

Du matériau à la structure : l'exemple de dimensionnement à la fatigue d'une culasse de moteur diesel

F. Szmytka^{a,b}

a. IMSIA, ENSTA ParisTech, Chemin de la Hunière, 91761 Palaiseau Cedex, France

b. précédemment à Groupe PSA, route de Gisy 78943 Vélizy-Villacoublay

Résumé

Les culasses de moteur diesel pour application automobile sont produites en alliages d'aluminium de fonderie par différents types de procédés (coulée gravité, modèle perdu, etc.). Elles sont par ailleurs soumises à des conditions de chargement très sévères qui les rendent sujettes à un endommagement par fatigue tant oligocyclique (thermomécanique) que polycyclique. Les stratégies numériques de dimensionnement de ce type de pièce font appel à de nombreux domaines de la mécanique et de la thermique et nécessitent bien souvent des allers et retours incessants entre les mécanismes physiques précis à l'échelle du matériau et des modélisations numériques simplifiées à l'échelle de la structure. L'objectif principal de ce court résumé est de souligner l'importance du lien expérience/modèle dans la compréhension puis la modélisation simplifiée (mais néanmoins efficace) de la fatigue oligocyclique et polycyclique des culasses.

Mots clés : fatigue polycyclique, fatigue oligocyclique, alliages d'aluminium ; analyse statistique

1. Introduction

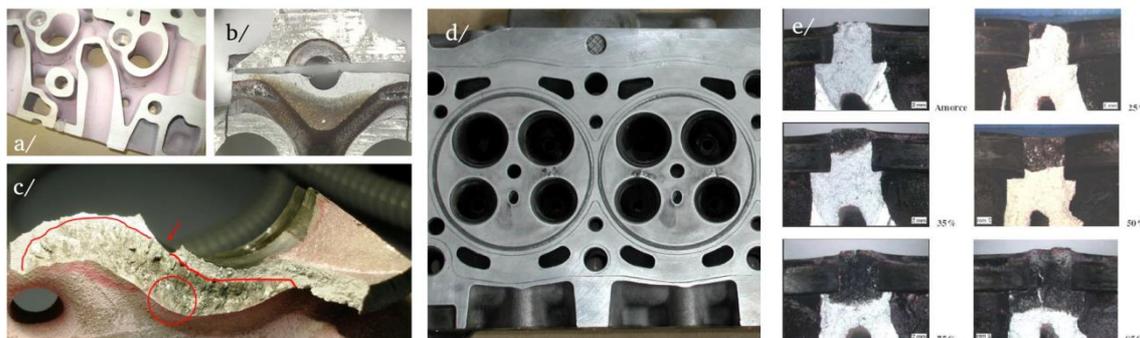


Figure 1. a/ Coupe de culasse mettant en évidence le circuit de refroidissement. b/ et c/ Fissure de fatigue polycyclique. d/ Face flamme de culasse. e/ propagation de fissure de fatigue thermomécanique à partir de la face flamme.

Les culasses de moteur diesel sont des pièces à géométrie complexe, qui jouent un rôle central dans la performance intrinsèque des motorisations tant sur le plan de la puissance que celui de la maîtrise des émissions polluantes. L'augmentation des températures et des pressions d'usage soumettent ces structures à des chargements thermo-mécaniques des plus sévères et les rendent sensibles à l'apparition de fissures de fatigue. La complexité des chargements subis par ces structures génère deux types d'endommagement comme présenté sur la *Figure 1*. Le premier est propre à la fatigue polycyclique : c'est le bridage de la structure combiné aux fortes variations de pression lié à la combustion qui génère une sollicitation mécanique qui risque de faire apparaître des fissures au

niveau du circuit de refroidissement des culasses. Le second est quant à lui caractéristique de la fatigue thermo-mécanique. Il est engendré par les gradients thermiques induits par la combustion ainsi que par les forts bridages mécaniques ; c'est la zone en contact direct avec la chambre de combustion qui présente, dans ce cas, le risque maximal d'endommagement.

Les culasses actuelles sont fabriquées, au moins pour le monde automobile, en alliage d'aluminium-silicium avec l'ajout fréquent de magnésium et de cuivre. L'objectif principal de ce document est alors de souligner l'absolue nécessité de prendre en compte les spécificités microstructurales de ces alliages ainsi que les conséquences des procédés de fabrication sur le matériau et la structure pour proposer un dimensionnement fiable – c'est-à-dire permettant le calcul d'un risque de défaillance- à la fatigue [1]. Il s'agira donc tout d'abord de préciser la variété microstructurale observée sur les alliages constitutifs des culasses avant de souligner la nécessité de comprendre comme elle influence les mécanismes d'endommagement. Un formalisme de modèle d'endommagement sera ensuite proposé pour estimer la résistance à la fatigue pour des structures composées de tels alliages. Enfin, une discussion sera menée sur la nécessité de considérer les particularités liées à la mise en forme de la structure pour proposer un dimensionnement cohérent à la fatigue.

2. Les alliages d'aluminium et leur spécificité pour la fatigue

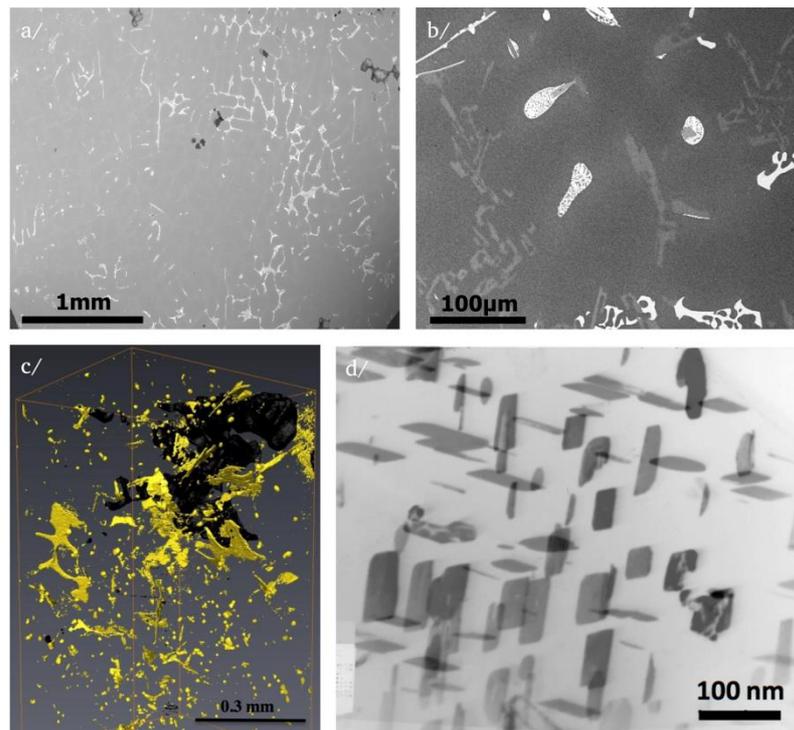


Figure 2. a/ « Macrostructure » dendritique. b/ Diversité des composants de la microstructure. c/ Analyse tomographique de la microstructure (intermétalliques en jaune, pores en noir [5]). d/ Nanostructure et mise en évidence de précipités dans la matrice d'aluminium

Le dimensionnement à la fatigue de structures comme les culasses nécessite une bonne connaissance des matériaux constitutifs et de leurs procédés de mise en œuvre sans laquelle il est bien souvent impossible d'estimer correctement la résistance à la fatigue. Les alliages d'aluminium-silicium sont en effet des matériaux de fonderie à durcissement structural qui présentent de fait plusieurs échelles caractéristiques comme présentées sur la Figure 2. Au delà de la finesse de la

microstructure caractérisée par l'espace inter-dendritique (Figure 2.a), nous pouvons noter la présence de très nombreux composés intermétalliques dont les propriétés mécaniques diverses [2] vont nécessairement avoir une forte influence sur la tenue à la fatigue. Des procédés particuliers comme la fonderie à modèle perdu induisent par ailleurs la présence de pores de tailles et de formes diverses qui peuvent agir comme précurseur de fissures de fatigue [3,4] et dont les distributions statistiques sont aujourd'hui accessibles en trois dimensions notamment grâce à la tomographie à rayon X [5]. Enfin, à l'échelle nanométrique, au sein de la matrice d'aluminium, nous pouvons noter (Figure 2.d) un réseau de précipités dont la taille, la forme et la répartition spatiale vont caractériser le comportement plastique de l'alliage. La connaissance de ce comportement et de son évolution avec l'exposition aux hautes températures –ce *vieillessement* induit une modification de la population de précipités- est cruciale pour la compréhension et l'estimation de l'endommagement par fatigue thermomécanique [6].

Les différents composants de l'alliage jouent tous un rôle, à leur échelle, dans le dimensionnement à la fatigue : il est donc important de le comprendre, le quantifier puis de proposer un lien entre ces mécanismes et l'estimation d'une résistance à la fatigue à l'échelle macroscopique.

3. L'importance de l'expérience

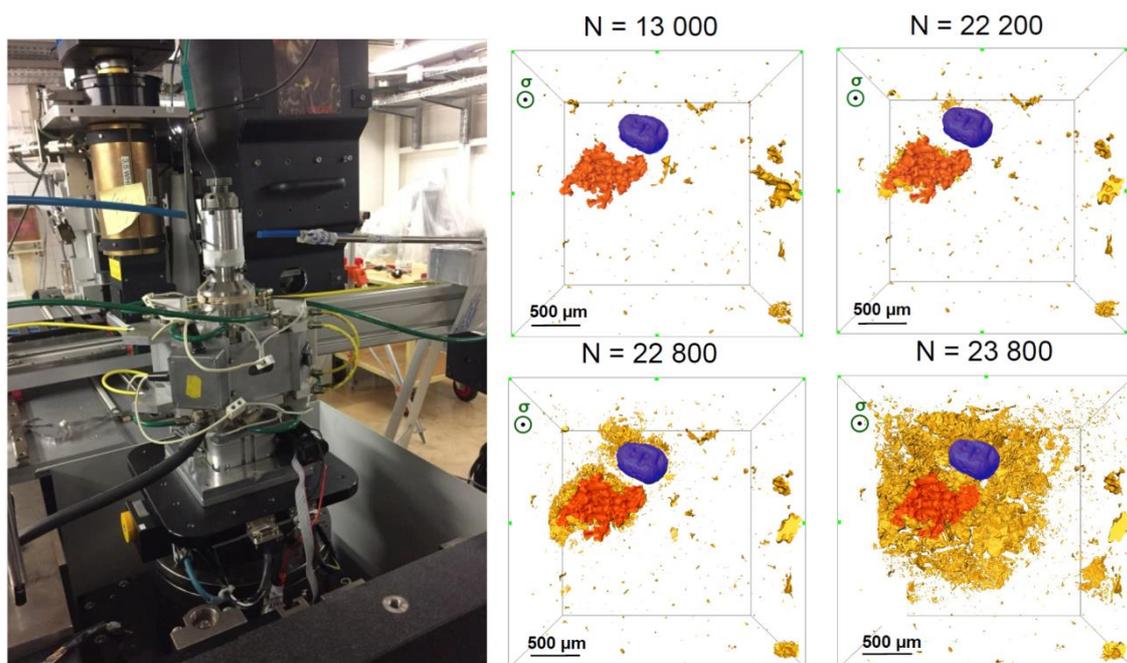


Figure 3. Essai de fatigue sous tomographie [7] et évolution de l'endommagement par micro-propagation de fissure (en jaune) autour de pores (en mauve et orange) au cours des cycles à 250°C

Pour comprendre le rôle des éléments de la microstructure sur le comportement en fatigue des alliages d'aluminium, l'apport récent de la tomographie à rayons X est décisif. Il est en effet alors possible de réaliser des essais de fatigue sur des éprouvettes de petite taille et d'observer l'évolution de l'endommagement au cours des cycles successifs comme le montre la *Figure 3* à haute températures. Ici, dans un cas de plasticité généralisée propre à la fatigue thermomécanique, la population de pores agit comme précurseur de l'endommagement en concentrant les contraintes à leur périphérie tandis que les composés intermétalliques facilitent la propagation des micro-fissures et, en fonction de leur taille et de leur concentration, influent sur la vitesse d'évolution de

l'endommagement. Les dispersions intrinsèques à ce genre d'alliage quant à la distribution spatiale de ces hétérogénéités microstructurales [7] ainsi que la forte variabilité de leur taille et leur forme [8] semble alors constituer une source à considérer au premier ordre lors de l'étude de la réponse macroscopique en fatigue et de sa variabilité.

Ces essais doivent alors nécessairement être complétés par des essais de fissuration macroscopique pour caractériser les vitesses de propagation et obtenir des modèles de fissuration utilisables dans un critère à l'échelle de l'ingénieur. Il s'agit aussi de réaliser des essais de fatigue « classiques » permettant d'identifier les variables d'endommagement les plus représentatives de l'endommagement cyclique subi par l'alliage et surtout de caractériser la variabilité de la réponse en fatigue [9] en regard de la variabilité des éléments microstructuraux (pores, composés intermétalliques, etc.) en multipliant des essais identiques du point de vue du chargement. Une fois cette large base expérimentale complétée, il est alors temps de proposer des modélisations permettant de prédire la résistance à la fatigue en intégrant la variabilité microstructurale ainsi que les mécanismes d'endommagement observés.

4. Le choix des modèles numériques

Nous nous concentrerons ici spécifiquement sur la fatigue thermomécanique mais la démarche est parfaitement transposable à la fatigue polycyclique. La durée de vie au sens de la fatigue oligocyclique peut être décomposée en une période d'amorçage au sens microscopique et reliée à des éléments caractéristiques comme la taille de grain dans les polycristaux sans défaut ou les pores lorsqu'ils sont présents et une phase de micro-propagation. À hautes températures et pour différents types de matériaux, des études ont montré que la durée de vie est principalement constituée d'une phase de micro-propagation et qu'une loi de propagation de fissures courtes est généralement suffisante pour décrire l'endommagement [10]. De nombreuses propositions ont été faites pour décrire les forces mécaniques motrices pour la propagation de fissures [11,12] mais l'hypothèse introduite par Skelton [13] sur le rôle de l'énergie semble une des plus intéressantes car elle est facile à mettre en œuvre et fait écho aux méthodes aujourd'hui couramment utilisées dans l'industrie. Si la mécanique linéaire de la rupture se limite au cas où le comportement du matériau est élastique, le chargement en fatigue thermomécanique impose nécessairement une viscoplasticité considérable et des solutions ont ainsi été proposées [14] pour décrire la propagation de fissures longues dans des éprouvettes plastifiées en utilisant l'intégrale de Rice de la même manière que Paris avec le facteur d'intensité des contraintes K . Cette approche a ensuite été élargie aux fissures courtes [15] mais à partir d'hypothèses simplifiées sur le comportement non linéaire menant à des formulations difficiles à généraliser. Forts de ces constats, une première proposition a été faite dans la thèse de Shadan Tabibian [8] en introduisant une densité d'énergie dissipée dans une loi de propagation de type Paris et définissant ainsi le nombre de cycles à amorçage N_f en fonction d'une variable caractérisant l'endommagement cyclique ϕ , ainsi que des tailles de défauts initiale a et finale a_f

$$N_f = \left(\frac{\phi}{k}\right)^{-m} (a^{1-m} - a_f^{1-m}) \quad (1)$$

avec k et m des paramètres réels et positif ($m > 1$). a représente la taille d'un pore ou d'une inclusion tandis que a_f est la taille d'une fissure considérée comme critique pour une structure. Étant donné que les pores sont considérés comme les précurseurs de l'endommagement et que leur statistique de taille est connue, cette dernière peut être facilement intégrée dans l'équation (1). a représente alors une variable aléatoire et la distribution des tailles de pores dans la matière, la probabilité de trouver un pore de taille a dans un élément de volume représentatif. La durée de vie

en fatigue N_f en tant que fonction dépendante de a devient elle-même une variable aléatoire dont la distribution varie avec la valeur de ϕ , ce qui permet de déterminer naturellement une probabilité de défaillance.

Un tel modèle est bien entendu assez simpliste mais néanmoins efficace [16] et il peut facilement être amélioré pour prendre en compte la complexité de la réponse mécanique, en introduisant par exemple différentes densités d'énergies et des modèles de propagation plus réalistes et basés sur l'expérience [17]. Il n'en reste pas moins vrai que la combinaison d'une force motrice de l'endommagement, macroscopique et facilement identifiable expérimentalement ou par le calcul – telle une densité d'énergie dissipée- avec un modèle de propagation *ad hoc* offre une solution efficace pour prédire la réponse en fatigue de ces alliages d'aluminium en intégrant les caractéristiques de la microstructures à l'analyse en fatigue à l'échelle macroscopique.

5. L'importance de la structure

La connaissance du matériau en lui même n'est toutefois pas suffisante. Il est également indispensable de bien connaître la structure. S'il est utile de rappeler qu'il est en effet indispensable de s'intéresser aux chargements réels appliqués en fonctionnement nominal sur la structure pour correctement calibrer les critères précédemment décrits, il est également fondamental de s'attarder sur le procédé. Pour compléter la description d'un protocole de dimensionnement à la fatigue reliant le matériau à la structure, la prise en compte des effets liés au procédé est indispensable, que ce soit les traitements thermiques, l'usinage ou la mise en forme elle même.

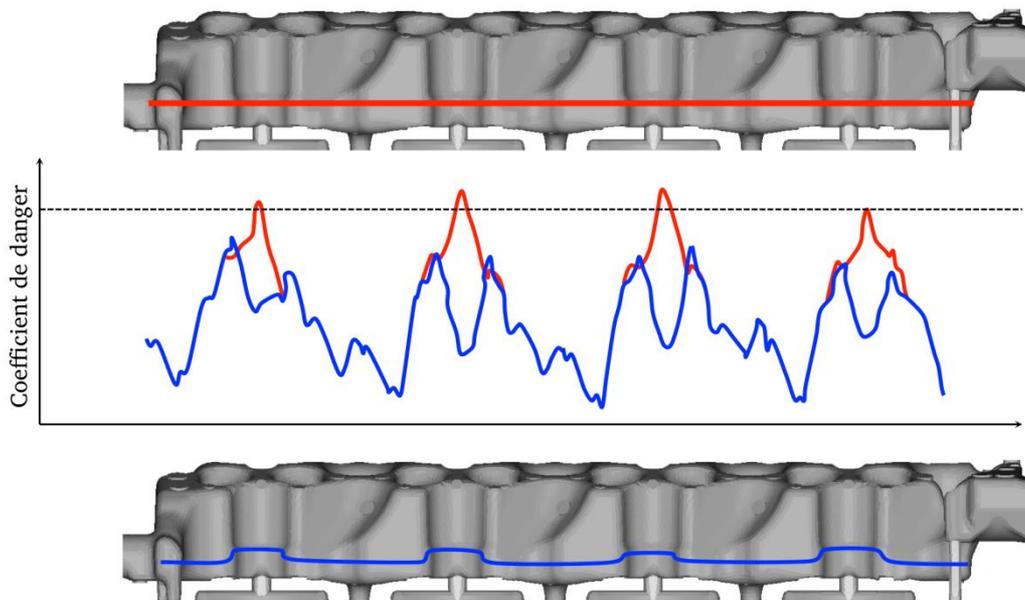


Figure 4. Calcul d'un risque d'endommagement par fatigue à l'aide du critère de Dang Van pour une culasse : influence de la prise en compte d'un joint de colle pour le modèle polystyrène de fonderie à modèle perdu.

La Figure 4 présente un exemple caractéristique du risque à laisser de côté les effets liés à la mise en forme. Une culasse obtenue par fonderie à modèle perdu présente des aspérités caractéristiques dans les zones de jonctions liant les différentes parties du modèle en polystyrène [7]. La géométrie de ces joints de colle est particulière et il est nécessaire de la considérer précisément dans le calcul des structures. Ici, le critère de Dang Van est utilisé pour qualifier ou pas la structure à la fatigue polycyclique. Si un joint linéaire (en rouge) est choisi de manière arbitraire, alors le calcul

indique un risque d'obtenir un coefficient de danger positif et donc une ruine de la structure. Si la géométrie du cordon de colle est respectée (en bleu), alors, le calcul infirme ce risque. Ainsi, connaître précisément la microstructure de l'alliage constitutif de la culasse est nécessaire mais insuffisant. Il est impératif de toujours garder à l'esprit les effets de la structure sur le dimensionnement et veiller à prendre en compte l'ensemble des étapes de mise en forme le plus précisément possible.

6. Conclusion

Les stratégies numériques de dimensionnement des culasses font appel à de nombreux domaines de la mécanique et de la thermique et nécessitent des allers et retours incessants entre les mécanismes physiques précis pour les différentes échelles d'un matériau aussi complexe que les alliages d'aluminium et des modélisations numériques simplifiées à l'échelle de la structure. Pour bien dimensionner à la fatigue ces structures, il est impératif d'étudier en profondeur les mécanismes d'endommagement responsables de la résistance globale du matériau et de sa variabilité. Pour cela, observations et expérimentations sont indispensables. L'utilisation de critères basés sur une statistique de défauts couplée à des modèles de micro-propagation de fissure semble alors une voie prometteuse pour estimer la résistance à la fatigue de ces structures, particulièrement dans le cas où l'amplitude des chargements est variable. Enfin, il est impératif d'inclure les étapes de mises en forme et les particularités qu'elles confèrent à la structure à dimensionner pour proposer un protocole de dimensionnement fiable à la fatigue.

Remerciements

Ces résultats sont le fruit d'environ dix ans de collaborations alors que j'étais ingénieur de recherche au sein du groupe PSA et doivent beaucoup au travail de doctorat de Shadan Tabibian et Sébastien Dézecot ainsi qu'aux idées et aux apports de Pierre Osmond, Pierre-Damien Masson et Alexis Oudin. Elles concrétisent également l'accomplissement de collaborations académiques, que j'espère encore longues, avec Luc Rémy, Andrei Constantinescu, Eric Charkaluk, Vincent Maurel, Alain Köster et Jean-Yves Buffière.

Références

- [1] Szmytka, F., & Oudin, A. (2013). A reliability analysis method in thermomechanical fatigue design. *International Journal of Fatigue*, 53, 82-91.
- [2] Tabibian, S., Charkaluk, E., Constantinescu, A., Guillemot, G., & Szmytka, F. (2015). Influence of process-induced microstructure on hardness of two Al-Si alloys. *Materials Science and Engineering: A*, 646, 190-200.
- [3] Dezecot, S., Buffiere, J. Y., Koster, A., Maurel, V., Szmytka, F., Charkaluk, E., ... & Witz, J. F. (2016). In situ 3D characterization of high temperature fatigue damage mechanisms in a cast aluminum alloy using synchrotron X-ray tomography. *Scripta Materialia*, 113, 254-258.
- [4] Le, V. D., Morel, F., Bellett, D., Saintier, N., & Osmond, P. (2016). Multiaxial high cycle fatigue damage mechanisms associated with the different microstructural heterogeneities of cast aluminium alloys. *Materials Science and Engineering: A*, 649, 426-440.
- [5] Wang, L. (2015). *Etude de l'influence de la microstructure sur les mécanismes d'endommagement dans des alliages Al-Si de fonderie par des analyses in-situ 2D et 3D* (Doctoral dissertation, Ecole Centrale de Lille).
- [6] Osmond P. (2010) Étude du vieillissement des alliages d'aluminium pour culasses diesel et prise en compte dans le dimensionnement. *Thèse de doctorat Mines Paristech*

- [7] Dezecot, S., Maurel, V., Buffiere, J. Y., Szmytka, F., & Koster, A. (2017). 3D characterization and modeling of low cycle fatigue damage mechanisms at high temperature in a cast aluminum alloy. *Acta Materialia*, 123, 24-34.
- [8] Tabibian, S. (2011). *Contributions to Thermomechanical Fatigue Criteria for Lost Foam Casting Aluminum Alloys: Thèse de Doctorat* (Doctoral dissertation, S. Tabibian).
- [9] Tabibian, S., Charkaluk, E., Constantinescu, A., Szmytka, F., & Oudin, A. (2013). TMF criteria for lost foam casting aluminum alloys. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 36(4), 349-360.
- [10] Solomon, H. D., & Coffin, L. F. (1973). Effects of frequency and environment on fatigue crack growth in A286 at 1100 F. In *Fatigue at elevated temperatures*. ASTM International.
- [11] Tomkins, B. (1968). Fatigue crack propagation—an analysis. *Philosophical Magazine*, 18(155), 1041-1066.
- [12] Rémy, L. (2003). Thermal-mechanical fatigue (including thermal shock). *Comprehensive structural integrity; vol 5*, 113-199.
- [13] Rémy, L., & Skelton, R. P. (1990). Damage assessment of components experiencing thermal transients. *High temperature structural design*, 283-315.
- [14] Lamba, H. S. (1975). The J-integral applied to cyclic loading. *Engineering Fracture Mechanics*, 7(4), 693-703.
- [15] Shih, C. F., & Hutchinson, J. W. (1976). Fully plastic solutions and large scale yielding estimates for plane stress crack problems. *Journal of Engineering Materials and Technology*, 98(4), 289-295.
- [16] Charkaluk, E., Constantinescu, A., Szmytka, F., & Tabibian, S. (2014). Probability density functions: from porosities to fatigue lifetime. *International Journal of Fatigue*, 63, 127-136.
- [17] Dézecot, S. (2015) Caractérisation et modélisation du rôle des défauts microstructuraux dans la fatigue oligocyclique des alliages d'aluminium de fonderie: application au procédé à modèle perdu. *Thèse de doctorat INSA Lyon*
- [17] Dang-Van, K. (1993). Macro-micro approach in high-cycle multiaxial fatigue. In *Advances in multiaxial fatigue*. ASTM International.