

Prédiction du dommage par impacts de gouttes d'eau sur une structure métallique

G. Coudouel^{1,2}, A. Combescure¹, J.-C. Marongiu²

¹ LaMCoS, UMR CNRS 5259, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, {guillaume.coudouel - alain.combescure}@insa-lyon.fr

² ANDRITZ Hydro, jean-christophe.marongiu@andritz.com

Résumé — On se propose dans ce travail de comprendre le mécanisme d'érosion par impact répétés de gouttes d'eau sur une structure métallique. Lors de l'impact, la pression "coup de bélier" nait pas effet d'inertie au centre du contact, mais la pression maximale, largement supérieure est située sur l'enveloppe de la zone de contact. Lorsque le front d'onde de compression voyageant dans la goutte dépasse la zone de contact, des jets latéraux apparaissent au bord du contact. Du point de vue du matériau, l'endommagement est produit par fatigue. Il y a d'abord affaiblissement des joints de grains. Après un plus grand nombre d'impacts, des micro-fissures apparaissent et provoquent l'enlèvement ou la rupture des grains. Des simulations numériques FSI permettent de rendre compte du phénomène de fatigue, et grâce à l'utilisation d'un post-traitement de fatigue, montre les zones les plus sollicitées dans la masse au cours d'un cycle de charge. Il apparait que les microjets jouent un rôle important dans le processus d'endommagement, puisque l'érosion est localisée directement autour de leur apparition.

Mots clés — impact, couplage, érosion, fatigue, MEF, SPH fluide, dynamique explicite.

1 Introduction

Ce travail fait partie d'un projet concernant l'érosion des augets de turbine Pelton. Durant leur fonctionnement, les turbines hydrauliques connaissent de nombreux dommages dûs à la mauvaise qualité de l'eau ou aux conditions d'écoulement. Ces dégradations engendrent des coûts de maintenance et des pertes de puissance, et peuvent même mettre en danger la sécurité des installations. Exploitants de centrales hydrauliques et fabricants de turbines cherchent à augmenter la durée de vie des machines en réduisant l'intensité des dommages et à l'aide de traitement de surfaces. L'étude présentée concerne l'étude du mécanisme d'érosion dans un premier temps, puis la simulation numérique du dommage par impacts de gouttes sur une structure métallique dans un second temps.

2 L'érosion par goutte d'eau

Cette partie a pour but de présenter les mécanismes intervenant dans l'érosion des structures métalliques par des impacts de gouttes d'eau. D'abord, les phénomènes influents à l'intérieur du fluide lors de l'impact fluide-structure sont présentés comme la pression « coup de bélier » ou la propagation des ondes. La pression maximale exercée sur la paroi surgit au moment où des jets d'eau se forment. Ensuite, on traite des mécanismes d'érosion et ce qui se passe dans le solide. Les mécanismes d'érosion sont scindés en deux groupes selon leur échelle : les dommages observables à l'échelle macroscopique, en surface, puis ceux à l'échelle mésoscopique, visibles à l'échelle du grain, tels que la propagation de fissures intergranulaires amenant à l'arrachage de grain, ceci produisant des cratères en surface.

2.1 Impact solide-liquide

2.1.1 Propagation d'ondes

D'après Haller [5] et Li [11], pour une goutte d'eau à grande vitesse et faible diamètre impactant une paroi rigide, il est possible de négliger les effets de viscosité et de tension superficielle. Par exemple, Haller [5] montre que pour un rayon $R = 0.1\text{mm}$ et vitesse initiale $V = 500\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, le nombre de Reynolds

vaut $Re = 50'000$ et le nombre de Weber $We = 350'000$. Les résultats numériques de Haller [5] montrent une température quasi constante dans la goutte au cours du temps : il n'y a donc pas d'effet convectif, autrement dit, la température n'intervient pas dans le mouvement du fluide. Le comportement du fluide est donc dominé par les effets d'inertie et les équations d'Euler sont adoptées pour les simulations numériques. Après impact, une onde de choc démarre de la zone d'impact et se propage le long de la surface libre latérale de la goutte. Cette onde de choc suit un point triple non observable, mais proche du bord de la zone de contact. Field [3] et Haller [5] construisent géométriquement le front d'onde par le principe d'Huygens-Fresnel, le front étant l'enveloppe des ondelettes émises par les bords successifs de la zone de contact (Figure 1.b). La zone délimitée par le front d'onde et la surface de contact est fortement compressée (Figure 1.a).

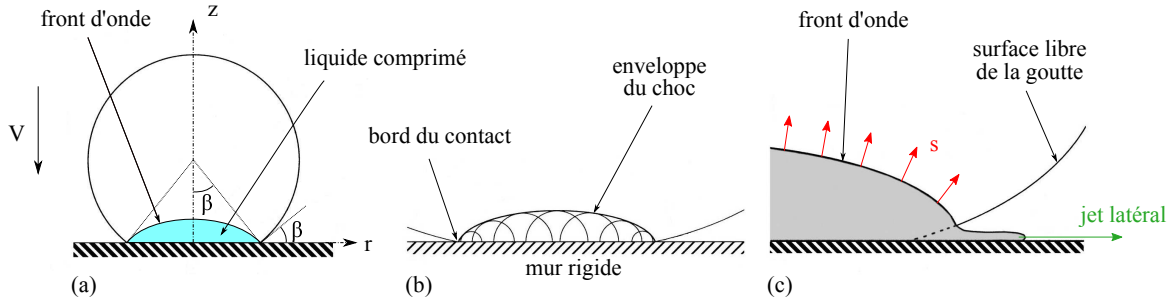


FIGURE 1 – Impact d'une goutte sphérique sur un plan rigide. (a) Front d'onde et zone fortement compressée (colorée). (b) Construction géométrique du front d'onde. (c) Apparition des jets latéraux. (d'après Haller [5]).

2.1.2 Pression de contact et apparition des jets

Lors de l'impact d'un fluide sur un solide, la pression "coup de bélier" naît par effet d'inertie. D'après Field [4], Heymann [6], Kennedy [8] et Li [11], son expression pour un solide rigide est donnée par l'équation (1) :

$$P_{wh} = \rho_0 s V \quad (1)$$

où ρ_0 est la masse volumique initiale du fluide, s la vitesse de l'onde de compression voyageant dans la goutte (cf. Figure 1.c) et V la vitesse de chute de la goutte. D'après Haller [5], Heymann [6] et Li [11], il est possible dans ces conditions de remplacer s par une valeur approchée, donnant ainsi une nouvelle expression de P_{wh} avec l'équation (2), où k est une constante dépendant du liquide, valant environ 2 pour l'eau, et c_0 la vitesse initiale du son dans l'eau à température ambiante :

$$P_{wh} = \rho_0 c_0 V \left(1 + k \frac{V}{c_0} \right) \quad (2)$$

Comme vu dans 2.1.1, la tension de surface n'affecte pas la réponse en pression dans le cadre de cette étude (Haller [5]). Les résultats numériques de Haller [5] et Li [11] montrent que la répartition de pression suit la surface de contact au cours du temps. D'après Field [4], Haller [5], Heymann [6] et Lesser [10], la valeur maximale en pression se situe toujours à la limite de la surface de contact (Figure 2.a). La valeur maximale au cours du temps est atteinte non-pas lors de l'impact, mais lorsque le front d'onde dans la goutte franchit le bord de la zone de contact et entre en surface libre. Il y a alors apparition de jets latéraux au contact du solide par éjection du fluide provoquée par compression (Figures 1.c et 2.b). La valeur de la pression maximale n'est pas encore bien déterminable analytiquement. Haller [5] obtient $P_{max} \approx 2P_{wh}$ et Kennedy [8] trouve $P_{max} \approx 3P_{wh}$. Cependant, Haller [5] propose une expression donnant le temps d'apparition du jet après impact avec l'équation (3), où \hat{s} est la vitesse de l'onde de compression dans la goutte au moment de la formation des jets latéraux :

$$t_{jet} = \frac{RV}{2\hat{s}^2} \quad (3)$$

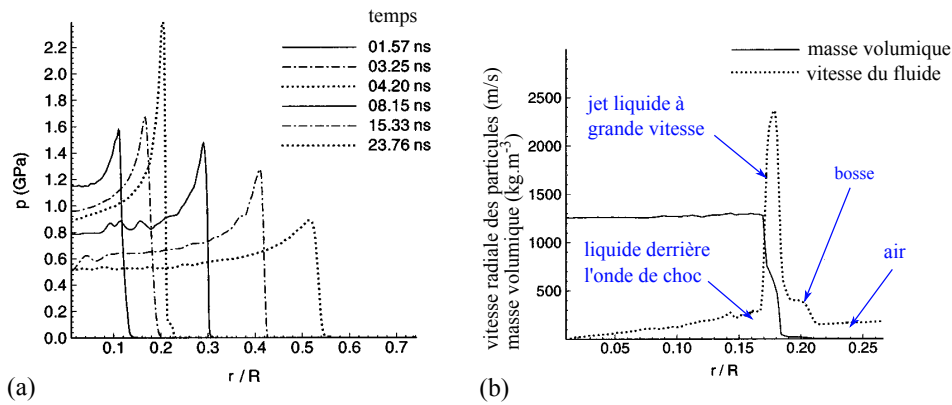


FIGURE 2 – (a) Répartition spatiale de la pression de contact pour six temps différents ($R = 0.1\text{mm}$, $V = 500\text{m.s}^{-1}$). (b) La naissance du jet. La vitesse radiale du fluide sur la surface de contact (en pointillés) montre l'initiation du jet. (d'après Haller [5]).

2.2 Mécanisme d'érosion

2.2.1 Échelle macroscopique

Claverie [2] observe 3 phases dans l'érosion par impact de goutte d'eau des aubes de turbines à vapeur. (a) Une phase "d'incubation" pendant laquelle il n'y a pas arrachement de matière, mais modification de l'aspect de la surface. (b) Une phase où la perte de matière est assez rapide et pratiquement linéaire en fonction du temps (durée 2000 h environ). (c) Une phase où la vitesse de l'érosion diminue, et arrive même à s'annuler dans certains cas.

2.2.2 Échelle mésoscopique

Luiset [12] propose une description des étapes du phénomène d'érosion par impact de goutte comme suit :

1. Les premiers impacts érodent les joints de grain. Des microfissures apparaissent au fond des crevasses.
2. Il y a enlèvement de matière sur la surface à partir de deux modes d'endommagement : a) éjection des grains pouvant faire apparaître des points triples, b) rupture des grains.
3. Après un nombre plus important d'impacts, les autres grains dans la périphérie subissent le même sort et sont, soit éjectés, soit fracturés (étape 2). La zone de dommage peut être plus large que la goutte elle-même. Les fissures sont de type intragranulaire, dégradant ainsi l'état de surface. Ces fissures sont parallèles à la surface et se propagent en profondeur. On assiste à l'apparition de cupules.
4. Les défauts sont amplifiés par fatigue.

Finalement l'endommagement est piloté par la déformation plastique, l'écrouissage, la propagation de fissures intergranulaires, et le mécanisme de fatigue. Le caractère cyclique du dommage donne un creusement par escalier visible sur la Figure 3. Kamkar [7] observe un mécanisme d'endommagement similaire. Kong [9] donne une autre description, mais plus adaptée à l'impact de gouttes de la taille du grain.

3 Simulation de l'érosion

Cette section traite de la simulation numérique 2D de l'impact d'une goutte d'eau sur une milieu solide déformable. L'analyse en fatigue y est ensuite effectuée. Le calcul du domaine solide est réalisé avec le code de dynamique explicite EuroPlexus® [16] développé conjointement par le Commissariat à l'Énergie Atomique et aux Energies Alternatives (CEA) et le Centre Commun de Recherche de la Commission Européenne (EC/JRC). Ce code est adapté aux problèmes de dynamique rapide impliquant de fortes non-linéarités et de l'érosion. Pour la résolution du domaine fluide on utilise le code ASPHODEL,

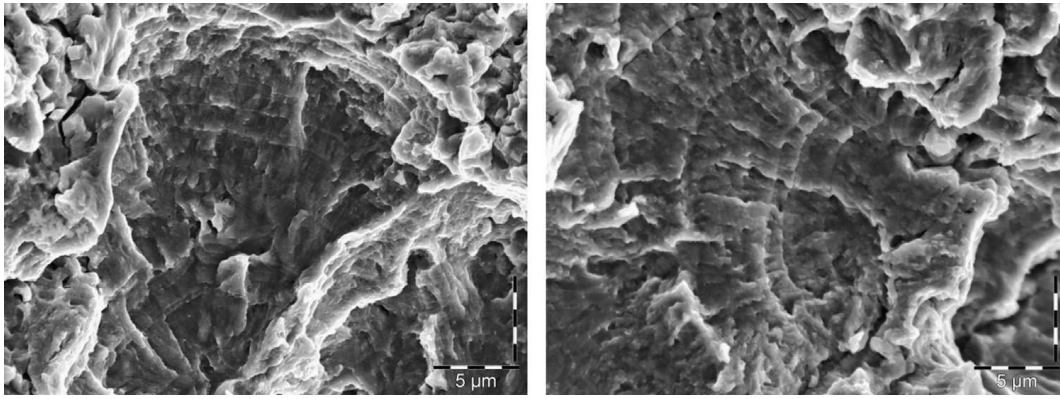


FIGURE 3 – Dommage par impacts répétés de gouttes sur une structure en acier inoxydable (d’après Luiset [12]).

développé en interne par ANDRITZ Hydro. C’est un code explicite utilisant la méthode SPH, particulièrement efficace dans le traitement des surfaces libres. Le calcul couplé fluide-structure est réalisé par le code de couplage développé par Nuñez-Ramirez [14].

3.1 Caractéristiques du modèle numérique

La goutte est constituée d’eau à masse volumique $\rho_f = 1000\text{kg.m}^{-3}$, et vitesse du son $c_0 = 1500\text{m.s}^{-1}$, sans viscosité et sans tension superficielle, avec comme loi d’état la loi de Tait (voir Macdonald [13]) et un coefficient de Grüneisen égal à 7. Le solide est homogène, isotrope, élasto-plastique parfait à module d’Young $E = 200\text{GPa}$, coefficient de Poisson $\nu = 0.3$, limite d’élasticité $\sigma_e = 650\text{MPa}$, de masse volumique $\rho_s = 7700\text{kg.m}^{-3}$. La goutte a un rayon $R = 0.5\text{mm}$ et se déplace orthogonalement vers le solide à une vitesse $V = 100\text{m.s}^{-1}$.

3.2 Impact sur un solide rigide

Un calcul fluide non couplé sur un solide rigide permet de rendre compte des chargements mis en jeu dans ce problème. Sur la Figure 4, la pression maximale est de presque 1.7GPa, ce qui équivaut à 10 fois la pression coup de bélier calculée par l’équation (2) et les données de la section 3.1, $P_{wh} = 170\text{MPa}$. La zone d’apparition de P_{max} est à $x/R = 0.18$, ce qui correspond au résultat de Haller [5] (voir Figure 2). L’impulsion, obtenue par intégration temporelle de la pression, rend plus compte du dommage subit par la surface de contact au cours de l’impact. Le signal présente de petites variations là où le jet se forme en $x/R = 0.18$, car ce phénomène est instable et très localisé.

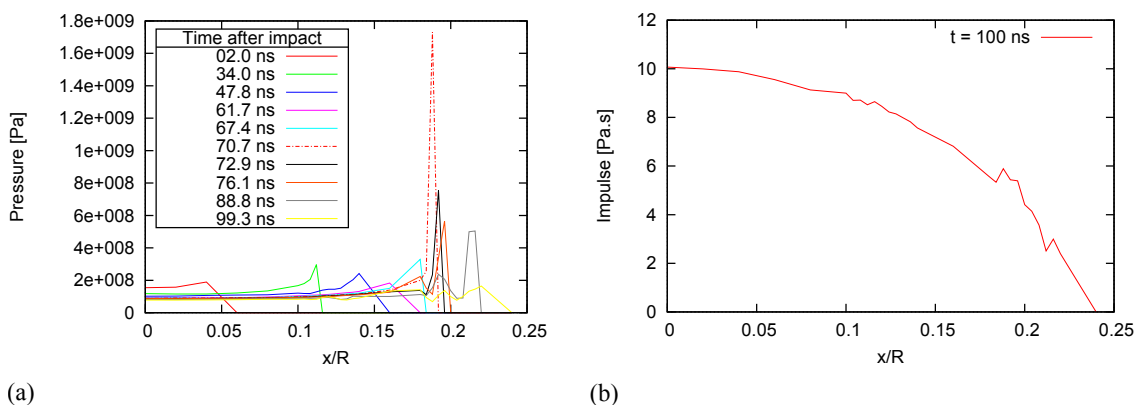


FIGURE 4 – (a) Pression sur le solide à différents instants. (b) Impulsion sur le solide. L’abscisse $x/R = 0$ correspond au centre de la goutte.

3.3 Calcul couplé

Les résultats du calcul couplé sont visibles sur la Figure 5. L'évolution de la contrainte hydrostatique σ_H permet de rendre compte du phénomène de fatigue. En effet, la région sous la zone d'impact subit un changement de signe pour σ_H , elle passe de traction à compression au cours du cycle.

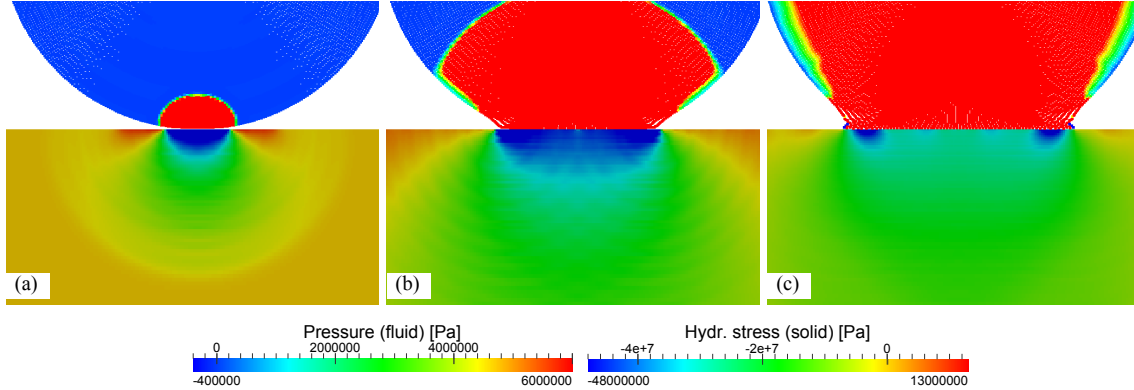


FIGURE 5 – Pression dans le fluide et contrainte hydrostatique dans le solide pour différents temps après l'impact (a) $t = 60\text{ns}$. (b) $t = 260\text{ns}$. (c) $t = 440\text{ns}$.

3.4 Analyse en fatigue

3.4.1 Programme d'érosion

Premièrement, un calcul couplé FSI est effectué. On choisit alors un nombre de cycles N_{lim} . Ce nombre définit la limite pour laquelle les éléments seront érodés ou non. On effectue alors une analyse en fatigue par post-processing qui donne pour chaque élément une amplitude de contrainte σ_a . Une loi de fatigue par courbe de Wöhler permet de relier l'amplitude de contrainte au nombre de cycles à la rupture. Au nombre de cycles choisi N_{lim} correspond une contrainte σ_{lim} , et l'amplitude de contrainte σ_a donne le nombre de cycles N . On définit l'indicateur de dommage $D = \sigma_a / \sigma_{\text{lim}}$ pour chaque élément. Si $D < 1$, l'élément est vierge (non érodé), ce qui correspond à $N > N_{\text{lim}}$. Par contre, si $D = 1$, l'élément est considéré érodé, ce qui correspond à $N < N_{\text{lim}}$, il est alors enlevé du maillage. Une nouvelle surface FSI est alors déterminée, et un autre cycle de calcul couplé et fatigue est lancé. Le principe de simulation est décrit dans la Figure 6. Seul un seul cycle est considéré dans cet article.

3.4.2 Critère utilisé

Il existe un grand nombre de critères pour la fatigue. Weber [15] et Chamat [1] en donnent une liste. Chacun des critères répond à un certain nombre d'hypothèses. En attendant d'avoir vérifié les hypothèses nécessaires, on utilise le critère décrit ci-après, simple à mettre en œuvre. Pour tout couple de temps t_i et t_j de contraintes respectives $\underline{\underline{\sigma}}^{(i)}$ et $\underline{\underline{\sigma}}^{(j)}$, on définit le tenseur des différences $\Delta\underline{\underline{\sigma}}^{(i,j)}$ du couple (i, j) à l'équation (4) :

$$\Delta\underline{\underline{\sigma}}^{(i,j)} = \underline{\underline{\sigma}}^{(i)} - \underline{\underline{\sigma}}^{(j)} \quad \text{avec } i \neq j \quad (4)$$

L'étendue de contrainte est le critère de Rankine appliqué à $\Delta\underline{\underline{\sigma}}^{(i,j)}$, pour obtenir l'état de contrainte maximal, ce qui suppose la détermination de ses valeurs principales $\Delta\sigma_I^{(i,j)}$, $\Delta\sigma_{II}^{(i,j)}$, $\Delta\sigma_{III}^{(i,j)}$. L'amplitude σ_a en est la moitié (équation 5) :

$$\Delta\sigma = \sup_{\substack{i,j \\ i \neq j}} \left\{ \left| \Delta\sigma_I^{(i,j)} \right|, \left| \Delta\sigma_{II}^{(i,j)} \right|, \left| \Delta\sigma_{III}^{(i,j)} \right| \right\} \quad \sigma_a = \frac{\Delta\sigma}{2} \quad (5)$$

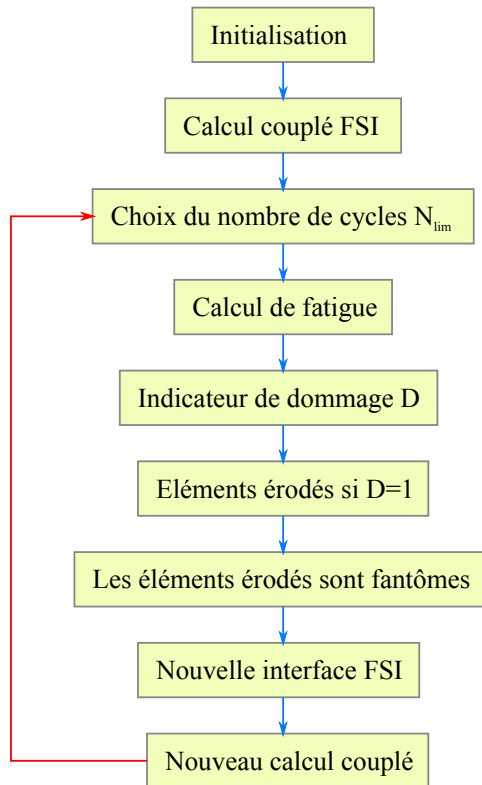


FIGURE 6 – Procédure de la simulation d'érosion.

Le nombre de cycles N pour l'amplitude de charge σ_a est obtenu par la courbe S-N de Wöhler, faisant correspondre un nombre de cycles à la rupture N à l'amplitude de contrainte. L'indicateur de dommage est alors déterminé (cf. 3.4.1).

3.4.3 Résultats

Les résultats présentés concernent un seul calcul FSI, il n'y a pas le bouclage décrit dans 3.4.2. Le calcul de l'amplitude contraintes σ_a (Figure 7), met en lumière les zones les plus sollicitées au cours du cycle de charge à 80MPa, d'après le critère utilisé pour $\Delta\sigma$ (cf. 3.4.2). Le nombre de cycles à la rupture par la loi de Wöhler (cf. 3.4.2) ainsi que l'indicateur de dommage pour N_{lim} sur la Figure 8. Les premiers éléments cassent au bout de 5 millions de cycles autrement dit après 5 millions d'impact de gouttes dans ces mêmes conditions, c-à-d sans changement de géométrie entre temps. Lors du choix du nombre de cycles N_{lim} qui va déterminer la liste d'éléments érodés (cf. Figure 6), il convient de choisir un nombre suffisamment faible pour lequel la surface n'évolue pas trop. En effet, on fait l'hypothèse que la géométrie ne change pas au cours de ce nombre de cycles. On constate que les zones érodées sont directement à l'extérieur de la zone d'apparition des microjets, ce qui montre l'importance de ce phénomène dans ce mécanisme d'érosion. L'endommagement suit donc une allure de couronne autour du centre d'impact de la goutte.

4 Conclusion

Lors de l'impact d'une goutte d'eau à faible diamètre et grande vitesse sur une surface solide, l'interaction est régie par les effets d'inertie, il est donc possible de négliger les efforts visqueux et l'action de la tension superficielle. L'utilisation des équations d'Euler est donc pertinente pour la modélisation du comportement du fluide. Lors de l'impact, la pression "coup de bélier" nait pas effet d'inertie au centre du contact, mais la pression maximale est située sur l'enveloppe de la zone de contact. Cette dernière peut être très supérieure à la pression coup de bélier. L'impact provoque le mouvement d'une onde de compression dans la goutte, et lorsque le front d'onde dépasse la zone de contact, des jets latéraux apparaissent au bord du contact par phénomène de compression. Du point de vue du matériau, l'endomma-

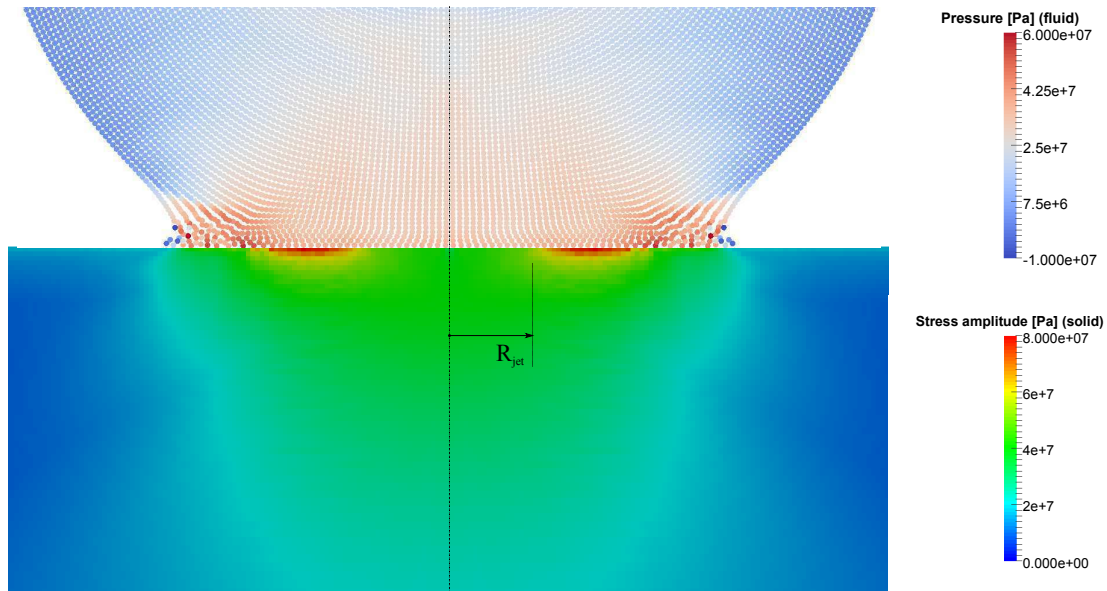


FIGURE 7 – Pression dans le fluide et amplitude de contrainte dans le solide à $t = 460\text{ns}$. Le marquage définit la zone d'apparition des microjets en $x = R_{jet}$.

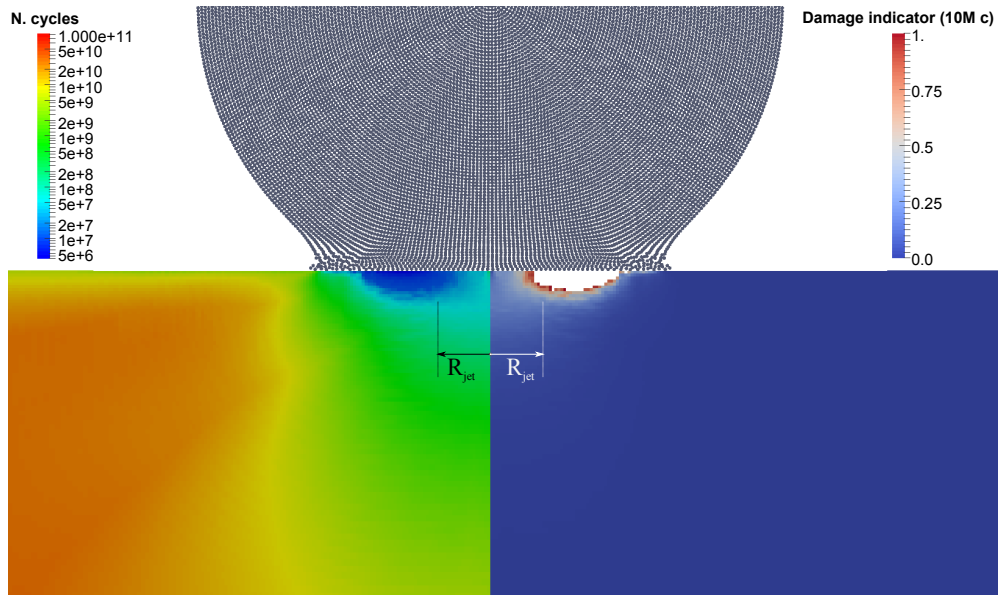


FIGURE 8 – Gauche - Nombre de cycles avant rupture N dans le solide à $t = 460\text{ns}$ par la loi de Wöhler. Droite - Indicateur de dommage pour $N_{lim} = 10M$ cycles. Les éléments érodés sont ôtés du maillage. Le marquage définit la zone d'apparition des microjets en $x = R_{jet}$.

gement est produit par fatigue. Il y a d'abord affaiblissement des joints de grains (période d'incubation). Après un plus grand nombre d'impacts, des micro-fissures apparaissent et provoquent l'enlèvement ou la rupture des grains (période d'amplification). Les simulations numériques sur un solide rigide permettent, en observant la pression et l'impulsion sur la paroi, de détecter les zones de la paroi les plus sollicitées. Un couplage fluide-structure à l'échelle macroscopique permet de rendre compte du phénomène de fatigue par la contrainte hydrostatique. Le programme d'érosion développé avec un critère simplifié montre les zones les plus sollicitées dans la masse au cours d'un cycle de charge. Il apparaît que les microjets jouent un rôle important dans le processus d'endommagement, puisque l'érosion est localisée directement autour de leur apparition.

Références

- [1] A. Chamat. *Prévision de la durée de vie en fatigue des roues ferroviaires sous sollicitations multiaxiales proportionnelles et non-proportionnelles*, PhD Thesis, Laboratoire de Fiabilité Mécanique, École Nationale d'Ingénieurs de Metz, 2005
- [2] J. Claverie. *Critère permettant de prévoir le risque d'érosion des corps basse pression des turbines à vapeur*, Électricité de France, 1973, ref J/32/062/1.1
- [3] J.E. Field. *ELSI Conference : invited lecture : Liquid impact : theory, experiment, applications*, Wear, 1999, 233-235, 1-12
- [4] J.E. Field, J.-J. Camus, M. Tinguely, D. Obreschkow, M. Farhat. *Cavitation in impacted drops and jets and the effect on erosion damage thresholds*, Wear, 2012, 290-291, 154-160
- [5] K. K. Haller, Y. Ventikos, and D. Poulikakos. *Computational study of high-speed liquid droplet impact*, Journal of applied physics, 2002, 92, 2821-2828
- [6] F.J. Heymann. *High-speed impact between a liquid drop and a solid surface*, Journal of Applied Physics, 1969, 40, 5113-5122
- [7] N. Kamkar, F. Bridier, P. Jędrzejowski, P. Bocher. *Water droplet impact erosion damage initiation in forged Ti-6Al-4V*, Wear, 2015, 322-323, 192-202
- [8] C. F. Kennedy, J. E. Field. *Damage threshold velocities for liquid impact*, Journal of Materials Science 2000, 35, 5331-5339
- [9] M.C. Kong, D. Axinte, W. Voice. *Aspects of material removal mechanism in plain waterjet milling on gamma titanium aluminide*, Journal of Materials Processing Technology, 2010, 210, 573-584
- [10] M.B. Lesser. *Thirty years of liquid impact research : a tutorial review*, Wear, 1995, 186, 28-34
- [11] R. Li, H. Ninokata, M. Mori. *A numerical study of impact force caused by liquid droplet impingement onto a rigid wall*, Progress in Nuclear Energy, 2011, 53,7, 881-885
- [12] B. Luiset, F. Sanchette, A. Billard, D. Schuster. *Mechanisms of stainless steels erosion by water droplets*, Wear, 2013, 303, 1-2, 459-464
- [13] J. R. Macdonald. *Some Simple Isothermal Equations of State*, Rev. Mod. Phys., American Physical Society, 1966, 38, 669-679
- [14] J. Nuñez-Ramirez, J.-C. Marongiu, M. Brun, A. Combescure. *A partitioned approach for the coupling of SPH and FE methods for transient non-linear FSI problems with incompatible time-steps*, International Journal for Numerical Methods in Engineering, 2017, 109, 1391-1417
- [15] B. Weber. *Fatigue multiaxiale des structures industrielles sous chargement quelconque*, PhD Thesis - Laboratoire de Mécanique des Solides - Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 1999
- [16] CEA/DEN/SEMT/DYN EuroPlexus. *A computer program for the finite element simulation of fluid-structure systems under dynamic loading*, Users manual, 2002

Acknowledgement

The research leading to these results has received funding from the European Community's Seventh Framework Programme (FP7 / 2007-2013) under Grant Agreement 608393 "PREDHYMA".