

Simulation numérique de la rupture de structures navales sous l'effet d'explosions au contact

P. Longère¹, A-G. Geffroy^{2,3}, B. Leblé³,

¹ICA, Institut Supérieur de l'Aéronautique et de l'Espace, France, patrice.longere@isae.fr

²LIMATB, Université de Bretagne Sud, France, anne-gaelle.geffroy@univ-ubs.fr

³DCNS, France, bruno.leble@dcnsgroup.com

L'objectif de ce travail est la prédiction numérique de la réponse d'une structure navale (de bâtiments de surface, de sous-marins) à une explosion au contact. A cette fin, une modélisation avancée du comportement du matériau constitutif sous sollicitations sévères de déformation, de vitesse de déformation et de température a été développée.

Le matériau de l'étude est un acier doux ferrito-perlitique constitutif des coques de bâtiments de surface. Compte tenu des sollicitations sévères (intenses et rapides) considérées (explosion), une attention particulière a été portée pour identifier le plus fidèlement possible les effets combinés de l'écroutissement plastique, de l'adoucissement thermique et de la viscoplasticité. Une importante campagne d'essais a ainsi été réalisée incluant des essais de traction et de compression, quasi statiques et dynamiques, à l'ambiante et en température. Les observations microstructurales d'éprouvettes sollicitées à différentes amplitudes de déformation jusqu'à rupture ont révélé un endommagement sous la forme de micro-cavités et de micro-fissures dont l'amorçage se produit à des déformations plastiques que l'on peut qualifier d'avancées. En parallèle, des essais d'explosion aérienne de plaques minces de structures navales ont été menés dans des configurations de chargement progressif conduisant pour les charges de faible intensité à un gonflement des plaques et pour les charges de forte intensité à une déchirure des plaques en pétales. La fractographie des plaques a montré des mécanismes d'endommagement comparables à ceux des essais de laboratoire.

Sur la base des observations expérimentales, un modèle élasto-thermo-viscoplastique endommageable multi-surface a été construit, destiné en particulier à reproduire la transition de comportement entre un métal dense et un métal micro-poreux. Dans l'approche adoptée, le matériau métallique élasto-thermo/viscoplastique considéré est en effet supposé initialement exempt de cavités, i.e. initialement non micro-poreux. Son comportement est régi par le potentiel de Mises :

$$\Phi_0 = \tilde{\sigma}_{eq}^2 - 1 = 0 ; \tilde{\sigma}_{eq} = \frac{\sigma_{eq}}{\bar{\sigma}_y} \quad (1)$$

où σ_{eq} représente la contrainte équivalente au sens de Mises (second invariant du tenseur des contraintes de Cauchy) et $\bar{\sigma}_y$ la contrainte d'écoulement rendant compte de l'écroutissement plastique, de l'adoucissement thermique et de la viscosité plastique. Soumis à des chargements monotones impliquant des taux de triaxialité positifs ou nuls, et lorsque les conditions en termes de taux de triaxialité, de déformation plastique, de vitesse de déformation et de température sont réunies, le matériau est supposé sujet à l'endommagement ductile, i.e. acquérir une micro-porosité. Son comportement devient alors dépendant de la pression, et est régi par le potentiel de Gurson-Tvergaard-Needleman (GTN), voir [1]-[2], modifié pour rendre compte de la croissance de cavités en cisaillement :

$$\Phi_G = \tilde{\sigma}_{eq}^2 + 2q_1 f \cosh \left[-\frac{3}{2} q_2 (\tilde{p}_m + \tilde{p}_r) \right] - (1 + q_3 f^2) = 0 ; \tilde{p}_m = \frac{p_m}{\bar{\sigma}_y} ; \tilde{p}_r = \frac{p_r}{\bar{\sigma}_y} \quad (2)$$

où f représente la porosité et p la pression (tension hydrostatique négative). La quantité p_r est une pression cinématique provoquant une translation de la surface de charge. Les quantités q_i sont des constantes. Un critère d'amorçage de cavités, cohérent avec le modèle micro-poreux et capable de rendre compte des effets accélérants du taux de triaxialité (positif) des contraintes et des effets retardants de la vitesse et de la température, est ainsi proposé :

$$\Phi_{I_0} = \hat{\sigma}^2 + 2q_1 f_0 \cosh\left(-\frac{3}{2}q_2(\hat{p}_m + \hat{p}_r)\right) - (1 + q_3 f_0^2) = 0$$

$$\hat{\sigma} = \frac{\sigma_y}{\sigma_c} ; \hat{p}_m = \frac{p_m}{\sigma_c} ; \hat{p}_r = \frac{p_r}{\sigma_c} \quad (3)$$

où σ_c est une contrainte critique. La rencontre entre le modèle de plasticité des métaux denses (1) et le critère de germination (3) fait instantanément basculer le comportement du matériau vers celui du métal micro-poreux (2).

Le modèle a été implémenté en tant que loi utilisateur (vumat) dans le code de calculs par éléments finis Abaqus. Les opérations tensorielles d'intégration des équations constitutives se font dans le repère en rotation propre. La méthode de prédiction élastique-corrrection plastique est celle du retour radial, voir [3], et l'algorithme de résolution retenu est celui de Newton-Raphson. Les calculs numériques ont été systématiquement conduits avec un schéma d'intégration temporelle explicite. Différents problèmes aux limites à conditions initiales à la difficulté croissante ont été menés. Pour les plus simples concernant des cubes ou des éprouvettes cylindriques lisses et entaillées soumis à une traction uniaxiale, l'objectif était de valider qualitativement et/ou quantitativement les performances du modèle. Pour les plus compliqués impliquant l'explosion de plaques navales, l'objectif était de prédire la déchirure. Concernant ces dernières simulations, les limitations de la carte Conwep d'Abaqus en champ proche ont été mises en évidence. Les premières simulations d'explosion aérienne de plaques ont par suite montré des résultats encourageants, voir Fig.1.

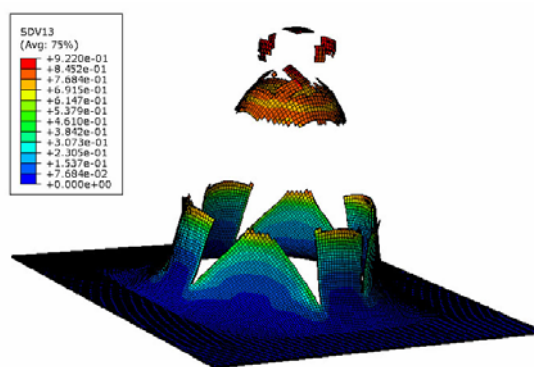


Fig.1 : Simulation numérique de l'explosion aérienne d'une plaque

- [1] Gurson, A. L., *Continuum Theory of Ductile Rupture by Nucleation and Growth: Part I - Yield Criteria and Flow Rules for Porous Ductile Media*, Journal of Engineering Materials and Technology, Vol. 99, pp.2-15, 1977.
- [2] Tvergaard, V., Needleman, A., *Analysis of cup-cone fracture in a round tensile bar*, Acta metall, 32, p.157-169, 1984.
- [3] Aravas, N., *On the numerical integration of a class of pressure-dependent plasticity models*, International Journal for numerical methods in engineering, 4, pp.1395-1416, 1987.