



Science Arts & Métiers (SAM)

is an open access repository that collects the work of Arts et Métiers Institute of Technology researchers and makes it freely available over the web where possible.

This is an author-deposited version published in: <https://sam.ensam.eu>
Handle ID: <http://hdl.handle.net/10985/11384>

To cite this version :

Benjamin GERIN, Catherine VERDU, Alain MARY, Franck MOREL, Etienne PESSARD - Effet bénéfique de l'extrusion à froid sur la tenue en fatigue de pièces automobiles - Revue Forge et Fonderie - Vol. 2016, n°5, p.6-11 - 2016

Any correspondence concerning this service should be sent to the repository

Administrator : scienceouverte@ensam.eu



Effet bénéfique de l'extrusion à froid sur la tenue en fatigue de pièces automobiles

B. Gerin, E. Pessard, F. Morel, C. Verdu, A. Mary

^a LAMPA, Arts et Métiers ParisTech Angers, 2Bd du Ronceray, 49035 Angers

^b MATEIS, INSA de Lyon, Bâtiment St Exupery, 20av. Jean Capelle, 69621 Villeurbanne

^c Gevelot Extrusion, 92 rue Saint-Melaine CS 70409, 53004 Laval

Dans son action continue de la promotion des avantages de la pièce forgée, la commission AFF/Cetim des métiers de la forge a apporté un soutien financier permettant la réalisation du projet ANR DEFISURF dont l'objectif est d'étudier l'effet des états de surfaces sur les propriétés mécaniques des pièces forgées notamment en fatigue. L'étude de différents états de surface a été découpée selon des états polis, brut ou grenailés pour les pièces forgées à chaud, et selon le taux de réduction pour les pièces extrudées à froid. Les résultats pour la forge à froid sont présentés dans cet article.

Introduction :

La déformation introduite dans le matériau par les procédés de forgeage à froid peut être considérée comme un type de pré-déformation, appliquée avant l'utilisation en fonctionnement du composant. Cette déformation modifie le matériau, en introduisant écrouissage et contraintes résiduelles. Les caractéristiques mécaniques du matériau en sont donc modifiées, ainsi que la dureté et la microstructure. De plus, la surface du matériau est affectée, l'extrusion permet d'obtenir par exemple un très bon état de surface ($R_a = 0,1$ à $0,5\mu m$) [Caminaga et al., 2007]. Les modifications que subit le matériau dépendent des conditions de forgeage : taux de corroyage, forme de la matrice, type de lubrification...

Le pivot de direction présenté en figure 1 est un exemple de pièce extrudée à froid. Seules les zones fonctionnelles du composant ont été usinées (gorges, rotule...), le reste de sa surface a été laissée brut de forge. Le composant présente plusieurs réductions de sections consécutives. Ces réductions de section témoignent des différents niveaux de prédéformation introduits lors de la mise en forme. Les caractéristiques mécaniques et la tenue en fatigue dépendent de l'intensité de cette prédéformation, et donc de la réduction de section (aussi appelé taux de corroyage).



Figure 1 : Exemple d'un composant forgé à froid montrant de multiples réductions de sections successives. Crédit photo : Société Gévelot Extrusion.

L'objectif de ces travaux est donc de développer une approche globale capable de prendre en compte l'effet de la prédéformation introduite par les opérations de mise en forme sur le comportement en fatigue de pièces forgées à froid.

Cette étude fait partie d'un projet ANR plus large intitulé DEFISURF qui fédère partenaires industriels et académiques autour d'un objectif commun : prendre en compte l'effet des modifications de l'intégrité de surface sur la tenue en fatigue de composants forgés à chaud et à froid.

Fabrication des éprouvettes extrudées:

Pour réaliser l'étude, des éprouvettes représentatives des composants forgés par extrusion à froid ont été fabriquées par la société Gévelot Extrusion. Les éprouvettes sont issues de l'extrusion à froid d'un barreau d'acier 27MnCr5, donnant lieu à une réduction de la section après forgeage (corroyage). Pour étudier l'influence de cette prédéformation, deux taux de corroyage ont été choisis, représentant les deux extrêmes appliqués en forge à froid au sein de la société Gévelot Extrusion. Les taux de corroyage limites usuels sont respectivement 18% (minimum) et 75% (maximum). Les deux lots sont extrudés de barres avec des diamètres initiaux différents (15 et 27.4 mm) pour donner des éprouvettes avec le même diamètre final de 13.55 mm. Les deux lots forgés seront appelés faiblement corroyé (18%) et fortement corroyé (75%), et le matériau initial sera appelé avant forgeage. Comme en condition industrielles, le matériau a subi un recuit avant forgeage pour améliorer sa ductilité.



Figure 2 : Lopin et l'éprouvette forgée, pour les deux lots. A gauche : 75% de réduction de section. A droite : 18% de réduction de section. Les têtes des éprouvettes n'ont pas encore été usinées. Crédit photo : Société Gévelot Extrusion.

Simulation numérique:

La simulation de l'extrusion a été effectuée avec le logiciel de simulation numérique par éléments finis Forge2011®. Le premier objectif est de comparer l'hétérogénéité de la déformation plastique introduite durant le forgeage obtenues expérimentalement et prédite numériquement. Le deuxième objectif est de montrer que la simulation permet de prédire certaines propriétés matériau après forgeage, comme par exemple la dureté. Une représentation 3D de la simulation du procédé est donnée en figure 4. Le comportement du lopin est modélisé via une loi elasto-visco-thermo-plastique d'Hansel & Spittel qui s'écrit :

$$\sigma = A e^{m_1 T} \varepsilon^{m_2} e^{\frac{m_4}{\varepsilon}} \dot{\varepsilon}^{m_3}$$

Où les coefficients m_1 (sensibilité à la température) et m_3 (sensibilité à la vitesse de déformation) sont fixés à des valeurs classiques pour les aciers. Les coefficients A , m_2 et m_4 ont été déterminés expérimentalement par des essais de compression à faible vitesse. Le tableau 1 liste les valeurs des différents coefficients de la loi de comportement.

Coefficient	A	m_1	m_2	m_3	m_4
Valeur	1010	-0.0009	0.138	0.00988	-0.005

Tableau 1 : Coefficients pour la loi matériau du 27MnCr5 utilisée dans les simulations

L'outillage est considéré comme rigide. Le frottement à chaque interface est modélisé par une loi Coulomb limitée Tresca, avec les paramètres $\nu = 0,03$ et $m = 0,07$. Ces valeurs sont classiques pour le savonnage au phosphate de zinc utilisé dans le forgeage à froid des aciers [Gariety et al., 2007]. Les résultats des simulations sont donnés en figure 4. La simulation prédit correctement la géométrie des éprouvettes, en particulier la partie bombée en bout d'éprouvette pour le lot fortement corroyé (figure 3).

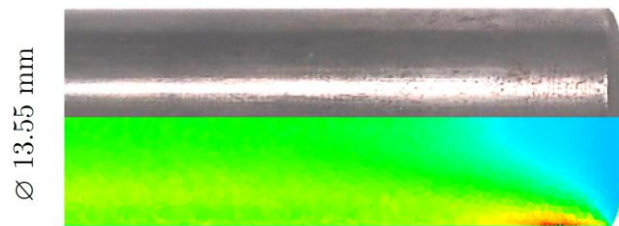


Figure 3 : Comparaison de géométrie entre la simulation et la pièce réelle pour une éprouvette du lot 75% de réduction de section.

La déformation plastique équivalente de Von Mises est assez homogène pour les deux lots, allant de 0.2 à 0.4 pour le faiblement corroyé et de 1.4 à 1.7 pour le fortement corroyé. Pour les deux éprouvettes, la déformation plastique est plus faible à cœur et plus élevée en surface.

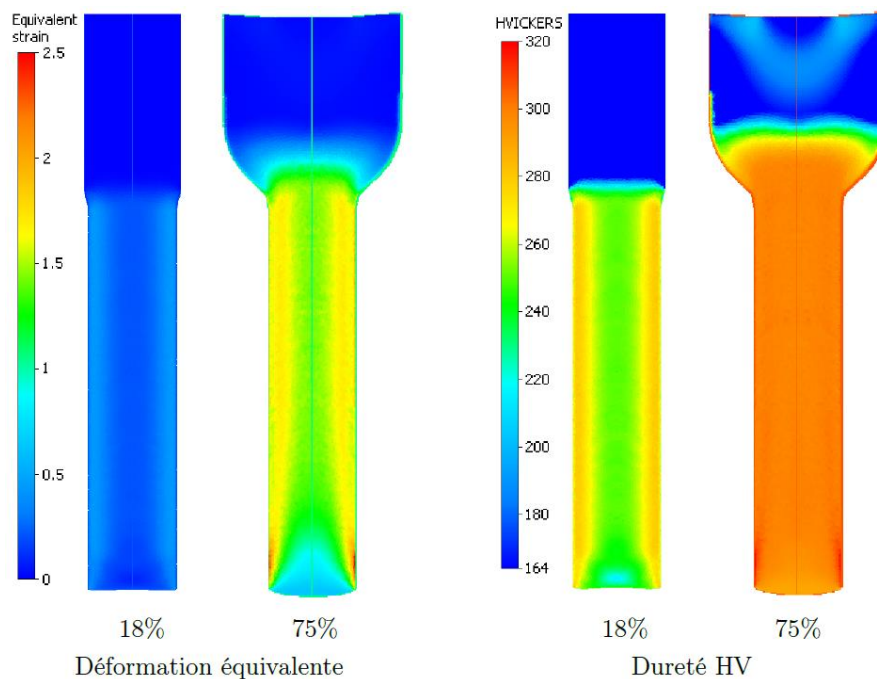


Figure 4 : Simulations EF du procédé de forgeage, montrant en coupe la déformation plastique équivalente et la dureté. Les parties supérieures des éprouvettes ne sont pas extrudées, montrant les deux différentes réductions de section.

Pour prédire la dureté finale du matériau déformé, le logiciel Forge2011® utilise une loi empirique [Tabor, 1956] reliant la dureté Vickers à la contrainte équivalente de Von Mises maximale vu par le matériau lors de l'opération de mise en forme :

$$HV = \text{Max} \left(\frac{\sigma_{VMeq}}{3} \right)$$

Les simulations montrent que la dureté des éprouvettes forgées suivent la même tendance que la plasticité, avec pour l'éprouvette faiblement corroyée un gradient allant de 250 HV à cœur à 275 HV en surface. Pour le fortement corroyée, la dureté est très homogène, à 300 HV.

Microstructure et comportement monotone:

Pour quantifier les effets du forgeage, des essais de traction monotone ont été effectués sur le matériau, avant et après forgeage.

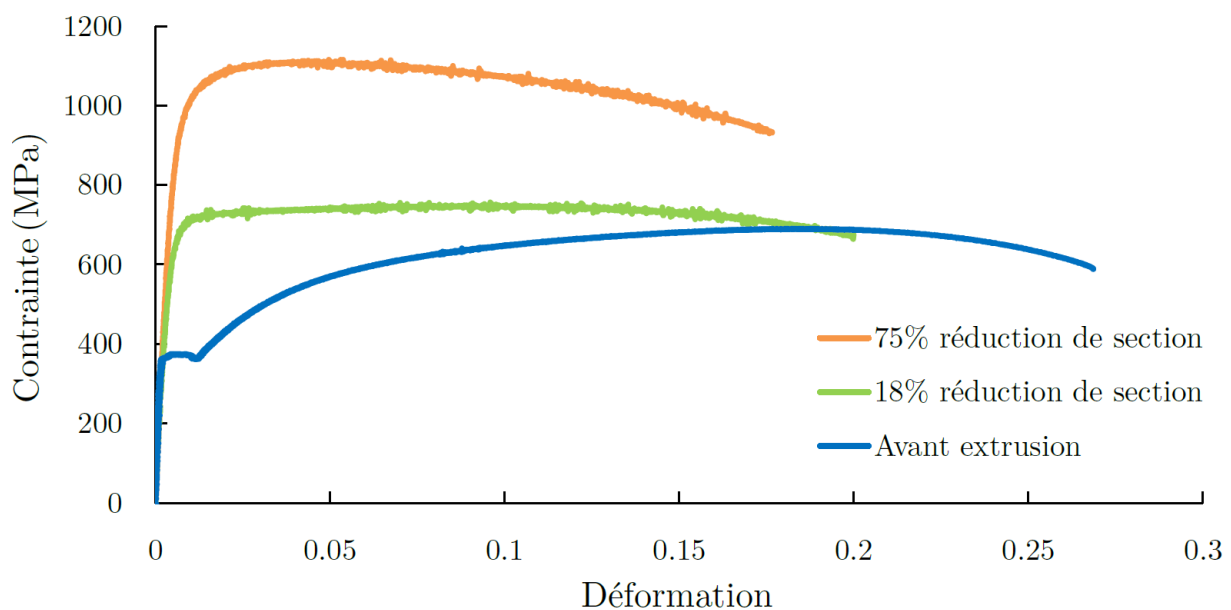


Figure 5 : Courbes de traction monotone pour les éprouvettes, avant et après forgeage à froid.

Les caractéristiques mécaniques augmentent nettement avec l'intensité de la prédéformation introduite lors de l'extrusion, notamment la limite d'élasticité qui est plus que doublée dans le cas du lot fortement corroyé. La figure 6 montre les profils de dureté le long d'un diamètre pour les trois lots. La dureté est quasiment constante le long de l'épaisseur des pièces extrudées et augmente avec l'intensité de la prédéformation. Le lot fortement corroyé a une dureté 75% plus grande par rapport à l'état initial. Les valeurs de duretés mesurées expérimentalement sont très proches de celles prédites par simulation numérique (figure 4).

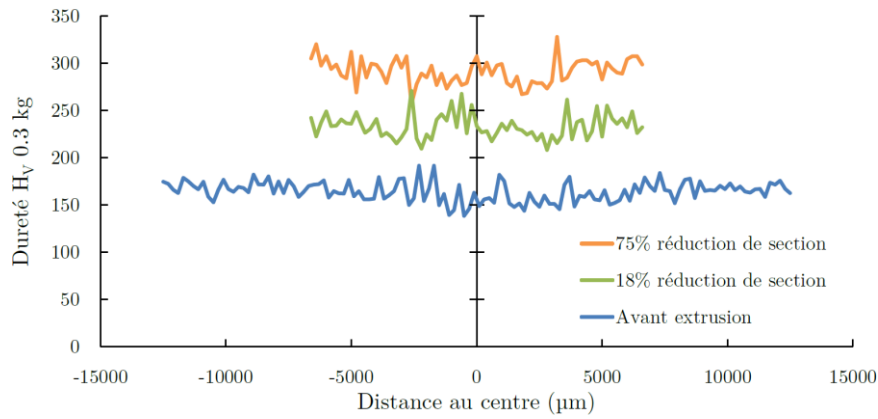


Figure 6 : profils de microdureté HV 0.3 kg, mesurés dans la direction transverse, le long d'un diamètre (le centre est au milieu des courbes).

L'impact de l'écouissage est également visible sur la microstructure (figure 7). Les éprouvettes présentent des bandes de ferrite (gris) et de perlite (blanc), générées lors du laminage à chaud des barres. L'alternance de ces bandes permet d'expliquer les variations de dureté observées sur les profils (figure 6), la perlite étant plus dure que la ferrite. Pour l'éprouvette faiblement corroyée, la microstructure est visuellement similaire à celle avant forgeage, c'est à dire qu'elle montre des bandes de ferrite et de perlite. Ces bandes ayant une largeur moyenne de 20 μm . Cependant, pour le lot fortement corroyé, la microstructure est complètement modifiée. Les grains ont été étirés dans la direction de forgeage et les bandes de ferrite et perlite sont beaucoup plus fines, avec une largeur moyenne de 10 μm (figure 7).

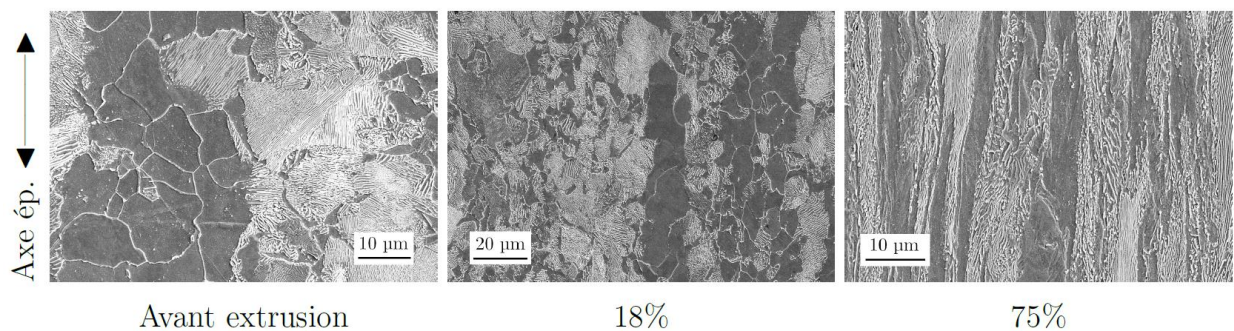


Figure 7 : Images MEB en coupe dans la direction longue des éprouvettes, près du bord

L'analyse EBSD permet d'identifier plus précisément la morphologie des grains, et donne aussi accès à leur orientation. La figure 8 montre des cartographies EBSD des deux lots extrudés pour une coupe longitudinale. Alors que la microstructure du lot 18% de réduction de section ne montre pas de déformation liée à l'extrusion, les grains du lot 75% sont visiblement allongés dans la direction d'extrusion.

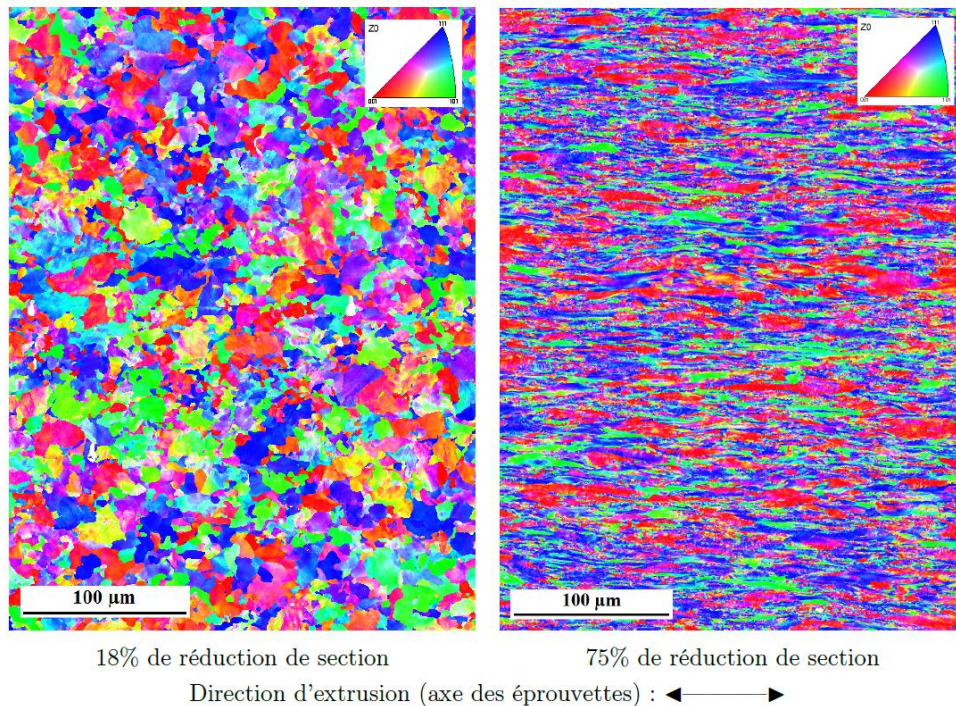


Figure 8 : Cartographies IPF obtenues par EBSD à cœur dans la direction longitudinale.

Contraintes résiduelles:

Le procédé de forgeage à froid introduit également des contraintes résiduelles dans le matériau. Dans les deux lots, les contraintes résiduelles sont toujours compressives en surface, mais passent de compression ($\sigma_{res}=-100\text{MPa}$) à la traction à partir de 50 μm de profondeur pour les éprouvettes faiblement corroyées. Pour les éprouvettes fortement corroyées, les contraintes résiduelles restent compressives ($\sigma_{res}=-200\text{MPa}$) sur une épaisseur importante (supérieure à 1mm), ce qui suggère également un effet bénéfique sur le comportement en fatigue.

Etat de surface:

Après l'opération de préparation de la surface, les stries d'usinage sont encore clairement visibles avant forgeage (figure 9). Ces stries sont perpendiculaires à l'axe de l'éprouvette, car issues du tournage pour obtenir le diamètre initial voulu. Les mesures obtenues montrent que la rugosité chute avec l'intensité du corroyage imposé. Les stries d'usinage sont toujours visibles sur la surface du lot faiblement corroyé et ont complètement disparues pour le lot fortement corroyé. L'extrusion à froid améliore donc nettement la rugosité, en lissant la topographie de surface présente initialement sur le lopin.

Etat de surface	Ra et écart-type (μm)	Rz (μm)	Sa (μm)	Sz (μm)
Avant forgeage	2,44 $\pm$ 0,73	19,22	2,68	34,14
Faiblement corroyé	0,81 $\pm$ 0,20	5,63	0,89	12,12
Fortement corroyé	0,2 $\pm$ 0,03	2,33	0,25	6,22

Tableau 2 : Rugosité dans le sens long pour les 3 lots étudiés.

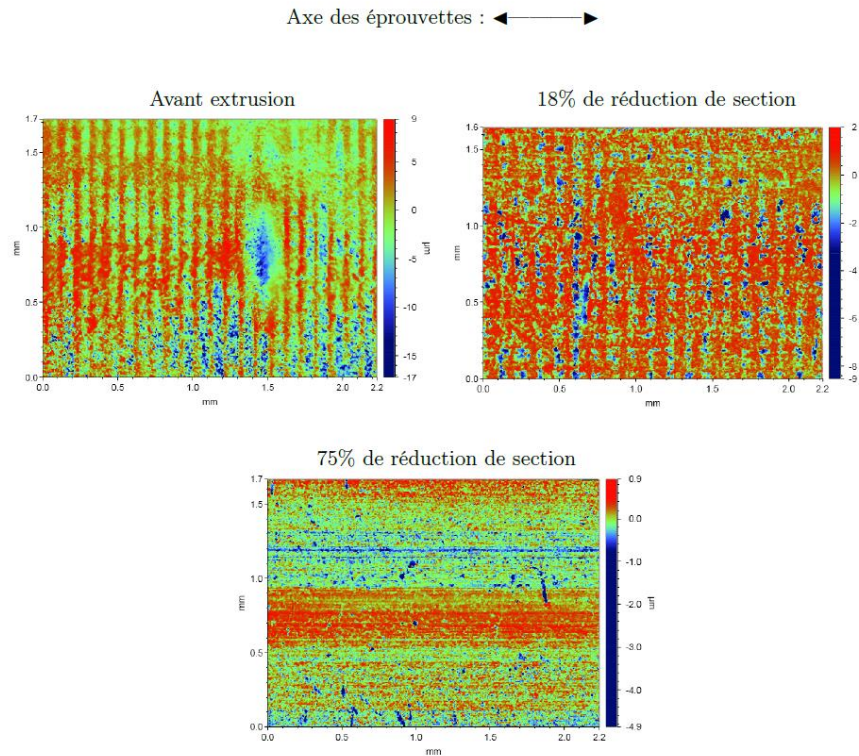


Figure 9 : Topographie de surface pour les trois lots. Un profil selon l'axe des éprouvettes est donné pour chaque scan.

Comportement en fatigue:

La limite d'endurance à grand nombre de cycles ($N=2 \cdot 10^6$ cycles) a été caractérisée en traction-compression, en torsion purement alternée et en flexion en conservant la surface brute de l'éprouvette forgée. Pour chaque lot la méthode stair-case a été suivie avec un minimum de 10 éprouvettes par lot.

En traction compression et en torsion purement alternées, la prédéformation imposée en extrusion permet d'écrouir le matériau et donc d'augmenter sa dureté ainsi que la tenue en fatigue. La figure 10 montre que les limites d'endurance augmentent linéairement avec la dureté. On retrouve ici l'expression de la limite d'endurance en traction-compression proposée par Garwood en 1951 [Garwood 1951] : $\sigma_D = 1.5HV$

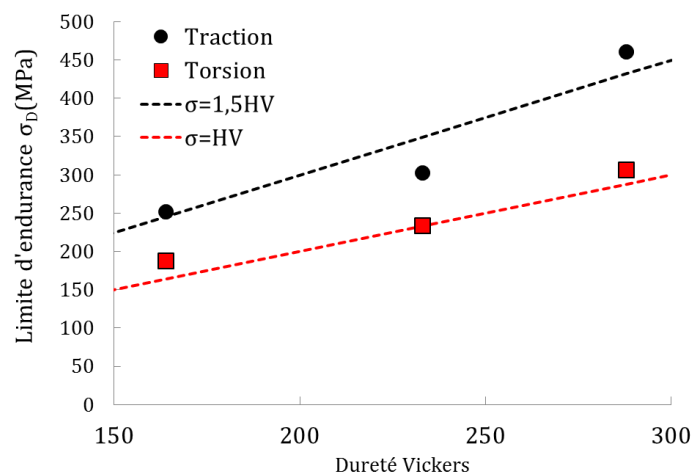


Figure 10 : Evolution de la limite d'endurance en traction-compression et en torsion en fonction de la dureté.

Pour prendre en compte l'ensemble des différents types de chargement, les résultats des essais de fatigue peuvent être représentés dans un diagramme de Dang Van [Dang Van, 1993].

Cette approche définit un critère en fatigue multiaxiale et permet de prendre en compte les contraintes résiduelles. Dans le cas d'un chargement proportionnel, Le critère de Dang Van s'écrit comme suit :

$$\tau_a + \alpha \sigma_{Hmax} \leq \beta$$

Où τ_a est l'amplitude de la contrainte de cisaillement et σ_{Hmax} est la contrainte hydrostatique maximale, avec α et β des paramètres matériau.

La contrainte hydrostatique σ_H peut être décomposée en amplitude, moyenne et contrainte résiduelle :

$$\sigma_H = \sigma_{H\text{ Amplitude}} + \sigma_{H\text{ Moyenne}} + \sigma_{H\text{ Résiduelle}}$$

Il est donc simple de prendre en compte les contraintes résiduelles avec le critère de Dang Van. Le critère de Dang-Van peut être représenté graphiquement dans digramme avec σ_H en abscisse et τ_a en ordonnée, où le critère définit une droite de pente α qui représente la contrainte maximale acceptable en fatigue. Si le trajet de chargement dépasse cette droite, il y a amorçage d'une fissure. La figure 12 montre le modèle de Dang Van appliqué à deux chargements proportionnels, ainsi que l'influence des contraintes résiduelles compressives.

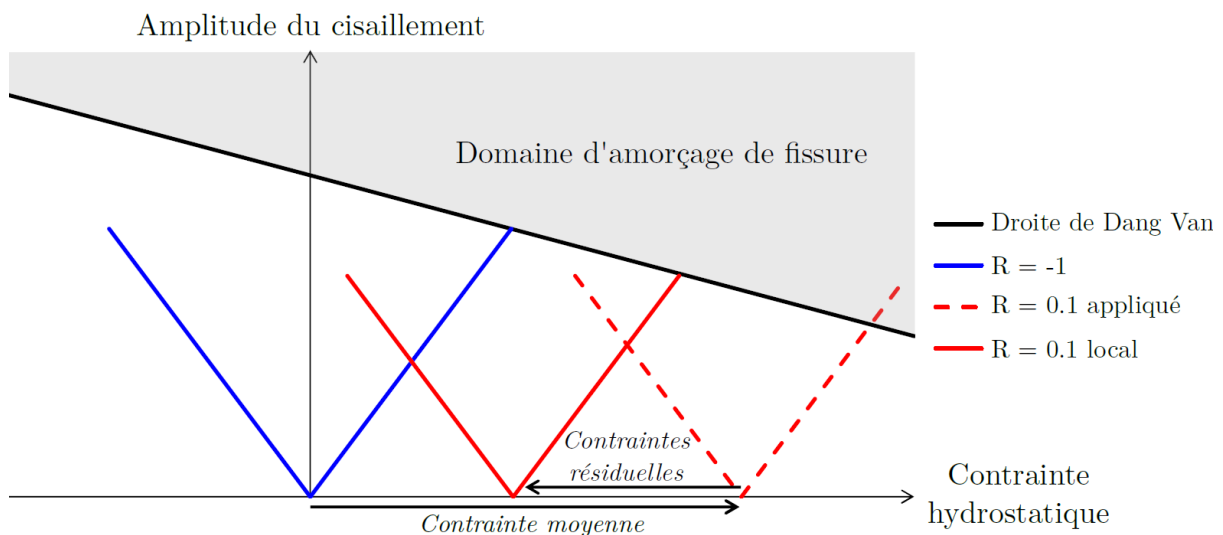


Figure12 : Digramme de Dang Van montrant les trajets de chargement uniaxiaux en $R = -1$ et $R = 0,1$ et avec contraintes résiduelles compressives

Le diagramme de Dang Van récapitulant l'ensemble des données en fatigue est présenté sur la figure 13, où par souci de clarté, chaque trajet de chargement n'est représenté que par son point le plus critique dans le temps. Ce diagramme permet d'illustrer l'augmentation de la taille du domaine d'utilisation avec le niveau de déformation plastique imposé par le procédé. Il montre également que l'état de surface des deux lots corroyés n'a pas d'effet sur la tenue en fatigue. En effet, après soustraction des contraintes résiduelles du lot testé en flexion possédant une surface brut, la limite d'endurance est très proche du lot poli sollicité en traction-compression.

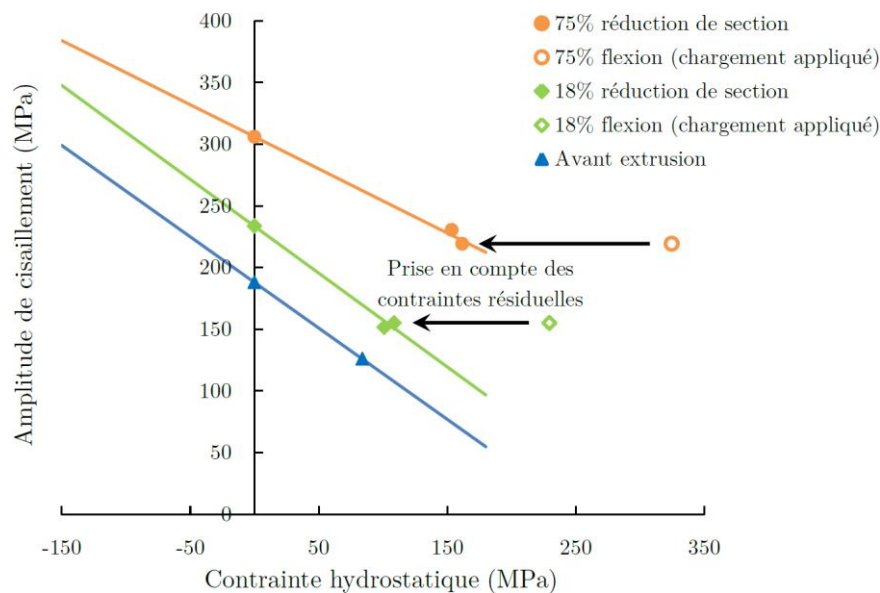


Figure13 : Diagramme de Dang Van bilan des résultats d'essais de fatigue.

Conclusion:

En conclusion, l'érouissage introduit par l'extrusion à froid permet d'améliorer considérablement la rugosité ainsi que les tenues monotone (R_m) et en fatigue du composant. La simulation du procédé permet également de prédire efficacement certaines évolutions du matériau comme l'augmentation de la dureté par déformation plastique.

L'utilisation de critère en fatigue intégrant les effets du procédé sur le matériau permet maintenant le développement de chaînes numériques globales. Les résultats issus de la simulation numérique du procédé sont alors intégrés à la simulation de dimensionnement afin de prendre en compte entre autre l'hétérogénéité de comportement de la pièce.

Remerciement :

Ces travaux ont été réalisés au sein du projet ANR DEFISURF dans le cadre d'un partenariat entre industriels (Ascometal, Cetim, Renault, Transvalor, Atelier des Janves, Gévelot Extrusion) et universitaires (INSA Lyon MATEIS, ENSMP-CEMEF, Arts et Métiers Paris-Tech LAMPA).

Références :

- [Caminaga et al., 2007] Caminaga, C., Neves, F. O., Gentile, F. C., & Button, S. T. (2007). Study of alternative lubricants to the cold extrusion of steel shafts. *Journal of Materials Processing Technology*, 182(1–3), 432 – 439.
- [Gariety et al., 2007]. Gariety, M., Ngaile, G., & Altan, T. (2007). Evaluation of new cold forging lubricants without zinc phosphate precoat. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 47(3–4), 673 – 681.
- [Tabor, 1956] Tabor, D. (1956). The physical meaning of indentation and scratch hardness. *British Journal of Applied Physics*, 7(5), 159–166.
- [Garwood, 1951]. Garwood MF, Gensamer M, Zurburg HH, Burwell JT, Erickson MA, La Que FL. Interpretation of tests and correlation with service. American Society for Metals; 1951.
- [Dang Van, 1993]. Dang Van, K. (1993). Macro-micro approach in high-cycle multiaxial fatigue. In D. McDowell & J. Ellis (Eds.), *Advances in Multiaxial Fatigue* (pp. 120 – 130). American Society for Testing and Materials. ASTM STP1191