



NAUFRAGE DU CHALUTIER *L'ÉPAULARD*

**SYNTHÈSE DES ÉTUDES SIREHNA
ET DGA TECHNIQUES ET HYDRODYNAMIQUES**



Bureau d'enquêtes sur les événements de mer

Rapport publié : décembre 2013



Bureau d'enquêtes sur
les événements de mer

Paris, le **13 DEC. 2013**
N/réf. : *BEA*mer

000697



Objet : Naufrage du chalutier *L'ÉPAULARD*.

P. Jointe : Une synthèse des études SIREHNA et DGA Techniques Hydrodynamiques.

À la suite du naufrage du chalutier de 19,50 m *L'ÉPAULARD*, le 21 janvier 2010, le *BEA*mer a réalisé une enquête technique. Les informations recueillies au cours de l'enquête, ainsi que le calcul de stabilité réglementaire, n'ont pas permis au *BEA*mer d'identifier de manière certaine les causes du chavirement ayant conduit au naufrage.

Un certain nombre d'hypothèses ont été émises et, selon l'armateur, la cause du chavirement ne pouvait être qu'externe au navire.

C'est dans ce contexte particulier que le *BEA*mer a fait réaliser une étude de stabilité dynamique par la société d'ingénierie navale SIREHNA et par DGA Techniques Hydrodynamiques.

Le document que le *BEA*mer diffuse aujourd'hui (<http://www.beamer-france.org/etudes-et-analyses-fr.html>) est une compilation du résultat des deux études, menées indépendamment et avec des outils de simulation différents.

Outre la synthèse que le lecteur pourra effectuer lui-même, des mesures applicables à la conception du navire et pendant son exploitation sont proposées en conclusion.

L'Administrateur Général des Affaires Maritimes
Daniel LE DIREACH
Directeur du *BEA*mer

Ministère de l'Écologie,
du Développement durable
et de l'Énergie

*BEA*mer

Tour Pascal B
92055 LA DEFENSE CEDEX
téléphone : 33 (0) 1 40 81 38 24
télécopie : 33 (0) 1 40 81 38 42
Bea-Mer@developpement-durable.gouv.fr



Naufrage du chalutier *L'ÉPAULARD*

**Synthèse des études SIREHNA
et DGA Techniques hydrodynamiques**

Sommaire

Rappel du rapport du <i>BEA</i>mer	Page 4
Synthèse de l'étude SIREHNA	Page 6
Synthèse de l'étude DGA Techniques Hydrodynamiques	Page 23
Calculs de tenue à la mer	Page 42
Comparaison et points clés	Page 58
Conclusion	Page 59

Glossaire des abréviations

AIS	:	Automatic Identification System
DV	:	Début de vie (du navire)
FV	:	Fin de vie (du navire)
GM ou GMT	:	Rayon métacentrique transversal
GZ (ou BLR)	:	Bras de levier de redressement
KG	:	Hauteur du centre de gravité au-dessus de la quille
LCG	:	Distance du centre de gravité à la perpendiculaire AR
Lpp	:	Longueur entre perpendiculaires
REX	:	Retour d'expérience
s	:	Secondes
WL	:	Water level
YG	:	Distance du centre de gravité à l'axe du navire

Naufrage du chalutier *L'ÉPAULARD*

Synthèse des études SIREHNA et DGA Techniques hydrodynamiques

Le rapport du *BEA*mer a été publié le 20 septembre 2010.

Contributeurs : Chantier A. MERRE, ORION Naval Engineering (étude de stabilité réglementaire), Météo France.

Rappel des circonstances

Le 21 janvier 2010, après trois jours de pêche « en bœufs » avec un chalutier du même armement, *L'ÉPAULARD* pratique, seul, le chalut de fond. En fin de matinée, à l'issue de son premier trait à 7 milles de la côte, *L'ÉPAULARD* effectue un demi-tour par l'ouest.

Lorsque l'équipage, composé de cinq hommes, est prêt pour virer le chalut, le navire suit un cap de secteur est à 3,5 nœuds. Le patron est en timonerie, aux commandes de l'enrouleur, et le mécanicien est dans l'entrepont, aux commandes des treuils.

Le cul du chalut arrive le long du bord et comprend deux poches d'environ 1,5 tonne. Une première poche est embarquée ; les méduses et indésirables sont évacués et moins d'une tonne de poisson est conservée sur le pont principal.

Alors que la deuxième poche est prête à être ouverte sur le pont, *L'ÉPAULARD* prend une très forte gîte sur bâbord. Le patron n'a que le temps d'alerter *L'ALBATROS* de la situation et d'évacuer la timonerie ; les trois matelots sont éjectés à la mer. *L'ÉPAULARD* se couche à 90° puis se retourne complètement. Le mécanicien reste prisonnier sous le navire, puis revient à la surface, à demi inconscient. Malgré les efforts du patron et d'un matelot pour le soutenir et lui maintenir la tête hors de l'eau, il sera rapidement sans réaction.

Environ 15 minutes après s'être retourné, *L'ÉPAULARD* sombre par 50 mètres de fond.

Les secours s'organisent mais le mécanicien décède au cours de l'évacuation ; les autres naufragés seront sauvés.

Des plongeurs de la brigade nautique d'Arcachon feront une première investigation de repérage de l'épave le 15 février. Deux jours plus tard, un ROV de la Marine nationale effectuera des prises de vue détaillées par caméra vidéo. Ces images ne permettent pas d'identifier de manière certaine la cause du naufrage.

Rappel de la synthèse du rapport *BEA*mer

L'ÉPAULARD n'a pas pu chavirer sous l'action d'un facteur unique. Le recensement des facteurs probables et les images prises par le ROV ne permettent pas pour autant de conclure à un cumul de causes pouvant être validées avec certitude ; les réactions et la configuration du navire avant l'accident, de même que son historique, ayant plutôt tendance à écarter les hypothèses réalistes habituellement retenues pour ce type de naufrage.

Un scénario, jamais rencontré auparavant, et cumulant des effets défavorables durant un court instant, pourrait cependant être à l'origine du naufrage.

Facteur naturel

Houle de travers ; le navire suit une verticale apparente et présente une tendance à gîter sur bâbord ; simultanément, si son volume de carène immergé diminue (proximité de la crête d'une vague), sa réserve de stabilité se dégrade momentanément.

Facteurs matériels

Entrée d'eau relativement peu importante mais suffisante pour créer un effet de carène liquide dans un espace libre. Non détection de cette présence d'eau, le navire gîte sur bâbord. Ripage de moins d'une tonne de poisson sur le pont principal arrière ; la poche d'1,5 tonne en suspens se décale également sur bâbord et la dégradation de stabilité due à la position du navire sur la houle s'accroît.

Ce cumul d'effets défavorables aurait, a priori, pour conséquence le chavirement d'un navire de la dimension de *L'ÉPAULARD*. Mais en l'absence de preuves matérielles pouvant être vérifiées par le *BEA*mer, le scénario envisagé reste à l'état d'hypothèse.

Facteur Humain

Aucune action ayant pu conduire à la perte de stabilité du navire n'a été identifiée.

Rappel des remarques de l'armateur après réception du rapport provisoire (phase de consultation)

- Le rapport ne fait pas état d'une probable cause du naufrage externe au navire.
- L'enfouissement partiel de l'épave ne permet pas de voir la coque sous les quilles antiroulis.

C'est dans ce contexte que le *BEA* prend la décision, courant 2011, de lancer une étude de « stabilité dynamique » de *L'ÉPAULARD*. L'objectif est d'approfondir les hypothèses du rapport en modélisant les situations susceptibles d'expliquer l'accident, à l'aide d'un simulateur de comportement temporel des mouvements du navire (SIREHNA).

Parallèlement, l'idée de réaliser une maquette et d'observer son comportement dans un bassin des carènes (DGA Techniques hydrodynamiques) est abandonnée et remplacée par une étude sur maquette numérique.

Les études détaillées livrées par SIREHNA et DGA Techniques hydrodynamiques sont argumentées par de nombreux tableaux et graphiques. Si le texte est reproduit dans sa presque totalité, seuls les tableaux et graphiques nécessaires à sa compréhension figurent dans la « synthèse ».

1. SYNTHÈSE DE L'ÉTUDE SIREHNA

1.1 Approche SIREHNA

Dans un premier temps, des simulations longues (plusieurs heures) sont lancées afin d'obtenir les grandeurs statistiques des mouvements du navire et identifier les situations critiques.

Dans un deuxième temps, des simulations courtes (quelques dizaines de secondes) sont réalisées à partir des situations critiques identifiées en modifiant quelques paramètres. Sont testés :

- L'effet d'un coup de barre,
- L'effet du déplacement d'une masse suspendue,
- L'effet du ripage d'une partie de la pontée,
- L'effet d'une augmentation de la cambrure de la houle.

1.2 Conditions générales

1.2.1 Conditions des simulations

Conditions initialement envisagées :

- Navire avec vitesse faible mais manœuvrant,
- Houle de l'arrière bâbord,
- Houle irrégulière avec bande étroite de période 10 sec et de hauteur significative 3,20 m pour les calculs longs (20 à 30 min),
- Houle régulière de période 10 s et de hauteur 3,20 m à 5,50 m pour les calculs courts.

Les simulations de 20 à 30 minutes, bien que satisfaisantes pour obtenir la réponse statistique du navire dans l'état de mer choisi, ne permettent de mettre en évidence que très peu de situations critiques pour la sécurité du navire (par exemple, aucun pic de roulis au-delà de 50° pour le cas de chargement 4, un seul pic au-delà de 40° sur tribord). Afin de détecter des événements plus rares, par exemple liés à la réponse non linéaire du navire, des simulations très longues (6 heures) avec les mêmes données d'entrée ont été lancées.

Les conditions de houle utilisées pour réaliser les calculs courts ont également été modifiées par rapport aux conditions envisagées initialement : à la place d'une houle régulière, la même houle irrégulière qu'au cours des calculs longs a été utilisée afin de reproduire les situations critiques identifiées au cours de ceux-ci.

1.2.2 Cas de chargement

Quatre cas de chargement sont étudiés ; seuls les cas 1 et 4 sont retenus pour la synthèse :

Cas 1 : *L'ÉPAULARD* le jour de l'avarie, situation la plus stable ;

Cas 4 : *L'ÉPAULARD* le jour de l'avarie avec le chargement de la pontée décalé et 20 cm d'eau dans la cale à poisson, situation la plus dégradée.

1.3 Stabilité statique

	cas 1	cas 4
Déplacement (t)	111,32	113,16
KG (m)	2,518	2,493
KG corrigé (m)	2,532	2,792
LCG (m)	7,165	7,198
YG (m)	0	- 0,027

Une étude de stabilité statique a été réalisée pour les quatre cas de chargement considérés, avec le logiciel HYDRO+. Les résultats sont proches de ceux du *BEAmer* (ORION Naval) calculés avec le code ARGOS.

Ces calculs permettent en particulier d'obtenir l'angle d'envahissement du navire :

Cas 1 : 53,4°

Cas 4 : 52,2°

1.4 Tenue à la mer linéaire fréquentielle

Dans un second temps, un calcul de tenue à la mer linéaire fréquentiel est réalisé. Ce type de calcul, basé sur des hypothèses de houle de faible amplitude, ne permet pas de modéliser directement les grands mouvements du navire, mais permet néanmoins d'appréhender sa réponse au premier ordre, via des fonctions de transfert (amplitude des mouvements en fonction de la période de houle).

Ceci permet également de générer un certain nombre d'informations nécessaires à la mise en œuvre de la simulation non-linéaire.

Périodes propres des mouvements :

	cas 1	cas 4
Roulis	4,8 s	5,8 s
Tangage	3,6 s	3,8 s
Pilonnement	3,4 s	3,5 s

Les informations de masses ajoutées et d'amortissement de radiation sont également obtenues à partir des calculs AQUA+ pour être utilisées en entrée du simulateur.

1.5 Simulation temporelle des mouvements

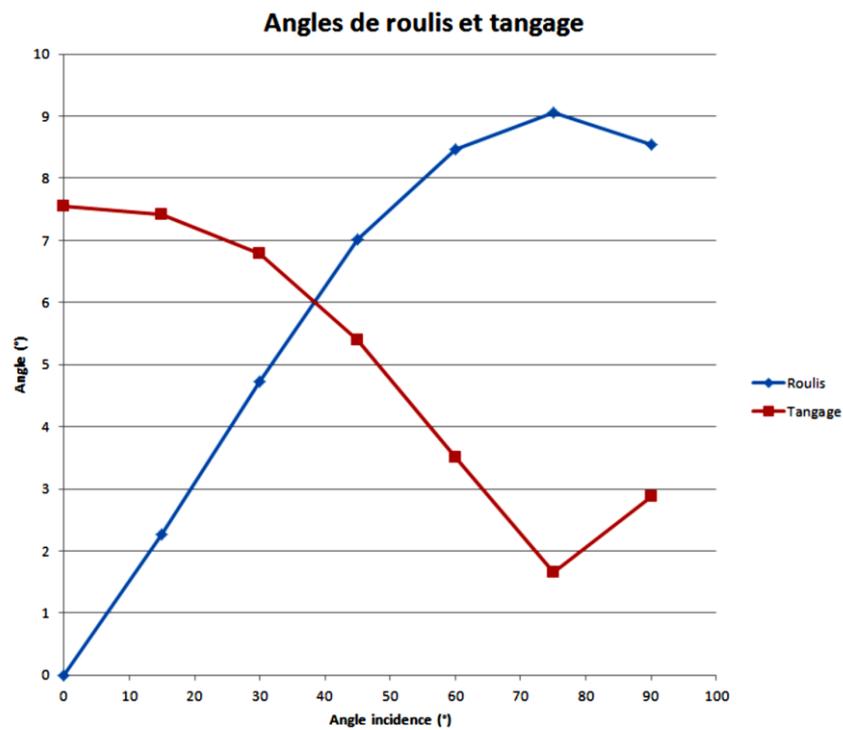
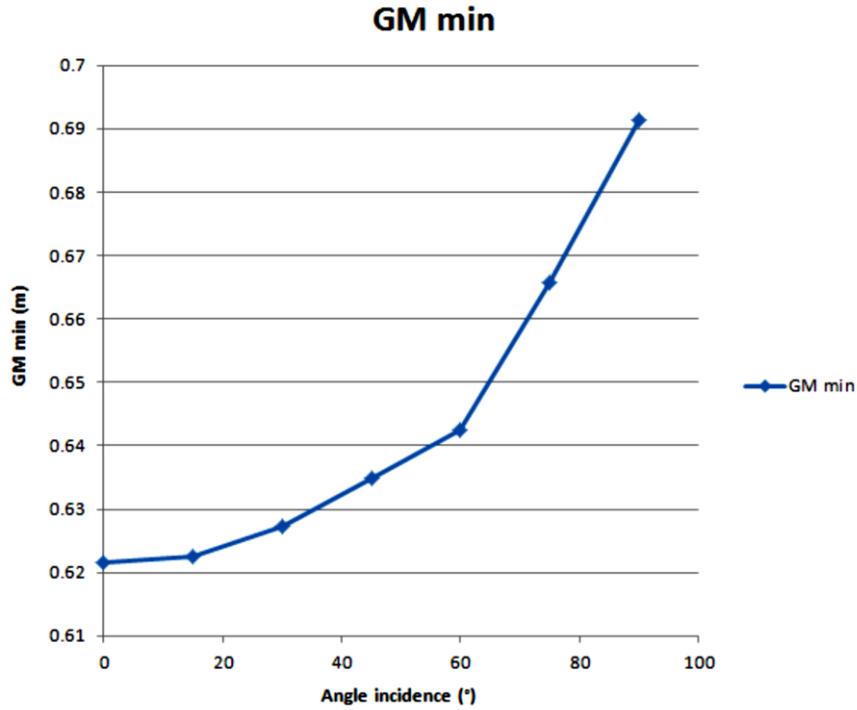
1.5.1 Validation du GM

	GM simulateur	GM Argos	GM Hydro+
cas 1	0,73 m	0,72 m	0,74 m
cas 4	0,46 m	0,44 m	0,47 m

1.5.2 Calculs préliminaires, détermination de la condition la plus défavorable

Afin de déterminer la condition de route navire la plus défavorable, on calcule, pour une houle régulière de période 10 secondes et de hauteur 3,2 mètres, les amplitudes de mouvements ainsi que le GM minimum de *L'ÉPAULARD* en régime stationnaire en fonction de l'incidence de la houle (0° : houle de l'arrière ; 90° : houle de travers venant de bâbord).

GM dynamique : le simulateur permet de calculer, en fonction du temps et du mouvement du navire, la raideur en roulis instantanée du navire. Cette raideur permet de définir un pseudo « GM », qui tend vers le GM statique lorsque le navire est au repos en eau calme.



On choisit pour la suite une orientation de 60° qui correspond à un compromis entre un roulis fort et un GM faible. De plus, cet angle est cohérent avec celui estimé au moment du naufrage : houle portant au 110° et cap au 042° (informations AIS).

1.5.3 Simulations longues

Avec les conditions définies ci-dessus, des simulations longues sur houle irrégulière ont été menées, avec pour objectif de déterminer statistiquement, sur une durée de l'ordre de 30 minutes, les situations les plus critiques :

	cas 1	cas 4
Roulis :		
min.	26,8° bd	31° bd
max.	32,8° td	46,9° td
GM :		
min.	0,1 m	- 0,1 m
max.	1,8 m	1,1 m

Une durée de 1800 s est classiquement suffisante pour représenter le contenu spectral de la houle et des réponses du navire, sous l'hypothèse de linéarité. Dans le cas présent, on recherche des mouvements de grande amplitude potentiellement liés à des non-linéarités de comportement, qui peuvent être modélisés par le simulateur (hydrostatique et efforts de houle non-linéaires). Cependant, ces phénomènes peuvent s'avérer rares et nécessiter des simulations plus longues pour pouvoir les détecter.

1.5.4 Simulations très longues

Le temps de simulation des simulations très longues est 6 heures (21600 s). Ce temps de simulation permet d'obtenir des valeurs de roulis plus importantes que celles observées pendant 30 minutes.

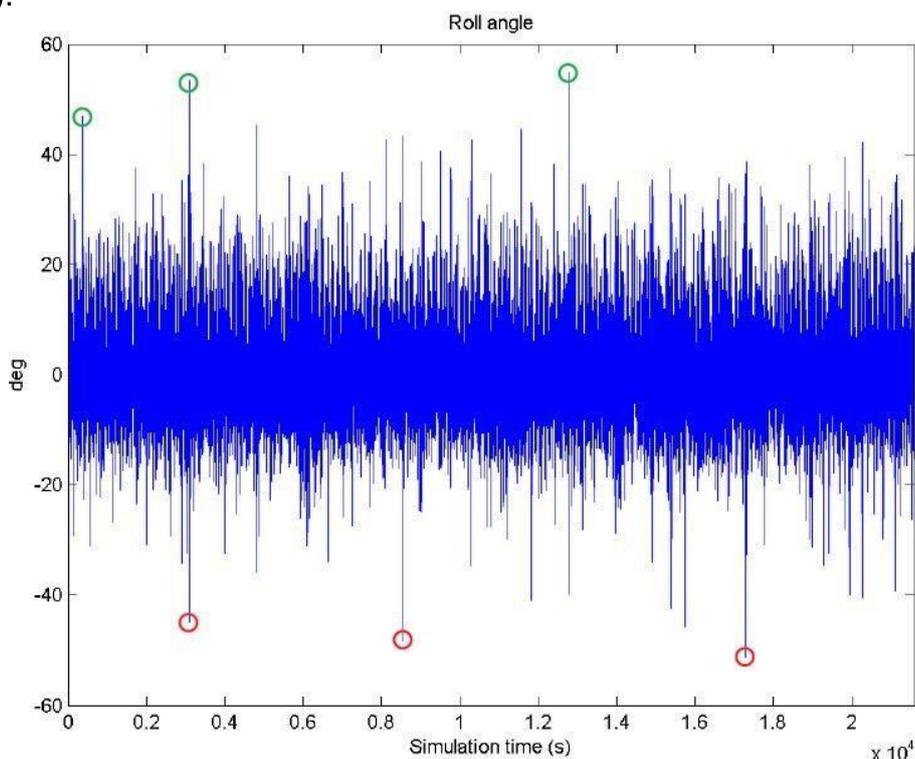
Les situations conduisant à ces valeurs importantes sont ensuite étudiées plus particulièrement, et rejouées en modifiant certaines conditions de calcul :

	cas 1	cas 4
Roulis :		
min.	29,2° bd	51,3° bd
max.	32,8° td	54,9° td
GM:		
min.	0,1 m	-0,2 m
max.	1,9 m	1,1 m

Les pics de roulis au-delà de 50° sont plus nombreux que pour les simulations de 30 minutes, même s'ils restent peu fréquents.

Les calculs réalisés sur le cas 4 mettent en évidence des angles de roulis importants, éventuellement en mesure de mettre en danger le navire.

En particulier, on observe 6 pics de roulis supérieurs à 45° (3 sur bâbord, 3 sur tribord).



Trois pics sur bâbord : $-45,5^\circ$ à 3104 s, -54° à 8552 s et $-54,5^\circ$ à 17304 s.

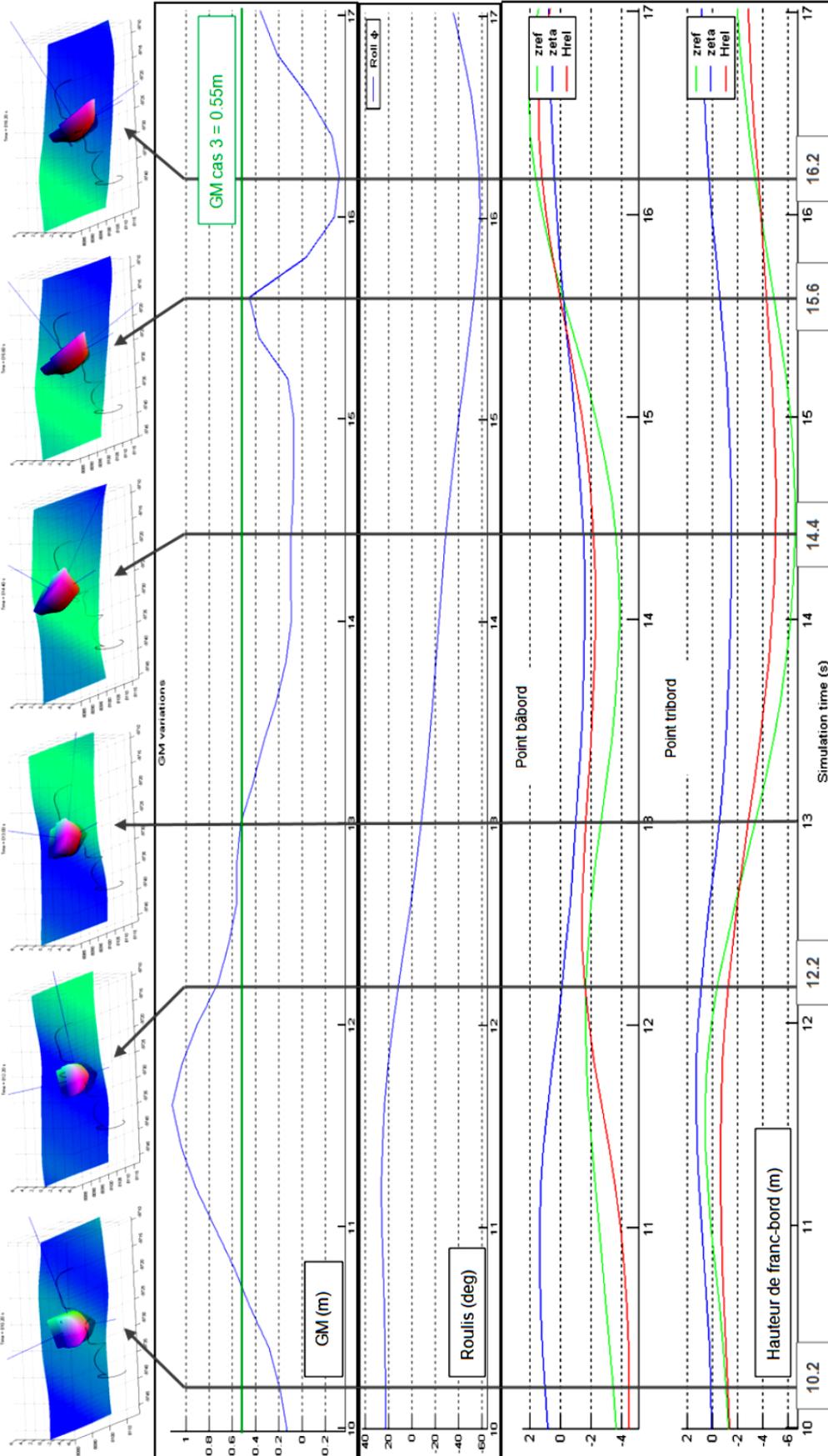
Le deuxième pic sur tribord ($53,4^\circ$ à 3108 s) est une conséquence du fort roulis sur bâbord observé à 3104 s.

Dans les instants de la simulation autour de la séquence étudiée, l'incidence de la houle par rapport au navire (légèrement sur l'avant bâbord) n'est pas exactement celle de 60° utilisée en entrée. La vitesse du navire est en effet réglée pour rester manœuvrant avec le pilote utilisé, mais des variations significatives de gisement par rapport à la houle sont observées, liées au mouvement de lacet. Ces variations existent probablement aussi dans la réalité. Des séquences très similaires sont observées avec des gisements de houle légèrement différents.

Le premier cadre de la figure ci-après représente le "GM" instantané en fonction du temps. Le deuxième cadre représente l'angle de roulis en fonction du temps.

Les signaux du troisième cadre de la figure sont :

- Zeta : élévation de surface de l'eau par rapport à la surface libre au repos (positive vers le bas) calculée à la verticale de deux points du bateau. Ces deux points sont les extrémités arrière haute bâbord (graphe correspondant au 'point bâbord') et tribord (graphe correspondant au 'point tribord') du pavois.
- Zref : hauteur du point considéré du bateau (point bâbord ou point tribord) par rapport à la surface libre au repos ; correspond à la hauteur du point considéré dans le repère fixe (Zref est donc positif lorsqu'il est sous la surface libre au repos).
- Hrel : hauteur relative du point du bateau considéré par rapport à la surface libre ; correspond à la hauteur de franc-bord instantanée (Zref-Zeta). **Lorsque Hrel est positif, le niveau d'eau passe au-dessus du pavois.**



1.5.5 Simulations courtes

Les calculs courts s'appuient sur les résultats ci-dessus. Ils permettent de modifier les conditions de calcul à des instants critiques pour le navire.

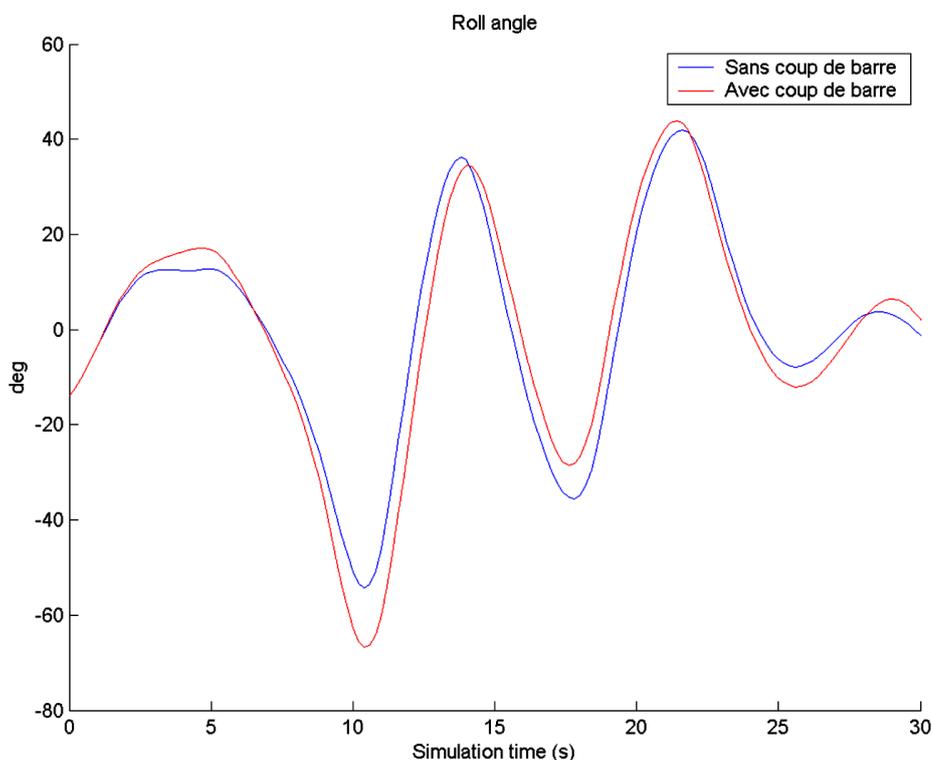
Effets d'un coup de barre :

L'influence d'un coup de barre a été étudiée sur le cas 4 (GM le plus dégradé) lors d'un coup de roulis au temps 17304 s de la simulation très longue.

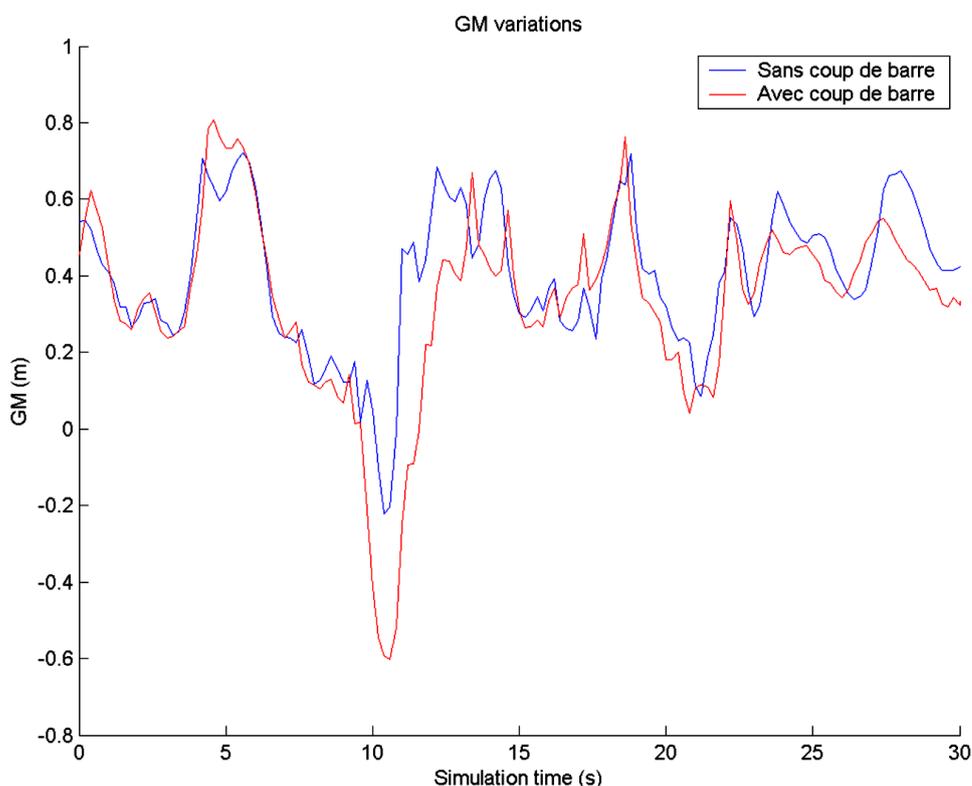
Plusieurs simulations courtes ont été réalisées en reprenant cette situation et en donnant un coup de barre (barre à 30°) à différents instants avant le pic de roulis : 6 simulations ont été lancées, avec un déclenchement du coup de barre 12s, 10s, 8s, 6s, 4s et 2s respectivement avant le pic de roulis.

L'effet est maximal pour un coup de barre se produisant 10 secondes avant le pic de roulis. Les signaux de roulis et de GM du cas 4 sans coup de barre et avec le coup de barre se produisant 10 s avant le pic de roulis.

Dans les autres cas testés, l'augmentation de l'angle de roulis n'est pas aussi significative.



Le roulis minimal atteint est de -66° (sur bâbord). Le coup de barre accentue donc de manière significative l'effet de roulis fort. L'instant du déclenchement du coup de barre, 10 s avant le pic de roulis, précède légèrement le moment où le navire commence à rouler sur bâbord. Le coup de barre doit ainsi accentuer la vitesse de roulis à l'origine de la valeur extrême de roulis.



La réduction du GM minimum, qui passe de $-0,2$ m sans coup de barre à $-0,6$ m avec coup de barre, est aussi très importante.

Effets d'un pendule :

L'effet d'une poche de poisson d'1,5 tonne suspendue se fait par l'intermédiaire d'un pendule de 2 m dont le point d'accroche est la poulie de caliorne.

Le pendule est modélisé par une masse ponctuelle à deux degrés de liberté : la masse ponctuelle peut se déplacer dans le sens longitudinal (angle β) et dans le sens latéral du navire (angle α). Aucun amortissement n'est appliqué aux mouvements du pendule.

Des validations élémentaires ont été réalisées pour vérifier l'intégration du pendule au simulateur. Cependant, aucune vérification complète n'a pu être réalisée faute de données de validation : les résultats obtenus avec les simulations impliquant le pendule doivent donc être considérés avec précaution.

Le pendule ainsi modélisé a une période propre de 2,8 s ; cette période est inférieure à celles du navire (5,8 s pour le cas 4) et de la houle (10 s).

L'effet de ce pendule sur les mouvements du navire est étudié pour les 3 situations critiques avec roulis sur bâbord du cas 4 : -45,5° à 3104 s, -54° à 8552 s et -54,5° à 17304 s.

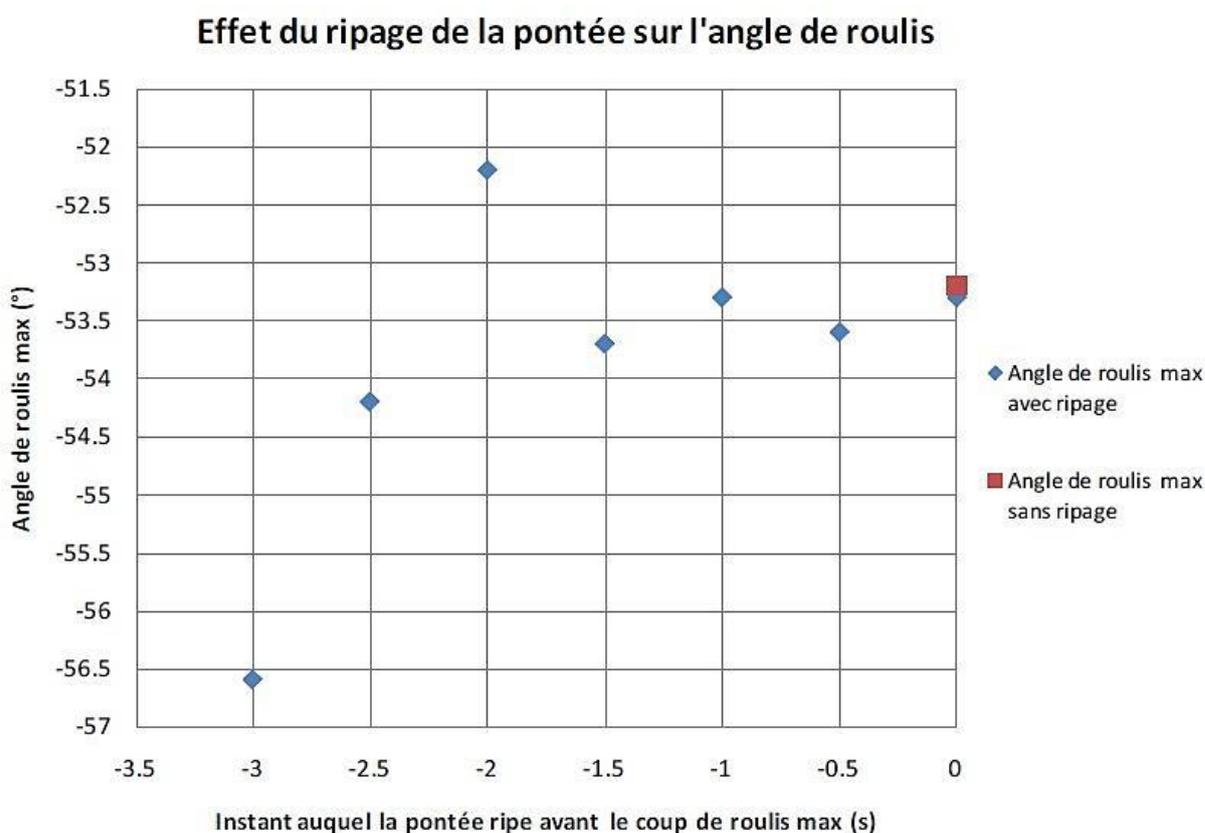
Les mouvements du pendule peuvent être très importants (jusqu'à plus de 100° par rapport au référentiel fixe), notamment après l'extremum du roulis ; ceci est dû au fait que le pendule n'est pas amorti. Les mouvements précédant le coup de roulis paraissent néanmoins réalistes. Pour ces simulations, seuls les mouvements du navire et du pendule avant le coup de roulis doivent donc être considérés :

	Roulis minimum		GM minimum	
	sans pendule	avec pendule	sans pendule	avec pendule
cas 4 (t=3104 s)	-45,5°	-58,1°	-0,1 m	-0,3 m
cas 4 (t=8552 s)	-54,0°	-57,3°	0,1 m	-0,1 m
cas 4 (t=17304 s)	-54,5°	-34,8°	-0,1 m	0,1 m

Les résultats montrent que la poche suspendue peut être une cause accentuant le fort roulis du navire ; l'augmentation du roulis n'est cependant pas systématique. Si le pendule dégrade la stabilité statique du navire, son influence sur une séquence donnée n'est pas nécessairement négative, et dépend fortement des phases entre mouvements du navire et du pendule. Il est difficile de conclure mais il ne semble pas que la masse suspendue puisse avoir un effet déterminant dans le chavirage.

Effets du ripage de la pontée :

L'étude de l'effet du ripage de la pontée est réalisée sur un pic de roulis bâbord (8852 s de la simulation très longue du cas 4) en déplaçant, en 0,2 s, 500 kg du centre du bateau à 2,3 m de l'axe longitudinal, conformément à la position de la pontée décrite dans le rapport *BEAMer*. De même que pour le coup de barre, le déplacement de cette masse est réalisé à différents instants entre le moment où le navire commence à rouler sur bâbord et l'instant où l'angle de roulis est minimal (le navire commence à rouler sur bâbord 3 secondes avant d'atteindre le pic de roulis). Une simulation est réalisée pour chacun de ces instants.



Le ripage de la pontée, tel que défini ici, augmente globalement l'angle de roulis mais pas de manière significative (3° environ au maximum dans le cas présent).

Effets de la cambrure de la houle :

L'effet d'une augmentation de cambrure de la houle a été simulé sur un petit pic de roulis du cas 1 (960 s) et sur un pic du cas 4 (17304 s).

L'augmentation de la cambrure est réalisée de manière artificielle en multipliant la hauteur de houle de base par un gain donné ; un gain de 1 aboutit donc à la houle utilisée pour les simulations très longues.

Pour les simulations réalisées ici, le gain est à 1 au début des simulations, puis passe linéairement de 1 à la valeur du gain voulu entre 2 instants donnés, et reste enfin à cette valeur de gain jusqu'à la fin de la simulation. L'augmentation du gain se fait sur 5 s environ, soit une demi-période de la houle. Le gain final vaut 2 pour le cas 1 et 1.15 pour le cas 4.

Pour le cas 1, l'extremum de roulis sur bâbord passe de -16° à -21° lorsque l'on augmente la cambrure ; l'extremum de roulis sur tribord passe de 20° à 29° .

Pour le cas 4, l'augmentation de la cambrure engendre un pic de roulis (sur bâbord) plus important de 29° (-54° sans cambrure, -83° avec cambrure).

L'augmentation de cambrure, très forte dans le cas 1 (hauteur de vague multipliée par 2), augmente relativement peu le maximum de roulis et ne fait pas chavirer le bateau. Il faut que celui-ci soit déjà dans une situation critique pour qu'une cambrure forte ait une réelle influence sur la stabilité.

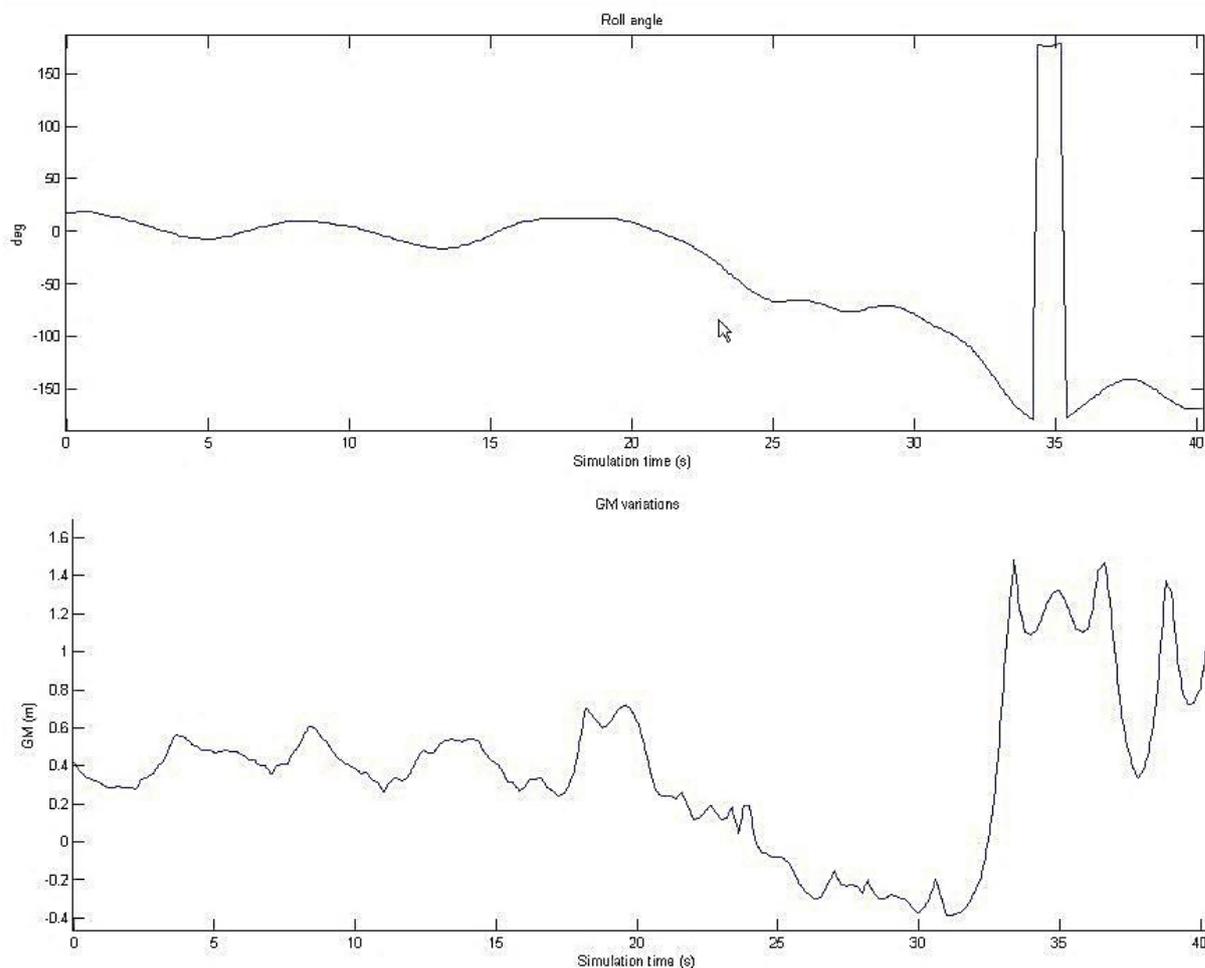
Note : la modélisation d'une augmentation de cambrure dans le simulateur est très simplifiée et probablement peu représentative de la réalité; les résultats des simulations présentées, s'ils donnent des indications générales, sont à utiliser avec précaution.

Envahissement simulé par une masse supplémentaire :

La séquence détaillée au § 1.5.4 montre que l'envahissement peut se produire au niveau du pont principal pour les angles de roulis importants. Le simulateur n'intégrant pas de modèle d'envahissement, celui-ci n'est pas représenté quand il se produit.

Une simulation a cependant été lancée en modélisant l'envahissement de manière simplifiée par une masse statique supplémentaire de 14 tonnes au niveau du pont principal, décalée sur bâbord. Cette masse correspond environ à un remplissage du pont principal sur sa longueur (environ 7 m), la hauteur du pavois (environ 1 m) et une partie de sa largeur (remplissage de 2 m sur les 6 m de large).

Le cas rejoué est celui donnant le roulis le plus fort pour le cas 4 (à 17304 s). Les signaux de roulis et de GM font apparaître que le navire chavire :



1.5.6 Critères de perte de stabilité

La description de l'accident faite par le *BEA* mentionne que le navire a subi un roulis très important de façon soudaine, sans excitation préalable du navire à sa période propre en roulis. Les simulations présentées dans les paragraphes précédents tendent à corroborer cette possibilité (à condition cependant d'être déjà dans des conditions dégradées). L'analyse des signaux correspondant à ce comportement fait penser à un phénomène de perte de stabilité pure en roulis. La caractérisation de ce phénomène pour le cas de l'Epaulard est abordée ici.

La perte de stabilité pure peut être définie comme étant liée à une diminution du GM instantané en deçà d'une valeur seuil, pendant une durée supérieure à une durée seuil. A ce jour, les valeurs de ces seuils, qui permettraient de caractériser objectivement une situation de perte de stabilité pure, ne sont pas définies. Cependant

la méthode est intéressante pour comparer plusieurs situations et en tirer des observations relatives à la stabilité du bateau étudié.

Une simulation permettant de rejouer le roulis maximal du cas 4 (roulis sur tribord, temps 12802 s de la simulation très longue) est effectuée.

Pour cette simulation, un GM critique de 0,2 m est choisi arbitrairement. Pour plusieurs cycles de mouvements du bateau, le temps durant lequel le GM est inférieur à cette valeur est retenu, rapporté à la période de résonance en roulis du cas considéré.

Mouvement	Temps	% de la période de roulis	Angle de roulis
1	3,15 s	54%	54° bd
2	0,6 s	10%	40° td
3	0,85 s	15%	18° td

Ces résultats montrent que des angles de roulis très importants sont atteints lorsque le temps pendant lequel le GM est inférieur au GM critique dure environ 50% de la période en roulis du navire.

Ainsi, le GM n'est pas une donnée à considérer seulement au moment le plus critique : l'évolution de cette valeur peut renseigner, voire caractériser, une situation de perte de stabilité pure. Une phase relativement longue (vis-à-vis de la période de résonance en roulis du bateau) pendant laquelle le GM reste faible peut donc créer une phase critique de perte de stabilité.

1.6 Conclusion de l'étude SIREHNA

Après une phase de recalage et de vérifications (hydrostatique et tenue à la mer linéaire), un simulateur de mouvements non-linéaires a été mis en œuvre, pour différentes configurations du navire, certaines proches des conditions normales d'utilisation du navire, d'autres correspondant à des conditions dégradées.

En particulier, des simulations dites "très longues" (6 h) ont été lancées avec 4 cas de chargement afin d'identifier des situations potentiellement critiques pour le navire, hors de son comportement linéaire. Moins de 10 occurrences d'angle de roulis supérieur à 50° apparaissent pour l'ensemble des 2 cas de chargement les plus

défavorables (chargements avec carène liquide dans la cale à poisson). Aucune n'apparaît pour les 2 cas de chargement les plus proches du chargement nominal du navire.

Les situations ponctuelles amenant à de forts angles de roulis ont été rejouées sur des temps courts (quelques dizaines de secondes), en modifiant certains paramètres tour à tour (angle de barre, mouvements d'une masse suspendue, ripage de la pontée, cambrure de la houle). Ces différents paramètres peuvent, à différents niveaux, jouer le rôle de facteur aggravant vis-à-vis de la stabilité en roulis du navire.

Parmi ces facteurs aggravants, le coup de barre à un instant défavorable semble être le plus influent, mais aucun de ces facteurs n'est décisif.

En revanche, l'analyse des simulations réalisées met en évidence, sur les quelques cas potentiellement critiques détectés, un comportement type, pouvant correspondre à une situation de perte de stabilité pure. Ce phénomène est lié aux non-linéarités de comportement du navire, en particulier à l'évolution de ses caractéristiques de rappel hydrostatique lors de ses mouvements sur les vagues, et n'apparaît que dans des combinaisons de mouvements et de houle particulières, qui le rendent exceptionnel.

Ce phénomène est aujourd'hui identifié par les instances réglementaires (cf. IMO 2008 IS Code) parmi les problèmes de stabilité dynamique auxquels les navires peuvent faire face, mais les critères en permettant une évaluation objective ne sont pas encore clairement établis.

La conclusion globale des analyses réalisées est que le navire, dans ses conditions de chargement nominales et dans les conditions de houle rencontrées, n'est pas susceptible de subir des coups de roulis pouvant entraîner un chavirage.

Dans des conditions dégradées (carène liquide dans la cale à poisson notamment), il est possible que des événements singuliers, de type "perte de stabilité pure", apparaissent ponctuellement, conduisant alors à des angles de roulis inhabituels, susceptibles de provoquer un enchaînement conduisant au chavirage.

2. SYNTHÈSE DE L'ÉTUDE DGA TECHNIQUES HYDRODYNAMIQUES

2.1 Approche DGA Techniques hydrodynamiques (DGA TH)

DGA TH a procédé en 3 étapes :

Étape 1 : Reproduire les calculs réalisés par ORION Naval pour l'enquête du *BEA*mer afin de définir une configuration de référence ;

Étape 2 : Analyse paramétrique, mise sur houle figée, prise en compte du vent à partir de la configuration de référence. Définition du flotteur « cabine » ;

Étape 3 : Analyse critique des précédents résultats (stabilité statique) en réalisant des simulations dans les conditions du chavirement, Réalisation de polaires d'opérabilité.

2.2 Étapes 1 et 2, moyens mis en œuvre

Le logiciel utilisé pour réaliser les calculs est FASTABI, développé par DGA TH. Le navire ainsi que ses capacités et compartiments sont définis par un maillage 3D, ce qui permet de prendre en compte de façon plus précise les formes complexes.

Il permet de réaliser une large gamme de calculs hydrostatiques (équilibrage en enfoncement, assiette et gîte, table hydrostatique, ...) et de stabilité (courbe de GZ, courbe de KG max, ...) à l'état intact ou après avarie. L'influence des capacités peut être prise en compte par calculs directs (le code recalculé à chaque fois la position du centre de gravité de chaque capacité en fonction de l'attitude du navire) ou en interpolant des valeurs préalablement tabulées dans un fichier (Tanktable).

Tous ces calculs peuvent être confrontés à divers critères afin de réaliser une analyse de stabilité réglementaire.

La version du logiciel utilisée est FASTABI V2.1.

Les formes du navire ayant été fournies sous format papier, il a d'abord été nécessaire de numériser ces données sous forme de fichiers de points.

FASTABI utilisant une description 3D du navire, il a ensuite fallu générer des couples à partir de ces points, puis une surface fermée définissant le flotteur étudié. Cette opération a été réalisée avec le logiciel RHINOCEROS qui est un logiciel de CAO du commerce travaillant principalement sur des modèles surfaciques. Il permet notamment d'interpoler une surface entre deux courbes et de lisser les surfaces.

Une fois la surface générée, il faut réaliser un maillage de cette surface pour pouvoir l'utiliser dans FASTABI. Cette opération a été réalisée à l'aide du logiciel ICEM, logiciel de maillage du commerce.

2.3 Données d'entrée

2.3.1 Plan de forme

La forme de la carène a été fournie sous la forme d'un devis de tracé et de plans de structure, sous format papier.

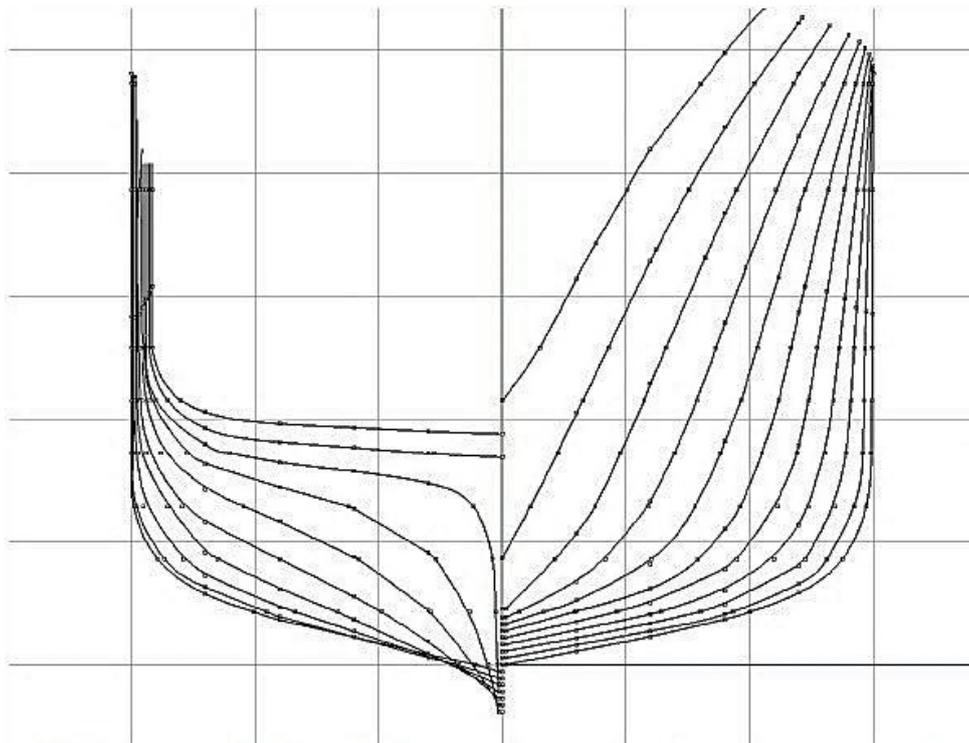


Illustration 1: Plan de forme numérisé - Coupe transversale

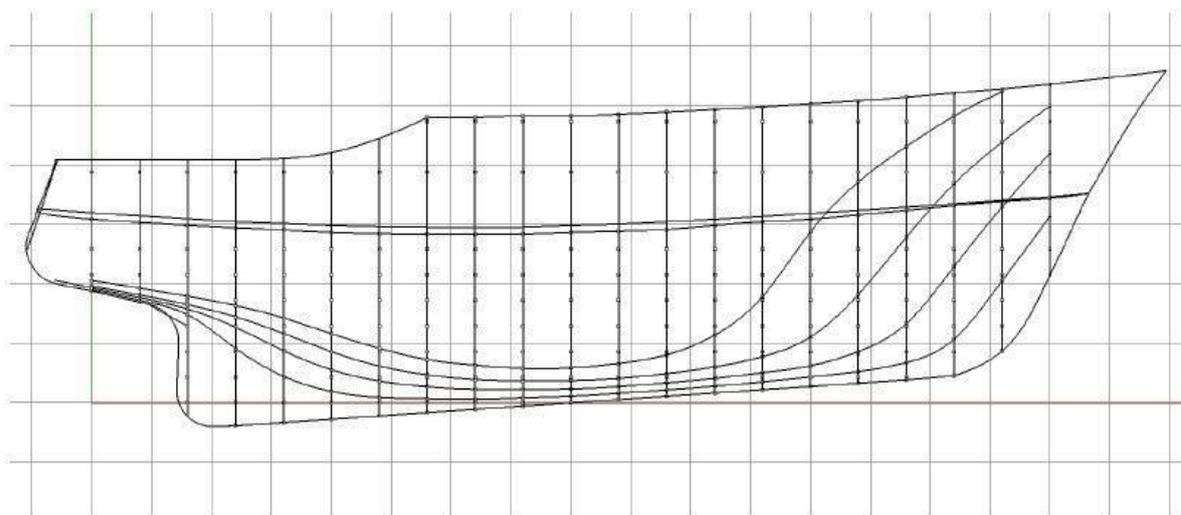


Illustration 2: Plan de forme numérisé - Coupe longitudinale

La coupe longitudinale, au-dessus de la 10H, montre que les formes avant et arrière du navire ne sont plus décrites par des couples. La génération d'une surface en 3 dimensions de la carène requiert donc d'interpréter les plans du navire afin d'en interpoler les formes. Cela peut créer quelques écarts sur les caractéristiques hydrostatiques du navire.

Principales caractéristiques :

Longueur hors-tout	19,5 m
Longueur entre PP	16,0 m
Largeur hors-tout	6,01 m
Tirant d'eau AV	1,90 m
Tirant d'eau AR	2,80 m
Creux à la PP milieu	2,83 m
Franc-bord	0,53 m

2.3.2 Définition du flotteur étanche

Deux définitions du flotteur étanche ont été utilisées dans les calculs réalisés par ORION Naval : l'un se limitant au pont principal – soit environ la 14H – et l'autre se limitant au pont supérieur – soit environ la 24H.

La première définition est assez pénalisante, car elle considère que les locaux sur le pont principal (cabine, cuisine et magasin) ne sont pas étanches, or on peut penser que ceux-ci, s'ils sont fermés, contribuent à la stabilité du navire. La deuxième définition est plutôt optimiste puisqu'elle considère que toute la partie avant est étanche, ce qui n'est pas le cas puisqu'une coursive permet d'accéder à la cale à poissons.

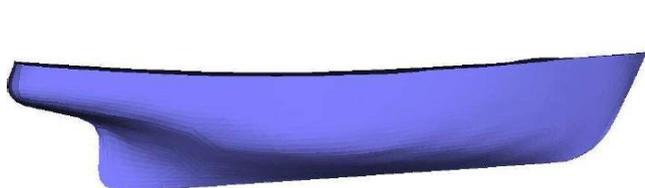


Illustration 3: Définition du flotteur jusqu'au pont principal

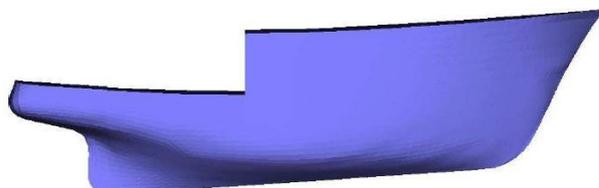


Illustration 4: Définition du flotteur jusqu'au pont supérieur

2.3.3 Chargement

Le chargement du navire en configuration légère est donné dans le tableau ci-après. Ces valeurs proviennent de l'expérience de stabilité effectuée au neuvage en 1979. Elles ne prennent pas en compte les différentes modifications effectuées sur le navire qui ont pu changer le déplacement et le KG.

Navire léger :

Déplacement du navire	82,90 t
LCG	6,910 m
YG	0
KG	2,425 m

Remplissage des capacités :

- Caisses gasoil Bd et Td : 2,47 t ;
- 1 t dans chaque caisse Eau Douce ;
- Autres caisses : pleines à 100%

Éléments de chargement :

- 4 membres d'équipage ;
- 1 t de poisson sur le pont ;
- 1,5 t en suspens au-dessus du pont ;
- 3 t de glace dans la cale à poisson.

Le cas de chargement nominal est centré sur l'axe navire de telle sorte qu'il n'y ait pas de gîte. En pratique, l'équipage utilise les soutes à gasoil et à eau douce pour obtenir une gîte nulle. Le deuxième cas de chargement étudié par ORION Naval, plus défavorable, considère la pontée décalée de 2,3 m et la charge suspendue de 0,5 m, toutes deux sur bâbord. Il en résulte un centre de gravité décalé de 0,027 m sur bâbord. Le KG est identique.

À noter que selon les hypothèses du pendule pesant simple, la charge suspendue est, en statique, toujours à la verticale de son point d'accroche. Les mêmes hypothèses sont utilisées par ORION Naval et FASTABI. C'est à dire positionnement de la charge suspendue au point d'accroche (décalé latéralement pour certains cas). La période propre d'une charge suspendue de 4,65 m est de 4,3 s.

Sur les plans, il existe une caisse huile moteur et une caisse huile usée, collées l'une à l'autre. ORION Naval a fait le choix de ne modéliser que la caisse huile moteur, celle-ci étant alors remplie au maximum, la caisse huile usée étant supposée vide.

2.4 Liste des calculs

2.4.1 Calcul de validation

Dans un premier temps, les cas de calculs effectués par ORION Naval ont été relancés afin de vérifier la modélisation du flotteur utilisée dans FASTABI, ainsi que la prise en compte des capacités et du chargement. Cette partie est divisée en 2 groupes de calculs :

- calculs des caractéristiques hydrostatiques du flotteur, des volumes maximum des capacités et de leur positionnement dans le navire ;
- calculs de la courbe de GZ pour différentes configurations.

2.4.2 Analyse paramétrique

Dans un deuxième temps, une étude de sensibilité sur différents paramètres est réalisée.

Les paramètres étudiés sont :

- la prise en compte du vent,
- la prise en compte de la dissymétrie de l'emménagement du pont principal,
- la variation des hydrostatiques en présence d'une houle figée,
- la prise en compte de carène liquide dans la cale à poisson et dans le compartiment moteur.
- la prise en compte du vieillissement du navire (augmentation forfaitaire du KG et du déplacement).

L'influence de chacun de ces paramètres est étudiée via une analyse de stabilité réglementaire. A chaque fois, le logiciel FASTABI est utilisé pour déterminer la courbe de GZ et l'analyser afin de confronter les résultats avec les critères réglementaires. Les critères utilisés sont ceux actuellement en vigueur pour les navires de pêche d'une longueur inférieure à 24 m et d'une longueur hors-tout supérieure à 12 m.

À noter qu'il est possible que ces critères aient évolué depuis 1979, date de la mise à l'eau de *L'ÉPAULARD*.

2.5 Validation de la modélisation

2.5.1 Caractéristiques hydrostatiques du navire

Un calcul de la table hydrostatique de *L'ÉPAULARD* a été réalisé avec FASTABI permettant de caractériser le flotteur à l'état intact pour différents tirant d'eau. Les résultats obtenus sont le déplacement, la position longitudinale du centre de carène et du centre de la surface de flottaison (voir illustration 6), la position verticale du centre de carène et du métacentre en fonction du tirant d'eau (voir illustration 7). Les résultats ont été comparés à ceux obtenus par ORION Naval, ainsi qu'aux courbes hydrostatiques fournies par le chantier A. MERRE.

Globalement, les résultats de FASTABI sont en accord avec les valeurs fournies par ORION Naval et le chantier. Le déplacement obtenu pour les grands tirants d'eau est légèrement plus faible dans FASTABI. Cela pouvant être imputé aux extrémités avant et arrière du navire dont la description varie entre ARGOS et FASTABI. Le biais reste cependant faible puisque pour un tirant d'eau de 2,58m, l'écart sur le déplacement est seulement de 5 t, soit 3% du déplacement total.

2.5.2 Volume des capacités

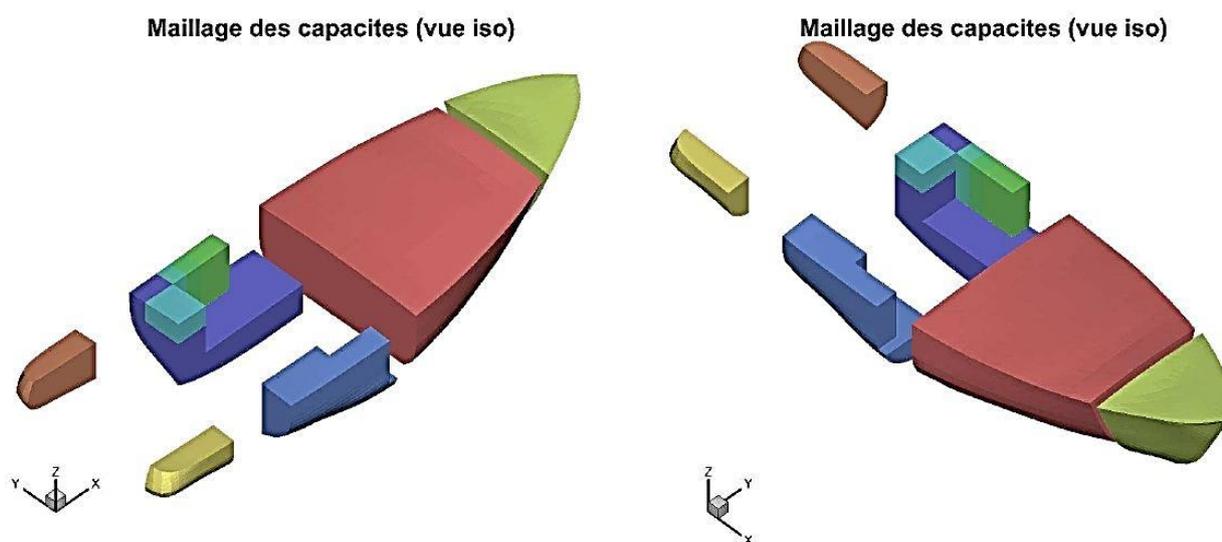


Illustration 8: Visualisation des capacités dans Fastabi

Pour la majorité des capacités, la modélisation faite dans FASTABI correspond à celle faite par ORION Naval.

Il existe cependant un écart plus important sur les caisses à eau douce. Celles-ci se situent à l'arrière du navire et épousent les formes de la carène à cet endroit. Comme précisé au paragraphe 2.3.1, les formes arrière sont quelque peu libres d'interprétation, ce qui peut expliquer un écart.

Cependant, s'il est un peu élevé en pourcentage, en valeur absolue, cet écart reste faible et n'a pas d'incidence sur l'équilibre global du navire.

Les masses utilisées pour le remplissage proviennent des déclarations faites par l'équipage, celles-ci pouvant être approximatives.

Orion Naval Engineering a délibérément placé toutes les capacités sur l'axe navire de façon à assurer une gîte nulle. En réalité, le centre de gravité du chargement, basé sur le remplissage des capacités tel qu'il est donné ci-dessus, est décalé de 0,038 m sur bâbord, ce qui entraîne une gîte à l'équilibre de 2,94° sur bâbord.

Une telle gîte est peu vraisemblable dans la pratique, d'autant que l'équipage a les moyens de la corriger en modifiant la répartition de l'eau douce et du gasoil entre les capacités tribord et bâbord.

En agissant uniquement sur les caisses à gasoil, il faut, pour revenir à gîte nulle, transférer 0,99 t de gasoil de bâbord vers tribord. Les modifications sur le chargement global du navire sont assez faibles – modification de quelques millimètres de la position longitudinale et verticale du centre de gravité – et peuvent être négligées. Il semble donc plus réaliste d'utiliser ce chargement équilibré pour l'étude paramétrique.

2.5.3 Calibration de la cale à poisson

La cale à poisson n'est pas à proprement parler une capacité, puisqu'en fonctionnement normal elle ne contient pas d'eau. Étant données ses dimensions – son volume total représente la moitié du volume du navire – il est important de bien vérifier sa modélisation et notamment l'augmentation de KG due aux effets de carène liquide.

Globalement, les valeurs obtenues sont très proches de celles d'ORION Naval.

Seul le volume total est légèrement plus important – 53,74m³ dans FASTABI au lieu de 51,87 m³ dans ARGOS.

2.5.4 Courbe de GZ – eau dans la cale à poisson

De même que pour le navire léger et le chargement « solide », les calculs de courbes de GZ avec de l'eau de mer dans la cale à poisson ont été réalisés afin de vérifier la prise en compte de la carène liquide dans cette capacité. Les calculs ont tous été réalisés avec le chargement décalé et équilibré.

L'illustration page suivante compare les résultats obtenus par FASTABI avec ceux d'ARGOS.

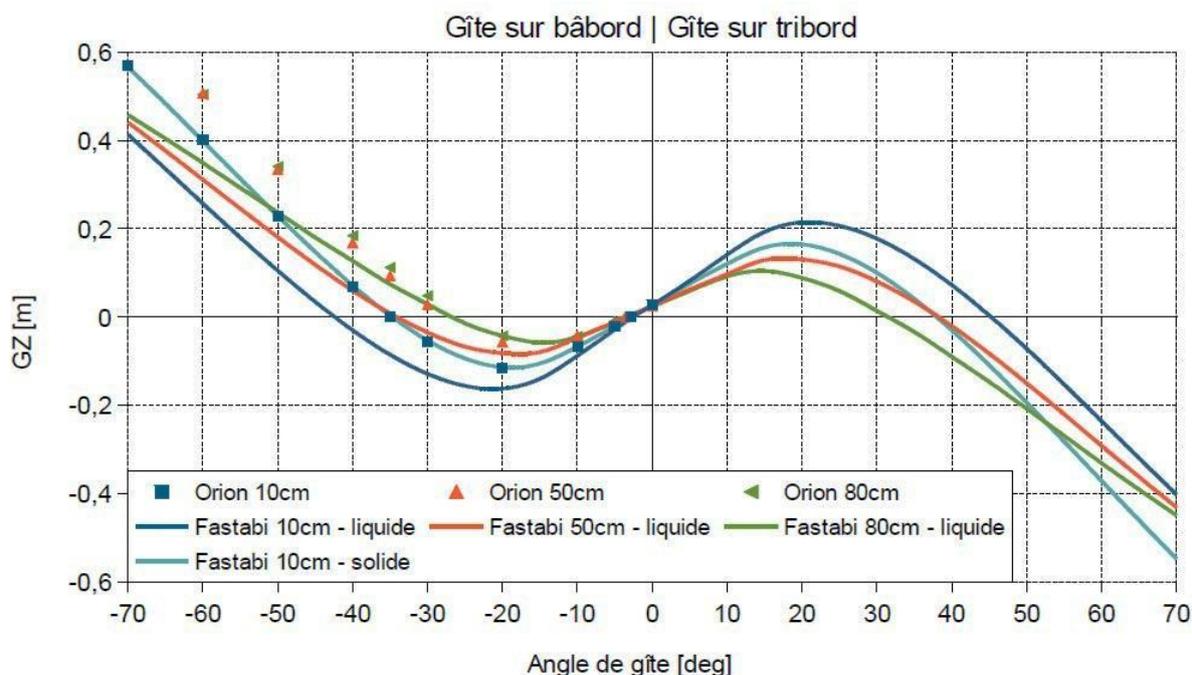


Illustration 15: Courbe de GZ - Chargement décalé, navire limité au pont principal, eau dans la cale à poissons

Les résultats obtenus avec FASTABI sont sensiblement différents de ceux d'ARGOS, principalement aux petits remplissages. Seule la courbe « FASTABI 10cm, solide » coïncide parfaitement avec les résultats Argos, ce qui voudrait dire que l'écart provient bien de la prise en compte de la cale à poisson.

L'écart constaté sur les courbes de GZ aux grand angles est donc dû à la façon de prendre en compte les effets de carène liquide. Là où Argos calcule, à gîte nulle, une correction du KG qui sera ensuite appliquée à tous les angles, FASTABI calcule pour chaque angle la position du centre de gravité de la masse de liquide, puis le bras de levier correspondant.

Cette approximation est souvent utilisée dans les règlements car elle facilite les calculs et reste, dans la majorité des cas, conservative. Pour la suite de cette étude, le cas, considéré comme plus réaliste de FASTABI avec des capacités liquides, a été retenu.

2.6 Analyse paramétrique

2.6.1 Situation initiale

La situation de référence est donnée au § 2.3.3. Les cas dits « chargement centré » et « chargement décalé » sont successivement étudiés.

Afin de respecter les notations des dossiers de stabilité réglementaires, les angles de roulis sont désignés par θ .

Bien que ne figurant pas dans la présente synthèse, l'analyse détaillée dissocie les deux bords. Seule la valeur la plus défavorable est retenue.

		Flotteur « Pont principal »		Flotteur « pont supérieur »	
		Chargement centré	Chargement décalé	Chargement centré	Chargement décalé
<u>Conditions à satisfaire par la courbe des BLR *</u>	<u>Cibles</u>	<u>Valeurs réalisées</u>			
Gîte d'inclinaison θ [°]	$> 30^\circ$	43.23	43.23	52.67	52.67
Aire A2 [m.rad]	≥ 0.1	0.0919 sur Bd	0.0750 sur Bd	0.1250 sur Bd	0.1081 sur Bd
GZmax [m]	≥ 0.25	0.197 sur Bd	0.171 sur Bd	0.285 sur Td	0.269 sur Bd
Gîte pour GZmax [°]	$25.0 \leq \theta $	20.00 sur Bd	20.00 sur Bd	50.00 sur Td	50.00 sur Bd
GMT [m]	≥ 0.45	0.735	0.733	0.734	0.732
GZ [m] pour une gîte $> 30^\circ$	≥ 0.25	0.163 sur Bd	0.171 sur Bd	0.285 sur Td	0.269 sur Bd

Tableau 8: Critère de stabilité sur la configuration initiale

* BLR : bras de levier de redressement

Le flotteur étanche, lorsqu'il est limité au pont principal, ne répond pas au critère de stabilité.

Cela est dû au fait qu'aux grands angles, le franc-bord étant faible, la courbe de GZ retombe rapidement, ne garantissant pas suffisamment de réserve de stabilité.

En limitant le flotteur étanche au pont supérieur, le navire retrouve du volume dans les hauts. Ce qui permet, aux grands angles, d'augmenter la réserve de stabilité et de passer les critères imposés. Pour la suite de l'analyse, le flotteur étanche de référence sera limité au pont supérieur.

2.6.2 Prise en compte du vent

L'effet du vent est pris en compte via une pression forfaitaire uniforme appliquée à la surface de fardage longitudinale du navire.

Dans FASTABI, la surface de fardage et son centre de surface sont calculés automatiquement à partir d'un fichier de points décrivant cette surface. Le centre de la surface latérale immergée est situé, comme suggéré dans le règlement, à la moitié du

tirant d'eau. La surface des quilles anti-roulis et la surface de la quille massive ont été estimées à partir des plans fournis et de la CAO.

Surface des quilles anti-roulis et de la quille massive	[m ²]	4.49
Surface de fardage (calculée par FASTABI)	[m ²]	56.71
Centre de la surface de fardage (calculé par FASTABI)	[m/WL]	1.812
Tirant d'eau moyen sur quille	[m]	2.161
Centre de la surface latérale immergée (T/2)	[m]	1.081

Tableau 9: Données utilisées pour la prise en compte du vent

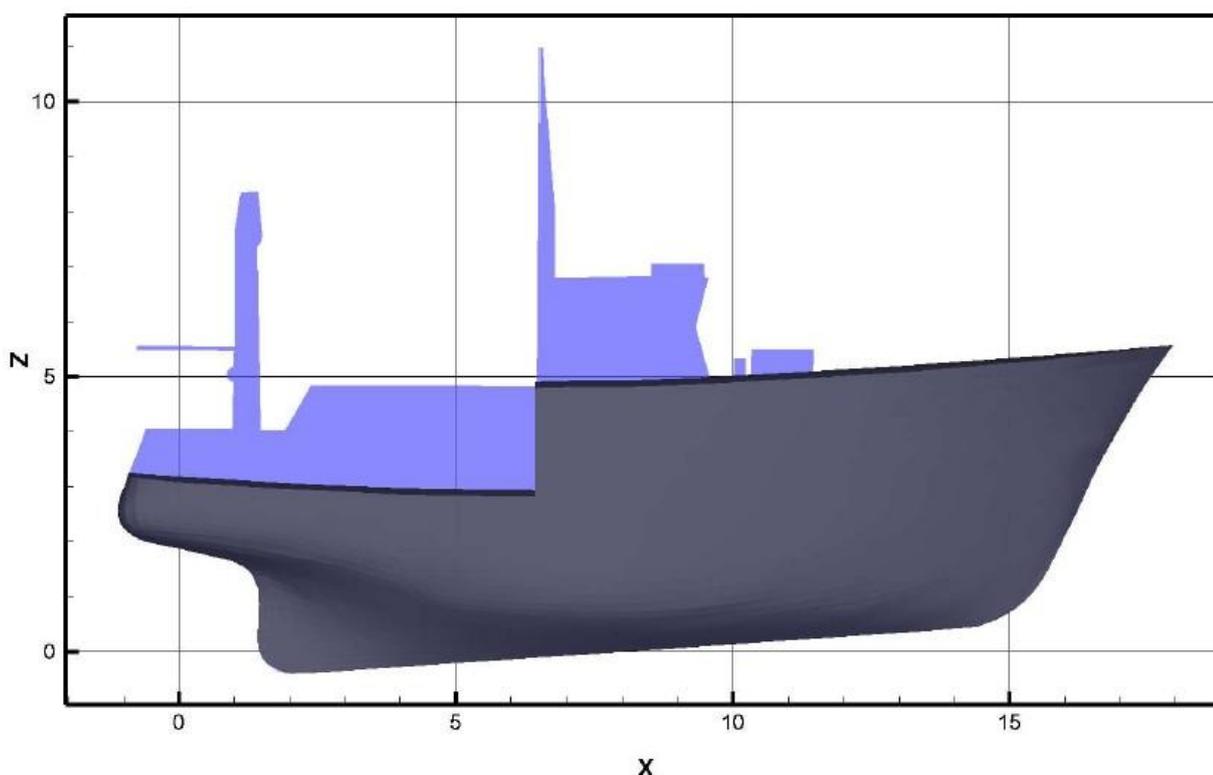


Illustration 19: Surface de fardage de l'Epaulard

		Flotteur « Pont principal »		Flotteur « Pont supérieur »	
		Chargement centré	Chargement décalé	Chargement centré	Chargement décalé
<i>Conditions à satisfaire par la courbe des BLR</i>	<i>Cibles</i>	<i>Valeurs réalisées</i>			
Gîte sous l'action du vent [°]	-	6.72	8.94	6.72	8.95
Gîte d'envahissement θ_f [°]	> 30°	43.23	43.23	52.67	52.67
Ratio A1 / A2 [-]	≥ 1	0.90 sur Bd	0.61 sur Bd	2.45 sur Bd	2.05 sur Bd

Tableau 10: Critère de stabilité - Prise en compte du vent

Le flotteur « Pont supérieur » respecte assez largement le critère de vent, que ce soit pour le chargement centré ou pour le chargement décalé, ce qui n'est pas le cas pour le flotteur « Pont principal ». Encore une fois, c'est le manque de réserve de stabilité aux grands angles qui pénalise ce flotteur.

Il faut noter que la prise en compte du vent en utilisant les critères réglementaires est plutôt « majorante » dans le sens où même si le règlement utilisé ne précise pas la vitesse du vent, on peut supposer que les pressions utilisées pour le calcul du moment inclinant sont dues à des vents forts. Or, le jour du naufrage de *L'ÉPAULARD*, le vent n'était que de 6 à 8 nœuds.

2.6.3 Modification du flotteur étanche pris en compte

Comme indiqué précédemment, limiter l'enveloppe étanche du navire au pont principal est un peu restrictif, car le navire possède sur le pont principal des locaux pouvant être considérés comme étant étanches (cuisine, cabines, magasin, ...). En revanche, considérer toute la partie avant – au-delà du couple 13 – du pont principal comme étanche est un peu optimiste, puisque la coursive menant à la cale à poisson, ainsi que la zone d'accès à cette cale sont « ouvertes ». Il y a, de plus, des ouvertures dans le bordé, au niveau du panneau d'accès de la cale pour évacuer l'eau qui se trouverait sur le pont.



Illustration 23: Ouverture dans le bordé au niveau de l'accès à la cale à poisson

D'un point de vue stabilité ces volumes ne devraient donc pas faire partie du flotteur étanche.

Un nouveau flotteur étanche a donc été dessiné, à partir des plans d'aménagement du navire.

Il s'agit en fait du flotteur limité au pont principal augmenté du magasin avant et des cabines sur bâbord et tribord. Ce flotteur modifié est par la suite désigné « flotteur cabine ». Comme le montre l'illustration ci-après, il présente une légère dissymétrie, due à l'aménagement du pont supérieur.

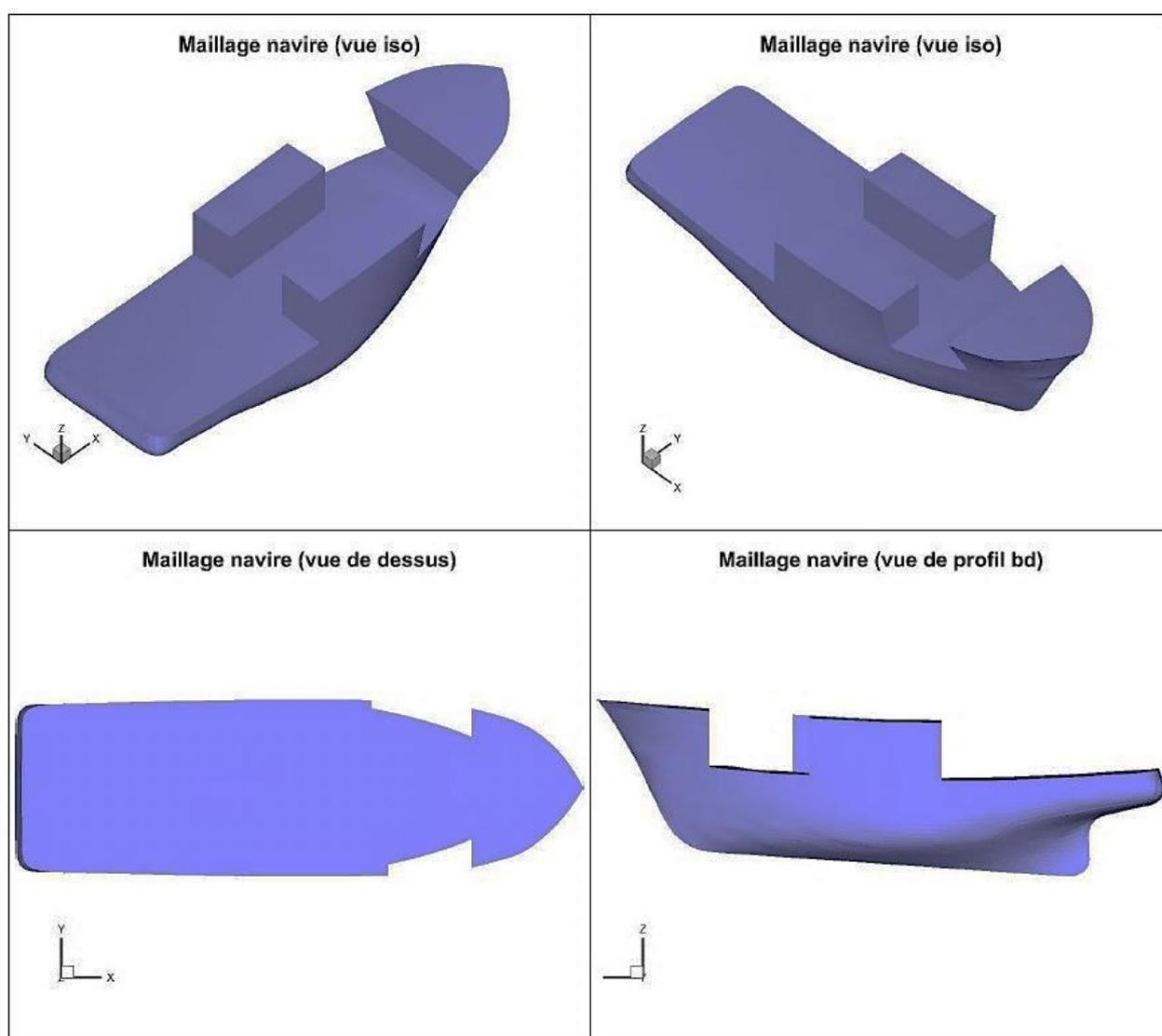


Illustration 25: Flotteur dit « Cabine »

Les volumes ajoutés au flotteur « Cabine » augmentent considérablement la stabilité du navire et permettent de respecter tous les critères, à l'exception de ceux nécessitant un GZ supérieur à 0,25 m.

Comme précisé dans le tableau, ce critère n'est pas respecté lorsque l'analyse est effectuée sur bâbord, avec une valeur maximum de GZ de 0,239 m. L'analyse sur tribord fournit une valeur de GZ de 0,250 m, soit exactement la valeur cible des critères. Comme ARGOS n'effectue l'analyse réglementaire que sur tribord, il est possible que la vérification sur ce navire ait été faite sur ce flotteur, sans prendre en compte la dissymétrie bâbord/tribord.

Dans le cas d'un chargement décalé, sur bâbord de surcroît, le GZ_{MAX} s'éloigne encore un peu de la valeur cible.

		Flotteur « Pont principal »	Flotteur « Cabine »	Flotteur « Pont supérieur »	Flotteur « Cabine »
		Chargement centré			Chargement décalé
<u>Conditions à satisfaire par la courbe des BLR</u>	<u>Cibles</u>	<u>Valeurs réalisées</u>			
Gîte d'envahissement θ_f [°]	> 30°	43.23	49.74	52.67	49.74
Aire A2 [m.rad]	≥ 0.1	0.0919 sur Bd	0.1218 sur Bd	0.1250 sur Bd	0.1049 sur Bd
GZmax [m]	≥ 0.25	0.197 sur Bd	0.239 sur Bd	0.285 sur Td	0.216 sur Bd
Gîte pour GZmax [°]	$25.0 \leq \theta$	20.00 sur Bd	35.00 sur Bd	50.00 sur Td	35.00 sur Bd
GMT [m]	≥ 0.45	0.735	0.734	0.734	0.732
GZ [m] pour une gîte > 30°	≥ 0.25	0.163 sur Bd	0.239 sur Bd	0.285 sur Td	0.216 sur Bd
Angle sous l'action du vent [°]	-	6.72	6.72	6.72	8.97
Ratio A1 /A2 [-]	≥ 1	0.90 sur Bd	2.17 sur Bd	2.45 sur Bd	1.78 sur Bd

Tableau 11: Critères de stabilité du flotteur "Cabine" - Chargement centré

Le flotteur dit « Cabine » est, de l'avis de DGA TH, le plus représentatif du navire à prendre en compte pour les calculs de stabilité. Il a cependant un GZ légèrement trop faible pour satisfaire les critères de stabilité réglementaires.

2.6.4 Carène liquide dans la cale à poisson ou le compartiment moteur

Cale à poisson :

ORION Naval a fait une étude de sensibilité de la courbe de GZ au remplissage de la cale à poisson. Il a été montré que les résultats obtenus sont globalement plus pessimistes que ceux obtenus avec FASTABI, car Argos prend en compte la correction de surface libre à gîte nulle et l'applique pour tous les angles. De plus, l'étude n'a été réalisée que pour le cas « Chargement décalé ».

		Chargement décalé	+ 10cm d'eau	+ 20cm d'eau	+ 30cm d'eau
<u>Conditions à satisfaire par la courbe des BLR</u>	<u>Cibles</u>	<u>Valeurs réalisées</u>			
Gîte d'invasissement θ_f [°]	$> 30^\circ$	52.67	52.29	51.36	49.96
Aire A2 [m.rad]	≥ 0.1	0.1081 sur Bd	0.1034 sur Bd	0.0947 sur Bd	0.0845 sur Bd
GZmax [m]	≥ 0.25	0.269 sur Bd	0.267 sur Bd	0.261 sur Bd	0.252 sur Bd
Gîte pour GZmax [°]	$25.0 \leq \theta $	50.00 sur Bd	50.00 sur Bd	50.00 sur Bd	55.00 sur Bd
GMT [m]	≥ 0.45	0.732	0.67	0.553	0.477
GZ [m] pour une gîte $> 30^\circ$	≥ 0.25	0.269 sur Bd	0.267 sur Bd	0.261 sur Bd	0.252 sur Bd
Angle sous l'action du vent [°]	-	8.95	9.59	10.73	12.1
Ratio A1 /A2 [-]	≥ 1	2.05 sur Bd	2.10 sur Bd	2.12 sur Bd	2.08 sur Bd

Tableau 13: Evolution des critères de stabilité en fonction du remplissage de la cale à poisson – chargement décalé – flotteur « Pont supérieur »

Avec un chargement centré, il faut 40cm d'eau de mer dans la cale à poissons pour que l'effet de carène liquide soit tel que le navire ne passe plus certains critères. Ce qui représente un volume de 6m^3 et une réduction du GM de 32,2cm.

Avec un chargement décalé, il ne faut plus que 20 cm d'eau, soit $1,8\text{ m}^3$ qui se traduit par une réduction du GM de 19 cm.

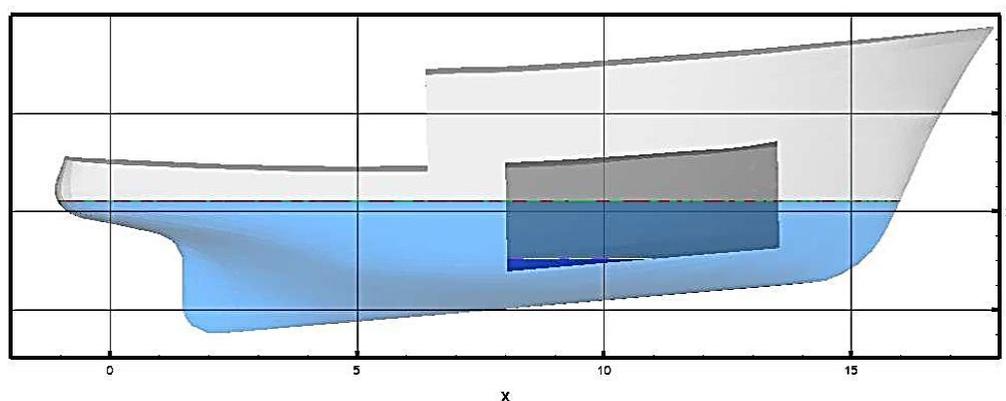


Illustration 29: 20cm d'eau dans la cale à poisson

Compartiment moteur :

Étant données les formes très pincées dans les fonds du compartiment moteur, il faut au moins 50 cm d'eau pour que l'influence de la carène liquide soit visible sur les critères de stabilité, ce qui représente 1,24 m³ d'eau.

Pour que le flotteur ne respecte plus les critères, dans le cas d'un chargement décalé, il faut au moins 80 cm, soit 4,1 m³ d'eau dans le compartiment. Par ailleurs, dans le cas d'un chargement centré, avec 80 cm d'eau dans le compartiment moteur, les critères sont toujours respectés.

L'hypothèse d'une perte de stabilité par présence d'eau (non détectée) dans le compartiment moteur est écartée.

2.6.5 Prise en compte du vieillissement du navire

Pour mesurer l'influence du vieillissement du navire sur sa stabilité, DGA TH a utilisé la règle utilisée pour les navires militaires de classe 3 (patrouilleurs et bâtiment auxiliaire), à savoir que le KG et le déplacement augmentent de 0,1 % par an. Le navire ayant 31 ans au moment du naufrage, il en résulte une augmentation de 3,1 % du déplacement et du KG, appliqué au navire léger – les capacités et les chargements solides étant considérés comme inchangés.

Pour rappel, le petit décalage entre le chargement théorique et le chargement utilisé dans FASTABI provient des petits écarts dans la modélisation des capacités.

	Déplacement	LCG	YG	KG
	[t]	[m]	[m]	[m]
Navire léger au neuvage	82.9	6.910	0.000	2.430
Navire léger +31 ans	85.5	6.910	0.000	2.506
Port en lourd	28.4	7.909	0.107	2.774
Chargement au neuvage	111.3	7.165	0.027	2.518
Chargement +31 ans	113.9	7.159	0.027	2.573

Tableau 15: Chargement théorique (Orion) du navire avec prise en compte du vieillissement

Ainsi, la prise en compte du vieillissement du navire augmente le déplacement d'environ 2,6 t et le KG de 55 mm, ce qui se traduit par un enfoncement

du navire d'environ 4 cm. Cette valeur est assez faible eu égard au fait que les marques de franc-bord étaient noyées en permanence.

Le tableau ci-après donne les résultats de l'étude réglementaire pour les flotteurs « Pont supérieur » et « Cabine ». La conséquence de ce vieillissement est que même le flotteur « Pont supérieur » - pourtant bien au-dessus du critère réglementaire avec le chargement du neuvage – ne respecte plus cette fois les critères de stabilité. Ce phénomène est aggravé dans le cas d'un chargement décalé puisque non seulement le GZ_{MAX} n'est pas assez élevé, mais la réserve de stabilité est également trop faible, quel que soit le flotteur considéré.

		Flotteur « pont supérieur »		Flotteur « cabine »	
		Chargement centré	Chargement décalé	Chargement centré	Chargement décalé
<i>Conditions à satisfaire par la courbe des BLR</i>	<i>Cibles</i>	<i>Valeurs réalisées</i>			
Gîte d'invasissement θ_f [°]	$> 30^\circ$	50.73	50.73	48.04	48.04
Aire A2 [m.rad]	≥ 0.1	0.1092 sur Bd	0.0928 sur Bd	0.1056 sur Bd	0.0892 sur Bd
GZmax [m]	≥ 0.25	0.237 sur Td	0.222 sur Bd	0.202 sur Bd	0.179 sur Bd
Gîte pour GZmax [°]	$25.0 \leq \theta $	50.00 sur Td	50.00 sur Bd	30.00 sur Bd	30.00 sur Bd
GMT [m]	≥ 0.45	0.666	0.665	0.666	0.665
GZ [m] pour une gîte $> 30^\circ$	≥ 0.25	0.237 sur Td	0.222 sur Bd	0.202 sur Bd	0.179 sur Bd
Angle sous l'action du vent [°]	-	7.17	9.54	7.17	9.56
Ratio A1 /A2 [-]	≥ 1	2.06 sur Bd	1.66 sur Bd	1.69 sur Bd	1.31 sur Bd

Tableau 17: Critères de stabilité après vieillissement

2.6.6 Calcul sur houle figée

L'eau calme est remplacée dans FASTABI par une houle figée régulière :

- Hauteur : 3,20 m ;
- Longueur d'onde 156 m (correspondant à une période de 10 s).

Les 3 courbes (voir page suivante) sont superposées et montrent que ce type de houle n'a pas d'effet sur la stabilité du navire (houle très longue par rapport à la largeur du navire et donc « ressentie » comme un plan plus ou moins incliné).

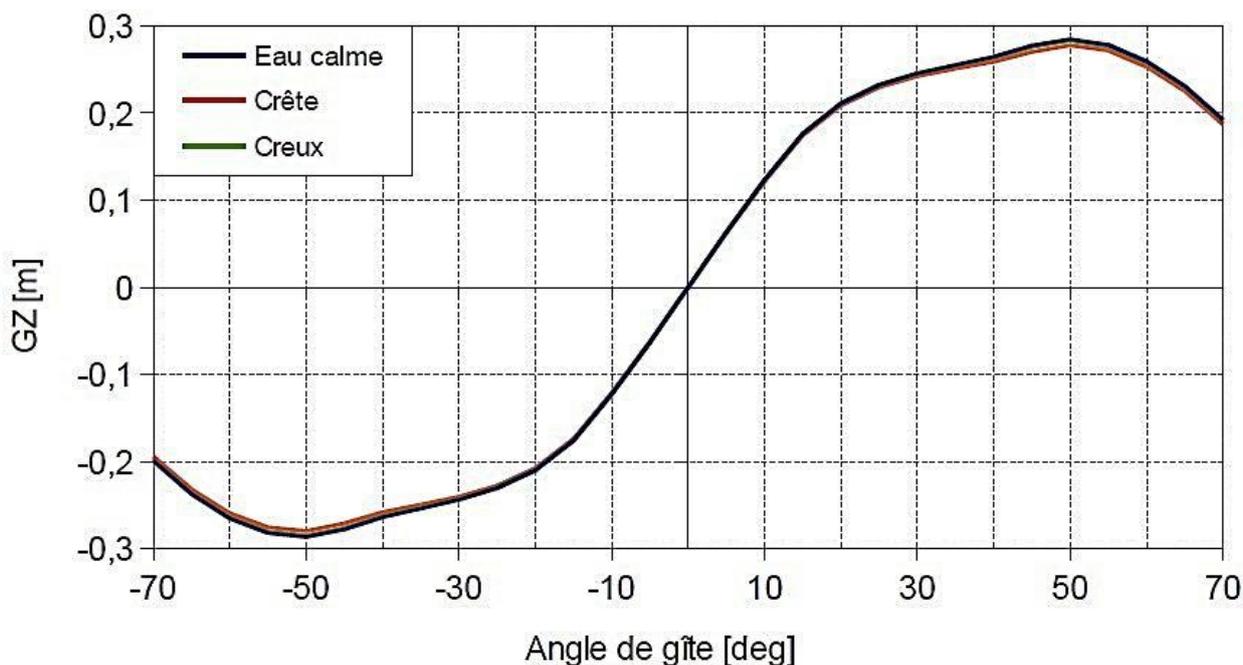


Illustration 32: Variation du GZ due à la présence de la houle

2.6.7 Influence des valeurs Déplacement/ KG

Une recherche de KG maximum est réalisée afin de déterminer, pour un déplacement et une assiette donnés, le KG maximum permettant de respecter les critères de stabilité.

Pour les valeurs associées assiette/déplacement, un équilibre est réalisé afin de déterminer le LCG correspondant. Puis le programme FASTABI fait varier le KG et réalise des calculs de stabilité réglementaires jusqu'à ce que les critères ne soient plus respectés. Un grand nombre d'itérations est réalisé afin d'obtenir une précision sur le KG_{MAX} de l'ordre du millimètre.

Pour une valeur de KG donnée, il existe une infinité de combinaisons de chargements solides et liquides. La recherche du KG_{MAX} est effectuée pour un chargement uniquement solide. Les résultats sont ensuite comparés au chargement réel corrigé des effets de carène liquide.

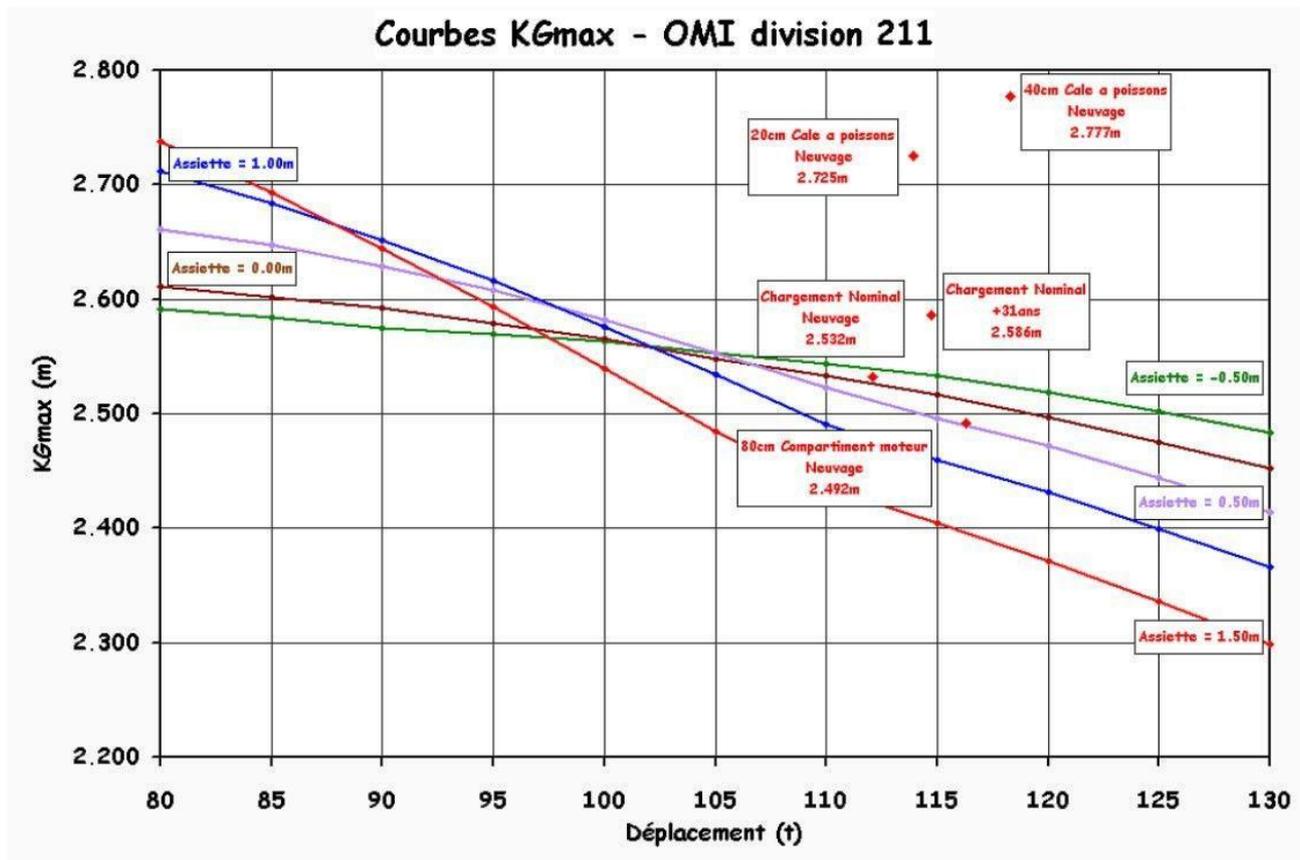


Illustration 35: Courbe de KGmax - Flotteur "Cabine"

Enseignements :

- Une assiette positive (cas de *L'ÉPAULARD*) est défavorable dans la plage de déplacements rencontrés en pratique. Cet effet est d'autant plus important que le volume étanche sur l'avant du navire est grand. Si le navire est trop sur l'arrière, le volume étanche placé à l'avant ne contribue plus à la stabilité.
- Plus le déplacement est important et plus le KG maximum permettant de tenir les critères de stabilité est faible. Ceci s'explique par le fait que le navire présente peu de volumes étanches au-dessus de la flottaison. Ainsi, plus il s'alourdit et plus ce volume se rétrécit, diminuant d'autant la réserve de stabilité du navire.
- Hormis pour le cas, plutôt favorable, du flotteur « Pont supérieur », les différents cas de chargement que *L'ÉPAULARD* pouvait rencontrer au cours de son exploitation sont au-dessus des courbes de KG_{MAX} .

2.7 Conclusion des deux premières étapes de l'étude DGA Techniques hydrodynamiques

Les calculs ont permis de valider la modélisation effectuée avec FASTABI, en comparaison avec les résultats précédemment obtenus avec ARGOS. Les écarts proviennent de la prise en compte plus réaliste des effets de carène liquide ;

La prise en compte du flotteur « cabine » améliore également le réalisme du modèle ;

Le vieillissement du navire est mesurable sur les critères de stabilité ;

La présence d'eau dans la cale à poisson est déterminante ;

La prise en compte du vent n'est pas déterminante.

3. CALCULS DE TENUE À LA MER

3.1 Étape 3, moyens mis en œuvre

Code FREDYN :

FREDYN est un code de calcul de tenue à la mer développé au sein du CRNav (*Cooperative Research Navies*), avec pour objectif de réaliser des calculs de stabilité dynamique sur houle. FREDYN est un code basé sur la théorie potentielle.

Le navire y est à la fois décrit par des sections – pour le calcul des coefficients hydrodynamiques – et par un maillage surfacique 3D – pour le calcul des efforts de la houle incidente à chaque pas de temps.

Ainsi, en amont de la simulation à proprement parler, les coefficients hydrodynamiques sont calculés via la théorie des tranches dans le domaine fréquentiel, sur la carène au repos, avec l'approximation de fréquence de rencontre, afin d'obtenir les efforts de diffraction et les efforts de rayonnement (amortissements et masses ajoutées). Ces derniers sont ensuite traduits sous forme de fonction de retard afin de pouvoir être utilisés dans le domaine temporel.

Lors de la simulation, il est possible d'utiliser une houle régulière non-linéaire (houle de Stokes) ou de spécifier un spectre de houle qui sera alors modélisé par une superposition de houle d'Airy. Les efforts liés à la houle incidente ainsi que les efforts de rappel hydrostatique sont alors calculés à chaque pas de temps par intégration des pressions sur le maillage 3D, en prenant ainsi en compte les œuvres mortes de la carène. Cela permet ainsi d'appréhender une partie des non-linéarités liées aux fortes houles et aux mouvements de grandes amplitudes.

FREDYN étant un code potentiel (hypothèse de fluide parfait), de base, il ne prend pas en compte les phénomènes d'origine visqueuse s'appliquant sur la carène. Or ces phénomènes contribuent de façon majoritaire à l'amortissement du navire en roulis. Pour pallier cette limitation, FREDYN utilise des coefficients d'amortissement linéaires et quadratiques fournis par l'utilisateur sur la base d'essais d'extinction ou calculés à partir des caractéristiques du navire via des formulations empiriques.

La version utilisée de FREDYN est la V10.3.

3.2 Chargement

3.2.1 Chargement nominal

Pour les simulations avec FREDYN, le remplissage des capacités utilisé est celui provenant du code FASTABI, adapté pour satisfaire les contraintes de modélisation inhérentes à FREDYN.

3.2.2 Inerties du navire

Une approximation faite pour les navires conventionnels, et validée sur les navires de pêche par le REX de DGA Techniques hydrodynamiques, est de prendre comme valeur de rayon d'inertie :

- $k_{xx} = 0.37 \cdot B$ pour le roulis,
- $k_{yy} = k_{zz} = 0.25 \cdot L_{pp}$ pour le tangage et le lacet.

3.2.3 Chargement décalé

Afin de ne pas multiplier les cas de calcul pour les simulations réalisées, le cas de chargement décalé n'est pas retenu. Cependant, deux phénomènes sont pris en compte :

1. Le décalage de la pontée résulterait en un angle de gîte sur eau calme. Celui-ci étant faible – inférieur à 2 degrés – il n'aura que peu d'influence sur le comportement dynamique du navire,
2. Le phénomène de balancement du chalut est modélisable par un pendule de longueur 4,65 m et de masse 1,5 t. La période du pendule – 4,33 s – est bien en-dessous des périodes de houle, mais est proche de la période propre du navire.

Ainsi, même si on peut s'attendre à des amplitudes d'oscillations faibles pour le pendule, étant proche de la période propre du navire cela peut sévèrement impacter les amplitudes de roulis du navire. La partie statique des efforts peut être modélisée en positionnant la masse suspendue au niveau de son point d'accroche (on suppose la masse toujours à l'aplomb de son point d'accroche, ce qui augmente son KG). Cela était déjà le cas dans le devis de masse réalisé par ORION Naval.

La partie dynamique des efforts dus aux oscillations pendulaires du chalut fera l'objet du § 3.6.2.

3.2.4 Surface de fardage

Même s'il a été montré dans l'étude paramétrique que le vent n'avait pas un rôle prépondérant sur le risque de chavirement du navire, celui-ci a été pris en compte lors des simulations numérique avec FREDYN afin d'affiner la modélisation.

Surface de fardage latérale (calculée par FASTABI)	[m ²]	56.710
Surface de fardage frontale (estimée par FREDYN)	[m ²]	17.034
Centre de la surface de fardage (calculé par FASTABI)	[m/0H]	3.973
	[m/PPar]	8.325
Coefficient de traînée transversale (CD_Y)	[-]	0.95
Coefficient de traînée longitudinale (CD_X)	[-]	0.7
Coefficient de portance (δ)	[-]	0.4
Rapport entre le centre d'effort et le centre de surface (κ)	[-]	1.1
Coefficient sur le moment en lacet	[-]	0.25

Tableau 5: Données utilisées pour la prise en compte du vent

La surface de fardage latérale (voir illustration 6) a été estimée à partir des plans du navire. La surface de fardage frontale ayant moins d'importance dans cette étude, elle a simplement été estimée par le code FREDYN en utilisant l'approximation largeur*hauteur.

3.2.5 Amortissement en roulis

Le roulis étant un phénomène résonnant, la modélisation du comportement en roulis intègre impérativement l'amortissement.

L'amortissement en roulis est d'origine visqueuse et est mal pris en compte par les codes de tenue à la mer qui sont généralement basés sur la théorie potentielle. Un amortissement supplémentaire, d'origine visqueuse, est alors ajouté pour obtenir des mouvements réalistes.

Dans le cas de *L'ÉPAULARD*, ne disposant pas d'essais d'extinction en roulis, les coefficients d'amortissement ont été calculés directement par le code FREDYN, via les formulations empiriques dites d'Ikeda-Tanaka-Himeno, qui prennent en compte la forme de la carène ainsi que les dimensions des appendices (quilles anti-roulis et safran). Ne disposant pas des caractéristiques précises des quilles, celles-ci ont été estimées à partir des plans et des photos du navire. Les paramètres principaux des quilles sont donnés dans les tableaux ci-après :

Longueur des quilles anti-roulis	[m]	7.00
Hauteur des quilles anti-roulis	[m]	0.225
Angle par rapport à l'horizontale	[deg]	45

Tableau 6: Caractéristiques des quilles anti-roulis

Envergure du safran	[m]	2.00	
Corde du safran	[m]	0.8	
Position du centre de surface	X	[m]	0.0
	Y	[m]	0.0
	Z	[m]	0.6

Tableau 7: Caractéristiques du safran

3.3 Liste des calculs

3.3.1 Calculs de validation

Dans un premier temps, vérification que la modélisation faite dans FREDYN correspond à celle de FASTABI. Les comparaisons portent sur les caractéristiques hydrostatiques du navire et la courbe de stabilité, en configuration solide puis en prenant en compte l'effet de carène liquide.

3.3.2 Calculs de chavirement

Des simulations sont réalisées pour vérifier que les situations jugées « à risque » dans l'étude réglementaire conduisent bien à un risque de chavirement élevé. Les conditions environnementales et de navigation ont été reproduites.

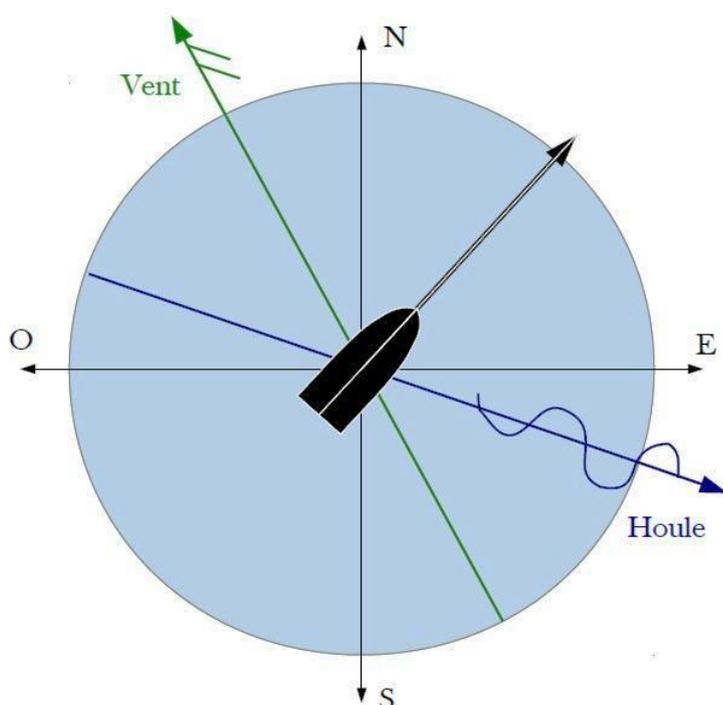


Illustration 7: Condition de navigation lors de l'accident

3.3.3 Polaires

Afin d'estimer l'évolution du risque encouru en fonction des conditions de navigation, des calculs systématiques ont été réalisés.

Sur l'état de mer rencontré lors de l'accident ($H_s = 3,20$ m, $T_{pic} = 11,7$ s), des simulations pour 13 gisements de houle et 7 vitesses différentes ont été réalisés :

- Vitesses : 0, 1, 2, 4, 6, 8, 10 nœuds,
- Gisements : 0, 15, 30, 45, 60, 75, 90, 105, 120, 135, 150, 165, 180 degrés.

Ces calculs ont été réalisés sans vent, pour les configurations de chargement suivantes :

- Flotteur « Cabine », début de vie,
- Flotteur « Cabine », début de vie, 30cm d'eau dans la cale à poisson.

3.4 Validation de la modélisation

3.4.1 Contraintes de modélisation

La version de FREDYN utilisée ne prend en compte que l'eau de mer dans les capacités. Dans le cas de *L'ÉPAULARD*, il y a 5 densités de fluide différentes dans les capacités (gasoil, huile de moteur, huile hydraulique, eau douce et eau de mer). Ainsi, pour simplifier la modélisation, les capacités pleines (caisse journalière, huile moteur, huile hydraulique, peak avant) ont été modélisées comme étant solides (ce qui se justifie par l'absence de phénomène de carène liquide dans ces capacités). Pour les autres, le volume a été modifié pour obtenir, au final, la même masse de fluide.

Le volume étanche dit flotteur « Cabine » est un flotteur asymétrique du fait de l'emménagement du pont principal. Dans FREDYN, seule une demi-géométrie est utilisée avec une hypothèse de symétrie suivant l'axe navire. L'option spécifique permettant d'utiliser un maillage asymétrique n'ayant pas pu être utilisée ici, il a été choisi d'utiliser la partie bâbord du navire, plus pénalisante en termes de stabilité, comme géométrie pour les cas dits « Cabine », celle-ci étant ensuite « symétrisée » pour obtenir le navire complet.

Dans toutes les simulations réalisées avec FREDYN, le mouvement de lacet du navire a été bloqué. Si cet artifice constitue une restriction importante dans les calculs, il permet d'assurer au navire un cap constant tout en s'affranchissant de tout pilotage automatique (dont les caractéristiques ne sont pas connues) et de toute intervention humaine qui ne serait pas modélisable.

3.4.2 Courbes de GZ

Les courbes obtenues à partir des codes FREDYN et FASTABI sont rigoureusement identiques.

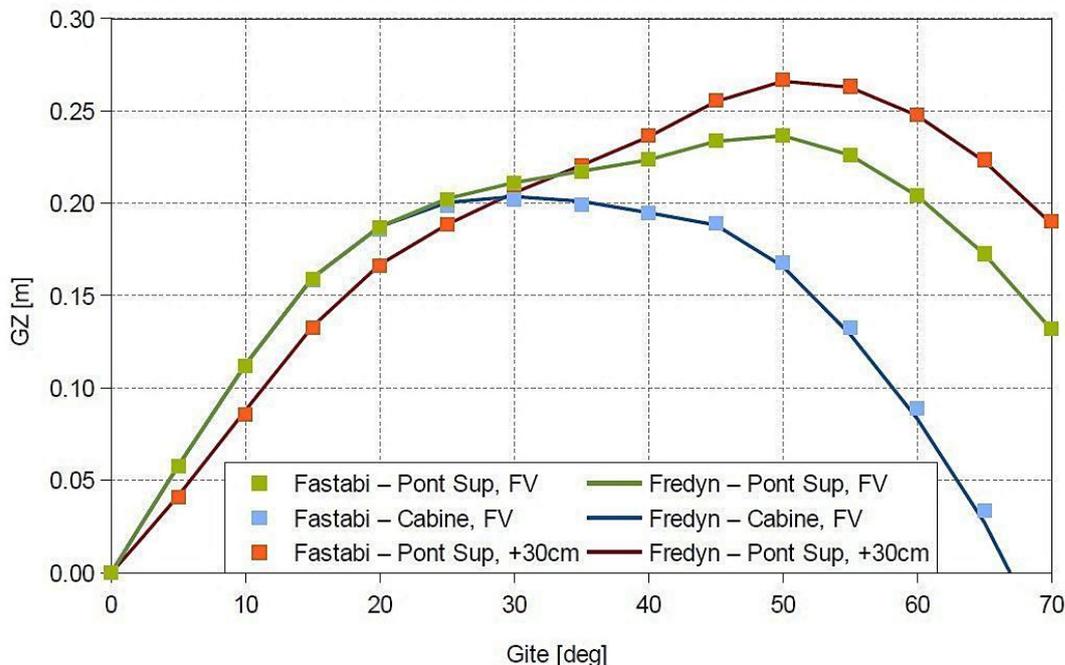


Illustration 9: Comparaison des courbes GZ - Navire intact après 31 ans et au neuvage avec 30cm d'eau dans la cale à poisson

3.5 Résultats des simulations

L'analyse vise à comparer l'approche hydrostatique (courbes de GZ) à une approche prenant en compte les efforts de houle, les effets d'inertie et d'amortissement.

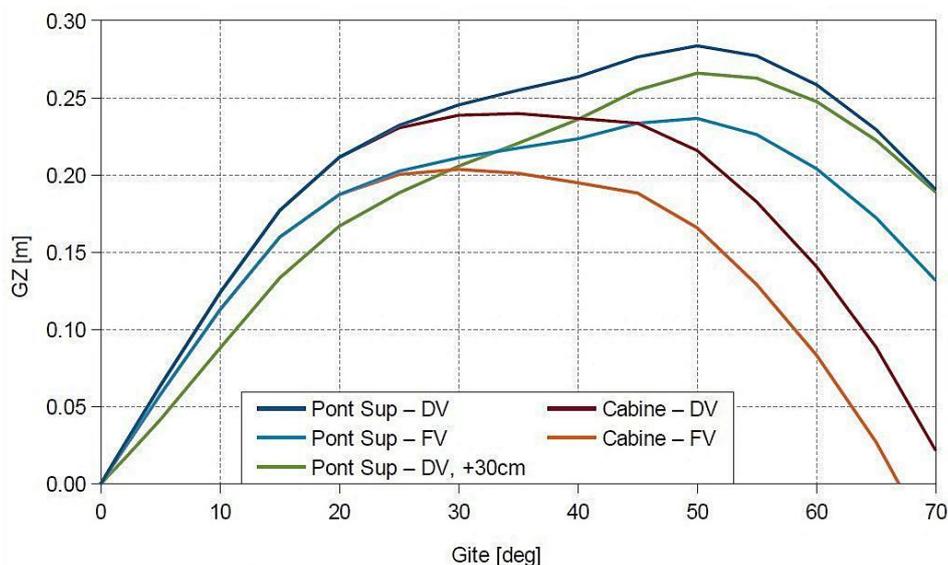


Illustration 10: Courbe de GZ des cas simulés

3.5.1 Analyse des mouvements sur une heure

Les temporels de mouvements obtenus grâce aux simulations ont été post-traités via une analyse vague à vague. Les valeurs fournies dans le tableau 9 sont les hauteurs significatives crêtes à creux de houles et de pilonnement, ainsi que les amplitudes significatives de roulis et de tangage.

L'écart visible sur les courbes de GZ entre le flotteur « Pont Sup » et le flotteur « Cabine » n'apparaît plus ici. Les amplitudes de roulis sont identiques pour les 2 flotteurs. Cela s'explique par le fait que, globalement, le roulis reste modéré (inférieur à 30 degrés). Or c'est à partir de 30 degrés de roulis que l'écart entre les deux flotteurs est remarquable sur la courbe de GZ.

De même le chargement « fin de vie » donne des niveaux de roulis (et de tangage) plus faibles que le chargement du neuvage. Cela va aussi à l'encontre de ce qui est observable sur les courbes de GZ de l'illustration ci-dessus. Encore une fois, les amplitudes de roulis étant plutôt faibles, on se situe encore dans la zone où les courbes du neuvage et FV sont assez proches.

Une autre explication est que l'amortissement en roulis, qui est calculé automatiquement par FREDYN, évolue avec le déplacement du navire. Ainsi, entre la configuration « début de vie » (DV) et « fin de vie » (FV), l'amortissement en roulis équivalent pour une amplitude de roulis de 20° passe de 4,1 % à 4,4 % de l'amortissement critique.

De plus, même si le cas de chargement « fin de vie » est plus lourd et associé à un GM plus faible que le cas du neuvage, la période propre en roulis change peu et reste assez éloignée des périodes de houle.

	Chargement	Houle	Pilonnement	Roulis		Tangage	
		H1/3	H1/3	A+1/3	A-1/3	A+1/3	A-1/3
		[m]	[m]	[deg]	[deg]	[deg]	[deg]
Pont Sup	DV	3.15	3.05	14.6	14.2	2.1	2.1
	DV, +30cm	3.12	3.01	19.8	19.5	1.9	1.9
	FV	3.13	3.04	14.1	13.5	1.8	2.0
	FV, +30cm	3.17	3.06	16.0	15.9	1.9	1.9
Cabine	DV	3.15	3.06	14.6	14.2	2.0	2.1
	FV	3.13	3.04	14.1	13.5	1.8	2.0

Tableau 9: Hauteur et amplitude significative des mouvements du navire

3.5.2 Analyse à long terme

Les simulations ont été réalisées sur une durée d'une heure avec un seul tirage de phase de la houle.

Il est alors possible d'observer les maximas pour vérifier les risques de chavirement.

En utilisant un autre tirage de phase, on obtient un autre résultat. Il faudrait alors multiplier les simulations afin d'identifier les tirages de phase pour lesquels le navire chavire et ainsi, calculer la probabilité de chavirement.

Afin de ne pas multiplier les simulations, une analyse statistique est réalisée sur chacune des simulations en utilisant une loi de probabilité de Weibull. Il est alors possible de connaître sur une durée T , la probabilité que le navire dépasse un certain seuil.

Cette analyse a été faite pour une durée d'une heure, correspondant à la durée et aux conditions de navigation ayant précédé le chavirement.

Le seuil retenu pour déterminer s'il y a chavirement est un angle de roulis de 45° . Cet angle est choisi arbitrairement et est communément utilisé par DGA TH. Ce choix est basé sur une comparaison entre essais au modèle et calculs de chavirement et permet de retrouver, dans les deux cas, le même nombre d'occurrences de chavirement.

Pont Sup	DV	1.91E-04
	DV, +30cm	1.70E-02
	FV	1.56E-06
	FV, +30cm	3.56E-05
Cabine	DV	1.89E-04
	FV	1.52E-06

Tableau 10: Probabilité de chavirement de l'épaulard sur 1h

On constate que les tendances sont les mêmes que pour les amplitudes significatives de roulis, les configurations les plus pénalisantes étant finalement au neuveage.

La configuration avec 30 cm d'eau dans la cale à poisson est la plus critique, car pour 100 bateaux qui navigueraient dans les mêmes conditions pendant une heure, environ 2 d'entre eux chavireraient.

3.6 Effet de la masse suspendue

FREDYN ne permet pas de modéliser une masse suspendue sur un navire. Or, en fonction des périodes de houle et des mouvements du navire, une masse suspendue (la poche du chalut) peut modifier les mouvements du navire.

3.6.1 Contribution statique

La contribution purement statique de la masse suspendue est prise en compte (comme pour l'étude statique menée auparavant) en plaçant artificiellement le centre de la masse au point d'accroche de celle-ci. Cela revient à supposer que la masse est toujours à la verticale de son point d'accroche avec pour conséquence la diminution du GZ, donc la raideur hydrostatique du navire.

3.6.2 Contribution dynamique

L'étude de l'effet dynamique du pendule sur le navire est faite en dehors de FREDYN, l'objectif étant d'estimer de manière qualitative le moment généré par les mouvements du chalut et de vérifier s'il est significatif.

La modélisation linéaire et fréquentielle des mouvements du pendule, ainsi que celle du moment induit sur le navire, n'est valide que pour les petits angles. Les efforts générés par les mouvements du pendule ne sont pas pris en compte pour recalculer les mouvements du navire. Cependant, la modélisation permet d'apprécier l'effet de la masse oscillante sur les mouvements du navire, par exemple en comparant ce moment au moment inclinant des efforts excitateurs de la houle incidente (efforts de Froude-Krylov et de diffraction).

Les graphiques ci-après montrent que les oscillations du pendule ont un effet sur les mouvements du navire. Ainsi, même si la période propre du pendule est éloignée des périodes de houle, celui-ci est excité par le roulis du navire et, du fait des moments ainsi générés (même ordre de grandeur que ceux de la houle incidente), va exciter à son tour le navire en roulis.

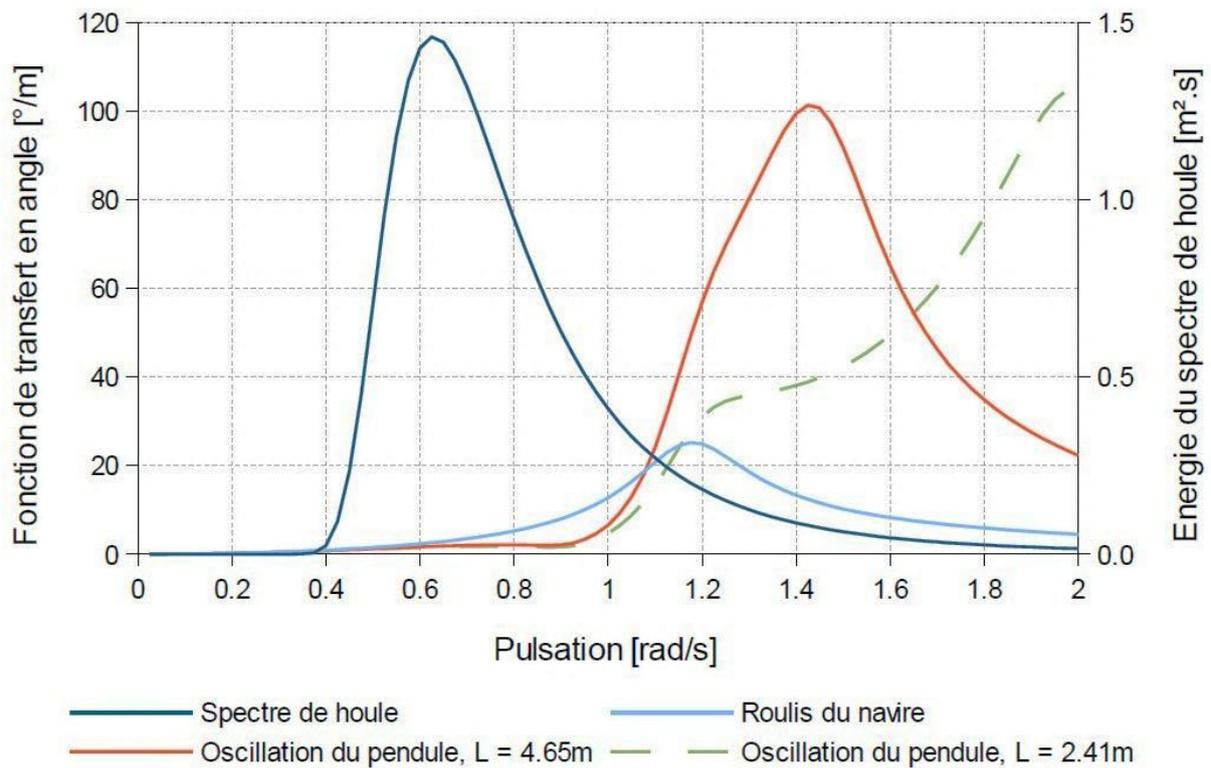


Illustration 11: Fonction de transfert du navire en roulis et des oscillation du pendule pour 2 longueurs de pendule

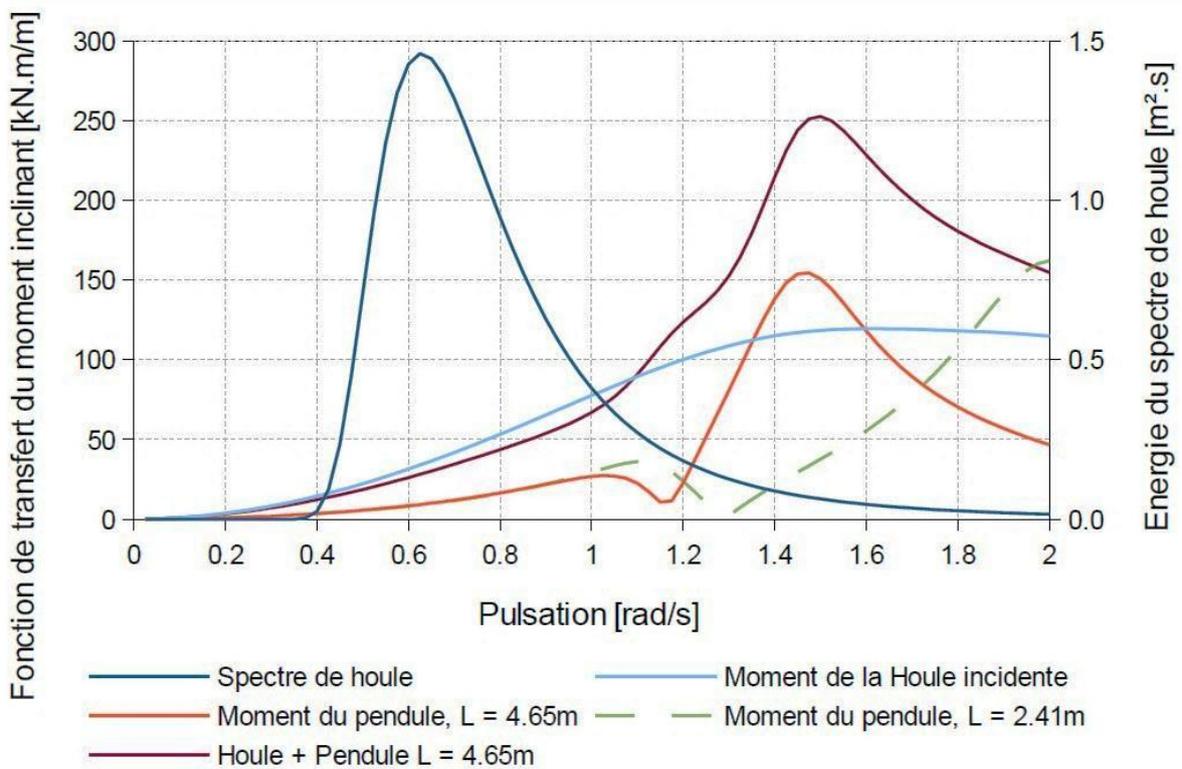


Illustration 12: Fonction de transfert du moments inclinant de la houle incidente et du moment induit par le pendule

Cependant, ces résultats sont à nuancer. Le pendule pris en compte pour établir les courbes ci-dessus correspond à la portion de la poche du chalut comprise entre le treuil et le pont principal, ce qui correspond à une longueur de 4,65 m. Or les mouvements latéraux de la poche du chalut sont limités par des guides. Ces guides limitent l'angle de la poche du chalut avec la verticale du navire à approximativement 8°. Ainsi, si l'on considère que le pendule, une fois en butée sur les guides, se limite à la partie libre de la poche du chalut, la longueur du pendule n'est alors plus que de 2,41 m. La période propre du pendule est alors de 3,11 s et ne coïncide alors plus avec celle du navire (voir courbe en tirets verts, page précédente).

Pour le calcul du moment, le point d'application des efforts a été conservé au niveau des treuils, ce qui est majorant puisque la plupart des efforts latéraux sont alors repris par les guides.

Reste le phénomène de fouet, lorsque la poche du chalut vient en butée sur les guides, qui n'a pas été quantifié.

De plus, les courbes ci-dessus ont été réalisées avec un amortissement forfaitaire égalé à 10 % de l'amortissement critique. Il ressort de l'analyse de la fonction de transfert que l'amortissement est un paramètre important de ce système de pendule.

Or cet amortissement n'est pas connu et est difficile à estimer. Étant donnée la configuration du navire (mouvements de la poche du chalut limitée entre les guides), il est admis que l'amortissement de ce système est compris entre 1 % et 100 % (voire plus) de l'amortissement critique (amortissement au-delà duquel le système n'entre plus en résonance).

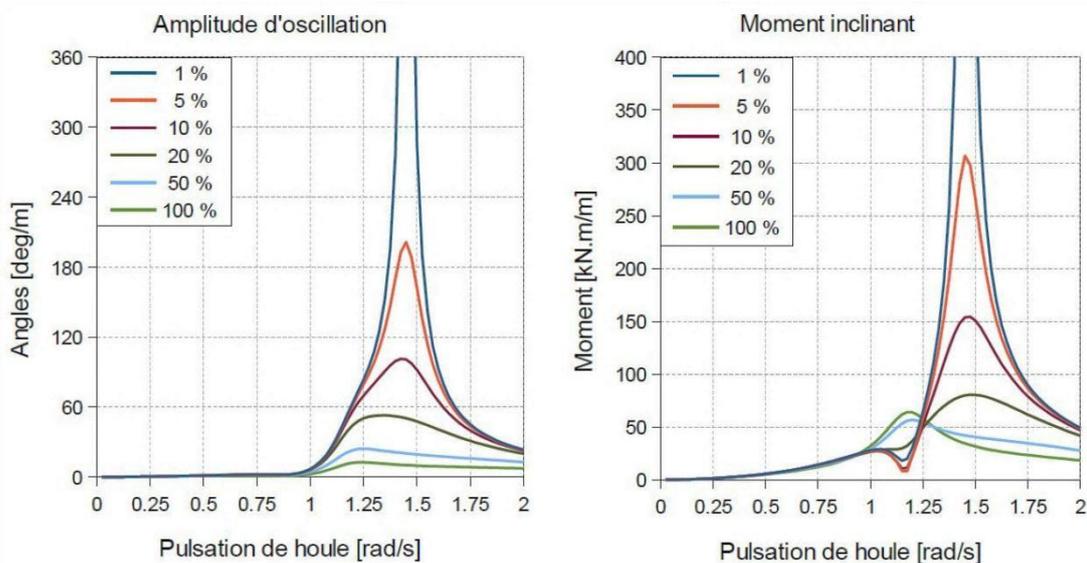


Illustration 13: Effet de l'amortissement du pendule sur ses mouvements et sur le moment induit sur le navire

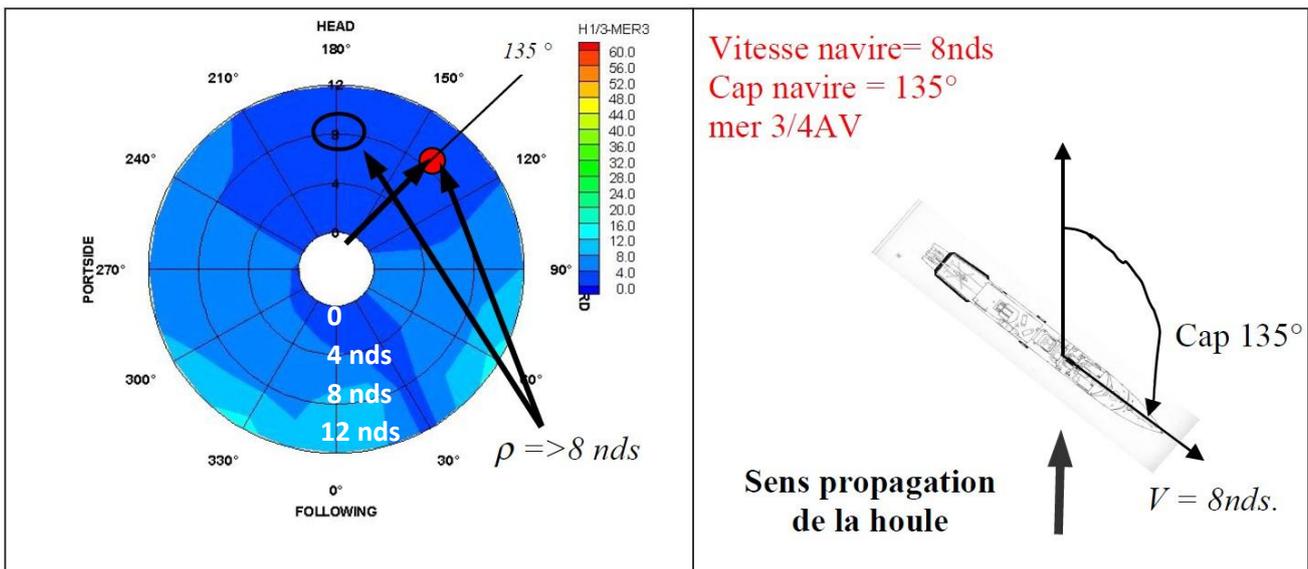
3.7 Polaire d'opérabilité

Une polaire est une courbe à deux paramètres :

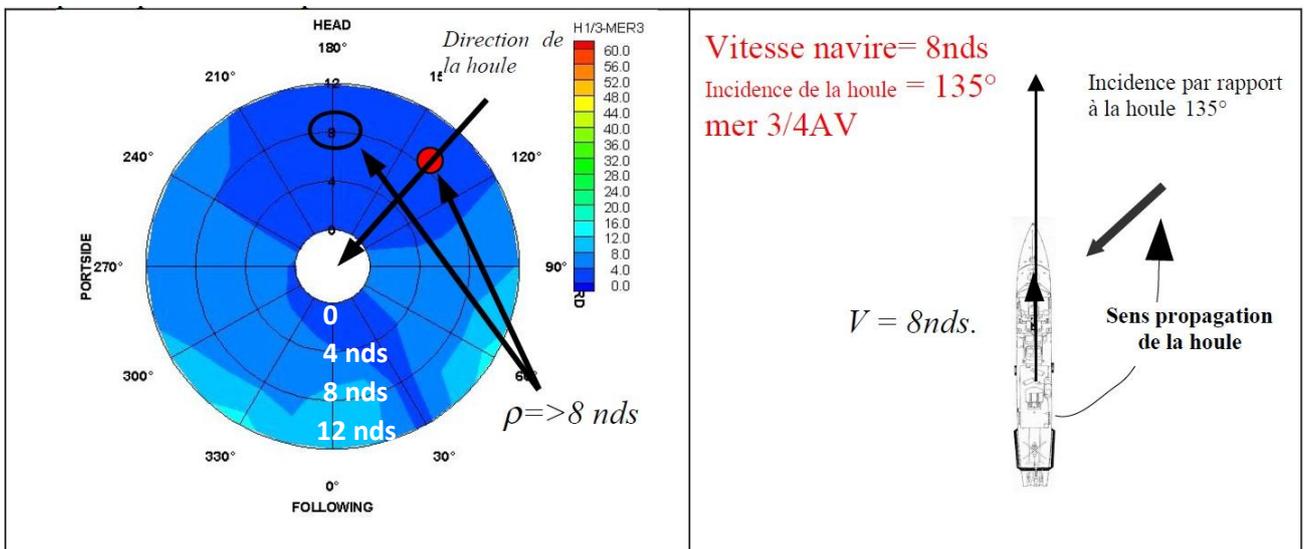
- La distance ρ par rapport au centre : croissante avec la vitesse du navire,
- L'angle θ entre le vecteur vitesse du navire et le vecteur vitesse de propagation de la houle (0° pour la mer de l'arrière, 180° pour la mer sur l'avant).

Deux modes de représentation :

La polaire indique le cap du navire si l'on considère que la houle provient d'une direction constante (du bas vers le haut du cercle) :



La polaire indique la direction de la houle si l'on considère que le navire a un cap fixe :



Les résultats des calculs systématiques sont présentés sous forme de polaire d'amplitude de roulis 1/3 et de polaire d'opérabilité. Ces dernières permettent de visualiser, en fonction de la vitesse du navire et du gisement de la houle, l'évolution de l'amplitude significative de roulis, ainsi que celle du risque de chavirement.

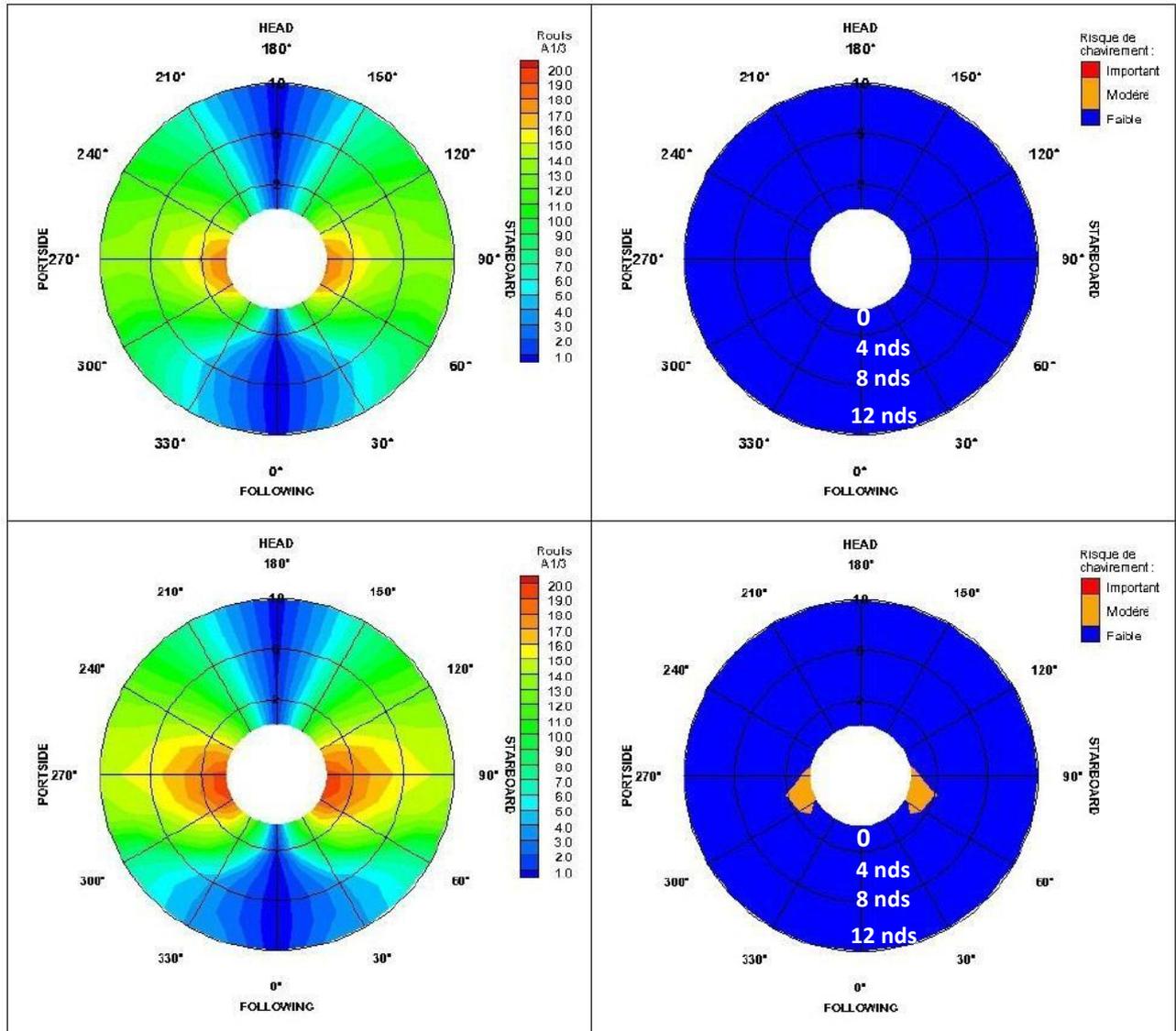


Illustration 14: Polaires de roulis et d'opérabilité pour les configurations "Cabine - DV" (en haut) et "Cabine - DV - 30cm" (en bas)

Légende caractérisant le risque de chavirement :

Risque important (rouge) : La probabilité que le navire chavire en 1 heure est supérieure à 50 %.

Risque modéré (jaune) : La probabilité de chavirement dans l'heure est inférieure à 50%.

Risque faible (bleu) : La probabilité que le navire chavire au bout d'une heure de navigation dans ces conditions est inférieure à 1 %.

Les polaires montrent que la situation la plus défavorable est la navigation par mer de travers à basse vitesse.

Si la navigation par mer de l'arrière semble limiter l'amplitude du roulis, il faut cependant noter que les calculs ont été réalisés en bloquant les mouvements de lacet, ce qui supprime les chavirements liés au phénomène de « broaching¹ » qui apparaît par mer de l'arrière et $\frac{3}{4}$ arrière.

Les polaires montrent également les effets de la présence d'eau dans la cale à poisson. Ainsi, même s'il est possible de noter une légère diminution du roulis pour un gisement de 30°, la présence d'eau dans la cale à poisson est défavorable au navire.

Globalement, en se référant aux polaires, il est fort peu probable que le navire chavire (moins de 1% de probabilité), à l'exception du cas où il naviguerait à moins de 2 nds par mer de travers à $\frac{3}{4}$ arrière ET où il y aurait 30 cm d'eau dans la cale à poisson.

3.8 Conclusion de la troisième étape de l'étude DGA Techniques hydrodynamiques (code FREDYN)

Contrairement aux résultats de l'analyse réglementaire réalisée avec le code FASTABI (étapes 1 et 2), les cas de chargement présentant le risque de chavirement le plus élevé sont les situations du navire au neuvage, bien que l'écart avec les cas « Fin de vie » ne soit pas très élevé. De même, l'écart entre les flotteurs « Cabine » et « Pont supérieur » constaté au cours de l'analyse réglementaire n'est pas aussi net.

En définitive, le cas le plus pénalisant est obtenu en simulant la présence d'eau dans la cale à poisson, générant ainsi des effets de carène liquide importants et un risque de chavirement non négligeable.

À cela s'ajoute l'effet de balancier de la poche du chalut. Bien que les résultats obtenus restent qualitatifs, il apparaît que les efforts induits (pour un navire en limite de stabilité) sont susceptibles d'augmenter significativement l'amplitude du roulis, et donc le risque de chavirement. De plus, on peut supposer que lorsque la poche du

¹ Ce phénomène, particulièrement non-linéaire et violent, apparaît généralement par houle de quart arrière. Le navire, dont la poupe est poussée par la crête d'une vague, prend rapidement du lacet, allant parfois jusqu'à mer de travers. Par couplage, le changement rapide de cap génère un angle de gîte important pouvant mener au chavirement.

chalut arrive en butée sur ses guides, un moment (non quantifié) peut subitement provoquer un roulis important.

Un approfondissement de l'étude sur l'effet de balancier de la poche du chalut serait pertinent. Ceci via le développement d'outils de calculs prenant en compte le couplage entre les mouvements du navire et les mouvements de la poche du chalut, ainsi que des données expérimentales permettant de recalibrer les paramètres de la modélisation.

Les polaires d'opérabilité, bien que tendant à montrer que le navire présentait un risque de chavirement globalement faible, permettent cependant de constater que, le jour du naufrage, les conditions de navigation étaient défavorables du point de vue de la vitesse d'avance et du gisement de la houle.

À l'instar de certains navires marchands ou militaires, il serait donc souhaitable d'utiliser des polaires d'opérabilité à bord des navires de pêche.

4. COMPARAISON ET POINTS CLÉS

Comparaison des études	SIREHNA	DGA TH
Conditions des simulations	Faible vitesse navire, chargement décalé et 20 cm d'eau dans cale à poisson, houle Bd AR	Idem (simulation avec 30 cm d'eau dans cale à poisson)
	Calculs longs: houle irrégulière, T=10 s, H=3,2 m	Calculs sur houle figée en statique (FASTABI)
	Calculs très courts: houle irrégulière, T=10 s, H=3,2 m	Prise en compte du vieillissement (+ 0,1% par an du KG et du Déplact)
		Définition du flotteur "Cabine", plus réaliste
Stabilité réglementaire (statique)	Comparaison ARGOS / HYDRO+ : résultats proches	Comparaison ARGOS / FASTABI : valeurs proches (FASTABI plus précis pour grands angles, cdg des masses liquides recalculé)
Simulation des mouvements (méthode/ code)	Simulations longues (30 min.) et très longues (6 heures, détection d'angles de gîte sup. à 50°)	FREDYN (avec prise en compte du vent, même faible)
Effets perturbateurs	<u>Coup de barre</u> : effet maximal si effectué 10 sec avant pic de roulis >> 66° sur Bd	
	<u>Poche suspendue (pendule)</u> : non déterminant	<u>Poche suspendue (pendule)</u> : mouvements limités par les guides
	<u>Ripage pontée</u> : accroissement angle de roulis mais pas significatif	
		Vieillessement du navire non déterminant en calculs dynamiques
	<u>Cambrure houle</u> : influente si navire déjà en situation critique	
	<u>Envahissement par une masse (14 t d'eau)</u> : le navire chavire	
		Simulation sur 1 heure: dans les conditions les plus dégradées, 2 navires sur 100 chavirent
Point clé des études	Critère de perte de stabilité pure : GM en deçà d'un seuil (0,20 m) pendant une durée d'au moins 50% de la période de roulis	Polaire d'opérabilité : anticipation des allures critiques

5. CONCLUSION

Les études conduites par DGA TH et SIREHNA ont permis de mieux appréhender les configurations où le risque de chavirage existe, notamment dans les situations où l'équipage ne mesure pas la vulnérabilité du navire, du fait de conditions de mer suffisamment « maniables », ou ne dispose pas à bord des moyens matériels pour mesurer ce risque.

Les solutions qui existent pour prévenir ces risques sont principalement :

- les aides à la conduite,
- les bonnes pratiques.

Les aides à la conduite :

- système de mesure et de comparaison (par rapport à des situations déjà connues) des mouvements du navire. Le système SCraMP (*Small Craft Motion Program*) peut être téléchargé sur iPhone, iPad, iPod ;
- estimateur de l'état de la mer à comparer avec des situations où le risque a été perçu ;
- mesure des volumes dans les capacités liquides, à coupler avec un paramétrage préalable.

L'intégration et la validation à bord des aides à la conduite seront idéalement réalisées par les chantiers, qu'il s'agisse de constructions neuves ou de travaux effectués sur la flotte existante. Les chantiers doivent de ce fait être tenus informés par les bureaux d'études de l'existence, des évolutions et de la vulgarisation (faible coût) de ces équipements.

Les bonnes pratiques :

Les bonnes pratiques sont applicables aux opérations de maintenance, à la conduite du navire, principalement dans les situations où l'équipage mobilise toute son attention sur l'opération de pêche, et à l'information diffusée par la terre.

Opérations de Maintenance à ne pas négliger :

- état des joints de portes étanches ;
- état des contre-hublots, souvent bloqués par la rouille ;
- état des collecteurs et clapets des moyens d'assèchement permanents ;
- évolution du navire (poids supplémentaires, modification du centre de gravité) à prendre en compte tous les 5 ans.

Conduite du navire :

- fermeture des portes et des contre-hublots, suivant les conditions de mer ;
- respect des cas de chargement réglementaires, tant par les patrons que par les mécaniciens (notamment la répartition du gasoil et de l'eau douce) pour maintenir le navire dans ses lignes d'eau.

Information diffusée par la terre :

Une bonne pratique islandaise peut également être considérée comme un modèle, du fait des bons résultats constatés sur l'accidentologie (*The Icelandic Information System*) :

- affichage en capitainerie des mesures en direct des hauteurs de houle, transmises par un réseau de bouées, permettant ainsi au marin d'évaluer les risques en fonction des limites connues de son navire.



Ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie

Bureau d'enquêtes sur les évènements de mer

Tour Pascal B - 92055 La Défense cedex
téléphone : +33 (0) 1 40 81 38 24 - télécopie : +33 (0) 1 40 81 38 42
www.beamer-france.org
bea-mer@developpement-durable.gouv.fr



FRANCE
2009092411