

Modèles de calcul pour l'approche de la vulnérabilité des structures navales

Bernard AUROIRE¹, Philippe MERMILLOD¹, Bruno MAUREL¹

¹Centre Technique des Systèmes Navals, BP 28, 83800 Toulon Armées

bernard.auroire@dga.defense.gouv.fr philippe.mermillod@dga.defense.gouv.fr bruno.maurel@dga.defense.gouv.fr

Résumé : L'analyse de la vulnérabilité des structures de navires soumises aux événements accidentels, explosions, ou agressions terroristes, fait l'objet de calculs de structures complexes ; tant par les comportements (non linéarités, ruptures, etc...) que par la modélisation des chargements généralement issus du couplage fluide-structure. Certaines des méthodes utilisées à la DGA (Centre Technique des Systèmes Navals) sont explicitées au travers de quelques exemples significatifs.

Abstract : Ship vulnerability analysis for military events or terrorist attacks needs complex forms of structural computation due to non linear behaviours such as ruptures and loadings by fluid-structure interactions. Some of methodologies used at DGA (Centre Technique des Systèmes Navals) are described with typical examples.

1 - Introduction :

L'analyse de la vulnérabilité des structures navales aux événements accidentels, qu'ils relèvent directement de menaces militaires ou d'actes indésirables (menaces terroristes), fait appel à des techniques de simulation élaborées ; du fait de la complexité des chargements à considérer d'une part (ondes d'explosions en eau, en air) ; du fait également des comportements fortement non linéaires des structures (phénomènes de plastification, d'instabilités, de déchirures, etc.), dans de telles situations.

On se propose de décrire sommairement certaines techniques particulières utilisées dans les centres techniques de la DGA, maître d'ouvrage de programmes navals militaires, ainsi que de façon assez répandue par les industriels maîtres d'œuvre, ou leurs coopérateurs ; de les illustrer par quelques exemples particuliers concrets.

Touchant aux problèmes de sécurité du transport on peut citer les cas accidentels médiatisés du pétrolier Limbourg ou de la frégate USS Cole de l'US Navy.

On a exclu de l'exposé les modèles de collisions de navires qui présentent un intérêt particulier également et font l'objet de développements spécifiques.

Par ailleurs les évaluations de la vulnérabilité des structures du navire s'intègrent dans des analyses plus globales de la vulnérabilité des fonctions militaires du navire et de sa capacité de survie qui ne seront pas présentées ici.

Les points suivants sont successivement abordés :

- la caractérisation des chargements par explosions sous-marines et aériennes,

- les techniques de calcul de structure en dynamique transitoire,

- la description de méthodes de calcul de structures en interaction avec l'eau, accompagnées d'exemples.

2 - Les chargements par explosions sous-marines :

Les chargements résultent d'interactions d'ondes et écoulement de fluide créés par l'explosion en eau libre, que l'on se propose de caractériser dans un premier temps.

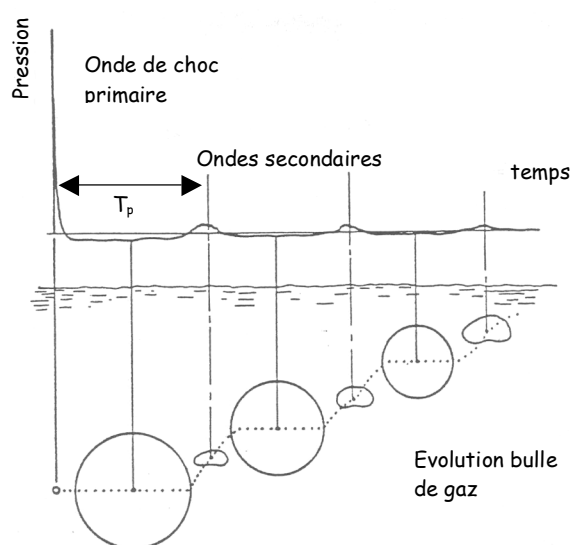


Figure 1 : caractérisation d'une explosion sous-marine.

Le premier effet de la détonation d'une charge C (masse en kg) en eau consiste en la génération « instantanée » d'une onde de surpression à front raide (onde de choc primaire), prolongation directe de l'onde de détonation générée au sein même de l'explosif. Dès lors que l'on quitte la région très proche de l'explosion, la propagation est sphérique et s'effectue à la vitesse du son dans l'eau ; cette onde acoustique se propage à l'infini. A la distance R du point de détonation, on lui donne communément la forme d'une exponentielle décroissante :

$$p(t) = P_{\max} \exp(-t/\theta)$$

Avec, en fonction de la masse de charge C et R , les formes suivantes pour la pression maximale et la constante de temps (formule de similitude) :

$$P_{\max} = K_p \left(\frac{C^{1/3}}{R} \right)^\alpha \quad \text{et} \quad \theta = K_\theta C^{1/3} \left(\frac{C^{1/3}}{R} \right)^\beta$$

Sur une échelle de temps plus importante, la détente en eau du volume gazeux issu de la détonation donne naissance à un phénomène pulsatoire, du fait de la recherche de l'équilibre avec la pression hydrostatique.

La bulle de gaz ainsi générée, sphérique, est caractérisée par son rayon maximal, qui dépend de la hauteur d'eau H au dessus du point de détonation, ici exprimée en mètres :

$$R_{\max} = K_R \frac{C^{1/3}}{(H + 10)^{1/3}}$$

Sa dynamique est caractérisée par une pseudo-période (durée qui sépare la détonation du passage au premier minimum du rayon) qui s'écrit sous la forme :

$$T_p = K_T \frac{C^{1/3}}{(H + 10)^{5/6}}$$

Les différentes constantes et exposants ne dépendant alors que de la nature de l'explosif.

La figure 1 illustre le processus : au dessus de l'abscisse (axe des temps) on reporte la forme générale de l'onde de pression générée (onde de choc, ondes secondaires). Sous l'axe des temps est représentée l'évolution de la bulle des gaz générée : l'axe vertical suivant lequel s'effectue la migration est pour une raison de lisibilité rabattu sur l'axe des temps.

Du fait de la forte densité de l'eau, le champ de pression qui s'applique aux interfaces exposées (chargement) dépend de la réponse de structure (vitesse, accélération). Il s'agit d'un couplage fort :

- du chargement dépend la réponse,
- de la réponse dépend le chargement.

Ainsi donc la détermination du chargement effectif est renvoyé à celui de la réponse.

Hors toute simplification, la difficulté réside dans le fait d'échelles de temps très différentes pour ce qui est de la durée des chocs et la dynamique de pulsation de bulle. On a par exemple pour une charge de 100 kg de TNT immergée à 10 m, un rayon de bulle d'explosion de 6 mètres et une pseudo-période de 0,8 seconde, alors que l'onde de choc primaire est dotée d'une pression maximale de 220 bars pour une constante de temps inférieure à 0,5 millisecondes.

3 - Les chargements par explosions ou souffles aériens

La caractérisation des chargements de souffle aérien est plus aisée pour le mécanicien des structures, dans la mesure où, a contrario de ce qui précède, les forces dues aux mouvements sont cette fois-ci négligeables. En champ libre, la forme du signal de pression est celle de la figure 2.

Si R et C sont respectivement la distance d'observation et la masse de la charge, on utilise des abaques qui définissent, en fonction de la distance réduite $Z = R/C^{1/3}$ des paramètres tels :

- la pression maximale en champ libre,
- la durée de la surpression positive,
- la valeur de l'impulsion positive du signal.

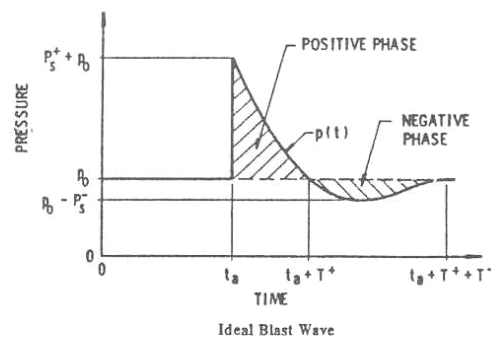


Figure 2 : Onde de souffle aérien (forme générale)

Les chargements de structures sont donnés par des abaques du même type, généralement issues d'expérimentations qui donnent :

- la pression réfléchie, ici pression totale qui s'applique sur la paroi exposée,
- l'impulsion générée par l'onde, désignée comme réfléchie également.

Cela concerne des souffles s'appliquant en incidence normale ; des corrections sont possibles en incidence oblique.

Dans des cas plus complexes, ceux de réflexions multiples d'ondes à l'intérieur de locaux confinés notamment, le calcul numérique des chargements peut s'effectuer, cible ou parois fixes, à l'aide de modèles plus ou moins sophistiqués ; mais majoritairement donc de façon découplée.

Toujours dans le cas d'explosions internes avec confinement, s'applique en fin de signal de souffle, une pression « quasi statique » ou résiduelle p_R . Elle est reliée à la charge explosive et au volume V_C de confinement par (formule de Weibull) :

$$p_R = C^{te} \left[\frac{C}{V_C} \right]^\alpha$$

Supposons que la même charge de 100 kg de TNT détone au centre d'un cube de 10 m de côté. Sur la paroi à 5 mètres, la pression maximale réfléchie est de 33 bars pour une impulsion positive de 2500 Pa.s. La pression résiduelle calculée (volume de 1000 m³) est de 4,3 bars.

En champ libre à 5 m, la surpression est de 8 bars pour une impulsion positive de 780 Pa.s, d'une durée de 8 ms environ.

4 - Le calcul des structures par éléments finis : modèle implicite et/ou modèle explicite :

La formulation générale d'un calcul de structures par éléments finis est supposée connue. Si K , C et M désignent respectivement les opérateurs ou matrices de rigidité, d'amortissement et de masse, il s'agit alors, en dynamique de résoudre à chaque instant t :

$$M\ddot{x} + C\dot{x} + Kx = F(t)$$

Le vecteur x désignant le vecteur des variables de déplacement aux nœuds du maillage (inconnues).

Le temps étant discrétisé sous le pas Δt , on écrira respectivement :

a) en schéma implicite (Schéma de Newmark, cas de l'accélération moyenne) :

$$\left[\frac{4}{\Delta t^2} M + \frac{2}{\Delta t} C + K \right] x_{n+1} = F_{n+1} - C \left[\dot{x}_n + \frac{\Delta t}{2} \ddot{x}_n \right] + \left[\frac{4}{\Delta t^2} M + \frac{2}{\Delta t} C \right] \left[x_n + \Delta t \dot{x}_n + \frac{\Delta t^2}{4} \ddot{x}_n \right]$$

b) en schéma explicite (cas des différences finies centrées) :

$$\left[\frac{1}{\Delta t^2} M + \frac{1}{2\Delta t} C \right] x_{n+1} = F_n - \left[K - \frac{2}{\Delta t^2} M \right] x_n - \left[\frac{1}{\Delta t^2} M - \frac{1}{2\Delta t} C \right] x_{n-1}$$

Dans les deux cas, les vitesses \dot{x}_{n+1} et accélérations \ddot{x}_{n+1} s'écrivent alors en fonction de x_{n+1} et des valeurs $x_n, \dot{x}_n, \ddot{x}_n$ calculées au pas précédent.

A la lecture, on remarque que la résolution du système en formulation implicite nécessite celle d'un système linéaire à chaque pas de temps.

Si les opérateurs ainsi que le pas de temps sont constants, ce schéma est très efficace car il s'agit d'inverser une première fois l'opérateur du premier membre et la résolution temporelle est immédiate. Ce schéma a également pour avantage d'être inconditionnellement stable ; il est donc très adapté à la dynamique linéaire se déroulant sur une échelle de temps longue.

En statique, vient la simplification bien connue : $F = Kx$.

En dynamique non linéaire, l'opérateur de rigidité K dépend du déplacement x et alors le schéma explicite est beaucoup plus efficace.

En effet, l'inversion des opérateurs n'est pas nécessaire, à la condition toutefois d'utiliser dans le calcul des opérateurs de masse et d'amortissements diagonaux ou diagonalisés.

Le schéma est alors assimilable à celui d'un équilibre de nœuds. Les forces internes, sources potentielles des non linéarités, peuvent être assez facilement reformulées à chacun des pas de temps. Il ne fonctionne qu'en dynamique et présente du fait de son caractère explicite l'inconvénient d'être instable (au pas $n+1$ la force appliquée est celle du pas n) ; une condition générale de stabilité s'exprime sous la forme :

$\Delta t < \frac{\Delta \ell}{c}$ avec c la vitesse du son et $\Delta \ell$ une dimension caractéristique des éléments finis.

On parle volontiers de code de dynamique rapide dans la mesure où le calcul sur des échelles de temps long est pénalisé.

On introduit alors aisément les non linéarités géométriques à l'origine des phénomènes d'instabilité (flambement), celles de comportement des matériaux ainsi que la prise en compte de processus de déchirures, d'auto-contacts, etc.

Concernant la modélisation d'un processus de déchirure, deux techniques sont généralement possibles :

(a) la suppression d'éléments (masse non conservée),

(b) la suppression de liaisons entre éléments,

Une application très sommaire est illustrée sur la figure 3 : elle illustre le processus de déchirement d'une plaque encadrée soumise à onde de pression (méthode b).

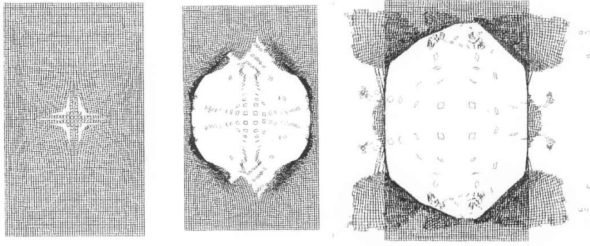


Figure 3 : processus calculé de déchirement d'une plaque

Une application plus consistante et pratique est donnée sur la figure 4 : il s'agit de la simulation des effets d'une explosion à l'intérieur d'un navire civil, provoquée par un véhicule piégé. Les chargements de pression sont introduits sous la forme temporelle sur chacune des parois successivement exposées.

Les réflexions d'ondes sont négligées et la pression résiduelle due au confinement est bien évidemment appliquée. Le processus de déchirement, est modélisé suivant b) ci-avant. Le modèle de calcul de structure (symétrisé) utilisé est présenté. Bien que non reportée ici, la visualisation des effets de la détonation, déformation des planchers et parois latérales, ainsi que la propagation des déchirures est possible et déterminante dans l'analyse.

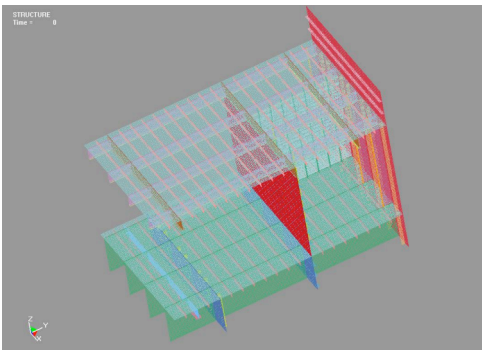
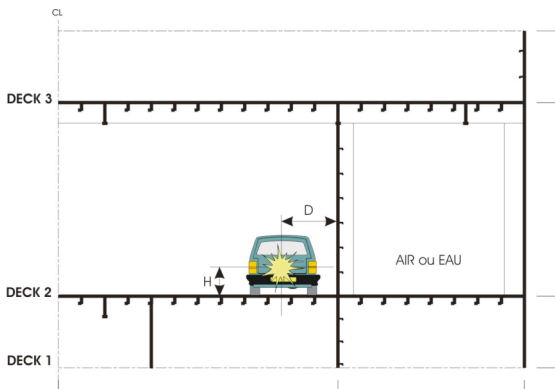


Figure 4 : Effets de détonation interne à un navire

5 - Le calcul couplé fluide-structure par la méthode DAA :

Il s'agit de traiter les effets de détonations en eau : la méthode DAA (Double Approximation Asymptotique), s'applique aux explosions suffisamment lointaines pour que l'évolution de la bulle de gaz d'explosion ne soit pas modifiée par la présence de la structure et sa réponse.

Développée par Geers dans les années 70, elle permet de traiter de façon approchée, mais efficace, l'interaction fluide-structure sur l'ensemble du domaine fréquentiel ; elle représente néanmoins de façon exacte l'interaction aux deux comportements limites asymptotiques suivants :

- en haute fréquence HF, ou « temps court », pour lesquels les effets liés à l'action des ondes acoustiques sont majeurs,

- en basses fréquences BF, ou « temps long », pour lesquels les effets inertiels dus aux masses d'eau ajoutées sont prépondérants.

Elle est de ce fait très bien adaptée à la détonique sous-marine ; les effets liés à l'onde de choc relevant essentiellement du comportement HF et ceux liés à la pulsation de bulle relevant de la dynamique de structure en BF.

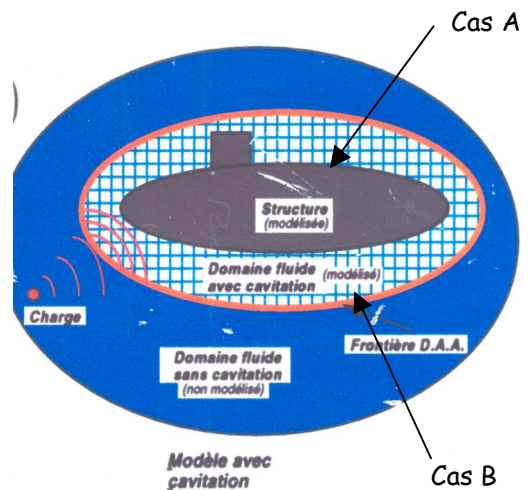


Figure 5 : Modélisation par la méthode DAA

Le système couplé d'équations à résoudre s'écrit :

$$(1) \quad M\ddot{x}(t) + C_S\dot{x}(t) + Kx(t) = -GA_f(p_i(t) + p_s(t))$$

$$(2) \quad \frac{1}{\rho c} M_f \dot{p}_s(t) + A_f p_s(t) = M_f \dot{u}_s(t)$$

ou

$$(2') \quad \frac{1}{\rho c} M_f \dot{p}_s(t) + A_f p_s(t) = M_f (G^T \ddot{x}(t) - \dot{u}_i(t))$$

Le vecteur x désigne ici le déplacement généralisé, M , C et K sont les opérateurs de structure déjà cités. M_f désigne la matrice des masses d'eau ajoutée, A_f un opérateur de surface (aires) et G un opérateur géométrique utile à la projection normale notamment.

Les vecteurs p_i , u_i représentent les champs de pression et vitesse particulaire incidents, connus.

De la même façon, les vecteurs p_s et u_s sont relatifs à l'onde diffusée (onde diffractée + onde réfléchie) u_s . Ce sont des inconnues du système, au même titre que les déplacements x

Nota :

Les vecteurs $u_i(t)$ et $p_i(t)$ ne sont pas indépendants. Ils sont définis par le chargement (explosion), qu'il s'agisse de la modélisation de l'onde de choc primaire ou de celle des effets d'écoulement générés par la pulsation : là aussi des modèles numériques particuliers de calcul en eau libre existent.

On déduit (2') de (2) par continuité de l'écoulement à la surface : $G^T \dot{x} = u_i + u_s$

Les deux systèmes d'équations sont résolus pas à pas par deux codes «indépendants». On parle parfois de méthode « chimère ».

Les opérateurs sont généralement formulés sur la surface mouillée de structure (cas A de la figure 5) ou à la frontière d'un domaine fluide externe entourant la structure, discrétisé pour traiter les aspects non linéaires (cavitation) de l'interaction fluide-structure, si nécessaire (cas B de la figure 5). Ainsi donc, la modélisation de l'ensemble du domaine fluide est absente du modèle (zone bleue de la figure 5).

Le calcul de l'opérateur des masses d'eau ajoutées s'effectue à l'aide d'une méthode par équations intégrales.

A partir de la formulation on peut décrire plus précisément les deux comportements asymptotiques :

a) en HF, les termes en \dot{p}_s de l'équation (2) ci-avant sont beaucoup plus importants que les termes en p_s ; il vient alors :

$$p_s(t) = \rho c (G^T \dot{x}(t) - u_i(t))$$

Il s'agit de l'approximation d'onde plane ou PWA. Cela revient à écrire localement le chargement de pression totale sous la forme, $V(t)$ désignant la vitesse normale:

$$p_i(t) + p_s(t) = 2p_i(t) - \rho c V(t)$$

Une simplification du calcul couplé peut encore exister (voir nota ci-après)

b) en basse fréquence, l'inverse prévaut ; il vient alors :

$$A_f p_s(t) = M_f (G^T \ddot{x}(t) - \dot{u}_i(t)) \quad \text{soit :}$$

$$(M + M_f) \ddot{x}(t) + C_s \dot{x}(t) + Kx(t) = -GA_f p_i(t) + M_f \dot{u}_i(t)$$

On reconnaît en particulier dans le premier membre la formulation du calcul des fréquences en eau.

Un exemple d'application (figure 6) :

Entouré partiellement d'eau (cas B ci-avant), le tronçon de coque raidi de sous-marin est doté d'un plancher supportant divers équipements d'emménagement et se trouve chargé dans sa partie basse d'équipements lourds, schématisés par des blocs rigides.

Le calcul a pour but d'établir les sollicitations dynamiques applicables aux matériels internes du navire, sensibles aux effets de chocs par explosions sous-marines ; au delà du seul calcul dynamique, on utilise volontiers les traitements de signaux en spectre de chocs sur des points cibles (figure 6), dans le but de spécifier au plus juste besoin les essais de qualification sur machines de chocs.

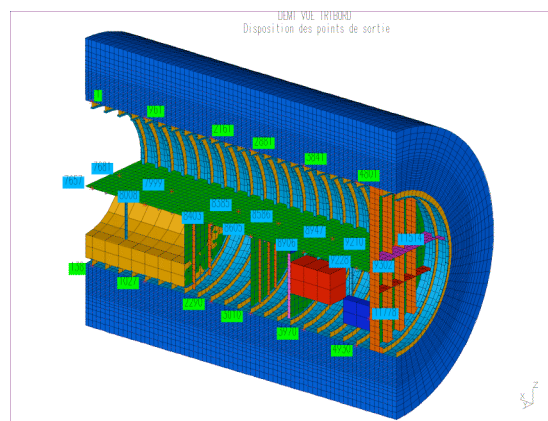


Figure 6 : Calcul DAA d'un tronçon de coque

Ces techniques sont notamment utilisées dans le cadre de l'analyse de sûreté des chaufferies nucléaires des sous-marins, dans l'environnement militaire.

Un contexte particulier d'utilisation de la méthode DAA est également celui de la mise sur suspension basse fréquence des systèmes de propulsion des navires, optimisés dans le but d'améliorer les performances de discrétion acoustique. Les effets possibles de couplage entre fréquences de suspension et de pulsation de bulle doivent être maîtrisés.

Un autre cas enfin peut être celui de l'implosion de capacités immergées et ses effets sur des structures avoisinantes.

Nota :

Dans le cas limite de l'approximation d'onde plane (voir ci-avant), le chargement est donné localement par :

$$p_i(t) + p_s(t) = 2p_i(t) - \rho c V(t)$$

Si l'on fait de plus l'hypothèse que les périodes propres de structures sont grandes par rapport aux durées d'application des chargements, on est alors dans le domaine dit « impulsif » : les forces internes sont négligeables durant l'interaction, le comportement est purement massique et l'équation propre à l'approximation d'ondes planes peut posséder une solution analytique ; c'est le cas d'un chargement par onde de choc à décroissance exponentielle.

Cela peut donner naissance à une technique de calcul de structure approché équivalent « in vacuo ». Cette méthode consiste alors à appliquer à la structure comme champ de vitesses initiales celles issues de l'interaction calculées analytiquement et localement, et de procéder alors au calcul de la réponse.

Cela permet d'estimer assez facilement les effets de la seule onde de choc d'explosion, souvent majeurs.

Le calcul de la solution analytique et certaines propriétés du couplage qui en découlent sont reportés en annexe. Il s'agit du modèle de Taylor.

6 - Les modèles couplés « Euler Lagrange » :

Dans le cas où les interactions entre l'évolution de la bulle des gaz générée par l'explosion et les structures exposées sont plus complexes (cas des explosions très proches), on est amené à traiter sous forme discrétisée non seulement le comportement des structures, mais également celui de l'explosion et des milieux environnants.

a) Les champs d'écoulements propres aux milieux « fluides » sont déterminés par résolution des équations d'Euler. Pour schématiser, le support de calcul « Eulerien » est une grille fixe à l'intérieur de laquelle s'écoulent les différents fluides, qu'il s'agisse :

- du fluide dans laquelle la structure est partiellement ou totalement immergée,
- de l'air (atmosphérique ou interne au navire),
- du gaz explosif, généré par la détonation.

Les cellules de calcul sont initialement remplies des fluides concernés mais toutes interactions restent possibles (les gaz d'explosion prennent la place de l'eau qui peut elle-même pénétrer dans la structure après déchirement au même titre que les gaz d'explosion, etc.)

Les schémas numériques les plus performants permettent de gérer sans phénomènes parasites de diffusion la migration des fluides d'une cellule à l'autre ; une cellule de calcul peut être « multi fluides ».

b) Le comportement et la réponse de structure sont classiquement décrits par un modèle Lagrangien (équations de Lagrange) ; le support de calcul suit dans ce cas la géométrie.

c) le couplage entre modèles Eulerien et Lagrangien s'effectue à chaque pas de temps du calcul transitoire. Les mouvements de la cible fixent les conditions de frontières propres aux calculs de fluide (continuité des écoulements) ; les pressions aux interfaces celles de la structure.

Le calcul s'effectue en explicite avec les contraintes et facilités qui lui sont propres (pas de temps de calcul réduits par respect des conditions de stabilité, prise en compte aisée des non-linéarités).

De fait, ce type de simulation reste très lourd et coûteux :

- de par la taille des modèles,
- de par la précision de la réponse recherchée (effet de chocs en HF) et la durée des phénomènes et précision (effet BF de pulsation et collapse de bulle).

Le développement du calcul parallèle sur machines multi-processeurs est alors quasi-indispensable.

Un exemple :

Un des problèmes caractéristiques est celui de l'explosion de charges de plus ou moins gros grammage (de la charge de nageurs de combat à celles de torpilles) sous les fonds de navires (structures en simple ou double fonds). Les effets de déchirements possibles sont du type de ceux de la figure 7 (respectivement obtenus par expérimentation et simulation numérique).

Fig. 7-a : Expérience

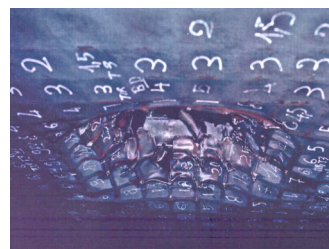


Fig. 7-b : Calcul

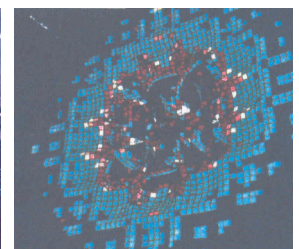


Figure 7 : Effets d'explosions sous fonds de navire

Une illustration des conditions du calcul Eulerien est donnée sur la figure 8 suivante.

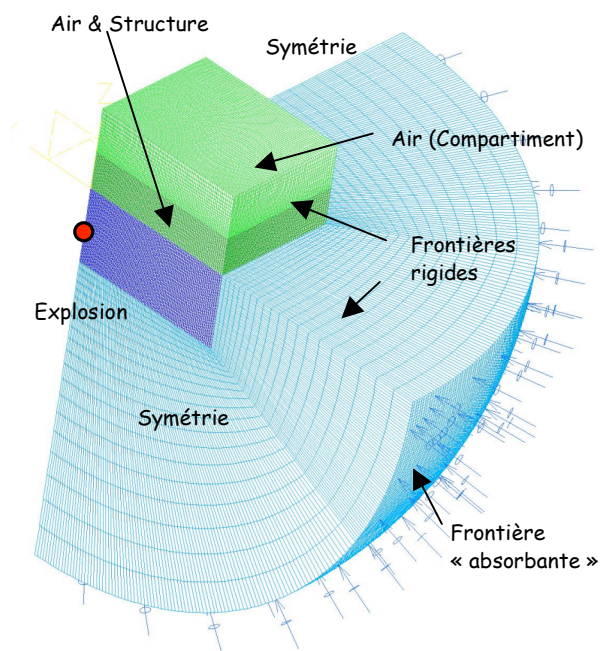


Figure 8 : Grille Eulérienne d'un calcul couplé

La structure en double parois d'un fond de navire (cachée sur la figure) est positionnée sur le volume d'air qu'elle enferme initialement (partie « vert foncé » de la figure).

Au dessus du double fond, en « vert clair », se trouve un compartiment interne au navire supposé doté de parois rigides.

En « bleu foncé », un volume d'eau est très finement modélisé car la propagation des ondes doit y être parfaitement calculée (explosif positionné à l'intérieur, en rouge). En « bleu ciel » figure une zone étendue de fluide est susceptible de recevoir l'expansion de la bulle de gaz d'explosion.

La simulation peut mettre en évidence :

- l'interaction fluide-structure sous l'onde de choc et les effets de déchirure générés sur la structure,
- l'expansion de la bulle de gaz de l'explosion en eau, ses effets sur la structure,
- la pénétration de l'eau et des gaz dans le compartiment, le déchirement éventuel du vaigre, c'est-à-dire la paroi interne du double-fond,
- la recherche d'équilibre entre pression interne de l'air des gaz et hydrostatique.

Toutes les conditions du calcul respectent les équilibres initiaux et comportements de frontières (rigides, acoustiques, etc.)

Une charge explosive est placée en eau ; qui à l'instant 0 du calcul libère un gaz obéissant aux équations de comportement JWJ (Jones Wilkins Lee).

Ce type de technique peut être également utilisé à la détermination des effets sur les navires attaqués à la flottaison par embarcations suicide (figure 9) ; explosions sous-marines et aériennes sont alors intimement mêlées.

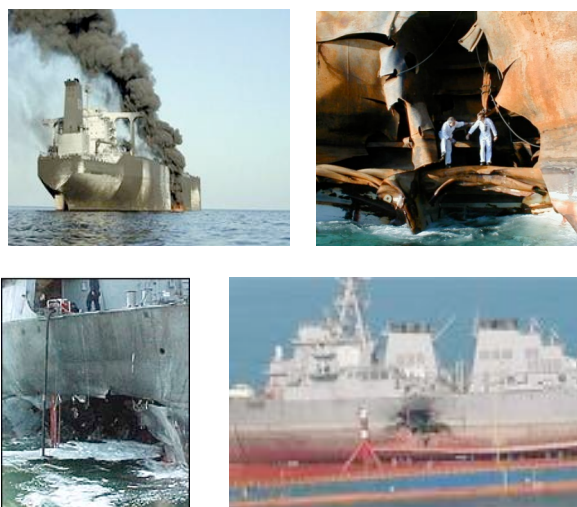


Figure 9 : Attaque des navires Limburg et USS Cole

7 - Les moyens d'expérimentations :

Il va de soi que la mise au point et la validation de telles méthodes de calcul ne peut se faire sans quelques recouvrements et validations par voie expérimentale :

- essais en bassin de détonique de grandes dimensions qui permet à DGA Toulon de réaliser des tirs sous-marins de charges de l'ordre de 5 kg, par valeurs maximales ; en mer également pour des charges plus importantes (essais sur navires) ; les photos de la figure 10 en sont une illustration ;

- essais de détonations aériennes sur des sites sécurisés, les charges peuvent alors atteindre plusieurs centaines de kilogrammes d'explosif.

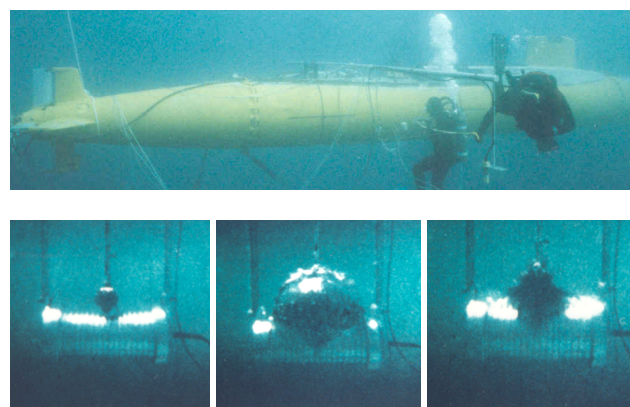


Figure 10 : Essais de détonique sous-marine

Les essais en similitude sont bien évidemment possibles (la similitude géométrique s'applique, hors effets gravitationnels) mais ne sont pas strictement nécessaires s'il s'agit de qualifier des processus de simulation complexes.

Pour ce faire, on utilise bien évidemment des moyens de visualisation par caméra rapide, ainsi qu'un ensemble large de moyens de métrologie : accéléromètres, vélocimètres laser, capteurs de pression, jauges d'extensométrie, etc. L'étude de la réponse de cibles instrumentées, à petite ou grande échelle est alors possible. Les méthodes DAA décrites auparavant et nombreuses de leurs formes d'applications possibles ont été régulièrement confrontées à l'expérimentation.

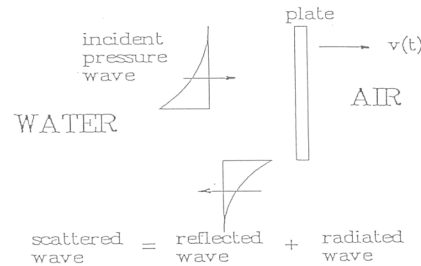
Les développements expérimentaux actuels portent plus particulièrement sur la thématique des explosions au voisinage du dioptré « eau/air », comme tel est le cas des structures de navires exposées à la menace par embarcation suicide.

Bibliographie :

- [1] R.S. Hoyller: Direct shock waves damage due to merchant ships from non contact underwater explosions - The society of naval architects and marine engineers SNAME (april 59).
- [2] K.A. Bannister: Whipping analysis techniques for ships and submarines – The shock and vibration bulletin (n°50 part 3 -09/1980)
- [3] B. Auroire: Modèles de réponse couplés fluide-structure en détonique sous-marine – Institut pour la promotion des sciences de l'ingénieur - *IPSI /φ²AS* (vol. XXII n°2 - 1998).
- [4] T.L. Geers: Doubly Asymptotic Approximations for Transient Motions of Submerged Structures – Journal of Acoustical Society of America (nov. 78)
- [5] J. A. Deruntz: The underwater shock analysis code and its applications – Proc. 60th Shock and vibration symposium (1989 - vol.1)
- [6] J. A. Deruntz & T.L. Geers : Added mass computation by the boundary Integral method - International journal for numerical methods in engineering (vol. 12 -1978).
- [7] Ch. E. Anderson: An overview of theory of Hydrocodes International Journal of impact engineering (vol.5 - 1987).
- [8] LS-Dyna User's manual, V970 Avril 2003 & supports de cours associés.
- [9] W.E Baker – Cox: Explosion hazards and evaluation. Editions Elsevier.

Annexe : Modèle de Taylor

On suppose la plaque libre, de dimension unitaire et de masse par unité de surface m ; elle est en interface eau-air et soumise à l'action de l'onde acoustique en incidente normale $p_i(t)$ en eau (c vitesse du son et ρ masse volumique de l'eau) :



En acoustique linéaire, l'onde diffractée (reflected wave) est égale à l'onde incidente, l'onde rayonnée (radiated wave), due au mouvement, est égale à $-\rho c V(t)$ de telle sorte que l'équilibre s'écrit :

$$m \frac{dV}{dt} = 2p_i(t) - \rho c V(t)$$

Pour une onde de forme $p_i(t) = P_{\max} e^{-t/\theta}$

La solution s'écrit :
$$V(t) = \frac{2P_{\max}\theta}{m(1-\beta)} \left[e^{-\beta t/\theta} - e^{-t/\theta} \right]$$

Le coefficient $\beta = \frac{\rho c \theta}{m}$ représente un coefficient adimensionnel de masse, ratio de la masse d'eau « déplacée » par l'onde à celle de la structure, par unité de surface.

On calcule alors la vitesse maximale de cible :

$$V_{\max} = \frac{2P_{\max}}{\rho c} \beta^{\frac{1}{1-\beta}} \quad \text{atteinte au temps} \quad t_c = \theta \frac{\text{Log} \beta}{\beta - 1}$$

Pour une pression de cavitation nulle, c'est aussi le temps auquel la cavitation apparaît car le chargement s'annule à t_c . Dans ce cas l'interaction peut être considérée comme terminée. L'énergie cinétique transmise s'écrit :

$$E_C = \frac{1}{2} m V_{\max}^2 = \frac{2P_{\max}^2 \theta}{\rho c} \beta^{\frac{1+\beta}{1-\beta}} = 4E_0 \beta^{\frac{1+\beta}{1-\beta}}$$

E_0 représente ici l'énergie par unité de surface portée par l'onde.

Il est possible d'établir bien d'autres propriétés du transfert. Des méthodes de correction existent également pour traiter le cas d'action ondes en incidence quelconque.