

# ETUDE DE LA TENUE EN MER DE *Posidonie*

Théo Prats Rioufol, Mai 2025.

**Résumé**—Ce document présente l'analyse menée sur les conditions météo que *Posidonie* devrait affronter. A défaut de pouvoir adapter la géométrie de la coque à toute les condition de mer, ce document vise à déterminer le cade de navigation de *Posidonie*, et de localiser les effort causé par les vagues. Ainsi, l'opérateur connaîtra quelle seront les conditions de mer limites, et le concepteur aura les paramètres critiques en tête.

**Index Terms**—Sea keeping, wave theory, wave diffraction analysis, hydrodynamic response

## I. INTRODUCTION

Pour cette étude, on cherche à répondre à trois objectifs :

- Trouver le domaine de navigation, c'est-à-dire les conditions de mer pour lesquels le bateau peut "survivre" (ne pas subir de dommage par la houle), et celle où il peut naviguer
- Quantifier les efforts due aux vagues
- Obtenir une loi quantitative pour améliorer les performance du bateau.

La réponse du bateau sera déterminée grâce au module AQWA d'Ansys. Les données d'entré du modèle sont : la période des vagues  $T$ , la hauteur des vagues  $h$ , la direction par rapport au bateau  $\alpha$ , la vitesse du bateau  $u$  (modélisé par un courant). On néglige l'action du vent sur le bateau (on se concentre uniquement sur la réponse au vagues).

## II. TAILLE ET PÉRIODE DES VAGUES

### A. Cadre d'étude

Pour trouver la taille et la période des vagues à considérés, on s'appuie sur des enregistrements de la houle en méditerranée et en atlantique grâce à l'initiative européenne *Copernicus*. Ainsi, on définit 5 zones d'intérêt (voir Fig. ?? :

- 1) Le canal région PACA vers la Corse. La zone 1 moyenne les vagues rencontrés lors d'une traversée de 300km jusqu'en Corse
- 2) A mi-chemin France-Algérie, dans le but de capter le comportement des vagues de haute mer
- 3) Le large de Perpignan, dans le cas où le bateau serait envoyé dans cette direction
- 4) Les côtes bretonnes, souvent utilisé comme départ vers la MicroTransat. Par ailleurs les vagues venues d'atlantique vienne se briser sur ces côtes, avec une grande puissance.
- 5) Au « large » en Atlantique, au-dessus des îles Açores comme exemple des vagues d'océan

On moyenne spatialement 4 grandeurs sur chacune de ces zones :

- *Sea surface wind wave mean period* (VTM01\_WW) correspondant à la période moyenne des vagues générées par le vent local.
- *Sea surface wind wave significant height* (VHM0\_WW) soit la hauteur significative (la moyenne des 1/3 vagues les plus grandes, mesuré du creux jusqu'à la crête) de ces mêmes vagues.
- *Sea surface primary swell wave significant height* (VHM0\_SW1) idem pour la houle (générée par un vent/orage lointain). Elle est très régulière est la période est longue. On notera que **sa direction peut être opposée aux vagues générés par le vent local** qui peut faire déferler ces vagues. « Primary » correspond au fait que l'on considère que les vagues dans la direction principale de la houle.
- *Sea surface primary swell wave mean period* (VTM01\_SW1) idem avec la période moyenne.

### B. Distribution générale de la taille des vagues

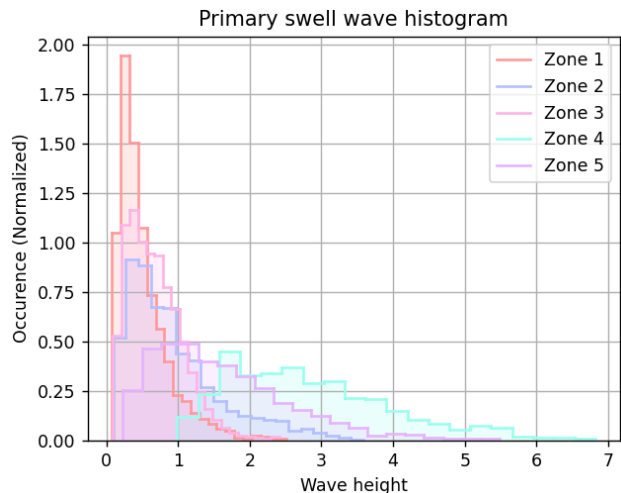


FIGURE 2. Histogramme normalisé (l'intégrale des courbes est unitaire) de la taille de la houle dans la direction **principales** pour différentes zones géographiques.

La figure II-B présente un histogramme de la taille de la houle sur chacune des zones. En méditerranée (zone 1,2 et 3) la houle est inférieure 51cm à m dans 50% des cas, 1.39m dans 90% des cas, 1.83m pour 95% et inférieure à 2.62m pour 99% des cas (sur une durée d'environ 200 jours). En atlantique, c'est 1.7m pour 50%, 3.36m pour 90%, 4.03m sous les 95% et 99% de la houle est inférieure à 5.34m. On remarquera que les côtes bretonnes sont particulièrement houleuses en moyenne (médiane autour de 2.66m contre 40cm pour la région PACA). **Pour posidonie en méditerranée, on retiendra  $h = 2.62m$ .**

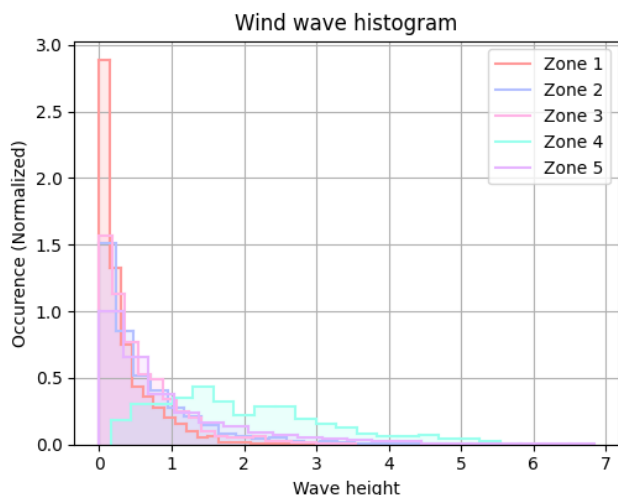


FIGURE 3. Histogramme normalisé (l'intégrale des courbes est unitaire) des tailles de vague **causé par le vent** pour différentes zones géographiques.

La figure II-B présente un histogramme de la taille de la mer formée par le vent sur chacune des zones. On remarque que la distribution est d'avantage tassée vers les petites vagues (même si elle sont plus violente, voir la suite). En médiane, en méditerranée, les vagues ont une hauteur de 33cm (20cm pour PACA) versus 83cm pour l'atlantique (1.74m pour la bretagne). En termes d'aspect général, l'histogramme est similaire à celui de la houle. Les hauteurs à 95% et 99% sont de 1.6m, 2.7m en méditerranée et 3.4m, 4.8m en atlantique.

### C. Relation taille/période de la houle et du clapot pour chacune des zones

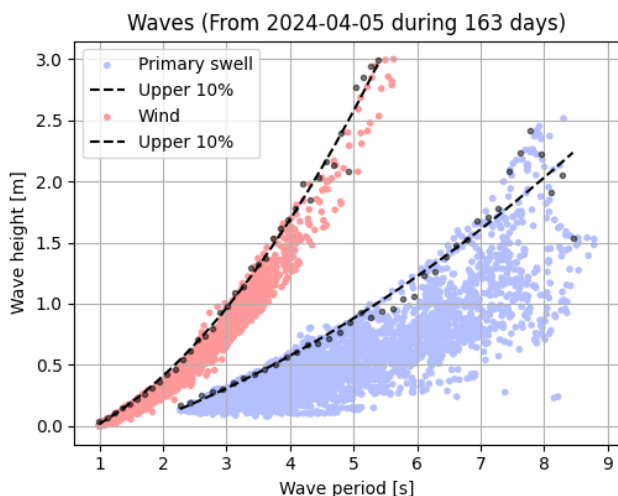


FIGURE 4. Répartition des couples taille/période des vagues (par le vent et principales), pour la **zone 1**, durant 163 jours.

La figure II-C présente les couples taille, durée des vagues due à la houle (en bleu) et au vent (orange) dans la zone1. On remarque que la déviation sur les vagues formée par le vent est bien plus faible que celle de la houle du fait que

la houle peut présenter plusieurs états de « dégénérescence » suivant la distance entre la source de la houle et la mesure (les vagues s'étalent ? la période augmente avec la distance). Si une vague est d'autant plus dévastatrice que sont rapport hauteur/période est grand (forte variation d'amplitude en un temps court, c-a-d forte accélération/risque de déferler, partie gauche du graphique), **c'est la mer formée par le vent qui est dangereuse**. Comme pour ces vague la période est bien définie selon la hauteur de la vague, c'est **l'histogramme de la mer formé par le vent qui est dimensionnant**. Sur la figure II-C, le trait noir en pointillé est une modélisation polynomiale de degré 3 des 10% des vagues les plus courte pour une hauteur donnée (=les plus puissantes).

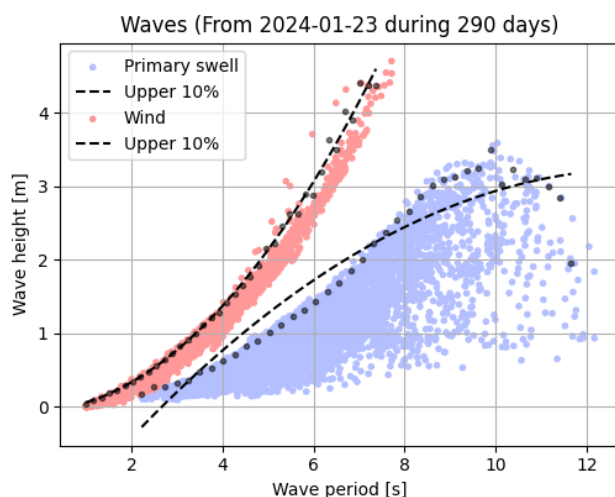


FIGURE 5. Répartition des couples taille/période des vagues (par le vent et principales), pour la **zone 2**, durant 290 jours.

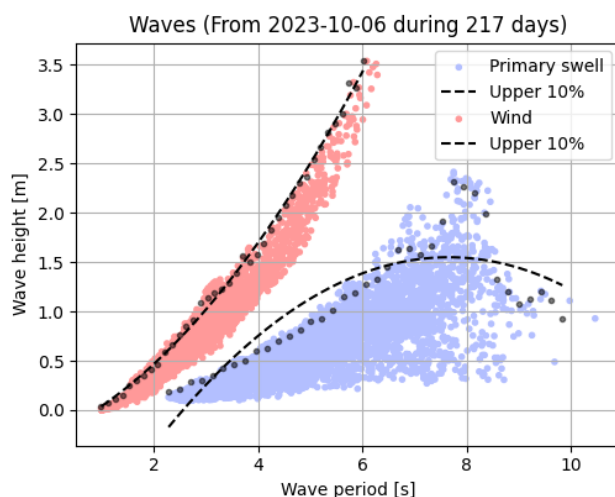


FIGURE 6. Répartition des couples taille/période des vagues (par le vent et principales), pour la **zone 3**, durant 290 jours.

Les figures II-C à II-C trace la même grandeur pour les différentes zones. On remarque qu'en méditerranée les distributions sont plutôt homogènes, tandis que pour l'atlantique

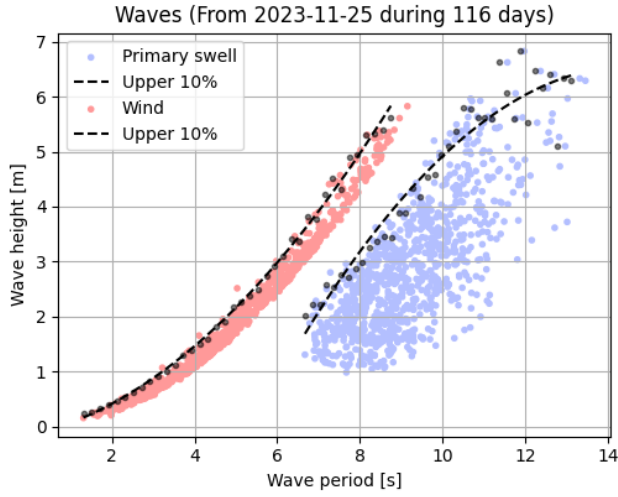


FIGURE 7. Répartition des couples taille/période des vagues (par le vent et principales), pour la **zone 4**, durant 290 jours.

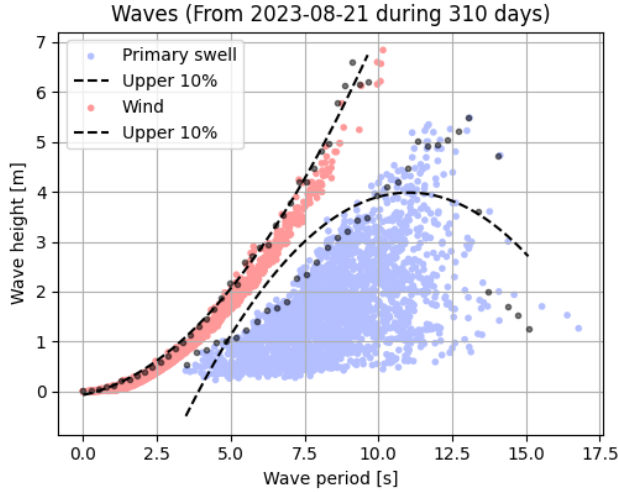


FIGURE 8. Répartition des couples taille/période des vagues (par le vent et principales), pour la **zone 5**, durant 290 jours.

(Fig II-C et II-C) la distribution se déplace vers la droite, c-a-d des vagues plus grandes en moyenne mais tout aussi dispersées

#### D. Autre relations

La figure II-D représente les couples taille-hauteur de la mer formée par le vent, toute zones confondues. On remarque toutes suivent une distribution similaire (c'est un phénomène local, il ne dépend pas de la différence d'étendue océan/mer) que l'on modélise par un polynôme d'ordre 2 :

$$h = 0.08105T^2 + 0.033T - 0.052 \quad (1)$$

En utilisant le modèle de vague d'**Airy** pour des houles de faible cambrure pour des profondeurs grandes par rapport à l'amplitude des vagues, la relation de dispersion suivante est satisfaite :

$$\frac{2\pi^2}{T} = gk \tanh(kh_w) \quad (2)$$

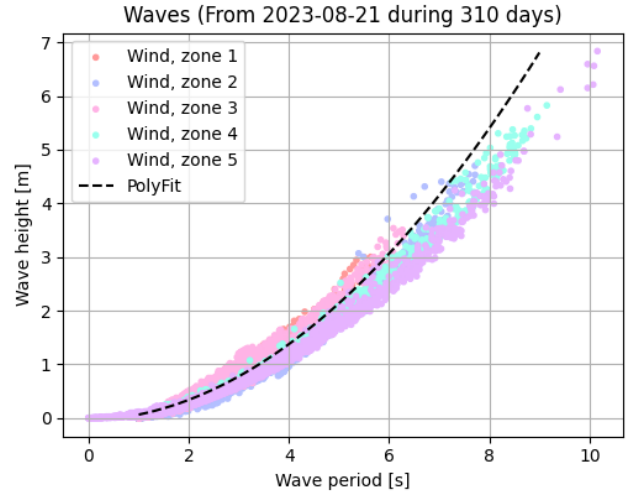


FIGURE 9. Répartition des couples taille/période des vagues formées par le vent, pour toutes les zones. En noir est tracé la modélisation polynomiale d'ordre 3 de la relation taille de la vague - période

TABLE I  
MODÈLE DES VAGUES GÉNÉRÉES PAR LE VENT POUR DIFFÉRENTES PÉRIODES.

| $T$ [s] | $h$ [m] | $L$ [m] | $\ a\ $ [ $m/s^2$ ] | $P_{med}(\geq)$ | $P_{atl}(\geq)$ |
|---------|---------|---------|---------------------|-----------------|-----------------|
| 0.50    | -0.02   | 0.39    | 0.19                | 100.00%         | 100.00%         |
| 1.00    | 0.06    | 1.56    | 0.39                | 85.31%          | 92.59%          |
| 1.50    | 0.18    | 3.51    | 0.75                | 66.22%          | 84.76%          |
| 2.00    | 0.34    | 6.25    | 1.06                | 49.59%          | 74.66%          |
| 2.50    | 0.54    | 9.76    | 1.35                | 34.96%          | 63.05%          |
| 3.00    | 0.78    | 14.05   | 1.63                | 24.24%          | 52.21%          |
| 5.00    | 2.14    | 39.03   | 2.69                | 2.73%           | 18.87%          |
| 7.00    | 4.15    | 76.50   | 3.73                | 0.09%           | 2.87%           |
| 8.00    | 5.40    | 99.92   | 4.24                | 0.00%           | 0.26%           |
| 9.00    | 6.81    | 126.47  | 4.75                | 0.00%           | 0.03%           |

où  $h_w$  est la profondeur de l'eau ;  $k = 2\pi/L$  le nombre d'onde ;  $g$  l'intensité de pesanteur ;  $L$  la longueur d'onde (donc celle de la vague) et  $T$  la période de la vague. On se considère suffisamment loin des côtes tel que  $kh_w \rightarrow +\infty$  d'où :

$$L = \frac{g}{2\pi} T^2 \quad (3)$$

On notera que le modèle d'**Airy** peut mener à des imprécision en eau profonde de l'ordre de 30%. En assimilant la vague à une sinusoïde (hypothèse sous dimensionnante), on peut calculer l'accélération d'une bouée fixe qui suivrait le mouvement de la vague :  $\|a\| = 2\pi h/T$ . La table II-D présente le calculs des grandeur caractéristique d'une vague pour plusieurs période.  $P_{med}(\geq)$  (resp.  $P_{atl}(\geq)$ ) désigne la probabilité qu'une vague causée par le vent en méditerranée (resp. en atlantique) tirée au hasard soit d'amplitude plus grande que  $h$ .

### III. TENUE EN MER DE POSIDONIE

#### A. Paramétrage de l'étude

L'analyse de la tenue en mer de *Posidonie* s'effectue sur Ansys avec le module *Diffraction hydrodynamique* et *Réponse hydrodynamique* d'AQWA. La figure III détaille le paramétrage

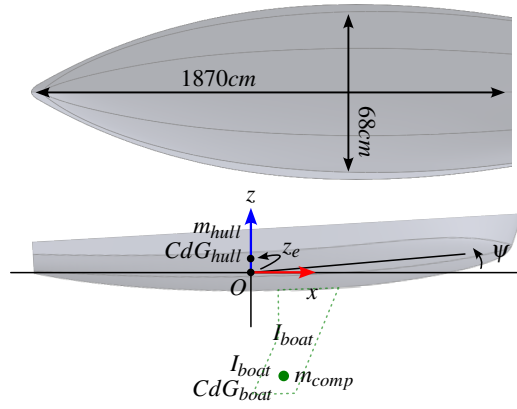


FIGURE 10. Paramétrisation géométrique du bateau sous Ansys AQWA.

TABLE II  
DIMENSIONNEMENT GÉOMÉTRIQUE DE POSIDONIE

| Composant  | Dimmensionnement   |
|------------|--|
| Voile      | 0.3m × 1.17m, $d_s = 0.2m$ , 45%   |
| Dérive     | Trapèze, 0.15m × 1m × 0.01m, 30°, 30%  |
| Lest       | 40kg   |
| CdG        | $z_{CdG,boat \setminus hull} = -0.98$  |
| $I_{boat}$ | $\begin{bmatrix} 63.51 & 0 & -6.72 \\ 0 & 64.56 & 0 \\ -6.72 & 0 & 11.05 \end{bmatrix} \text{ kg/m}^2$ |
| $z_e$      | 30 mm  |

géométrique. L'origine du repère est situé à une distance  $z_e$  du centre de gravité de la coque, avec l'axe  $x$  vers le sens de la marche et l'axe  $z$  opposé au champ de gravité.  $z_e$  est le niveau du plan d'eau quand le bateau est en équilibre de flotaion. On considère également un angle de tangage  $\psi$ . On considère des vagues se propageant en  $-x$ , et pas de courant marin. En effet, on ne cherche à quantifier que la contribution des vague et non la tainée du bateau. On contrain le bateau à ne pas se déplacer selon  $x$  et à garder un cap constant. Les masses et inertie utilisées sont détaillées dans la table III-A. Dans AQWA, deux masse ponctuelles en  $CdG_{boat}$  et  $CdG_{hull}$  ont été placées (avec  $I_{hull} \approx 0$  puisque intégrée dans  $I_{boat}$ ).

### B. Mouvement angulaire face aux vagues

Tout d'abord on s'intéresse à la réponse cinématique du bateau face au vagues. La figure III-B décrit comment le roulis et le tangage sont affecté suivant la période d'une vague. On consière une vague à 60° degrés d'incidence (0° correspondant à une vague arrivant sur la proue du bateau). Le courbe en trait plein représente de combien le bateau va s'incliner par unité de taille de vague incidente. Les courbes en pointillées représentent la réponse pour une vague typique méditerranéenne ayant une taille  $h = f(T)$  (d'après l'eq. (1)). Ainsi pour les petites périodes (vagues courte) la réponse "réelle" est moins critique que celle théorique (trait plein) car les vagues de ces périodes sont d'amplitude faible. A contrario, l'amplitude des vagues augmente à la période d'où les perturbation angulaire plus importantes pour  $T \geq 2s$  jusqu'à stationner à 7m avec la pente d'une décade. Les zones semi

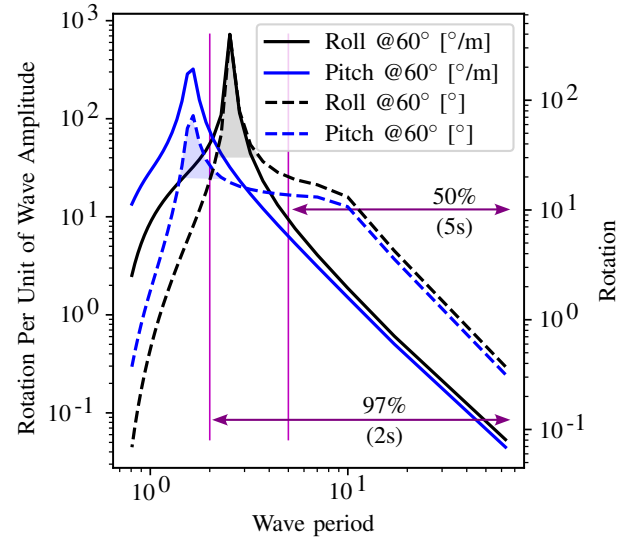


FIGURE 11. Réponse en roulis et tangage du bateau face à une vague en fonction de la fréquence. Les zones semi transparentes bleu et noir décrivent l'instabilité en tangage et roulis respectivement

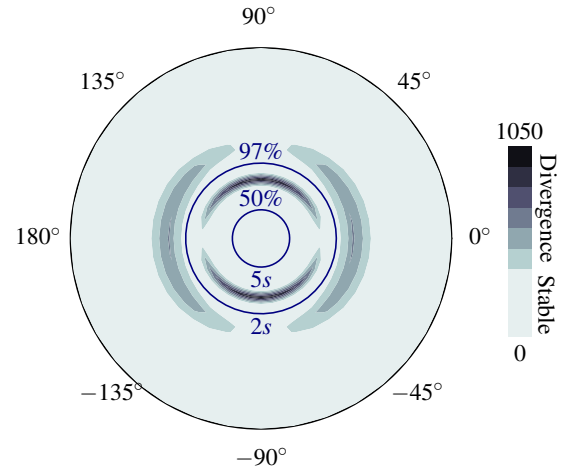


FIGURE 12. Réponse angulaire du bateau face au sollicitation des vagues. Les angles de la polaire correspondent à l'angle d'incidence des vagues, le rayon à leur fréquence et la couleur à l'amplitude de la réponse. La taille des vagues est déduite de la période d'après le modèle de la partie précédente.

transparente correspondent au zone d'instabilité du bateau (celle du roulis est atteinte pour des angles important car un bateau gîte plus que ce qu'il tangue). Les deux traits magenta décrivent les zone statistiquement atteinte par les vagues en méditerranée : dans 50% des cas, les vagues ont une période supérieure à 5s (trait de droite) et dans 97% des cas,  $\geq 2s$  (à gauche). Ainsi l'instabilité en tangage n'est pas un problème (car à droite de la ligne des 97%) c'est le roulis qui est limitant.

La figure III-B est essentiellement une représentation angulaire de la figure III-B. Les angles du graphe représentent l'angle d'incidence de la vague (0° : vagues de face, 90° tribord...), la distance au centre est la fréquence de la vague incidente (l'extérieur du graphe représente les vagues de courte période) et la couleur est l'amplitude du mouvement du bateau

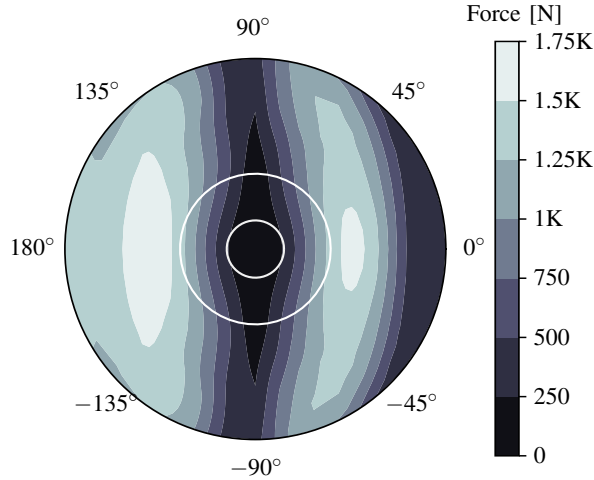


FIGURE 13. Effort dans le sens **longitudinal** en fonction de l'angle d'incidence des vagues et de leur période. La taille des vagues est calculé avec le modèle de vague méditerranéen.

(cumulant roulis et tangage). On constate que le graphe est symétrique en  $y$  (car la coque est symétrique) et présente quatre lobes : ceux du roulis (lobes au centre, excités par les vagues latérales) et ceux du tangage (à l'extérieur, sollicités pour une fréquence plus grande, en cohérence avec la fig. III-B). La hauteur des vagues est également calculée à l'aide de l'éq. (1) saturée à 7m. Les deux cercles au centre délimitent les périodes contenant 50% et 97% des vagues méditerranéennes. (il faut regarder le disque décrit par ces cercles, d'une fréquence de 0Hz (vague très étalée) à 0.5, 0.2Hz). Ce qui se trouve en dehors du plus grand cercle (lobe de tangage) n'est sollicité que dans moins de 3% des vagues. Toutefois, la dérive (non modélisée) joue un rôle majeur dans l'amortissement du roulis.

### C. Forces exercées par les vagues

Dans un second temps, on quantifie l'effort transmis par la vague sur le bateau. La figure III-C présente une polaire des isosurface de force transmise sur l'axe longitudinal du bateau, en fonction de la fréquence et l'angle d'incidence de la vague. La taille des vagues est donnée par le modèle méditerranéen saturé à  $h_{max} = 7m$ . On remarque la présence de deux lobes pour les vagues venant sur la proue et la poupe. Le lobe de la poupe ( $180^\circ$ ) est plus large que celui de la proue. En effet, sur la coque considérée, l'arrière est bien plus large que l'avant (voir fig. III) ce qui le rend plus sensible aux vagues. On note que pour des vagues orthogonales au bateau, presque aucun effort n'est transmis dans la direction longitudinale ( $90^\circ$  et  $-90^\circ$ ). Les deux cercles représentent les mêmes vagues typiques des 50% et 97%, le bateau n'ayant pas de problème dans 50% des cas. La figure III-C suit la même logique avec les efforts latéraux. Cette fois-ci le graphique est symétrique en  $x$  et  $y$ , on s'attend aux mêmes efforts au portant (généralement à  $135^\circ$

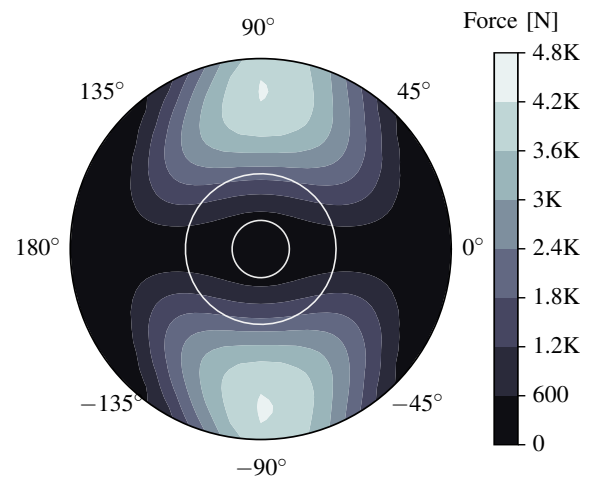


FIGURE 14. Effort dans le sens **latéral** en fonction de l'angle d'incidence des vagues et de leur période. La taille des vagues est calculée avec le modèle de vague méditerranéen.

des vagues) et au près ( $45^\circ$ ). Les efforts sont maximaux pour une incidence orthogonale (la section vue par les vagues de côté est plus grande que celle de face, et sollicite directement le roulis). On constate également que les efforts latéraux sont plus importants que ceux longitudinaux : le bateau dérive fortement avec les vagues.

### D. Répartition des efforts

La figure III-D présente la répartition des efforts due aux vagues, pour une amplitude arbitraire de 0.2m à incidence longitudinale ( $i = 0^\circ$ ) et latérale ( $i = 90^\circ$ ). Trois fréquences sont présentées : la fréquence critique en roulis  $f_{roll} = 0.353$  Hz, celle en tangage  $f_{pitch} = 0.648$  Hz et une troisième arbitraire, pour des vagues courtes à  $f \approx 1$  Hz. On constate que le maximum de la pression est atteint pour les fréquences critiques. De ces graphiques, on déduit que la proue, la poupe et les parties latérales arrière du bateau doivent être renforcées vis-à-vis du centre de la coque, non sollicitées dans ces 6 configurations.

### E. Effet du volume de la carène

Pour qualifier si un coque à grand déplacement (comportant plus de trainé à petite vitesse) est plus performant qu'une à petit déplacement, on simule la réponse au vague pour une coque mise à l'échelle à 83%. Le plan du niveau de l'eau est ajusté pour garder un même volume en eau (compensant 10kg de coque et 38.7kg de composants). Ainsi, on obtient une nouvelle carène avec la même capacité d'emport que la précédente, mais un volume hors de l'eau plus faible. (Ainsi qu'un couple de redressement plus modeste).

La figure III-E représente la sensibilité angulaire en fonction de l'angle d'incidence des vagues et de leurs fré-



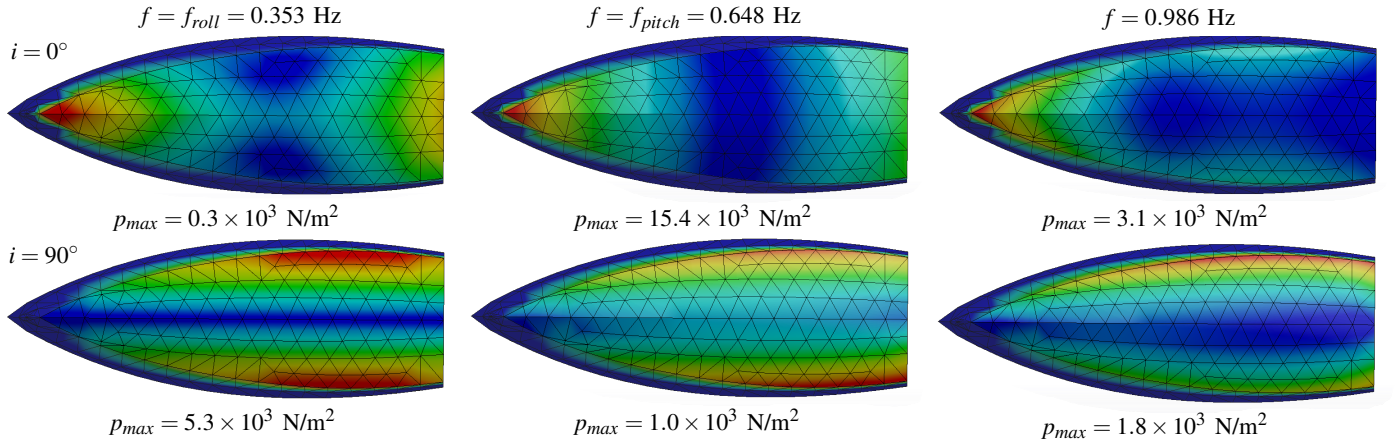


FIGURE 15. Répartition des efforts sur la coque en fonction de la fréquence, pour des vagues longitudinales ( $i = 0^\circ$ ) et transversales ( $i = 90^\circ$ ). Les pressions sont à titre indicatif, et ont été obtenue avec une amplitude de 0.2m

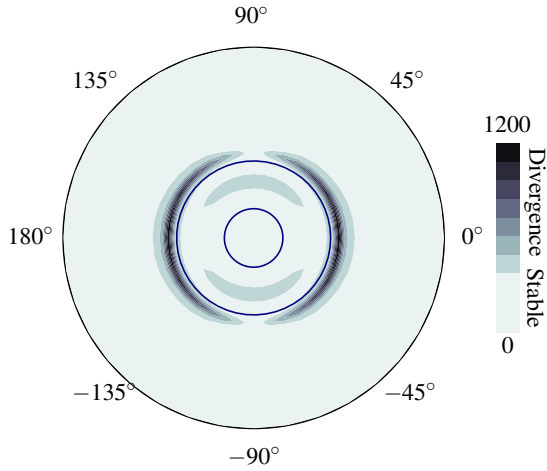


FIGURE 16. Réponse angulaire de la coque à fort déplacement face au sollicitation des vagues. On constate que la zone d'instabilité du roulis à diminué angulairement et s'est étalée fréquenciellement.

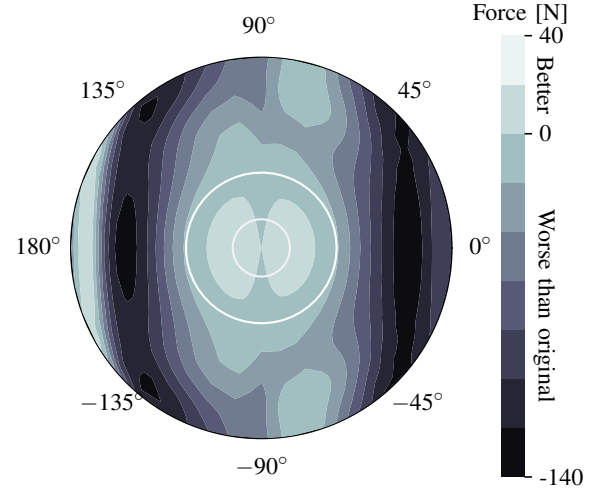


FIGURE 17. Différence d'effort **longitudinal** entre la carène à fort déplacement et celle à petit déplacement en fonction de l'angle d'incidence des vagues et de leur période. Une valeur positive signifie que la carène à fort déplacement subie moins d'effort.

quences (analogue de la figure III-B). On constate que le bateau comporte toujours une instabilité en roulis mais celle ci atteint des valeurs maximale plus faible que pour la coque à faible déplacement. La zone d'instabilité s'est légèrement élargie en fréquence mais à diminuée en angle d'incidence des vagues ( $120^\circ$  vs  $170^\circ$ ). Rappelons que le bateau navigue la plupart du temps entre  $45^\circ$  et  $135^\circ$  des vagues.

Les figures III-E et III-E représentent respectivement les différences de performance entre la carène à faible ( $CFaible$ ) et fort ( $CFort$ ) déplacement pour l'axe longitudinal et latéral respectivement. Ces figures tracent les efforts  $CFaible - CFort$ . Ainsi une valeur positive signifie que la carène à faible déplacement performe mieux que  $CFort$ . On constate que pour l'axe longitudinal,  $CFaible$  réduit les efforts pour toutes les vagues avec une probabilité d'occurrence supérieure à 3%. L'opposé se produit pour l'axe latéral (voir fig. III-E) avec une augmentation modérée des efforts sur tout le domaine. (la

seule réduction se produit pour les vagues arrivant de l'arrière à hautes fréquence).

#### F. Effet de l'angle des parois de carène et de l'inertie

On considère à présent une coque en forme de trapèze extrudé (voir fig. III-F). On cherche à quantifier la réponse de la carène aux vagues latérales  $w_i$  (incidence normale sur le bateau) selon différents angle d'inclinaison  $\theta$  des parois latérales du bateau. Les parois sont inclinés en gardant la largeur  $l$  du bateau à mi tirant d'eau constante, de telle manière à garder le volume déplacé  $V_0$  constant.  $V_0 = 126L$  à  $h = 0.2m$ ,  $l = 0.68m$ ,  $L = 1.87m$ . Le centre de gravité est placé à une altitude  $h = -0.8m$  en dessous du centre géométrique de ( $h$ ) avec une masse équilibrant verticalement le bateau est une inertie  $I_{xx} = I_{yy} = 50Nm^2$ ,  $I_{zz} = 10Nm^2$  (produit d'inertie nuls).

La figure III-F traces les efforts  $F$  par unité d'amplitude de la vague  $w_i$  selon l'axe  $y$  en fonction de la fréquence  $f$  de

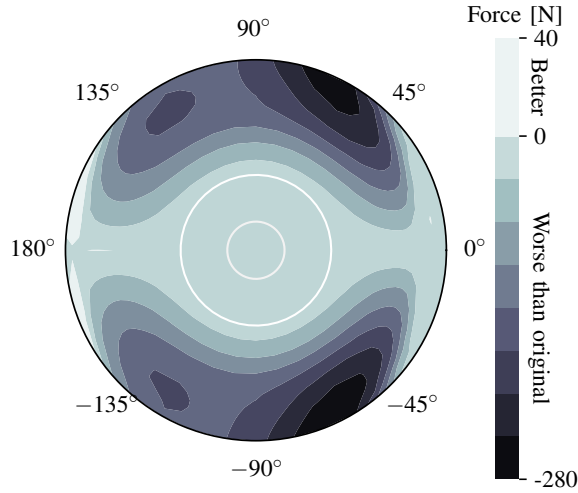


FIGURE 18. Différence d'effort **latéral** entre la carène à fort déplacement et celle à petit déplacement en fonction de l'angle d'incidence des vagues et de leur période. Une valeur positive signifie que la carène à fort déplacement subie moins d'effort.

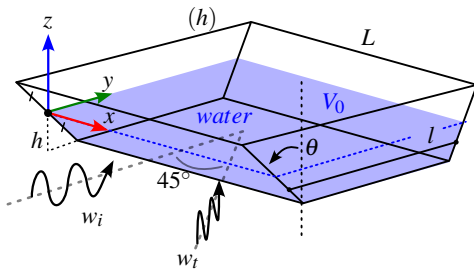


FIGURE 19. Géométrie de la carène considérée pour l'étude de l'inclinaison des parois et de l'inertie. La coque est un parallélogramme extrudé, dont les parois sont inclinées d'un angle  $\theta$  à  $l$  constant. Ainsi, le volume déplacé  $V_0$  est constant avec  $\theta$ .

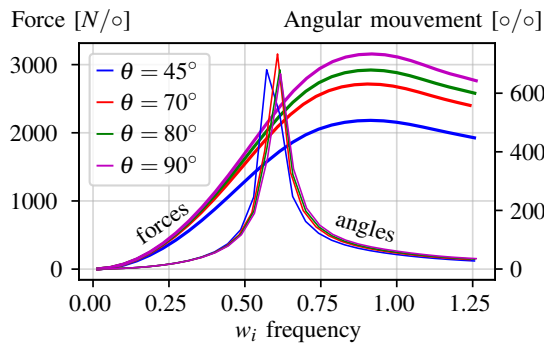


FIGURE 20. Effet de l'angle des parois de la coque sur la sensibilité angulaire et les forces exercées par une vague latérale  $w_i$ .

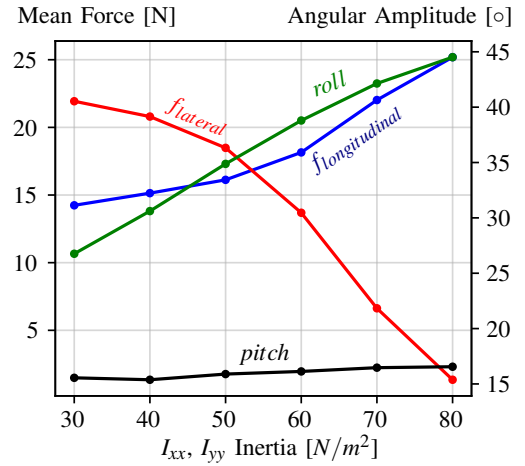


FIGURE 21. Effet de l'inertie sur le tangage, le roulis et les forces longitudinale et latérale de résistance des vagues.

$w_i$  sur l'axe de droite. L'axe de gauche représente le roulis  $\Phi$  par unité d'amplitude de la vague  $w_i$  en fonction de  $f$ . On constate que la sensibilité angulaire est faiblement dépendante de  $\theta$  tandis que les efforts augmentent avec  $\theta \rightarrow 90^\circ$ . **Une coque à parois à faible incidence est à privilégier.**

La figure III-F décrit l'effet de l'inertie  $I_{xx} = I_{yy} = I$  sur les forces et mouvements angulaire de la coque. Pour cela, on considère une vague test  $w_t$  à  $45^\circ$  d'incidence, d'amplitude  $0.17m$ , de période  $2s$  et une force de  $20N$  qui tracte le bateau dans sa direction longitudinale. L'amplitude de  $45^\circ$  souhaite représenter un bateau navigant au près. On constate que le bateau gîte de plus en plus fort à mesure que l'inertie augmente (courbe verte). Le tangage reste inchangé (courbe noire). Par ailleurs le bateau tends à moins être freiné avec une faible inertie, puisque la force longitudinale (en bleue) augmente avec l'inertie. Toutefois, une grande inertie permet de moins dériver, puisque la force latérale décroît avec l'inertie (bateau moins déporté dans le sens des vagues). En gardant en tête qu'un bateau rapide dérive moins (plus de force antidérive à incidence fixe) et qu'une petite inertie réduit la résistance des vagues dans le sens de la marche, **on privilégiera une faible inertie.**

#### IV. CONCLUSION

Dans ce document, l'analyse statistique des vagues en méditerranée et en atlantique en section II a montré que les vagues les plus critiques vis-à-vis de *Posidonie*; i.e de forte fréquence et amplitude; étaient celles générées par le vent. La houle, est systématiquement de période plus grande à hauteur de vague donnée. La taille de la mer générée par le vent peut être liée à sa période grâce à une relation polynomiale, permettant de caractériser la réponse d'une coque uniquement selon la période et la direction des vagues incidentes.

L'étude de *Posidonie* sur Ansys AQWA a révélé que le bateau présente une instabilité en roulis ( $f = 0.353$  Hz) et non en tangage, pour 97% des vagues. Les efforts générés par les vagues sont maximum pour l'axe du roulis et asymétrique vis

à vis de l'avant et l'arrière de la carène. (significativement moins d'effort pour les vagues de face). Les efforts sont majoritairement localisés à la proue, poupe et latéralement, au niveau de la partie la plus large de la coque.

En réduisant le volume de la partie immergée par rapport à celle émergée, la stabilité en roulis est améliorée, les efforts en tangage sont réduits et ceux en roulis légèrement augmentés. L'étude de l'angle des parois montre qu'un profil très voûté est préférable à des parois en angle droit. Enfin, il a été montré qu'une faible inertie est à privilégier.