

Etude en bassin de l'estimation des propriétés d'un courant cisailé sur la verticale à partir de la dispersion des ondes de gravité de surface

**Alexandra CUEVAS¹, Vincent REY¹, Julien TOUBOUL², Rémi CHEMIN¹
Fabrice ARDHUIN³**

1. Université de Toulon, Aix-Marseille Université, CNRS/INSU, IRD, Mediterranean Institute of Oceanography (MIO), UM AMU 110, Toulon, France.
alexandra-cuevas@etud.univ-tln.fr
2. École Centrale de Marseille, Aix Marseille Université, CNRS, IRPHE UMR 7342, 13384 Marseille, France
3. LOPS, IUEM, Rue Dumont d'Urville, 29280 Plouzané, France.

Résumé :

Les conditions de houles, du large à la côte, permettent d'accéder à l'information présente sous la surface. Les phénomènes de réfraction, diffraction et réflexion de houles sont non seulement forcés par des variations de la bathymétrie mais aussi par la présence de courant. Ce travail propose et discute de méthodes de reconstruction des champs de courant à partir de données de houles en se basant sur des analyses synchrones des spectres de vagues en différents points de l'espace. On considère ici le cas 2DV de houles progressives ou partiellement stationnaires en présence de courants homogènes ou présentant un profil vertical cisailé. L'étude s'appuie sur des données d'expériences réalisées au Bassin de Génie Océanique (BGO) FIRST, dans le cadre de l'ANR Maturation MORHOC'H 2 en janvier 2022 (étude de la propagation en présence de courants cisailés). Ces premiers traitements de la campagne d'essais MORHOC'H2 nous ont permis de tester la sensibilité de l'évolution de la phase de l'onde au cours de sa propagation, pour estimer la faisabilité de méthodes de reconstruction de courants, constants ou cisailés suivant la verticale. Dans l'hypothèse d'une onde progressive, l'étude de l'évolution de phase montre une influence notable du courant, permettant de retrouver l'intensité d'un courant uniforme. L'évolution de phase calculée en présence de courant cisailé est cohérente avec la théorie, mais pour de faibles valeurs du cisaillement, les modifications de vitesses de phase restent bien inférieures, ce qui rend la méthode plus sensible aux « bruits ». En outre, pour une houle partiellement stationnaire, un impact significatif sur l'évolution de sa phase est observé dans la direction de propagation de l'onde incidente même pour de faibles réflexions, ce qui oblige à inclure ce paramètre dans la reconstruction des courants à partir de données de houles synchrones.

Mots-clés : Houle, Courant, Cisailé, Bassin d'essai, Ondes progressives, Réflexion.

Thème 1 – Hydrodynamique marine et côtière

1. Introduction

Les conditions de houle, du large à la côte, sont des informations nécessaires à la navigation, à la bonne compréhension et modélisation de la dynamique littorale, au dimensionnement des structures en ingénierie côtière, ou à l'évaluation des risques de submersion. Elles constituent également un moyen potentiel d'accéder à de l'information présente sous la surface, comme par exemple des informations sur l'hydrodynamique. La finalité de ce travail est d'accéder à l'information sur les courants et leurs profils verticaux à partir de données de houle. En effet, la réflexion, la réfraction et la diffraction de la houle sont non seulement forcées par les changements de bathymétrie mais aussi par la présence de courants. Les effets d'un courant cisailé verticalement sur la vitesse de propagation ont déjà été étudiés il y a une dizaine d'année (KIRBY & CHEN, 1989). Cependant, les modèles numériques sont restés longtemps limités à la prise en compte de courants homogènes sur la colonne d'eau, ce qui permettait de conserver le caractère irrotationnel de l'écoulement induit par la houle. Or des courants cisailés verticalement sont généralement observés à cause du vent, des marées ou des vagues (voir par exemple SOULSBY, 1990 ; HAAS & SVENDSEN, 2002). Ces cisaillements peuvent être également générés ou amplifiés par des variations rapides de la bathymétrie (REY *et al.*, 2014). Récemment, des modèles ont été proposés pour la propagation de houles régulières en présence de courants présentant un cisaillement vertical constant (TOUBOUL *et al.*, 2016), puis arbitraire (TOUBOUL & BELIBASSAKIS, 2019) et étendus à des cas de houles fortement réfléchies par un fond composé d'une succession de sinusoides (BELIBASSAKIS *et al.*, 2019 ; LAFFITTE *et al.*, 2021).

La présence d'un courant colinéaire à la houle modifie sa vitesse de propagation. Cet effet Doppler est utilisé depuis de nombreuses années pour la mesure des courants de surface par courantométrie Radar (STEWART & JOY, 1974). Il permet de calculer la vitesse du courant de surface moyenné sur une épaisseur qui dépend de la longueur d'onde de la vague considérée, égale à la demi-longueur d'onde du Radar, le principe de mesure étant basé sur la résonance de Bragg. A partir de mesures synchrones de la houle à deux positions successives, il est également possible d'en déduire l'intensité du courant dans cette direction. En effet, la cohérence des signaux doit permettre de connaître leur déphasage, par conséquent la vitesse de l'onde, et donc implicitement celle du courant. Récemment, les champs de courants de surface ont pu être reconstruits à partir de mesures de vagues par télédétection (YUROVSKAYA *et al.*, 2019). Lorsque la houle est partiellement stationnaire, l'algorithme de séparation des ondes fait également intervenir l'intensité du courant (REY *et al.*, 2002 ; MAGNE *et al.*, 2005), il peut être également utilisé dans l'hypothèse la plus simple d'un cisaillement vertical constant du courant (LAFFITTE *et al.*, 2021). Lorsque les caractéristiques du courant sont connues, il doit donc être possible de séparer des ondes se propageant dans des directions différentes. On peut également noter que les caractéristiques du courant peuvent être déterminées en

utilisant la cohérence des signaux mesurés en différents points. Lorsque le courant est cisailé verticalement, l'onde de surface est sensible au courant de surface, sur une épaisseur d'autant plus grande que l'onde est longue (KIRBY & CHEN, 1989 ; TOUBOUL *et al.*, 2016). Les fréquences composant les houles réelles seront donc impactées différemment par un courant cisailé sur la verticale au cours de leur propagation.

Ce travail propose de discuter les effets d'un courant, homogène ou cisailé sur la verticale pour proposer des méthodes de reconstruction des champs de courant à partir de données de houles en se basant sur des analyses synchrones des spectres de vagues en différents points de l'espace. On considère ici le cas 2DV de houles progressives ou partiellement stationnaires en présence de courants homogènes ou présentant un profil vertical cisailé.

2. Propagation des ondes et vitesse de phase

Nous nous plaçons dans le cas bidimensionnel dans le plan vertical xOz, z orienté vers le haut. Pour une houle linéaire monochromatique de période T se propageant par profondeur constante h dans la direction Ox, la vitesse de phase $c = \frac{\omega}{k}$, avec $\omega = \frac{2\pi}{T}$ où ω vérifie la relation de dispersion:

$$\omega^2 = gk \tanh(kh) \quad (1)$$

En présence de courant homogène U, colinéaire à la houle, la relation de dispersion devient :

$$(\omega - kU)^2 = gk \tanh(kh) \quad (2)$$

En présence d'un courant cisailé linéairement sur la verticale de la forme $U(z) = U_0 + Sz$, avec U_0 le courant à la surface et S le paramètre de cisaillement, la relation de dispersion s'écrit sous la forme suivante :

$$(\omega - kU_0)(\omega - kU_2) = gk \tanh(kh) \quad (3)$$

$$\text{avec } U_2 = U_0 - S \frac{\tanh(kh)}{k}$$

De même que la présence d'un courant modifie la vitesse de phase, un courant cisailé verticalement va donc modifier différemment la vitesse de propagation de la houle, mais de façon différente selon la période de l'onde, dont dépend la vitesse U_2 . Plus la période de l'onde sera élevée, plus la célérité de l'onde sera influencée par le courant sur une colonne d'eau importante. Ainsi, pour une houle spectrale, on doit pouvoir estimer le profil vertical du courant sur une profondeur d'autant plus grande que les composantes basses fréquences de la houle seront de grande période. Cette étude porte donc sur l'influence du courant et de sa structure sur la vitesse de propagation. Elle est basée sur l'analyse de mesures expérimentales effectuées en bassin.

3. Dispositif expérimental et méthode

Le Bassin Génie Océaniques (BGO) FIRST, situé à la Seyne-sur Mer (Var, France) est opéré par l'entreprise Océanide. Il a une longueur totale de 40 m dont 24 m de longueur utile. Le BGO est équipé d'un générateur de houles, régulières et irrégulières de période comprise entre 0,6 s et 4 s et de hauteur pouvant aller jusqu'à 0,6 m. Des pompes génèrent un courant dans le sens de propagation de la houle ou dans le sens opposé. A l'opposé au générateur de houle, le bassin est équipé d'une plage amortissante perforée permettant de limiter la réflexion de la houle tout en laissant passer le courant.

3.1 Dispositif expérimental

Dans le cadre du projet ANR maturation MORHOC'H 2, des essais ont été menés au BGO en janvier 2022. Leur objectif était d'étudier la propagation de la houle, en présence d'un courant cisailé sur la verticale. Pour cela, en plus des équipements du BGO, une grille a été conçue pour créer un cisaillement constant sur la colonne d'eau. En utilisant différentes inclinaisons de grille nous avons pu générer différentes conditions de cisaillement.

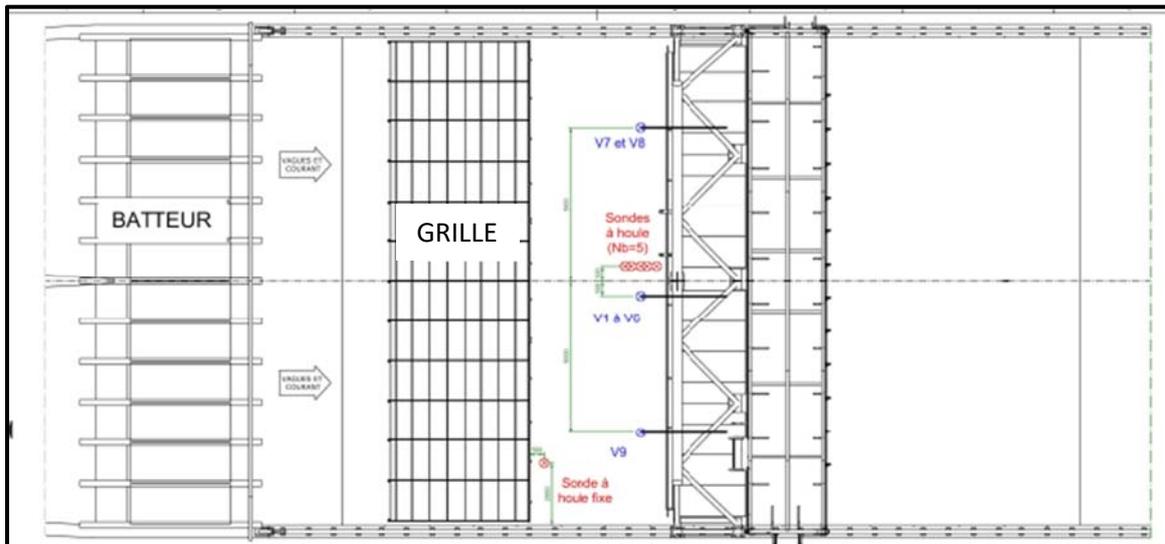


Figure 1. Plan des essais au BGO pour le projet MORHOC'H2.

Cinq sondes à houle, alignées suivant l'axe de propagation et espacées de 0.20 m, 0.30 m, 0.20 m, 0.30 m deux à deux étaient disposées dans la partie médiane du bassin sur une plateforme. Cette plateforme était mobile le long du bassin, permettant de se placer à différentes distances de la grille. Pour mesurer le courant, des vélocimètres (Vectrino, Nortek) ont été utilisés. Leur principe de mesure est basé sur le décalage Doppler des faisceaux acoustiques. Un système de d'électrolyse générant des microbulles a été utilisé pour améliorer le rapport signal sur bruit, l'eau du bassin étant très limpide. Les dix

vélocimètres notés V1 à V10 étaient placés à différentes profondeurs et sur la plateforme mobile afin de connaître le profil vertical du courant à différentes distances de la grille. Deux périodes de houles régulières ont été retenues pour ces essais, $T=1.4$ s et $T=2.1$ s, en l'absence de courant puis pour 3 valeurs de courant dans le sens de propagation des ondes : 0.1 m/s ; 0.2 m/s et 0.3 m/s. Dans le cas d'un courant de 0.3 m/s, des conditions de houles spectrales de type Jonswap ont été générées, pour deux périodes pic, $T_p=1.4$ s et $T_p=2.1$ s. La profondeur d'eau était constante, $h=2$ m. Les mesures ont d'abord été réalisées en l'absence de grille puis en présence de grille avec deux inclinaisons différentes pour chacun des courants considérés.

3.2 Méthode de reconstruction en courant uniforme

A partir de la relation de dispersion (2), des données enregistrées en bassin et en faisant l'hypothèse d'une onde progressive, on peut alors retrouver la valeur du courant uniforme. Cette hypothèse nous permet d'exprimer la différence de phase (à partir de la transformée de Fourier) entre deux points de l'espace :

$$\Delta\varphi = k \Delta x \quad (4)$$

En utilisant la relation entre la célérité de l'onde c , le nombre d'onde k et la pulsation de la houle ω , on obtient :

$$c = \frac{\omega \Delta x}{\Delta\varphi} \quad (5)$$

En combinant (2) et (4) on peut retrouver la valeur du courant uniforme :

$$u_{calculé} = c - \frac{c}{\omega} \sqrt{g \frac{\omega}{c} \tanh\left(\frac{\omega}{c} h\right)} \quad (6)$$

4. Résultats houle monochromatique

4.1 Courant homogène

Nous avons représenté l'évolution de la phase, calculée par transformées de Fourier, pour les différentes sondes. Nous avons représenté sur la figure 2 l'évolution de la phase pour une houle de période de $T=1.4$ s, en l'absence de courant puis pour les trois valeurs de courant considérées. On observe que les points calculés sont en très bon accord avec les courbes théoriques pour toutes les valeurs de courant uniforme. Pour cette période, on peut donc retrouver les valeurs de courant générées au BGO, par une régression linéaire par exemple de l'évolution de la phase en fonction de x .

Nous avons répété les mêmes opérations pour une période de $T=2.1$ s. On remarque sur la figure 3 que les phases calculées sont éloignées de la théorie. Ce décalage significatif entre l'évolution de la phase au cours de la propagation de l'onde et la valeur calculée dans l'hypothèse d'une onde progressive vient, au moins en partie, du fait que cette

Thème 1 – Hydrodynamique marine et côtière

évolution spatiale est modifiée pour une onde partiellement stationnaire. Nous avons représenté sur la figure 3 l'évolution de la phase pour un courant de 0.30 m/s pour un coefficient de réflexion de 10% et de 20%. L'évolution de la phase est nettement plus cohérente avec les résultats expérimentaux, pour lesquels on a observé un coefficient de réflexion compris entre 6% et 15% selon les conditions d'expérience.

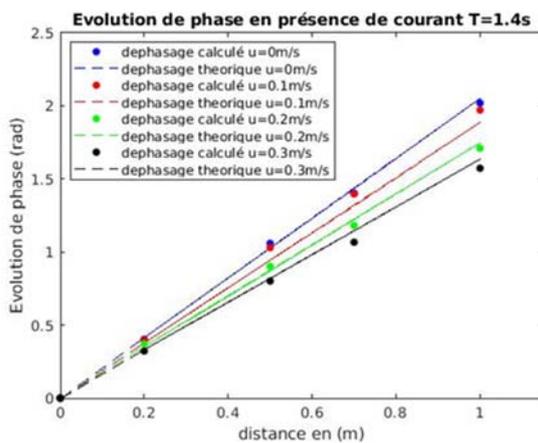


Figure 2. Evolution de la phase pour un courant uniforme $T=1.4 s$.

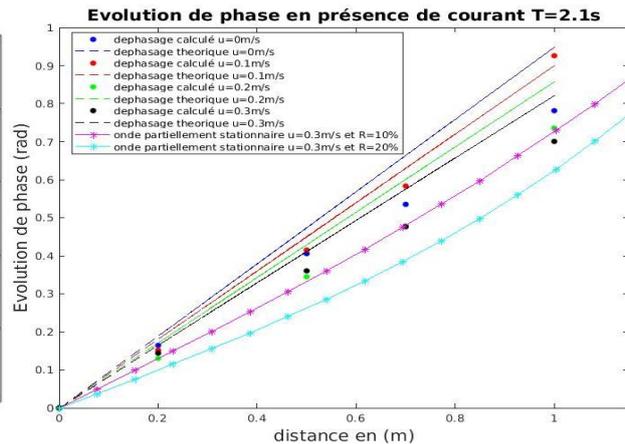


Figure 3. Evolution de la phase pour un courant uniforme $T=2.1 s$.

4.2 Courant cisailé linéairement

Comme montré précédemment, la présence de cisaillement modifie la relation de dispersion. De plus, cette modification est variable selon la période de la houle. Nous avons représenté sur les figures 4 et 5 l'évolution de la phase ainsi que le profil vertical du courant, pour $T=1.4 s$ et $T=2.1 s$ respectivement. A partir de ces profils, l'évolution « théorique » de la phase peut être calculée à partir des caractéristiques du courant, et de son profil vertical, supposé linéaire. Sa comparaison avec les mesures expérimentales montre un très bon accord, pour $T=1.4 s$ (figure 4a) et pour $T=2.1 s$ (figure 5.a).

Cependant, contrairement au cas d'un courant homogène, à une vitesse de phase peuvent correspondre plusieurs couples (U_0 , S). La méthode d'inversion nécessite donc l'utilisation d'au moins deux périodes de houle. De façon pratique et plus opérationnelle, cette condition est remplie pour des houles spectrales. Nous avons donc mené des études en houles irrégulières.

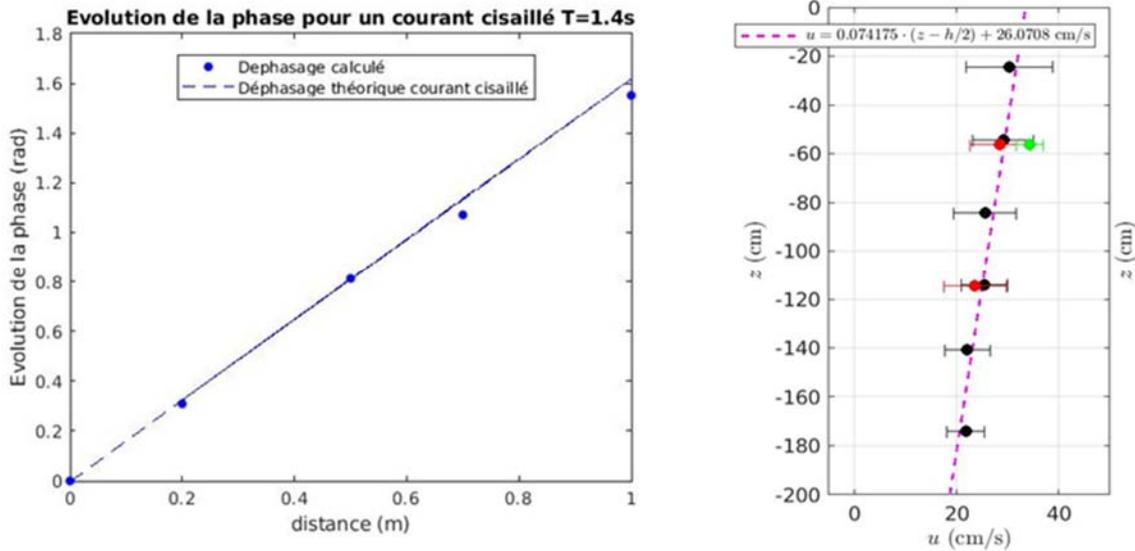


Figure 4. (a) Evolution de la phase pour un courant cisailé T1.4 s ; (b) Profil du courant cisailé.

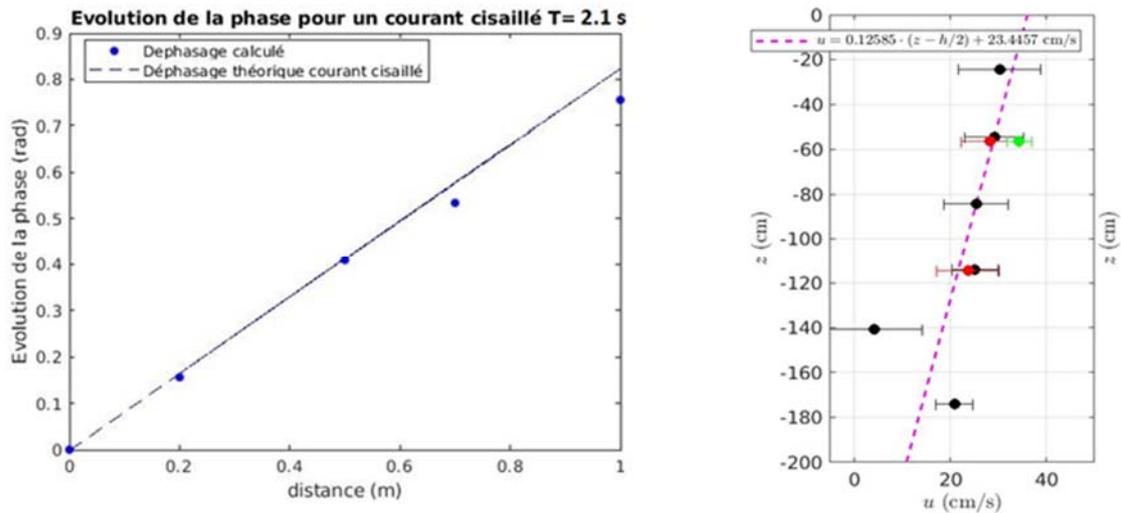


Figure 5. (a) Evolution de la phase pour un courant cisailé T=2.1 s ; (b) Profil du courant cisailé

5. Résultats houles réelles

5.1 Courant homogène

En houle irrégulière, on peut calculer le courant en déterminant l'évolution de phase entre 2 sondes pour toutes les composantes fréquentielles du spectre. On a représenté sur la figure 6 l'évolution de la phase entre deux sondes séparées de 0.50 m en fonction de la fréquence. On a également représenté la différence de phase théorique, sans courant et avec les conditions de courant de l'expérience. On remarque que les résultats expérimentaux sont en très bon accord avec les déphasages calculés dans la gamme de

Thème 1 – Hydrodynamique marine et côtière

répartition de l'énergie de l'onde, autour de sa fréquence pic (indiquée par un trait en pointillés). On observe également, par comparaison au cas sans courant, que le courant a un effet significatif sur l'évolution spatiale de la phase. Pour retrouver la valeur du courant on peut appliquer la même méthode qu'en houle régulière pour chaque composante du spectre puis moyenner ou pondérer les valeurs de courant obtenues. Si on ne dispose que de deux sondes, on peut utiliser une méthode de minimisation par exemple par moindres carrés, de la phase en fonction de la fréquence, entre $f_p/2$ et $2f_p$.

On retrouve le même résultat pour la période $T=2.1$ s. Contrairement à la houle régulière, le fait que la houle réelle soit irrégulière semble atténuer le phénomène de réflexion dans notre cas d'étude.

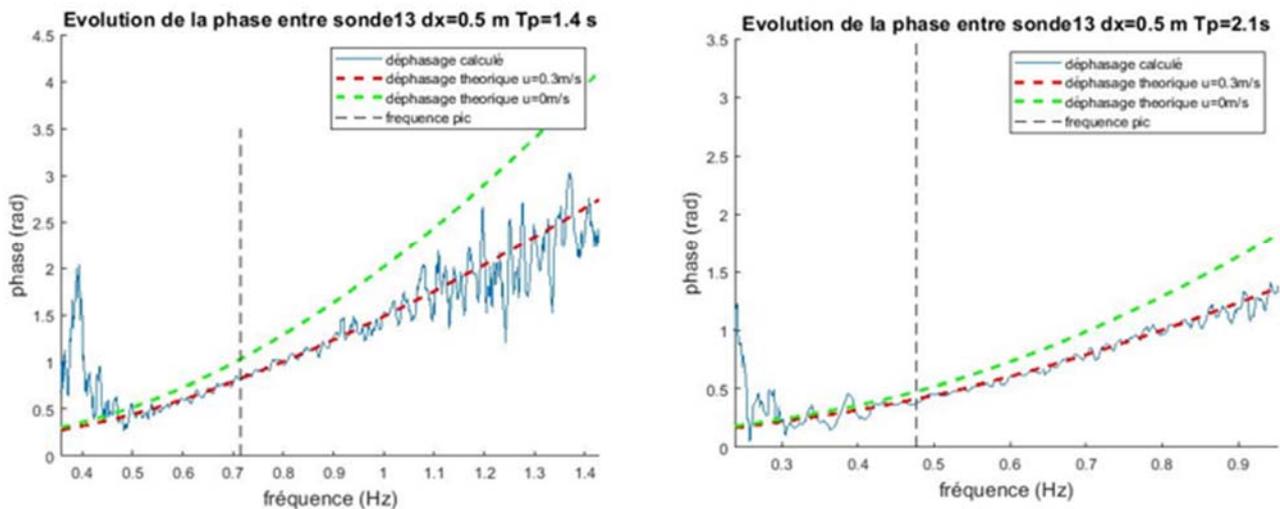


Figure 6. (a) Spectre de phase en courant uniforme $T_p=1.4$ s ; (b) Spectre de phase en courant uniforme $T_p=2.1$ s.

5.2 Courant cisailé

On a représenté sur les figures 7.a et 7.b l'évolution de la phase entre deux sondes séparées de 0.50 m en fonction de la fréquence, respectivement pour $T_p=1.4$ s et $T_p=2.1$ s. On a également représenté la différence de phase théorique, pour un débit donné, avec un courant homogène et un courant cisailé dans les conditions de l'expérience. On remarque que les résultats expérimentaux sont en très bon accord avec les déphasages calculés dans la gamme de répartition de l'énergie de l'onde, autour de sa fréquence pic (indiquée par un trait en pointillés). On observe également, par comparaison au cas sans cisaillement, que ce dernier a un effet relativement faible sur l'évolution spatiale de la phase. Les effets du cisaillement sont visibles essentiellement aux hautes fréquences. C'est en effet pour les hautes fréquences que le courant, et son cisaillement, ont le plus d'effet.

Dans les conditions d'expérience, le cisaillement restait en fait assez faible, ce qui peut expliquer les résultats. Pour retrouver la valeur du courant (en surface) et du cisaillement vertical, on peut utiliser une technique de minimisation de la différence entre phase mesurée et théorique, par rapport au débit et au cisaillement, de la phase en fonction de la fréquence, entre $f_p/2$ et $2f_p$.

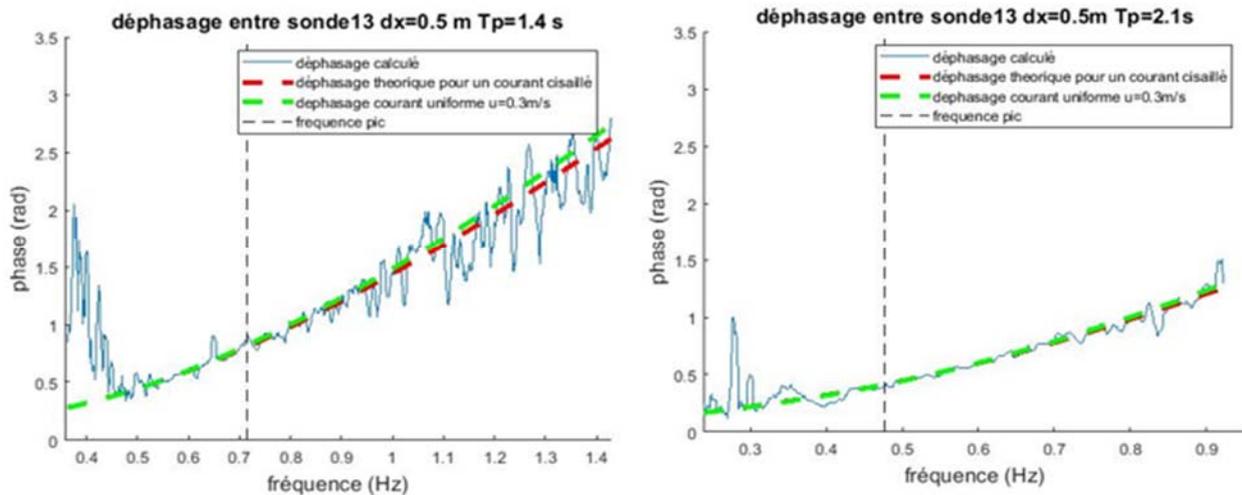


Figure 7. (a) Spectre de phase avec courant cisailé $T_p=1.4s$; (b) Spectre de phase en courant cisailé $T_p=2.1s$.

6. Discussion et perspectives

Ces premiers traitements de la campagne d'essais MORHOC'H2 nous ont permis de tester la sensibilité de l'évolution de la phase de l'onde au cours de sa propagation, pour estimer la faisabilité de méthodes de reconstruction de courants, constants ou cisailés suivant la verticale. Dans l'hypothèse d'une onde progressive, l'étude de l'évolution de phase montre une influence notable du courant, permettant de retrouver l'intensité d'un courant uniforme. L'évolution de phase calculée en présence de courant cisailé est cohérente avec la théorie, mais pour de faibles valeurs du cisaillement, les modifications de vitesses de phase restent bien inférieures, ce qui rend la méthode plus sensible aux « bruits ». En outre, nous avons vu dans le cas $T=2.1s$ que la présence d'une houle même faiblement partiellement stationnaire peut induire un impact significatif sur l'évolution de la phase dans la direction de propagation de l'onde incidente. Il convient donc de continuer cette étude en prenant en compte l'hypothèse d'une onde partiellement stationnaire. Dans un premier temps, la réanalyse de données issues d'une campagne expérimentale dans le BGO dans le cadre du GIS HYDRO en 2004 (MAGNE *et al.*, 2005) est planifiée, avant le passage à des houles multidirectionnelles dans la perspective d'analyse de données satellitales.

Thème 1 – Hydrodynamique marine et côtière

Remerciements

La DGA est remerciée pour le financement de la bourse de thèse AID d'Alexandra CUEVAS, ainsi que pour l'ANR maturation MOROC'H2. Le personnel de la société Océanide ainsi que Veronica MORALES-MARQUEZ, post doctorante au M.I.O, sont vivement remerciés pour leur contribution aux expériences menées au BGO FIRST.

7. Références

- BELIBASSAKIS K.A., TOUBOUL J., LAFFITTE E., REY V. (2019). *A mild-slope system for Bragg scattering of water waves by sinusoidal bathymetry in the presence of vertically sheared currents*, J. Mar. Sci. Eng. 2019, 7, 9. doi:10.3390/jmse7010009
- HAAS K., SVENDSEN I. (2002). *Laboratory measurements of the vertical structure of rip currents*. J. Geophys. Res. C5, 3047. <https://doi.org/10.1029/2001JC000911>
- KIRBY J.T., CHEN T.-M. (1989). *Surface waves on vertically sheared flows: Approximate dispersion relations*. Journal of Geophysical 94 pp 1013-1027. <https://doi.org/10.1029/JC094iC01p01013>
- LAFFITTE E., REY V., TOUBOUL J., BELIBASSAKIS K. A. (2021). *Water wave scattering by a sinusoidal bed in the presence of vertically sheared current*, Appl. Ocean Res., 108, 102549. doi:10.1016/j.apor.2021.102549
- MAGNE R., REY V., ARDHUIN F. (2005). *Measurement of wave scattering by topography in presence of current*, Phys. Fluids, 17, 126601. <https://doi.org/10.1063/1.2140283>
- REY V., CAPOBIANCO R., DULOU C. (2002). *Wave scattering by a submerged plate in presence of a steady uniform current*, Coastal Engineering, 47, 27-34. doi: 10.1016/s0378-3839(02)00096-0
- REY V., CHARLAND J., TOUBOUL J. (2014). *Wave-current interaction in the presence of a three-dimensional bathymetry: Deep water wave focusing in opposing current conditions*, Phys. Fluids, 26, 096601. <https://doi.org/10.1063/1.4894740>
- STEWART R.H., JOY J.W. (1974). *HF radio measurements of surface currents*. Deep-Sea Res. 21, 1039–1049. [https://doi.org/10.1016/0011-7471\(74\)90066-7](https://doi.org/10.1016/0011-7471(74)90066-7)
- SOULSBY R. L. (1990). *Tidal current boundary layers*. Vol. 9 of Ocean Eng. Sc., John Wiley, New York, USA.
- TOUBOUL J., CHARLAND J., REY V., BELIBASSAKIS K. (2016). *Extended Mild-Slope equation for surface waves interacting with a vertically sheared current*, Coastal Engineering 116, pp.77–88. doi:10.1016/J.COASTALENG.2016.06.003
- TOUBOUL, J. & BELIBASSAKIS, K., (2020) *A novel method for water waves propagating in the presence of vertical mean flows over variable bathymetry*, Journal of Ocean Engineering and Marine Energy 5 (4), 333-350. doi: 10.1007/s40722-019-00151-w
- YUROVSKAYA M., KUDRYAVTSEV V., CHAPRON B., COLLARD F. (2019). *Ocean surface current retrieval from space: The sentinel-2 multispectral capabilities*. Remote sensing of Environment, 234, 111468. doi: 10.1016/j.rse.2019.111468