminée à partir de relevés sur 33 ans, est présentée en figure 8 pour le site de Saint-Nazaire.

On choisit une loi de distribution de Weibull (2), qui ajuste le mieux la queue de distribution (correspondant aux valeurs extrêmes) :

$$f(x) = \frac{k}{x} \left(\frac{x}{A} \right)^k \exp \left[- \left(\frac{x}{A} \right)^k \right] \quad (2)$$

où A est le paramètre d'échelle et k est le paramètre de forme (ici $A = 21.1$ m/s et $k = 2.13$). Pour déterminer le champ stochastique de la vitesse \bar{U}_z en rafale du vent indexé par la hauteur z , la loi en puissance (3) est utilisée (CSTB 1995).

$$\frac{\bar{U}_z}{\bar{U}_{ref}} = \left(\frac{z}{z_{ref}} \right)^{rg} \quad (3)$$

où \bar{U}_{ref} est la vitesse de référence du vent à la hauteur de référence $z_{ref} = 10$ m, rg exposant dépendant de la rugosité du site ; pour un site dégagé $rg = 0.16$.

La résultante des efforts appliqués par le vent sur un élément structurel à une dimension joignant les nœuds N et P est donnée par :

$$F = (S C_x)_\alpha \int_N^P p \, dz \quad \text{avec} \quad p = \frac{1}{2} \rho U_z^2 \quad (4)$$

où S est la surface de l'élément sollicitée par le vent en projection perpendiculaire à la direction du vent, C_x le coefficient de traînée, p , la pression du vent, α la direction du vent par rapport à l'axe du quai (ici 45°), et ρ est la masse volumique de l'air. Le terme $(S C_x)_\alpha$ est exprimé en (5) par (Eden 1985).

$$(SC_x)_\alpha = (SC_x)_0 \cos^\nu \alpha + (SC_x)_{90} \sin^\nu \alpha \quad (5)$$

où $\nu=1$, $(SC_x)_0$ correspond à $\alpha=0^\circ$ où la direction du vent est parallèle à l'axe du quai ; $(SC_x)_{90}$ correspond à $\alpha=90^\circ$ où la direction du vent est perpendiculaire à la longueur du quai. On trouve en figure 8 deux valeurs de ces coefficients. Le portique fait une hauteur totale de 63 mètres, la flèche mesure 40 m et la distance entre appuis d de 20,8 m. Sa modélisation pour le calcul d'efforts et les ordres de grandeur des coefficients $(SC_x)_{45}$ est donnée en figure 8 ainsi que l'histogramme de l'intensité de la résultante des efforts en pied. La distribution est de type exponentielle.

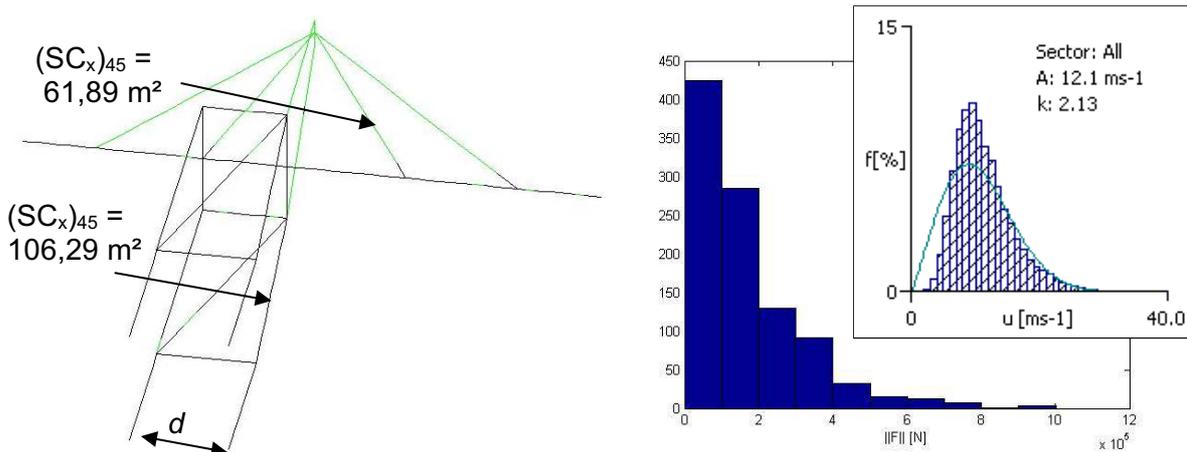


Figure 8. Modèle du portique et distribution de la vitesse de référence du vent et de l'intensité $\|F\|$ des efforts du vent dans le plan horizontal

4. Modélisation et analyse inverse

Un modèle mécanique de type poutre de Timoshenko libre permet de réduire considérablement les temps de calcul. Ses paramètres ont été identifiés à partir d'un modèle complet 3D du quai et présentés dans (Verdure et al. 2004a).

L'objectif est maintenant, à partir des statistiques d'effort, considérés comme la réponse de notre système, de déterminer les caractéristiques statistiques des variables d'entrée δ_0 et K_t . Compte tenu de la faible taille de l'échantillon d'efforts mesurés, il n'est pas envisageable de remonter à la fois aux caractéristiques de poussée du sol, de jeu dans la rotule et de raideur du tirant. Le choix se porte donc sur deux analyses inverses indépendantes :

- la raideur K_t des ressorts est identifiée à partir de la distribution de la variation des efforts dans les tirants au cours de marées de coefficients 94, la variation de poussée du remblai étant alors déterministe, calculée par analyse limite (Verdure 2004), ici 94 kN.
- Le jeu δ_0 dans la rotule est identifié à partir de la distribution des efforts à marée moyenne, la poussée du remblai étant alors déterministe, calculée par analyse limite (Verdure 2004), ici 896 kN, et la raideur étant prise à une valeur moyenne.

La méthode d'ordre 0 dite du Simplex est alors utilisée pour déterminer les caractéristiques des variables sources. A partir des probabilités et statistiques d'efforts mesurés, le pourcentage d'efforts nuls p_{mes} , la moyenne m^*_{Fmes} et l'écart type σ^*_{Fmes} des

efforts non nuls, appelées valeurs cibles, l'idée est de calculer la moyenne m_{δ_0} et de l'écart type σ_{δ_0} de δ_0 , en minimisant la fonction de coût λ , (6), ici quadratique.

$$\lambda(m_{\delta_0}, \sigma_{\delta_0}) = \left(\frac{p}{p_{mes}} - 1 \right)^2 + \left(\frac{m_F}{m_{Fmes}^*} - 1 \right)^2 + \left(\frac{\sigma_F}{\sigma_{Fmes}^*} - 1 \right)^2 \quad (6)$$

Le type de distribution de δ_0 doit alors être précisé et le choix se porte ici sur une loi normale. L'algorithme n'est pas décrit ici mais est largement présent dans la littérature ; il est rappelé dans (Verdure 2004). Il est à noter que, compte tenu du faible nombre de tirages (38 tirants), l'algorithme ne peut converger vers une solution unique. Chaque solution est alors le fruit de la moyenne des résultats obtenus à partir de 100 échantillons de 38 jeux dans les tirants. Cette opération est reproduite 10 fois afin d'évaluer l'intervalle de confiance à 95 %. Les valeurs cibles sont ici : $p_{mes} = 0.51$, $m_{Fmes}^* = 393$ kN et $\sigma_{Fmes}^* = 104$ kN. On représente dans le tableau 1 les résultats du calcul inverse m_{δ_0} et σ_{δ_0} ainsi que les intervalles de confiance à 95 % sur le processus de résolution numérique.

Tableau 1. Solution du problème inverse pour le jeu

Paramètre	Moyenne [mm]	Ecart type [mm]	Intervalle de confiance à 95% [mm]
m_{δ_0}	13.5	0.22	[13.3; 13.7]
σ_{δ_0}	3.7	0.15	[3.5; 3.8]

On retrouve des valeurs technologiques réalistes et des simulations directes ont montré que les densités d'efforts étaient assez bien décrites (Verdure et al. 2004a).

En reproduisant cette méthode, sans le terme en p dans l'équation (6), on trouve pour K_t les résultats présentés dans le tableau 2. Cette fois une loi log normale est sélectionnée pour la raideur et les valeurs cibles, correspondant à l'échantillon de la figure 7, sont $m_{Fmes} = 35.2$ kN et $\sigma_{Fmes} = 21.9$ kN.

Tableau 2. Solution du problème inverse pour la raideur

Paramètre	Moyenne [MN/m]	Ecart type [MN/m]	Intervalle de confiance à 95% [MN/m]
m_{K_t}	35.6	0.27	[35.4; 35.8]
σ_{K_t}	23.5	0.48	[23.2; 23.8]

5. Calcul de fiabilité

Les caractéristiques des variables aléatoires sont issues de l'analyse inverse ci-dessus. Le critère d'état limite est de type performantiel : $G = U_{max} - U_c$, où U_{max} est le déplacement maximal le long du quai et $U_c = 0.015$ m (exigence du gestionnaire). La probabilité de plastifier les tirants étant inférieure à 10^{-9} , elle n'est pas intégrée dans l'analyse. Les efforts du portique sont donc exercés à l'extrémité du quai. Par simulation de Monte-Carlo réalisée sur le modèle poutre de Timoshenko, on trouve alors une probabilité de défaillance de $1,5 \cdot 10^{-1}$ sur 30 ans d'un ordre de grandeur légèrement supérieur à celui admis par les Eurocodes aux Etats Limites de Service. Sans l'effet du vent, elle est de $6,7 \cdot 10^{-2}$. Malgré le sur-dimensionnement du quai, le fonctionnement en service est fortement altéré par une situation de tempête. On trouve dans le tableau 3 une étude de sensibilité de la probabilité de défaillance en fonction du déplacement admissible. On note une forte sensibilité qui impose de justifier avec précision cette valeur.

Tableau 3. Etude de sensibilité de la probabilité de défaillance au déplacement critique

U_c [mm]	15	15.2	15.4	15.6	15.8	16
P_f	$1,5 \cdot 10^{-1}$	$5,7 \cdot 10^{-2}$	$2 \cdot 10^{-2}$	$6 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-3}$	$7 \cdot 10^{-4}$

6. Remerciements

Ce travail est réalisé au sein du projet européen Interreg Medachs (Marine Environment Aamage to Atlantic Coast Historical and transport Structures and buildings : methods of assessment and repair, maintenance). Les auteurs remercient la communauté européenne pour son soutien financier.

7. Conclusions

Cet article présente un calcul de fiabilité d'une structure portuaire. L'accent est mis à la fois sur la modélisation des actions de tempêtes et sur l'utilisation de données d'instrumentation pour améliorer la modélisation des conditions aux limites. La méthode du simplex est utilisée pour identifier par analyse inverse les paramètres du modèle probabiliste. On détermine ensuite la probabilité de défaillance à partir d'une fonction d'état de type performantiel (déplacement maximal du quai) en présence de tempête. On calcule alors une probabilité de ruine tout juste acceptable au sens des valeurs usuelles, préconisées par les Eurocodes pour les calculs aux Etats Limites de Service.

8. Références bibliographiques

Eden J.F., Butler A.J. and Patient J. (1985) A new approach to the calculation of wind forces on latticed structures. Building Research Institut. The Structural Engineer, Volume 63 A, No. 6, June 1985.

CSTB (1995) Traité de physique du bâtiment . Tome 1 : connaissances de base. Centre Scientifique et Technique du Bâtiment, Editeur, 832 p., ISBN 2-86891-240-0.

Yanez-Godoy H. (2004) Identification d'indicateurs de performance d'un quai d'accostage en estuaire. Mémoire de DEA. Juillet 2004. Université de Nantes. 123 pages.

Verdure L., Casari P. and Wielgosz C. (2003) Joint use of instrumentation and probabilistic modelling applied to a container wharf. Proc. 9th International Conférence on applications of Statistics and Probability in civil engineering, ICASP 9, San Francisco USA.

Verdure L., Casari P., Schoefs. F. (2004a) Approche inverse du dépouillement des résultats fortement dispersés du suivi en service d'un ouvrage de génie civil", Journées Techniques – AUM / AFM, La Mécanique dans les Sciences de la Mer, thème : matériaux et structures en environnement marin, Brest 2,3 sept. 2004, 10 pages (U.B.O. Brest, http://cours.univ-brest.fr/IUT-Brest/IUT-GMP/robotique/AUM_AFM_2004,2004).

Verdure L., Casari P. Schoefs. F. (2004b), Analyse des mesures d'efforts dans les tirants d'ancrage passifs d'un quai sur pieux, VIII èmes Journées Génie Civil - Génie Côtier, session posters, Compiègne 7-9 sept., 10 pages (Centre Français du Littoral, Centre d'Etudes Techniques Maritimes Et Fluviales, Université de Technologie de Compiègne, 2004).

Verdure L. (2004) Cadre statistique du suivi en service des ouvrages de génie civil : application à un quai sur pieux. Mémoire de thèse soutenue le 29/06/04, Université de Nantes, 232 p.