



Développement d'une nouvelle méthode de transfert des états de mer pour le code d'agitation portuaire ARTEMIS

Franck MAZAS ¹, Roman LE BELLEGUIC ², Régis WALTHER ¹, Agnès DIASPARRA ¹

1. ARTELIA, 6 rue de Lorraine, 38130 Echirolles, France.

*franck.mazas@arteliagroup.com ; regis.walther@arteliagroup.com ;
agnes.diasparra@arteliagroup.com*

2. Université de Montpellier, Faculté des Sciences, Master GCL, Place E. Bataillon, 34095, Montpellier, France.

lebelleguicroman@gmail.com

Résumé :

La connaissance de l'agitation à l'intérieur d'une zone portuaire est essentielle à la réalisation des études de génie portuaire. En effet, elle permet le dimensionnement des ouvrages et l'estimation des taux de disponibilité des différents postes, ce qui permet d'ajuster le plan-masse des aménagements. Elle est pourtant particulièrement complexe du fait de la difficulté à simuler avec précision les interactions de la houle avec les structures portuaires d'une part (brise-lames, quais, pontons...) qui induisent des effets de réflexion, diffraction et transmission, et avec les fonds d'autre part (chenaux de navigation et leurs talus à forte pente, faibles profondeurs) qui induisent des effets non-linéaires de réfraction et de déferlement.

Les différents codes de calcul d'agitation classiquement utilisables dans les études d'ingénierie reposent sur des formulations plus ou moins simplifiées des équations de Navier-Stokes qu'ils cherchent à résoudre. Les formulations plus sophistiquées permettent de mieux représenter les phénomènes complexes mais pâtissent d'un temps de calcul élevé. Or, l'estimation des taux de disponibilité requiert la réalisation d'un grand nombre de calculs (de plusieurs dizaines à plusieurs centaines) pour l'établissement d'une matrice de transfert permettant par interpolation la reconstruction de séries temporelles dans le port à partir des conditions en entrée de modèle.

Partant du constat que chacun de ces calculs repose sur la combinaison de sous-calculs de composantes spectrales individuelles (une période et une direction), une solution pour réduire les temps de calcul est de réaliser une bibliothèque de calculs portant sur les composantes spectrales plutôt que sur un état de mer complet, comme le fait la méthode traditionnelle de la matrice de transfert, largement utilisée dans les études d'ingénierie. L'enjeu est alors d'être capable de recombinaison, pour chaque état de mer souhaité, les composantes appropriées, tout en tenant compte des effets non linéaires de dissipation d'énergie dus notamment au déferlement.

Thème 1 – Hydrodynamique marine et côtière

Cette méthodologie est développée sur le code ARTEMIS, module d'agitation de la chaîne TELEMAC-MASCARET. Ce code écrit en Fortran présente en effet l'avantage d'être ouvert, permettant l'enrichissement de son code.

Nous présentons donc les développements réalisés, portant à la fois sur le code Fortran d'ARTEMIS de façon à pouvoir manipuler les résultats des composantes spectrales, et sur les routines de post-traitement permettant, pour chaque état de mer considéré, la pondération de chaque composante, la recombinaison de l'état de mer ainsi que la limitation des vagues due au déferlement bathymétrique. Une comparaison avec un calcul d'état de mer complet par ARTEMIS est réalisée de façon à évaluer la précision de la nouvelle méthodologie permettant le transfert d'une série temporelle longue d'états de mer en tout point du port.

Mots-clés :

Agitation portuaire, Taux d'indisponibilité à poste, Matrice de transfert.

1. Introduction

L'estimation des séries temporelles de houle à l'intérieur du domaine portuaire est une des problématiques majeures en ingénierie portuaire. Elle nécessite le transfert des états de mer depuis l'entrée du port jusqu'au sein des bassins, à l'aide d'un modèle d'agitation devant prendre en compte les phénomènes de transformation des vagues et leurs interactions avec les structures : réfraction, réflexion, diffraction, déferlement. La complexité de ces phénomènes implique des temps de calcul trop importants pour la simulation de chaque état de mer successif sur de longues durées.

L'état de l'art repose donc sur la simulation d'un nombre limité d'états de mer judicieusement choisis permettant le transfert par interpolation d'états de mer (technique dite de la matrice de transfert). Cependant, la variabilité des paramètres de houle (hauteur, période, direction) voire de niveau est telle que le nombre de calculs souhaitables pour obtenir la précision souhaitée (typiquement quelques centaines à quelques milliers) peut rester hors de portée des capacités de calcul de l'ingénierie.

L'enjeu de cette recherche est donc le développement d'une méthode permettant l'établissement d'une méthode de transfert suffisamment raffinée dans des temps de calcul acceptables. Suivant les cas, il pourra s'agir soit d'une matrice de transfert plus raffinée, soit du transfert direct de la série temporelle (sans interpolation).

2. Matériel et méthodes

2.1 Présentation du code de calcul

Cette méthodologie est développée pour le module d'agitation portuaire de la suite TELEMAC-MASCARET, nommé ARTEMIS (Agitation and Refraction with TELEMAC on a Mild Slope). Ce code de calcul à résolution de phase est basé sur la

résolution de l'équation de pente douce (BERKHOFF, 1976), par une méthode des éléments finis, sur un maillage déstructuré. Elle est déduite du modèle des fluides newtoniens en admettant certaines hypothèses simplificatrices : fluide non visqueux et incompressible, écoulement irrotationnel, pente des fonds invariable dans le temps et faible et courbure faible.

Permettant de simuler les ondes gravitaires 2DH en eau peu profonde, il inclut les effets des processus physiques linéaires et non linéaires, de réflexion totale ou partielle, de diffraction d'obstacle émergé ou immergé, de réfraction induite par la bathymétrie, de dissipation sur les fonds ou par déferlement bathymétrique.

2.2 Méthodologie d'un calcul de houle irrégulière

Dans sa dernière version V8P3R0, ARTEMIS décompose le spectre fréquentiel de type JONSWAP (HASSELMANN *et al.*, 1980) en bandes d'énergie égale. Il résout les sous-calculs des composantes spectrales individuelles, puis intègre l'entièreté du spectre d'énergie en sortie de modèle et enfin, il restitue les valeurs de H_{m0} (hauteur significative spectrale) en tout point du domaine de calcul. La prise en compte des processus dissipatifs est mise en œuvre par deux approches, celle de (DALLY *et al.*, 1984) ou celle de (BATTJES & JANSSEN 1978), en calculant le coefficient de dissipation, qui remplit un critère de convergence itératif.

3. Développement d'une nouvelle méthode de transfert des séries temporelles de houles

3.1 Méthodologie

La première étape est d'établir une bibliothèque de composantes spectrales (combinaisons de directions et de périodes) pertinentes au regard du climat de houle en entrée de modèle et de l'exposition du port. Des calculs sont réalisés par ARTEMIS pour chacune de ces composantes monochromatiques (calcul de houle régulière) en y associant une énergie unitaire. Il est à noter qu'aucune dissipation d'énergie (par frottement sur le fond ou déferlement bathymétrique) n'est prise en compte. Dans une deuxième étape, les résultats pour un état de mer complet (houle irrégulière) sont recomposés par post-traitement des résultats numériques obtenus pour la bibliothèque de composantes spectrales. Pour cela, une pondération est attribuée à chaque composante spectrale monochromatique, à partir du spectre directionnel de l'état de mer considéré, et une somme pondérée des résultats de chaque composante permet d'obtenir en tout point du domaine les résultats pour l'état de mer complet. Le déferlement bathymétrique est pris en compte de façon simplifiée par l'application en tout point d'une hauteur maximale, issue du modèle de (BATTJES & JANSSEN 1978). Cette approche est généralement satisfaisante dans les domaines portuaires dans lesquels le déferlement n'intervient qu'au pied des ouvrages ou en fond de bassin ; en outre cette méthodologie s'intéresse aux conditions usuelles et non aux

Thème 1 – Hydrodynamique marine et côtière

conditions de tempêtes, pour lesquelles des simulations dédiées (prenant en compte le déferlement de façon complète) restent recommandées.

Cette méthodologie repose d'une part sur des modifications apportées au code ARTEMIS lui-même, et d'autre part sur des routines de post-traitement des résultats.

3.2 Modifications apportées au code ARTEMIS

Pour pouvoir imposer un calcul unitaire de composantes spectrales et archiver les valeurs des hauteurs énergétiques en tout point du domaine, le code source en langage Fortran a été modifié. En premier lieu, il a été implémenté un module utilisateur qui alloue en tant que variables globales la bibliothèque de directions et de périodes discrètes, qui ont été assignées aux sous-routines de discrétisation directionnelles et fréquentielles. Ensuite, il a été imposé aux conditions aux limites du potentiel, la variable imputée par l'utilisateur dans la sous-routine de condition aux limites. Enfin, il a été utilisé une des variables privées allouables pour écrire les valeurs des hauteurs énergétiques, selon chacune des composantes spectrales individuelles, en tout point du domaine de calcul.

3.3 Post-traitement des résultats numériques

La nouvelle méthode a exigé le développement d'un outil de post-traitement des résultats numériques, réalisé sous la forme d'un utilitaire Notebook en langage Python.

Considérant un état de mer en entrée de modèle à transférer, la première étape consiste à représenter son spectre angulo-fréquentiel $\hat{S}(f, \theta)$, à le découper en fonction des composantes spectrales de la bibliothèque de calculs monochromatiques d'ARTEMIS et à identifier les coefficients de pondération associés. Le spectre fréquentiel peut suivre les formulations de Pierson_Moskowitz, JONSWAP, Bretschneider ou TMA ; la fonction de répartition directionnelle pouvant suivre les modèles de Pierson ou Mitsuyasu. Les coefficients de pondération pour les composantes spectrales associées à la fréquence discrète f_i et à la direction discrète θ_j valent $\hat{S}(f_i, \theta_j)df_id\theta_j$, c'est-à-dire des fractions discrètes du moment d'ordre 0 $\widehat{m}_{0,i,j}$. L'accentuation ^ signale les valeurs en entrée de modèle.

La seconde étape consiste à utiliser ces pondérations pour sommer en tout point du domaine de calcul les résultats de hauteur $H_{i,j}^1$ calculés par ARTEMIS pour chaque composante spectrale (d'énergie unitaire). Cette somme quadratique pondérée s'écrit :

$$H_{m_0} = \sum_{i,j} \sqrt{H_{i,j}^2}, \text{ avec } H_{i,j} = H_{i,j}^1 4 \sqrt{\widehat{m}_{0,i,j}} \quad (1)$$

où : $H_{i,j}^1$ est la hauteur en sortie de modèle du calcul ARTEMIS de la composante spectrale unitaire de fréquence f_i et de direction θ_j , et $H_{i,j}$ la hauteur associée à la composante après application de la pondération propre à l'état de mer considéré.

La dernière partie est la prise en compte simplifiée de la dissipation par déferlement bathymétrique, par l'application d'une hauteur limite en tout point du modèle. Cette

hauteur limite H_m est basée sur l'adaptation du critère de Miche proposée par (BATTJES & JANSSEN, 1978) pour les houles irrégulières :

$$H_m = \frac{2\pi\gamma_d}{k} \tanh\left(\gamma_s \frac{kh}{2\pi\gamma_d}\right) \quad (2)$$

où $\gamma_d = 0,14$ est la cambrure limite en eau profonde, $k = 2\pi/L$ le nombre d'onde, h est la hauteur d'eau, et γ_s est un critère de déferlement en eau peu profonde, pour lequel (BATTJES & STIVE, 1984) ont proposé la paramétrisation suivante :

$$\gamma_s = 0,5 + 0,4 \tanh(33S_0) = 0,5 + 0,4 \tanh\left(33 \frac{H_{m0,0}}{\sqrt{2}L_{p,0}}\right) \quad (3)$$

où S_0 est la cambrure au large, ici calculée à partir des valeurs en entrée de modèle.

La longueur d'onde de pic locale est calculée en tout point du domaine par une formulation analytique approchée, la fréquence de pic considérée étant soit la fréquence discrète de plus forte énergie, soit celle calculée par la méthode de Read à l'ordre 5.

Enfin, l'utilitaire permet de restituer les cartes d'iso-valeurs de la hauteur significative de houle en sortie de modèle, au format de sortie binaire selafin du logiciel TELEMAC.

4. Cas d'étude

4.1 Description du cas

La nouvelle méthodologie est appliquée sur un cas d'étude basé sur un modèle physique du port de Grenaa au Danemark (HELM-PETERSEN & BRORSEN, 1997), comportant plusieurs bassins et des ouvrages réfléchissants (figure 1).

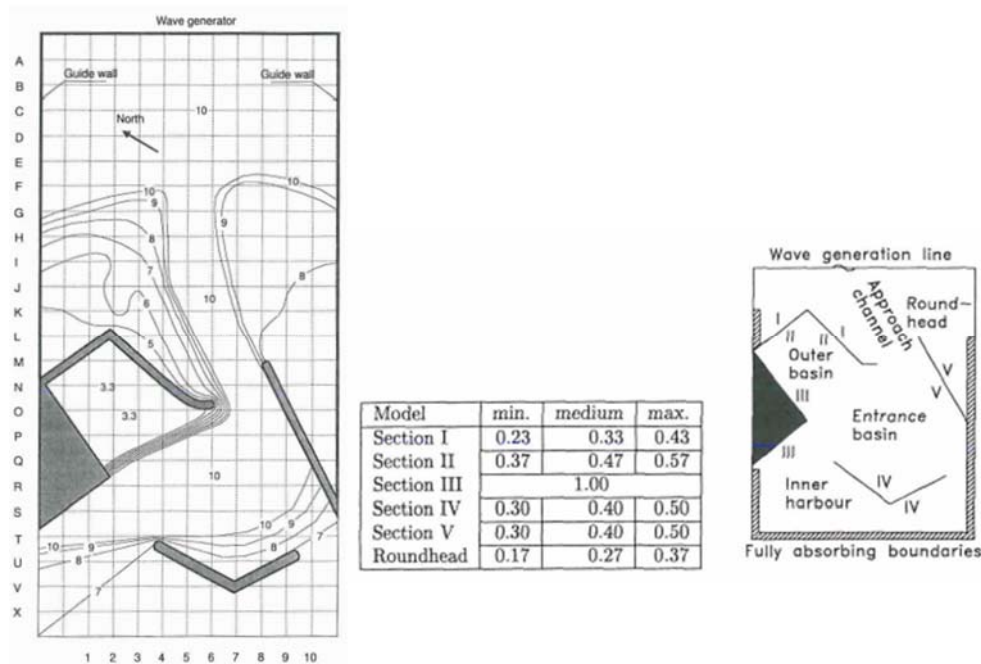


Figure 1. Présentation du cas d'étude : modèle physique du port de Grenaa par Helm-Petersen et Brorsen - plan-masse et coefficients de réflexion.

Thème 1 – Hydrodynamique marine et côtière

4.2 Méthodologie et présentation des cas-tests

Le premier cas de validation consiste à vérifier que la recombinaison à partir de la bibliothèque de composantes spectrales aboutit à un résultat très proche de celui d'un calcul ARTEMIS en houle irrégulière.

Deux calculs monodirectionnel et multidirectionnel sont réalisés, chacun d'abord par un calcul ARTEMIS classique puis par la méthode de la bibliothèque de composantes spectrales (en reprenant la discrétisation déterminée par ARTEMIS dans le premier cas). Le second cas-test, en houle multidirectionnelle, s'intéresse à la prise en compte du déferlement bathymétrique par l'application du critère limitatif.

Les conditions d'entrée physiques de ces cas-tests sont présentées dans le tableau 1.

Tableau 1. Description des cas-tests.

<i>Cas</i>	<i>Hm0</i> (m)	<i>Tp</i> (s)	<i>Dirp</i> (°N)	γ (-)	σ (°)	<i>Déferlement</i>	<i>Nombre de</i> <i>fréquences</i>	<i>Nombre de</i> <i>directions</i>
1	0,53	5,26	329	1,6	9,4	-	13	1
2	0,53	5,26	329	1,6	9,4	-	7	13
3	3,00	6,24	0	1,0	9,2	X	8	21

4.3 Résultats

Les épures des erreurs absolues de la hauteur significative spectrale montrent la distribution spatiale de l'écart entre les deux méthodes (voir figure 2).

En moyenne, l'écart est quasi-nul : 0,00067 m pour le cas 1 et 0,00049 m pour le cas 2. Les écarts maximaux sont nettement réduits lorsque l'on passe d'une houle monodirectionnelle à une houle multidirectionnelle. Ainsi, cette comparaison valide la méthode de recombinaison à partir de la bibliothèque de composante spectrale.

La figure 3 montre le bon calcul de la hauteur limite au déferlement H_m ainsi que la bonne localisation du déferlement, matérialisée par une différence négative entre H_m et le H_{m0} recomposé. Ainsi cette approche simplifiée permet bien d'obtenir des valeurs de H_{m0} compatibles avec les fonds, ce qui est satisfaisant pour la plupart des situations où l'on s'intéresse au transfert des houles usuelles (non extrêmes) dans des bassins portuaires.

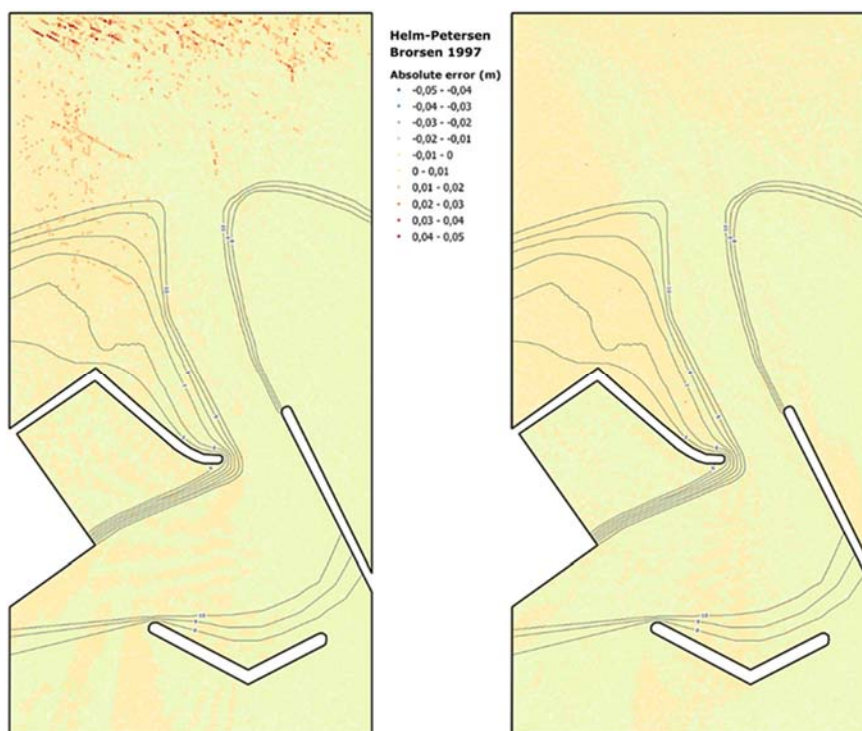


Figure 2. Carte des erreurs absolues entre les calculs recomposés et les calculs ARTEMIS pour les cas-test monodirectionnel 1 (gauche) et multidirectionnel 2 (droite).

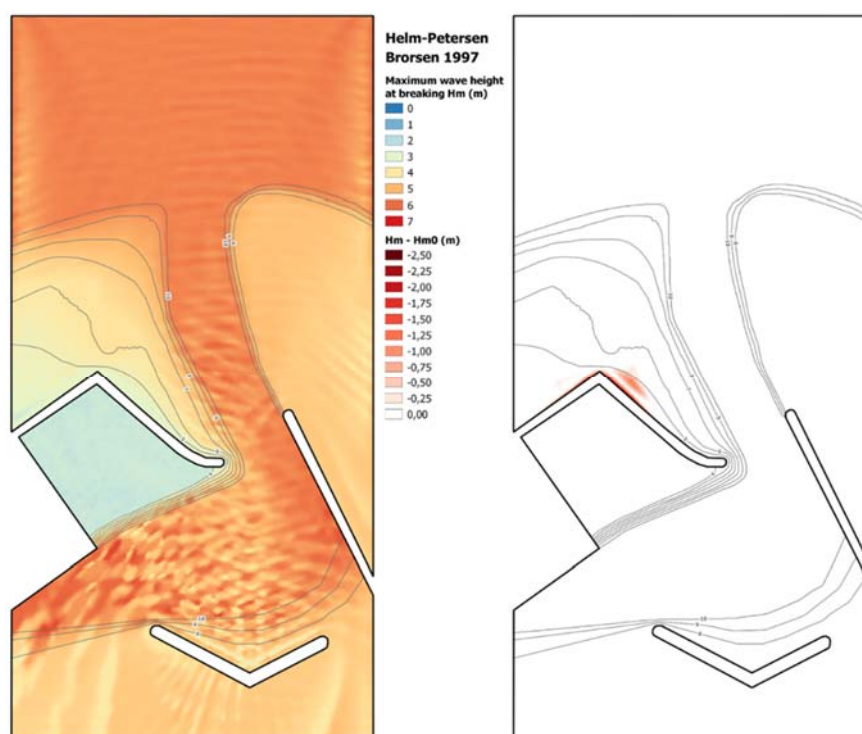


Figure 3. Cas-test 3 : hauteur maximale au déferlement H_m (gauche) et différence avec H_{m0} (droite).

Thème 1 – Hydrodynamique marine et côtière

5. Conclusions

L'utilisation d'une bibliothèque de composantes spectrales et la recombinaison des états de mer par une somme quadratique pondérée permet ainsi d'obtenir l'agitation en tout point du domaine de calcul avec une précision équivalente à un calcul direct ARTEMIS. Le gain en temps de calcul est cependant très important : si l'on considère que le nombre de composantes spectrales nécessaire pour couvrir tous les cas de la série temporelle à transférer est environ 10 fois supérieur au nombre de composantes nécessaires à un seul état de mer, alors on voit que la méthode est plus rapide dès lors qu'il y a plus de 10 états de mer à transférer, et a fortiori plusieurs dizaines de milliers. Cette approche ouvre donc des perspectives pratiques très intéressantes pour les études d'ingénierie portuaire pour lesquelles on souhaite connaître les conditions usuelles dans le port, notamment pour l'estimation des taux d'indisponibilité à poste.

On peut également noter que cette approche peut être utilisée pour les différents systèmes de vagues (mer de vent, houles) au sein d'un état de mer, ce qui renforce encore la précision des résultats.

Cette méthodologie peut être appliquée directement au transfert d'une série temporelle lorsque l'on se situe dans le domaine de la houle linéaire, où seules les période et direction influent sur les résultats. Lorsque le niveau marin joue un rôle important, à la fois sur la propagation et sur les conditions en limites du modèle (cas d'un port découvrant), on pourra alors utiliser une matrice de transfert en appliquant notre méthode pour plusieurs valeurs de niveau marin.

6. Références bibliographiques

- BATTJES J., JANSSEN J. (1978). *Energy loss and set-up due to breaking of random waves*. Coastal Engineering Proceedings, 1(16), 32. <https://doi.org/10.9753/icce.v16.32>
- BATTJES J., STIVE M. (1984). *Calibration and verification of a dissipation model for random breaking waves*. Coastal Engineering Proceedings, 1(19), 44. <https://doi.org/10.9753/icce.v19.44>
- BERKHOFF J. (1976). *Mathematical models for simple harmonic linear water waves: Wave refraction and diffraction*. Ph.D. Thesis - Tech. Hogeschool Delft, Neth. Delft Hydraulics Lab. (Netherlands). <http://resolver.tudelft.nl/uuid:381c691b-eea8-4f67-be8f-d471a7da1d58>
- DALLY W., DEAN R., DALRYMPLE R. (1984). *A model for breaker decay on beaches*. Coastal Engineering Proceedings, 1(19), 6. <https://doi.org/10.9753/icce.v19.6>
- HASSELMANN, Dieter E., DUNCKEL, M., et EWING, J. A. *Directional wave spectra observed during JONSWAP 1973*. Journal of physical oceanography, 1980, vol. 10, no 8, p. 1264-1280. doi:10.1175/1520-0485(1980)010<1264:DWSODJ>2.0.CO;2.
- HELM-PETERSEN J., BRORSEN M. (1997). *Wave disturbance in harbors - the importance of a correct modelling of wave reflection*. Proc. IAHR seminar on multi-directional waves and their interaction with structures, San Francisco, USA, pp 10-15.