



Réflexions menées dans le cadre de l'étude d'agitation du Port Est à la Réunion

Julien BAILLS ¹, Arnaud SALLABERRY ¹,

1. CASAGEC INGENIERIE, 18 rue Maryse Bastié, Zone de Maignon, 64600 Anglet, France.

contact@casagec.fr

Résumé :

CASAGEC INGENIERIE a réalisé pour le Grand Port Maritime De La Réunion (GPMDLR) une étude hydraulique maritime d'agitation et courants afin notamment de s'assurer des possibles impacts de projets d'aménagement sur les activités portuaires. L'objet de cet article concerne l'étude d'agitation mise en œuvre dans le cadre de ce projet et plus spécifiquement les difficultés rencontrées ainsi que les solutions mises en place pour y répondre. L'un des objectifs de cette étude est de définir des taux d'opérabilité dans l'enceinte du port sur la base de seuils liés à l'agitation du plan d'eau et au vent. Pour cela, des séries temporelles de houles sont propagées du large à l'intérieur du port grâce à une chaîne de modélisation. Deux subtilités rencontrées lors de cette étude peuvent être mise en avant : la première concernant le caractère multidirectionnel de la houle atteignant le site d'étude et la seconde en lien avec l'influence non négligeable des clapots sur l'agitation du Port. En effet, le port Est est bien protégé des houles australes et des houles d'alizés, qui se traduisent par des composantes de houles d'Ouest et de Nord-Est au niveau du port. Les houles cycloniques peuvent quant à elles atteindre et impacter fortement le port de manière très ponctuelle. Afin de considérer ces différentes composantes, les spectres de houle au large ont été décomposés puis propagés séparément et par la suite recombinaison afin d'avoir une information à l'intérieur du port intégrant le caractère multidirectionnel. Cette approche après comparaison avec une approche « simplifiée » a démontré l'effet limité et favorable de la décomposition qui n'a pas été retenue afin de se placer du côté de la sécurité pour la suite du travail. De plus, le Port Est est bien protégé des conditions usuelles (houles d'alizés et australes). Ainsi il est apparu nécessaire de prendre en considération les clapots dans le cadre de la définition de l'agitation dans les bassins portuaires. Par conséquent, les clapots ont été modélisés sur la même période d'étude que les houles et les valeurs de clapots et de houle résiduelle ont été recombinaison à partir de la méthodologie utilisée par GRUWEZ *et al.*, (2011) et VAN DER MEER *et al.*, (2002) en réalisant une somme quadratique en chaque point du modèle. Ainsi tout ce travail a permis de définir les houles résiduelles – clapots – houle totales au niveau des différents postes du Port Est avec et sans aménagements.

Thème 4 – Ouvrages portuaires, offshore et de plaisance

Mots-clés : Agitation portuaire, Clapots, Analyse spectrale.

1. Introduction

Dans le cadre de son développement, le Grand Port Maritime De La Réunion (GPMDLR) a confié à CASAGEC INGENIERIE la conduite d'une étude hydraulique maritime d'agitation et courants afin d'améliorer ces connaissances et également de s'assurer des possibles impacts de projets d'aménagement sur les activités portuaires. Cette étude doit permettre de déterminer les caractéristiques des houles de dimensionnement et d'exploitation, des courants au large et à l'intérieur du port, des niveaux d'agitation engendrés par les houles et le vent et d'étudier le phénomène de résonance. L'un des objectifs finaux de cette étude est de définir des taux d'opérabilité au niveau des postes présent dans le port sur la base de seuils liés à l'agitation du plan d'eau et au vent. Cet article va présenter les difficultés rencontrées lors des différentes étapes mises en place ayant permis d'aboutir à la définition des taux d'opérabilité dans le port et solutions permettant d'y répondre.

Pour cela, dans un premier temps, les données de houle au large ont été récupérées et analysées puis les séries temporelles de houles ont été propagées du large à l'intérieur du port grâce à une chaîne de modélisation. Dans un second temps, les clapots ont été modélisés sur la même période d'étude que les houles puis recombinaison avec ces dernières. Une fois les houles totales connues, les taux d'opérabilité aux différents postes du Port peuvent être définis en configuration actuelle mais également en prenant en compte des aménagements pour les différents types de navires à partir de seuils définis conjointement avec le GPMDLR.

2. Récupération des données de site et propagation des houles du large

Dans un premier temps, l'objectif est de propager les houles exploitations du large à l'entrée du Port. Pour cela, un modèle SWAN (Simulating WAVes Nearshore) qui est un modèle de houle spectrale de 3^{ème} génération, a été mis en place. Le modèle se compose de trois grilles (présentées en Figure 1) imbriquées de résolutions variables allant de 500 m pour la grille large (en vert), à 100 m pour la grille intermédiaire (en bleu) et à 20 m pour la grille « fine » (en rouge) permettant d'avoir une bonne précision à l'entrée du port.



Figure 1. Grilles SWAN permettant la propagation du large à la côte.

Des données de houle sont extraites du modèle COPERNICUS sur une grille de résolution $0,2^\circ$ (approx 20 km) toutes les 3 heures. Ce modèle est construit à partir du code MFWAM et est forcé par les données atmosphériques ERA5 et les données de courants GLORYS12V1. Ces données sont utilisées sur la période 2008 – 2013 pour forcer les modèles SWAN pour la définition des houles d'exploitation. Le forçage est réalisé à partir de 20 points répartis le long de la limite de la grille 1 « Large » du modèle SWAN. Ainsi les 5 ans de données ont été propagées jusqu'à proximité de port Est et des analyses statistiques ont été réalisées. Par exemple, la Figure 2 montre la rose de houles obtenue au droit du port.

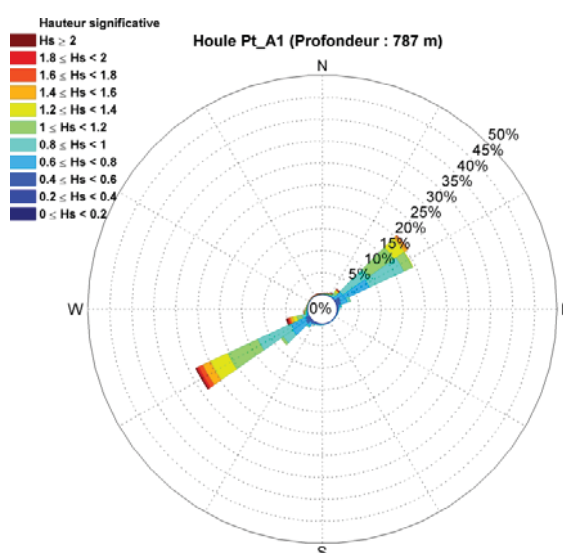


Figure 2. Rose des houles au droit du port Est.

Ce travail montre la première subtilité rencontrée dans cette étude soit le caractère multidirectionnel de la houle atteignant le site d'étude. En effet, le port Est est bien

Thème 4 – Ouvrages portuaires, offshore et de plaisance

protégé des houles australes et des houles d'alizés, qui se traduisent par des composantes de houles d'Ouest et de Nord-Est au niveau du port. Les houles cycloniques peuvent quant à elles atteindre et impacter fortement le port de manière très ponctuelle. En effet, la plupart des houles atteignant le port a contourné l'île et notamment la Pointe des Galets à l'Ouest et le Cap Bernard ou Pointe des Jardins à l'Est. Les houles d'Ouest sont un peu plus énergétiques avec une valeur de Hs dépassée 1% du temps de 2,12 m alors que cette même valeur est de 1,87 m pour le secteur Est. Afin de considérer ces différentes composantes, les spectres de houle au large ont été décomposés puis propagés séparément et par la suite recombinaison afin d'avoir une information à l'intérieur du port intégrant le caractère multidirectionnel. Ce travail sera décrit par la suite.

3. Modélisation des houles résiduelles

Afin de modéliser l'agitation à l'intérieur du port, le code de calcul ARTEMIS a été mis en place. ARTEMIS résout l'équation en pente douce de l'équation de Berkhoff par la formulation des éléments finis. Le maillage des grilles de calcul du modèle ARTEMIS est déstructuré. Pour reproduire finement les processus d'agitation, des mailles de 5 m sont considérées. Au total, le maillage comprend ainsi 52 686 nœuds de calculs soit environ 103 428 éléments triangulaires. Un coefficient de réflexion (Cr) compris entre 0 et 1 est attribué à chaque frontière solide du modèle d'agitation portuaire.

Plus ce coefficient est proche de 1, plus la paroi est réfléchissante. Les coefficients de réflexion peuvent être estimés grâce aux formules du guide de l'enrochement (CIRIA, CUR, CETMEF, 2009). Dans le cadre de cette étude, un coefficient de réflexion de 1 a été considéré au niveau des quais, de 0,45 au niveau d'enrochements et de 0,1 au niveau des zones d'atténuation type plages. L'objectif de cette partie d'étude est de propager la base de données de houle depuis l'extérieur du port, qui ont été modélisées par le code SWAN comme décrit précédemment, à l'intérieur du port. Pour cela, une matrice de transfert est construite afin d'encadrer les valeurs de Hm0, Tp et Dir susceptibles d'être obtenues devant le port et ainsi par interpolation de retrouver en différents points les valeurs à l'intérieur du port et cela pour chaque pas de temps de la base de données.

De plus, une analyse des spectres obtenus devant le port a démontré la possible combinaison de plusieurs composantes de la houle, contournement pas l'Est et par l'Ouest d'une même houle au large et des mers de vents générées plus localement. La Figure 3 présente un exemple de spectre multi directionnel que l'on pourrait observer sur la zone d'étude. Cette diversité directionnelle serait donc effacée si nous ne considérons que les paramètres réduits Hm0 / Tp / Dir issus du modèle SWAN en entrée du modèle ARTEMIS.

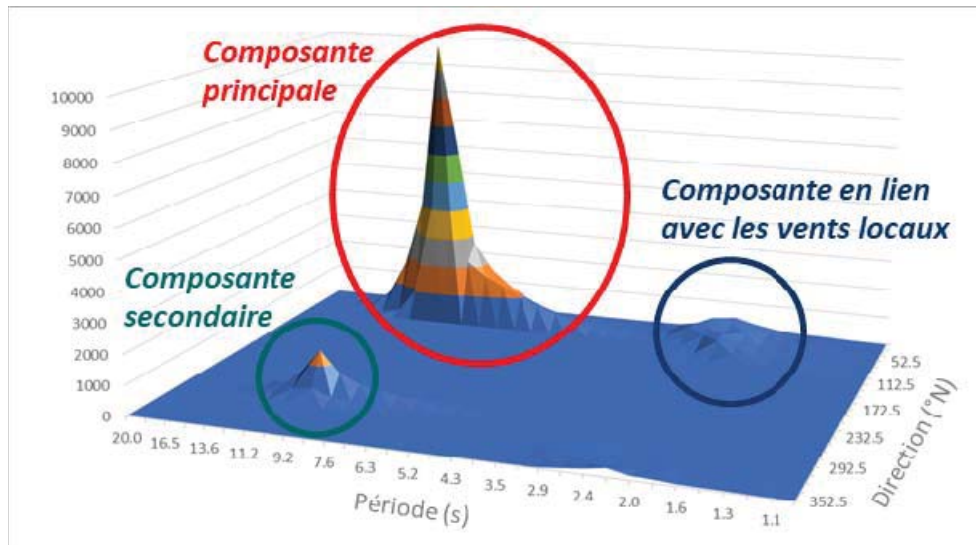


Figure 3. Exemple de spectre multi directionnel.

Toutefois, devant la difficulté de paramétrer le spectre d'entrée dans le modèle ARTEMIS, et de modéliser l'ensemble des cas de calculs (5 ans de données / pas de 3h), nous avons décidé de décomposer un spectre en plusieurs spectres (de l'ordre de 4) caractérisés par leurs valeurs de H_{m0i} / T_{pi} / Dir_i , puis de recombinaison les valeurs obtenues à l'intérieur du port. Cette approche de décomposition – recombinaison a été appliquée en parallèle de l'approche « standard » ($H_{m0}/T_p/Dir$) afin de s'assurer du potentiel effet des différentes composantes du spectre sur l'agitation résiduelle dans le port. Les Figures 4a et b suivantes présentent les 139 cas de calcul (croix rouges) considérés pour alimenter la matrice de transfert sur les figures H_s / T_p et H_s / Dir .

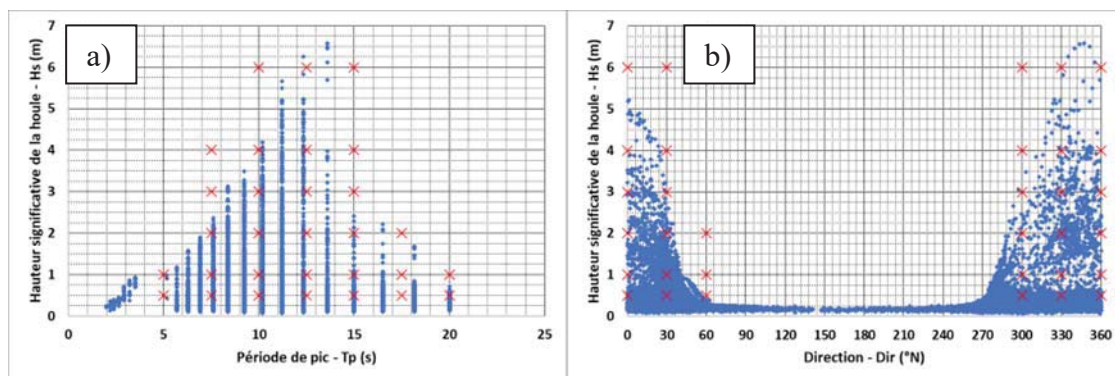


Figure 4. Présentation des calculs de la matrice de transfert sur l'ensemble des caractéristiques de houle devant le port.

Afin de limiter le nombre de cas de calculs, plusieurs hypothèses ont été considérées dont notamment le fait que les houles de direction comprises entre 90 °N et 270 °N ne soient pas considérées dans l'agitation, celles de direction entre 90 °N et 60 °N sont rattachées à la direction 60 °N et celles de direction entre 270 °N et 300 °N sont

Thème 4 – Ouvrages portuaires, offshore et de plaisance

rattachées à la direction 300°N . Les houles de périodes inférieures à 5 s sont rattachées à la période 5 s et les houles de hauteurs supérieures à 6 m rattachées à une hauteur de 6 m. Les principales zones caractéristiques du port soit le secteur Bassin - Zone d'évitage, le secteur Darse et le secteur Avant-Port sont présentées sur la Figure 5.



Figure 5. Zones de sorties des résultats.

Comme expliqué précédemment, la décomposition spectrale a été réalisée afin de s'assurer de la bonne prise en considération de certaines composantes directionnelles qui pourraient être oubliées dans une approche standard. Toutefois, après vérification il ressort que quel que soit la zone ou le pourcentage de dépassement considéré la différence reste comprise entre $-0,5$ et $+2,5$ cm avec l'approche « standard » par rapport à l'approche « décomposition spectrales ». Pour la suite de l'étude nous considérerons l'approche « standard ». Ce travail a donc permis de caractériser les houles résiduelles au niveau des différentes zones caractéristiques du Port présentées ci-après. Les valeurs statistiques dépassées 10% et 1% du temps sont présentées sur la Figure 6.

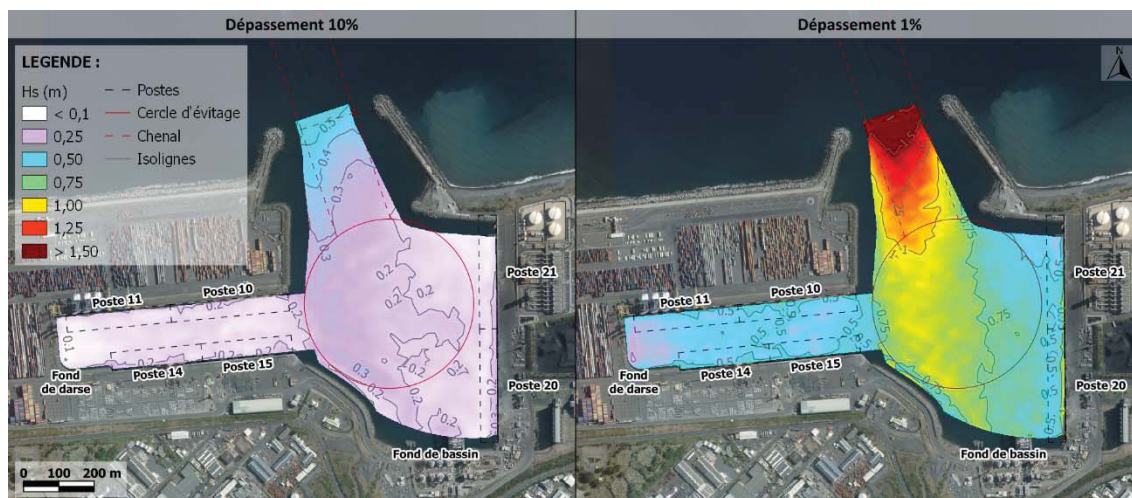


Figure 6. Agitation résiduelle dépassée 10 et 1% du temps.

Au niveau de la darse, les valeurs de houle résiduelle dépassées 10% et 1% du temps sont respectivement 15 et 41 cm. Ces valeurs sont légèrement plus fortes au niveau de la zone Bassin – Zone d'évitage avec 18 cm et 61 cm. Cette distinction entre les zones est moins vraie pour les fréquences de dépassement plus courante.

Au niveau de l'avant-port pour une fréquence de dépassement de 10%, la houle résiduelle est de 35 cm et pour une fréquence de dépassement de 1% de 1,26 m.

4. Modélisation des clapots et recombinaison

Maintenant les houles résiduelles caractérisées, il est nécessaire de prendre en compte l'influence non négligeable des clapots sur l'agitation du port. Pour cela, les données de vents au niveau du port ont été récupérées. Afin de modéliser les clapots, le modèle SWAN a été réutilisé. Pour cette problématique très locale, seule la grille fine est utilisée et a été même raffinée à 10m pour obtenir une meilleure représentation des processus à l'intérieur de l'enceinte du port. La modélisation des clapots (voir clapots dépassés 10% et 1% du temps en Figure 7) montre que les zones les plus agitées par la génération des clapots sont le secteur de la darse (et en particulier le fond de la darse présentant les fetchs les plus importants) avec une valeur de H_{m0} dépassée 10% de l'ordre de 15 cm et 1 % du temps de l'ordre de 27 cm. Au niveau de la zone Bassin – Zone d'évitage, les clapots sont moins forts avec une valeur de H_{m0} dépassée 10% du temps de l'ordre de 10 cm et dépassée 1% du temps de 19 cm. Les valeurs de clapots apparaissent globalement faibles, elles peuvent toutefois être impactantes pour les plus petites embarcations liées à l'exploitation du Port et peuvent influencer les statistiques globales de dépassement de seuil.

Thème 4 – Ouvrages portuaires, offshore et de plaisance



Figure 7. Clapots dépassés 10 et 1% du temps.

Sur la période d'étude de 5 ans, les houles et les clapots ont été combinés, en s'inspirant de la méthodologie mise en place dans l'article de GRUWEZ *et al.*, (2011) concernant l'étude de l'agitation dans le port d'Oostende pendant les conditions de tempête. En effet, afin de prendre en considération l'effet combiné de l'agitation résiduelle et des clapots, il a été décidé d'appliquer la formule suivante :

$$H_{m0} = \sqrt{H_{m0,1}^2 + H_{m0,2}^2} \quad (1)$$

avec H_{m0} la houle significative totale, $H_{m0,1}$ la houle significative due à l'agitation résiduelle et $H_{m0,2}$ le clapot généré dans les bassins. Cette formule a été proposée par VAN DER MEER *et al.*, (2002). La combinaison des houles et des clapots amène aux résultats présentés dans la Figure 8 soit des cartes de valeurs dépassées 10% et 1% du temps sur la période des 5 ans modélisée.

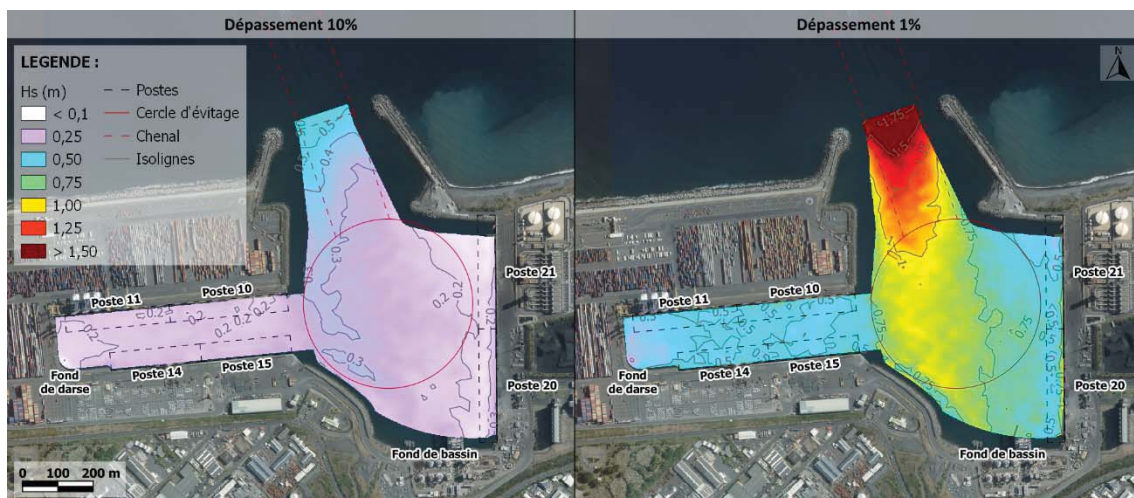


Figure 8. Agitation résiduelle (incluant les clapots) dépassée 10 et 1% du temps.

La combinaison des houles résiduelles et des clapots engendre une augmentation plus forte au niveau de la darse que dans le bassin et zone d'évitage, ce qui a tendance à uniformiser les résultats. En prenant en compte le vent et les clapots, la valeur d'agitation totale dépassée 10% du temps dans la darse devient 21 cm avec une augmentation de 38% par rapport à la valeur sans vent et celle dépassée 1% du temps devient 46 cm soit une augmentation de 13%. Au niveau du bassin et de la zone d'évitage, la prise en compte des clapots est moins visible avec une augmentation de ces valeurs statistiques de houles dépassées 10% et 1% du temps de l'ordre de 2% à 12% uniquement.

5. Conclusion

La présente étude a permis de caractériser les houles résiduelles – clapots – houles totales au niveau des différents postes et zones caractéristiques du port Est du GPMDLR. Pour cela, il a fallu répondre à quelques défis comme notamment la prise en compte du caractère multidirectionnel des spectres de houles atteignant le port (même si cette approche n'a finalement pas été prise en compte afin de se placer dans le sens de la sécurité) et la prise en compte de l'influence non négligeable des clapots en particulier sur certains postes. Ce travail a donc permis de définir les houles totales à l'intérieur du port. Ces dernières ont été ensuite analysées et comparées à différents seuils d'opérabilité définis avec le GPMLDR pour chaque quai en fonction du type de trafic (conteneur, RoRo, Vrac...) et des navires associés.

Cette approche a été appliquée à une première configuration aménagée du port en considérant le raccourcissement du tenon permettant d'assurer des meilleures conditions de sécurité lors des phases d'entrée des grands porte-conteneurs entrant dans le port. L'influence de cet aménagement a ainsi pu être appréhendée en termes de valeurs statistiques de houle et surtout de taux d'opérabilité. Par la suite, les futurs aménagements que le GPMLDR pourrait envisager pour améliorer son attractivité ou s'adapter au changement climatique pourraient alors être étudiés en suivant la méthodologie décrite dans cet article et ainsi caractériser leurs rôles sur l'opérabilité dans le port.

6. Références bibliographiques

- CIRIA, CUR, CETMEF. (2009). *Guide Enrochement. L'utilisation des enrochements dans les ouvrages hydrauliques. Version française du Rock Manual*. P09-01. CETMEF, Compiègne.
- GRUWEZ V., BOLLE A., VERWAEST T., HASSAN W. (2012). *Numerical and physical modelling of wave penetration in Oostende harbour during severe storm conditions*. 5th International Short Conference on Applied Coastal Research.
- VAN DER MEER J.W., LANGENBERG J.W., KLEIN BRETELER M., HURDLE D.P., DEN HEIJER F. (2002) *Wave boundary conditions and overtopping in complex*

Thème 4 – Ouvrages portuaires, offshore et de plaisance

areas. Paper presented at the 28th International Conference on Coastal Engineering, Cardiff, UK.