

## Tenue à la mer d'un navire-énergie dans la mer des Caraïbes: cas d'un navire déployé au large de la Guadeloupe

### *Seakeeping behaviour of an energy ship in the Caribbean sea: case of a ship deployed in the Guadeloupe*

F. PILI<sup>(1,2)</sup>, A. BABARIT<sup>(1)</sup>, F. BONNEFOY<sup>(1)</sup>, G. PAYNE<sup>(2)</sup>  
*fabio.pili@farwind-energy.com*

<sup>(1)</sup>Nantes Université, Ecole Centrale de Nantes, LHEEA, UMR 6598, Nantes

<sup>(2)</sup>Farwind Energy, Nantes

### Résumé

Propulsé par le vent via des rotors Flettner et équipé d'hydrogénérateurs sous sa coque, le navire-énergie est une technologie innovante qui permet la conversion de l'énergie du vent en électricité tout en se déplaçant. La production d'énergie est maximale pour des conditions de navigation de vent de travers. Or, le vent de travers est souvent synonyme de houle de travers, ce qui peut poser problème vis-à-vis des enjeux de sécurité à bord et d'intégrité structurelle dans la mesure où le navire sera particulièrement excité en roulis. Il est donc crucial de prédire quels seront les mouvements et accélérations maximaux subis par le navire durant son cycle de vie, ce qui constitue l'objectif de ce travail.

Pour atteindre cet objectif, deux simulateurs de tenue à la mer adaptés à un design de navire-énergie ont été développés : le premier, en domaine fréquentiel, se base sur le code de tenue à la mer "NEMOH" développé par le LHEEA à l'ECN. Le deuxième, en domaine temporel, s'appuie sur le simulateur instationnaire SYD développé par la société VPLP Design.

Ces simulateurs ont été exploités pour évaluer la tenue à la mer d'un navire-énergie qui serait déployé dans une région située au large de la Guadeloupe.

Les résultats de simulation sont comparés entre eux et aux valeurs préconisées par la réglementation. Les résultats montrent un accord satisfaisant quant aux prédictions des mouvements et accélérations en roulis entre les différents modèles. Les résultats sont par ailleurs rassurants quant à la possibilité d'exploiter un navire-énergie en toute sécurité dans cette zone. De plus, les résultats indiquent qu'appliquer telle quelle la réglementation ne permet pas d'obtenir des valeurs d'accélération en roulis cohérentes, une correction est nécessaire au niveau des périodes propres en roulis du navire.

## Summary

Propelled by wind through Flettner rotors and equipped with hydrogenerators underneath its hull, the energy ship is an innovative technology that converts wind energy into electricity while sailing. Energy production is optimized under beam wind conditions. However, beam wind will often correspond to beam sea conditions, which can cause safety and structural integrity issues due to increased roll motions of the ship. Therefore, it is crucial to predict the maximum movements and accelerations experienced by the ship through its lifecycle, which is the aim of the present work.

To achieve this goal, two seakeeping simulators suited to an energy ship design have been developed : the first, in the frequency domain, is based on the seakeeping code 'NEMOH' developed by LHEEA at ECN. The second, in the time domain, relies on the unsteady simulator 'SYD' developed by VPLP Design.

These simulators were used to assess the sea-keeping performance of an energy ship intended for deployment in an area close to the French Guadeloupe. Simulation results are compared between them and against regulatory guidelines. The results show satisfactory agreement in predicting roll motions and accelerations for beam sea scenarios across different models. Moreover, the results are optimistic regarding the feasibility of safely operating an energy ship in this zone. Additionally, the results indicate that directly applying regulations does not yield consistent roll acceleration values ; corrections to the ship's natural roll periods are necessary.

## I – Introduction

La société Farwind Energy a été fondée en 2020 avec pour mission principale d’agir pour le climat en développant des systèmes innovants pour la conversion de l’énergie du vent en haute-mer. Ces systèmes sont basés sur la technologie du navire-énergie [15]. Un navire-énergie est un navire propulsé par le vent par l’intermédiaire de voiles (voile souple, kite, voile rigide, turbo-voile ou rotors Flettner) et est équipé d’hydrogénérateurs placés sous sa coque qui ont pour fonction de produire de l’énergie durant la navigation. L’énergie ainsi produite est stockée à bord, soit dans des batteries, soit par conversion en carburant (hydrogène par électrolyse, ammoniac, méthanol, etc.). Des exemples de navire-énergie sont décrits dans [8], [14], [12] et [6]. Un exemple de navire-énergie est montré en Figure 1. Il s’agit d’un catamaran propulsé par quatre rotors Flettner.

Les travaux de [6] ont montré que la production de puissance de l’exemple de navire-énergie montré en Figure 1 était maximale pour des conditions de navigation autour du vent de travers.

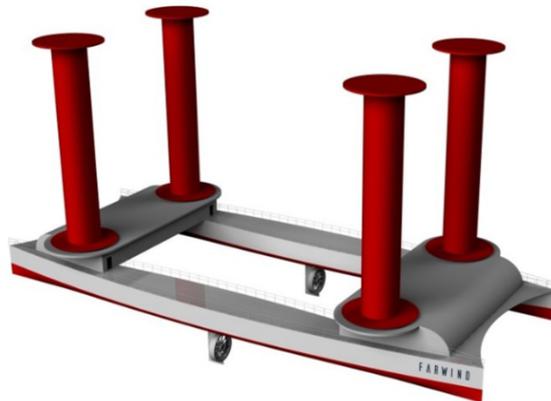


FIGURE 1 – Vue d’artiste d’un exemple de navire-énergie.

Généralement, la navigation par vent de travers correspond à des conditions de houle de travers (car la houle est générée par le vent). Naviguer dans ces conditions peut poser de sérieux enjeux de sécurité, car le navire serait soumis à des mouvements de roulis, qui, en plus d’être inconfortables pour l’équipage, peuvent poser des problèmes structurels. Il est donc important de prédire quelles seront les accélérations subies par le navire tout au long de son cycle de vie en conditions opérationnelles afin d’optimiser le dimensionnement structurel de la coque et de ses équipements (rotors par exemple). Farwind-Energy a identifié en particulier plusieurs scénarios de navigation pouvant être problématiques pour le navire-énergie.

Ces derniers sont présentés dans le Tableau 1. Il s’agit de conditions de navigation pour des hauteurs de houle significatives  $H_s$  supérieure à 2.0 m et des périodes de houle  $T_P$  comprises entre 7 s et 13 s.

TABLE 1 – Conditions de navigation potentiellement critiques pour le navire-énergie.

Cas	$\beta$ (°)	$W$ (m/s)	$H_s$ (m)	$T_P$ (s)
Prod 60	60	9.7	$\geq 2.0$	$7 \leq T_P \leq 13$
Prod 90	90	9.7	$\geq 2.0$	$7 \leq T_P \leq 13$
Prod 120	120	9.7	$\geq 2.0$	$7 \leq T_P \leq 13$
Prod 180	180	9.7	$\geq 2.0$	$7 \leq T_P \leq 13$

L’objectif de ce travail est ainsi de prédire quelles seront les accélérations et les mouvements subis par le navire pour les scénarios « Prod 60 », « Prod90 », « Prod 120 » et « Prod 180 » dans une zone de navigation située au large de la Guadeloupe (zone envisagée par Farwind pour le déploiement d’un navire-énergie). Pour étudier ces scénarios, il est possible de mettre en œuvre un calcul réglementaire en appliquant les normes de société de classification permettant d’évaluer les accélérations et les mouvements attendus pour de grands catamarans de type non-cargo ([3], [4], [5]). Cependant, ces dernières ont été construites sur un état de l’art et un retour d’expérience pour des catamarans à propulsion non vélique sans hydro-générateurs. Il est légitime de questionner la fiabilité de ces normes dans le cas d’un design innovant tel qu’un navire-énergie.

Une autre approche, potentiellement plus précise, consiste à utiliser des simulateurs de tenue à la mer adaptés à un design de navire-énergie. Au cours de ce travail, deux simulateurs de tenue à la mer adaptés à un design de navire-énergie ont ainsi été développés : le premier, en domaine fréquentiel, se base sur le code de tenue à la mer « NEMOH » [2] développé par le LHEEA à l’ECN. Le deuxième, en domaine temporel, s’appuie sur le simulateur instationnaire SYD développé par la société VPLP Design, dans lequel des contributions ont été apportées sur la modélisation des hydrogénérateurs et des rotors Flettner. Ces simulateurs ont été exploités pour étudier la tenue à la mer en houle irrégulière d’un navire-énergie qui serait déployé au large de la Guadeloupe. Les résultats de simulation ont été comparés entre eux et aux valeurs préconisées par la réglementation [4].

Cet article présente dans un premier temps le cas d’étude en introduisant le navire-énergie étudié ainsi que les conditions environnementales considérées. Par la suite, une description succincte des simulateurs de tenue à la mer est présentée ainsi que la méthodologie réglementaire utilisée. Enfin, l’article présente les résultats de

l'étude de tenue à la mer obtenue avec l'approche réglementaire et les simulateurs de tenue à la mer.

## II – Cas d'étude

### II – 1 Navire étudié

Le cas d'étude est un design de navire-énergie proposé par le cabinet d'architecture navale MAURIC pour le compte de la société Farwind Energy (voir Figure II – 1). Il s'agit d'un catamaran propulsé par 4 rotors Flettner, et équipé de deux hydrogénérateurs (un sous chaque flotteur). La longueur du navire est 83.5 m, son tirant d'eau est 10.2 m avec les hydrogénérateurs et sa largeur hors-tout est de 33.9 m (voir Figure II – 1 pour plus de détails).



Données techniques		Hydrogénérateurs	
Coque		Nombre	2 -
Longueur	83.5 m	Diamètre	6 m
Largeur	33.9 m	hélice	
Espace entre	24.8 m	$TSR$ nominal	2.67 -
flotteurs		Safrans	
Tirant d'eau	4.2 m	Nombre	2 -
Déplacement	2760.7 t	Envergure	2.5 m
$GM_T$	91.4 m	Corde	0.8 m
$X_G, Y_G, Z_G$	-2.39, -0.09, 8.67 m	Profils anti-dérive	
Rotors Flettner		Nombre	2 -
Nombre	4 -	Envergure	8 m
Hauteur	50 m	Corde	2.7 m
Diamètre	5.5 m		
Masse unitaire	117.5 t		

FIGURE 2 – Illustration et données techniques du design de navire-énergie proposé par le cabinet d'architecture navale MAURIC pour le compte de la société Farwind Energy.

### II – 2 Conditions environnementales

Les données de houle considérées dans cette étude ont été collectées par une bouée de mesure déployée au Large de la Guadeloupe (à La Désirade) aux coordonnées GPS ( $16^{\circ}24,950'N$ ,  $60^{\circ}53,160'W$ ). Ces données ont été recueillies sur une période d'environ 2 ans et sont disponibles sur le site internet du CEREMA [1].

Les états de mer (période de pic  $T_p$ , hauteur significative  $H_s$ ) considérés dans cette étude sont représentés en Figure 3 par des zones rectangulaires bordées en bleu. Ces zones sont centrées sur des points de simulation en houle irrégulière

définis par des croix rouges. La probabilité de chaque état de mer  $p_{sea}$  considérée est calculée en prenant le rapport entre le nombre de points situés dans le rectangle et le nombre total d'observations.

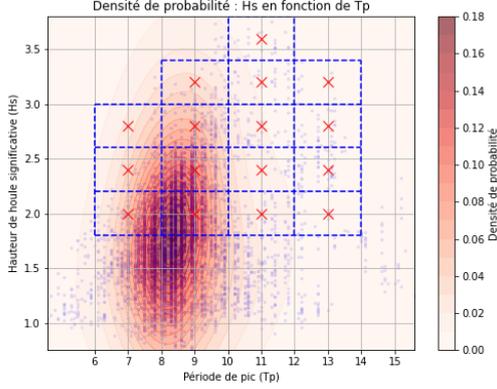


FIGURE 3 – Corrélogramme des états de mer mesurés à La Désirade et matrice des simulations.



FIGURE 4 – Carte de La Désirade.

La description de la houle irrégulière employée dans le cadre de ce travail se base sur la forme du spectre de Pierson-Moskowitz [10] prenant en entrée la hauteur de houle significative  $H_s$  et la fréquence de pic  $f_p$  associée dont la formulation est :

$$S(f) = \frac{A}{f^5} e^{-B/f^4}. \quad (1)$$

Avec  $S(f)$  la forme spectrale de l'état de mer considéré pour une fréquence  $f = \frac{\omega_0}{2\pi}$  où  $\omega_0$  est la pulsation de la houle,  $A = \frac{5H_s^2 f_p^2}{16}$  et  $B = \frac{5f_p^2}{4}$ .

### III – Méthodes de calcul

#### III – 1 Simulateur fréquentiel

En faisant l'hypothèse d'une faible cambrure et amplitude de houle et de petits mouvements du navire autour de sa position d'équilibre moyenne, l'équation générale du mouvement d'un navire-énergie peut s'écrire :

$$\begin{aligned} &[-(M + A)\omega_e^2 - i \left( B_r + B_H + B_{ITTC,H} + \sum_{k=1}^{N_{app}} B_{ITTC,app,k} + \sum_{k=1}^{N_{wt}} B_{wt,k} + \sum_{k=1}^N (B_{a,k} + B_{gy,k}) \right) \omega_e + K] \mathbf{X} \\ &= \mathcal{A}(\mathbf{F}_{FK}(\omega_0) + \mathbf{F}_D(\omega_e)). \end{aligned} \quad (2)$$

Avec :

- $\mathbf{M}$  la matrice de masse généralisée du navire
- $\mathbf{X}$  le vecteur des mouvements du navire.
- $\mathbf{K}$  la matrice de raideur hydrostatique de la coque.
- $\mathbf{A}$  la matrice de masse ajoutée de la coque,  $\mathbf{B}_r$  la matrice d'amortissement de radiation de la coque,  $\mathbf{F}_{\mathbf{FK}}$  le torseur des efforts de Froude-Krylov,  $\mathbf{F}_{\mathbf{D}}$  le torseur des efforts de diffraction. Ces termes sont calculés avec NEMOH.
- $\mathbf{B}_H$  la matrice d'amortissement de résistance à l'avancement de la coque, calculée par développement de Taylor de la résistance à l'avancement de la coque.  $\mathbf{B}_{\text{ITTC},H}$  la matrice correctrice d'amortissement préconisée par l'ITTC [7] pour la coque.
- $\mathbf{B}_{wt}$  la matrice d'amortissement des hydrogénérateurs, calculée par développement de Taylor des efforts produits par les hydrogénérateurs avec  $N_{wt}$  le nombre d'hydrogénérateurs.
- $\mathbf{B}_a$  l'amortissement aérodynamique des rotors Flettner, obtenu par développement de Taylor des efforts aérodynamiques produits par les rotors, avec  $N$  le nombre de rotors.  $\mathbf{B}_{gy}$  la matrice d'amortissement associée aux effets gyroscopiques des rotors [13]. Ce terme est obtenu en exprimant le moment dynamique d'un rotor isolé.
- $\mathbf{B}_{\text{ITTC},app}$  la matrice d'amortissement préconisée par l'ITTC [7] pour les appendices.
- $\omega_0$  est la fréquence de la houle et  $\omega_e$  est la fréquence d'oscillation du navire, autrement dit la fréquence de rencontre dont la relation est donnée par  $\omega_e = \omega_0 - \bar{u} \frac{\omega_0^2}{g} \cos \mu + \bar{v} \frac{\omega_0^2}{g} \sin \mu$  avec  $\mu$ ,  $\bar{u}$  et  $\bar{v}$  la direction de la houle, les vitesses moyennes d'avance et de dérive du navire respectivement.

### III – 2 Simulateur temporel

Le simulateur en domaine temporel se base sur le logiciel SYD. Ce dernier permet de résoudre l'équation de mouvement généralisée suivante pour un navire-énergie :

$$\left( \mathbf{M} + \mathbf{A}_\infty - \frac{1}{\omega_e} \int_0^\infty \mathbf{R}(t) \sin(\omega_e t) dt \right) \ddot{\mathbf{X}} = \mathcal{A}(\mathbf{F}_{\mathbf{FK}}(t) + \left( \int_{-\infty}^t \mathbf{R}(t - \tau) d\tau \right) \dot{\mathbf{X}} + \mathbf{F}_{\mathbf{D}}(t) + \mathbf{F}_{\mathbf{H}}(t) + \mathbf{F}_{app}(t) + \mathbf{F}_{\mathbf{B}} + \mathbf{F}_{\mathbf{g}} + \sum_{k=1}^{N_{wt}} \tau_{wt,k}(t) + \sum_{k=1}^N \tau_{r,k}(t). \quad (3)$$

Avec :

- $\mathbf{M}$  la matrice de masse généralisée du navire,  $\mathbf{K}$  la matrice de raideur hydrostatique de la coque,  $\mathbf{X}$  le vecteur des mouvements du navire.

- $A_\infty$  la matrice de masse ajoutée de la coque à pulsation infinie, définie comme  $A_\infty = \int_0^\infty A \cos(\omega_e t) d\omega_e$  où  $A$  est la matrice de masse ajoutée de la coque calculée avec des codes potentiels tels que NEMOH ou AQUAPLUS pour une pulsation  $\omega_e$ .
- $R$  la fonction de retard, définie selon [11] comme  $R = \frac{2}{\pi} \int_0^\infty B_r \cos(\omega_e t)$  où  $B_r$  est la matrice d'amortissement de radiation de la coque calculée avec des codes potentiels tels que NEMOH ou AQUAPLUS pour une pulsation  $\omega_e$ .
- $\mathbf{F}_{\mathbf{FK}}$  le torseur des efforts de Froude-Krylov, ce terme n'est pas linéarisé dans SYD, il prend en compte la surface mouillée instantanée.  $\mathbf{F}_{\mathbf{D}}$  est le torseur des efforts de diffraction, ce dernier est calculé avec des codes potentiels comme NEMOH ou AQUAPLUS.
- $\mathbf{F}_{\mathbf{B}}$  le torseur des efforts de poussée d'Archimède.
- $\mathbf{F}_{\mathbf{g}}$  le torseur des efforts de gravité.
- $\mathbf{F}_{\mathbf{H}}$  le torseur des efforts de résistance à l'avancement de la coque. Ce terme est calculé via des surfaces de réponses calibrées avec des résultats CFD issus de la méthode RANS qui dépendent des attitudes du navire (déplacement, enfoncement, angle de gîte, angle de dérive).
- $\mathbf{F}_{\mathbf{app}}$  le torseur des efforts des appendices. Ce terme est calculé via une approche VLM (Vortex Lattice Method).
- $\tau_{\mathbf{wt}}$  le torseur des efforts des hydrogénérateurs,  $\tau_{\mathbf{r}}$  le torseur des efforts des rotors Flettner. Ces termes sont calculés grâce à une table d'efforts dépendant de la vitesse du navire et du vent relatif (vitesse d'avance pour les hydrogénérateurs, angle de dérive et vent relatif pour les rotors).

### III – 3 Méthode de calcul réglementaire

La référence normative est la norme NR-600 [4] émise par le Bureau Veritas. Cette dernière établit une liste d'enveloppes d'accélération et de mouvements pour des navires multicoques (catamarans) de type non-cargo de longueur totale inférieure à 90 m, ce qui correspond au design du navire-énergie étudié dans ce projet. L'enveloppe d'accélération et de mouvements considérée ici correspond aux valeurs maximales attendues pour ces grandeurs, peu importe l'allure de navigation, pour le roulis, le tangage et le pilonnement. Ces enveloppes d'accélération sont nécessaires afin de procéder au dimensionnement structurel du navire et de ses équipements qui est basé sur les efforts correspondant à des événements d'une probabilité d'occurrence  $p = 10^{-5}$  pour une durée d'observation de 25 ans.

### III – 4 Calcul des enveloppes de mouvement et d'accélération via les simulateurs

Au cours de sa durée de vie (25 ans), le navire va rencontrer différents états de mer, chacun ayant une probabilité d'occurrence notée  $p_{sea}(T_p, H_s)$ . Pour obtenir

les valeurs d'accélération et de mouvement associées à une même probabilité d'occurrence  $p$  pour l'ensemble des états de mer qui sera rencontré par le navire durant son exploitation, on recherche, pour chaque état de mer, les valeurs correspondant à la probabilité  $p_{sample}(T_p, H_s)$  tel que  $p = p_{sea}(T_p, H_s) * p_{sample}(T_p, H_s)$ . On obtient ainsi l'ensemble des valeurs équiprobables pour les maxima de mouvements et d'accélération. Pour le dimensionnement, on retiendra les valeurs maximales de cet ensemble.

Pour le modèle fréquentiel, les mouvements  $x_{q,k}$  et les accélérations  $\ddot{x}_{q,k}$  pour un degré de liberté  $k$  correspondant à la probabilité  $p_{sample}$  se calculent comme [9] :

$$\begin{aligned} x_{q,k} &\simeq 1.252Q \sqrt{\int_0^\infty S(f) x_k^2 df} \\ \ddot{x}_{q,k} &\simeq 1.252Q \sqrt{\int_0^\infty S(f) |4\pi^2 f^2 x_k|^2 df} \end{aligned} \quad (4)$$

avec :

$$Q = \sqrt{\frac{4}{\pi} \ln(1/p_{sample})}, \quad (5)$$

où  $x_k$  est le mouvement du navire (solution de l'équation 2).

Pour le modèle temporel, pour chaque état de mer, on procède à 5 simulations de 1400 secondes chacune (chacune avec un tirage de phase de houle différent). Les amplitudes des mouvements et des accélérations sont extraites de ces simulations et post-traitées de manière à pouvoir tracer leur densité de probabilité (Figure 5) et identifier les paramètres de la loi de Weibull qui en donne la meilleure approximation. Cette dernière est utilisée pour déterminer l'amplitude du mouvement (ou de l'accélération) correspondant au quartile d'intérêt  $1 - p_{sample}$ .

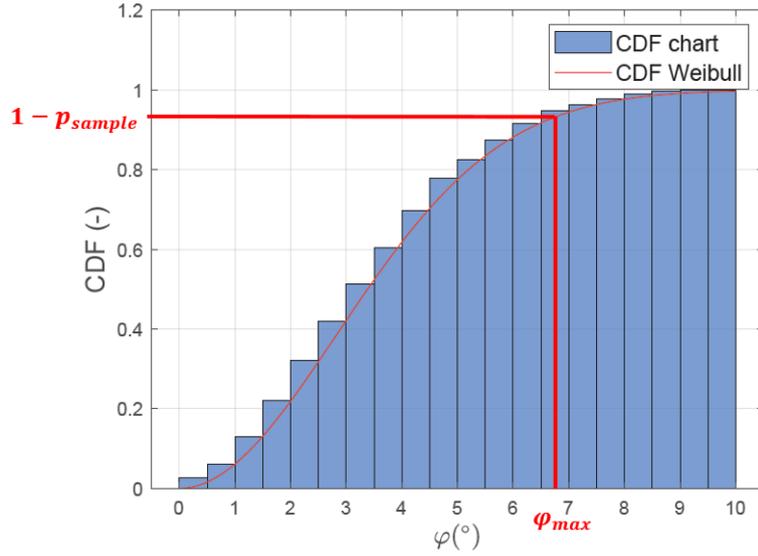


FIGURE 5 – Densité de probabilité des amplitudes de roulis obtenues avec SYD et extraction des valeurs associées au quartile  $q = 1 - p_{sample}$ .

## IV – Résultats

### IV – 1 Comparaison des simulateurs en houle régulière

La Figure 6 montre une comparaison de la réponse du navire en houle régulière de travers à  $\mu = 90^\circ$  calculée avec les simulateurs fréquentiel et temporel. L’amplitude de la houle est  $\mathcal{A} = 1$  m. L’accord est satisfaisant pour le cavalement, pilonnement, tangage et roulis. L’accord est cependant moins satisfaisant pour les mouvements d’embarquée et de lacet, particulièrement aux basses fréquences. Par ailleurs, on observe que les simulateurs s’accordent à prédire une période propre en roulis d’environ 7 secondes et 6 secondes pour le tangage, ce qui est bien inférieur à ce que préconisent les normes (environ 30 s de période propre en roulis).

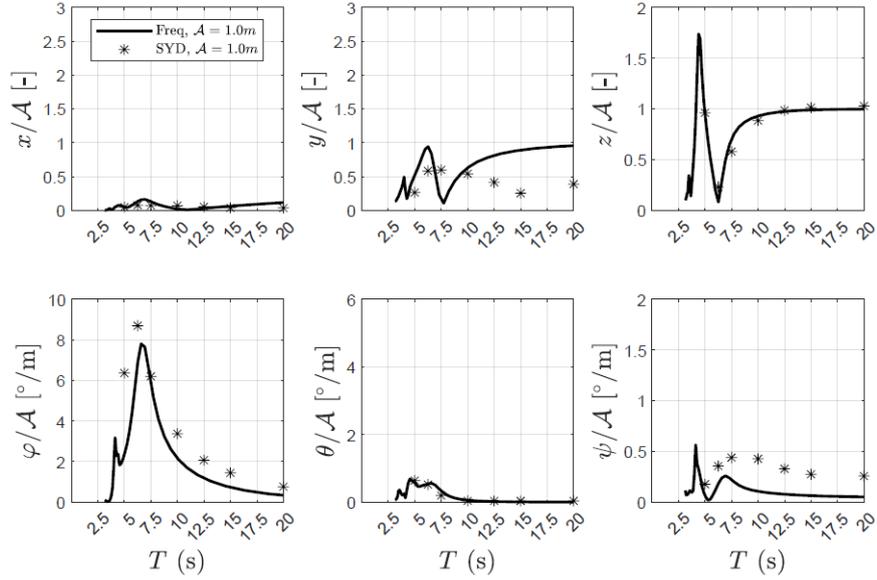


FIGURE 6 – Comparaisons simulateurs  $\mu=90^\circ$ ,  $H = 2.0$  m et  $W = 18$  kts.

#### IV – 2 Comparaison avec l’approche réglementaire

Cette section présente une comparaison entre les résultats issus du modèle fréquentiel et du modèle temporel et les valeurs préconisées par l’approche réglementaire. Le tableau 2 présente les résultats issus des simulations en houle irrégulière avec les simulateurs temporel et fréquentiel pour les amplitudes maximales de roulis  $\varphi_{max}$  et les accélérations maximales en roulis  $a_\varphi$  correspondants aux quartiles d’intérêt  $p_{sample}$  et à la probabilité associée de l’état de mer  $p_{sea}$ . Les résultats indiquent que la condition la plus défavorable du point de vue du roulis est atteinte pour une période de houle  $T_p = 9$  s et  $H_s = 3.2$  m.

TABLE 2 – Résultats des simulations en houle irrégulière pour différentes conditions de navigation.

$T_p$ (s)	$H_s$ (m)	$p_{sea}$	$p_{sample}$	$\varphi_{max}$ (°)		$a_\varphi$ (°/s <sup>2</sup> )	
				freq	temp	freq	temp
7	2.0	0.086	0.00001	11.6	13.5	10.7	10.2
7	2.4	0.010	0.00002	13.1	14.4	12.0	10.8
7	2.8	0.002	0.00013	13.9	14.7	12.8	11.2
9	2.0	0.206	0.00001	11.5	12.2	9.2	9.0
9	2.4	0.098	0.00001	13.8	14.6	11.0	10.4
9	2.8	0.025	0.00002	15.6	15.2	12.4	11.0
9	3.2	0.006	0.00008	16.9	16.4	13.3	11.6
11	2.0	0.009	0.00005	8.9	9.9	6.6	6.5
11	2.4	0.003	0.00014	10.1	10.9	7.4	7.2
11	2.8	0.007	0.00006	12.3	12.6	9.1	8.0
11	3.2	0.005	0.00008	13.9	13.3	10.2	8.6
11	3.6	0.004	0.00010	15.5	14.2	11.4	9.4
13	2.0	0.005	0.00009	7.0	7.6	4.8	4.7
13	2.4	0.009	0.00005	8.7	8.7	6.0	5.4
13	2.8	0.005	0.00008	9.9	9.7	6.8	6.0
13	3.2	0.002	0.00021	10.7	10.3	7.4	6.3

Pour cette même condition, la Figure 7 illustre la comparaison entre les simulateurs et l’approche réglementaire par houle de travers pour le pire cas envisagé selon les simulateurs ( $H_s = 3.2$  m et  $T_P = 9$  s). Pour cette condition, on observe que le simulateur fréquentiel prédit des réponses moins élevées par rapport au simulateur temporel pour les angles de roulis, les accélérations en pilonnement et en roulis.

En ce qui concerne le roulis, l’écart relatif maximum observé entre les simulateurs est d’environ 30 % pour les mouvements, contre environ 15 % pour les accélérations. Pour le tangage, l’écart relatif maximum observé est remarquablement faible pour les mouvements (moins d’1 % d’écart relatif), contre approximativement 2 % pour les accélérations. Pour l’accélération en pilonnement, l’écart est d’environ 17 %.

Du point de vue des normes, on constate que si on applique les formules réglementaires telles qu’elles sont présentées, les accélérations en roulis préconisées sont extrêmement faibles, et cela, en raison de la période de roulis indiquée qui est relativement longue (autour de 30 secondes). Si on fixe la période de roulis à 7 s, soit la période de résonance en roulis du design de navire-énergie objet de l’étude,

les accélérations en roulis prédites par la norme reviennent à un ordre de grandeur comparable à ce que prédisent les simulateurs. Pour les accélérations en tangage, si on applique les formules réglementaires telles qu'elles sont écrites, la valeur prédite est nettement plus élevée par rapport à ce que ce qui est obtenu par les simulateurs. Ce comportement est attendu, car dans ce cas, les valeurs préconisées par la norme en tangage doivent donner une valeur maximale toutes allures confondues. Or, l'allure pour laquelle le navire sera le plus excité en tangage est la navigation par mer de face. Malheureusement, les valeurs ne sont pas comparables puisqu'on considère ici un cas de mer de travers. Pour obtenir une comparaison cohérente pour tous les degrés de liberté, il faudrait balayer plusieurs directions de houle.

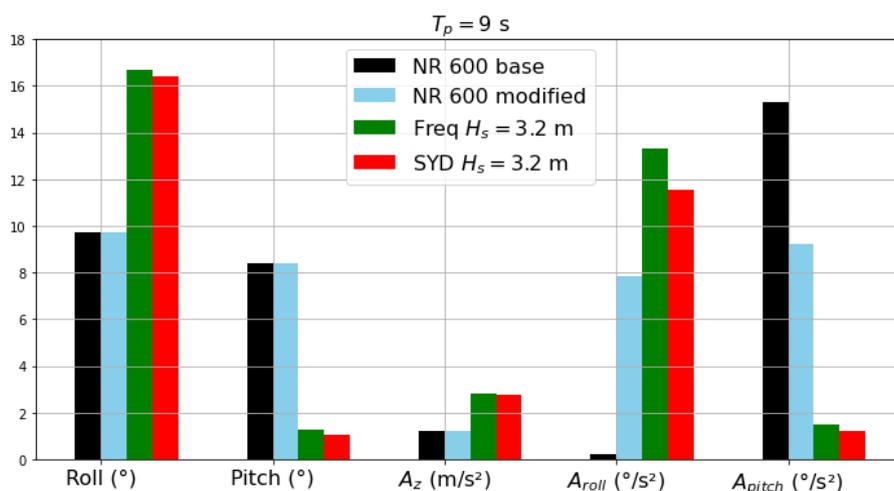


FIGURE 7 – Comparaison des simulateurs et de l’approche réglementaire (Bureau Veritas NR-600) pour de la houle de travers (spectre de Pierson Moskowitz unidirectionnel) de hauteur significative  $H_s = 3.2 \text{ m}$  et de période de pic  $T_P = 9 \text{ s}$ .

## V – Conclusions et perspectives

Ce travail a été consacré à l’exploitation des simulateurs de tenue à la mer dans le cas d’une étude de tenue à la mer d’un design de navire-énergie qui serait déployé au large de la Guadeloupe. Cette étude a permis de proposer une méthode numérique permettant d’évaluer les mouvements et accélérations du navire-énergie prédits par les simulateurs, pour une durée d’exploitation de 25 ans. Les résultats de cette approche ont été comparés avec l’approche réglementaire d’origine et une approche réglementaire modifiée pour différents états de mers qui ont été enregistrés par les bouées de houle in-situ.

La comparaison entre ces approches a permis de mettre en évidence que l'approche réglementaire d'origine n'est pas adaptée pour le design du navire-énergie considéré. En effet, les accélérations angulaires prédites sont environ 16 fois plus faible par rapport à ce que prédisent les modèles numériques car la période en roulis obtenue à l'aide de la NR-600 est 4 fois plus grande que la période propre estimée par les simulateurs (dépendance en  $1/T^2$ ).

De plus, les diverses simulations réalisées par houle de travers ont permis d'identifier le pire scénario du point de vue des mouvements et accélérations, qui correspond à une période de pic  $T_P = 9$  s et une hauteur de houle significative  $H_s = 3.2$  m où un bon accord a été observé quant aux prédictions des mouvements et des accélérations en roulis.

## Références

- [1] Candhis - campagne 97102 la désirade, 2002.
- [2] A. Babarit and G. Delhommeau. Theoretical and numerical aspects of the open source BEM solver NEMOH. In *Proc. of the 11th European Wave and Tidal Energy Conference (EWTEC2015)*, Nantes, France, 2015.
- [3] BV. NR-467 : Rules For The Classification Of Steel Ships. Technical report, 2020.
- [4] BV. NR-600 : Hull Structure And Arrangement For The Classification Of Cargo Ships Less Than 65 m And Non Cargo Ships Less Than 90 m. Technical report, 2022.
- [5] DNV GL. DNVGL-RP-C205 : Environmental conditions and environmental loads. Technical report, DNV GL, 2018.
- [6] J.-C. Gilloteaux and A. Babarit. Preliminary design of a wind driven vessel dedicated to hydrogen production. In *Proc. of the International Conference on Ocean, Offshore Mechanics and Arctic Engineering*. ASME, 2017.
- [7] ITTC. Numerical estimation of roll damping. In *ITTC-Recommended procedures*, pages 7.5–02–07–04.5. 6th ITTC Specialist Committee on Stability in Waves, 2011.
- [8] J. Kim and C. Park. Wind power generation with a parawing on ships, a proposal. *Energy*, 35(3) :1425–1432, 2010.
- [9] S. Massel. *Ocean Surface Waves : Their Physics and Prediction*. Advanced series on ocean engineering. World Scientific, 1996.
- [10] L. Moskowitz. Estimates of the power spectrums for fully developed seas for wind speeds of 20 to 40 knots. *Journal of Geophysical Research (1896-1977)*, 69(24) :5161–5179, 1964.

- [11] T. F. Ogilvie. Recent progress toward the understanding and prediction of ship motions. *Proceedings of the 5th Symposium on Naval Hydrodynamics, Bergen, Norway, pp. 3-80*, 1964.
- [12] K. Ouchi and J. Henzie. Hydrogen generation sailing ship : conceptual design and feasibility study. In *In Proc. of the OCEANS conference*. Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2017.
- [13] F. Pili, A. Babarit, F. Bonnefoy, and G. S. Payne. Seakeeping Behaviour of a Flettner Rotors-Propelled Catamaran in Beam Waves. *Journal of Sailing Technology*, 8(01) :96–117, 10 2023.
- [14] M. Platzer, N. Sarigul-Klijn, J. Young, M. Ashraf, and J. Lai. Renewable energy production using sailing ships. *ASME Journal of Energy Resources Technology*, 136, 2014.
- [15] R. Salomon. Process of converting wind energy to elemental hydrogen and apparatus therefore, 1982. U.S. Patent 4335093A.