

6e JOURNÉES DE L'HYDRODYNAMIQUE

24, 25, 26 février 1997 - Nantes

**MODÉLISATION NUMÉRIQUE D'IMPACT SUR L'EAU
D'UNE STRUCTURE SOUPLE PAR UNE MÉTHODE
ÉLÉMENTS FINIS EXPLICITE**

Hélène RIBET

**Convention de Recherche Université Paul Sabatier (Toulouse) - Aérospatiale
Aérospatiale - 316, Route de Bayonne 31060 Toulouse cedex 03**

Résumé

Le développement actuel de codes de calcul de crash associé à l'amélioration significative des performances des moyens informatiques permettent d'envisager, dans un cadre industriel et à des conditions économiques intéressantes, des simulations numériques d'impact sur l'eau de structure déformable, dont la modélisation est rappelée dans un premier temps. Une méthode éléments finis explicite de dynamique rapide transitoire, choisie pour ses potentialités à modéliser les non linéarités de la structure (en terme de déplacements ou de déformations) est évaluée ici à partir de différents cas tests pour lesquels résultats analytiques et numériques sont disponibles. Les corrélations entre calculs et résultats de référence, ainsi que leur coût, permettent de valider une telle approche, sous réserve d'une validation définitive sur structure représentative.

Summary

The present development of crash calculation codes associated with significant improvements in the performances of I.T resources, mean that, in an industrial context and in advantageous economical conditions, numerical simulations of impact on water of a flexible structure can be envisaged. The mathematical model of the numerical problem is presented in a first part. An explicit finite elements method of transient fast dynamic, chosen for its capabilities to model non-linearities of the structure, is evaluated with different tests, for which analytical or experimental results are available. The correlation between calculations and reference results validate such an approach, if a definitive validation on a representative structure is obtained.

I. INTRODUCTION

Les études théoriques et expérimentales d'impact sur l'eau ont débuté dès le début de ce siècle, en raison de leurs intérêts multiples et des nombreuses applications concernées. On distingue à cet effet deux types d'impacts :

- les impacts dits "intérieurs" (ou "*sloshing*") pour lesquels le fluide est situé dans une cavité de la structure. Il s'agit alors essentiellement de problèmes de ballonnement de fluide dans des réservoirs (par exemple, déplacement de liquide dans les soutes d'un méthanier, ballonnement de carburant dans les réservoirs d'un avion,...).
- les impacts dits "extérieurs" (ou "*slamming*") pour lesquels la structure est soit progressivement immergée dans le fluide, soit partiellement immergée dans un fluide soumis à de la houle. Il s'agit alors aussi bien d'étudier la résistance structurale d'une coque de bateau ou d'une plate-forme pétrolière aux chocs des vagues, que d'étudier la retombée d'éléments de lanceurs spatiaux dans la mer ou la récupération de capsule spatiale habitée.

L'objectif de l'architecte est alors de concevoir une structure résistante aux chocs, à objectif de masse donné, en intervenant le plus en amont possible dans le cycle de conception de la structure.

C'est essentiellement le *slamming* qui fera l'objet de cet article.

Les phénomènes physiques à prendre en compte sont complexes : aspect transitoire non linéaire, présence d'une surface libre, couplage entre champ de pression dans le fluide et déformations de la surface libre. De ce fait, historiquement, il a été nécessaire de procéder par étapes.

Initialement, les expérimentations se sont attachées à l'étude de corps rigides. D'une part, il est très délicat, pour des raisons liées à l'instrumentation, de mesurer des pressions sur une structure déformable. D'autre part, des structures comme les coques de navires ou les plates-formes pétrolières peuvent, dans un premier temps, être considérées comme indéformables. A partir de différentes campagnes d'essais sur des corps de géométrie relativement simple, des formulations analytiques ont été définies : elles permettent d'obtenir une première évaluation des efforts subis par le corps au moment de l'impact sur l'eau.

La principale référence est la méthode des "masses ajoutées" initialement développée par Von Karman, dans les années 30, qui bien que d'un principe très simple, permet une bonne approximation des efforts résultants sur une structure rigide (en impact vertical et pour des corps de type sphère, dièdre ou cylindre). Il s'agit alors simplement d'écrire la conservation, au cours du temps, de la quantité de mouvement du corps et de la masse d'eau entraînée par le corps, la difficulté étant d'estimer a priori cette masse d'eau.

Aujourd'hui, grâce au développement important des moyens informatiques de calculs, des simulations numériques d'impacts hydrodynamiques deviennent envisageables, simulations dont le niveau de complexité est lié à la nature des résultats souhaités. Leur principale difficulté réside dans la modélisation des interactions entre fluide et structure, dans le cas d'un régime de dynamique rapide transitoire. La connaissance du comportement structural du corps n'apparaît plus comme un obstacle aujourd'hui ; les codes de calculs permettent des simulations très précises d'écrasement de structures, pouvant inclure des ruptures complexes. De même, la modélisation des écoulements de fluide atteint des niveaux de précision élevés. Il reste donc à modéliser l'influence d'un milieu sur l'autre.

L'objet de cette étude, qui s'attache à la prévision du comportement d'un corps impactant le fluide est donc concentré sur les mouvements de sa structure et ses déformations locales. La méthode numérique choisie doit donc privilégier la modélisation structurale, plutôt que celle de l'écoulement, car seule la sollicitation en pression du fluide est essentielle. Pour cette raison, une approche de type éléments finis explicite, développée pour l'étude de structures souples complexes, est adoptée, à travers le code de calcul Radioss de la société Mecalog.

Le présent article décrit la démarche de modélisation dans ses grandes lignes, et l'illustre par différentes applications d'impact de structures rigides ou souples sur l'eau.

II. MODÉLISATION D'UN IMPACT HYDRODYNAMIQUE

II.1. Le modèle mathématique

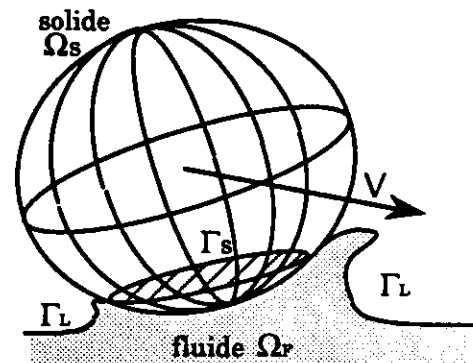
Etudions l'entrée avec une vitesse initiale quelconque d'un corps dans un fluide initialement au repos. Les pressions importantes qui apparaissent dans le fluide au moment du choc sur l'eau sont responsables de déformations locales de la structure et d'une modification du mouvement d'ensemble du corps. Ces déformations locales et globales interagissent avec l'écoulement du fluide et modifient de ce fait les profils de pression. Mathématiquement, l'action du fluide sur le corps est prise en compte par l'écriture d'une force de contact sur la structure ; l'action du corps sur le fluide se traduit par des conditions cinématiques appliquées à la surface du fluide.

Hypothèses et Notations

- le fluide est considéré comme faiblement compressible.
- les effets de tension superficielle, les décollements éventuels ne seront pas modélisés. La cavitation sera simplement représentée par une pression minimale dans le fluide. Les effets de couche limite seront négligés.
- la structure est souple, avec un comportement élasto-plastique qui peut conduire à la rupture.
- les seules forces volumiques extérieures correspondent aux forces de gravité (champ uniforme g).

Notons, en un point M quelconque du domaine d'étude, u et v son déplacement et sa vitesse (indiqué par "solide" ou "fluide" si la distinction s'impose), σ et ϵ les champs de contraintes et de déformations, σ^v les contraintes visqueuses, σ_0 celles au repos et p la pression dans le fluide (de viscosité cinématique η), ρ la masse volumique, e et i les énergies spécifiques totale ou interne. F représente les forces de volumes (limitées à g), $P_{atmos.}$ et $V_{atmos.}$ les conditions de pression et vitesse de la surface libre au repos, v_{impact} la vitesse d'impact du corps à $t=0$. I est la matrice unitaire.

Notons Ω_F et Ω_S les domaines fluide et solide, Γ_L et Σ_c la surface libre du fluide et celle candidate au contact avec la structure à chaque instant (Σ_c contient à chaque instant $\Gamma_S = \Omega_F \cap \Omega_S$). La normale d'une surface sera notée n .



Il s'agit alors de trouver les champs de déplacement et de contraintes admissibles $(\mathbf{u}, \boldsymbol{\sigma})$ définis sur $\Omega = \Omega_F \cup \Omega_S$ par

$$\begin{cases} \boldsymbol{\sigma}(M) = \boldsymbol{\sigma}_{\text{solide}}(M) \text{ et } \mathbf{u}(M) = \mathbf{u}_{\text{solide}}(M) \text{ si } M \in \Omega_S \\ \boldsymbol{\sigma}(M) = \boldsymbol{\sigma}_{\text{fluide}}(M) \text{ et } \mathbf{u}(M) = \mathbf{u}_{\text{fluide}}(M) \text{ si } M \in \Omega_F \end{cases}$$

vérifiant le système d'équations suivant :

• **Lois de comportement et loi d'état**

◇ dans Ω_S comportement élastique $\boldsymbol{\sigma} = \mathbf{C}\boldsymbol{\varepsilon}$
(plasticité éventuelle)

◇ dans Ω_F fluide newtonien :
$$\begin{cases} \sigma_0 = -pI, \boldsymbol{\sigma}^v = 2\eta\boldsymbol{\varepsilon} \\ p = f(\mu, \boldsymbol{\varepsilon}) \text{ avec } \mu = \rho/\rho_0 - 1 \end{cases}$$

• **Equations de la dynamique (formulation Euler ou Lagrange)**

◇ dans Ω_F , conservation de :

la quantité de mouvement :
$$\frac{\partial \rho \mathbf{v}}{\partial t} + \text{div}(\rho \mathbf{v} \otimes \mathbf{v}) = \rho \mathbf{F} + \text{div} \boldsymbol{\sigma}$$

la masse :
$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div} \rho \mathbf{v} = 0$$

l'énergie totale :
$$\frac{\partial \rho e}{\partial t} + \text{div}(\rho e \mathbf{v}) = \rho \mathbf{F} \cdot \mathbf{v} + \text{div}(\boldsymbol{\sigma} \cdot \mathbf{v})$$

l'énergie interne :
$$\frac{\partial \rho i}{\partial t} + \text{div}(\rho i \mathbf{v}) = -p \text{div} \mathbf{v} + \boldsymbol{\sigma}^v \cdot \text{grad} \mathbf{v}$$

l'énergie cinétique :
$$\rho \frac{d}{dt} \left(\frac{\mathbf{v}^2}{2} \right) = \rho \mathbf{F} \cdot \mathbf{v} - (\text{grad} p) \cdot \mathbf{v} + (\text{div} \boldsymbol{\sigma}^v) \cdot \mathbf{v}$$

◇ dans Ω_S , conservation de la quantité de mouvement

$$\rho \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} = \rho \mathbf{F} + \text{div} \boldsymbol{\sigma}$$

• **Conditions aux limites**

◇ sur Σ_c , condition de non pénétration du fluide
(glissement si le fluide est parfait, adhérence sinon)

$$(\mathbf{v}_{\text{fluide}} - \mathbf{v}_{\text{corps}}) \cdot \mathbf{n} \leq 0 \begin{cases} \text{si } (\mathbf{v}_{\text{fluide}} - \mathbf{v}_{\text{corps}}) \cdot \mathbf{n} < 0, \boldsymbol{\sigma} \cdot \mathbf{n} = 0 \\ \text{sin on, } \begin{cases} \boldsymbol{\tau} = 0 & \text{si fluide parfait} \\ \mathbf{v}_{\text{fluide}} = \mathbf{v}_{\text{corps}} & \text{si fluide réel} \end{cases} \end{cases}$$

◇ sur Γ_L , équilibre de la surface libre,
$$\begin{cases} \mathbf{v} \cdot \mathbf{n} = V_{\text{atmos.}}^{\text{normale}} \\ p = p_{\text{atmos.}} \end{cases}$$

◇ à $t=0$
$$\begin{cases} \text{dans } \Omega_F & \mathbf{v} = 0 \\ \text{dans } \Omega_S & \mathbf{v} = \mathbf{v}_{\text{impact}} \end{cases}$$

◇ dans Ω_F
$$\lim_{M \rightarrow \infty} \mathbf{v} = 0, \lim_{M \rightarrow \infty} p = p_{\text{atmos.}}$$

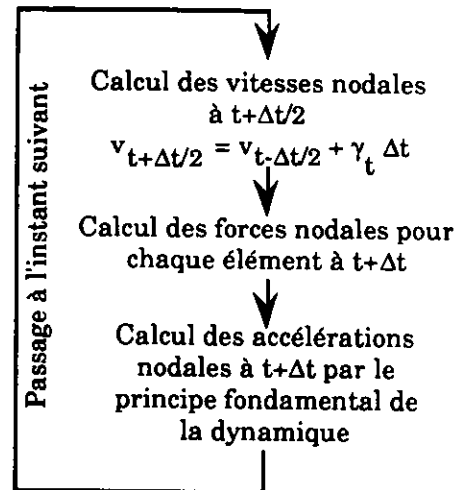
II.2. Résolution par une méthode éléments finis explicite

Le code de calcul Radioss, choisi pour la résolution de ce problème, est fondé sur une méthode éléments finis explicite. Il s'agit donc de résoudre à chaque pas de temps, les équations de conservation et de comportement établies précédemment, après une discrétisation du domaine de calcul en mailles élémentaires.

a. Schéma d'intégration en temps

L'algorithme du code est fondé sur la résolution du principe fondamental de la dynamique en chaque nœud du maillage, par une formulation explicite selon un schéma de différences centrées, schéma utilisé de façon très classique. Il s'agit donc de calculer l'accélération aux nœuds à un instant donné, connaissant sa valeur à l'incrément précédent.

Notons que accélérations et déplacements sont constants entre les instants t et $t+\Delta t$ (Δt représente le pas de temps de calcul) alors que les vitesses le sont entre $t-\Delta t/2$ et $t+\Delta t/2$.



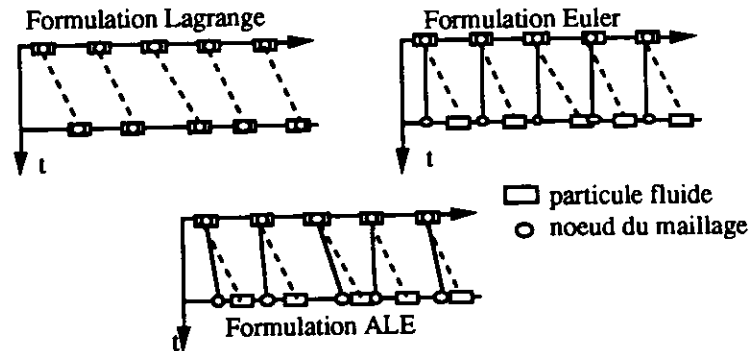
Dans le cas de résolution implicite, le calcul des variables au temps t s'effectue par un schéma de prédiction-corrrection : il s'agit d'évaluer le comportement ultérieur de la structure, en chaque point afin de le connaître à l'instant choisi. Une telle méthode, inconditionnellement stable, exige de nombreuses étapes de calcul et ne peut être envisagée quand les systèmes deviennent trop fortement non linéaires.

Dans un schéma de résolution explicite, la difficulté réside dans le calcul des forces appliquées aux nœuds d'un élément mais l'état de la structure aux instants futurs n'est pas nécessaire. Ainsi, cette méthode est bien adaptée aux calculs en dynamique rapide à grandes déformations puisque celles-ci n'ont pas à être anticipées. Toutefois, le schéma de résolution est conditionnellement stable, c'est-à-dire que le pas de temps de calcul doit être suffisamment petit pour assurer la convergence de l'algorithme. Cette condition est liée au calcul de contrôle de l'erreur du déplacement à chaque instant (erreur due à l'approximation du champ de déplacement et au choix d'un schéma d'intégration, qui se cumule aux erreurs des pas de temps précédents) qui à chaque instant impose des contraintes sur les valeurs propres de la matrice $M^{-1}K$. Physiquement, celle-ci traduit que le pas de temps doit être inférieur au minimum global du rapport (taille de l'élément / célérité du son dans le matériau) : toute onde située en un nœud du maillage sera, au mieux, au nœud le plus proche au pas de temps suivant ; aucune information ne peut donc "sauter" un point du maillage.

Notons enfin que le temps total de calcul est conditionné non seulement par le pas de temps de calcul mais aussi par le nombre d'éléments du maillage (et non par le nombre de degrés de liberté comme pour les cas implicites).

b. Formulation Lagrangienne ou ALE

La formulation adoptée correspond soit à une formulation lagrangienne (pour laquelle le maillage se déplace avec la matière), soit à une formulation dite ALE ("Arbitraire Lagrange Euler"). Cette formulation est intermédiaire entre les formulations purement lagrangienne ou eulérienne (pour laquelle le maillage fixe est traversé par la matière) ; les déplacements du maillage et de la matière sont alors indépendants.



Dans le cas d'une formulation lagrangienne, le maillage suit la matière dans son mouvement. Ceci conduit à des maillages susceptibles d'être fortement écrasés - d'où des longs temps de calcul puisque le pas de temps, et donc la durée du calcul, sont directement liés aux dimensions minimales des mailles.

D'autre part, la prise en compte de la vitesse horizontale d'impact impose des dimensions totales de maillage importantes, puisqu'il faut modéliser la totalité de la zone d'eau concernée par l'impact. Dans un tel cas, il apparaît plus judicieux d'utiliser une formulation ALE. Celle-ci permet de modéliser un écoulement horizontal à travers le maillage, comme dans le cas d'une approche eulérienne, limitant ainsi le coût du calcul. En revanche, le fluide peut aussi se déplacer avec le maillage dans le sens de l'impact : les déformations de la surface libre sont alors bien appréhendées. Enfin, il est possible de rendre indépendants déplacements du maillage et du fluide : ceci permet de limiter les écrasements des éléments.

En contrepartie, il s'agit à chaque pas de temps, d'estimer de façon précise la direction normale à la surface libre afin d'imposer correctement les conditions de glissement et d'écrasement. Ceci conduit à des cycles de calcul plus longs mais cependant acceptables, l'interpolation du déplacement du maillage ne permettant pas toujours d'exploiter au mieux les avantages de l'ALE.

c. Modélisation de la structure et du fluide

- La structure est modélisée, en formulation lagrangienne, soit par des éléments surfaciques ou linéaires dans le cas d'une structure souple, soit par un corps infiniment rigide.

La loi de comportement du matériau correspond en général à une loi élastique et plastique pouvant aller jusqu'à la rupture.

- Le fluide est associé à une loi d'état hydrodynamique linéaire et une pression de cavitation constante ($p = C\mu$ avec $C = 2100\text{MPa}$, $p_{\min} = -0.1\text{MPa}$) et une viscosité cinématique égale à $\eta = 1.10^{-3}$.

Le maillage est basé sur des éléments volumiques à 8 nœuds. Les dimensions globales du fluide sont suffisamment importantes pour que les réflexions d'ondes sur les parois ne

gènèrent pas d'échos perturbant les mesures dans la zone d'impact. La densité du maillage est voisine de celle de la structure.

- **Les phénomènes numériques d'hourglass** : les éléments surfaciques et volumiques de Radioss n'utilisent qu'un seul point d'intégration pour l'évaluation des matrices élémentaires de rigidité : ces éléments sont donc fortement sous-intégrés, mais cela permet des temps de calcul réduits. En revanche, certaines grandeurs physiques peuvent être assimilées à une valeur constante dans l'élément alors qu'elles sont en réalité variables.

Une conséquence est qu'il apparaît des modes de déformations parasites (dits *modes d'hourglass*), qui ne correspondent à aucune réalité physique. Il s'agit alors de limiter ces déplacements en introduisant des forces anti-hourglass, qui s'opposent au déplacement erroné du maillage.

Plusieurs formulations d'hourglass sont disponibles dans ce code (notamment celle de Hallquist ou de Belytschko). Malheureusement, il est très difficile de contrôler ces déformations de maillage en raison de la faible résistance en cisaillement des éléments fluide. D'autre part, si une formulation se trouvait adaptée à la phase très brève de l'impact, elle ne l'est pas forcément pour la phase d'écoulement qui suit car les déformations en cisaillement des éléments sont radicalement différentes pour ces deux phases.

L'une des principales difficultés des modélisations a reposé sur le choix d'une formulation d'hourglass adaptée.

d. Modélisation des interactions fluide-structure : méthode de pénalité

Le contact entre fluide et structure conduit à écrire, en premier lieu, des conditions de vitesses selon la normale à la surface de contact, qui traduisent la non-pénétration du fluide dans la structure. D'autre part, comme les frottements du fluide sur la structure sont très faibles, même pour un fluide réel, les contraintes tangentielles dans le fluide et sur la structure au niveau de la zone de contact pourront être négligées.

La condition de non-pénétration est traduite approximativement en introduisant entre le nœud et l'élément en contact un ressort caractérisé par sa raideur, afin de repousser les nœuds qui viendraient en contact, grâce à la création d'effort fictif de pénalité. Cette dernière peut être constante ou dépendre de la pénétration estimée du nœud (équivalente à un amortissement visqueux), selon les algorithmes choisis (*figure 1a*). La traversée des éléments par les nœuds peut être anticipée par l'imposition d'un intervalle (dit *gap*) de détection du contact, ce qui évite des variations trop brutales des forces appliquées aux nœuds.

Dans tous les cas, la gestion du contact se compose d'une phase de recherche des pénétrations éventuelles puis d'une phase de réduction des pénétrations par la mise en place de ressorts fictifs entre le nœud pénétrant et la facette traversée. En outre, afin de respecter le principe mécanique de l'action et de la réaction, si une force de pénalité est appliquée à un nœud, les nœuds de la facette en regard au travers de laquelle il aurait pénétré, sont soumis à des forces de réaction qui s'y opposent (*figure 1b*). Celles-ci sont fonction, entre autres, de la position du point de contact C par rapport aux quatre nœuds de l'élément impacté.

La principale difficulté dans le cas d'impact sur l'eau repose sur le fait que les raideurs des éléments du fluide et de la structure sont très différentes, celle de l'interface étant généralement une moyenne des raideurs des éléments en contact. Dans ce cas précis, la raideur des interfaces sera choisie équivalente à celle du fluide.

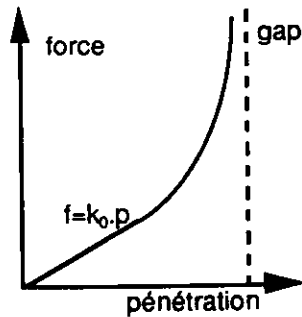
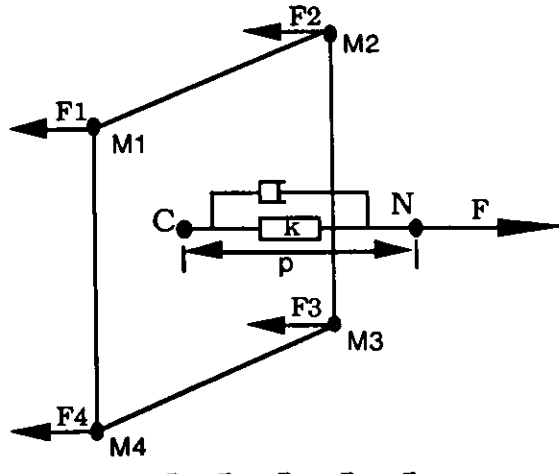


figure 1a : évolution de la force de pénalité en fonction de la pénétration

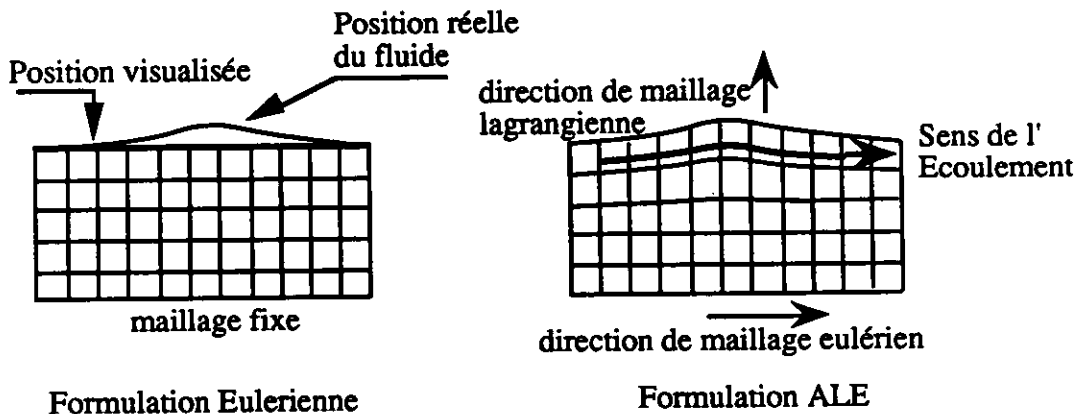


$$\vec{F} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \vec{F}_3 + \vec{F}_4$$

figure 1b : équilibre des forces de pénalité

e. Modélisation de la surface libre

En formulation lagrangienne, chaque élément du maillage contient toujours les mêmes particules, ce qui permet de connaître avec précision la position des frontières d'un domaine. En revanche, en formulation ALE, il peut y avoir fuite de la matière à travers le maillage, comme pour une formulation eulérienne. Ainsi, pour modéliser un écoulement de fluide avec formation d'une vague, il serait intéressant de suivre précisément les déformations du maillage dans le sens orthogonal à l'écoulement (afin de bien appréhender le " gonflement " de la vague) tout en laissant l'écoulement eulérien dans le sens tangentiel (pour ne pas entraîner le maillage avec la matière).



Il sera donc nécessaire de déterminer à chaque pas de temps, la direction normale de la surface libre en chaque point afin d'imposer les déplacements lagrangiens ou eulérien adéquats. L'idée est de définir un repère local associé à chaque nœud dont les directions coïncident avec les directions tangente et perpendiculaire de l'écoulement.

III. APPLICATIONS

Cette étude a pour objectif de mettre en évidence les potentialités et les limites du code de calcul Radioss à modéliser un impact sur l'eau d'une structure souple, sur des objets de forme simple.

La corrélation a porté sur la comparaison de résultats de calcul fournis par Radioss à des résultats analytiques ou d'essais. En effet, il a été possible de se procurer, dans le cas de l'impact sur l'eau d'une sphère rigide et d'un dièdre déformable, une estimation analytique de l'effort résultant d'une part et des mesures de pression d'autre part.

Enfin, la modélisation de l'impact d'un ellipsoïde souple permettra d'illustrer les potentialités de la méthodologie de dimensionnement proposée, sur une structure de caractéristique aéronautique ou spatiale.

III.1. Impact d'une sphère rigide

Il s'agit d'étudier la retombée d'une structure sphérique rigide, animée d'une vitesse initiale verticale et horizontale. La masse de la sphère est de 40 kg, son rayon de 1 mètre ; les vitesses initiales verticale et horizontale sont de 5 m/s.

Les résultats de référence sont issus des travaux analytiques de T.Miloh (1991) et ont été validés expérimentalement. Ceux-ci permettent de calculer l'angle d'incidence du corps (angle entre trajectoire et horizontale) et l'effort résultant longitudinal sur la sphère, en fonction de sa masse et de sa vitesse initiale.

La visualisation de l'enfoncement progressif de la sphère met en évidence la formation d'une gerbe d'eau sous la sphère (*figure 2*), gerbe dissymétrique en raison des conditions d'impact

Les courbes de variations d'incidence au cours du temps obtenues grâce à Radioss sont proches de la courbe théorique de Miloh (*figure 3*).

En ce qui concerne l'estimation de l'effort résultant, le pic d'effort est légèrement surestimé mais l'effort en phase d'écoulement est sous-estimé en raison d'un décollement, vraisemblablement trop important, du fluide sous la sphère (*figure 4*).

Cette corrélation permet de valider l'utilisation d'une méthode de pénalité pour la modélisation d'un contact fluide-solide. Le principal paramètre mis en évidence au cours de cette étude a été le coefficient d'hourglass, qui, s'il ne modifie pas les résultats concernant les efforts longitudinaux, conditionne les déformations de la surface libre.

Cette comparaison peut difficilement être approfondie étant donné les résultats de référence en notre possession. En effet, bien que la formulation de Miloh ait été comparée à des résultats d'essais -et validée-, ses limitations n'ont pas été formulées. Ainsi, elle ne tient pas compte d'éventuels phénomènes de cavitation ou de décollement de l'eau. Si le pic est bien appréhendé, en est-il de même de la pression d'écoulement ? Notamment, Miloh néglige les déformations de la surface libre, hypothèse uniquement valable dans les premiers instants de l'impact.

III.2. Impact d'un dièdre

Afin d'évaluer plus finement la modélisation adoptée dans Radioss et notamment d'obtenir des corrélations locales et non plus seulement globales, des simulations d'impact à vitesse constante d'un dièdre souple, pour lequel sont disponibles des mesures

de pression, ont été réalisées. Dans un premier temps, le modèle est bidimensionnel afin de limiter les temps de calcul CPU.

En cours d'essais, le dièdre, formé par deux plaques planes présentant un angle de 120° entre elles, subit un enfoncement à vitesse constante (vitesse à composantes verticale et horizontale).

Compte tenu de la vitesse horizontale du dièdre et afin d'éviter des écrasements trop importants du maillage, une formulation ALE est choisie. Le dièdre, modélisé par des éléments surfaciques, est soumis à une vitesse verticale fixe. Le fluide est animé de la vitesse horizontale du dièdre en cours d'essais, pour respecter la vitesse relative eau-structure. Le contact entre fluide et structure est modélisé par une interface de type "surface libre", qui permet de traiter aussi bien l'aspect déformations de la surface du fluide que le contact entre structure et fluide.

L'enfoncement progressif de la structure met en évidence la formation d'un vortex à l'avant du dièdre ainsi qu'un cisaillement important du maillage. Or une formulation ALE, comme dans une moindre mesure une formulation lagrangienne, ne permet pas la modélisation de l'enroulement du maillage sur lui-même (*figure 5*).

Toutefois, la visualisation des profils de pression dans la zone d'impact montre une bonne corrélation avec les résultats d'essais. Le pic de pression est suivi d'un plateau à une valeur stabilisée. Les ordres de grandeurs des différentes mesures par rapport aux résultats d'essais sont respectés :

$$\begin{array}{ll} \text{calculs :} & P_{\text{pic}} = 2.510^{-2} \text{ MPa} & P_{\text{plateau}} = 0.810^{-2} \text{ MPa} \\ \text{essais :} & P_{\text{pic}} = 1.2 \cdot 10^{-2} \text{ MPa} & P_{\text{plateau}} = 0.710^{-2} \text{ MPa} \quad (\text{figure 6}) \end{array}$$

Les différences peuvent être liées au caractère bidimensionnel du modèle ou au fait que le dièdre soit modélisé par une structure rigide et non souple comme en essai. Une simulation 3D est aujourd'hui limitée par un fort écrasement du maillage sous le dièdre, qui conduit à des temps de calcul prohibitifs, ce qui ne permet pas aujourd'hui de mettre en avant les effets de souplesse de la structure. Les travaux futurs envisagés permettront leur prise en compte, par une gestion adéquate du déplacement du maillage dans la zone d'impact.

III.3. Impact d'un corps de type ellipsoïde

Ces dernières limitations sont due à la géométrie de l'objet impactant, géométrie relativement éloignée d'une structure réelle qui viendrait impactée un plan d'eau. Afin de supprimer de tels problèmes d'origine purement numérique, un dernier cas test a été mené afin d'estimer si formation d'un vortex et écrasement du maillage demeuraient limitatifs.

La structure choisie est assimilée à un ellipsoïde de révolution, non raidi. Les vitesses d'impact sont de 5m/s en vertical et 60m/s en vitesse horizontale. Les simulations ont été réalisées avec les deux formulations lagrangienne et ALE, en reprenant les hypothèses de modélisation développées lors de l'étude des deux cas précédents. Le contact est géré par une interface de type pénalité, indépendamment de la surface libre, elle-même suivie par une interface appropriée spécifique.

L'ellipsoïde présente un mouvement à piquer autour du point d'impact, semblable pour les modélisations ALE et lagrangienne. Le fluide tend à former une vague d'étrave à l'arrière de la zone d'impact, vague qui représente un fort écrasement de maillage, limitant le calcul à 46ms dans le cas ALE. Celui-ci a pu être poussé au-delà en formulation

lagrangienne, grâce à la destruction des éléments qui ne participaient plus au contact fluide-structure (*figure 7*).

Les temps de calcul CPU, sur un Cray j916 à 2 processeurs, sont respectivement de 1h50 pour 100ms en version lagrangienne et de 2h15 pour 46ms en version ALE.

En revanche, aucun tourbillon à l'avant de l'ellipsoïde n'a le temps de prendre naissance, contrairement au cas précédent. Les efforts futurs de modélisation devront donc en priorité porter, en formulation ALE, sur l'élaboration d'un nouvel algorithme de gestion du déplacement du maillage ou sur l'introduction d'une possibilité de destruction d'éléments, comme cela est couramment fait en formulation lagrangienne.

Si aucun résultat analytique ou expérimental ne permet, à ce jour, des corrélations pour ce cas test, les limitations numériques sont restreintes dans le cas d'une formulation lagrangienne.

IV. CONCLUSIONS

La modélisation d'un impact d'une structure souple sur un plan d'eau est donc réalisable à partir d'une méthode éléments finis, telle que celle développée dans Radioss. En effet, les comparaisons d'effort résultant ou de mesures de pressions entre les simulations et des données expérimentales ou analytiques montrent de bonnes corrélations sur des formes simples.

Les limitations sont essentiellement liées, à ce jour, aux fortes déformations du maillage, aussi bien pour une formulation lagrangienne que ALE. Des développements numériques sont attendus dans cette direction. D'autre part, une future exploitation industrielle en phase de conception, devra passer par des validations sur structures concrètes, de forme plus complexe, dont la simulation est accessible comme le montre le dernier cas.

Dans cette perspective, au niveau numérique, un axe de recherche serait d'établir un couplage entre un code de dynamique rapide transitoire tel que Radioss et un code de modélisation d'écoulement instationnaire, à la condition que la souplesse de la structure puisse être prise en compte.

Références Bibliographiques

Hydrodynamique physique - E.Guyon.JP.Hulin L.Petit -
Savoirs Actuels Interéditions Editions du CNRS (1991)

Interactions fluide-structure - H.Morand R.Ohayon
Editions MASSON (1992)

Arbitrary Lagrangian Eulerian Finite Elements Methods - J.Donea
Computational Methods for Transient Analysis - §10-pp473-516 (1983)

Sliding Interface with contact-impact in large scale lagrangian computations
- JO.Hallquist GL.Goudreau DJ.Benson
Computer Methods in applied mechanics and engineering - vol51-pp107-137

Computational methods for transient analysis - §1 - T.Belytschko
North Holland- *Collection mechanics and mathematical methods*

On the oblique water entry problem of a rigid sphere - T. Miloh -
Journal of Engineering Mathematics - vol 25 pp77-92 (1991)

Etude des impacts hydrodynamiques sur les coques d'hydroptères
- JL Petiniot Y. MartinSiegfried F. Dupriez -
IMFL - Rapport 81-05 (1981)

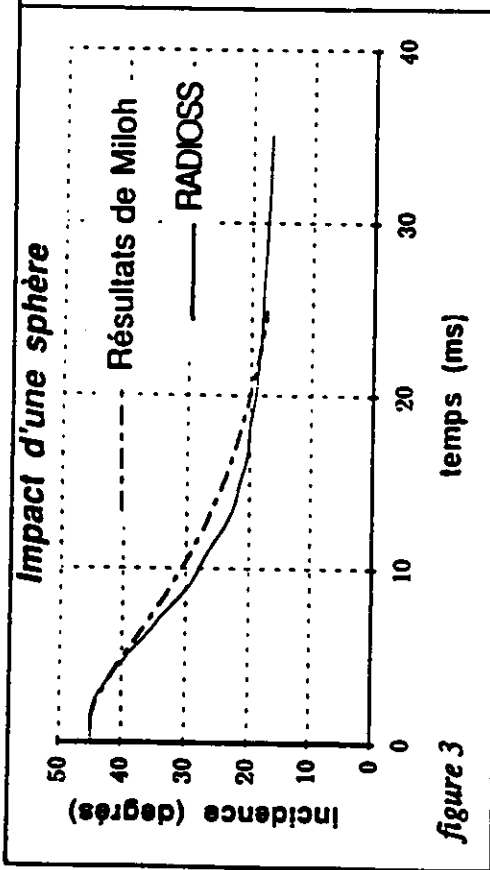


figure 3

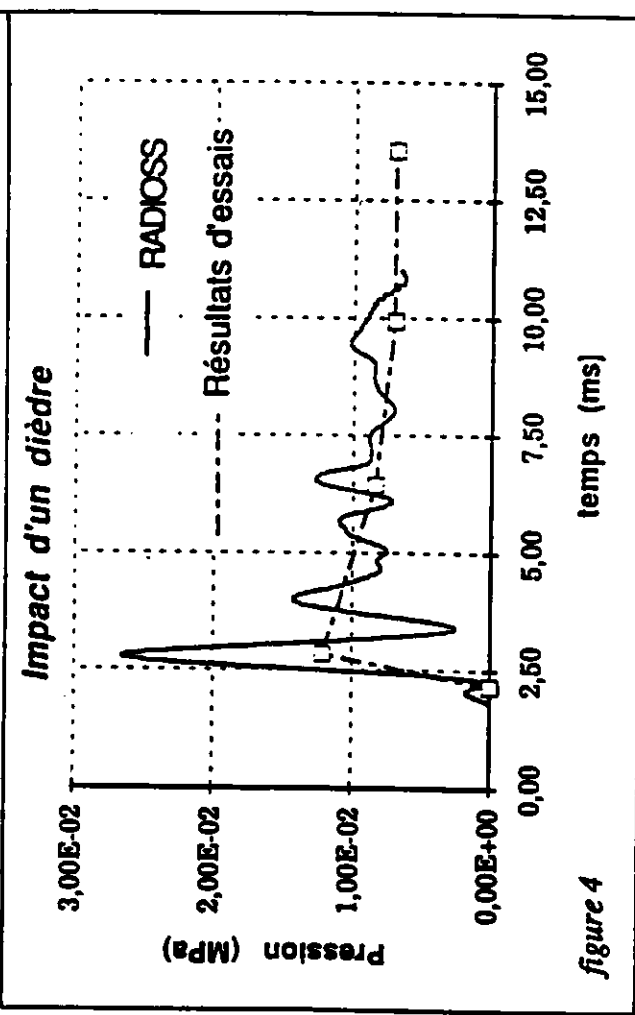


figure 4

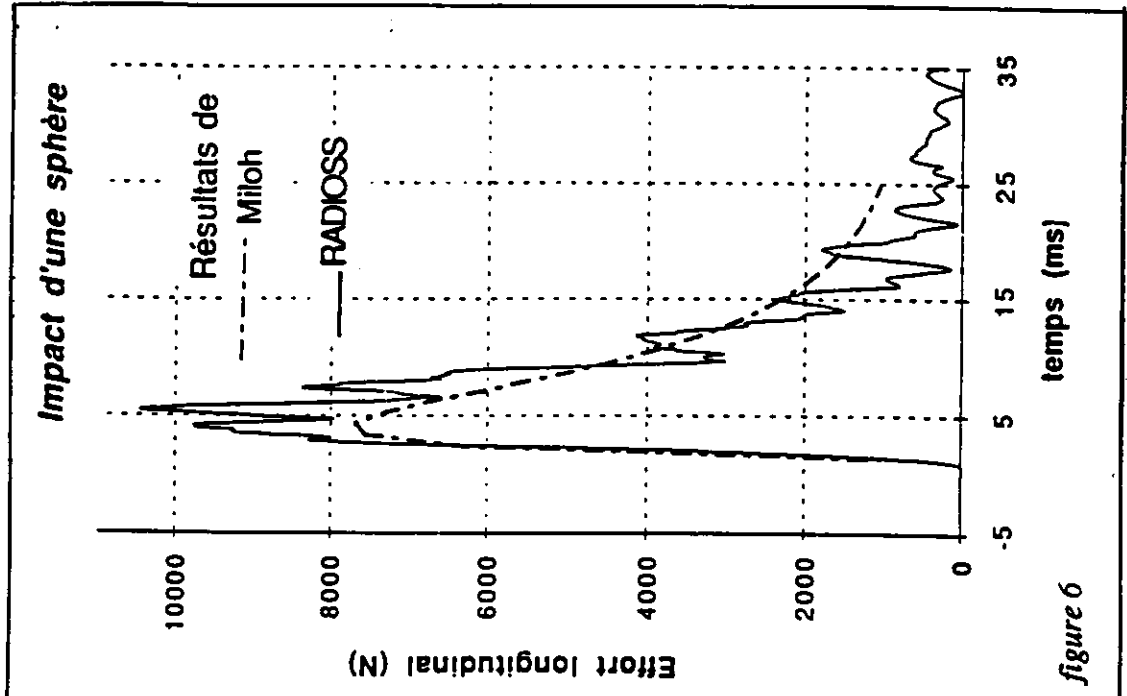


figure 6

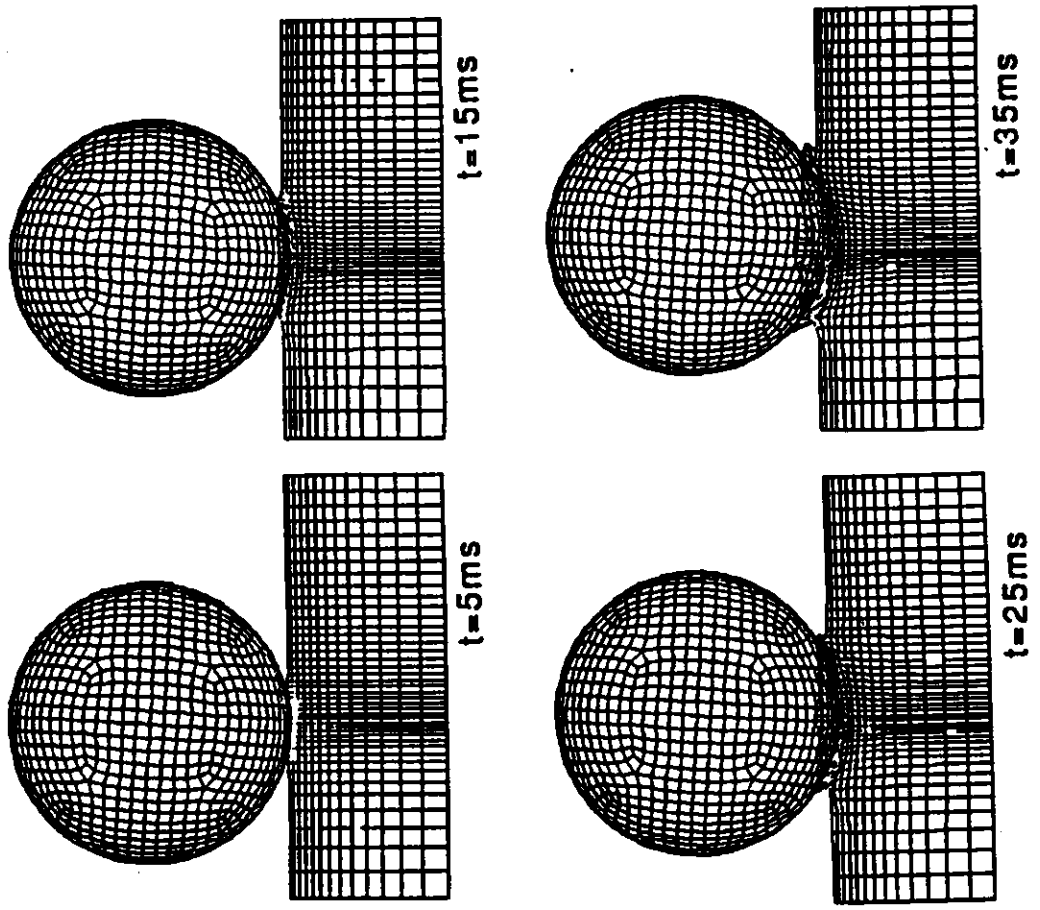
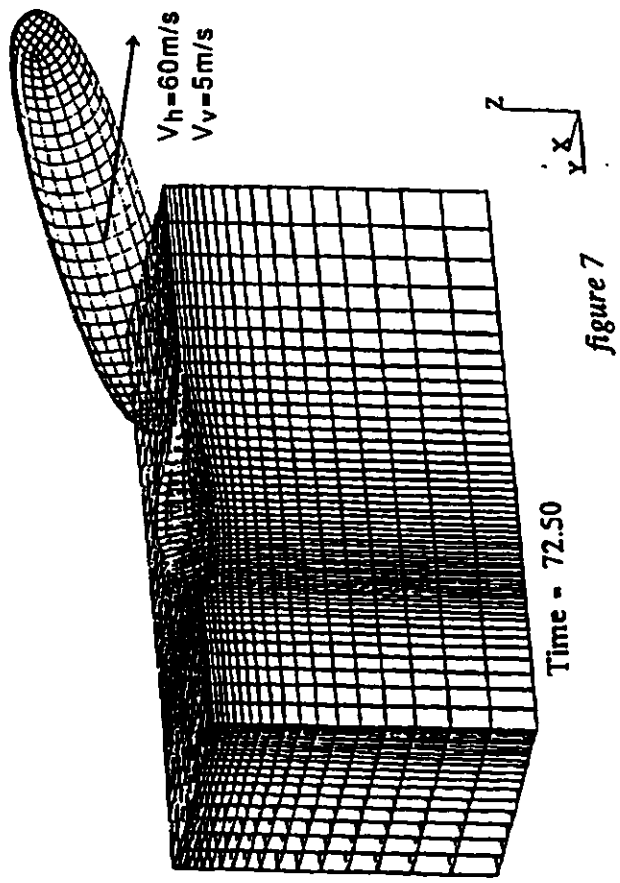
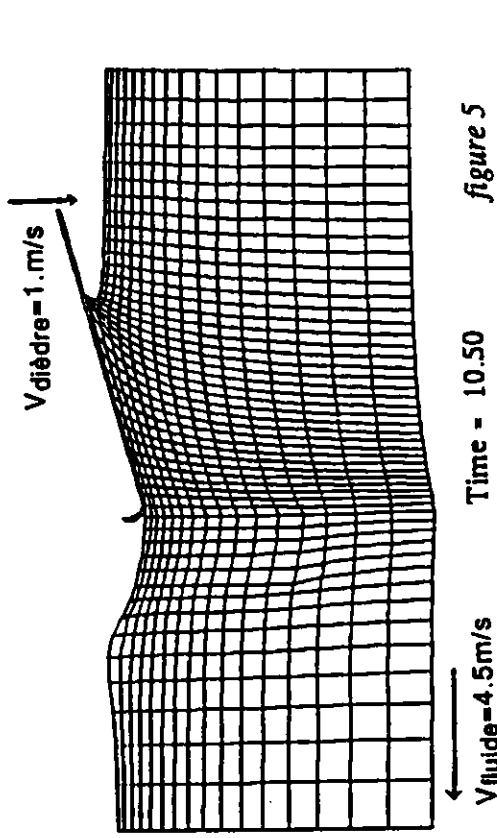


figure 2