



Forces configurationnelles et localisation de front de fissure

Vincent Chiaruttini, Sylvia Feld-Payet, Vincent Bonnand, Noémie Rakotomalala, Dominique Geoffroy

► To cite this version:

Vincent Chiaruttini, Sylvia Feld-Payet, Vincent Bonnand, Noémie Rakotomalala, Dominique Geoffroy. Forces configurationnelles et localisation de front de fissure. 12e Colloque national en calcul des structures, CSMA, May 2015, Giens, France. hal-01515070

HAL Id: hal-01515070

<https://hal.science/hal-01515070>

Submitted on 27 Apr 2017

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Public Domain

Forces configurationnelles et localisation de front de fissure

V. Chiaruttini¹, S. Feld-Payet¹, V. Bonnard¹, N. Rakotomalala², D. Geoffroy³

¹ Onera DMSM/MNU, {vincent.chiaruttini, sylvia.feld-payet}@onera.fr

² Safran Tech {noemie.rakotomalala}@safran.fr

³ EDF R&D, {dominique.geoffroy}@edf.fr

Résumé — En exploitant un procédé de post-traitement de calcul de taux de restitution d'énergie, une stratégie pour la recherche de front de fissure est présentée. La position d'un éventuel front de fissure au sein d'un domaine spatial (sur lequel au moins une information de déformation et de comportement est donnée) est recherchée à partir de la maximisation de la dérivée d'une quantité énergétique par rapport à une transformation de domaine. Plusieurs applications sont présentées, sur l'exploitation de résultats d'essais en corrélation d'image et sur une simulation d'endommagement non-local.

Mots clés — Forces configurationnelles, corrélation d'image, endommagement non-local.

1 Introduction

Dans le cadre de l'étude de la rupture de structures mécaniques, il existe de nombreuses situations où il peut-être nécessaire de vouloir localiser une pointe ou un front de fissure. Par exemple, pour le suivi d'essais de fissuration, afin d'obtenir les vitesses de propagation. De même, pour la simulation numérique de problème de transition endommagement fissure dans des matériaux ductiles, l'étendue de la zone de localisation rend moins critique la connaissance exacte de la position du front de fissure (qui reste toujours une question ouverte). Cependant, pour les propagations longues, la trajectoire définie par l'ensemble des "fronts" de fissure lors de la propagation permet de retrouver une surface qui peut être éventuellement exploitée afin d'insérer une véritable fissure macroscopique (en complément, par exemple, aux approches développées dans [1]).

Pour la corrélation d'image en fissuration, il existe plusieurs approches pour déterminer la position d'un front de fissure. L'une des plus populaires, sur des fissures droites, repose sur une approche par corrélation des champs issus des séries de Williams, la position du front étant obtenue en assurant la nullité du premier terme supersingulier de la série [2, 3].

Dans ces travaux nous avons choisi d'utiliser une approche basée sur le calcul de forces configurationnelles [4, 5], susceptible d'être appliquée à des fissures de formes complexes et éventuellement hors du champ de la mécanique linéaire de la rupture. La partie suivante exprime la grandeur que nous allons calculer par intégrale de domaine et détaille l'algorithme de recherche utilisé. Ensuite sont présentes des résultats de validation dans le cadre d'une corrélation d'image et d'un calcul de fissuration ductile.

2 Algorithme de recherche de front de fissure

On suppose connu l'état mécanique en équilibre d'une structure en petites déformations, défini sur un domaine Ω par :

- un champ de déplacement vectoriel u (permettant le calcul de son gradient symétrisé $\varepsilon = \frac{1}{2} (\nabla u + \nabla^T u)$);
- un champ de contrainte tensoriel σ ;
- un champ de déformation résiduelle *figé* ε^{ae} .

À la manière de [6], il est possible, en tout point M du domaine, de calculer la force configurationnelle liée à l'évolution de l'énergie potentielle, par l'intégrale suivante :

$$G_p(M, \theta) = - \int_{\Omega} \left[\frac{1}{2} (\sigma : (\varepsilon - \varepsilon^{ae})) \nabla \cdot \theta - \sigma : (\nabla u \nabla \theta) - (\sigma : \nabla \varepsilon^{ae} \cdot \theta) \right] d\Omega, \quad \forall \theta \in \Theta \quad (1)$$

quels que soient les champs de perturbation θ respectant les conditions suivantes :

$$\theta \in \Theta = \{\mu \text{ tel que } \mu.n = 0 \text{ sur } \partial\Omega\} ; \quad \|\theta(M)\| = 1 \quad (2)$$

En l'absence de déformation résiduelle, cette grandeur correspond à un calcul volumique d'intégral J centré sur n'importe quel point M de la structure. En présence d'un tel champ non nul, la force configurationnelle ainsi définie suppose que le champ ε^{ea} n'est pas perturbé par la transformation de domaine. Il est dès lors possible de calculer ainsi des forces configurationnelles sur une structure possédant un comportement visco-élasto-plastique pour lequel l'état anélastique sera supposé *figé* dans la transformation θ . Comme dans [7], on s'autorisera à "violer" partiellement les conditions imposées au champ θ pour calculer une quantité vectorielle $G_p^d(M)$ dans une direction que ne vérifie pas nécessairement $\theta.n = 0$ à proximité du point d'évaluation M (en particulier sur d'éventuelles lèvres de fissure). On notera ainsi $G_p(M) = \max_{\|d\|=1} G_p^d(M)$, la plus grande valeur atteignable de la force configurationnelle, au point M pour toutes les directions vectorielles possibles d .

Le principe de la recherche d'un point P du front de fissure, développée ici, repose sur l'hypothèse que celui-ci constitue un maximum local de force configurationnelle. Une telle hypothèse est valide dans le cadre d'une fissure ouverte en mécanique linéaire de la rupture, la singularité de la contrainte en ce point assurant un tel résultat.

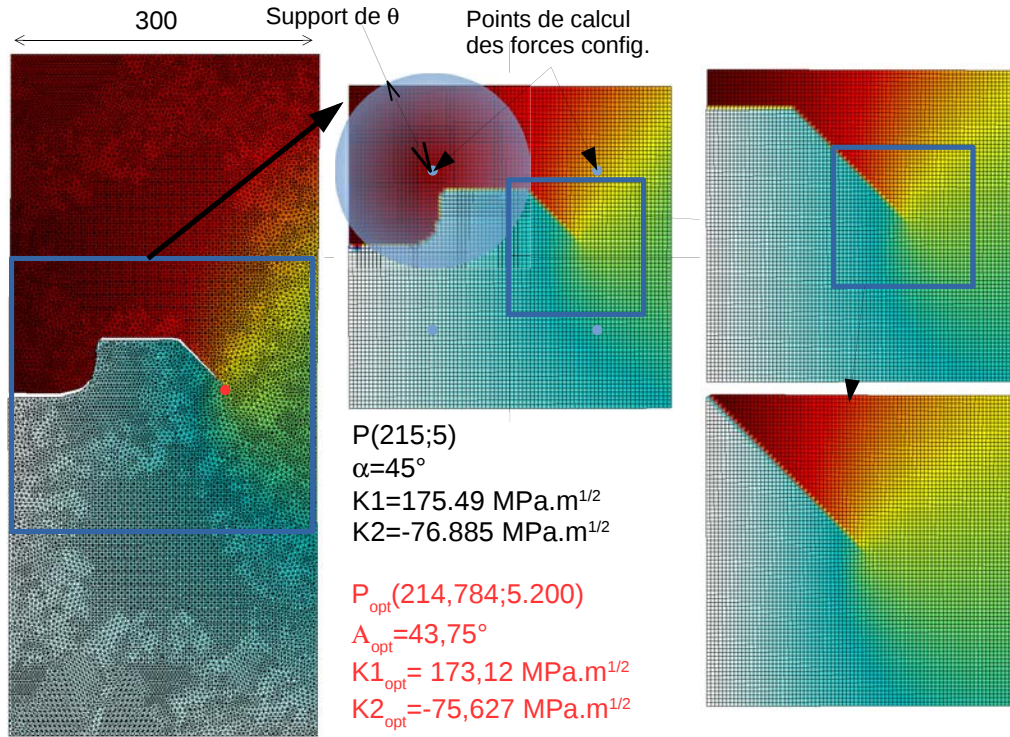


FIGURE 1 – Principe de l'algorithme multigrille de recherche du front sur un calcul élastique (valeurs estimées en rouge, valeurs réelles en noir).

Pour mener à bien cette recherche, on se propose d'utiliser un algorithme itératif multigrille : comme présenté dans la figure 1 pour un cas 2D, la recherche est menée en plusieurs étapes (avec deux critères : l'un lié à la précision de recherche sur une grille - η_G typiquement un dixième du pas de la grille courante -, l'autre un critère de précision absolu η) :

1. projection de la solution sur une grille éléments finis régulière (un carré de largeur D avec 80×80 éléments d'interpolation linéaire) ;
2. calcul de $G_p(M)$ à partir de deux vecteurs de base (avec un support de la fonction θ de rayon $R = D/\sqrt{2}$, sur quatre point répartis, cf. figure 1) ;
3. sélection du point P fournissant la valeur maximale, diminution de D d'un facteur $1/\sqrt{2}$
4. si $D > \eta_G$ retour en 2.

5. si $D > \eta$ retour en 1.
6. fin.

On associe en plus de cette approche un critère de déformation maximale ϵ^{seuil} , au dessus de laquelle, on suppose que la solution est discontinue au point de Gauss considéré (dans le processus d'intégration volumique). En analysant la direction moyenne formée par l'ensemble des points dépassant le seuil, on en déduit la direction de la fissure (une autre possibilité repose sur l'emploi d'une approche incrémentale, la direction d'avancée étant déterminé par différence avec la position précédente du front). Une dernière étape consiste alors, une fois la position du front déterminée et l'orientation de fissure connue, à calculer les facteurs d'intensité des contraintes.

La figure 1 représente le principe de fonctionnement sur un exemple de validation. Cet exemple est basé sur une solution de référence calculée par éléments finis sur un maillage conforme d'une fissure de forme complexe. L'algorithme de localisation exploite ensuite uniquement la connaissance du champ de déplacement (qui est projeté sur la grille cartésienne sans fissure), et la connaissance d'une relation de comportement élastique. Avec 3 grilles, et environ une quinzaine d'itérations sur chaque grille, l'algorithme de recherche permet de retrouver la position du front à moins de 0,3 mm près (sur une éprouvette de 300 mm de largeur et une fissure d'environ 200 mm de long). L'orientation de la fissure est retrouvée à moins de 2° près, et les facteurs d'intensité des contraintes calculés (sur la grille sans fissure la plus fine) avec une précision d'environ 2%.

3 Applications

On présente deux applications de cette approche, la première sur un cas de corrélation d'image de fissuration sur une éprouvette en INCO718. Dans ce cas, on part de l'ensemble des valeurs des déplacements corrélés sur les deux directions, et on suppose que le comportement est élastique linéaire (ce qui permet d'obtenir des valeurs contraintes, uniquement à partir des dérivées des champs de déplacement). La figure 2, montre le champ de déplacement reconstruit par corrélation et la position estimée (en jaune) du front de fissure. Cette opération a requis environ 8 secondes sur un portable à quatre coeurs (les intégrations volumiques étant multithreadées), et l'utilisation de 3 grilles.

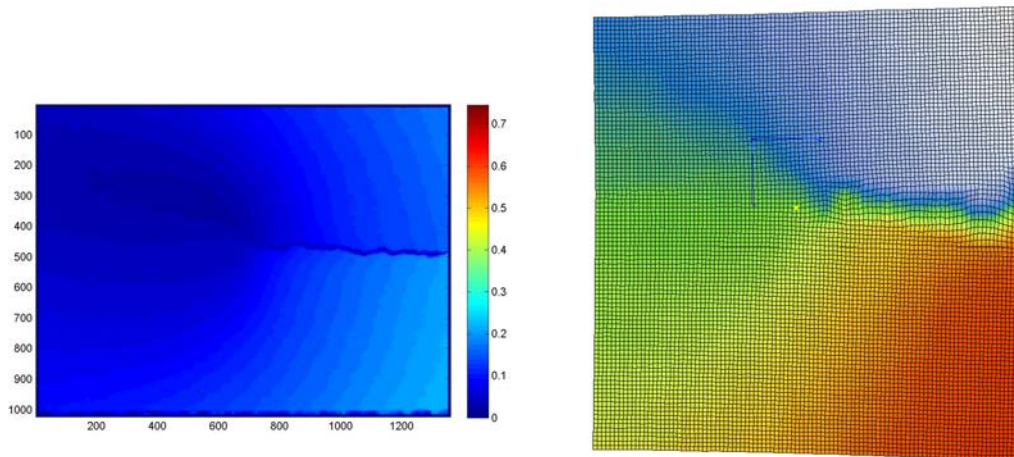


FIGURE 2 – Champ reconstruit sur un essai de fissuration réalisé à l'Onera (iso-valeurs du déplacement horizontal), à gauche, et position du front estimée (iso-valeurs du déplacement vertical), à droite.

La deuxième application concerne la recherche d'un trajet de fissuration dans le cadre de la fissuration ductile sous chargement monotone d'une éprouvette issue de [1]. Dans ce cadre, il n'est plus possible de seulement exploiter les champs de déplacements, puisque le comportement est fortement non-linéaire. On utilise alors la formule (1) pour laquelle le champ de déformation anélastique n'est plus nul. La figure 3 montre une bonne correspondance entre la succession des fronts obtenus et les trajectoires de fissures déterminées par une approche de détection de crête [1], pour les deux fissures observées, passée la phase d'initiation. Par ailleurs, la valeur de la grandeur énergétique calculée au niveau du front est

quasi-constante pendant toute la durée de la propagation, et légèrement plus élevée pour la fissure du bas qui avance d'ailleurs beaucoup plus que celle du haut. On peut donc supposer qu'un tel type de grandeur puisse être exploitée dans un matériau ductile pour formuler un critère de propagation "à la Griffith".

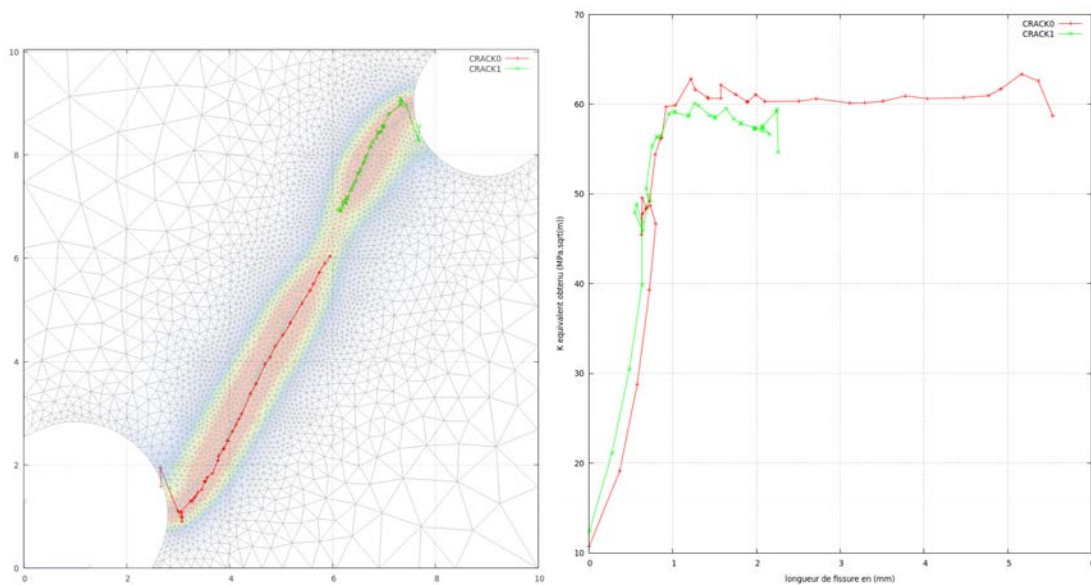


FIGURE 3 – Recherche des positions de fronts de fissure par le post-traitement d'une vingtaine d'étapes de calcul : à gauche, positions successives des fronts identifiés superposées à l'isovaleur du champ d'endommagement non-local final, à droite valeur de la force configurationnelle - convertie en FIC équivalent - au niveau du front, en fonction de la longueur de la fissure.

4 Conclusion

L'approche que nous avons développée, basée sur une recherche multigrille des extrema des forces configurationnelles par un calcul intégral permet de localiser efficacement la position d'un front de fissure dans le cadre de l'exploitation de corrélation d'image sur un essai 2D. Par ailleurs, elle permet également de proposer une alternative aux méthodes de détection de crêtes basées sur l'analyse d'un champ d'endommagement, lorsque celui est piloté par la plasticité : l'ensemble des positions successives de fronts de fissure obtenus correspondant avec une assez bonne précision à la position d'une fissure macroscopique en phase de propagation. En perspective, on pourra s'intéresser à l'étude quantitative de la valeur dissipative ainsi calculée en pointe de fissure (le caractère quasi-constant de cette valeur au cours de la propagation suggérant qu'elle puisse être exploitée comme un critère de propagation critique).

Références

- [1] Feld-Payet, S., Amorçage et propagation de fissures dans les milieux ductiles non locaux. Ph.D. thesis. Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris. <http://pastel.archives-ouvertes.fr/pastel-00583011>, 2010.
- [2] S.Roux, F. Hild, Stress intensity factor measurement from digital image correlation :post-processing and integrated approaches. *Int J Fract*, 140 :141–157, 2006.
- [3] H. Auradou, M. François, V. Lazarus, Evaluation Using Digital Image Correlation and Finite Element method of Stress Intensity Factors and T-stress, 13th International Conference on Fracture June 16–21, 2013, Beijing, China.
- [4] J.D. Eshelby, The force on an elastic singularity. *Phil. Trans. R. Soc. Lond. A*, 244 :87–112, 1951.
- [5] G.A. Maugin, Material forces, Concept and applications. *Applied Mechanical Reviews*, 48(5), 1995.
- [6] P. Heintz, On the numerical modelling of quasi-static crack growth in linear elastic fracture mechanics. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 62(2) :174–189, 2006.
- [7] P. Steinmann, D. Ackermann et F.J. Barth, Application of material forces to hyperelastostatic fracture mechanics. II. Computational setting. *International Journal of Solids and Structures*, 38 :5509–5526, 2001.