



MINISTÈRE  
DES ARMÉES

Liberté  
Égalité  
Fraternité

PRINCIPIA



## Résistance des bâtiments de surface aux explosions sous-marines : fouettement non-linéaire de poutre navire

Session de l'ATMA 2023

Association Technique Maritime et Aéronautique

17 octobre 2023

DGA TECHNIQUES NAVALES

Guillaume BARRAS



Direction générale de l'armement

1

1

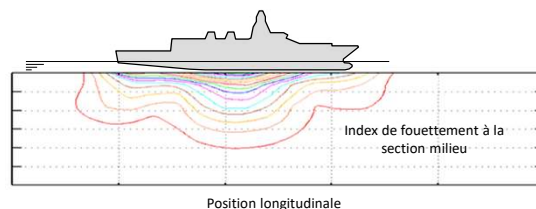


MINISTÈRE  
DES ARMÉES

Liberté  
Égalité  
Fraternité



## Préambule



- Les navires militaires sont spécifiés et conçus pour résister aux chocs par explosions sous-marines
- Outre les installations qu'ils supportent, il s'agit de vérifier que la charpente résistante peut subir la menace sans risque pour la plateforme
  - Résistance des œuvres vives (flotteur) au choc sous-marin issu de la détonation
  - Résistance de la poutre navire au fouettement généré par la bulle d'explosion
- Vulnérabilité de la plateforme / létalité des armes sous-marines : outils d'évaluation rapide pour balayer un grand nombre de scénarios d'attaque
- Pour couvrir les scénarios les plus sévères et quantifier correctement les marges, l'évaluation du fouettement doit s'appuyer sur des modèles robustes, restituant correctement les phénomènes physiques

Objet de l'étude : Extension du domaine d'application des modèles de fouettement aux agressions modérées à sévères en tenant compte du comportement non-linéaire de la poutre navire

Direction générale de l'armement

2

2

## Sommaire

1. Introduction
2. Modèle de fouettement
3. Etude expérimentale du fouettement
4. Etude théorique : couplage local/global
5. Conclusions et perspectives

3

## 1. Introduction

Parmi les effets des armes sous-marines conventionnelles sur les plateformes, ceux provoqués par les pulsations de la bulle d'explosion et le fouettement peuvent être importants

- Débattements des matériels suspendus aux limites de leur capacité
- Contraintes importantes dans les structures longitudinales de charpente résistante liés à la flexion du navire dans son ensemble

Ces effets peuvent devenir préjudiciables à la sécurité de la plateforme lorsque les fréquences de pulsation de bulle et de poutre navire sont proches → résonance du système

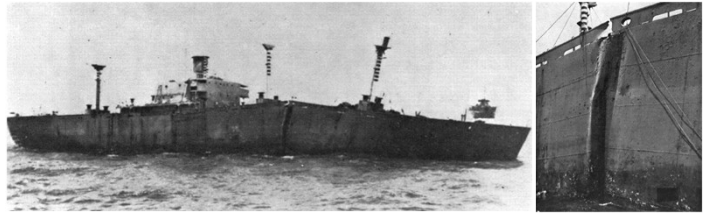
Traitement classique du fouettement (réf. [1] à [7]) suivant hypothèse de linéarité du comportement de la poutre navire, le moment de flexion s'écrit en fonction de la courbure

$$M_f = \langle EI_y \rangle \chi$$

Comparaison de  $M_f$  aux moments ultimes en arc  $M_u^{(+)}$  et contre-arc  $M_u^{(-)}$  avec critères et marges appropriées pour des analyses sécuritaires

4

## 1. Introduction



Hypothèse de linéarité invalide pour des agressions sévères

- Nécessite de prendre en compte le comportement non-linéaire de la poutre navire
- Grands déplacements en flexion cyclique alternée
- Capacité de résistance des structures principales de poutre navire (fonds et pont de résistance)
  - En traction vis-à-vis de la limite d'élasticité des matériaux
  - En compression vis-à-vis de la tenue au flambement

Illustration ruine de poutre navire (réf. [8])

- Attaque par explosion sous-marine d'un Liberty Ship pendant le 2<sup>de</sup> Guerre
- Flambement généralisé du bordé de carène sur toute la hauteur

5

## 2. Modèle de fouettement

Modèle théorique

Equations du mouvement  $y(t)$  dans la direction verticale

$$[M_s + M_a] \ddot{y} + [C] \dot{y} + [K_s + K_h] y(t) = F(t)$$

Efforts hydrodynamiques liés à la pulsation de bulle projetés en vertical

$$F(t) = 2 \cos \theta [M_a + M_d] \dot{u}(t)$$

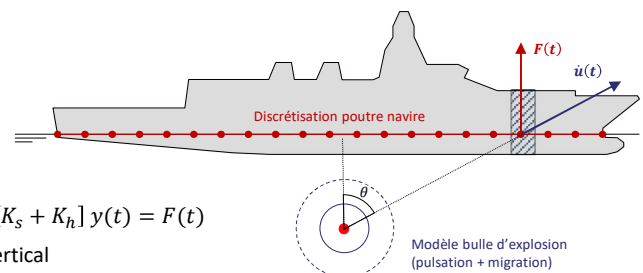
Accélération particulaire  $\dot{u}(t)$  reliée à la dérivée seconde du volume de bulle (réf. [9])

$$\dot{u}(t) = \frac{\dot{V}(t)}{4\pi R^2}$$

Discretisation par éléments finis 1D (20 à 40) type poutre de Timoshenko avec cisaillement transverse

Calcul temporel

- Modèle linéaire : résolution par superposition modale sur la base des premiers modes (rigides + flexion) dans la direction verticale
- Modèle non-linéaire : résolution par intégration directe, schéma implicite



6

## 2. Modèle de fouettement

Comportement de poutre non-linéaire

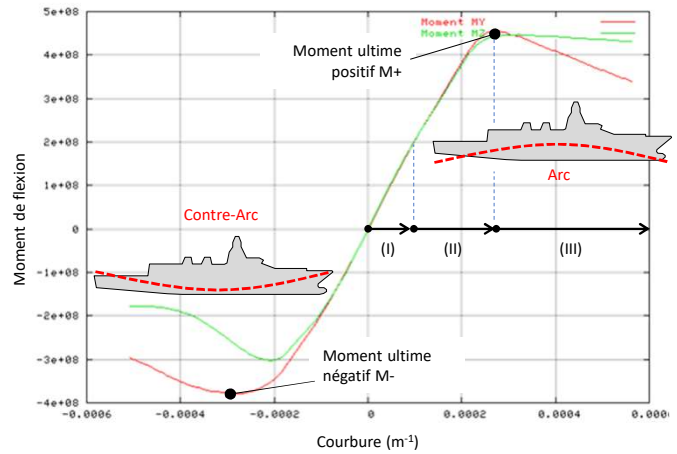
Sous l'effet de chargements extrêmes, le comportement non-linéaire de la poutre navire doit être considéré

Illustration en flexion verticale sous chargement statique monotone (calcul RULTIM réf. [10])

- En Arc
- En Contre-Arc

Trois zones de comportement

- (I) Linéaire
- (II) Endommagement progressif
- (III) Post-critique



## 2. Modèle de fouettement

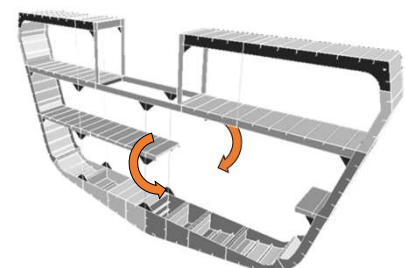
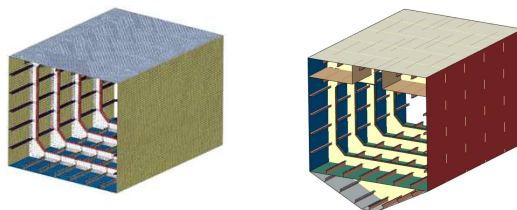
Comportement de poutre non-linéaire

Pour le fouettement, nécessité de caractériser le comportement en flexion cyclique alternée

Etude numérique pour différents types de cyclage

- Charge/décharge simple
- Charge/décharge répétée
- Charge alternée arc/contre-arc (symétrique ou dissymétrique)

Modèles simplifiés : poutre caisson symétrique, poutre dissymétrique



Calculs élasto-plastiques  
incrémentaux

## 2. Modèle de fouettement

Comportement de poutre non-linéaire

Identification des paramètres de comportement

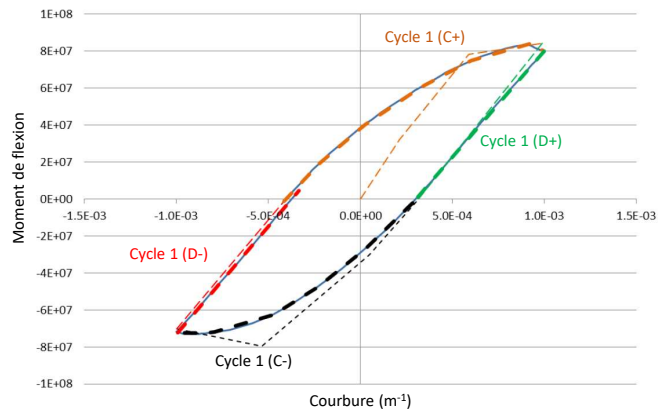
Illustration pour 2 cycles complets de charge-décharge à courbure imposée

- Charge positive (C+) / Décharge positive (D+)
- Charge négative (C-) / Décharge négative (D-)

→ Nécessité de tenir compte de l'histoire du chargement

→ Construction du comportement à partir de 3 lois moment-courbure élémentaires

1. Loi de base en arc / contre-arc (section intègre)
2. Loi de section dégradée en arc
3. Loi de section dégradée en contre-arc



## 2. Modèle de fouettement

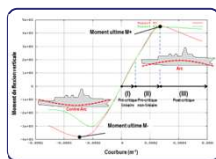
Développements

Outil historique ARIANE « Analyse de la Réponse Interactive de l'Ame d'un Navire aux Explosions » (linéaire)

Développement de l'outil PHEDRE « Poutre Hydroélastique Endommageable Dynamique en Réponse aux Explosions » (non-linéaire)

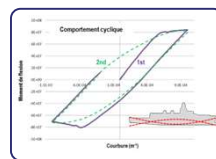
- Opérateur raideur  $[K_s]$  non-linéaire : actualisation de la rigidité de flexion  $(EI_y)$  dans chaque section
- Schéma d'intégration temporelle implicite ou explicite avec actualisation à chaque instant de l'opérateur tangent pour prendre en compte la loi Moment-Courbure non-linéaire

Résistance ultime (RULTIM)

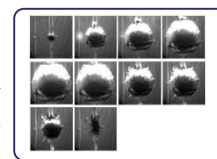


Lois M-C élémentaires pour comportement non-linéaire

Fouettement (PHEDRE)



Explosion sous-marine



Forces issues de la dynamique de bulle

### 3. Etude expérimentale

Modèle d'essai

**Objet :** Etude expérimentale du fouettement – domaine linéaire

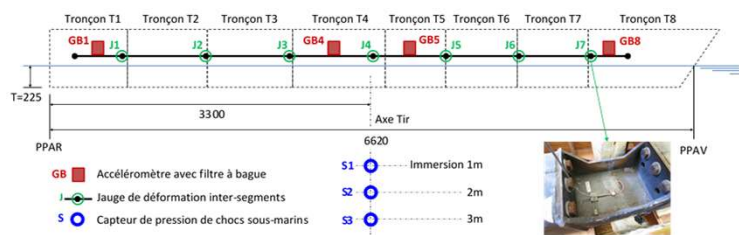
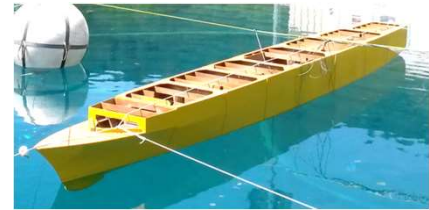
Maquette hydrodynamique échelle 1:20 (ex-frégate ASM)

Poutre navire segmentée

- 8 tronçons
- Fréquences de flexion en similitude

Instrumentation des mesures physiques :

- Pressions sous-marines
- Moments de flexion inter-segments
- Accélération de poutre



11

### 3. Etude expérimentale

Campagnes d'essai

Essais réalisés en bassin de détonique DGA TN

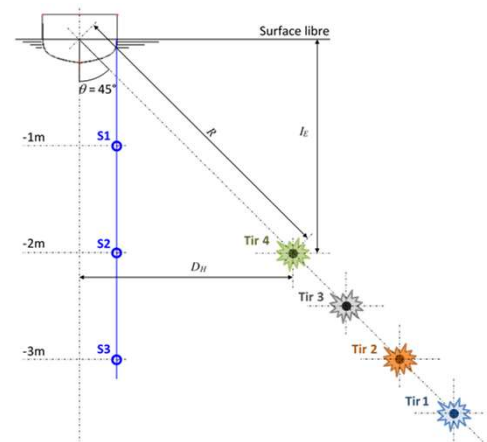
Sources d'excitation hydrodynamique

- (P) - Explosion sous-marine (charge hexocire 36g)
- (C) - Canon à air (G. GUN II 150 cu.in)

Configurations de tir n°1 à 4

- Source par le travers à -45°, face à la perpendiculaire milieu
- Paramétrage distance d'action  $R$

Configurations de tir Pyro (P) / Canon (C)	Immersion de la source $I_E$ (m)			
	2,0	2,5	3,0	3,5
2,0	P4/C4	-	-	-
2,5	-	P3/C3	-	-
3,0	-	-	P2/C2	-
3,5	-	-	-	P1/C1

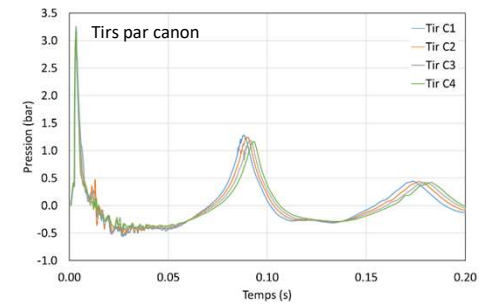
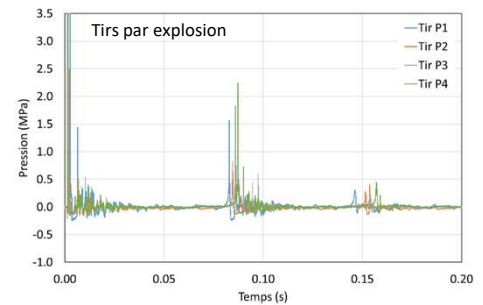


12

### 3. Etude expérimentale

#### Excitations hydrodynamiques

- Essais pyrotechniques (P)
  - Front raide de pression de choc primaire
  - Chocs secondaires liés aux contractions de bulle
- Essais par canons (C)
  - Choc de faible amplitude
  - Identification très nette des pulsations de la cavité gazeuse
- Fréquence d'excitation de bulle
  - 11 Hz environ pour les 2 sources (P) et (C)
  - De l'ordre du double de la fréquence du mode fondamental de flexion verticale (5,9 Hz)



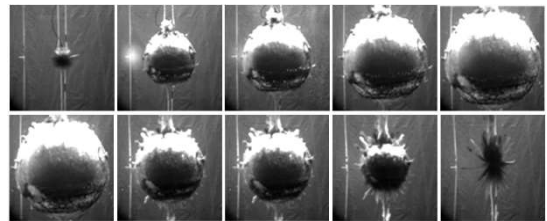
13

### 3. Etude expérimentale

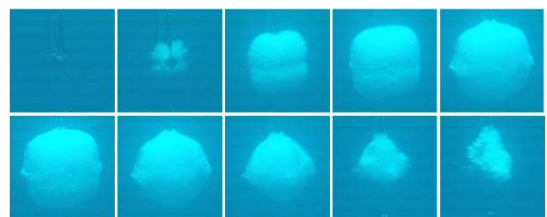
#### Comparaison explosion / canon

- Dans sa première phase d'expansion et de contraction, la bulle d'explosion reste sphérique
  - Ecoulement incompressible omnidirectionnel
- La cavité gazeuse produite par canon présente 4 lobes principaux liés à la géométrie du dispositif de détente (4 orifices)
  - Faible sphéricité de l'écoulement

Explosion



Canon



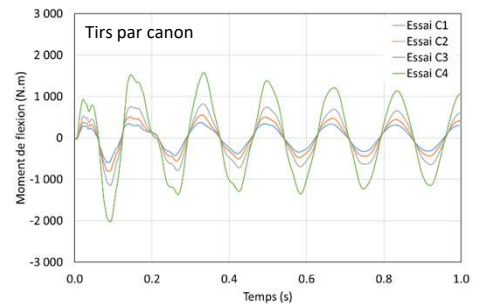
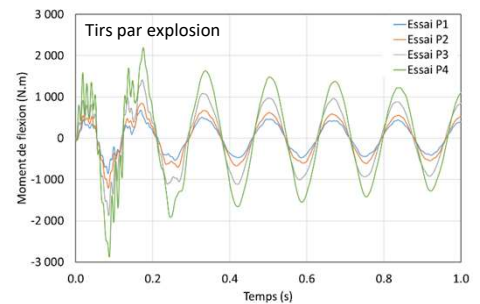
14

### 3. Etude expérimentale

#### Résultats de fouettement

- Mesures du moment de flexion le long de la poutre navire
  - Examen des résultats (section milieu) →
    - Prédominance du chargement de bulle sur 200ms (2 pulsations environ) : les tirs par explosion génèrent un contenu fréquentiel plus « riche » que par canon
    - Réponse en flexion verticale de la poutre à la fréquence fondamentale  $f$  de 5,97 Hz
    - Amplitudes maximales inversement proportionnelles à  $R^2$
- confirme la théorie sous-jacente selon laquelle les efforts hydrodynamiques sont proportionnels à l'accélération particulaire  $\dot{u}(t)$

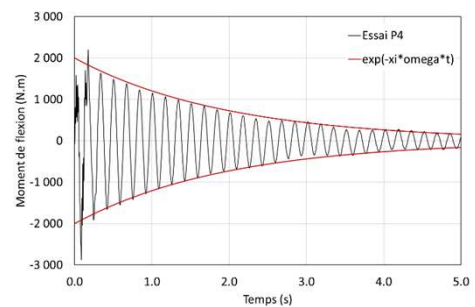
$$\dot{u}(t) = \frac{\ddot{V}(t)}{4\pi R^2}$$



### 3. Etude expérimentale

#### Corrélation calculs / essais

- L'amortissement influe au premier ordre sur l'amplitude de la réponse si les fréquences bulle / poutre navire sont proches
- Estimation de l'amortissement à prendre en compte dans les modèles
- Au-delà de 300ms, l'excitation est quasi-nulle (pertes d'énergie dans la bulle), régime de vibrations libres de pulsation  $\omega = 2\pi f$
- Exploitation du décrément logarithmique  $\exp(-\xi\omega t)$  de l'amplitude du moment de flexion aux temps longs
  - Estimation de l'amortissement critique  $\xi$  entre 1 et 2%
  - Valeur cohérente avec les mesures d'analyse modale préalables





### 3. Etude expérimentale

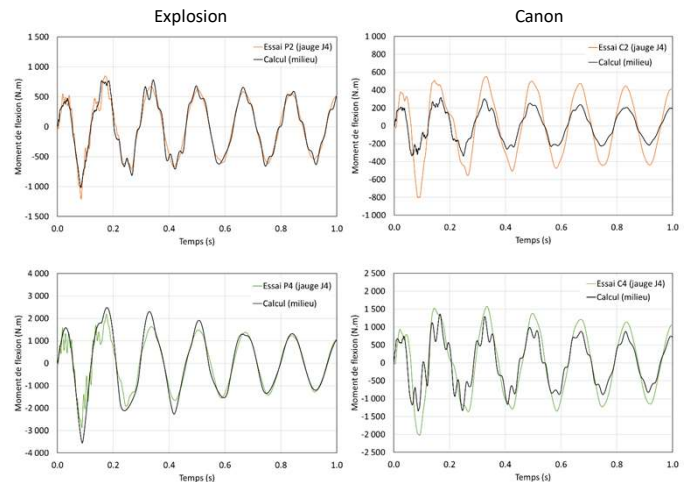
Corrélation calculs / essais

Calcul de fouettement - modèle linéaire

Comparaison des moments de flexion (section milieu)

- Très bonne corrélation pour les essais par explosion
  - Corrélation moins bonne pour les essais par canon
- Hypothèse d'écoulement sphérique généré par le canon mise en défaut par l'observation du comportement de la cavité gazeuse

$$\dot{V}(t) \neq \frac{4\pi R}{\rho} p(t)$$



### 4. Couplage local/global

Vers une preuve de concept

Traitement classique du fouettement

- Les effets locaux liés au choc primaire (temps courts ~ ms) n'ont pas d'influence sur les effets globaux de fouettement (temps longs ~ s)
- Hypothèse vérifiée pour les explosions de sévérité faible à modérée

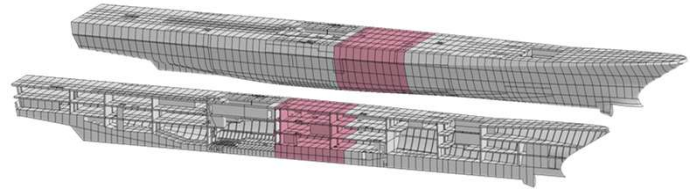
Et pour les explosions sévères ?

- L'endommagement (plastifications, enfoncements) des structures soumises à l'onde de surpression est-il de nature à modifier le comportement de poutre navire et sa réponse aux temps longs ?
- Dans quelle mesure les effets de chocs sont susceptibles d'aggraver les effets du fouettement, par modification et diminution de la capacité de résistance de poutre navire à l'état initial ?

→ Présentation d'une étude théorique destinée à fournir une forme de preuve de concept

## 4. Couplage local/global

Etude théorique



À défaut d'essais, calculs numériques par éléments finis avec modèles couplés LS-DYNA / USA

Modélisation 3D de la charpente résistante du navire

Adaptation de la finesse du maillage en tranche milieu pour modéliser correctement les mécanismes de plastification et d'enfoncement sous chocs (primaire et secondaires)

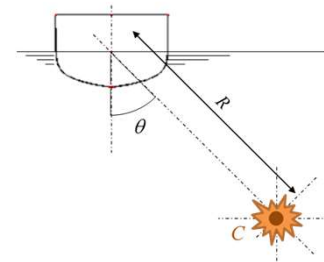
Pour analyser l'influence du choc, étude comparative

- Chargement bulle seule (HS)
- Chargement combinant choc et bulle (PHS)

Configurations testées x8 (même charge explosive  $C$ ) en étudiant

- 2 angles d'attaque  $\theta$  ( $0^\circ$  et  $45^\circ$ )
- 4 distances d'action  $R$

→ Exploitation des résultats en fonction du facteur de choc à la quille :  $K_{SF} = \frac{\sqrt{C}}{R} \left( \frac{1+\cos}{2} \right)$



## 4. Couplage local/global

Résultats et analyse

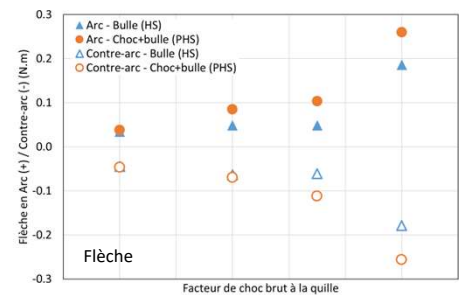
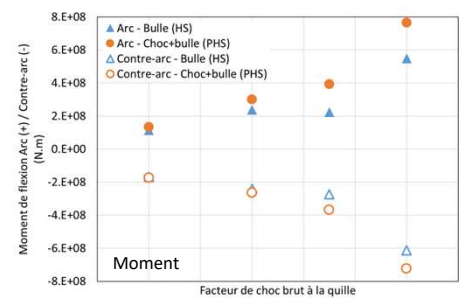
Moment de flexion et flèche au milieu du navire

Exploitation des valeurs maximales en arc (positif) et contre-arc (négatif).

Illustrations pour les explosions à  $0^\circ$  →

Constats :

- La réponse au fouettement est modifiée et amplifiée par le choc primaire pour les facteurs de choc les plus élevés
- L'influence du choc est quasi-nulle pour les facteurs de chocs les plus faibles



## 4. Couplage local/global

### Résultats et analyse

#### Énergie de déformation – Evolutions au cours du temps

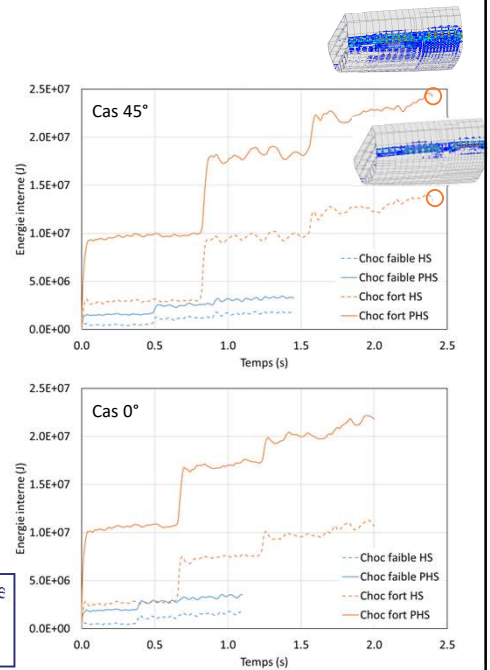
Comparaison choc fort et choc faible (cas à 0° et 45°) →

Constats :

- Pour les chocs forts, le cumul d'énergie plastique dans la coque à chaque cycle (contraction) de bulle est plus élevé pour les cas combinant le choc primaire avec le bulle
- Pour les chocs faibles, la prise en compte du choc primaire n'a pas d'influence notable

Ces constats sont corroborés par analyse des déformations plastiques cumulées en fin de simulation

Conclusion : Ces résultats théoriques tendent à montrer l'influence du choc primaire sur la réponse au fouettement. Influence croissante avec la sévérité de l'explosion



## 5. Conclusions et perspectives

### Conclusions

- Pertinence des essais à échelle réduite sur maquettes segmentées pour l'étude spécifique du fouettement et la validation de modèles
- Extension du domaine d'application des modèles au fouettement non-linéaire pour les explosions modérées à sévère, et développements dans l'outil PHEDRE
- Mise en évidence des effets du choc primaire sur la réponse au fouettement (couplage local/global)

### Perspectives

- Intégration d'un modèle d'amortissement hydrodynamique lié aux premiers modes de réponse du navire en surface
- Validation de modèles par campagnes d'essais de choc

## Mention et remerciements

Travaux théoriques menés en collaboration avec la société PRINCIPIA dans le cadre des Marchés Publics N° 2015 86 0014 et N° 2020 83 0044 sous financement DGA ayant respectivement pour objet :

« Développement d'un modèle de fouettement de poutre non-linéaire », et « Etude pour la prise en compte des effets d'explosion sur les coques et son intégration dans l'outil PHEDRE »

Remerciement des co-auteurs du mémoire pour leur contribution aux travaux réalisés et pour les résultats obtenus : Matthias HIVERT, Natacha LE COQ, Tanguy QUESNEL



## Références

- [1] G. Chertock – The flexural response of a submerged or floating body to an underwater explosion - Part 1 - Theory – David Taylor Model Basin, Washington, D.C., Report C-517 – 1952
- [2] G. Chertock – The Flexural Response of a Submerged Solid to a Pulsating Gas Bubble – Journal of Applied Physics, 24(2):192-197 – 1953
- [3] G. Chertock – Effects of underwater explosions on elastic structures – David Taylor Model Basin, Washington, D.C – 1964
- [4] G. Chertock – Transient Flexural Vibrations of Ship-Like Structures Exposed to Underwater Explosions – Journal of the Acoustical Society of America, 48(1):170-180 – 1970
- [5] A. N. Hicks – The theory of explosion induced whipping ship motions – Naval Construction Research Establishment, St. Leonard's Hill, Dunfermline, Scotland, Report NCRE/R579 – 1972
- [6] K. A. Bannister – Whipping analysis Techniques for Ships and Submarines – The Shock and Vibration Bulletin n°50 Part 3 – Sept. 1980
- [7] T. A. Vernon – Whipping response of ship hulls from underwater explosion bubble loading – Defence Research Establishment Atlantic, Dartmouth, Canada, Technical memorandum 86/225 – 1986
- [8] A. H. Keil – The Response of Ships to Underwater Explosions, volume 69 – Transactions of Society of Naval Architects and Marine Engineers – 1961
- [9] K. C. Heaton – Migration of the Gas Globe from Underwater Explosions : The Effect of Drag and Radiative Energy Loss – Defence Research Establishment Valcartier, Report R-4373/86 – 1986
- [10] T. Quesnel et. al. – Estimation de la résistance ultime de poutre navire : analyse comparative de diverses méthodes dans le cas de frégates – ATMA, Session technique 2002, Paris – 2003



MINISTÈRE  
DES ARMÉES  
*Liberté  
Égalité  
Fraternité*



## Fin de l'exposé

## Questions ?



MINISTÈRE  
DES ARMÉES  
*Liberté  
Égalité  
Fraternité*

Direction générale  
de l'armement

**Guillaume BARRAS**

[guillaume.barras@intradef.gouv.fr](mailto:guillaume.barras@intradef.gouv.fr)

Chef de groupe CS (Coques et Structures)

Expert référent coque et structures sous-marins

Expert (E) « Sécurité des biens et des personnes en milieu maritime – sécurité et vulnérabilité des navires

DGA Techniques navales

DGA TN/SDT/PFN/ITP/CS

Avenue de la Tour Royale, BP40915, 83050 TOULON Cedex

Tél. : 04 22 42 70 79

[www.defense.gouv.fr/dga](http://www.defense.gouv.fr/dga)

Direction générale de l'armement

25