

Le projet CONDOR : développement d'une méthodologie de prise en compte des contraintes résiduelles issues du grenailage de précontrainte dans le dimensionnement de pièces complexes

B. WEBER^a, R. KUBLER^b, P. OSMOND^c, J. BADREDDINE^d,
C. DIDES^e, P. LAMESLE^e

- a. ArcelorMittal Centre Produits - Voie Romaine - 57280 Maizières-lès-Metz
- b. ENSAM MSMP - 2, cours des Arts et Métiers - 13 617 Aix-en-Provence
- c. Groupe PSA - 212 Boulevard Pelletier - 78955 Carrières-sous-Poissy
- d. SAFRAN TECH - Rue des Jeunes Bois, Châteaufort - 78772 Magny-Les-Hameaux
- e. IRT M2P Matériaux, Métallurgie et Procédés - 4, rue Augustin Fresnel - 57070 Metz

Résumé :

Les Instituts de Recherche Technologique ont comme mission le développement de filières technologiques compétitives. L'IRT M2P (Matériaux, Métallurgie et Procédés) basé à Metz a fédéré autour d'un grand nombre d'acteurs industriels (SAFRAN, Groupe PSA, Framatome, AIRBUS Helicopters, ArcelorMittal, Mistras) et académiques (ENSAM LEM3 et MSMP, UTT, ONERA) le projet collaboratif CONDOR comme CONstraints DimensiOnnement Relaxation. L'ambition du projet était de se doter d'outils numériques fiables, afin d'intégrer dans les filières de calcul la prise en compte du grenailage de précontrainte pour le dimensionnement en fatigue. Cette démarche vise à répondre autant aux besoins de conception rencontrés en bureaux d'études, qu'à l'analyse et la compréhension du comportement des matériaux nécessaires aux activités de R&D. Sur cinq années, les challenges du projet CONDOR ont été nombreux et les apports scientifiques auxquels il a contribué constituent une longue liste d'outils et de résultats que l'IRT M2P et les partenaires industriels peuvent exploiter. C'est également un nouvel état de référence pour les partenaires académiques, sans compter les abondantes perspectives.

Abstract :

The French Technologic Research Institutes are intended to develop competitive technological sectors. The IRT M2P (as Materials, Metallurgy and Processes) based in Metz has federated around a large number of industries (SAFRAN, Groupe PSA, Framatome, AIRBUS Helicopters, ArcelorMittal, Mistras) and academics (ENSAM LEM3 and MSMP, UTT, ONERA) the collaborative project CONDOR. The ambition of this project was to build reliable numerical tools with the objective to integrate the shot-peening impact in the fatigue design. This approach aims to meet both the design needs encountered in design offices as well as the analysis and the understanding of materials behavior required for R&D activities. Over five years, the challenges of CONDOR project have been numerous and the scientific contributions constitute a long list of numerical tools and results that IRT

M2P and industrial partners are able to capitalize on. It also defines a new reference state for academic partners without forgetting plenty of perspectives.

Mots clefs : grenailage de précontrainte, contraintes résiduelles, fatigue, inconel, aciers, Eléments-Finis

1 Introduction

Le grenailage de précontrainte est largement employé dans l'industrie aéronautique, automobile et de l'énergie pour améliorer la tenue en fatigue des organes et structures métalliques soumis à des changements cycliques. La mise en œuvre de ce procédé dans un contexte de développement produit est essentiellement basée sur une démarche empirique largement optimisable, notamment en termes de coûts et de délais (conditions et paramètres, évaluation par mesures et essais, moyen de contrôle, maîtrise et suivi du procédé). Si la mise en compression de la surface est incontestablement bénéfique sur la tenue en fatigue, la mise en œuvre du grenailage demeure fastidieuse d'autant plus qu'elle est rarement *a priori* intégrée dans le dimensionnement au niveau des bureaux d'études. De même, la compréhension fine du comportement des matériaux soumis au grenailage et son impact sur la résistance en fatigue, à différentes échelles, n'est supportée que par des évaluations *a posteriori* sans intégrer toutes les interactions produit-procédé (modifications microstructurales, contraintes résiduelles induites et leurs évolutions).

Dans le cadre des missions des Instituts de Recherche Technologique, l'IRT M2P a fédéré le projet collaboratif CONDOR (CONtraintes DimensiOnnement Relaxation) dont l'ambition était de développer des méthodologies et des outils numériques fiables afin de prendre en compte le grenailage de précontrainte de géométries complexes pour le dimensionnement en fatigue dans les bureaux d'études, mais également à destination de l'expertise, pour la compréhension des mécanismes à l'échelles des matériaux. Ce sont donc des industriels des secteurs mentionnés préalablement (SAFRAN, Groupe PSA, Framatome, AIRBUS Helicopters), ainsi qu'un sidérurgiste (ArcelorMittal) et un laboratoire d'essais (Mistras), et des universitaires de la thématique (ENSAM LEM3 et MSMP, UTT, ONERA) qui ont œuvré de 2014 à aujourd'hui, afin de concrétiser et valider la filière numérique adéquate (figure 1).

L'organisation du projet a été déclinée autour des choix matière dépendant des différents secteurs industriels ainsi que des approches sur éprouvette ou sur des géométries complexes représentatives de pièces industrielles (figure 2). Une partie des études a été consacrée aux aciers à transformation de phase (effet TRIP) et l'autre partie s'est concentrée sur un alliage à base nickel.

Dans un premier temps, le comportement des produits a été modélisé sous l'effet d'un jet de grenaille afin d'en déduire le profil des champs mécaniques résiduels sur la base d'une hypothèse de Massif Semi-Infini (MSI) et confronté aux mesures expérimentales à l'échelle de l'éprouvette (Thèse 1 de R. Guiheux [3] et Thèse 2 de V. Boyer [4]). Pour chacune des applications matériaux, une attention particulière a été portée sur la définition des conditions de grenailage à étudier, afin d'assurer la cohérence avec le besoin industriel. Pour chacune de ces conditions, une étude préalable a permis de traduire les paramètres procédés usuellement utilisés en données d'entrée pour la modélisation numérique (vecteur vitesse et taux de recouvrement). Les lois de comportement adaptées aux matériaux étudiés ont été définies afin de décrire convenablement l'évolution des grandeurs

mécaniques d'intérêt sous les impacts répétés des grenailles (lois élasto-visco-plastiques intégrant des écrouissages cinématiques et isotropes avec ou sans changement de phase). Ces lois ont été intégrées à la simulation par le biais de lois utilisateur VUMAT dans ABAQUS Explicit. Une stratégie spécifique de validation, combinant analyse micro-géométrique et mécanique (incluant de très nombreuses analyses de contraintes résiduelles par Diffraction des Rayons X (DRX)), en situation de mono-impact et de multi-impacts, a été définie, permettant de valider les lois de comportement ainsi que les modélisations numériques proposées.

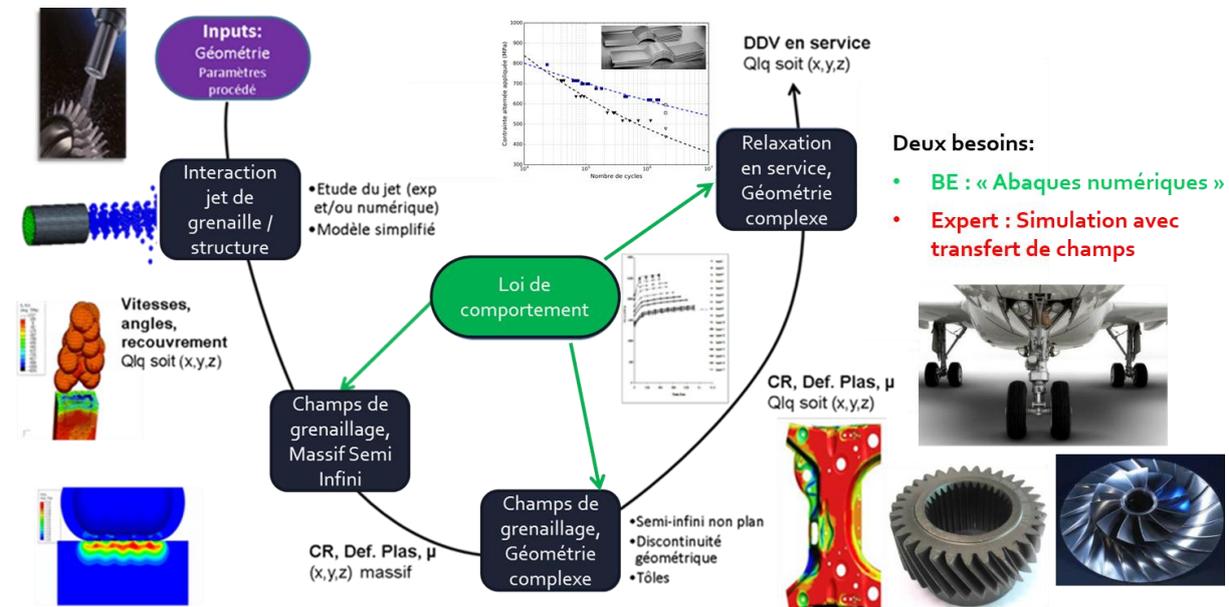


Figure 1. Méthodologie numérique complète [1 & 2].

Dans un second temps, la relaxation mécanique (ou thermomécanique pour le cas de l’Inconel 718 DA), c’est-à-dire l’évolution des champs de contraintes résiduelles sous sollicitation cyclique de fatigue, a été étudiée (Thèse 3 de C. Mauduit [5] et Thèse 4 de J.-P. Goulmy [6]). La connaissance des états mécaniques relaxés, de même que des lois de comportement adéquates pour en rendre compte dans la simulation numérique, ont pour objectif final une bonne prédiction de la durée de vie selon les méthodes de dimensionnement habituelles pratiquées par les industriels. Des éprouvettes technologiques présentant des géométries complexes ont été proposées et utilisées (éprouvette cylindrique avec entaille pour l’Inconel 718 DA et éprouvette jonc pour le TRIP780) en vue d’évaluer la performance des méthodologies proposées dans des conditions de sollicitations au plus près de l’usage en application industrielle.

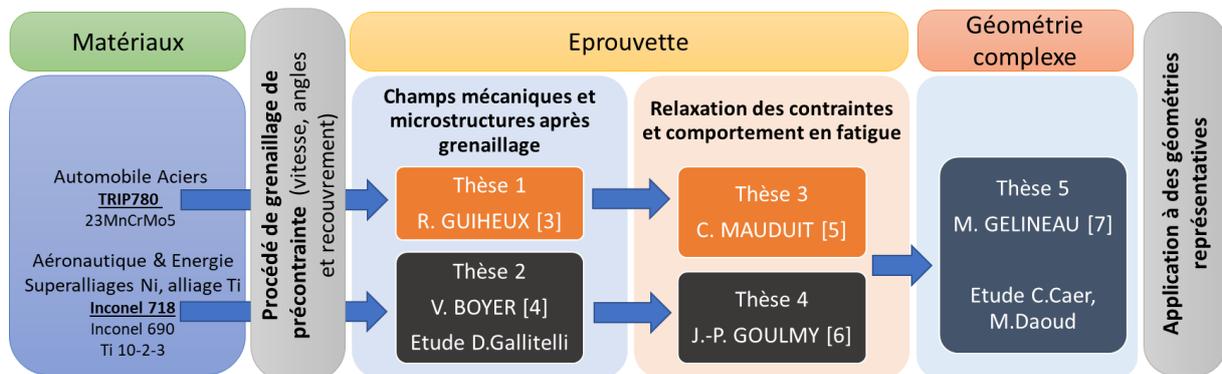


Figure 2. Déclinaison de l’organisation du projet autour des matériaux et domaines industriels.

Dans le même temps, l'impact du grenailage sur des composants à géométrie complexe (cylindre, forme concave, plaques plus ou moins épaisses ou partiellement masquées) a été investigué afin de mettre au point et valider les outils numériques permettant d'intégrer les champs de contraintes résiduelles induits par le grenailage et d'en établir également les limitations d'usage (Thèse 5 de M. Gélinau [7]). L'intérêt a été ici de développer un moyen de simulation permettant de déployer un profil de contraintes résiduelles obtenu sur MSI sur des géométries plus complexes, grâce à la simulation, afin par la suite d'établir un calcul de durée de vie (idéalement intégrant aussi la relaxation).

C'est ainsi cinq thèses [3-7] qui ont été achevées, accompagnées par de nombreux stages et trois post-docs. L'objectif du projet à terme est la mise à disposition d'outils et de méthodes numériques intégrant l'ensemble des étapes décrites précédemment afin d'introduire dès la phase de dimensionnement le grenailage de précontrainte tout en améliorant les calculs prédictifs de durée de vie en fatigue. Si le démarrage du projet a été fastidieux quant à l'organisation d'une certaine manière et étant donné la variété des applications, des domaines industriels, des matériaux considérés et des approches (parmi les premiers projets de l'IRT M2P), il n'en demeure pas moins qu'il a su rester ambitieux et a conduit à de très riches et nombreux résultats tant en matière d'outils numériques développés qu'en résultats expérimentaux (données physiques, essais et mesures).

L'objet de cette communication est de présenter des applications de la méthodologie mise en place. Un retour rapide sur les principaux résultats obtenus est présenté ci-après : modélisation du grenailage de précontrainte, introduction des contraintes résiduelles sur géométries complexes, évolution des champs mécaniques sous sollicitation cyclique et calcul de durée de vie.

2 Modélisation du grenailage de précontrainte

A partir des conditions habituelles du grenailage de précontrainte (intensité Almen, type de média projeté, pression de buse ou vitesse de turbine, temps de cycle, taux de recouvrement), l'analyse du jet de grenailage [8] et la quantification de sa distribution [9] ont permis d'établir des relations entre paramètres process et paramètres pour la simulation Eléments-Finis (EF) du grenailage. Ce dernier a été modélisé avec différentes stratégies afin d'estimer les contraintes résiduelles issues du procédé mais également d'en maîtriser les conditions (type de média, vitesse, débit et orientation de grenaille, taux de recouvrement).

Dans le cas de l'Inconel 718 DA, la nature stochastique du procédé a été considérée pour reproduire la variabilité du grenailage (distribution de la taille de grenaille, de la vitesse et de l'angle d'impact) avec l'utilisation d'une loi élasto-visco-plastique intégrée via une VUMAT sous ABAQUS [4,10]. La validation de la simulation EF multi-billes a été réalisée sur un grand nombre de configurations en comparant les profils de contraintes résiduelles numériques avec ceux mesurés par DRX (figure 3).

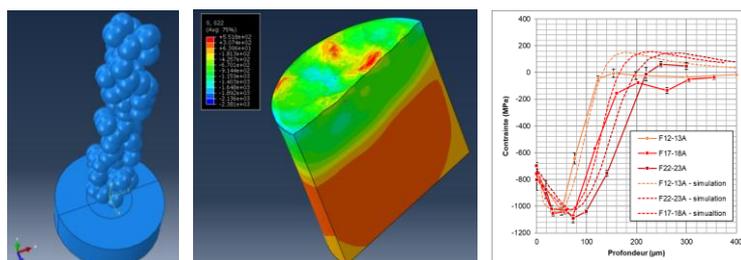


Figure 3. Modèle EF tridimensionnel du grenailage multi-billes et validation de l'Inconel 718 DA [4].

Une très bonne corrélation est obtenue sur les profils ainsi qu'une bonne estimation des profils de déformation plastique obtenus grâce à une méthode originale de calibration [11]. Cette modélisation permet d'étudier par exemple la variation de la vitesse de la grenaille sur le profil des contraintes résiduelles mais également tout autre variation des conditions de grenaillage.

S'agissant de l'acier TRIP780 (TRansformation Induced Plasticity, tôle d'épaisseur 2 mm), la modélisation EF du grenaillage est automatisée et considère la taille de grenaille, sa dureté, sa densité, sa vitesse ainsi qu'un nombre et un positionnement des billes pour assurer un taux de recouvrement défini sur MSI. Ce modèle s'appuie sur une loi spécifique reproduisant le comportement multi-phasé à transformation de phase austénite-martensite du TRIP780 intégrée également dans une VUMAT sous ABAQUS [12, 13, 14]. La simulation du grenaillage permet d'estimer très convenablement les contraintes résiduelles par confrontation avec les mesures DRX dans les phases (pseudo-)ferritiques et austénitiques ainsi que l'évolution du taux d'austénite post grenaillage dans la profondeur (figure 4).

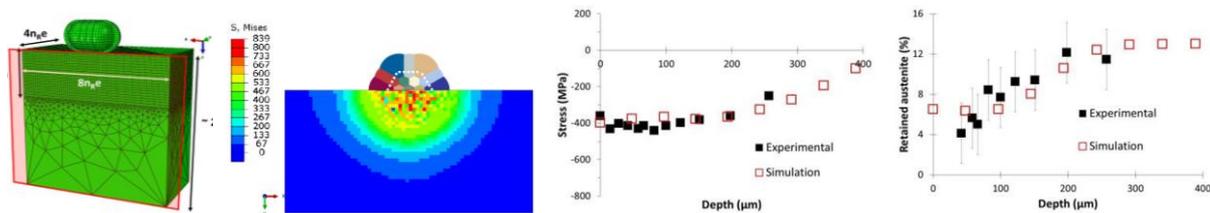


Figure 4. Modèle EF tridimensionnelle du grenaillage multi-billes et validation d'une tôle d'acier TRIP780 d'épaisseur 2 mm [3, 14].

Ces modèles permettent d'évaluer les champs mécaniques résiduels (contraintes, écrouissages) induits par le grenaillage de précontrainte en fonction des conditions du procédé, et de prédire, dans le cas des matériaux à transformation de phase, l'évolution des proportions de phases. Les données de sortie des modèles obtenues sur MSI (champs métallurgiques et mécaniques) sont ensuite appliquées à des géométries complexes en vue d'étudier leur évolution sous chargement cyclique et leur impact sur les durées de vie.

3 Contraintes résiduelles sur géométries complexes

Un fois l'acquisition et la validation des champs induits par la modélisation du grenaillage de précontrainte faites, il convient maintenant d'appliquer ceux-ci à des géométries complexes. Pour cela, il a été nécessaire de résoudre le problème d'équilibre mécanique, sous l'hypothèse de petites perturbations, basé sur la méthode des déformations libre de contraintes dite des "Eigenstrains". Déterminé sur MSI, l'introduction des profils de contraintes résiduelles sur n'importe quelles géométries a été réalisée par la méthode d'initialisation des contraintes sous ABAQUS entièrement automatisée à l'aide d'un programme PYTHON [15, 16]. Une base de données expérimentales a été établie sur Inconel 718 DA (analyses de contrainte résiduelles et déformées) avec une large palette de géométries élémentaires afin de valider l'outil numérique et d'en définir les limitations (figure 5).

L'outil a également été validé par comparaison avec la solution analytique d'une plaque plus ou moins épaisse ou avec des cas expérimentaux de grenaillage partiel de plaques en intégrant même les effets de l'usinage (fraisage) sur les contraintes résiduelles (amélioration de l'évaluation des déformées). Si le cas des plaques donne de bonnes corrélations, avec une limitation lorsque l'on s'approche d'une épaisseur de 2 mm (l'état de contrainte n'est alors plus biaxial, ce qui n'est pas retranscrit par la modélisation), des écarts plus conséquents sont observés sur les formes cylindriques et concaves.

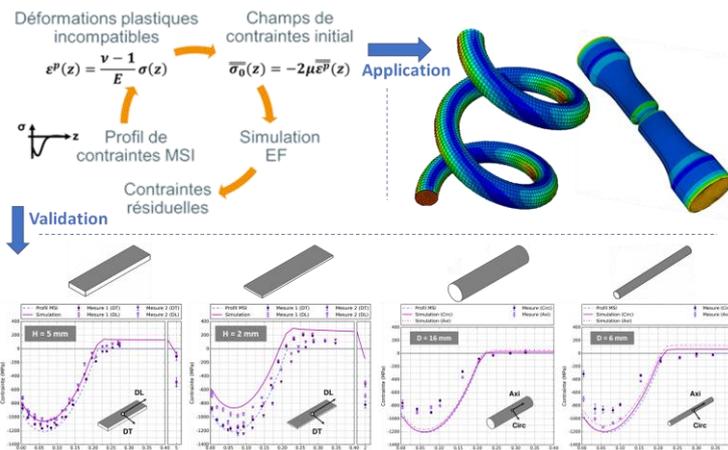


Figure 5. Introduction des contraintes résiduelles sur géométries complexes et validations [7].

Ces écarts peuvent s'expliquer par les effets d'angle d'incidence du jet de grenaille (donc la variabilité des conditions de grenailage) qui ne sont pas considérés par ce cadre de modélisation. Néanmoins il est possible sur une géométrie complexe de déployer des conditions de grenailage différentes, c'est-à-dire des profils de contraintes résiduelles représentatifs de ces conditions, et d'évaluer l'effet sur la distorsion dans le but de minimiser cette dernière. L'outil permet d'ores et déjà la réalisation du chaînage numérique depuis le grenailage de précontrainte jusqu'au calcul de durée de vie, certes sans considérer l'effet de relaxation des contraintes résiduelles sous chargement cyclique, ce qui constitue une première approche et une première illustration de l'ambition du projet Condor (exemple d'application à l'éprouvette jonc en TRIP780 à partir des propriétés de fatigue établies sur métal à plat, figure 6).

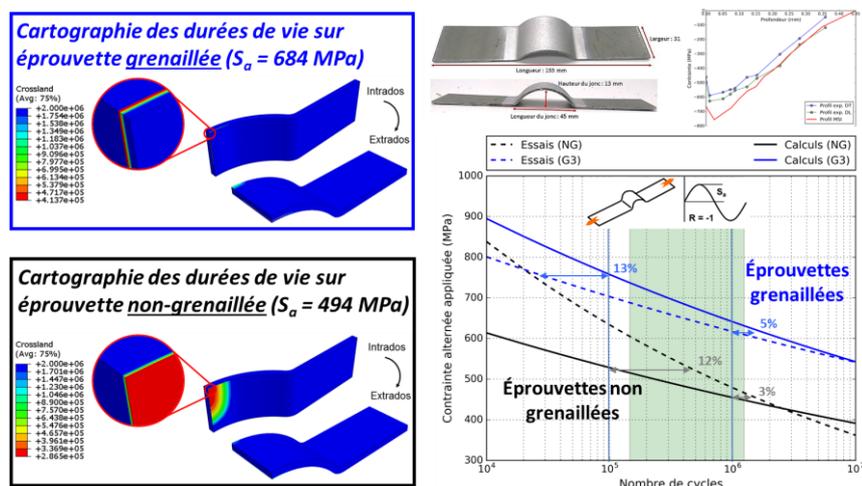


Figure 6. Exemple d'application d'un calcul de durée de vie sur géométrie complexe grenailée [7].

4 Evolution des contraintes sous sollicitation et durée de vie

Partant de la connaissance des champs de contraintes résiduelles issus du grenailage de précontrainte, les interactions entre le comportement des matériaux et les conditions de chargements cycliques (également en température s'agissant de l'Inconel 718 DA) doivent s'appuyer sur des lois de comportement appropriées pour rendre compte dans la simulation de la relaxation des contraintes. La connaissance des états mécaniques relaxés est nécessaire pour affiner encore la prédiction postérieure des durées de vie.

L'étude de l'Inconel 718 DA a montré une relaxation thermomécanique des contraintes et la prise en compte de l'écroissage issu du grenailage [11] dans la loi de comportement [17] améliore légèrement l'estimation de la relaxation sous chargement cyclique en proche surface (à l'ambiante ou à 550°C), mais celle-ci reste partielle du fait de la non prise en compte de la relaxation thermique (figure 7). S'agissant de la durée de vie, une approche probabiliste en volume a permis de tenir compte à la fois des effets de contrainte moyenne, d'échelle et d'entaille (gradient de contrainte). Le chaînage a été établi afin de calculer le cycle stabilisé relaxé servant au calcul de durée de vie.

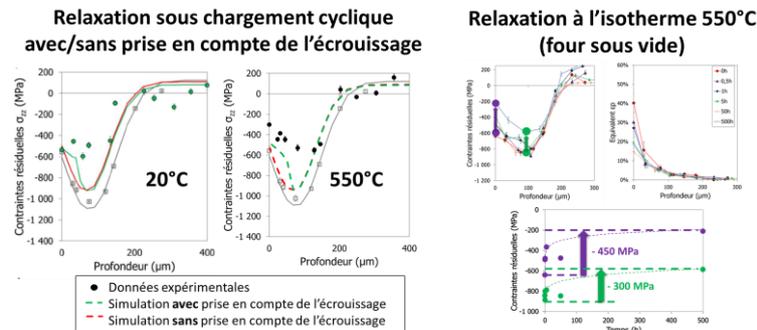


Figure 7. Relaxation thermomécanique des contraintes résiduelles dans l'Inconel 718 DA et simulation avec/sans prise en compte de l'écroissage issu du grenailage [6].

Un exemple de calcul de durée de vie, à partir des données de fatigue établies sur éprouvettes non grenillées et d'une condition de grenailage correspondant aux essais de fatigue conduits pour la validation sur des éprouvettes à entaille grenillées, est présenté en figure 8. Ont été introduits dans le calcul le profil des contraintes résiduelles, relaxé ou non, ainsi que la prise en compte ou non de l'écroissage dû au grenailage. Le résultat du calcul montre que la durée de vie estimée par le chaînage numérique est en relativement bon accord avec les essais expérimentaux mais aussi qu'elle semble influencée bien plus par la relaxation des contraintes que par l'écroissage.

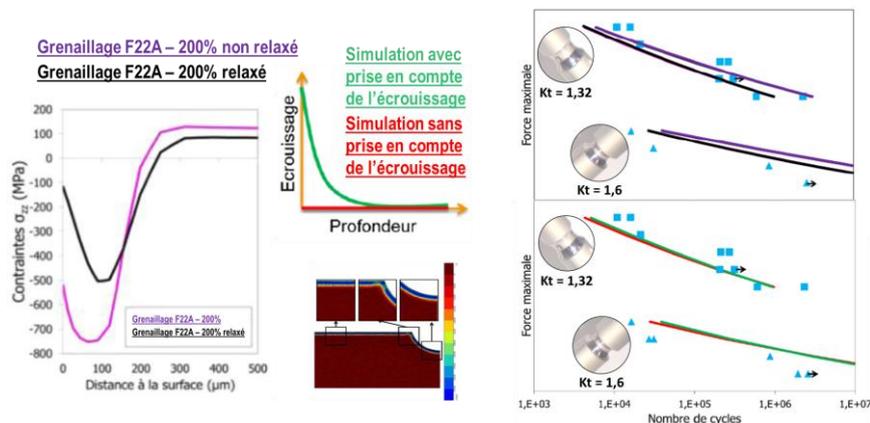


Figure 8. Exemple d'application de la méthodologie sur éprouvettes à K_t en Inconel 718 DA et confrontation avec l'expérience (rapport de charge $R = 0$ sur un cycle simulé) [6].

La relaxation du TRIP780 a été largement étudiée expérimentalement sur la base d'essais de fatigue en flexion alternée symétrique sur éprouvette d'épaisseur 2 mm [18]. Des lots d'éprouvettes (non-grenillés et grenillés selon deux conditions) ont été caractérisés en fatigue et en contraintes résiduelles (analyses DRX) à l'état initial, après 1 000, 10 000 cycles et à mi-durée de vie sur trois niveaux de chargement bien choisis entre environ 10^5 et 10^6 cycles. Les mesures montrent globalement (i) qu'il n'y a pas d'évolution notable des distributions d'austénite résiduelle à mi-durée de vie sous

l'effet du chargement cyclique, (ii) qu'il y a un élargissement initial des pics de diffraction en surface du fait de l'écroutissage après grenailage et (iii) que les pics de diffraction s'affinent avec l'augmentation du nombre de cycles, témoignant d'un réarrangement continu des structures de dislocations. Un exemple d'analyse sur la condition de grenailage G1 est donné figure 9. On observe une relaxation continue des contraintes résiduelles jusqu'à mi-durée de vie, plus importante en sous-couche qu'en surface pour les deux chargements à plus grande durée de vie. Enfin pour le chargement le plus fort (650 MPa / 100 000 cycles), la relaxation est conséquente dès les 1 000 premiers cycles. Les analyses ont montré que pour des conditions de grenailage moins intenses (grenailage G3), les contraintes résiduelles sont moins stables et se relaxent plus facilement, c'est-à-dire pour des niveaux de contrainte plus faibles.

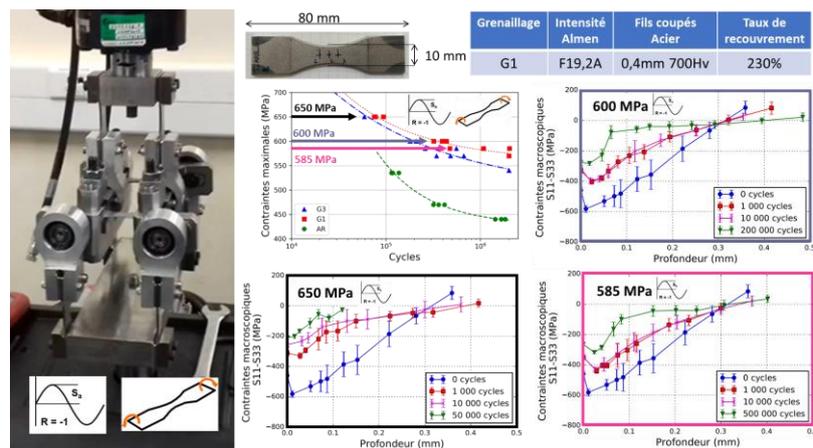


Figure 9. Evolution de la relaxation sous sollicitation cyclique de flexion du TRIP780 (tôle d'épaisseur 2 mm) pour la condition de grenailage G1 après 1 000, 10 000 cycles et à mi-durée de vie [5].

Une tentative de modélisation de la relaxation de l'acier TRIP780 sur la base d'une plasticité à changement de phase, identique à celle mise en œuvre pour la simulation du grenailage [14], conduit à une relaxation trop importante, notamment du fait de la difficulté de calibrer les paramètres d'écroutissage. L'utilisation d'une plasticité standard (isotrope ou cinématique) améliore l'estimation à la condition d'initialiser correctement les écroutissages pour chacune des profondeurs du modèle EF. Mais la relaxation est néanmoins moins bien estimée en surface, où l'effet du grenailage est le plus marqué.

5 Conclusion et perspectives : retour d'expérience

Comme cela a été présenté, de très nombreux outils numériques ont été développés et dans le meilleur des cas validés (simulation EF du grenailage avec lois de comportement adaptées, outils de transfert de champs sur géométrie complexe, étude des lois de comportement pour la relaxation...). Ces outils de simulation continuent d'évoluer et sont améliorés (stratégie de réduction des temps de calcul, exploitation des données de sorties, enrichissement des transferts de champs). Ces développements ont été possibles grâce à un large travail expérimental, alimentant à la fois la compréhension des mécanismes en jeu et la validation des modélisations proposées. L'ensemble constitue une base expérimentale conséquente et homogène sur les matériaux étudiés et pour différentes conditions de grenailage (caractérisations microstructurales, mesures DRX, essais comportementaux et de fatigue).

Une méthodologie a été présentée pour l'étude des effets du grenailage de précontrainte sur la durée de vie en application à des géométries complexes. Il n'en demeure pas moins que des obstacles

persistent et tous les verrous scientifiques n'ont pas été levés au cours de ces cinq dernières années. Le projet CONDOR a nécessité beaucoup de temps pour que les acteurs s'accordent sur la définition précise de ses objectifs, de son contenu et de la manière de décliner et articuler les phases, chacun s'attachant à établir les meilleurs choix en termes de matériaux et d'applications pour son domaine, en essayant de parler le même langage. Ces aléas font partie entière de la vie des projets et ne peuvent pas être anticipés. Le projet CONDOR a aussi eu une dimension humaine, réunissant et faisant collaborer des personnes issues de différents secteurs d'activités, industriels et universitaires, avec différentes approches et sensibilité, avec des départs et des arrivées. Ce fut aussi l'occasion pour cinq doctorants curieux de collaborer et d'échanger, entre eux et avec les partenaires académiques et industriels, autour de problématiques scientifiques aussi larges que diversifiées et enrichissantes. Enfin le projet CONDOR constitue un vrai réseau de partenaires avec des compétences propres et complémentaires sur le sujet.

Plusieurs stratégies ou modalités de chaînage numérique sont proposées avec un niveau de complexité croissant (figure 10), allant d'approches les plus simples destinées au bureau d'études jusqu'à celles à des fins d'expertise. Même si ces modalités ne sont pas toutes encore déclinées, les acquis permettent de les proposer et de commencer à les utiliser.

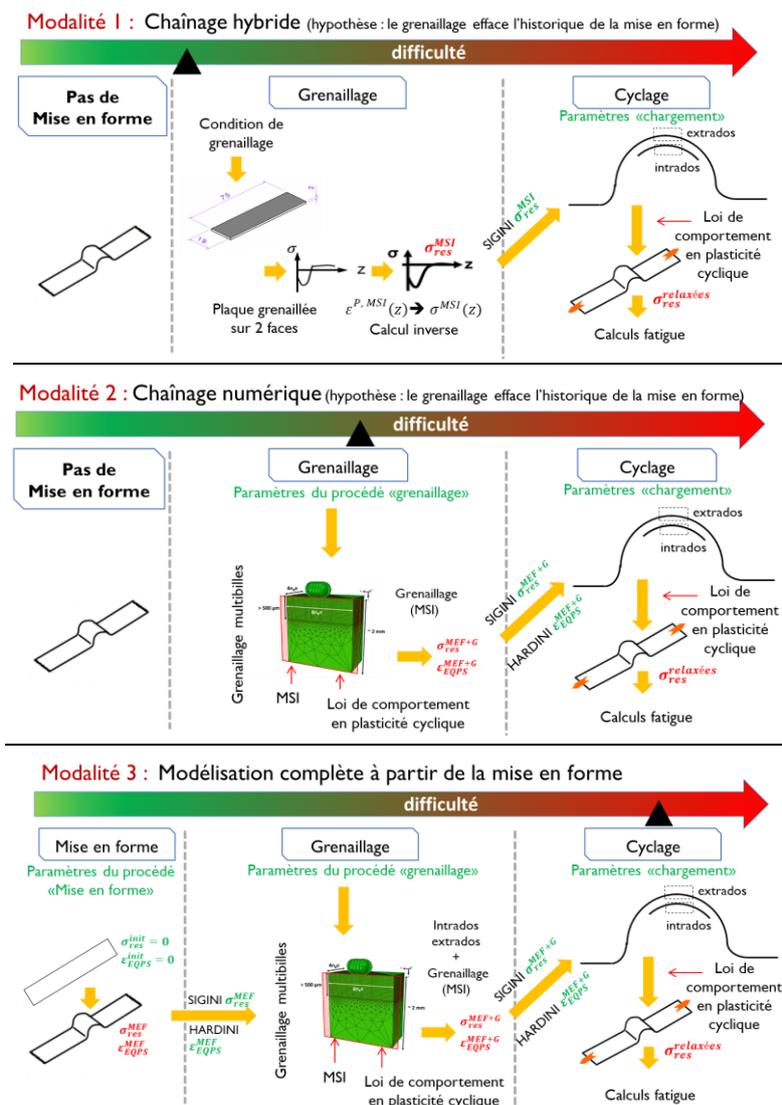


Figure 10. Stratégie des méthodologies possibles à degré de difficulté croissant.

Les principaux acquis sont :

- **la modélisation du grenailage multi-billes sur MSI,**
- **le transfert des champs de contraintes résiduelles sur des géométries complexes** afin d'étudier leur impact sur :
 - o la distorsion de composants,
 - o les chargements locaux pour établir des premiers calculs de durée de vie.
- **L'ensemble des résultats expérimentaux obtenus sur les différents matériaux** (superalliages à base Ni ou aciers) constituant une base de données conséquente de validation.

L'application des outils à un autre matériau d'intérêt pour les industriels (Ti 10-2-3 par exemple) permettra de valider la méthodologie.

Les principaux points d'amélioration constituant autant de perspectives, sans degré de hiérarchisation, sont :

- la professionnalisation des outils et du chaînage numériques,
- **la création d'abaques numériques** permettant d'obtenir immédiatement les contraintes résiduelles induites en fonction des conditions de grenailage (en cours d'étude),
- les effets d'histoire liés aux séquences de grenailage et l'impact sur les contraintes et la distorsion (possiblement en lien avec des détails géométriques particuliers),
- la mesure complète des contraintes résiduelles sur des géométries particulières à des fins de validation (mesures par rayonnement synchrotron),
- **la modélisation appropriée des effets de relaxation** mécanique ou thermomécanique qui engendre une complexification importante de la démarche et s'avère être le verrou scientifique le plus délicat,
- l'adéquation des critères de fatigue ou leur évolution en lien avec les modifications microstructurales des matériaux dans la zone de déformation plastique en sous surface,
- **la prise en compte de la micro-géométrie de surface** qui affecte aussi les contraintes en surface sous chargement de fatigue (cas des prédictions d'initiation de la fatigue en profondeur alors que l'essai désigne la surface).

Remerciements

Les auteurs souhaitent chaleureusement remercier les principaux acteurs et l'ensemble des personnes ayant contribué de près ou de loin au projet CONDOR : Q. Puydt, R. Guiheux, C. Mauduit, V. Boyer, J.-P. Goulmy, M. Gelineau, P. Rouyer, M. Monin, S. Berveiller, D. Bouscaud, L. Barrallier, E. Rouhaud, D. Retraint, P. Kanoute, S. Kruch, E. Patoor, C. Caer, M. Daoud, D. Gallitelli, A. Brosse, C. Moriconi, V. Robin, A. Hazotte, L. Toulbi, Q. Pujol, A. Seror, A. Longuet, J. Thuries, J. Lardinois, F. Chassard, R. Billardon, J.-M. Jachmich, R. Munier, F.-X. Hoche, F. Lecuyer, T. Billot, N. Guillemot, M. Taillandier.

Références

- [1] R. Kubler, R. Guiheux, C. Mauduit, S. Berveiller, D. Bouscaud, L. Barrallier, E. Patoor, B. Weber, Grenailage de précontrainte de l'acier TRIP780 - Etude des champs mécaniques et évolutions des couches grenillées jusqu'à rupture en fatigue, Matériaux 2018, Strasbourg, France, 2018
- [2] J. Badreddine, V. Boyer, J.-P. Goulmy, M. Gelineau, E. Rouhaud, D. Retraint, P. Kanoute, S. Kruch, R. Kubler, L. Barrallier, Q. Puydt, P. Lamesle, P. Renaud, Le grenailage dans l'ère de l'industrie 4.0 - Etat des lieux et perspectives, Matériaux 2018, Strasbourg, France, 2018

- [3] Romain Guiheux, Comportement d'aciers à transformation de phase austénite-martensite pour la simulation du grenailage de précontrainte, Thèse, ENSAM, 2016
- [4] Vincent Boyer, Modélisation du grenailage d'un alliage de nickel avec prise en compte de l'érouissage et de la microstructure, Thèse, UTT, 2017
- [5] Clément Mauduit, Evolution des couches grenillées sous sollicitations mécaniques de l'acier TRIP780 - Etude de la relaxation des contraintes et de la durée de vie en fatigue, Thèse, ENSAM, 2018
- [6] Jean-Patrick Goulmy, Modélisation de l'impact du grenailage sur le comportement et l'endommagement en fatigue de l'Inconel 718, Thèse, UTT, 2017
- [7] Maxime Gelineau, Étude de l'impact du grenailage sur des composants mécaniques industriels à géométrie complexe, Thèse, ENSAM, 2018
- [8] R. Kubler, R. Rotinat, J. Badreddine and Q. Puydt, Analysis of Shot Peening Blast by Particle Tracking and Digital Image Correlation, 13th International Conference on Shot Peening (ICSP-13), Montreal, Canada, 2017, 166-71
- [9] J. Badreddine, C. Ernould, E. Guenier, Q. Puydt and A. Hazotte, A New Method to Quantify the Heterogeneity of a Shot Stream - Coverage and Indent Distribution, 13th International Conference on Shot Peening (ICSP-13), Montreal, Canada, 2017, 24-28
- [10] V. Boyer, J.-P. Goulmy, E. Rouhaud and D. Reirant, A Finite Element Model for Simulation of Shot-Peening, 13th International Conference on Shot Peening (ICSP-13), Montreal, Canada, 2017, 340-343
- [11] J.-P. Goulmy, V. Boyer, L. Toualbi, P. Kanoute, S. Kruch, D. Reirant and E. Rouhaud, Assessment of Shot-Peening on Fatigue Life of Inconel 718 Turbine Disk, 13th International Conference on Shot Peening (ICSP-13), Montreal, Canada, 2017, 87-91
- [12] R. Guiheux, S. Berveiller, D. Bouscaud, R. Kubler, E. Patoor and Q. Puydt, Effect of Shot Peening on Microstructure of Steels Exhibiting a TRIP Effect - Experimental and Modeling Approaches, 12th International Conference on the Mechanical Behavior of Materials (ICM12), 10-14th May 2015, Karlsruhe, Germany, 2015
- [13] R. Guiheux, S. Berveiller, R. Kubler, D. Bouscaud, E. Patoor, Q. Puydt, P. Osmond and B. Weber, Shot Peening Analysis on TRIP780 Steel Exhibiting Martensitic Transformation, 13th International Conference on Shot Peening (ICSP-13), Montreal, Canada, 2017, 329-334
- [14] R. Kubler, S. Berveiller, D. Bouscaud, R. Guiheux, E. Patoor, Q. Puydt, Shot peening of TRIP780 steel: Experimental analysis and numerical simulation, Journal of Materials Processing Technology, vol. 270, 2019, 182-194
- [15] M. Gelineau, Y. Colaitis, E. Rouhaud, R. Kubler, L. Barrallier and F. Château, Modélisation Des Contraintes Résiduelles de Grenailage Dans Les Pièces à Géométrie Complexe, 22^{ème} Congrès Français de Mécanique (CFM2015), Lyon, France, 2015
- [16] M. Gelineau, L. Barrallier, E. Rouhaud, R. Kubler, Q. Puydt, J. Badreddine, C. Mauduit and B. Weber, Residual Stress Field Prediction and Fatigue Post Processing for Shot Peened Mechanical Parts with Complex Geometry, 13th International Conference on Shot Peening (ICSP-13), Montreal, Canada, 2017, 324-328
- [17] L. Toualbi, P. Kanouté, S. Kruch, J.-P. Goulmy, A. Seror and A. Longuet, Modélisation Multi-échelle de l'Inconel 718 - Relation Microstructure Comportement, Journées de Printemps de la Commission Fatigue de la SF2M, Paris, France, 2015
- [18] C. Mauduit, R. Kubler, L. Barrallier, S. Berveiller, Q. Puydt, M. Monin, B. Weber, Analysis of Residual Stress Relaxation Under Mechanical Cyclic Loading of Shot-Peened TRIP780 Steel Until Fatigue Lifetime, 13th International Conference on Shot Peening (ICSP-13), Montreal, Canada, 2017, 172-177