



HAL
open science

Intégration de la phase de mise en oeuvre dans le dimensionnement des pièces industrielles forgées

Pierre-Olivier Bouchard

► **To cite this version:**

Pierre-Olivier Bouchard. Intégration de la phase de mise en oeuvre dans le dimensionnement des pièces industrielles forgées. La Forge, 2008, 32, pp.Pages 14-18. hal-00834099

HAL Id: hal-00834099

<https://minesparis-psl.hal.science/hal-00834099>

Submitted on 14 Jun 2013

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.



Dr. Pierre-Olivier BOUCHARD
Maître de conférence
CEMEF,
Ecole des Mines de Paris

Intégration de la phase de mise en œuvre dans le dimensionnement des pièces industrielles forgées

Les pièces de forge sont universellement reconnues pour leurs bonnes propriétés mécaniques, notamment en fatigue. L'approche proposée ici consiste à intégrer la simulation du forgeage dans le dimensionnement en fatigue des pièces forgées. Le fibrage est l'une des caractéristiques principales du forgeage. A l'aide du logiciel FORGE2005®, le fibrage est calculé tout au long des opérations de mise en forme. Ce fibrage, ainsi que les contraintes résiduelles sont ensuite introduits dans des outils de dimensionnement pour améliorer la prédiction du calcul de durée de vie en fatigue. Par contre, les critères de fatigue actuels, basés sur des modèles isotropes, ne permettent pas de valoriser le sens long de ce fibrage, et par là les pièces de forge, car c'est en général dans ce sens que ces pièces sont le plus sollicitées. Une extension anisotrope du modèle de Morel est proposée sur la base d'une campagne expérimentale effectuée sur des éprouvettes prélevées à 0°, 45° et 90° par rapport à la direction de fibrage. Une modélisation à l'échelle micro (DIGIMICRO) permet également de mieux comprendre le rôle des inclusions sur les sollicitations en fatigue. La mise en place d'une chaîne de simulation virtuelle globale à l'échelle d'un composant industriel, associée à des modélisations des évolutions microstructurales, permet de mieux comprendre et de quantifier le rôle du fibrage sur les propriétés en fatigue à grand nombre de cycles des pièces forgées.

Introduction

Les pièces forgées ou matricées représentent des éléments clés pour de très nombreuses structures mécaniques : automobile (250 pièces par exemple dans les moteurs, liaisons au sol, et roulements), aéronautique (1 800 pièces critiques dans un avion comme l'A380 en termes d'aubes et de disques des moteurs, ou pièces de structure des ponts), construction mécanique, mines, prothèses pour l'homme, spatial (Ariane V) et équipements divers. Au total, plus de 10^{10} pièces en acier, aluminium, titane, nickel ou autres alliages sont fabriquées

par ces techniques de mise en forme dans près de 1 000 entreprises européennes pour un CA de 8 000 M d'euros. Et ces pièces présentent des propriétés d'emploi traditionnellement connues pour être supérieures à celles des pièces décolletées ou obtenues par fonderie.

Les pièces de forge sont universellement reconnues pour leurs bonnes propriétés mécaniques, notamment en fatigue. Ceci est dû principalement à la microstructure induite par le procédé de forgeage. D'une manière générale, le corroyage (dont le fibrage est l'une des conséquences visibles) a plusieurs

effets : amélioration de la compacité du matériau en éliminant des défauts, structure plus fine et plus homogène (structure dendritique brisée) ou encore anisotropie de certaines caractéristiques mécaniques.

A l'heure actuelle, la phase de conception de la gamme de mise en forme et celle de dimensionnement de pièces industrielles sont souvent dissociées. Le dimensionnement des pièces en service ne prend notamment pas en compte l'histoire thermomécanique et microstructurale des matériaux les constituant. Cela conduit souvent à

une estimation trop approximative de leur résistance en condition d'utilisation ou à l'utilisation de coefficients de sécurité importants.

Parfois, plusieurs itérations entre les services chargés de la conception et du dimensionnement sont nécessaires avant d'aboutir à la phase de production des pièces. Une communication étroite entre ces différents services permettrait d'améliorer la productivité ainsi que la qualité des pièces finales produites.

Les codes de simulation numérique des procédés de mise en forme permettent depuis peu de déterminer les propriétés mécaniques d'une pièce après mise en forme, mais également la microstructure du matériau en fonction des conditions thermomécaniques de mise en œuvre.

Les modèles de fatigue (régime oligocyclique ou endurance, sollicitations multiaxiales), et par conséquent les codes de dimensionnement, n'intègrent pas encore toutes ces informations comme données d'entrée. En particulier, du fait que ces critères sont isotropes, ils n'intègrent pas le sens long de ce fibrage, sens qui est le plus dur et en général le plus sollicité. Ceci conduit à un surdimensionnement ainsi qu'à une mauvaise valorisation des pièces de forge [1]. Il est important maintenant de savoir identifier et paramétrer les caractéristiques microstructurales et mécaniques critiques induites par la mise en forme qui doivent être prises en compte dans ces modèles de dimensionnement améliorés. Cette intégration permettra *in fine* d'améliorer la prédictivité de ces modèles et d'intégrer la phase de mise en œuvre comme étape préalable au dimensionnement d'une pièce industrielle.

Le projet ANR OPTIFORGE a pour but d'améliorer la prédiction du dimensionnement de pièces forgées en intégrant l'histoire thermomécanique

et microstructurale des matériaux. Ce projet est constitué d'un partenariat industriel et académique complémentaire : un aciériste (Ascométal Creas), deux forgerons (Ascoforge Safe et Setforge), un utilisateur final (PSA), un éditeur de logiciels (Transvalor) ainsi que 3 laboratoires (le Cemef de l'Ecole des Mines de Paris, le LPMI de l'Ensam d'Angers ainsi que le laboratoire Mateis de l'Insa de Lyon) et un centre technique (le Cetim) (*ndlr : Ascoforge Safe, Ascométal, Setforge et Transvalor sont membres de l'Association Française de Forge*).

La méthodologie présentée ici consiste tout d'abord à modéliser l'opération de forgeage de manière à obtenir l'état thermomécanique de la pièce en fin de forgeage. Nous nous intéresserons principalement aux contraintes résiduelles ainsi qu'au fibrage. Ces informations seront alors utilisées pour enrichir la modélisation de la tenue mécanique des pièces industrielles en endurance. Enfin, nous montrerons comment la modélisation à l'échelle microstructurale peut venir enrichir cette méthodologie.

Forgeage et Fibrage

La structure d'une pièce forgée est le résultat de l'histoire thermomécanique du matériau. Initialement, le métal brut de coulée (sous forme de lingot, de bloom ou de barre) est constitué de

grains de solidification. Sous l'action des opérations de laminage ou de forgeage, les grains sont brisés et des cellules ou de nouveaux grains apparaissent. Ces microstructures, ainsi que les inclusions, sont alors étirées dans la direction de la déformation. On parle alors de fibrage [1].

Cette expression qualitative reflète cette structure allongée. Le fibrage est généralement mis en évidence grâce à la révélation des joints de grain du métal par attaque macrographique. Les demi-produits corroyés tels que les barres présentent généralement un fibrage unidirectionnel. Le forgeage, intervenant normalement après des opérations de corroyage, va modifier le fibrage et son orientation, et l'adapter à la géométrie de la pièce. La figure 1 représente le fibrage observé sur un triangle de suspension.

Ce triangle de suspension est obtenu en plusieurs passes de forgeage et de finition/ébavurage. La modélisation de chacune des passes est réalisée à l'aide du logiciel éléments finis FORGE2005®. Le fibrage est calculé à chaque passe sous la forme d'un tenseur. La figure 2.a, page suivante, montre la géométrie finale du triangle obtenue à l'aide de la simulation numérique avant la phase d'ébavurage. Sur la figure 2.b, le vecteur fibrage est représenté. Le résultat numérique obtenu est en très bonne adéquation avec les observations présentées en figure 1.

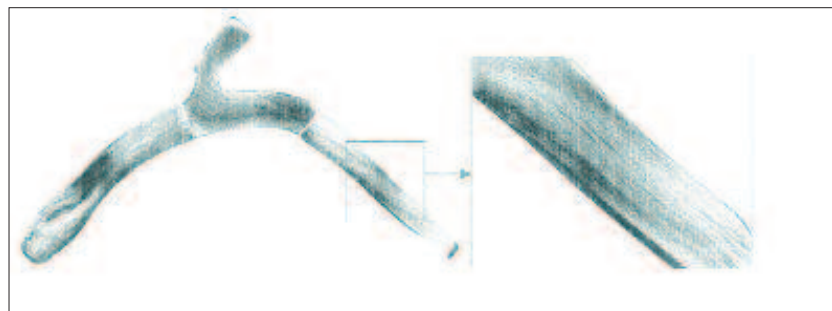


Fig. 1 : Représentation du fibrage sur une coupe de la géométrie finale d'un triangle de suspension obtenu par forgeage (solution de nital à 5 % et attaque au FeCl₃ pendant 15 secondes au niveau du coude)

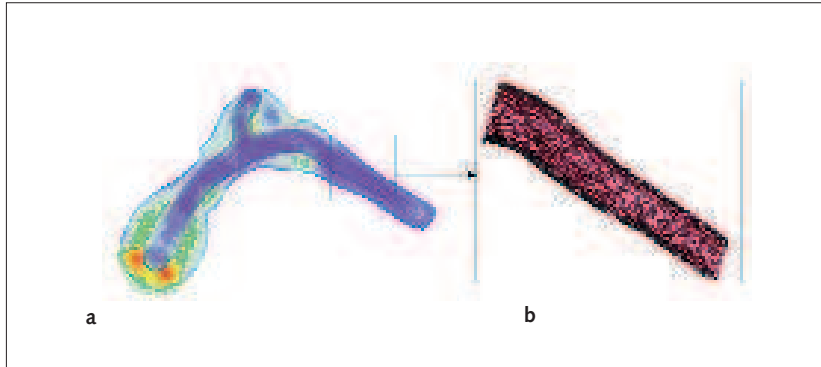


Fig. 2 : Modélisation numérique du forgeage du triangle de suspension (FORGE2005®) : a) étape intermédiaire de forgeage, b) vecteur fibrage final

Parmi les caractéristiques mécaniques, la résistance à la traction n'est en fait quasiment pas sensible au corroyage. Quant à la limite d'élasticité, elle dépend du taux de corroyage mais peu du sens de corroyage. En revanche, la résilience, la striction et, dans une moindre mesure, l'allongement à rupture, dépendent du taux de corroyage et du sens de corroyage. La limite d'endurance est également fortement liée au taux de corroyage. Dans le sens long, ces propriétés s'améliorent nettement jusqu'à un corroyage de l'ordre de 5, ensuite l'amélioration devient beaucoup plus faible pour les aciers de forge classiques à R_m de l'ordre de 1 000 MPa [2, 3].

Ce fibrage obtenu en fin d'opération de forgeage (Figure 2) joue un

rôle important sur la tenue à la fatigue. Or à l'heure actuelle, les codes de dimensionnement en endurance en fatigue ne permettent pas de prendre en compte ce paramètre comme donnée d'entrée pour améliorer la prédiction des calculs.

Endurance en fatigue des pièces forgées

Pour la modélisation de la fatigue, nous nous plaçons dans le domaine de l'endurance illimitée (Nombre de cycles $> 10^7$ cycles). C'est-à-dire que nous considérons que la phase d'amorçage est prépondérante par rapport à la phase de propagation.

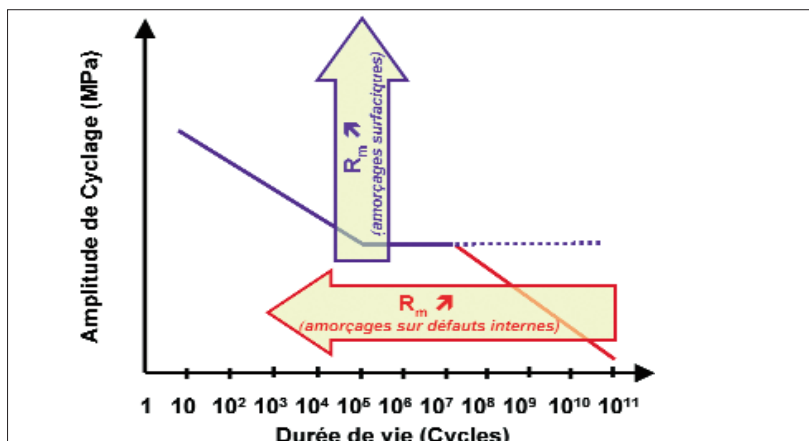


Fig. 3 : Influence de R_m sur la limite de fatigue - Contribution des défauts

Critères de dimensionnement en endurance

La sensibilité du matériau à la présence de défauts dépend de la nature de sa matrice. En effet, il apparaît sur la figure que plus le matériau possède une résistance mécanique élevée plus la taille de défauts acceptable sera faible.

Un matériau ayant un R_m plutôt faible (inférieur à 1 000 MPa), s'il ne possède pas de défauts de taille trop importante, aura tendance à avoir un comportement en fatigue piloté par la microstructure de sa matrice. Un matériau ayant une résistance mécanique plus élevée (supérieure à 1 000 MPa) aura, quant à lui, un comportement en fatigue le plus souvent piloté par ses défauts [4].

Lorsque la fatigue est pilotée par la matrice, le critère de Dang Van [5] est maintenant couramment utilisé en bureau d'étude. Ceci est dû principalement à sa facilité d'utilisation et d'implémentation dans un code éléments finis, ainsi qu'au faible nombre de données nécessaires pour l'utiliser. Il s'agit d'une approche mésoscopique de type plan critique permettant d'intégrer les contraintes résiduelles pour des sollicitations multiaxiales. Le principe fondamental étant que la rupture ne se fera pas si la réponse des grains les plus défavorablement orientés est adaptée élastiquement.

Cependant, ces critères restent dans un cadre isotrope, et ne permettent donc pas de prendre en compte l'orientation du fibrage vis-à-vis du chargement. Des extensions ont ensuite été proposées par Papadopoulos [4], puis par Morel [7], ce dernier y intégrant notamment une approche probabiliste.

Dans le cadre du projet OPTIFORGE,

une extension du modèle de Morel est en cours, de manière à prendre en compte l'anisotropie due au fibrage [8, 9].

Pour les matériaux «à défauts», le critère de Murakami [10] est plus approprié. En 1983, Murakami et Endo proposent un paramètre géométrique permettant de caractériser les défauts vis-à-vis de leur nocivité pour la tenue en endurance. Ce paramètre, valable à la fois pour des défauts 2D et des défauts 3D, est la racine carrée de l'aire de la projection du défaut sur un plan perpendiculaire à la contrainte normale maximale. Initialement développé pour des sollicitations uniaxiales, des propositions pour étendre ce critère aux sollicitations biaxiales [11], puis multiaxiales [1, 12] ont été formulées.

Influence du fibrage sur la limite en fatigue

Pour démontrer l'influence du fibrage sur les propriétés en fatigue, des éprouvettes de traction et de torsion ont été prélevées à 0°, 45° et 90° par rapport à l'axe de laminage d'un barreau d'acier METASCO MC (25MnCrSiVB6). La figure 4 montre l'orientation du fibrage par rapport à l'axe des éprouvettes et les résultats obtenus en traction/compression ($R = -1$).

Des essais de torsion réalisés in situ en microscopie électronique à balayage ainsi qu'en tomographie sont en cours, de manière à mieux comprendre le rôle du fibrage sur cette anisotropie. Sur la base de ces essais et de ces observations, une extension anisotrope du critère de Morel est proposée [8, 9].

Vers une approche micro

La modélisation à l'échelle micro constitue également un formidable outil de

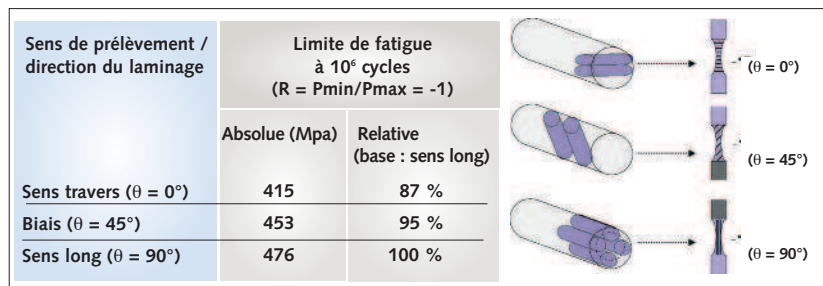


Fig. 4 : Influence de l'orientation du fibrage sur la limite de fatigue

compréhension des mécanismes de fatigue liés à la microstructure. Le logiciel DIGIMICRO [13, 14] permet de modéliser un Volume Élémentaire Représentatif (VER) sur la base d'une microstructure réelle, par exemple à partir d'un fibrage. Les inclusions et les grains peuvent être représentés, et un maillage anisotrope est généré de manière à avoir le maximum de précisions aux interfaces entre les inclusions et la matrice. La méthodologie consiste alors à effectuer un calcul de fatigue sur la pièce industrielle (prenant en compte l'histoire thermomécanique provenant de la simulation de forgeage), à localiser la zone à risque, puis à modéliser ce que subit le VER sur la base des sollicitations perçues par l'élément de matière (Figure 5, page suivante).

Conclusion – Vers une conception intégrée

La démarche présentée ici vise à améliorer la prédiction du dimensionnement en fatigue des pièces forgées en y intégrant l'histoire thermomécanique du matériau [15, 16]. Cette approche expérimentale et numérique permet notamment de mettre en évidence le rôle bénéfique du fibrage sur la tenue en service des pièces par l'utilisation de nouvelles approches de fatigue. Ceci permet notamment de démontrer l'avantage

concurrentiel des pièces de forge par rapport aux pièces obtenues par des procédés concurrents, et d'optimiser le dimensionnement des pièces (allègement, performance, coût, économies d'énergie). Pour compléter cette étude, il sera important à l'avenir d'intégrer également l'influence de la peau de forge sur la limite de fatigue, paramètre lui aussi très important dans le cas des pièces de forge.

L'approche présentée ici s'inscrit dans une démarche de conception intégrée. L'objectif étant d'une part d'améliorer la prédiction des codes de dimensionnement, et d'autre part de réduire le temps de conception d'une pièce industrielle.

La mise en place d'une chaîne de simulation virtuelle globale à l'échelle d'un composant industriel, associée à des modélisations des évolutions microstructurales, permet de mieux comprendre et de quantifier le rôle du fibrage sur les propriétés en fatigue à grand nombre de cycles des pièces forgées (Figure 6, page suivante).

Il s'agira donc d'un outil privilégié pour la conception intégrée, associant les fournisseurs de matériau, les forgerons, les bureaux d'étude et les équipementiers dans l'automobile ou l'aéronautique. L'objectif à terme est de pouvoir optimiser la durée de vie en fatigue en modifiant les conditions de mise en forme [1, 17, 18].

Remerciements

Les auteurs souhaitent remercier l'ANR pour le financement du projet OPTIFORGE, ainsi que tous les partenaires du projet : CEMEF (M. Milesi, Y. Chastel, P.O. Bouchard), LPMI (E. Pessard, Fr. Morel, J.L. Lebrun), MATEIS (C. Verdu, M. Beringhier), ASCOMETAL CREAS (G. Baudry, L. Flacelière, J.M. Jachmich), ASCOFORGE SAFE (P. Secordel), SETFORGE (N. Behr, Y. Gobard), P.S.A (N. Caillet, J. Ehret), TRANSVALOR (R. Ducloux) et le CETIM (C. Peyrac).

Références

- [1] N. Caillet, Prise en compte des spécificités des pièces forgées en fatigue illimitée, Thèse de l'Ecole des Mines de Paris, 13 décembre 2007.
 [2] G.A. Fett, J.W. Ros, The effect of reduc-

tion ratio on the mechanical properties of strand cast steels- ASME - WAM - ATLAN-TA - 1-6 Dec. 1991 - MD Vol. 28

- [3] G. Baudry, L. Flamand, R. Fougères, C. Hunter, H.P. Lieurade, A. Pineau - La Fatigue - Les aciers spéciaux - Lavoisier - p.477-560 (1997)
 [4] H. Kitagawa, S. Takahashi, in Proc. 2nd Int. Conf. On « behaviour of materials » Boston - pp. 627-631, 1976.
 [5] K. Dang Van, B. Griveau, O. Message, On a new multiaxial fatigue limit criterion : Theory and application, Biaxial and multiaxial fatigue, EGF 3, Mechanical Engineering Publications, London, pp. 479-496, 1989.
 [6] I.V. Papadopoulos, Multiaxial fatigue limit criterion of metals, International Center for Mechanical Sciences, Springer WienNewYork, 392, pp. 89-143, 1999.

- [7] F. Morel, N. Huyen, Plasticity and damage heterogeneity in fatigue, Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 49, pp. 98-127, 2008.
 [8] E. Pessard, F. Morel, A. Morel, Anisotropic fatigue behaviour in forged Steel, 12th International Spring Meeting, SF2M, Fatigue and Plasticity from Mechanisms to design, Paris, France, May 20-22, 2008.
 [9] M. Milesi, Y. Chastel, M. Bernacki, R.E. Loge, P.O. Bouchard, Multiaxial fatigue criterion accounting for anisotropy in forged components, 11th ESAFORM 2008, Lyon, France, April 23-25 2008.
 [10] Y. Murakami, M. Endo, Quantitative evaluation of fatigue strength of metals containing various small defects or cracks, Engineering Fracture Mechanics, Vol. 17, No. 1, pp. 1-15, 1983.
 [11] S. Beretta, Y. Murakami, SIF and threshold for small cracks at small notches under torsion, Fatigue Fract. Engng. Mater. Struct., 23, pp 97-104, 2000.
 [12] N. Caillet, P.O. Bouchard, Y. Chastel, Multiaxial approach of Murakami equation and applications to forged parts, 4th International Conference on Fracture and Damage Mechanics, Mallorca, Spain, July 12-14, 2005.
 [13] R.E. Logé, Y.B. Chastel, Coupling the thermal and mechanical fields to metallurgical evolutions within a finite element description of a forming process, Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 195, pp. 6843-6857, 2006.
 [14] M. Bernacki, Y. Chastel, H. Dignonnet, H. Resk, T. Coupeuz and R.E. Logé, Development of numerical tools for the multiscale modelling of recrystallization in metals, based on a digital material framework, Computer Methods in Materials Science 7, pp.142-149, 2007.
 [15] Y. Chastel, N. Caillet, P.O. Bouchard - Quantitative analysis of the impact of forging operations on fatigue properties of steel components, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 177, Issues 1-3, pp. 202-205, 2006.
 [16] M. Milesi, Y. Chastel, M. Bernacki, R. Loge, P.O. Bouchard - Explicit microscopic fatigue analysis of forged components, Computer Methods in Materials Sciences, Vol7, N°4, pp.383-388, 2007.
 [17] P.O. Bouchard, N. Caillet, Y. Chastel, Vers une optimisation de la tenue à la fatigue de pièces forgées intégrant l'histoire mécanique des matériaux, Revue Européenne Mécanique Numérique, vol. 17 - 3, 2008.
 [18] N. Caillet, P.O. Bouchard, Y. Chastel, A numerical tool for optimization of grain flow orientation in forged parts submitted to multiaxial loading, Fatigue Design 2005, Senlis, France, November 16-18 2005.

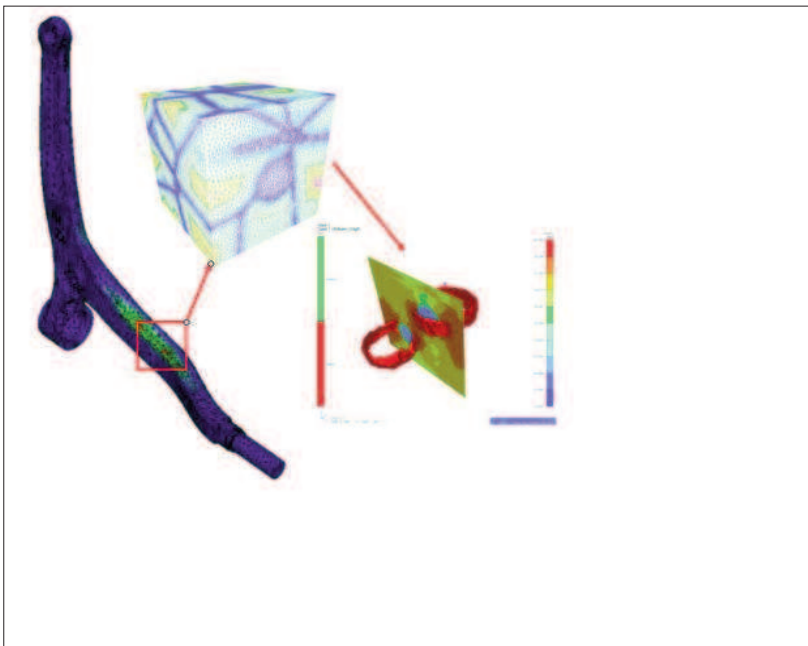


Fig. 5 : Du calcul de fatigue macroscopique (ABAQUS) aux contraintes locales générées sur un VER (DIGIMICRO)

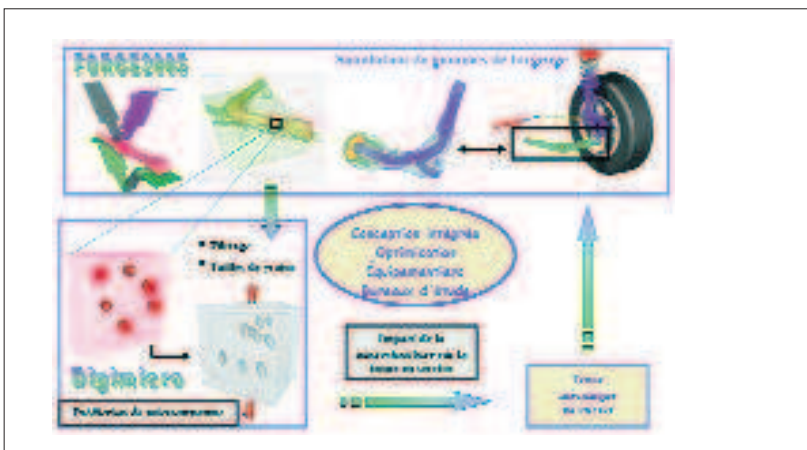


Fig. 6. Conception intégrée.