
Traitement d'impact fluide-solide par la méthode particulaire SPH

Application : ingestion d'oiseau par les turboréacteurs

Hariddh Bung* — **Marc Berthillier**** — **Stéphane Audic****
Alain Combescure***

* CEA-DMT, Centre d'Etudes de Saclay – F-91191 Gif-sur-Yvette
hbung@cea.fr

** SNECMA, Site de Villaroche, F-77550 Moissy-Cramayel

*** LMT/ENS Cachan,
61, Avenue du Président Wilson, F-94235 Cachan cedex

RÉSUMÉ : Une méthode particulaire SPH a été développée pour effectuer des analyses transitoires non linéaires lors des impacts d'un corps mou ou d'un fluide sur un solide. Cette méthode SPH a été couplée aux éléments finis par un algorithme de contact de type maître/esclave puis implémentée dans le code de dynamique rapide CASTEM-PLEXUS. La méthode est appliquée à la simulation d'ingestion d'oiseau par un turboréacteur. Les déformées résiduelles des différentes aubes sont calculées avec une précision suffisante et avec des temps de calcul permettant une utilisation industrielle.

ABSTRACT : A SPH method has been developed for the simulation of soft impacts of a fluid on a structure. The SPH method is coupled to a finite element method using a slave-master contact impact algorithm. An implementation has been performed in the Castem-Plexus explicit code. It is applied to bird swalling simulation in a turboreactor engine. The final strains and deformed shapes of the turbine blades are correctly predicted and the computation times are reasonable enough to do industrial applications.

MOTS-CLÉS : impact, fluide-solide, Lagrange, Euler, méthode particulaire, SPH, Éléments finis, dynamique explicite.

KEY WORDS: impact, fluid-solid, Lagrange, Euler, SPH, finite elements, explicit dynamic.

1. Introduction

Le problème d'impact d'un corps mou ou d'un fluide sur un solide est souvent rencontré dans le dimensionnement des pièces dans les divers secteurs de l'industrie. Ce problème peut être crucial, par exemple dans le cas d'ingestion d'oiseau par les turboréacteurs des avions (aéronautique) ou dans le cas des explosions dans les installations industrielles. La simulation numérique qui utilise les méthodes des éléments finis classiques, ne permet pas de traiter complètement ce problème. En effet, ces méthodes basées sur une discrétisation par un maillage, aboutissent rapidement à un arrêt du calcul parce que, soit le maillage (fluide) est trop déformé (formulation lagrangienne)[7], soit la dissipation numérique est trop importante dans le cas d'une formulation eulerienne [8].

De nouvelles méthodes basées sur des formulations particulières permettraient de lever ces difficultés. Des travaux ont été entrepris depuis quelques années pour adapter la formulation de l'une de ces méthodes appelée SPH (*Smoothed Particle Hydrodynamics*), aux problèmes d'impact et de chocs en mécanique [1], [2], [3], [4], [5]. En particulier, cette méthode est intégrée dans le logiciel de dynamique rapide CASTEM-PLEXUS du CEA-DMT, également codéveloppé au LMT. Récemment, des améliorations ont été apportées en ce qui concerne le calcul d'impact du fluide sur des pièces tournantes.

Une application industrielle est présentée pour illustrer cette méthode. Il s'agit de l'ingestion d'oiseau par les turboréacteurs. Ce calcul a été effectué par SNECMA.

2. Position de problème

Le traitement de l'impact d'un fluide sur un solide par la méthode des éléments finis purement lagrangienne aboutit assez rapidement à une impasse. En effet, le maillage associé au fluide va se déformer rapidement, le calcul ne peut plus progresser : cette méthode permet de simuler uniquement le début de l'impact.

Quant au traitement de type Euler-Lagrange couplé, deux difficultés principales se présentent : la surface libre pour le milieu eulerien est mal déterminée et l'interface Euler-Lagrange est délicate à manier. Le remaillage de la zone fluide s'avère donc difficile (sinon impossible dans le cas des pièces tournantes). D'autre part, cette méthode nécessite de modéliser une zone beaucoup plus importante en prévision des déplacements du fluide, d'où un nombre très élevé d'éléments entraînant un temps de calcul beaucoup plus long.

Dans les méthodes de type particulière, le fluide est modélisé par un essaim d'éléments, dont chacun ne contient qu'un seul nœud. Chaque élément représente en effet une certaine quantité de matières dont le nœud est le centre de gravité. Si dans les représentations graphiques, les éléments sont associés à des billes, leur volume n'est pas nécessairement sphérique. Par sa construction, une méthode particulière est

lagrangienne. Les avantages associés à cette formulation sont les suivantes : la prise en compte des frontières libres est immédiate et seule la zone occupée effectivement par le fluide est modélisée. Si par conception, les méthodes particulières ne sont pas gênées par la déformation du maillage, il est cependant nécessaire de recalculer les positions des éléments les uns par rapport aux autres (alors que les connectivités des maillages classiques ne changent pas). C'est le grand inconvénient de ces méthodes.

Les méthodes particulières rencontrent au cours de ces dernières années un regain d'intérêt. La progression toujours spectaculaire des puissances des ordinateurs permet aujourd'hui d'effectuer des calculs de plus en plus longs et de plus en plus compliqués. Un récapitulatif des différentes méthodes particulières (appelées aussi méthodes sans éléments) a été dressé dans [10]. Suite à des travaux de recherches [4], nous avons choisi une méthode particulière qui semble convenir au traitement des problèmes d'impact fluide/solide : c'est la méthode SPH. Sa formulation sera détaillée dans le prochain paragraphe.

Les structures solides continuent à être modélisées par la méthode des éléments finis classique en lagrangien. Il sera donc nécessaire d'introduire des termes de couplage entre SPH et éléments finis. Dans notre cas, il s'agit d'introduire des conditions de non-pénétration entre le solide et le fluide SPH. Pour ce faire, nous calculons tout simplement l'impact d'une masse ponctuelle sur une surface solide avec la technique maître esclave : la structure est considérée comme surface maître et la particule est l'esclave. L'algorithme pour traiter cette interface est ainsi très proche de celui utilisé pour traiter le contact entre deux solides (les deux parties en contact sont toutes les deux lagrangiennes). Cette méthode donne de très bons résultats tant que les distances entre « nœuds » SPH sont du même ordre de grandeur que les tailles des mailles élément finis.

La méthode SPH se prête très bien à la modélisation de la fragmentation et de la découpe comme l'on va le constater dans l'application industrielle présentée au paragraphe 4.

D'autre part, pour pouvoir traiter correctement les impacts sur des aubes, un modèle de grandes rotations a été introduit dans le code. Celui-ci permet donc une modélisation plus réaliste et plus précise de l'impact d'oiseau sur le moteur. Les aubes du moteur sont mises préalablement en rotation, puis on calcule l'impact de l'oiseau représenté par un essaim de points. Ainsi, contrairement aux anciennes pratiques de modélisation, le calcul n'est plus effectué dans le repère tournant avec des hypothèses sur la vitesse d'impact de l'oiseau dans ce repère.

3. Méthode SPH

La méthode SPH (*Smoothed Particle Hydrodynamics*) a été tout d'abord développée à la fin des années 1970 par les astrophysiciens (travaux de Monaghan et

Gingold en 1977 et 1982, cf. [6]). Depuis, plusieurs travaux ont été entrepris en ce qui concerne son adaptation et son utilisation dans les domaines de la mécanique classique (cf. [2] et [4]).

La base mathématique de la méthode SPH est une régularisation qui permet d’obtenir, à partir d’un champ discret quelconque f , un champ continu $\langle f \rangle(\underline{x})$ doué des propriétés de continuité et de dérivabilité voulues :

$$\langle f \rangle(\underline{x}) = \int_D f(\underline{y}) \cdot W(\underline{x} - \underline{y}, h) \cdot d\Omega$$

où : W est le noyau ou fonction poids,

h est une mesure qui détermine le volume D_i autour du point \underline{x} pris en compte pour le lissage, et donc la régularité de $\langle f \rangle$. Ce volume est bien beaucoup plus petit que le domaine D

Couramment on choisit une fonction W qui vérifie les conditions suivantes :

1. $W(\underline{x} - \underline{y}, h) > 0$ dans D_i , $D_i \subset D$
2. $W(\underline{x} - \underline{y}, h) = 0 \quad \forall \underline{y} \notin D_i$
3. $\int_D W(\underline{x} - \underline{y}, h) \cdot d\Omega = 1$, condition de consistance
4. $W(s, h)$ est monotone et décroissant avec $s = \|\underline{x} - \underline{y}\|$
5. $W(s, h) \rightarrow \delta(s)$ quand $h \rightarrow 0$ où $\delta(s)$ est une fonction de Dirac

Les fonction poids W les plus utilisées sont des gaussiens ou des fonctions splines cubiques ou quartiques.

L’intégrale peut se calculer numériquement comme une somme discrète sur certains points \underline{x}_i du domaine D :

$$\langle f \rangle(\underline{x}) = \sum_i m_i \cdot \frac{f(\underline{x}_i)}{\rho(\underline{x}_i)} \cdot W(\underline{x} - \underline{x}_i, h)$$

où m_i est la masse associée au point \underline{x}_i , et la fraction $\frac{m_i}{\rho(\underline{x}_i)}$ représente le volume de la partie de D_i attachée à \underline{x}_i .

L'équation précédente donne les valeurs de la fonction régularisée $\langle f \rangle$ à partir des valeurs « nodales » $f(x_i)$. Elle ressemble formellement à l'interpolation à partir des fonctions de forme :

$$\langle f \rangle(\underline{x}) = \sum_i \Phi_i(\underline{x}) \cdot f(\underline{x}_i)$$

On peut alors les dériver.

Au nœud k , les équations fondamentales de conservation s'écrivent avec l'approximation ci-dessus :

– conservation de la masse :

$$4 \frac{d\rho(\underline{x}_k)}{dt} = \rho(\underline{x}_k) \sum_{i=1}^N \frac{m_i}{\rho(\underline{x}_i)} (v(\underline{x}_k) - v(\underline{x}_i)) \cdot \nabla W(|\underline{x}_k - \underline{x}_i|)$$

– conservation de la quantité de mouvement :

$$\frac{d\langle v \rangle(\underline{x}_k)}{dt} = - \sum_{i=1, N} m_i \left[\frac{\langle p \rangle(\underline{x}_i)}{\langle \rho \rangle^2(\underline{x}_i)} + \frac{\langle p \rangle(\underline{x}_k)}{\langle \rho \rangle^2(\underline{x}_k)} + \pi_{ij} \right] \cdot \nabla W(|\underline{x}_k - \underline{x}_i|)$$

où p est la pression (obtenue par une loi d'état en fonction de la densité ρ ...), et π_{ij} est une viscosité artificielle proposée par [6].

On peut donc alors appliquer une intégration par collocation s'appuyant sur cette nouvelle discrétisation. Cette formulation mathématique peut s'étendre facilement au cas des fluides visqueux (cf. [3]).

4. Application industrielle

L'ingestion d'oiseaux par les turboréacteurs est un phénomène qui peut survenir au cours des différentes phases de vol et principalement lors des décollages et des atterrissages. Aussi, pour garantir la sécurité des vols, les autorités de certification, imposent aux constructeurs de turboréacteurs civils de démontrer par essai la capacité de résistance de leurs moteurs aux impacts d'oiseaux. Ces impacts font partie des sollicitations les plus sévères auxquelles sont soumises les aubes de soufflantes. Pour optimiser la masse et les performances aérodynamiques de ces pièces, les constructeurs réalisent des analyses avec des codes de dynamique rapide. L'oiseau est le plus souvent modélisé en lagrangien [7], parfois en lagrangien/eulérien (ALE) [8]. La mise au point de ces calculs est délicate à cause de la très grande déformation des mailles. De plus, il n'est pas aisé de représenter correctement la découpe d'un oiseau par plusieurs aubes. Pour ces raisons, la méthode SPH est actuellement utilisée à SNECMA pour simuler les impacts d'oiseaux sur les aubes de soufflantes.

A titre d'illustration, on présente ici un calcul d'ingestion d'oiseau sur un secteur d'aubes de soufflante (figure 1). L'oiseau est modélisé par un essaim de 13 500 particules. Son comportement est approximé par une loi d'état représentative d'un mélange gélatine (85 %)/air (15 %) proposé par Wilbeck [9]. La masse de l'oiseau est d'environ 1,2 Kg et sa vitesse avant impact, parallèle à l'axe de rotation du moteur, est de 90 m/s. Neuf aubes ont été modélisées pour représenter une découpe complète de l'oiseau. Chaque aube a été modélisée à l'aide de 1 470 éléments coques pour la partie pale et 556 éléments volumiques pour le pied et la plate-forme. Des conditions de non-pénétration ont été introduites entre les différentes aubes. Les aubes en titane ont une loi de comportement élastoplastique. Leur vitesse de rotation est de 7 300 tr/mn. L'oiseau vient impacter les 9 aubes pendant une durée d'environ 4 ms. Le calcul permet de mettre en évidence une découpe non régulière de l'oiseau due à la déformation des pales (figures 2 et 3). Les déformées résiduelles calculées sont en bon accord avec les résultats d'essai. Le calcul a été réalisé avec CASTEM-PLEXUS sur une station de travail. Les temps de calcul obtenus permettent une utilisation industrielle de la méthode.



Figure 1. *Maillage*

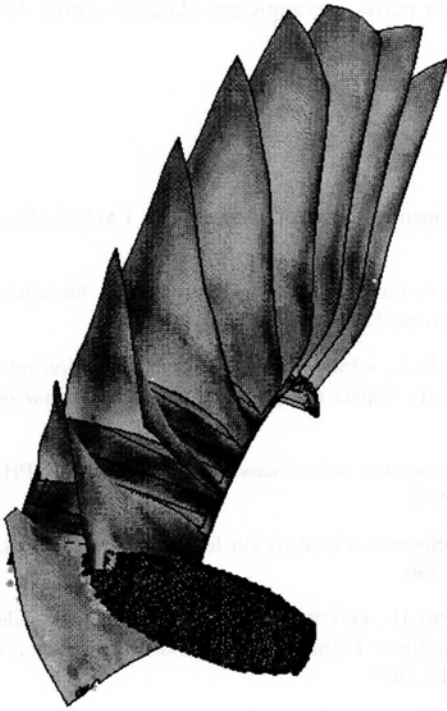


Figure 2. Découpe de l'oiseau après 0,4 ms



Figure 3. Découpe de l'oiseau après 1,8 ms

5. Conclusion

Comme on a pu le constater, la méthode SPH permet de traiter correctement le calcul des déformées plastiques des aubes de turboréacteurs suite à une ingestion d'oiseau. La découpe de l'oiseau par les aubes de soufflante s'effectue de manière particulièrement efficace et sans hypothèse simplificatrice. L'extension de ces calculs pour prédire les charges dans les parties structurales du moteur, nécessite

d'augmenter la taille des modèles par un facteur dix. Des efforts sont donc entrepris pour paralléliser le code, aussi bien dans la partie lagrangienne classique (pour les aubes) que dans la partie SPH (fluide).

6. Références

- [COM 99] COMBESCURE A., Méthodes sans éléments, Rapport interne n° 222, LMT-Cachan, février 1999.
- [JOH 89] JOHNSON G.R., STRYK R.A., « Dynamic three dimensional computations for solids with variable nodal connectivity », *Inter. Journal For Num. Methods*, (28), 1989.
- [JOH 93] JOHNSON G.R., PETERSEN E., STRYK R.A., « Incorporation of an SPH option into the epic code for wide range of high velocity impact computations », *Inter. Journal of Impact Engineering*, (14), 1993.
- [LEG 98] LEGAY A., LERAY D., PLEXUS : introduction de la viscosité dans la méthode SPH, Rapport CEA, SEMT/DYN/RT/98.040/A, 1998.
- [LET 96] LETELLIER A., Contribution à la modélisation d'oiseaux sur les aubes des réacteurs, Thèse de doctorat, Université d'Evry, juin 1996.
- [LET 97] LETELLIER A., BERTHILLIER M., BUNG H., GALON P., Bird impact on fan blade analysis using SPH Method coupled with finite Elements, Symposium on Structures Under Extreme Loading Conditions, Orlando, 1997.
- [MON 77] MONAGHAN J.J., GINGOLD R.A., « Smoothed Particle Hydrodynamics : theory and applications to non-spherical stars », *Monthly Notices of The Royal Astronomical Society*, (181), 1977.
- [NIE 90] NIERING E., « Simulation of bird strikes on turbine engines », *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 112, p. 573-578, Oct., 1990.
- [VIG 95] VIGNOLLES P., BUSSONET P.X., and TALBOTEC J., « Conception des aubes fan soumises à l'impact d'oiseaux », *AGARD CP*, 1995.
- [WIL 78] WILBECK J., Impact behavior of low strength projectiles, Technical Report 77-134, Air Force Material Laboratory, Wright-Patterson Air Force Base, Ohio 45433, 1978.