



16^{èmes} Journées de l'Hydrodynamique

27-29 novembre 2018 - Marseille



Approximation de la probabilité de chavirement par le choix d'un seuil de dépassement dans le plan de phase de roulis

Approximation of capsizing probability using a Roll Exceedance (RE) probability with a threshold chosen in roll phase plane

R. MACÉ⁽¹⁾, J.Y. BILLARD⁽²⁾, G. LANNEL⁽²⁾, J.-F. LEGUEN⁽²⁾

romain.mace@intradef.gouv.fr ; jean-yves.billard@ecole-navale.fr ;
guillaume.lannel@intradef.gouv.fr ; jean-francois.leguen@intradef.gouv.fr

⁽¹⁾ DGA Techniques hydrodynamiques, Val de Reuil

⁽²⁾ École Navale, Lanvéoc-Poulmic.

Résumé

On étudie la possibilité de relier la probabilité de dépassement d'un seuil de gîte ou de vitesse de roulis à la probabilité de chavirement exacte déterminée par la méthode de Monte Carlo. A précision égale, ou du moins suffisante, la probabilité de dépassement pourrait avoir un coût de calcul moindre. Comme fait dans [5] dans le cas d'une frégate, cette étude examine pour le porte-hélicoptère Jeanne d'Arc la possibilité entre un paramètre de son bassin d'attraction en eau calme et sa probabilité de chavirement du navire. Pour ces deux navires, on obtient des valeurs proches pour α_c la probabilité de chavirement par cycle obtenue par la méthode de Monte Carlo et $P(\dot{\phi} > \dot{\phi}_{0^\circ \text{ sécu}})$ la probabilité de dépasser la vitesse de roulis à gîte nulle identifiée sur l'enveloppe d'exclusion des cycles chavirants. La validation de la méthode nécessiterait une étude de convergence en nombre de cycles ou de simulations pour quantifier les gains en temps et en coût de calcul. Une application à d'autres navires permettrait et une analyse plus fine des résultats pourraient permettre de relier une grandeur intrinsèque au navire à la valeur de $\dot{\phi}_{0^\circ \text{ sécu}}$, et donc au risque de chavirement.

Summary

This study assesses the approximation of capsizing probability from a Monte Carlo method by a potentially cost-killing computation of heel or roll exceedance probability. Such as did [5] in the case of a frigate, it is made an attempt to identify a ship intrinsic parameter, from its attraction basin in phase plane, to capsizing probability. Monte Carlo method and roll exceedance probability shows good accordance, and a convergence study is to make to asses cost improvement. A thorough analysis and a widening to other ships is to do to identify a link between attraction basin and capsizing probability.

I – Introduction

Le chavirement dans des conditions sévères est l'un des risques environnementaux les plus importants encourus par un navire. Ce risque dépend des caractéristiques hydrostatiques du flotteur, du chargement, de la vitesse d'avance, du gisement de la houle et de l'état de mer. La détermination analytique du risque de chavirement est, pour l'heure, un problème non résolu. Les méthodes statistiques de Monte-Carlo donnent une évaluation satisfaisante de la probabilité de chavirement mais son coût de mise en œuvre n'est pas compatible avec la plupart des applications d'évaluation de risque.

On étudie la possibilité de relier la probabilité de dépassement d'un seuil de gîte ou de vitesse de roulis à la probabilité de chavirement. A précision égale, ou du moins suffisante, la probabilité de dépassement pourrait avoir un coût de calcul moindre que les méthodes de Monte Carlo. Cette étude évalue la précision de l'approximation du risque de chavirement par une probabilité de dépassement d'un seuil choisi dans le plan de phase par l'analyse des trajectoires chavirantes et non chavirantes dans le diagramme de phase. Comme fait dans [5] dans le cas d'une frégate, cette étude examine pour le porte-hélicoptère Jeanne d'Arc la possibilité entre un paramètre de son bassin d'attraction en eau calme et sa probabilité de chavirement du navire.

II – Présentation de la méthode

II – 1 Modèles de navires

Les cas d'application de cette étude sont le porte-hélicoptère Jeanne d'Arc (JDA) et une frégate conçue dans les années 70 et utilisée des années durant par la Marine Nationale.

II – 2 Méthode simulation numérique d'un modèle temporel libre en roulis sur houle réelle avec le code Fredyn

Les simulations numériques dans le domaine temporel de roulis sur houle spectrale sont réalisés avec FREDYN V14. Ce code est développé par MARIN dans le cadre du groupe de coopération CRNAV. Pour la modélisation des états de mer, FREDYN permet de définir une durée pendant laquelle la houle ne se répète pas. Dans toutes les simulations effectuées pour cette étude, cette durée de non répétition est réglée à 50000 [s] et la durée des simulations vaut 20000 [s].

II – 3 Méthode simulation numérique d'un modèle temporel de roulis en eau calme

Le solveur Runge-Kutta explicite d'ordre 4 de XCOS, module de l'environnement de calcul scientifique SCILAB, est employé pour simuler le roulis du navire en eau calme, avec ou sans amortissement (Figure 1). Il résout l'équation de mouvement (1).

$$(I_{xx0} + A_{44})\ddot{\varphi} + B_{44}^1\dot{\varphi} + B_{44}^2|\dot{\varphi}|\dot{\varphi} + C_{44} \cdot \varphi = 0 \quad (1)$$

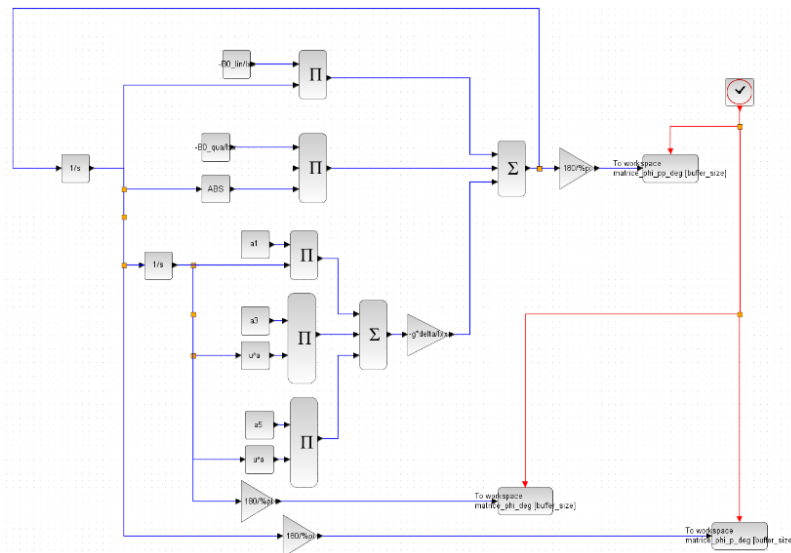


Figure 1 : Modèle XCOS de roulis en eau calme

L'équation (1) décrit le mouvement du navire en roulis sur un plan d'eau calme. Les termes d'inertie et d'amortissement sont déterminés par simulation d'une extinction de roulis avec Fredyn. Le bras de levier de redressement GZ des navires, représenté en Figure 2 pour la frégate et en Figure 3 pour la JDA, est approximé par un polynôme. Il comporte une partie linéaire jusqu'à environ 30° pour la frégate et jusqu'à 40° pour la JDA.

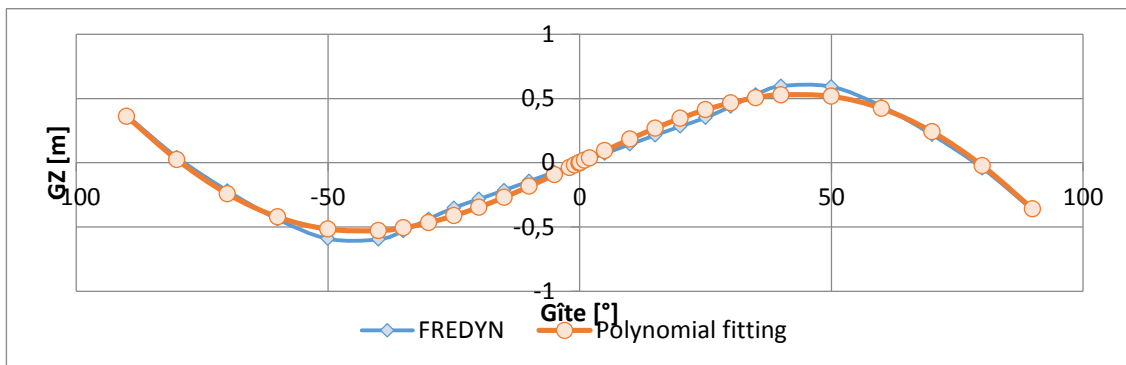


Figure 2 : Courbe de GZ de la frégate

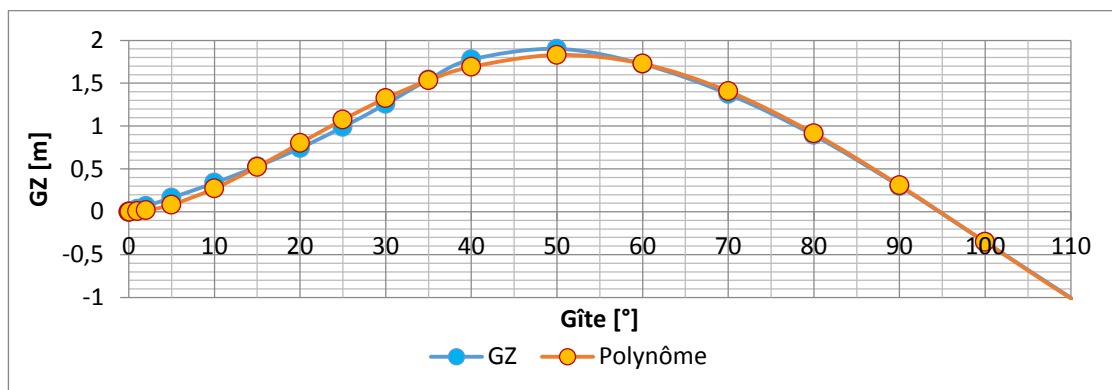


Figure 3 : courbe de GZ de la JDA

Le bassin d'attraction non amorti et en eau calme de la frégate est illustré par la Figure 4.

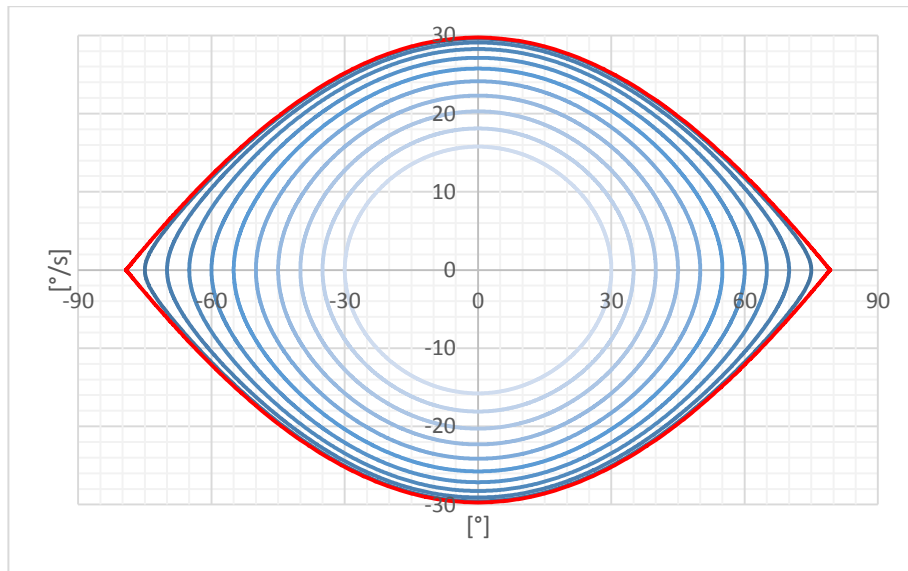


Figure 4 : Bassin d'attraction en eau calme de la frégate non amortie en roulis

III – Probabilité de chavirement par la méthode Monte Carlo

Vu d'un navire, un état de mer donné dure environ six heures. La durée simulée est donc fixée à 20000 [s]. Un échantillon de 1000 trajectoires semble suffisant pour un état de mer donné. La durée de non répétabilité du signal de houle est réglée à 50000 [s]. Le germe de génération aléatoire des états de mer est réglé pour que les 1000 signaux de houle soient distincts et décorrélés. On choisit les états de mer de façon à placer le navire dans des conditions relativement proches du chavirement, avec des proportions significatives à la fois de chavirement et de non chavirement. Des spectres de type Pierson Moskowitz à 80 composantes sont employés pour générer les signaux de houle. Le gisement de la houle est fixé à 90° (houle de travers), la vitesse d'avance est nulle, le lacet et l'embarquée sont bloqués.

État de mer	H_S	T_p
N°1	11 [m]	9.5 [s]
N°2	15.2 [m]	12.5 [s]

Tableau 1 : États de mer simulés dans cette étude

La probabilité PS_t de survie pendant une durée t inférieure à 20000 [s] est le ratio du nombre de simulations qui n'ont pas abouti à un chavirement (N_t) par rapport au nombre total de simulations (N_{total}). La probabilité de chavirement s'exprime alors (2):

$$PC_t = 1 - PS_t = 1 - \frac{N_t}{N_{total}} \quad (2)$$

Comme montré par Belenky (2007) la dépendance au temps du risque PC obéit à une loi exponentielle (3):

$$PC = 1 - e^{-\alpha t} \quad (3)$$

La constante de temps α est déterminée par minimisation de l'erreur par les moindres carrés. La Figure 5 montre les probabilités de chavirement obtenues par tirage Monte-Carlo et la loi exponentielle qui en découle. L'intérêt de cette approche est d'associer la probabilité de chavirement à α_S qui est aussi la tangente de la courbe à l'instant $t=0$. La probabilité de chavirement PC peut être exprimée sous la même forme en fonction du nombre de cycle de roulis (Figure 5 et Figure 6). Dans cette étude, on a déterminé la courbe par cycle à partir de la courbe en temps en considérant la durée moyenne des cycles (12.5 [s] pour la frégate). Comme on pouvait s'y attendre (démonstration analytique de Belenky, 2007), la période de l'état de mer étant plus courte que la période de roulis du navire, la durée moyenne d'un cycle de roulis est plus courte que la période de

roulis (13.75 [s]). Au final, on obtient deux probabilités de chavirement, l'une exprimée par unité de temps (α_S), l'autre par cycle (α_C). Les probabilités obtenues pour les différents cas de calcul sont synthétisées par le Tableau 2, en faisant la distinction entre les probabilités de chavirement du côté de la houle, du côté sous la houle, ou sur les deux bords. Dans le cas de la frégate, avec un grand nombre d'échantillons de chavirement, le ratio de α_C par α_S est égal à la période moyenne à 2% près, ce qui est cohérent et conforte la méthode.

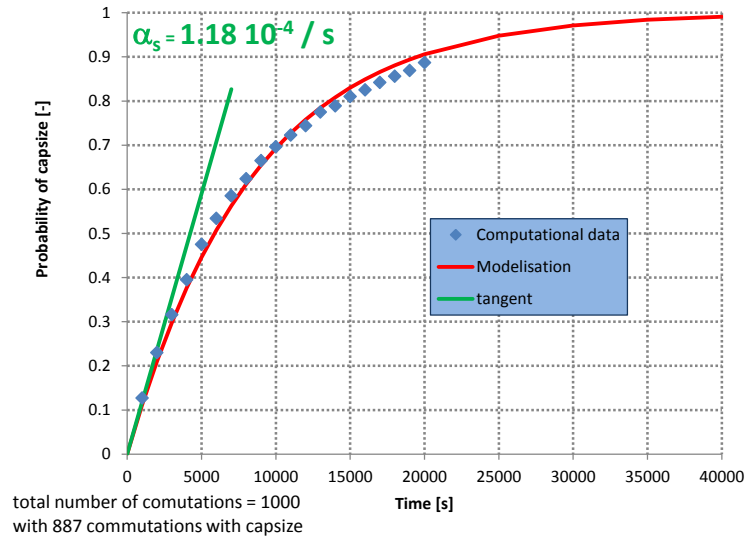


Figure 5 : Evolution de la probabilité de chavirement de la frégate au cours du temps

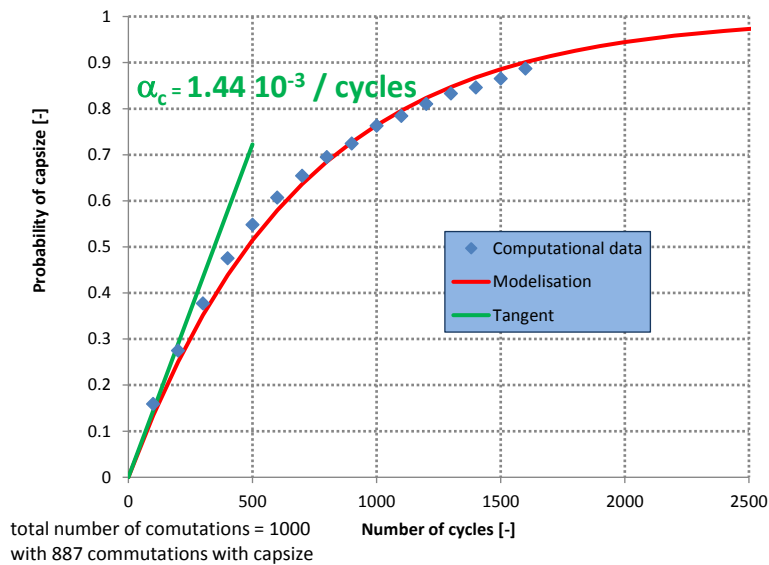


Figure 6 : Evolution de la probabilité de chavirement de la frégate en fonction du nombre de cycles de roulis

	Frégate SS1 Sous houle	Frégate SS2 Sous houle	Frégate SS2 Coté houle	Frégate SS2 2 bords	JDA SS1 Sous houle	JDA SS1 Coté houle	JDA SS1 2 bords	JDA SS2 Sous houle	JDA SS2 Coté houle	JDA SS2 2 bords
α_C	1,44E-03	5,90E-03	1,728E-04	7,16E-03	4,87E-05	4,24E-04	5,09E-04	1,56E-04	7,34E-04	1,10E-03
α_S	1,18E-04	4,52E-04	5,92E-05	5,08E-04	4,47E-06	3,73E-05	4,53E-05	1,36E-05	5,93E-05	9,39E-05
$\frac{\alpha_C}{\alpha_S}$	12,2	13,1	2,9	14,1	10,9	11,4	11,2	11,4	12,4	11,7
Nb	887	952	48	1000	75	587	662	189	613	802

Tableau 2 : Probabilités par cycle et par seconde de chavirement

IV – Analyse des trajectoires dans le plan de phase

La probabilité de chavirement exacte étant connue à grand renfort de temps de calcul par la méthode Monte Carlo, on souhaite la relier à une probabilité de dépassement d'un angle de gîte ou d'une vitesse de roulis déterminée dans le plan de phase, et si possible avec un nombre ou une durée de simulations plus restreintes.

Pour identifier un domaine sûr et un domaine mortel du plan de phase, on a tracé une enveloppe d'inclusion des cycles non chavirants (Figure 7 pour la frégate sur l'état de mer n°1), et une enveloppe d'exclusion des cycles chavirants (Figure 8 pour la frégate et Figure 9 pour la JDA). On a arbitrairement choisi pour l'enveloppe d'exclusion de comptabiliser 95% des cycles aux modules les plus grands dans un secteur angulaire donné (ici 5°). Dans le cas de l'état de mer n°1, la frégate ne chavire que du côté sous la houle.

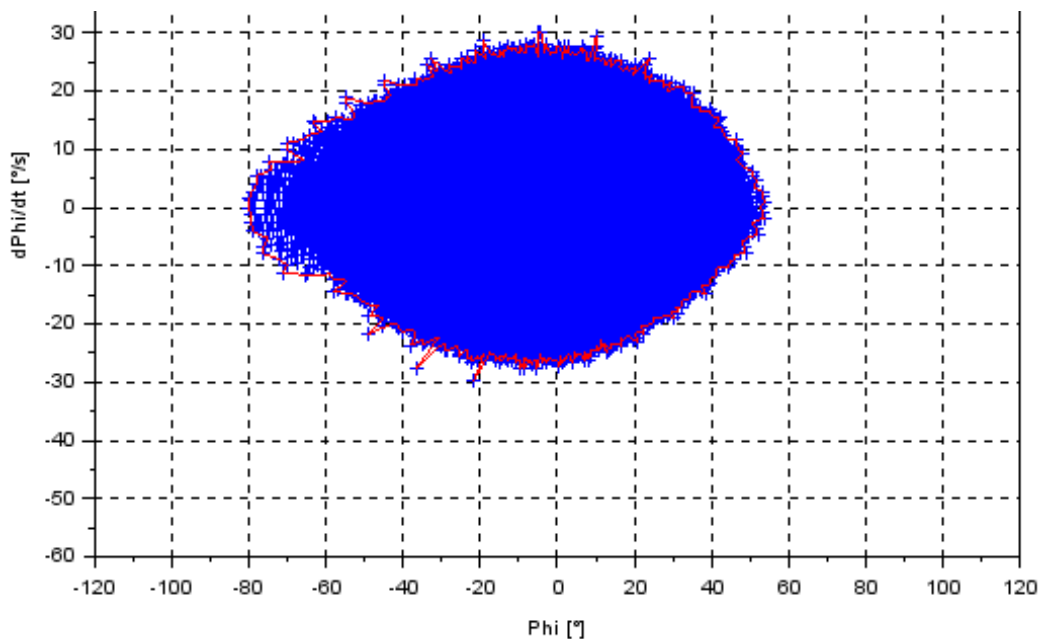


Figure 7 : Enveloppe des cycles non chavirants pour la frégate sur l'état de mer n°1

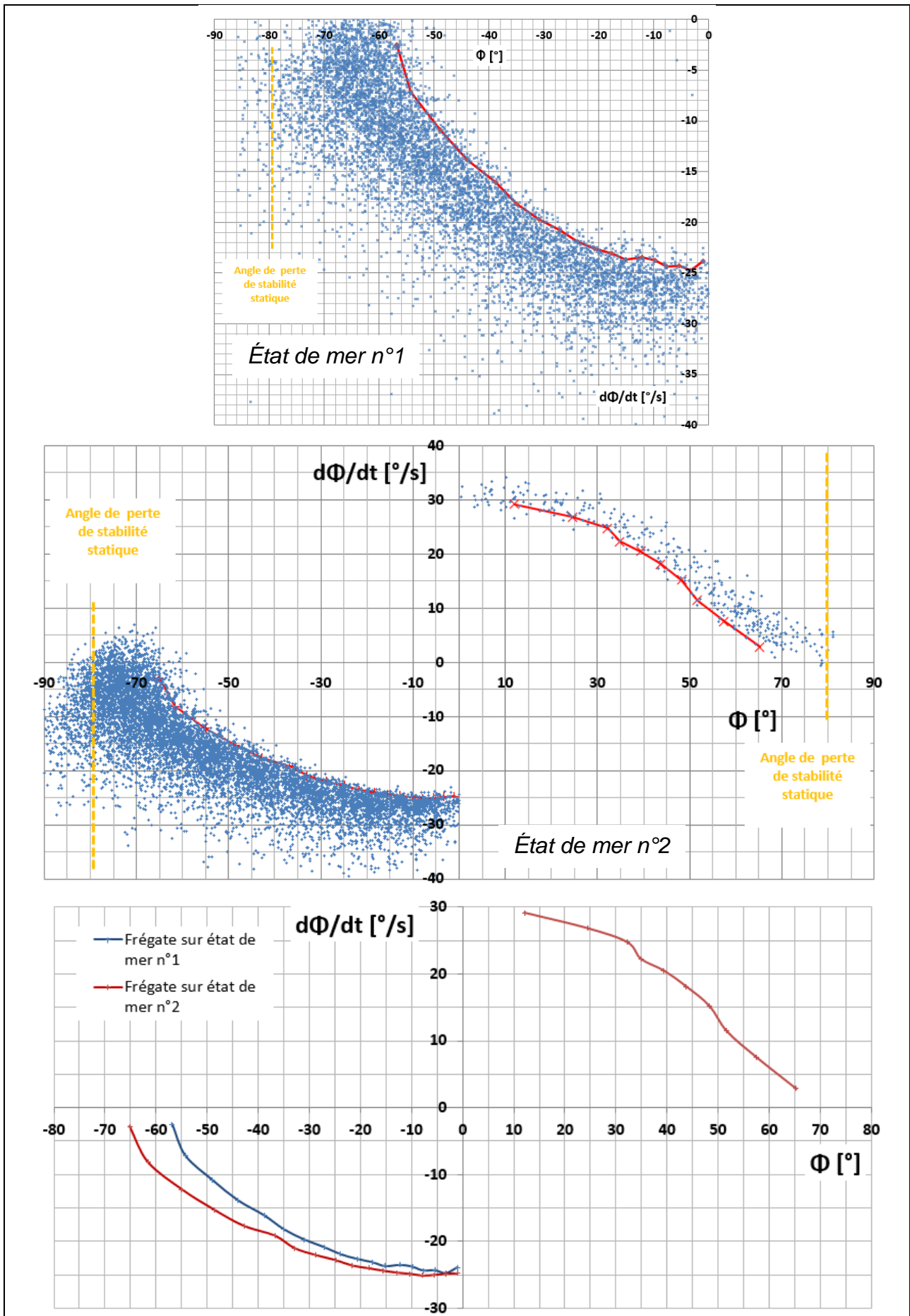


Figure 8 : Trajectoires de phase de la frégate avant chavirement

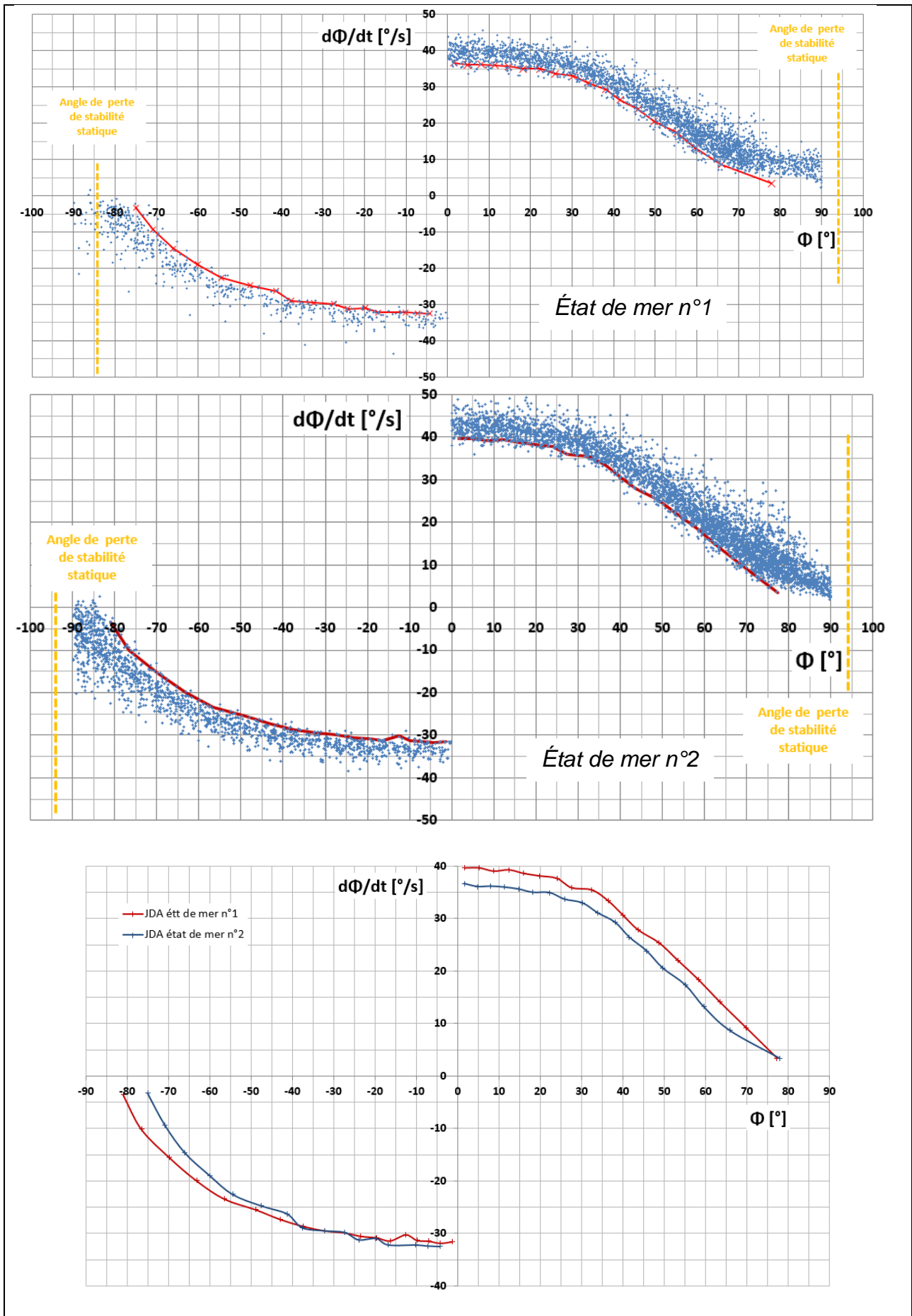


Figure 9 : Trajectoires de phase de la JDA avant chavirement

Sur l'enveloppe d'exclusion des cycles chavirants, on observe que la vitesse de roulis à gîte nulle (que l'on note $\dot{\phi}_{0^\circ \text{ sécu}}$) est peu ou pas sensible à l'état de mer. On a aussi remarqué une relative proximité de l'enveloppe non chavirante et de l'enveloppe chavirante pour une gîte nulle. Pour la frégate, on a envisagé que $\dot{\phi}_{0^\circ \text{ sécu}}$ pourrait permettre de définir un critère simple, en gîte ou en ratio de surface du bassin d'attraction non amorti, pour garantir le non chavirement du navire ([5]). Toutefois, si cette approche fonctionne pour la frégate, ce n'est pas le cas pour la JDA. Cette approche nécessite d'être approfondie sur ces deux cas tests et éventuellement élargie à un d'autres navires.

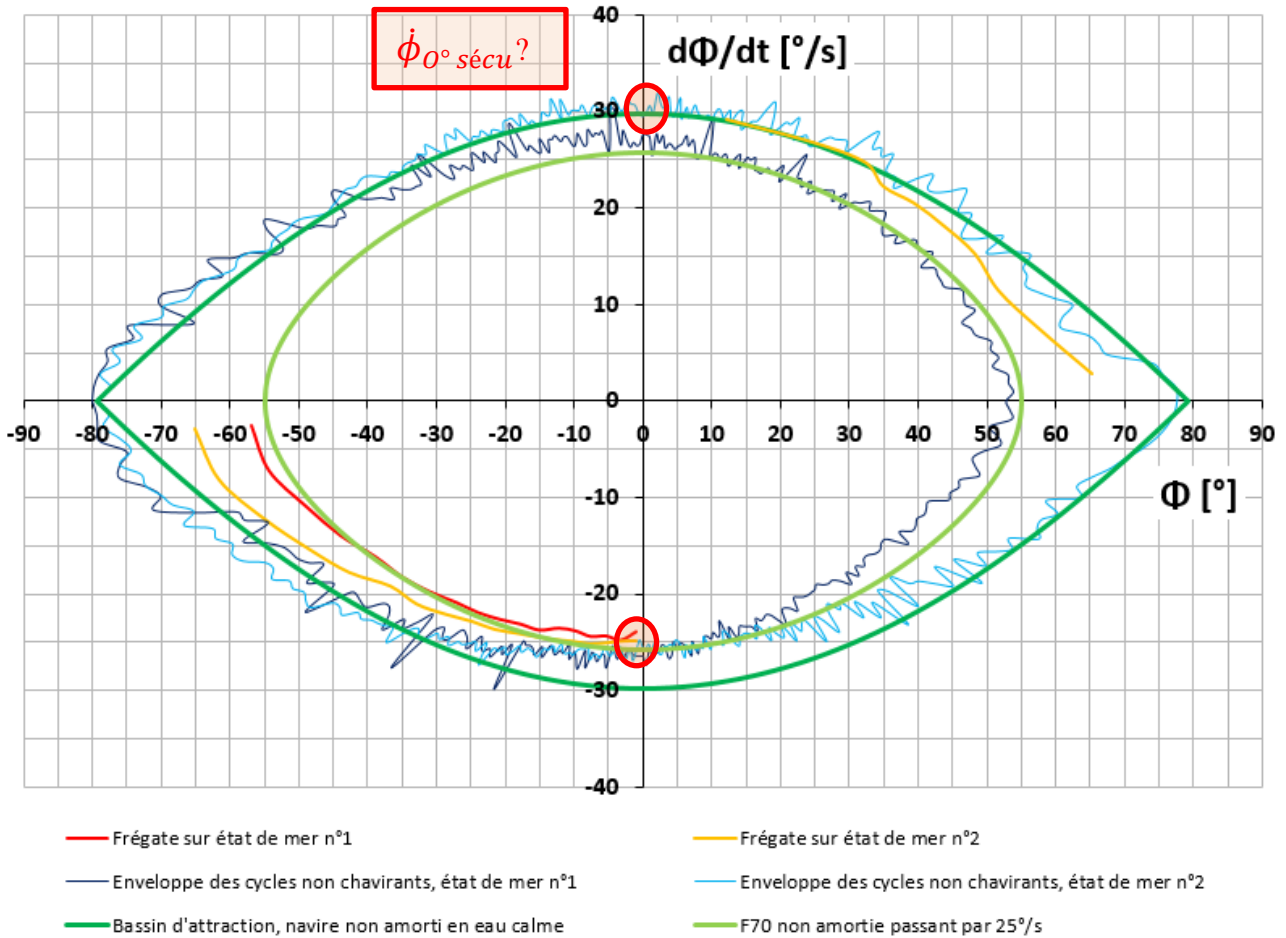


Figure 10 : Recherche d'un domaine sûr dans le plan de phase de la frégate

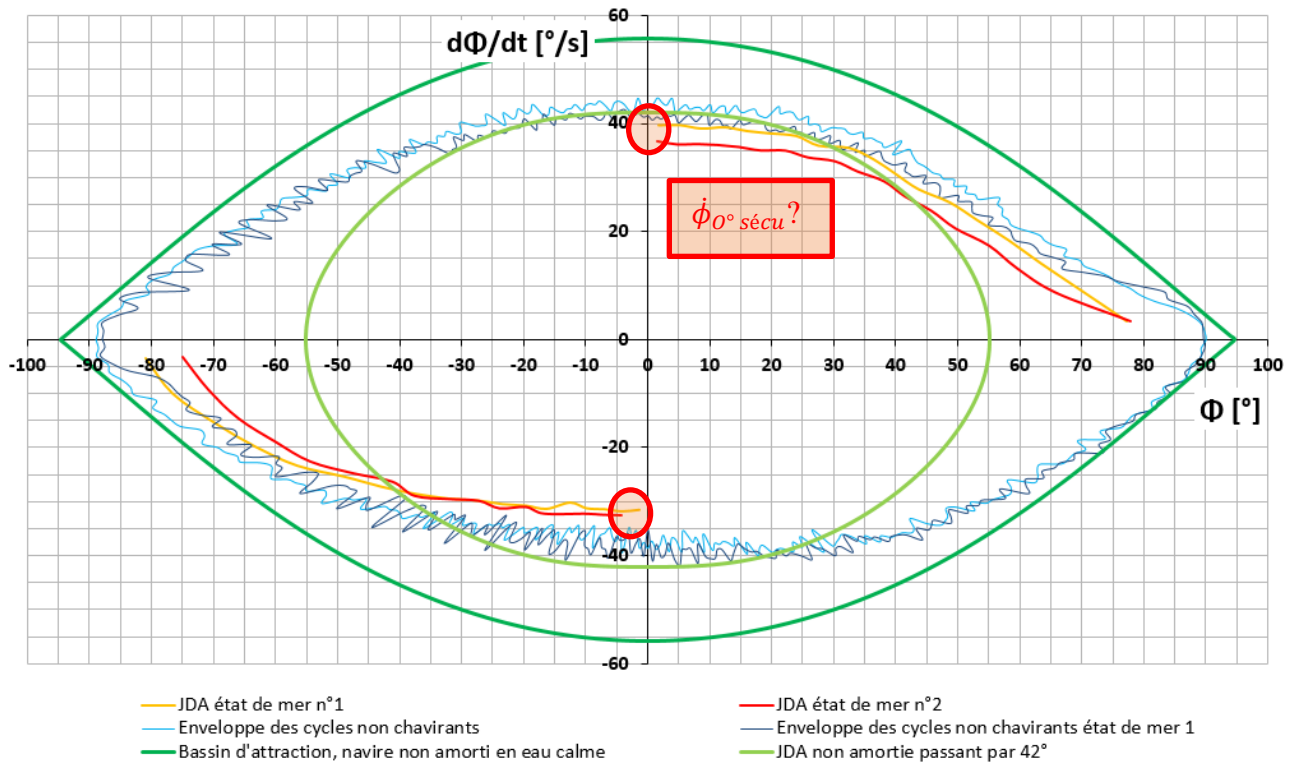


Figure 11 : Recherche d'un domaine sûr dans le plan de phase de la JDA

Il demeure que $\dot{\phi}_{0^\circ \text{ sécu}}$ semble être un paramètre pertinent pour évaluer le risque de chavirement. De plus, la valeur de $\dot{\phi}_{0^\circ \text{ sécu}}$ est relativement modérée par rapport aux valeurs extrêmes que peut prendre $\dot{\phi}$, et son occurrence est bien plus fréquente que celle des valeurs de gîte proches de 90° . Par conséquent, il peut exister une marque significative de réduction du coût de calcul de $P(\dot{\phi} > \dot{\phi}_{0^\circ \text{ sécu}})$ par rapport à celui de α_c . Il reste donc à comparer $P(\dot{\phi} > \dot{\phi}_{0^\circ \text{ sécu}})$ aux résultats de la méthode Monte Carlo.

	Frégate SS1 Sous houle	Frégate SS2 Sous houle	Frégate SS2 Coté houle	JDA SS1 Sous houle	JDA SS1 Coté houle	JDA SS2 Sous houle	JDA SS2 Coté houle
$\dot{\phi}_{0^\circ \text{ sécu}}$	-24,3 [°/s]	-24,3 [°/s]	30 [°/s]	-32 [°/s]	36 [°/s]	-32 [°/s]	40 [°/s]

Tableau 3 : Vitesses de roulis identifiées dans sur le plan de phase des simulations à ne pas dépasser pour éviter le chavirement

IV – Comparaison de la probabilité de dépassement de seuil de vitesse de roulis et des probabilités de chavirement par tirage Monte Carlo

Pour déterminer $P(\dot{\phi} > X)$ la probabilité d'un seuil X de roulis (Figure 12), on considère l'ensemble des simulations qui n'ont pas chaviré, plus l'ensemble des tirs qui ont chaviré moins le dernier cycle (qui chavire). Les extrema de roulis sur bâbord et sur tribord sont traités indépendamment et pondérés en utilisant la méthode décrite par Derbanne (2008).

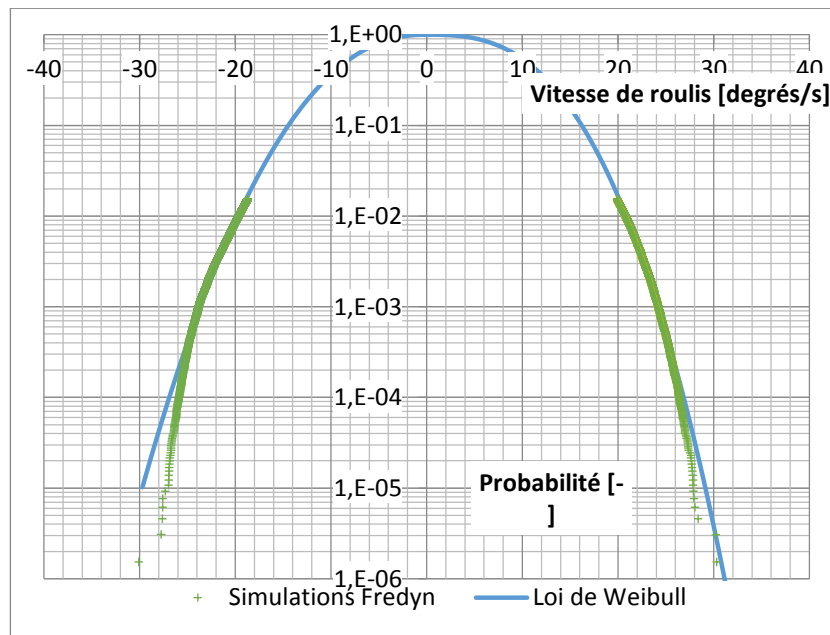
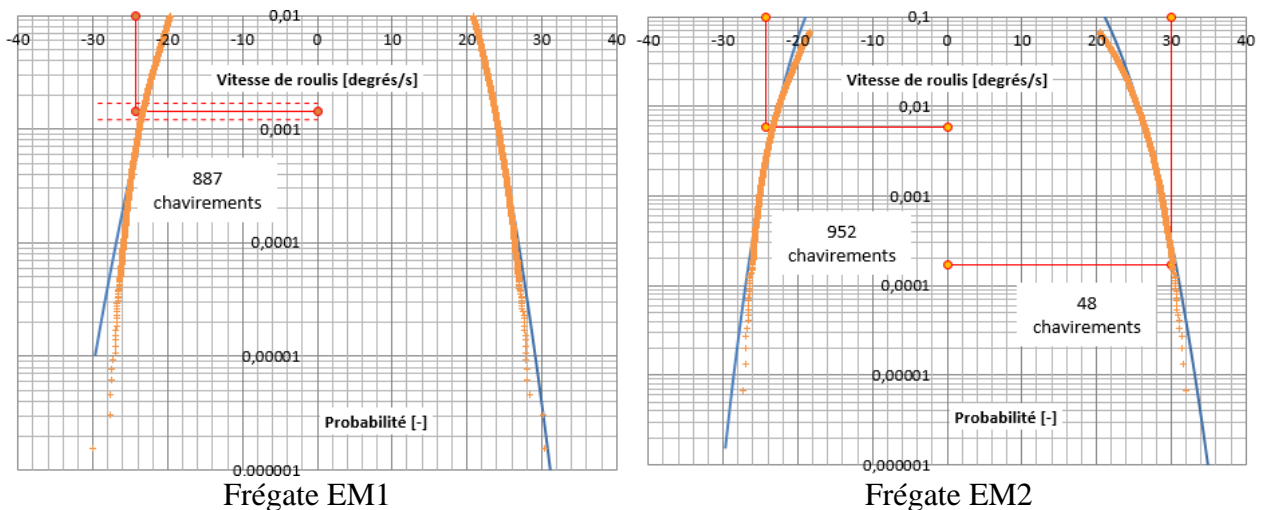


Figure 12 : Courbe de probabilité de dépassement de seuil de roulis pour la frégate sur SS1

Cette courbe donne la probabilité de dépassement à la vague suivante. Elle est donc évaluée sur une durée qui est du même ordre de grandeur que celle de l'oscillation suivante du navire.

Pour une partie des cas de calcul, on constate (Figure 13) que α_c est très proche de $P(\dot{\phi} > \dot{\phi}_{0^{\circ} \text{ sécu}})$. Cela est particulièrement vrai quand le nombre de chavirements est important. Bien qu'on observe une forte proximité pour le cas Frégate EM2 du côté de la houle, la validité du résultat est sujette à caution étant donnée le petit nombre d'échantillons (48), et ce d'autant plus que le JDA EM 1 du côté sous la houle présente un écart très important avec un petit échantillon de chavirements (75).



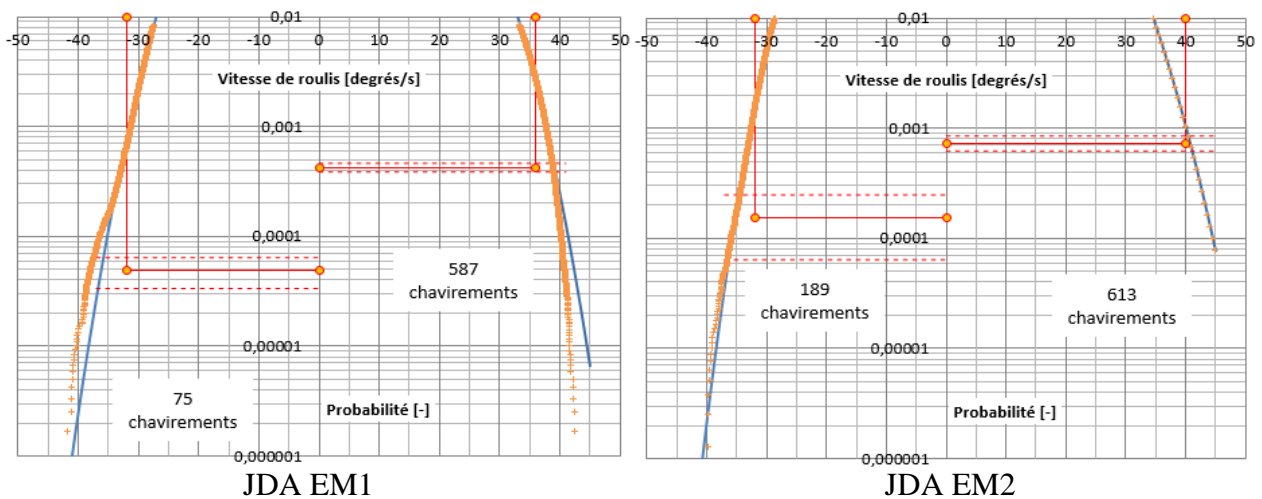


Figure 13 : Comparaison de la probabilité de chavirement par cycle déterminée par la méthode de Monte Carlo à la probabilité de dépasser la vitesse de roulis de sûreté identifiée dans le plan de phase

IV – Conclusions et perspectives

Pour ces deux navires, on obtient des valeurs proches pour α_c la probabilité de chavirement par cycle obtenue par la méthode de Monte Carlo et $P(\dot{\phi} > \dot{\phi}_{0^\circ \text{ s\u00e9cu}})$ la probabilité de dépasser la vitesse de roulis à gîte nulle identifiée sur l’enveloppe d’exclusion des cycles chavirants.

Des cas de simulation complémentaires permettraient de confirmer la possibilité d’approximer avec une précision suffisante le risque de chavirement exact par une probabilité de dépassement de seuil de roulis. Une étude de convergence reste à réaliser pour quantifier les gains potentiels de temps et de coût de calcul que permettrait une telle méthode.

Enfin, une analyse plus fine des résultats, et sans doute des cas de calcul supplémentaires avec d’autres navires sont nécessaires pour tenter d’identifier une grandeur intrinsèque au navire, comme un paramètre du bassin d’attraction ou de la courbe de GZ, à la valeur de $\dot{\phi}_{0^\circ \text{ s\u00e9cu}}$ et donc au risque de chavirement.

Références

- [1] V. Belenky, N. B Sevastianov. Stability and Safety of Ships: Risk of Capsizing, *The Society of Naval Architects and Marine Engineers*, Second Edition, 2007.
- [2] A. Maki. Estimation method of the capsizing probability in irregular beam seas using non-Gaussian probability density function, *Journal of Marine Science and Technology*, 22:351–360, 2017.
- [3] E. Ypma, E. Harmsen. Development of a New Methodology to Predict the Capsize Risk of Ships, *Proceedings of STAB 2012*, pp. 1-10, 2012.
- [4] Q. Derbanne, J.-F. Leguen, T. Dupau, E. Hamel. Long-Term Non-Linear Bending Moment Prediction, *Proceedings of OMAE 2008*, 2008.
- [5] R. Macé, J.-Y Billard, G. Lannel, J.-F Leguen. *Proceedings of STAB 2018*, 2018.