

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

BADJI-MOKHTAR-ANNABA UNIVERSITY

UNIVERSITE BADJI-MOKHTAR-ANNABA



جامعة باجي مختار - عنابة

Faculté des Sciences de l'ingénierat
Département de Génie Mécanique

Année 2017

THESE

Présentée en vue de l'obtention du diplôme de DOCTORAT(LMD)

Approche mécano-fiabiliste pour déterminer les indices de performance d'un système de production discontinue : cas d'un système de mise en forme

Option :

Fiabilité Mécanique

Par :

Youcef BENDJOUDI

DIRECTEUR DE THESE: Abdelaziz AMIRAT Pr. UBM Annaba
CO-DIRECTEUR DE THESE: Eric BECKER M.C.A ENSAM Metz

Devant le jury

Président : Pr. MERZOUG Bachir U-Annaba
Rapporteur : Pr. AMIRAT Abdelaziz U-Annaba
Co-rapporteur : Dr. BECKER Eric ENSAM ParisTech Centre de Metz (France)
Examineur : Pr. CHAOUI Kamel U-Annaba
Examineur : Pr. KHELIF Rabia U-Annaba
Examineur : Pr. AMARA Idris U-Constantine

Je dédie ce travail à mes parents,
à toute ma famille.

Remerciements

En tout premier lieu, je remercie Dieu de m'avoir donné la force et le courage pour terminer ce travail.

Au terme de cette thèse de doctorat effectuée au Laboratoire de recherche de mécanique des matériaux et maintenance industrielle, département de Mécanique, faculté des sciences de l'ingénierie, de l'Université Badji Mokhtar Annaba :

Je tiens à remercier mon encadrant Professeur Abdelaziz AMIRAT du laboratoire de recherche de technologies avancées de production mécanique de l'université Badji Mokhtar Annaba, et mon co-encadrant Docteur Eric BECKER du laboratoire de conception, fabrication et commande, LCFC de l'école des Arts et Métiers Paris Tech, du centre de Metz, ENSAM, France, qui ont en commun conduit mes recherches et m'ont accompagné tout au long de ces années de recherche, de façon subtile. Merci pour votre soutien sans faille, votre confiance et votre disponibilité.

Je tiens à remercier Professeur Bachir MERZOUG qui a bien voulu me faire honneur de présider mon jury de thèse, et les membres du Jury, Professeur Kamel CHAOUI, Professeur Rabia KHELIF et Professeur Idriss AMARA, pour avoir accepté d'examiner mon travail. Je leur exprime toute ma gratitude.

Je remercie tous les membres et le personnel des laboratoires de recherches, le LR3MI, mécanique des matériaux et maintenance industrielle et le LRTAPM, technologie avancée de production mécanique pour tous les moyens et aide qu'ils m'ont fourni pour mener à bien ce travail.

Mes remerciements vont aussi à l'équipe de formation doctorale de fiabilité mécanique qui m'a donné l'opportunité de poursuivre mes études dans le domaine de la maintenance industrielle et qui a veillé à ma formation.

Mes sincères remerciements au Professeur Patrick MARTIN du laboratoire de Conception Fabrication Commande de l'école des Arts et Métiers ParisTech (centre de Metz), pour tous les efforts qu'il a fait afin de rendre la collaboration scientifique réaliste et fructueuse.

Je remercie vivement Régis BIGOT, professeur au LCFC de l'ENSAM Paris Tech (centre de Metz), pour m'avoir consacré plusieurs heures de son temps et ses recommandations bien ciblées et objectifs.

J'ai une pensée profonde pour toute l'équipe du laboratoire LCFC, de l'école nationale des arts et métiers ParisTech, ENSAM du centre de Metz, France, chercheurs, ingénieurs, techniciens de m'avoir accueilli et m'a permis de découvrir un environnement de travail dynamique et aimable. Pendant ce petit séjour à Metz, j'ai acquis des connaissances considérables et fructueuses. Merci pour la disponibilité et les discussions très fructueuses.

Je remercie particulièrement Docteur Ouzzine BOUSSAID du laboratoire de recherche en risques, contrôle et sûreté du département de génie mécanique de l'université Badji Mokhtar Annaba pour son aide précieuse et les discussions que j'ai eu avec lui et qui m'ont beaucoup apporté.

Je tiens vivement à exprimer ma gratitude à Monsieur MELEK, Président Directeur Général de l'entreprise publique et économique Ferroviaire Annaba, Monsieur HADAOUI, directeur de l'unité forge, pour l'accueil et pour avoir mis à ma disposition, les moyens humains, matériels et pour toute la confiance qu'ils ont placée en moi. Mes remerciements à tout le personnel de Ferroviaire.

Je remercie également tous les membres et le personnel du département de génie mécanique (UBMA).

Mes remerciements les plus sincères sont adressés à mes collègues du bureau G19.

Je remercie mes collègues Mokhtar, Abdelouaheb, Saïd, Issam, Fathi, Mustapha, Walid, Lbahi, Fateh, Lamine, Akram, Tarek, Mohamed, j'exprime ma plus sincère reconnaissance et mon amitié.

Bendjoudi Youcef

RESUME

Dans l'industrie de mise en forme à chaud des pièces métalliques, jusqu'à 20% du coût de production d'une pièce forgée est attribué à l'outillage. Et la durée de vie de l'outillage préoccupe toujours et elle est souvent mal estimée compte tenu des divers facteurs de production qui restent insuffisamment maîtrisés, et cela malgré les efforts qui ont été déployés au cours des deux dernières décennies, dans le développement de technologies de pointe pour rendre le processus de fabrication précis, fiable et efficace. Donc, il est devenu impérative pour les services de production et de maintenance de trouver un moyen de prise de décision pour le changement de l'outillage au temps opportun et avec la meilleure performance possible. Ainsi, la recherche d'un indice permettant de mesurer la performance d'un système de mise en forme aussi complexe que les ateliers de forge est devenue accrue, afin d'éviter les arrêts nécessitant une maintenance curative et impliquant des coûts de maintenance et non-maintenance.

Le travail de cette thèse présente un nouveau concept d'évaluation d'un indice de performance des matrices de forgeage à chaud. Il se repose sur une analyse fiabiliste du procédé à travers un modèle mécanique qui prend en charge la loi rhéologique du processus de mise en forme à savoir la loi de Hansel et Spittel et une loi d'endommagement par fatigue de Lemaître et Chaboche. Le comportement du procédé est modélisé et simulé à l'aide de l'outil Forge® qui a permis d'optimiser les paramètres de forgeage et de déterminer les contraintes et les déformations, ainsi que les températures lors du forgeage et aussi d'identifier les facteurs affectant la vie de la matrice. L'analyse fiabiliste est réalisée à l'aide de l'outil PHIMECASoft sur la base d'une fonction d'un état limite représenté par la différence entre l'endommagement progressant et l'endommagement critique causant l'arrêt de la production.

Le principe de l'analyse fiabiliste est de déterminer la probabilité de défaillance des matrices et d'évaluer la sensibilité des variations des valeurs aléatoires des paramètres d'entrée et des paramètres de mise en forme. Le concept de cette contribution a été appliqué à des matrices industrielles réelles utilisées pour forger des leviers de direction d'automobile produits dans l'atelier de forgeage de la Ferroviaal Company d'Annaba en Algérie. L'indice de performance est donné par le nombre de pièces forgées correspondant à la valeur admise de l'indice de fiabilité β , en fonction du nombre de frappes, des températures de mise en forme, des variations des dimensions du lopin dans la limite des tolérances dimensionnelles.

Mots clés: Matrice de Forgeage, Fiabilité, Indice de Performance, Endommagement Critique, Durée de vie.

Abstract

In hot metal forming industry, up to 20% of the production cost of a forged part is attributed to toolings such as dies. The die lifetime is still a concern and is often poorly estimated because of various factors of production which remain insufficiently controlled, despite the efforts that have been made during the last two decades in the development high tech equipments in order to make the manufacturing process accurate, reliable and efficient. So it has become imperative for production and maintenance services to find decision-making tools for die replacement just in time and with the best possible performance. Thus, needs for an indicator to measure the performance of a forming system as complex as the forge workshops has increased, in order to avoid shutdowns that require curative maintenance and involve maintenance and non maintenance costs.

The work of this thesis presents a new concept in evaluating a performance index of hot forging dies. It consists in applying reliability analysis of the process through a mechanical model that supports the rheological law of the forming process, namely the Hansel and Spittel law and a fatigue damage law of Lemaître and Chaboche. The behavior of the process is modeled and simulated using the FORGE® software in order to optimize the forging parameters and to determine the stresses and deformations as well as the temperatures during the forging and also to identify the process factors affecting the life of the dies. The reliability analyses have been conducted using PHIMECASoft software tools on the basis of a limit state function that is expressed by the difference between the progressing damage and the critical damage causing the production to shutdown.

The principle of reliability analysis is to determine the probability of failure of the die and to evaluate the sensitivity of the variation of the random values of the input parameters and the forming parameters. The concept of this contribution has been applied to an industrial case for forging automotive steering levers at the forging workshop of the Ferrovia Company of Annaba in Algeria. The performance index is given by the number of forged parts corresponding to the acceptable reliability index β , as a function of the number of strokes, the forming temperatures, the variations in the dimensions of the billet within the limits of the dimensional tolerances.

Keywords: Forging Matrix, Reliability, Performance Index, Critical Damage, Lifetime.

ملخص

في الصناعات التي تستخدم عملية التشكيل على الساخن لإنتاج مختلف الأجزاء المعدنية، يتم تعيين ما يصل إلى 20٪ من تكلفة الإنتاج للأداة المستخدمة في عملية التشكيل. و حياة الأداة هي دائما موضع قلق و غالبا ما تكون ضمن تقديرات خاطئة مع الأخذ بعين الاعتبار تعدد عوامل الإنتاج التي لا تزال غير متحكم بها بما فيه الكفاية وهذا على الرغم من الجهود التي بذلت على مدى العقدين الماضيين في تطوير التكنولوجيات المتقدمة لجعل عملية التصنيع دقيقة، فعالة وموثوق بها. لذلك، فقد أصبح من الضروري لوحداث الإنتاج والصيانة إيجاد وسيلة مساعدة لأخذ القرار الصائب لتغيير الأدوات وذلك في الوقت المناسب مع أفضل أداء ممكن من خلال إيجاد مؤشر لقياس أداء ورش الحدادة لتجنب توقف عملية الإنتاج التي تستوجبها عملية الصيانة مع مراعاة التكاليف الناجمة عن الصيانة و عدم الصيانة.

عمل هذه الأطروحة يقدم مفهوما جديدا للتقييم مؤشر الأداء لأداة التشكيل على الساخن. حيث يقوم على تحليل الموثوقية لنهج عملية التشكيل من خلال النموذج الميكانيكي الذي يدعم قانون السلوك خلال عملية التشكيل Hansel et Spittel و قانون الضرر الناتج عن التعب Lemaître et Chaboche . تم تمثيل ومحاكاة سلوك النهج باستخدام الأداة FORGE® الذي يسمح بتقدير معايير التشكيل على الساخن ، تحديد الإجهادات و التشوهات، درجات الحرارة أثناء عملية التشكيل و تحديد العوامل المؤثرة على حياة الأداة. تم تحليل الموثوقية باستخدام الأداة PHIMECASoft على أساس علاقة محددة ممثلة في الفرق بين الضرر والضرر الحرج المتسبب في وقف الإنتاج.

مبدأ تحليل الموثوقية هو تحديد احتمال خلل الأداة من خلال تقييم حساسية تغيرات القيم العشوائية من المعايير المدخلة ومعايير التشكيل. وقد تم تطبيق مفهوم هذه المساهمة على أداة مستخدمة لصناعة ذراع التوجيه للسيارات(جرار)، حيث يصنع هذا الأخير في ورشة التشكيل في شركة فيروفيال عنابة بالجزائر. مؤشر الأداء معطى من خلال عدد القطع المشكولة الموافقة لمؤشر الموثوقية β اعتمادا على عدد الضربات، درجة حرارة التشكيل والتغيرات في أبعاد القطعة.

الكلمات المفتاحية: أداة التشكيل، وثوقية، مؤشر الأداء، الضرر الحرج، مدة الحياة.

Table des Matières

Remerciement.....	3
Résumé.....	5
Abstract.....	6
ملخص.....	7
Sommaire.....	8
Liste des Figures.....	11
Liste de Tableaux.....	13
Liste des Symboles est Abréviations.....	14
Introduction.....	15
Chapitre I :	
Etat de l’art sur le concept de recherche des indices de performances dans les systèmes de production discontinue.....	21
I.1 État de l’art sur les indices de performances	22
I.1.1 Définition et contexte : la performance et indice clés de performance.....	22
I.1.2 Indicateurs de performance en maintenance industrielle.....	22
I.1.2.1 Intérêt.....	22
I.1.2.2 Indicateurs de maintenance.....	23
I.1.2.2.1 KPI basée sur la fiabilité.....	24
I.1.2.2.2 KPI basée sur les coûts de maintenance.....	24
I.1.2.2.3 KPI basée sur des échéanciers.....	25
I.1.2.2.4 KPI d’entretiens non ordinaires.....	25
I.1.2.2.5 KPI basée sur l’équipe de maintenance.....	27
I.1.2.3 Types de mesure des indicateurs clés de performance.....	28
I.1.2.4 Systèmes de mesure des indicateurs clés de performance.....	29
I.1.2.5 Objectifs des indicateurs de maintenance.....	31
I. 2 État de l’art sur la modélisation et la simulation des procédés de mise en forme.....	32
I.3 État de l’art sur l’analyse fiabiliste des procédés de mise en forme.....	43
I.4 Conclusion du chapitre I.....	49

Chapitre II :	
Paramétrage d'un procédé de forgeage.....	50
II.1 Position du problème.....	51
II.2 Rôle stratégique d'une unité forge dans un atelier de fabrication mécanique.....	53
II.3 Défaillances dans le procédé de forge.....	56
II.4 Paramétrage d'un procédé de forgeage.....	58
II.4.1 Analyse du système de production de pièces forgées.....	60
II.4.2 Dessin de définition de la pièce forgée.....	60
II.4.3 Matériau de la pièce.....	60
II.4.4 Matériau de l'outillage d'estampage du levier de direction.....	60
II.4.5 Gamme de production du levier.....	61
II.5 Modélisation et Simulations du forgeage d'un levier cambré.....	65
II.5.1 Simplification du modèle géométrique.....	65
II.5.2 Configuration géométrique des matrices d'estampage sous Forge® Nxt.....	66
II.5.3 Elaboration du plan d'expérience pour le paramétrage du procédé du forgeage.....	68
II.6 Conclusion du chapitre II.....	70
Chapitre III	
Méthodologie d'évaluation d'indices de performance en maintenance.....	71
III.1 Elaboration d'un concept d'évaluation d'un indice de performance en maintenance.....	72
III.1.1 Comprendre la préoccupation des industriels.....	72
III.2 Stratégie d'évaluation des indices de performances en maintenance.....	73
III.3 Critères liés à la stratégie d'évaluation des indices de performance.....	75
III.4 Supports d'évaluation d'indices de performance.....	77
III.5 Données de départ pour l'évaluation d'indices de performance.....	80
III.6 Conclusion du chapitre III.....	81
Chapitre IV	
Contribution à l'évaluation des indices de performance d'une matrice de forgeage à chaud.....	82
IV.1 Analyse du processus de mise en forme d'un levier de direction.....	84

IV.2 Mise en données pour l'analyse de la fiabilité de l'outillage	84
IV.2.1 Modèle géométrique du procédé de forgeage d'un levier de direction.....	86
IV.2.2 Modèle mécanique basé sur le couplage de modèle de comportement rhéologique de l'outillage avec un modèle d'endommagement.....	87
IV.2.3 Association des incertitudes aux paramètres d'entrée dans le modèle mécanique.....	90
IV.2.4 Identification d'une fonction d'état limite déterminant la durée de vie de la matrice..	94
IV.2.5 Calcul de la fiabilité de l'outillage.....	95
IV.3 Détermination de l'indice de performance de l'outillage.....	95
IV. 4 Conclusion du Chapitre IV.....	96
Chapitre V	
Indice de performance d'un outillage de forge : Analyse et Discussion....	97
V. 1 Première déformation plastique équivalente dans une matrice de forgeage.....	98
V. 2 Effet du nombre de frappe sur la température d'une matrice d'estampage.....	99
V. 3 Effet des variables aléatoires sur la performance de l'outillage.....	100
V. 3.1 Analyse de la fiabilité d'une matrice avec un défaut de fatigue initié.....	100
V. 3.2 Analyse de la sensibilité des variables de calcul.....	101
V. 3.3 Effet de la variation de la température sur la durée vie de la matrice.....	103
V. 3.4 Effet de la première déformation équivalente sur la durée vie de la matrice.....	104
Conclusion générale et perspectives.....	106
Références bibliographiques.....	109
Appendice A1 : Dessin de définition de la pièce industrielle.....	116
Appendice A2 : Simulation sous logiciel Forge® Nxt.....	118
Appendice A3 : Paramétrage du procédé de forgeage du levier de direction..	126
Appendice A4 : Procédure d'analyse de la fiabilité mécanique sous le logiciel PhimecaSoft.....	136

Liste des figures

Figure I.1 : Quatre types de mesures de performance.....	29
Figure I.2 : Plateforme de mesure de la performance de la fonction maintenance.....	30
Figure I.3 : Distribution de la micro-dureté au-dessous de la surface usée dans une matrice préchauffée à 400°C, à différentes charges.....	33
Figure I.4 : Organigramme d'un système d'intégration de conception et Fabrication pour la modélisation et simulation des opérations de forgeage.....	35
Figure I.5 : Simulation d'une gamme de Forgeage pour l'obtention d'un triangle de suspension.....	36
Figure I.6 : Les phases de mise en forme des brutes de cages de roulements par estampage.....	37
Figure I.7 : Changement de maillage triangulaire en maillage quadrilatère pour l'analyse par éléments finis d'une pièce de forge.....	38
Figure I.8 : Prédiction de l'usure de l'outil de forgeage en utilisant Le code DEFORM-2D.....	39
Figure I.9 : Objet de l'étude (a) et champ de températures établi en surface (b) et au cœur (c).....	41
Figure I.10 : Prédiction du nombre de cycles à la rupture dans l'outillage.....	42
Figure I.11 : Adéquation de résultats de mesure de l'usure avec les résultats de prédiction par la combinaison de la méthode des réseaux de neurones et la méthode des éléments finis.....	43
Figure I.12 : Source d'incertitudes dans un procédé de forgeage.....	44
Figure I.13 : Phases de l'approche globale pour modéliser et optimiser le procédé de mise en forme..	46
Figure I.14 : Méthode d'approximation FORM / SORM, indice d'Hasofer-Lind.....	48
Figure II.1 : Variance de construction des leviers.....	51
Figure II.2 : Unité forge & soutien logistique dans un atelier de production des véhicules ferroviaires et d'engins de construction de bâtiments.....	55
Figure II.3 : Exemple de pièces forgées, produites pour les véhicules ferroviaires destinés au transport des minerais et des fluides.....	56
Figure II.4 : Vue de profil d'une matrice inférieure pour l'estampage d'un levier de direction: (a) Zone de cisaillement (b) Blessures (c) Usure.....	57
Figure II.5 : Principe de simulation sous Forge® Nxt.....	59
Figure II. 6 : Les 4 phases de mise en forme de l'ébauche d'un levier de direction.....	63
Figure II.7 : a) Matrice à joint brisée ; b) Pièce cambrée ; c) Matrice à joint plan.....	64
Figure II.8 : Simplification de la géométrie et Gamme de production d'un levier cambrée.....	66

Figure II.9: Conception sous SolidWorks de matrices d'estampage d'un levier cambré, à joint brisé.....	67
Figure II.10 : Modélisation géométrique du procédé de forgeage du levier de direction.....	68
Figure III.1 : Concept d'évaluation d'un indice de performance dans un procédé de mise en forme....	74
Figure III.2 : Procédé de mise en forme avancé a) Robot de manipulation de la pièce b) système de contrôle des pièces finies c) Presse 400t d) four électrique e) Système de contrôle intégré.....	76
Figure IV.1 : Comportement d'une matrice après le forgeage à chaud d'un levier de direction cambré. (1a) Surface de bavures (1b) bord (1c) zones descendant empreinte endommagées, (2) des traces de fraisage dans la zone des bavures, (3) déformation plastique, (4) usure.....	84
Figure IV.2 : Modèle géométrique du procédé de forgeage du levier de direction.....	86
Figure IV.3 : Schéma de principe de fonctionnement de l'enchaînement sous logiciel Forge.....	92
Figure V.1 : Génération de la première déformation plastique équivalente dans une matrice inférieure d'estampage préchauffée à 250 ° C.....	98
Figure V.2 : Cartographie des températures sur une matrice d'estampage après 4 itérations	100
Figure V.3 : Evolution de l'indice de fiabilité β en fonction du nombre de pièces forgées (Première valeur de la déformation plastique équivalente $\varepsilon_{(pc)} = 0,08$).....	101
Figure V.4 : Importance des variables dans une matrice de forgeage à chaud	102
Figure V.5 :Évolution des sensibilités des variables en fonction du niveau acceptable de la probabilité de défaillance dans une matrice de levier de direction.....	102
Figure V.6 : Estimation de la durée de vie de la matrice à travers l'évolution de l'indice de fiabilité β en fonction de la température.....	103
Figure V.7 : Estimation de la durée de vie de la matrice à travers l'évolution de l'indice de fiabilité β en fonction de la première déformation équivalente.....	104
Figure V.8 : Evolution du nombre de pièces forgées en fonction de la première déformation équivalente.....	105

Liste des Tableaux

Tableau I.1 : Indicateurs clé de performance de fiabilité.....	24
Tableau I.2 : KPI basés sur les coûts de maintenance.....	25
Tableau I.3 : KPI basée sur les échéanciers.....	26
Tableau I.4 : KPI emplois d'entretien non-ordinaires.....	27
Tableau I.5 : KPI d'équipe de maintenance.....	27
Tableau I.6 : Comparaison des résultats de simulation et expérimentaux en forgeage.....	34
Tableau I.7 : Ecart type moyen a) pour l'énergie et b) pour la charge appliquée.....	47
Tableau II.1 : Durée de vie approximative des matrices d'estampage en fonction de la puissance du marteau.....	53
Tableau II.2 : Composition chimique moyenne de l'acier 25CrMo4 %.....	60
Tableau II.3 : Caractéristiques mécanique moyennes de l'acier 25CrMo4 %.....	60
Tableau II.4 : Composition chimique moyenne du X38CrMoV5 (en %).....	61
Tableau II.5 : Caractéristiques mécaniques de l'acier X38CrMoV5.....	61
Tableau II.6 : Gamme de production du levier de direction.....	61
Tableau II.7 : Plan d'expériences pour l'estampage du levier de direction.....	69
Tableau IV.1 : Objets de simulation de l'opération de forgeage d'un levier de direction.....	86
Tableau IV.2 : Variables aléatoires des paramètres calcul et leur distribution probabiliste.....	90
Tableau IV.3 : Fichier frottement et échange thermique entre le lopin et la matrice.....	93
Tableau V.1 : Génération de la première déformation plastique équivalente au 6 ^{ème} cycle de forgeage	98
Tableau V.2 : Evolution de sensibilités des variables α^2 (point de conception dans l'espace réduit) en fonction des niveaux acceptés de probabilité de défaillance P_f	102

Liste des symboles et abréviations

$R(t)$	Fonction de fiabilité
t	Temps
U_i	Variabes gaussiennes
T	Transformation de Rosenblatt
X_i	Variable de base
$H(U_i)$	Fonction d'état dans l'espace normé réduit
G	Fonction d'état limite
T^{-1}	Transformation inverse de Rosenblatt
β	Indice de fiabilité de Hasofer-Lind
σ	Contrainte équivalente
A	Cohérence
ε	Déformation équivalente
$\dot{\varepsilon}$	Vitesse de déformation
T	Température donnée en Celsius
m_1 et m_9	Définissent la sensibilité du matériau à la température
m_5	Terme couplé température et déformation
m_8	Terme couplé température et vitesse de déformation
m_2, m_4 et m_7	Définissent la sensibilité du matériau à la déformation
m_3	Dépend de la sensibilité du matériau à la vitesse de déformation
N_f	Durée de vie de la structure
σ_u	Résistance ultime du matériau
J_{max}	Valeur maximale de l'invariant de VonMises du tenseur des contraintes
a et β	Coefficients du matériau
ΔJ	Déviateur des contraintes
\bar{I}_1	Valeur moyenne du premier invariant du tenseur des contraintes
$\sigma_i(\bar{I}_1)$	Étendue de contrainte cyclique moyenne
$M(\bar{I}_1)$	Effet de la contrainte moyenne
b, σ_0	Coefficients du matériau
D	Évolution du dommage
n	Nombre de cycles appliqués
D_c	Dommage critique
P_f	Probabilité de défaillance

Introduction

Introduction

Dans l'industrie de la mise en forme, comme celle du forgeage à chaud, jusqu'à 20% du coût de production d'une pièce forgée est attribué à l'outillage. Donc, la durée de vie de l'outillage préoccupe toujours et elle est souvent mal estimée compte tenu de divers facteurs de production qui restent insuffisamment maîtrisés, et cela malgré les efforts qui ont été déployés, au cours des deux dernières décennies, dans le développement de technologies de pointe pour rendre le processus de fabrication précis, fiable et efficace. La durée de vie des matrices de mise en forme par forgeage est définie par le nombre de pièces exécutées conformément aux exigences du dessin technique. Cependant elle reste étroitement dépendante de la forme géométrique et des dimensions de certains éléments de la gravure finale dans la matrice d'estampage. La puissance de frappe est aussi un facteur qui influe la durée de vie. Elle doit être suffisante pour mettre en forme la matière et assurer son écoulement dans la matrice. La forme géométrique doit être optimale pour mettre en forme la matière et assurer son écoulement dans la matrice mais également pour assurer une durée de vie de l'outillage économiquement acceptable et ceci pour un même produit à produire. Par ailleurs, une défaillance non admissible dans la pièce forgée est systématiquement reportée sur la pièce finie, allant jusqu'à provoquer un arrêt de la production qui pénalise la performance de l'entreprise. En réalité, les forgerons sont confrontés à un grand problème de fréquences d'apparition de défaillances dans l'outillage qui sont aléatoires et donc difficiles à gérer.

Dans le cas de la production de produit d'alliage métallique très souvent les ateliers mécaniques sont dotés de forge ou/et de fonderie nécessaire pour limiter les opérations d'enlèvement de matière par usinage. Souvent, la forme et les dimensions ainsi que la cadence des pièces à fabriquer, compliquent la production car pour chacune des pièces différentes, il faut réaliser des outillages correspondant. La forge et la fonderie sont des ateliers indispensables pour la préparation des produits métalliques afin de limiter les temps de production, les usinages, et augmenter les cadences. Dans le contexte du forgeage, la gamme de production détermine les phases et les opérations pour obtenir la pièce à partir d'un lopin, précisant les conditions de préchauffe ou de chauffe de l'outillage, les conditions de frappes du lopin, le nombre de frappes, la température du lopin et les cadences.

Le service de maintenance et de production dans les forges se soucie des conditions d'utilisation des moyens de mise en forme. En effet, chaque défaillance du système de

production est due à une ou plusieurs causes dont les conséquences affectent systématiquement le produit fini. Ainsi, pour limiter la maintenance curative le service de production a besoin de savoir si le procédé est bien paramétré pour remplir sa fonction dans les meilleures conditions de qualité de production, de délais de production et de sécurité. Il importe de bien préciser, qu'une presse de forgeage n'est qu'un intermédiaire entre l'outillage (les matrices) de mise en forme et la pièce à produire. La machine en effet fournit à l'outillage les déplacements et l'énergie nécessaires à son utilisation; pour une puissance donnée de la presse, ces déplacements sont plus ou moins rapides suivant la nature du métal constituant la pièce à forger, la forme de cette pièce et de l'empreinte dans les matrices. La machine doit fournir la puissance nécessaire à l'exécution du forgeage. Par ailleurs, l'outillage fait l'objet d'études poussées; puisque c'est un consommable onéreux pouvant affecter la production lors de son endommagement prématuré entraînant des pertes de production importantes. Les éléments suivants, les formes des empreintes et leur évolution, leur résistance et l'influence des facteurs physiques tels que les échauffements, les vibrations et les déformations qu'ils subissent permettent d'examiner les problèmes et d'étudier les risques associés aux outillages. Toutes les observations effectuées par les chercheurs sur l'outillage de mise en forme par forgeage ont permis d'arriver à des résultats d'ordre pratique extrêmement intéressants mais les exigences croissantes du marché de plus en plus compétitif, contraignent les producteurs et mainteneurs des pièces forgées à travailler sur l'amélioration des points faibles de leur système de production en l'occurrence l'outillage, pour le rendre plus résistant.

Dans cet environnement le forgeron doit se doter d'un outil de prise de décision déterminant le changement de l'outillage au moment opportun et avec la meilleure performance possible. Ainsi, la détermination d'un indice permettant de mesurer la performance d'un système de mise en forme complexe comme les ateliers de forge va contribuer à éviter les arrêts de maintenance curative impliquant des coûts de non-maintenance.

C'est dans ce contexte que s'inscrit le travail de thèse. Ainsi, le travail de cette thèse est scindé en 5 chapitres :

- Le premier chapitre présente l'état de l'art des travaux de recherche qui ont permis de développer une méthodologie d'évaluation d'un indice de performance d'un procédé de forgeage. Il est divisé en 3 parties principales relatant dans l'ordre l'état de l'art :
 - sur les indices de performance en maintenance industrielle,

- sur la modélisation et la simulation des procédés de mise en forme,
- sur l'analyse fiabiliste des procédés de mise en forme.

Ces trois volets introduisent les éléments de compréhension pour rechercher une méthodologie pour l'évaluation d'un indice de performance dans un procédé de mise en forme. L'objectif est atteint au moyen de la combinaison de deux outils d'analyses des moyens de production comme les modèles de calculs des procédés de mise en forme et les modèles de calculs de la fiabilité des matériaux et des structures. D'abord, la recherche bibliographique s'est orientée vers les différents travaux en rapport avec les indices de performances. Ces derniers servent à mesurer une réalité de production avec clarté, contrôler la réalisation des objectifs fixés, comparer des unités distinctes, entreprises ou secteurs d'activité et prendre des décisions adaptées. Pour la maintenance, ces objectifs ne servent pas seulement à évaluer l'impact d'une stratégie de maintenance, mais ils permettent d'identifier des forces ou des faiblesses techniques, économiques ou organisationnelles, et de décider d'actions d'amélioration, et en se focalisant encore davantage, ils permettent aussi à quantifier les progrès à réaliser. Puis, les recherches se sont concentrées sur les moyens et les méthodes d'analyse pour apporter des solutions à des problèmes complexes, tel que l'endommagement et la fissuration de l'outillage pour la prédiction de sa durée de vie. De nos jours, la capacité et les performances des outils de modélisation et de simulation des procédés de mise en forme pour analyser leur comportement, particulièrement l'interaction pièce-outils, est indiscutable. Cependant malgré leur efficacité, les résultats peuvent facilement être influencés par les incertitudes associées aux valeurs des paramètres d'entrée et des paramètres impliqués dans les lois de comportement rhéologique, de mécanique des milieux continus et d'endommagement, supportés par ces outils. Pour analyser d'une manière réaliste et plus précise le comportement réel d'un procédé de mise en forme en prenant en compte les incertitudes des paramètres géométriques de l'interaction pièce-outils, les outils d'analyse de la fiabilité mécanique des structures peuvent apporter des informations beaucoup plus explicites en prenant en compte les différentes sources de variabilité des paramètres jouant un rôle significatif pour l'instant.

- Le deuxième chapitre introduit une des problématiques de l'industrie de forgeage liée au coût de l'outillage, de 20%, de la production. Dans ces conditions, il est nécessaire de savoir déterminer la durée vie de l'outillage et d'œuvrer à son amélioration. La

modélisation numérique des moyens de production et des paramètres process associés permet de faire des analyses profondes pour apporter des solutions pour l'amélioration de la durée de vie de l'outillage. Donc l'optimisation des paramètres des moyens de production intéresse de près et le service exploitation et le service de maintenance car la durée de vie de l'outillage préoccupe toujours et est souvent mal estimée. Les tâches de la maintenance ne se résument plus à programmer des actions d'intervention, mais elle se doit de modéliser et d'analyser le système de production sur la base d'une meilleure compréhension du problème du processus de production, en l'occurrence les problèmes de l'outillage de forgeage, de la définition du rôle stratégique du système de production, et de la planification des actions d'inspection pour entreprendre au mieux les actions de prévention et d'entretien. Elle est aussi appelée d'entreprendre des études du système de production au moyen d'outils de modélisation et de simulation des procédés de mise en forme afin d'optimiser les paramètres d'entrée qui doivent être bien identifiés et aussi pour comprendre leur influence sur le système et le couplage entre eux.

- Le troisième chapitre contribue à développer une méthodologie pour rechercher des indices de performance de l'outillage de forge. Pour répondre aux préoccupations des industriels les modèles d'analyses du comportement du process de production et des éventuels endommagements qui peuvent en découler, une méthodologie d'élaboration d'un concept d'évaluation d'un indice de performance en maintenance doit être développée. Ceci mène à établir une stratégie d'évaluation des indices de performances en maintenance qui doit prendre en considération des critères bien définis. Des supports de calcul et d'analyses sont utilisés en fonction des données de départ et des objectifs à atteindre. Le présent concept bien qu'il s'inspire d'un cas industriel réel, il reste valable pour tous les procédés de mise en forme. L'important est de suivre la stratégie développée en mettant en clair les modèles de comportement, d'endommagement, et de les combiner et puis faire des analyses fiabilistes qui donnent des outils d'aide à la décision comme l'indice de fiabilité, les facteurs de sécurité et la sensibilité des variables afin d'évaluer un indice de performance.
- Le quatrième chapitre présente la contribution principale de ce travail. Elle consiste à appliquer le concept décrit ci-dessus sur une matrice de forgeage à chaud. Elle commence par l'analyse du processus de mise en forme d'un levier de direction en relatant les objectifs à atteindre et les éventuelles défaillances qui peuvent causer l'arrêt de la production. L'analyse de la durée de vie de la matrice de forgeage est réalisée par couplage

mécano-fiabiliste qui consiste à développer un modèle mécanique couplant le modèle rhéologique de Hansel & Spittel avec un modèle d'endommagement de Lemaître et Chaboche. Les incertitudes associées aux paramètres de calcul sont insérées à travers leur loi probabiliste. Le but est d'éviter un scénario exprimé par un état limite relatif à l'endommagement critique. Les calculs de fiabilité ont pour objectifs de déterminer la probabilité de défaillances et la sensibilité des paramètres d'entrée et de sortie du procédé d'estampage. L'évaluation de la performance d'une matrice d'estampage consiste à déterminer sa durée de vie. Pour une matrice présentant une amorce de fissure due à la fatigue, sa durée de vie dépend du nombre de frappes lié étroitement aux exigences requises par la gamme de production et du nombre de pièces à forger.

- Le cinquième chapitre analyse et discute les résultats de recherche sur l'évaluation d'un indice de performance dans une matrice d'estampage d'un levier de direction. Les discussions portent sur tous les points qui ont permis d'évaluer un indice de performance à savoir, l'évolution des déformations dans une matrice de forgeage, la distribution des températures dans la matrice pendant l'estampage et les effets des variables aléatoires sur la performance des matrices.

Une conclusion générale synthétise les principaux résultats et aussi axée sur chacun des points sensibles de ce travail.

Enfin une liste de références bibliographique en liaison étroite avec le sujet est fournie, avant de clôturer la thèse avec les annexes.

CHAPITRE I

Etat de l'art sur le concept de recherche des indices de performances dans les systèmes de production discontinue

Chapitre I Etat de l'art sur le concept de recherche des indices de performances dans les systèmes de production discontinue

I.1 État de l'art sur les indices de performances

I.1.1 Définition et contexte : la performance et indice clés de performance

Le terme « performance » est apparu vers le XIIIème siècle. Il définit l'accomplissement d'une action [ESCAFFRE]. Au fil du temps sa définition est devenue plus large : elle est le résultat d'une action ou encore une mesure d'un processus de réalisation. La performance industrielle est synonyme de la productivité des moyens mis en œuvre. La définition de performance varie suivant les époques et les domaines dans lesquels on se place [RAVELOMANANTSOA].

Dans le domaine des sciences pour l'ingénieur, la notion de performance est très rarement définie car considérée comme implicitement connue. La performance est toujours au cœur des préoccupations des ingénieurs et chercheurs, mais chacun l'aborde selon sa propre optique. Dans le domaine du contrôle-qualité, elle est assimilée le plus souvent à un indicateur de performance : temps d'exécution, quantité d'opérations, quantité de ressources utilisées... La plupart du temps, on considère qu'une proposition contribuant à l'amélioration de l'un de ces indicateurs génère une réduction des coûts et implicitement une amélioration des performances [SENECHAL].

I.1.2 Indicateurs de performance en maintenance industrielle

I.1.2.1 Intérêt

Les indicateurs servent à mesurer une réalité avec clarté, contrôler la réalisation des objectifs fixés, comparer des unités distinctes, entreprises ou secteurs d'activité et prendre des décisions adaptées (politique de maintenance, gestion du personnel,...). L'étude des indicateurs peut s'appréhender à différents niveaux [BELHOMME] :

- au niveau d'un secteur d'activité ;
- au niveau d'une section d'activité (forge, fonderie, usinage)
- au niveau de l'entreprise face à son secteur d'activité ;
- de l'évolution de l'entreprise elle-même ;
- de la fonction maintenance au sein de l'entreprise ;
- de l'évolution de la fonction maintenance elle-même ;
- au niveau des relations client-fournisseur pour mesurer les performances de ce dernier face aux obligations de résultats définies contractuellement.

Chapitre I Etat de l'art sur le concept de recherche des indices de performances dans les systèmes de production discontinue

Le souci de la performance, de la fiabilité et de la sécurité existe depuis très longtemps, probablement depuis que l'homme a conçu ou forgé ses premiers instruments. La manipulation de ces derniers a conduit l'homme à des améliorations. Celles-ci ont permis de constater que le progrès technologique attribué à l'ingéniosité de l'être humain permet d'effectuer les tâches beaucoup plus facilement, en moins de temps et à moindre coût. Aujourd'hui, la compétition entre les entreprises sur le marché mondial est de plus en plus soutenue. Dans ce contexte, l'efficacité des équipements, des systèmes et des procédés est un des facteurs clés qui déterminent la compétitivité et la rentabilité des diverses compagnies dans tous les secteurs industriels. Pour améliorer la performance et l'efficacité des équipements ou des procédés, il est primordial de quantifier leurs facteurs contributeurs. Ceci est fait communément à l'aide des indicateurs de performance clés (*Key Performance Indicator* KPI), [LAFONTAINE].

Dans le contexte de concurrence entre les entreprises, la création d'un système d'indicateur clé de performance KPI sert comme un moyen important pour consolider la gestion de la performance et accroître la compétitivité, [NING].

I.1.2.2 Indicateurs de maintenance

Au cours des dernières décennies, afin d'assurer une bonne performance de l'usine de production, les responsables de maintenance ont besoin d'une bonne vue de l'ensemble des processus et des réalisations d'entretien, global et local. La compétitivité et la performance des entreprises de fabrication dépendent de la disponibilité, la maintenabilité, la fiabilité et la productivité de leurs équipements de production [HORENBEEK, MUCHIRI]. Cette reconnaissance a conduit à un changement radical de la perception sur la maintenance [MUCHIRI]. Pour avoir cette vue d'ensemble, le service maintenance utilise des indicateurs de maintenances qui adoptent des critères, réalisent des mesures, utilisent des moyens de mesures permettant de prendre des décisions pour une meilleure une meilleure prévision des actions de maintenance et améliorer la performance de la maintenance.

Souvent, plusieurs KPI existent au sein d'une même société de production, mais ils restent mal exploités et incompréhensibles, c'est ce qui ressort d'une étude récente sur l'amélioration de la performance d'une des plus grandes sociétés pétrochimiques du monde, composée de plusieurs unités de production [Assaf]. En effet, l'étude a pris en considération 14 indices de performances générés automatiquement, mais ils ne sont jamais couplés ensemble pour avoir

Chapitre I Etat de l'art sur le concept de recherche des indices de performances dans les systèmes de production discontinue

une meilleure vue de l'ensemble des travaux de maintenance et de les rendre performants. Une analyse d'enveloppement de données (DEA, *data envelopment analysis*) avec le concours d'experts en maintenance industrielle a permis de classer ces indices en 5 catégories basées sur : la fiabilité, les coûts de maintenance, les échéanciers, les travaux d'entretien non ordinaires et l'équipe d'entretien. Ainsi, les 5 catégories des KPI qui en résultent pour la maintenance sont présentées dans les tableaux I.1 et I.2.

I.1.2.2.1 KPI basée sur la fiabilité

Cette catégorie comprend trois mesures de la fiabilité du système, à savoir, le temps moyen entre pannes (MTBF, *mean time between failure*), la disponibilité d'équipement (τ), et le rapport d'entretien préventif (PMR, *preventive maintenance ratio*). Le tableau I.1 donne la description de ces indicateurs de performance ainsi que leurs mesures ciblées.

Tableau I.1 : Indicateurs clé de performance de fiabilité.

KPI	Description	Équation
1. Moyenne des temps entre 2 défaillances (MTBF) (Cible > 36 mois)	MTBF est la moyenne des temps de fonctionnement de l'équipement avant d'échouer. Elle est généralement représentée en unités d'heures / jours / mois.	$MTBF = \frac{\sum Uptime}{Nb\text{redépannes}}$
2. La disponibilité de l'équipement (τ) (cible > 90%)	τ indique la proportion de disponibilité pour une période donnée.	$\tau = \frac{Uptime}{Uptime + Downtime}$
3. Rapport d'entretien préventif (PMR) (cible 40-60%)	PMR est le rapport de PM en heures au total des heures d'entretien réels. Cet indicateur est utile pour déterminer le nombre d'homme-heures pour une PM afin d'assurer la disponibilité et la fiabilité des équipements.	$PMR = \frac{PM\text{man hours}}{Total\text{maintenance hours}}$

I.1.2.2.2 KPI basée sur les coûts de maintenance

Le tableau I.2 montre les mesures de KPI liées aux coûts de maintenance. Il comprend les coûts de maintenance et des travaux d'urgence (EMC, *emergency and maintenance cost*) et le respect du budget de la maintenance (MBC, *maintenance budget compliance*). Dans de nombreuses situations, les coûts de maintenance peuvent être supérieurs aux estimations initialement prévues. Les travaux de maintenance sont de différents types, travaux d'extrême urgence, travaux urgents, travaux à refaire, et les travaux de maintenance préventive (PM, *preventive maintenance*). Dans cette catégorie, l'accent est mis sur les types d'extrême urgence et urgents. L'objectif est de faire en sorte que les coûts EMC ne doivent pas dépasser

Chapitre I Etat de l'art sur le concept de recherche des indices de performances dans les systèmes de production discontinue

10% du budget d'entretien. En outre, le budget de la maintenance MBC ne doit pas dépasser 95% des coûts estimés. Cela doit permettre d'assurer la disponibilité des ressources financières pour répondre à toute éventuelle action d'entretien émergeant des ordres de travail. Il ne convient pas d'avoir un grand écart entre le coût réel et le coût prévu. L'écart peut indiquer une estimation insuffisante des coûts de maintenance ou une mauvaise prédiction de la performance des équipements. Les coûts de maintenance incluent: les matériaux, les frais généraux, et le service.

Tableau I.2 : KPI basés sur les coûts de maintenance.

KPI	Description	Équation
4. Coût de maintenance d'urgence(EMC) (objectif <10%)	EMC est utilisé pour l'exécution des ordres de travail d'urgence. Cet indicateur est précieux pour veiller à ce qu'aucun coût d'urgence de maintenance excessif ne soit atteint.	$EMC = \frac{\text{Coût de l'ordre de travail d'urgence}}{\text{budget maintenance}} \times 100$
5. Respect du budget de maintenance (MBC) (objectif <95%)	MBC est le rapport entre le coût de maintenance réelle au coût du budget de maintenance. Si MPC est supérieure à 95%, il implique la non-conformité avec l'ensemble budget.	$MBC = \frac{\text{Coût total réel des ordres de travail}}{\text{budget maintenance}} \times 100$

I.1.2.2.3 KPI basée sur des échéanciers

Cette catégorie comprend trois mesures qui se rapportent à des dates, comme indiqué dans le tableau I.3. Ces mesures sont : l'échéancier des réalisations (SA, *schedule attainment*) ; l'échéancier des réalisations de la maintenance préventive (PMSA, *preventive maintenance schedule attainment*), et l'indice des heures de retard (BHI, *backlog hour index*). SA doit être supérieur à 90%. La réalisation des travaux préventive vise à être complètement satisfaite, 100%, ce qui signifie que pas tous les ordres de travail sont exécutés et achevés. La valeur de BHI est estimée acceptable entre 18 et 24.

I.1.2.2.4 KPI d'entretiens non ordinaires

Cette catégorie comprend les indicateurs de performance clés de maintenance non-ordinaires pour des types différents de maintenance à savoir, interventions d'extrême urgence, interventions d'urgence, travaux à refaire.

Chapitre I Etat de l'art sur le concept de recherche des indices de performances dans les systèmes de production discontinue

L'extrême urgence implique des travaux qui doivent démarrer dans l'immédiat. L'urgence implique des travaux d'entretiens qui doivent démarrer en temps opportun et dans les meilleurs délais. Reprise (refaire) des travaux s'applique en général aux travaux d'entretien défectueux. Les causes probables de défaillances peuvent être dues à l'erreur humaine, à une mauvaise utilisation de matériels, à un problème de conception, à un manque de travaux préventifs, manque de compétences techniques ou d'informations utiles etc. Cet indicateur est très utile pour capturer les problèmes des travaux de réparation qui nécessitent des analyses approfondies.

Tableau I.3 : KPI basée sur les échéanciers.

KPI	Description	Équation
6. Echéanciers des réalisations (SA) (Cible > 90%)	SA est le rapport entre le nombre de travaux exécutés dans les délais et le nombre total des travaux réalisés pendant cette période. Il mesure efficacement le respect de la durée des travaux.	$SA = \frac{\text{travaux non terminés dans les délais prévus}}{\text{total des travaux programmés non terminés}} \times 100\%$
7. la réalisation du plan de Maintenance préventive (PMSA) (cible 100%)	PMSA est le rapport entre le nombre des travaux de maintenance préventive PM exécutés dans les délais et nombre total des travaux de maintenance PM réalisés au cours de cette période. Il mesure efficacement la conformité du programme des travaux de maintenance préventive.	$PMSA = \frac{\text{travaux de PM non terminés dans les délais prévus}}{\text{total travaux PM programmés non terminés}} \times 100\%$
8. Indice des heures de retard (BHI) (Cible 18-24)	BHI est le rapport entre le total des heures de retard de tous les travaux en attente d'exécution et la capacité disponible (homme-heures disponibles total). Il mesure le temps suffisant pour une planification et un ordonnancement précis, et l'utilisation effective des ressources de maintenance.	$BHI = \frac{\text{total d'heure d'arrêt}}{\text{Capacité disponible}}$

Le tableau I.4 décrit trois indicateurs relatifs aux types d'entretien urgent. Ce sont le pourcentage d'entretien d'extrême urgence (EMP, *emergency maintenance percentage*), le

Chapitre I Etat de l'art sur le concept de recherche des indices de performances dans les systèmes de production discontinue

pourcentage d'entretien urgent (UMP, *urgent maintenance percentage*), et taux retravailler (RR *Rework Rate*).

Tableau I.4 : KPI emplois d'entretien non-ordinaires.

KPI	Description	Équation
9. Pourcentage de maintenance d'extrême urgence(EMP) (Objectif <5%)	EMP est le pourcentage des heures de travail d'extrême urgence en dehors du nombre total des heures de maintenance. Cet indicateur contrôle les activités non planifiées et les coûts de maintenance. Il améliore également l'utilisation des ressources de maintenance.	$EMP = \frac{\text{heures de travail d'extrême urgence}}{\text{Nombre total d'heures de maintenance}} \times 100\%$
10. Pourcentage Maintenance d'urgence pourcentage (UMP) (Objectif <20%)	UMP est le pourcentage des heures de travail d'urgence en dehors du nombre total des heures de maintenance. Cet indicateur est utile pendant le processus d'ordonnancement.	$UMP = \frac{\text{heures de travail d'urgent}}{\text{Nombre total d'heures de maintenance}} \times 100\%$
11. Taux de retravailler (RR) (Objectif <1%)	RR est le rapport des heures consommées dans les ordres de reprise des travaux sur le nombre total des heures de maintenance. Un ordre de reprise de travail est déposé pour un échec répété de l'équipement dans un court délai. Il indique que, initialement, le travail n'a pas été effectué correctement et complètement.	$RR = \frac{\text{heures de retravailler}}{\text{Nombre total d'heures de maintenance}} \times 100\%$

I.1.2.2.5 KPI basée sur l'équipe de maintenance

Cette catégorie comprend des mesures qui se rapportent à la performance de l'équipe de maintenance. Le tableau I.5 décrit trois indicateurs de performance clés, à savoir, estimation de la précision en homme-heure (MHEA, *man hour estimation accuracy*), utilisation des ressources humaines en homme-heure (MHU *man hour utilization*), et le taux des heures supplémentaires (OR, *Overtime Rate*).

Tableau I.5 : KPI d'équipe de maintenance.

KPI	Description	Équation
12. Estimation de la précision homme-heure (MHEA) (Objectif 90-110%)	MHEA est le rapport entre le nombre estimé d'heures de travail et le nombre réel d'heures de travail passé lors de l'exécution des travaux.	$MHEA = \frac{\text{homme -heures estimées}}{\text{heures de travail réelles}} \times 100\%$
13. Utilisation homme-heure (MHU) (cible> 80%)	MHU est le rapport du nombre réel d'heures de travail et le nombre d'heures de travail disponibles. Cet indicateur est	$MHU = \frac{\text{heures de travail réelles}}{\text{heures de travail disponibles}} \times 100\%$

Chapitre I Etat de l'art sur le concept de recherche des indices de performances dans les systèmes de production discontinue

<p>14. Taux d'heures supplémentaires (OR) (Objectif 5-8%)</p>	<p>utilisé pour contrôler la bonne utilisation de la disposition des ressources.</p> <p>OR est obtenu en divisant le nombre d'heures supplémentaires par le nombre total des heures (prévues et supplémentaires)</p>	$OR = \frac{\text{heures de travail disponibles}}{\text{régulières} + \text{supplémentaires}} \times 100\%$
---	--	---

I.1.2.3 Types de mesure des indicateurs clés de performance

Une enquête sur l'exploration des indicateurs clés de performance réalisée récemment par Badwy et all [BADAWY] a montré que de nombreuses entreprises travaillent avec de mauvaises mesures et mal interprétées en indicateurs clés de performance (KPI, *Key performance indicators*). Très peu d'organisations connaissent leurs véritables indicateurs de performance parce qu'en réalité, peu de dirigeants, d'acteurs des entreprises, experts et consultants ont exploré les KPI de leur entreprise pour les exploiter d'une manière rationnelle. Pour y arriver, il faut savoir mesurer la performance. Quatre types de mesures de la performance [PARMENTER] peuvent être retenus :

1. KRI : Indices clés de résultats montrant ce qui a été fait dans une perspective donnée par rapport à un facteur critique de succès correspondant à l'efficacité.
2. RIs (*result indicators*) : Indices de résultat renseignant sur ce qui est en train de se faire.
3. PIs (*performance indicators*) : Indices de performance renseignant sur ce qui devra être fait.
4. KPI: Indices Clés de performance renseignant sur ce qu'il faut faire pour augmenter fortement les performances.

Pour décrire la relation entre ces quatre types de mesure de performance, Parmenter [PARMENTER] a fait une analogie avec une vue en coupe d'un 'oignon' figure I.1. La peau extérieure décrit l'état général de l'oignon renseignant sur la quantité de soleil, la quantité d'eau et de nutrition qu'elle a reçu. La peau extérieure est l'indice clé du résultat KRIs. Puis, la coupe transversale de l'oignon, montre les différentes couches qui renseignent sur la manière elle a été transportée du champ de cueillette vers les étals des marchés. Plus les premières couches internes sont juteuses et humides, brillantes, plus la qualité initiale de

Chapitre I Etat de l'art sur le concept de recherche des indices de performances dans les systèmes de production discontinue

l'oignon est conservée. Dès que les couches sèchent et se dégradent, la qualité de l'oignon est réduite. Le nombre de couches dégradées indique la dégradation de l'oignon. Dès que les couches intermédiaires entre les premières couches internes et le noyau de l'oignon sont elles-mêmes touchées par la sécheresse et la dégradation, la qualité de l'oignon se détériore encore plus. C'est ce qui est exprimé par l'indicateur de performance des moyens de transport et de conservation. Si le noyau est lui-même dégradé alors, la qualité de l'oignon a chuté dramatiquement. A ce phénomène s'ajoute évidemment le facteur temps de conservation. Donc, la décision de réduire le prix de vente de l'oignon en fonction des ventes et du temps aussi bien que le retrait de l'oignon de l'étalage revient aux décideurs sur la base du KPI.

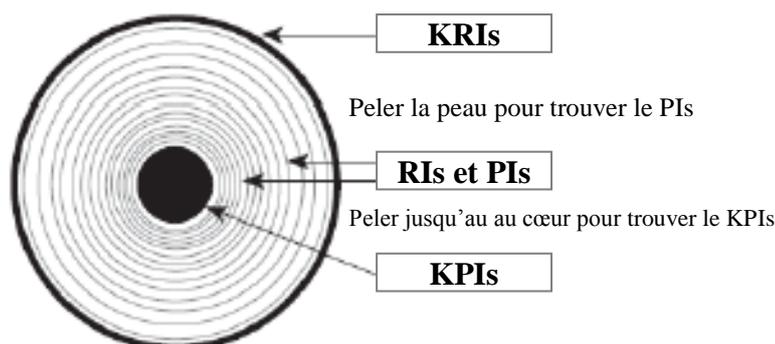


Figure I.1 : Quatre types de mesures de performance. [PARMENTER]

I.1.2.4 Systèmes de mesure des indicateurs clés de performance

Une bonne performance de l'usine de production peut être atteinte par un système de mesure de la performance de maintenance rigoureusement défini (MPM, *maintenance performance measurement*) et des indicateurs de performance de la maintenance (MPI, *maintenance performance indicators*). [HORENBEEK]. La mesure de la performance de la maintenance doit être définie à tous les niveaux de gestion (à savoir stratégique, tactique et opérationnel) [MUCHIRI].

Dans les entreprises de fabrication mécaniques, la performance et la compétitivité sont dépendantes de la fiabilité, la maintenabilité, la disponibilité et la productivité de leurs moyens de production. Pour s'assurer que l'entreprise remplit la performance requise, les décideurs de la maintenance ont besoin de suivre rigoureusement les procédés de

Chapitre I Etat de l'art sur le concept de recherche des indices de performances dans les systèmes de production discontinue

maintenance. Pour répondre à cette nécessité, il faut développer une plateforme de mesure de la performance suggérant des indices de performances capables de contrôler les actions de la fonction maintenance. La figure I.2 illustre une plateforme de mesure de la performance pour la maintenance [MUCHIRI]. Elle suggère une méthode d'organisation pour choisir les indices de performances mettant en relief les objectifs à atteindre à travers une formulation claire de la stratégie de la maintenance. Elle démontre que les indices de performances ne doivent pas être définis séparément mais ils sont générés par une analyse profonde entre l'interaction de la fonction maintenance avec les fonctions d'organisation, particulièrement la fonction production.

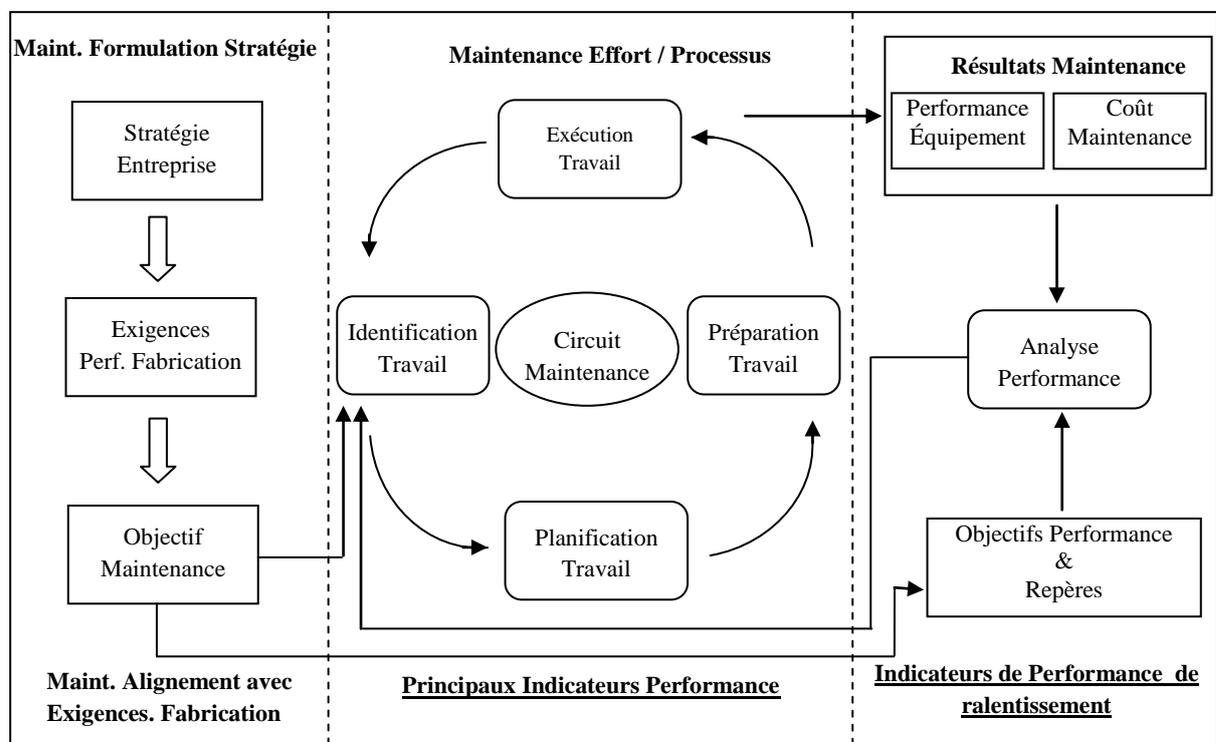


Figure I.2 : Illustration de la méthodologie de mesure de la performance de la fonction maintenance. [MUCHIRI]

Compte tenu qu'il existe un grand nombre d'indice de performance [INGEXPERT, LAFONTAINE], chaque service de maintenance doit trouver les indices qui lui conviennent. Pour qu'un indice soit significatif et exploitable, il faut que les valeurs utilisées qui le composent soient mesurables et définies avec précision. Il doit permettre de contrôler et de vérifier l'atteinte des objectifs et le bon fonctionnement du processus. A cet effet, deux indicateurs principaux sont exploitables qui sont les indicateurs techniques et les indicateurs financiers. Mais souvent la performance de la maintenance industrielle se repose sur des

Chapitre I Etat de l'art sur le concept de recherche des indices de performances dans les systèmes de production discontinue

indicateurs techniques des différentes activités de la maintenance [INGEXPERT, LAFONTAINE] :

- Indicateur quantité d'intervention (Iq) : nombre pannes par mois

- Indicateur de maintenance préventive (Imp) :

$$(\sum \text{heuredemintenncepréventive})/(\sum \text{heuresdemaintenance})$$

- Indicateur de maintenance corrective (Imc) :

$$(\sum \text{heuredemintenncecorrective})/(\sum \text{heuresdemaintenance})$$

- Indicateur de réactivité (I réac) : Temps d'intervention / Temps d'arrêt machine

- Indicateur de fiabilisation (MTBF) : *Mean Time Between Failure*, correspond à la moyenne des temps entre 2 défaillance d'un système réparable.

$$(\sum \text{Temps de bon fonctionnement})/ \text{Nbre de panne}$$

- Indicateur de compétence (MTTR) 'maintenabilité des équipements' : *Mean Time To Repair*, correspond à la durée moyenne d'attente de la réparation du système (MTTR) Opérationnel : correspond au temps moyen d'une action de maintenance corrective.

$$(\sum \text{Temps technique de réparation})/ \text{Nbre de pannes}$$

- Indicateur d'indisponibilité (d-1=1-D) :

$$\text{MTBF}/ (\text{MTBF}+\text{MTTR})$$

I.1.2.5 Objectifs des indicateurs de maintenance

Les indicateurs peuvent avoir différents usages qu'il est important de distinguer avant de chercher à les définir [DESPUJOLS] :

- Ils servent à la direction pour fixer des objectifs à atteindre en termes de performances et contribuer à renforcer la synergie du personnel de l'entreprise en l'incitant à concentrer ses efforts sur un axe particulier (par exemple : un niveau de disponibilité à atteindre, un objectif de réduction des accidents, un budget à tenir, un respect de contraintes environnementales, etc.).
- Ils sont utilisés pour évaluer l'impact d'une stratégie de maintenance sur les performances de manière à prouver son efficacité ou au contraire le besoin de la modifier. C'est en estimant la valeur apportée par les interventions qu'il est possible de montrer que la maintenance est une source de profits plutôt qu'une ligne de dépenses.

Chapitre I Etat de l'art sur le concept de recherche des indices de performances dans les systèmes de production discontinue

- Des indicateurs plus détaillés permettent aux responsables de maintenance d'identifier des forces ou des faiblesses techniques, économiques ou organisationnelles, et de décider d'actions d'amélioration.
- En se focalisant encore davantage sur des actions spécifiques mises en œuvre, ils permettent de quantifier les progrès réalisés et ils contribuent ainsi à motiver le personnel en montrant l'avancement des projets et les résultats des efforts fournis. Il faut noter également que certains indicateurs sont utilisés pour gérer les relations contractuelles avec les prestataires de maintenance.

Dans cette partie, il faut retenir que chaque entreprise manufacturière doit cibler des indices techniques et économiques qu'il faut exploiter. Face à la variabilité de la variance et la cadence des pièces, particulièrement formes complexes nécessitant de l'outillage spécifique avec une durée de vie bien ciblée, pouvant atteindre jusqu'à 15% du coût de production, le besoin d'avoir un indice de performance qui exprime la réalité de la performance des actions de la maintenance devient pertinent.

I. 2. État de l'art de la modélisation et la simulation des procédés de mise en forme

Dans l'industrie du forgeage, la durée de vie de l'outillage est au cœur des préoccupations comme les matrices d'estampage. Les efforts sont déployés au cours de la dernière décennie, dans le développement de technologies de pointe pour rendre le processus de fabrication précis et fiable. La durée de mise en forme correspondant à une frappe est trop court, environ 0.08 secondes, pour que le processus de forgeage soit observé et suivi [ŠRAML]. Par ailleurs pendant ce temps, la matrice est soumise à un début d'endommagement complexe et difficile à analyser en raison des interactions mutuelles entre les différents facteurs impliqués dans le mécanisme d'estampage [ALIMI]. Dans ces conditions, les recherches sur l'amélioration de la durée de vie des matrices se sont diversifiées et outillées par des moyens appropriés.

Bayramoglu et al [BAYRAMOGLU] ont étudié l'effet du revêtement sur la durée vie des matrices de forgeage. La performance des matrices a été évaluée sur la base du ratio du coût de l'outillage sur le coût total des pièces produites, dans des conditions réelles d'une chaîne de production. Comparativement aux matrices non revêtues et ayant subi une trempeet un revenu, la durée de vie des matrices revêtues a été améliorée. La meilleure performance est

Chapitre I Etat de l'art sur le concept de recherche des indices de performances dans les systèmes de production discontinue

observée pour les matrices revêtues de cobalt par soudage élevant la production de 892% plus élevé avec une réduction des coûts d'outillage de 80%.

Dans leurs travaux sur une matrice de forgeage en acier au Cr-Mo-V, à haute résistance à l'usure, Wei et al [WEI] ont observé le mécanisme d'usure en fonction du processus de traitement thermique. Ils ont montré que pour une combinaison appropriée de dureté, de la ténacité et de la stabilité thermique de la microstructure, la matrice a une meilleure à l'usure.

Le phénomène d'usure est accompagné par une énergie du frottement générant de la chaleur et de la déformation plastique. Avec l'augmentation de la charge (N), la chaleur augmente et avec la température de travail de l'outillage de 400 °C, la matrice s'adoucit sensiblement ce qui réduit sa résistance de la matrice et les sous couches à sa surface, figure I.3.

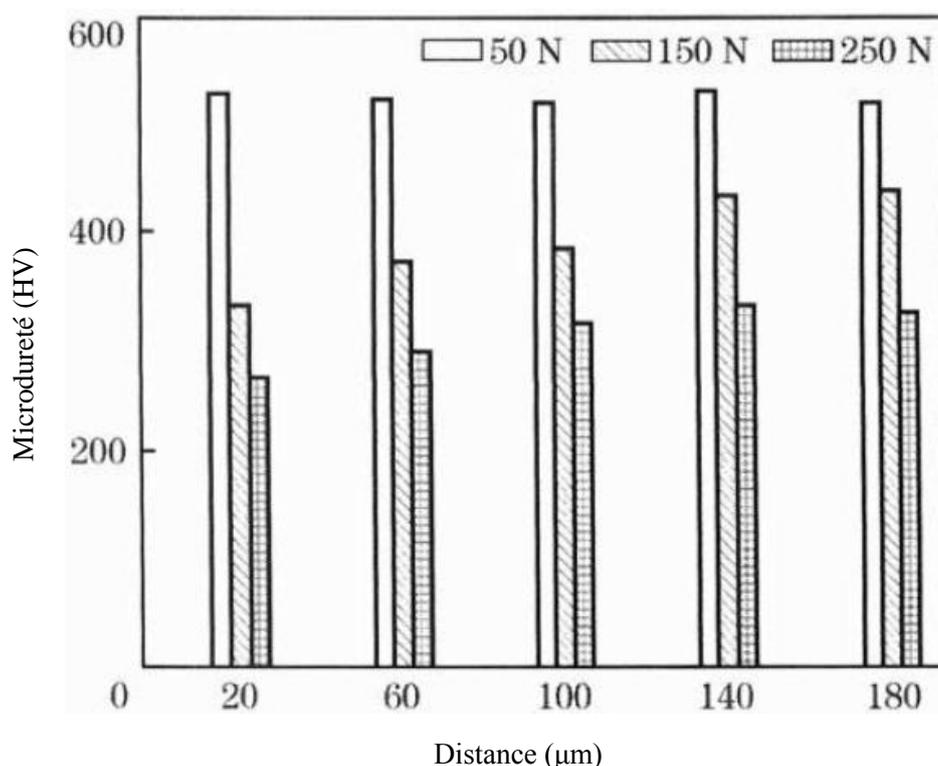


Figure I.3 : Distribution de la micro-dureté au-dessous de la surface usée dans une matrice préchauffée à 400°C, à différentes charges. [Wei]

Navinšek et al [NAVINSEK] ont eu recours aux revêtements en duplex BALINIT et FUTURA en vue d'améliorer le processus de forgeage à chaud de composants en acier. Des essais de performance effectués sur plus de 10000 pièces dans des conditions réelles de travail dans les

Chapitre I Etat de l'art sur le concept de recherche des indices de performances dans les systèmes de production discontinue

ateliers de forgeage à chaud d'UNIOR à Zreče, Slovénie, ont révélé que la durée de vie des matrices en duplex, a été considérablement améliorée par rapport à celles au revêtement unique.

Par conséquent, le recours aux simulations du forgeage offre des avantages significatifs en fournissant un aperçu détaillé du processus de forgeage afin de prendre une décision sur le procédé et l'outillage à utiliser au sein même de l'atelier de production [KHALILPOURAZARY]. Le Tableau I.6 montre les résultats, mesure de l'effort maximal de mise en forme, de forgeage d'une roue dentée conique obtenus par simulation et mesurés expérimentalement. La comparaison de ces résultats révèle que les écarts entre les résultats simulés et les résultats expérimentaux sont respectivement d'environ 7,5%, 4,6% et 3,11% pour le forgeage libre, la préforme et la finition.

Tableau I.6 : Comparaison des résultats de simulation et expérimentaux en forgeage. [KHALILPOURAZARY].

Étapes de forgeage		Forgeage initial (F1)	Forgeage intermédiaire (préforme) (F2)	Forgeage finale (F3)
Force (tonnes)	Valeurs numériques	52.05	219.775	434.55
	Valeurs expérimentales	56.3	230.5	448.5

L'importance de simuler les procédés de mise en forme à chaud, comme le forgeage dans l'industrie afin de résoudre avec précision de nombreux problèmes pratiques, a été rapportée pour la première fois en 1982 par Tang et al [TANG]. Ils ont montré le principe de modélisation d'un système de forgeage de pièce (figure I.4). Il est défini par la conception de l'outillage et puis sa fabrication. La conception démarre de la bonne connaissance de la pièce finie obtenue par usinage. A partir de cette dernière, la pièce brute doit être conçue afin de choisir les sections transversales de la matrice. Puis deux empreintes principales doivent être réalisées : la préforme et l'empreinte finie. Ces empreintes sont réalisées soit sur des machines à commande numérique soit par électrochimie. Une fois la matrice conçue et fabriquée, le procédé de forgeage peut commencer en veillant sur les paramètres d'entrée, volume de l'ébauche, le poids, le plan de joint (matrice est composée d'une matrice supérieure et d'une matrice inférieure) le chargement et les conditions de lubrification. La modélisation et

Chapitre I Etat de l'art sur le concept de recherche des indices de performances dans les systèmes de production discontinue

simulation doit correspondre à la réalité. Pour simuler un procédé de forgeage, chaque opération doit être considérée comme un système. Ce dernier est modélisé et analysé au moyen de logiciels de conception et de fabrication qui doivent intégrer les interactions entre les principales variables associées dans la fabrication de l'outillage de forgeage. Ces interactions impliquent le processus de forgeage en termes de flux de métal (cinématique), des formes géométriques et dimensions, des contraintes et des températures. En outre, la simulation de l'écoulement du métal permet de vérifier si les géométries initiale de la billette et de l'empreinte sur le bloc matrice sont conformes et suffisantes pour remplir les cavités des matrices afin de produire la pièce souhaitée, sans aucun défaut de forgeage.

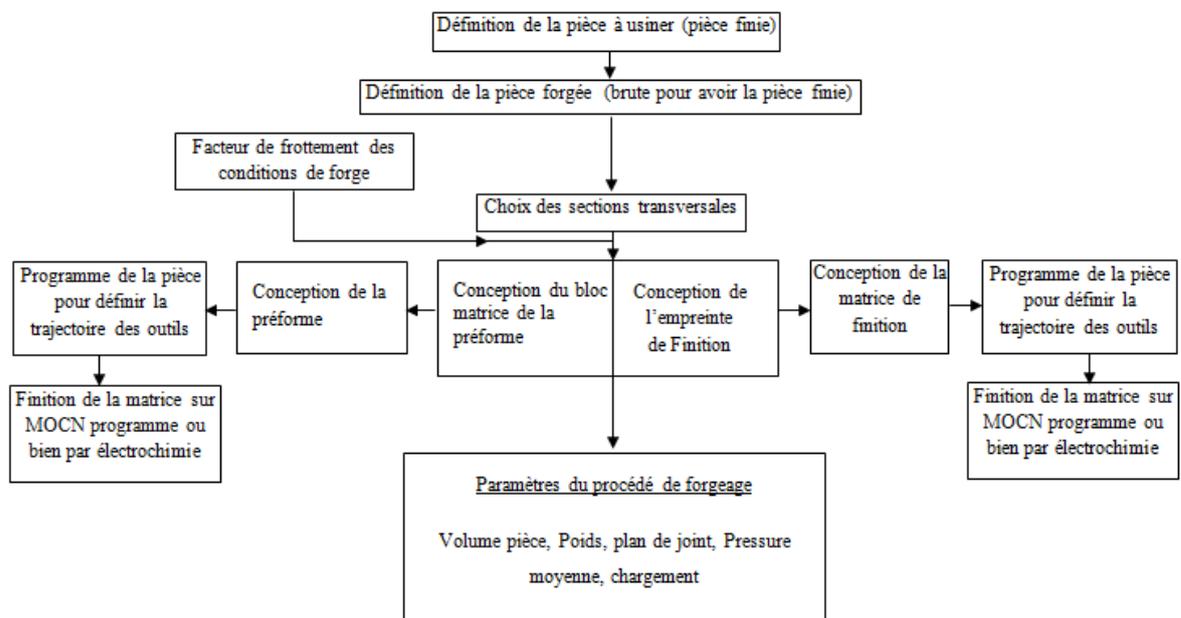


Figure I.4 : Organigramme d'un système d'intégration de conception et Fabrication pour la modélisation et simulation des opérations de forgeage Tang et al. [TANG]

Des années plus tard en 1999, dans le but d'améliorer la durée de vie de l'outillage de forgeage, Brucelle et Bernhart [BRUCELLE] ont présenté une méthodologie combinant simultanément les simulations numériques, les essais en laboratoire et les essais en industrie. Les simulations se reposent sur le code de calcul Forge2®, dédié aux travaux de mise en forme, sur le logiciel Ideas® pour le maillage et le code ABAQUS® pour le calcul de la contrainte thermique. La méthodologie a été appliquée pour fabriquer une pièce, support d'air bag, en acier austénitique inoxydable AISI 316, en utilisant des outils de poinçonnage. Elle a montré que la contrainte thermique induite par le gradient de température brusque pendant le forgeage correspond à 75% du champ de contrainte totale, dans les régions de la matrice où

Chapitre I Etat de l'art sur le concept de recherche des indices de performances dans les systèmes de production discontinue

les fissures de surface sont apparues. Une analyse paramétrique a permis d'optimiser le procédé de forgeage comme la température de la pièce et la vitesse de perforation qui ont conduit à une production de pièces conformes et un accroissement de la durée de vie du poinçon.

Au cours des quinze dernières années, la simulation numérique du processus de forgeage a connu un grand développement. Simuler le forgeage passe par la modélisation mathématique de l'écoulement de la matière et par la résolution de l'équation dynamique d'un milieu continu à comportement non linéaire dans le domaine des déformations plastiques. En effet, La modélisation mathématique de l'étape de mise en forme complète les expériences réalisées en laboratoire ou les mesures effectuées pendant le procédé réel. L'usage de méthodes numériques devient ainsi indispensable pour simuler le procédé de mise en forme. La plus courante est celle des éléments finis qui consiste à discrétiser un milieu continu en un nombre fini de sous domaines élémentaires de formes topologiques simples dans lesquels les équations constitutives sont satisfaites afin de pouvoir faire une approximation de la solution [HÉLÉNON]. Le développement d'outils de simulation numériques a permis d'améliorer la qualité de production à partir d'études paramétriques plus rapides et moins coûteuses. La mise au point d'une gamme de fabrication est alors facilitée par la connaissance des paramètres physiques lors de la mise en forme [STAUB]. La figure I.5 montre la simulation d'une gamme de forgeage d'un triangle de suspension de roue d'automobile [MILESI]. La simulation a été réalisée à l'aide du logiciel Forge2005®. Il s'agit d'un logiciel d'éléments finis 2D pour les configurations en déformations planes ou axisymétriques et 3D pour les configurations de tout type.

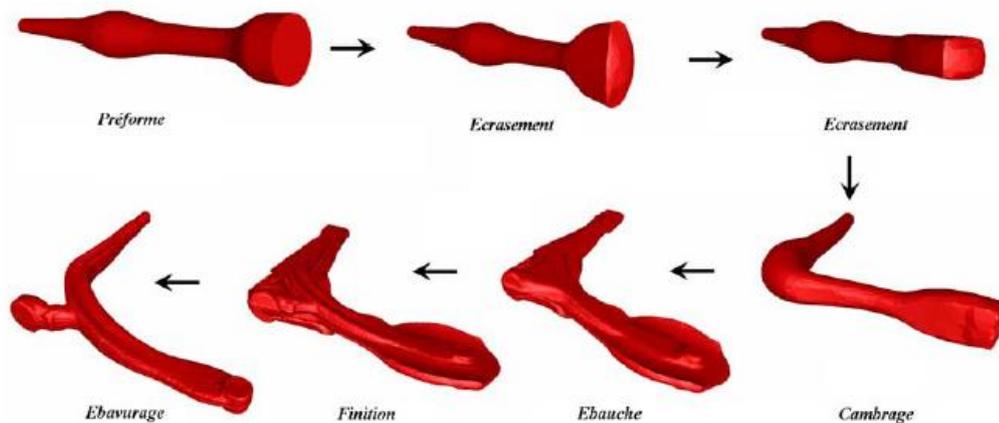


Figure I.5 : Simulation d'une gamme de Forgeage pour l'obtention d'un triangle de suspension.
[MILESI]

Chapitre I Etat de l'art sur le concept de recherche des indices de performances dans les systèmes de production discontinue

Arbak et al [ARBAK] ont étudié la production de cages de roulements par trois méthodes de forgeage à chaud. Le principal objectif a été de montrer qu'en intégrant une opération de préforme du lopin dans la gamme de forgeage des cages de roulements, Figure I.6, la durée de vie de la matrice est améliorée. Cependant, dans leur procédé de mise en forme, une étape supplémentaire a été ajoutée et éventuellement va engendrer des surcoûts qui doivent être pris en considération. Les expérimentations menées sur des matrices appropriées pour la préforme des pièces, ont été analysées au moyen d'un progiciel commercial de calcul par éléments finis MSC / AutoForge®. Les cages externe et interne sont obtenues en 4 opérations après le chauffage du lopin. Sur la première est réalisée la préforme, sur la deuxième, le forgeage avec matrice fermée, la troisième consiste au perçage pour obtenir la cage externe, et enfin dans la quatrième opération, la cage interne est isolée par perçage laissant tomber le disque central à jeter. Les simulations numériques ont montré qu'en rajoutant l'opération de préforme, la pression de forgeage peut-être réduite de 15%, impliquant une amélioration de la durée de vie de l'outillage.

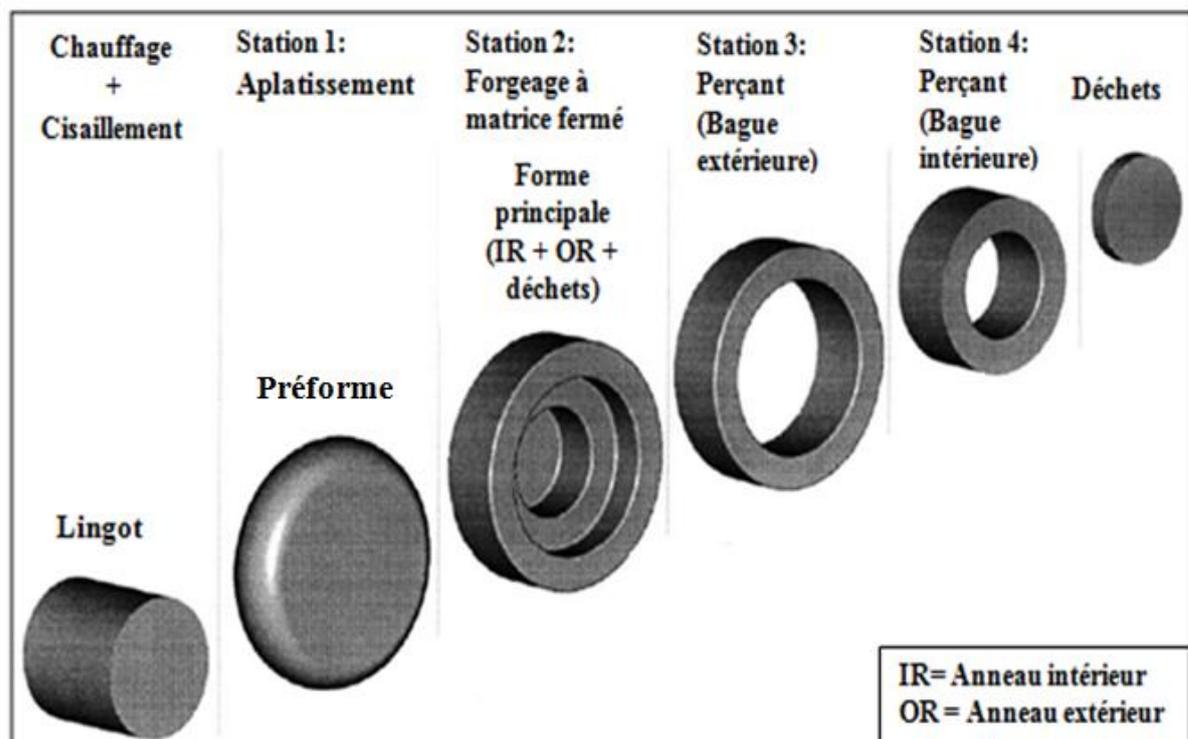


Figure I.6 : Les phases de mise en forme des brutes de cages de roulements par estampage. Arbak et al [ARBAK]

L'intérêt croissant de l'utilisation des codes de calcul numérique, a été mis en évidence par Hartley et Pillinger [HARTLEY] qui ont présenté un aperçu global sur les différents travaux de

Chapitre I Etat de l'art sur le concept de recherche des indices de performances dans les systèmes de production discontinue

recherche s'appuyant sur la simulation numérique des procédés de forgeage. Ils ont montré l'importance de remaillage dans la modélisation du procédé de forgeage dans des conditions réalistes quant à la modélisation géométrique correcte de la forme de la matrice, l'évaluation des contraintes sur la matrice et l'analyse de la défaillance de matrice. La figure I.7 illustre un changement de maillage triangulaire en maillage quadrilatère pour limiter le temps de calcul avec une même représentation de la pièce.

Depuis une décennie deux logiciels puissants DEFORM™ et Forge® sont communément utilisés pour la simulation des opérations de mise en forme. Ils offrent un grand nombre d'analyses paramétriques pour l'optimisation et le réglage des paramètres des machines de forgeage. Les travaux de Choi et al [CHOI] sont un bel exemple à considérer pour estimer la durée de vie de l'outillage. En effet au moyen du code DEFORM-2D, ils ont développé une méthode qui détermine les paramètres d'usure par abrasion afin d'estimer la défaillance de la matrice. Les résultats de mesure d'usure produits par la simulation numérique sont comparés aux résultats de mesure de l'usure sur pièce réel à l'aide d'une machine à mesurer tridimensionnelle (MMT). Les deux résultats sont proches et démontrent que la prédiction de la défaillance de la matrice est possible en employant la simulation par éléments finis et contribue énormément dans la minimisation des coûts et du temps à passer pour prédire cette défaillance par la méthode expérimentale. La figure I.8 illustre la validation de la méthode numérique dans la prédiction de l'usure des outils de forgeage.

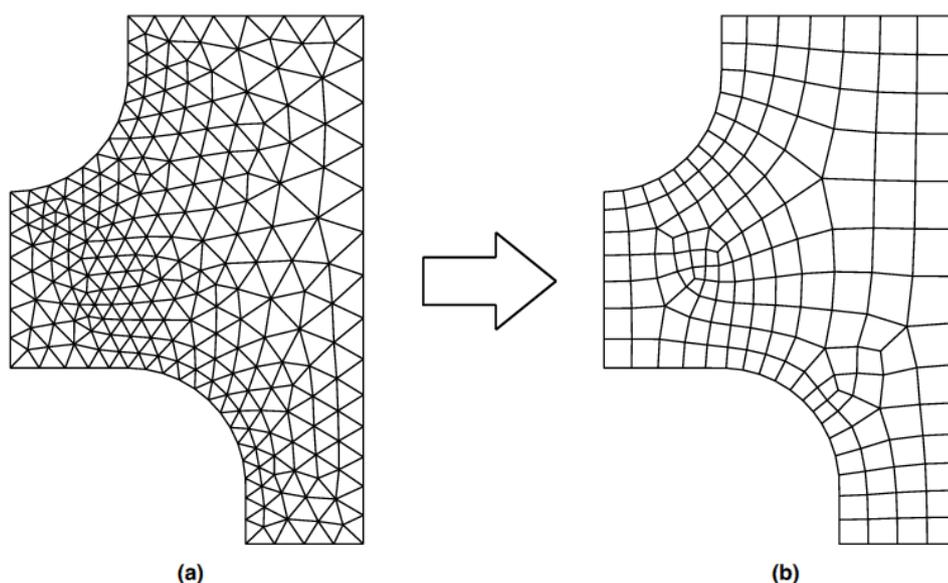


Figure I.7 : Changement de maillage triangulaire en maillage quadrilatère pour l'analyse par éléments finis d'une pièce de forge. [HARTLEY]

Chapitre I Etat de l'art sur le concept de recherche des indices de performances dans les systèmes de production discontinue

Equbal et al [EQUBAL] ont montré que le code de calcul DEFORM-3D est un outil efficace pour étudier l'effet des paramètres de conception et du procédé sur les conditions de chargement en forgeage et sur la perte de température dans la billeterie. Un plan d'expérience sur la base des paramètres d'entrée a été élaboré en utilisant la méthode de Taguchi afin d'analyser le processus de production en appliquant une analyse de la variance connu sous l'appellation anglaise ANOVA (Analysis of Variance)[IVERSEN] et l'optimisation multi objectif de Gray Taguchi [SATHIYA] sous le code de calcul DEFORM-3D. Les résultats sont très encourageants puisqu'ils offrent la possibilité d'optimiser les paramètres de conception et du procédé de forgeage afin d'obtenir une grande performance du processus.

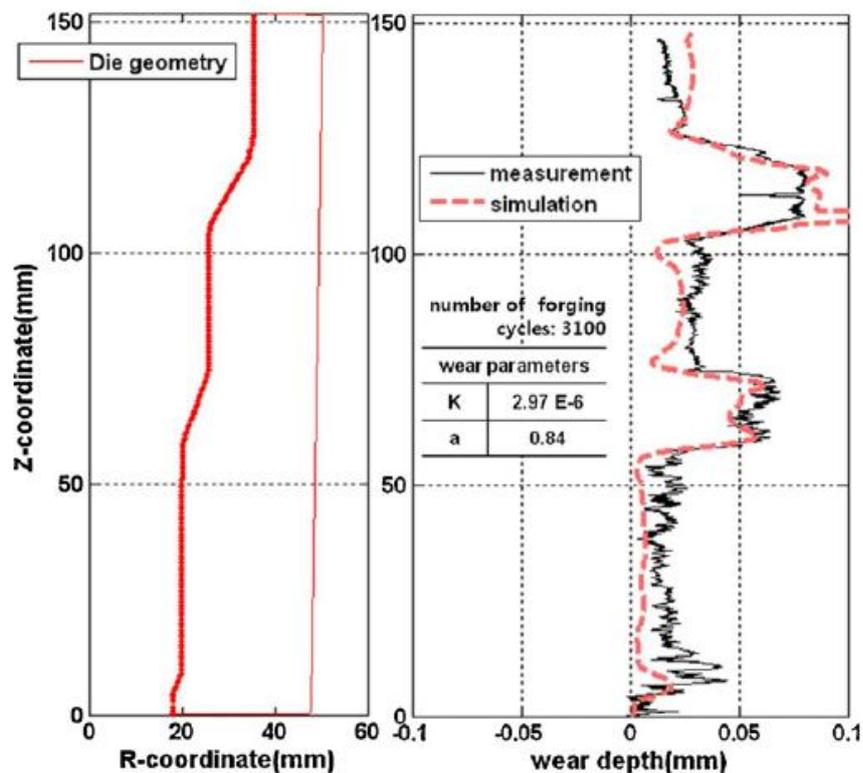


Figure I.8 : Prédiction de l'usure de l'outil de forgeage en utilisant Le code DEFORM-2DChoi et al. [CHOI]

Par conséquent, l'utilisation des plans d'expérience et des outils statistiques est très intéressante particulièrement lorsqu'ils sont couplés à l'analyse d'éléments finis. La difficulté réside dans la collecte de données fiables pour entamer des simulations de forgeage. Il est intéressant de consulter le rapport de Majerus et al [MAJERUS] qui ont montré comment obtenir statiquement des données précises et significatives d'un procédé de forgeage de sorte à mener des essais de matriçage réalistes pour des fins de simulations numériques. C'est aussi

Chapitre I Etat de l'art sur le concept de recherche des indices de performances dans les systèmes de production discontinue

le cas de Snape et al [SNAPE], qui, sur la base de résultats de simulations sous le code Forge2®, ont fourni un guide utile pour le processus forgeage afin de quantifier et comparer la sensibilité des paramètres thermomécaniques, et analyser les variations dans les différents paramètres d'entrée et les paramètres impliqués dans le processus tels que la contrainte d'écoulement de l'acier forgé, le transfert de chaleur et le frottement à l'interface matrice-pièce.

Un plan d'expérience multifactoriel regroupant les données d'entrée et la paramètres du processus de mise en forme a permis l'évaluation des variations paramétriques. Allam et al [ALLAM] ont effectué des simulations de Monte Carlo pour évaluer la variation des paramètres d'un processus de mise en forme. Leur objectif est de faire ressortir une méthodologie pour analyser l'effet de la variation des paramètres clés sur les écarts spécifiques d'un produit. Cette méthodologie est utilisée comme un outil d'aide à la décision pour contrôler la pertinence d'un processus de forgeage.

Actuellement il n'est plus possible d'ignorer que le recours aux outils de simulation numérique pour analyser le comportement d'un processus de mise en forme est d'une importance accrue compte tenu des possibilités qui existent et qui sont offertes pour aller toujours dans le sens d'amélioration de la qualité des pièces de forge et de mise en forme et surtout rester compétitif. Les outils de modélisation et simulation des opérations de forgeage sont exploités d'une manière intense par ce qu'ils ne permettent pas seulement la visualisation des résultats pour des essais virtuels mais ils apportent aussi des solutions à des problèmes complexes, tel que l'endommagement et la fissuration de l'outil de forgeage par la prédiction de sa durée de vie.

Pour estimer les champs de contraintes, de températures et de déformations auxquelles sont soumises les parties de l'outil les plus exposées durant leur service. Les équilibres mécaniques et les répartitions de températures sont calculés en tous points de l'outil via des simulations numériques. Une décomposition de l'outil en éléments minimaux (mailles) est alors nécessaire. La figure I.9 montre les différents mécanismes de fissuration d'un outil en service et les champs de températures en surface et en profondeur qui sont obtenues par simulations faites via le logiciel FORGE 2D/3D [DAFFOS].

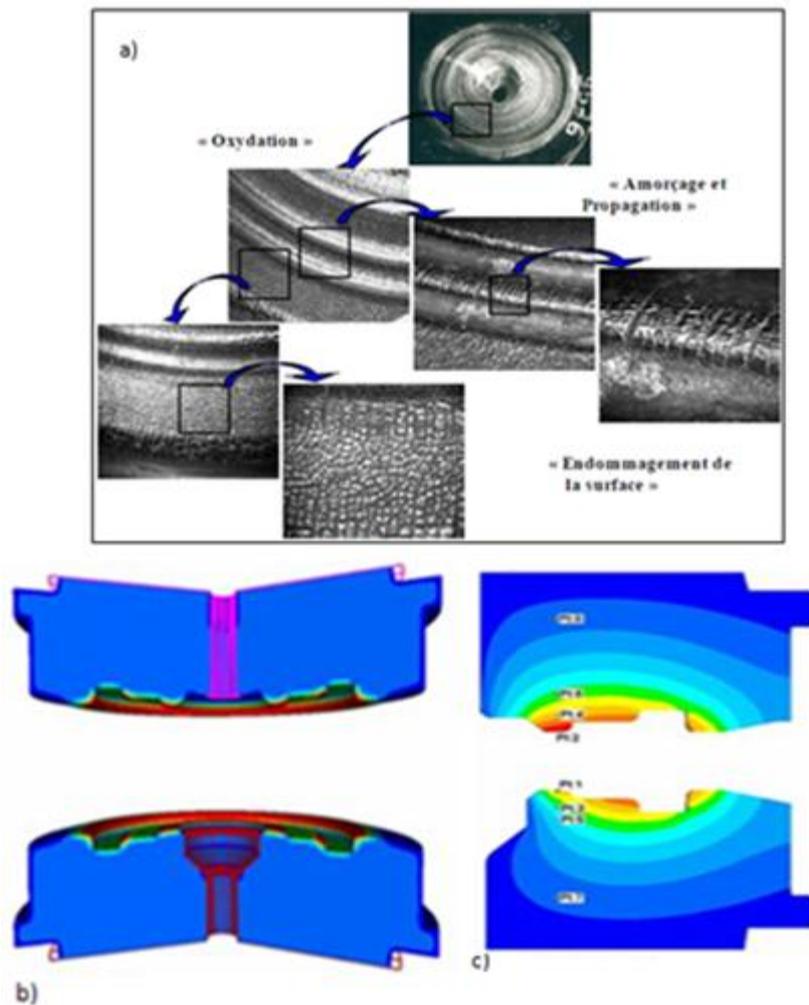


Figure I.9 : Objet de l'étude (a) et champ de températures établi en surface (b) et au cœur (c) (symétrie selon l'axe de révolution. [DAFFOS])

L'endommagement ou la ruine d'un outillage peut provenir d'un état de contrainte excessif (traction ou plastification), mais il est lié plus généralement à un état de fatigue oligocyclique se produisant pour un nombre de cycles faibles (soit quelques milliers de cycles). Cette fatigue peut être d'origine mécanique (liée aux forgeages successifs) mais également d'origine thermique et de leur combinaison. A ce jour, le code de calcul Forge permet une première approche des phénomènes de fatigue au travers d'un calcul du nombre de cycle à rupture. La figure I.10 illustre les zones de l'outillage où éventuellement se concentrent le plus de sollicitations mécaniques ou thermiques et qui par voie de conséquence doivent offrir le nombre de cycles le plus faible pour qu'une fissure s'initie et se propage, [TRANSVALOR].

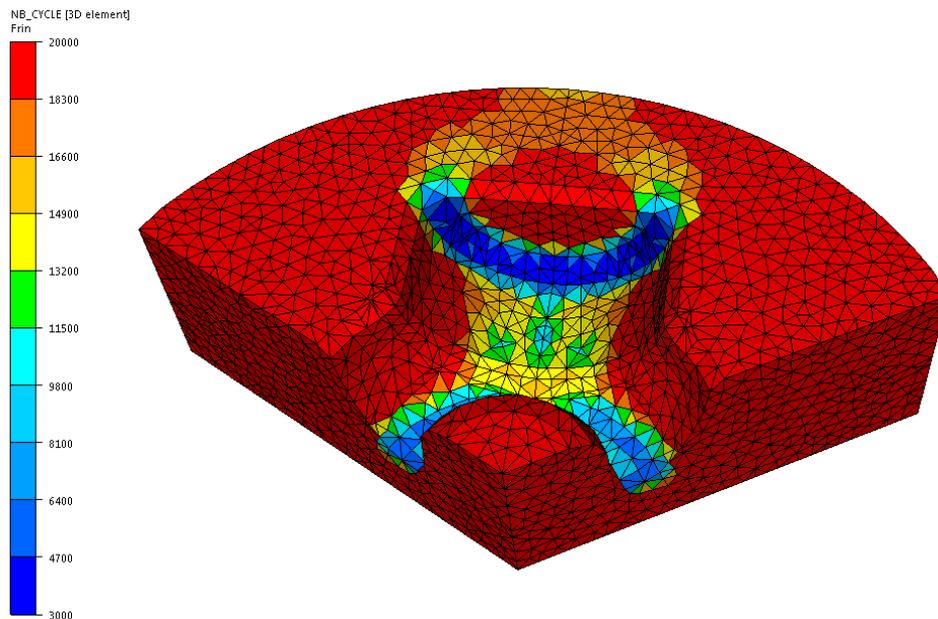


Figure I.10 : Prédiction du nombre de cycles à la rupture dans l'outillage. [TRANSVALOR]

De nos jours, la capacité et les performances des outils de modélisation et de simulation des procédés de mise en forme pour analyser leur comportement, particulièrement l'interaction pièce-outils, est indiscutable. Cependant malgré leur efficacité, les résultats peuvent facilement être influencés par les incertitudes associées aux valeurs des paramètres d'entrée et des paramètres impliqués dans les lois de comportement rhéologique, de mécanique des milieux continus et d'endommagement, supportés par ces outils. Pour analyser d'une manière réaliste et plus précise le comportement réel d'un procédé de mise en forme en prenant en compte les incertitudes des paramètres géométriques, les outils d'analyse de la fiabilité mécanique des structures peuvent apporter des informations beaucoup plus explicites en prenant en compte les différentes sources de variabilité des paramètres jouant un rôle significatif. Ainsi la 3^{ème} partie de ce chapitre introduit l'état de l'art sur l'analyse de la fiabilité mécanique des systèmes de production. L'axe est orienté vers les procédés de mise en forme.

I.3. État de l'art sur l'analyse fiabiliste des procédés de mise en forme

Dans une étude menée par Terčelj et al [TERCELJ], en 2003 pour prédire l'usure dans les arrondis des matrices de forgeage, ils ont proposé de combiner la méthode des réseaux de neurones avec la méthode des éléments finis pour prendre en considération les variables aléatoires associées aux paramètres d'entrée et de comportement rhéologique durant l'opération de mise en forme par forgeage. L'approche est une alternative aux méthodes statistiques empiriques classiques pour une meilleure analyse du processus de mise en forme. Cependant, l'adéquation des réseaux de neurones avec la méthode des éléments finis ne peut être suffisamment précise et efficace que si les valeurs des paramètres d'entrée influençant le processus sont prises d'une manière précise respectant les incertitudes associées aux résultats de mesure qui dépendent des moyens et méthodes utilisés et qui sont caractérisées par leur coefficients de variation (spectrométrie ou diffractométrie pour la composition chimique, essais mécaniques pour les propriétés mécaniques, prélèvement des températures, des charges appliquées, contraintes, déformations, mesures de l'usure). Cette étude montre que les résultats obtenus par la méthode des réseaux de neurones est robuste fiable et adéquate. La figure I.11 illustre les résultats de mesure d'usure et de prédiction par combinaison de la méthode des réseaux de neurones et de la méthode par éléments finis.

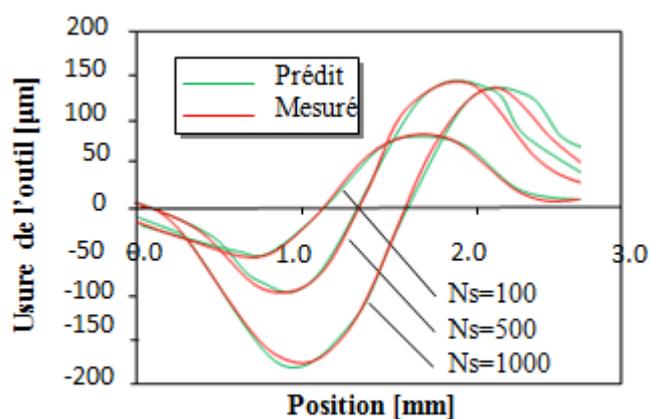


Figure I.11 : Adéquation de résultats de mesure de l'usure avec les résultats de prédiction par la combinaison de la méthode des réseaux de neurones et la méthode des éléments finis. [TERCELJ]

Les travaux de Repalle et al [REPALLE] en 2004 montrent le grand intérêt que portent les chercheurs aux incertitudes dans le procédé de forgeage. Quand elles sont ignorées, elles peuvent induire de grandes pertes de production, des pièces peu précises, et par conséquent une productivité affaiblie. L'analyse du processus a été réalisée sur l'optimisation basée sur la

Chapitre I Etat de l'art sur le concept de recherche des indices de performances dans les systèmes de production discontinue

fiabilité. La première étape de leur analyse consiste à identifier les sources d'incertitudes, figure I.12. La simulation du procédé de forgeage d'une roue en acier de section en H, sous le code de calcul DEFORM 2D a permis de déterminer les charges à appliquer, l'écoulement du matériau de la pièce et l'empreinte des déformations. A travers un plan d'expérience par la méthode multifactorielle et une analyse de variance ANOVA sur 6 variables d'entrée, les températures de la billette et de l'outil, la vitesse de l'outil, le coefficient de frottement, la distance de déplacement, et la température ambiante, la sensibilité du procédé de forgeage aux variables aléatoires a été évaluée. Une analyse Pareto a montré que la température de la billette et le coefficient de frottement contribuent à 70% sur l'effort à appliquer. L'analyse de la fiabilité du procédé a été réalisée en respectant la distribution probabiliste des variables d'entrée et une fonction d'état limite qui fixe la charge maximale de la presse à ne pas dépasser.

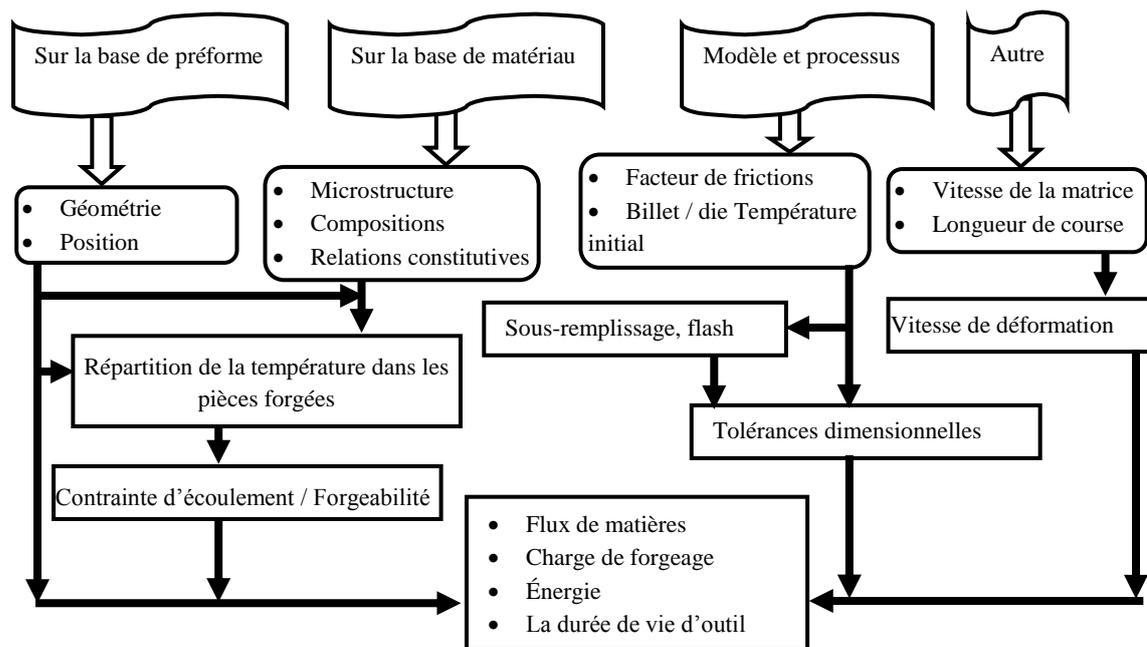


Figure I.12 : Source d'incertitudes dans un procédé de forgeage. [REPALLE]

La contribution Jalal et al [REPALLE] a été est forte intéressante dans la mesure où elle explique une méthodologie pour prendre en charge toutes les variables d'entrée en leur associant leur incertitudes afin de lancer une analyse fiabiliste d'un procédé de forgeage.

Plusieurs travaux sur l'utilisation de l'approche probabiliste ou fiabiliste dans l'analyse du comportement des procédés de mise en forme intégrant les incertitudes dans les variables

Chapitre I Etat de l'art sur le concept de recherche des indices de performances dans les systèmes de production discontinue

d'entrée. Tous s'accordent à dire que l'utilisation de cette approche est très difficile à appliquer. Ainsi, Velmanirajan et al [VELMANIRAJAN] ont considéré les incertitudes dans les courbes limites de formage d'une feuille en alliage d'aluminium Al 1350 en appliquant la méthode d'approximation FORM et la méthode de Monté Carlo. Les analyses fiabilistes ont donné les indices de fiabilité et les niveaux de confiance de la mise en forme de la feuille en fonction de l'épaisseur et des températures du recuit. Il en ressort que plus la température du recuit augmente (après la mise en forme), plus le niveau de confiance est grand. Les valeurs de l'indice de fiabilité permettent d'optimiser l'épaisseur et la température du recuit pour assurer la qualité de la pièce mise en forme. La difficulté de l'utilisation des méthodes fiabilistes dans le suivi des courbes limite de formage des tôles en acier est encore rappelée par Rojek et al[ROJEK].En effet leur recherche concerne la détermination de la probabilité de défaillance de l'épaisseur des tôles en appliquant des techniques de fiabilité basées sur les gradients efficaces. Afin d'évaluer la fiabilité des opérations de mise en forme des tôles obtenues par simulation utilisant la méthode des éléments finis, le caractère stochastique des paramètres tels que le coefficient de frottement, l'effort de serrage, l'épaisseur de la tôle, la dureté, les paramètres de la loi de comportement, ainsi que des paramètres définissant la courbe limite de formage (FLC) sont considérés. L'efficacité de leur analyse est basée sur la méthode de densité d'échantillonnage multimodal qui a permis d'ajuster le domaine de rupture non-linéaire afin d'estimer d'une manière réaliste la probabilité de défaillance de la pièce formée.

Une approche globale est présentée par Kroiß et al [KROIß] pour comprendre les interactions entre les processus de mise en forme d'une pièce par forgeage à froid. La conception de l'outillage et le procédé de forgeage a été simulé par la méthode d'éléments finis. L'approche comprend une détermination des déviations des caractéristiques de la presse à course contrôlée, de l'outillage et les modèles impliqués dans les simulations par éléments finis. Puis un modèle analytique du procédé a été développé pour exécuter un ensemble de simulations variées, suivi d'un modèle de chargement de l'outillage. Entre temps, ils ont développé une démarche très fructueuse pour optimiser le procédé de mise forme. Et comme les méthodes analytique et déterministe n'intègrent pas les incertitudes associées aux paramètres de calcul, elle est compléter par l'approche fiabiliste qui implique les fonctions de probabilité de ces paramètres. Les différentes étapes de l'approche sont synthétisées dans la figure I.13.

Chapitre I Etat de l'art sur le concept de recherche des indices de performances dans les systèmes de production discontinue

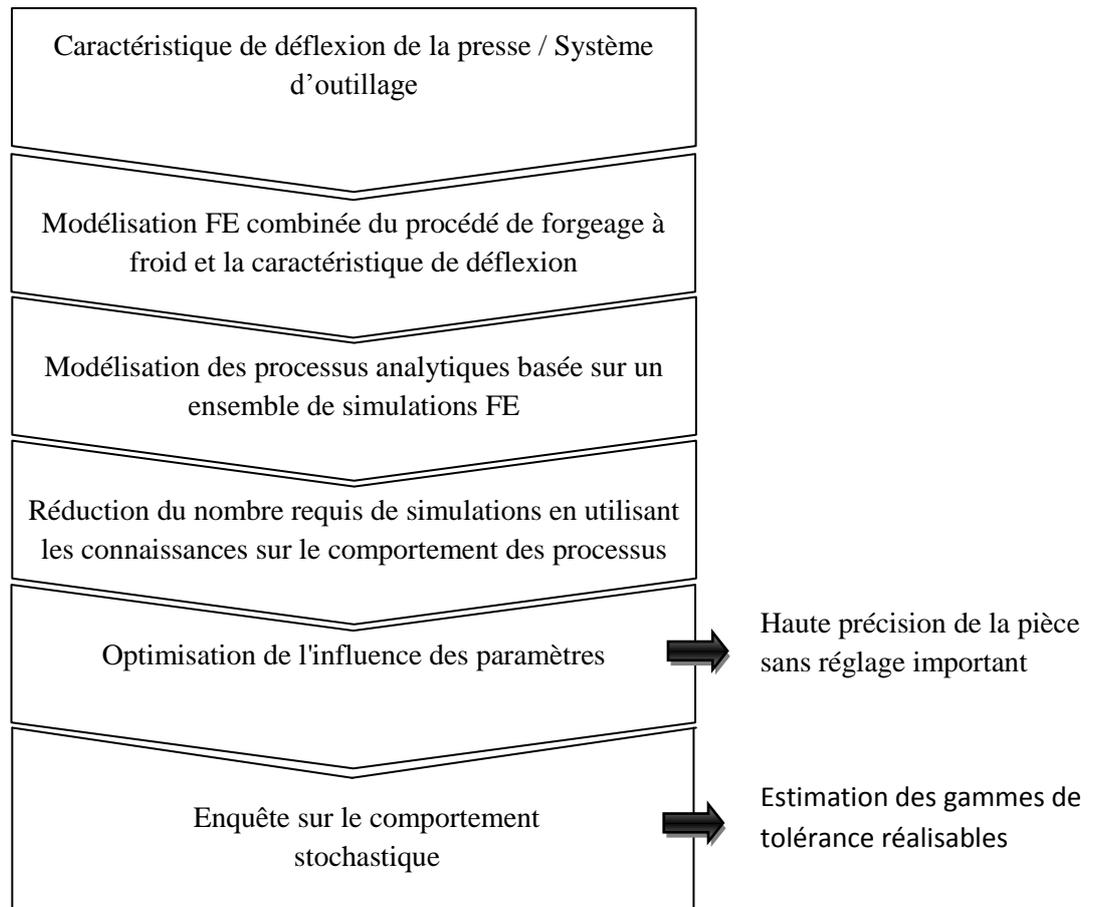


Figure I.13 : Phases de l'approche globale pour modéliser et optimiser le procédé de mise en forme. [Kroiß]

L'exploration menée par Ciancio et al [Ciancio] sur l'utilisation des outils stochastiques comme les différentes techniques d'intelligence artificielle, pour élaborer une relation d'entrée-sortie d'un procédé de forgeage, fait ressortir une comparaison fructueuse. En effet, en premier lieu, un algorithme génétique et l'approche Taguchi ont été utilisés pour configurer l'architecture des réseaux de neurones afin d'optimiser la conception de l'empreinte d'un outil de forgeage. L'objectif principal est de réduire l'énergie de frappe, le chargement et la consommation du matériau tout en respectant les exigences techniques de la pièce forgée. L'optimisation des dimensions de la bielle et du coefficient de frottement contribue à réaliser cet objectif.

Chapitre I Etat de l'art sur le concept de recherche des indices de performances dans les systèmes de production discontinue

Tableau I.7 : Ecart type moyen a) pour l'énergie et b) pour l'effort appliquée.

a)	GA-NN	NN-Flou	RSM	SVR
Ensemble d'entraînement	1.85%	2.73%	3.20%	3.10%
Ensemble d'essai	2.83%	3.25%	1.28%	1.36%
Ensemble de validation	1.23%	1.97%	2.04%	1.67%

b)	GA-NN	NN-flou	RSM	SVR
Ensemble d'entraînement	0.99%	1.81%	1.99%	1.96%
Ensemble d'essai	1.98%	3.28%	1.78%	1.56%
Ensemble de validation	2.12%	0.53%	0.62%	0.28%

Les résultats obtenus par les deux techniques sont validés par d'autres techniques comme séparateurs à vaste marge (SVM en anglais : *support vector machine*), les techniques de logique floue et les techniques de surfaces de réponse. Le tableau I.10 montre le pourcentage des erreurs dans chacune des 4 techniques employées. La technique d'optimisation des réseaux de neurones par l'algorithme génétique (GA-NN) est la plus performante des techniques dans la majorité des cas puisque l'écart type du test de validation est très faible.

Toutes les travaux de recherches présentés sur l'utilisation des approches probabilistes dans l'analyse des procédés de mise forme s'accordent à dire que la problématique réside dans la collecte des incertitudes exprimées en écarts types ou en coefficients de corrélation des valeurs d'entrée, liées aux lois comportement rhéologique et mécaniques, des contraintes appliquées et déformations recueillies. Plusieurs techniques d'intelligence artificielle sont proposées [TERCELJ], [REPALLE], [Velmanirajan], [Rojek], [Kroiß], [Ciancio], [Chen] et concourent toutes pour améliorer de la durée de vie de l'outillage et assurer la qualité de la pièce formée. Bien qu'elles présentent des directives fortes intéressantes, elles ne sont pas si simples à utiliser.

Aujourd'hui, il existe des outils d'analyse de la fiabilité à la conception très puissants, très simples à utiliser et se basant sur la détermination des indices de fiabilité par une approche d'approximation FORM/SORM, présentée ci-après, ou bien par l'approche de Monté Carlo.

Rappelons que la fiabilité est l'aptitude d'une entité à accomplir les fonctions requises dans des conditions données pendant une durée donnée. Elle est caractérisée par la probabilité $R(t)$

Chapitre I Etat de l'art sur le concept de recherche des indices de performances dans les systèmes de production discontinue

que l'entité E accomplisse ces fonctions, dans les conditions données pendant l'intervalle de temps $[0, t]$, sachant que l'entité n'est pas en panne à l'instant 0 [MIHALACHE].

$$R(t) = P [E \text{ non défaillante sur } [0, t]] \quad (I.1)$$

La première proposition d'un indice de fiabilité est due à Rjanitzyne dans les années 1950, Union Soviétique. Cependant, c'est Cornell qui a popularisé cette idée. Ensuite, diverses propositions furent présentées mais la forme la plus complète est due à Hasofer et Lind qui s'appuient sur une définition rigoureuse, figure I.14 [LEMAIRE2006].

Hasofer et Lind ont montré que la mesure de l'indice de fiabilité devait être prise dans un espace de variables Gaussiennes normées U_i . Pour cela, il faut définir une transformation T (Figure 2.14), telle que :

$$U_i = T(X_j) \text{ et } H(U_i) = G(T^{-1}(U_j)) \quad (I.2)$$

L'approche par approximation FORM/SORM consiste faire :

1. Une transformation T , de l'espace physique à l'espace normé
2. Une recherche de la distance de l'origine à l'état limite
3. Une approximation de la probabilité de défaillance

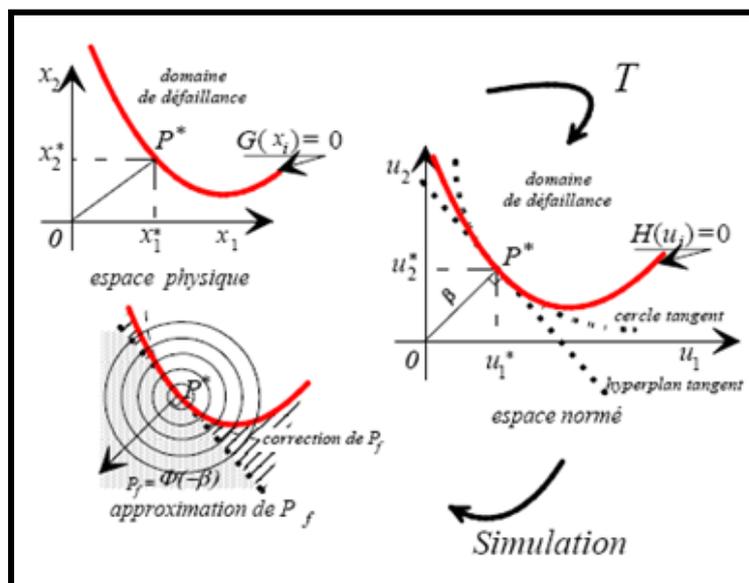


Figure I.14 : Méthode d'approximation FORM / SORM, indice d'Hasofer-Lind.

Chapitre I Etat de l'art sur le concept de recherche des indices de performances dans les systèmes de production discontinue

L'indice de fiabilité est alors le minimum de la distance entre l'origine de l'espace des variables U_i et le domaine $H(U_i)=0$ (Figure 2.15), ce qui s'écrit sous forme d'un problème de minimisation :

$$B = \min \sqrt{\{U\}^t \{U\}} \text{ sous la contrainte : } H(U_i) \leq 0 \quad (\text{I.3})$$

L'objectif des méthodes d'approximations FORM/SORM est de chercher quelles sont les hypothèses qui permettent de représenter un matériau ou une structure mécanique par un simple problème résistance-sollicitation dans un modèle nommé modèle mécanique.

I.4 Conclusion du chapitre I

La capacité et les performances des outils de modélisation et de simulation des procédés de mise en forme pour analyser leur comportement, particulièrement l'interaction pièce-outils, est indiscutable. Cependant malgré leur efficacité, les résultats peuvent facilement être influencés par les incertitudes associées aux valeurs des paramètres d'entrée et des paramètres impliqués dans les lois de comportement rhéologique, de mécanique de milieu continu et d'autres, supportés par ces outils. Pour analyser d'une manière réaliste et plus précise le comportement réel d'un procédé de mise en forme en prenant en compte les incertitudes des paramètres gérant l'interaction pièce-outils, les outils d'analyse de la fiabilité mécanique des structures peuvent apporter des informations beaucoup plus explicites car ils prennent en compte les différentes sources de variabilité des paramètres pouvant jouer un rôle significatif pour l'instant, l'estimation de la durée de vie de l'outillage qui continue à préoccuper les industriels.

Ce travail présente une méthode de couplage de modèles de comportement rhéologique déduits de résultats d'analyse par modélisation et simulation d'un procédé de mise en forme comme le forgeage avec des modèles d'endommagement. Puis ce couplage écrit sous forme d'un modèle mécanique doit servir pour l'analyse fiabiliste du système. Les résultats finaux vont servir d'outils pour définir un ou des indices de performances.

CHAPITRE II

Paramétrage d'un procédé de forgeage

II.1 Position du problème :

Dans l'industrie du forgeage, 15 à 20% du coût de production d'une pièce forgée est attribué à l'outillage [FEKIH]. Dans ces conditions, la durée de vie de l'outillage préoccupe toujours et est souvent mal estimée compte tenu de divers facteurs de production qui restent insuffisamment maîtrisés, et cela malgré les efforts qui ont été déployés au cours de la dernière décennie, dans le développement de technologies de pointe pour rendre le processus de fabrication précis, fiable et efficace. Néanmoins, la forme et la matière de la pièce à forger joue un rôle important dans la conception et la fabrication des matrices de production.

Pour une cadence de production donnée, comme pour les petites pièces automobiles, les matrices d'estampages sont les plus communément utilisées. La durée de vie de ces matrices est définie par le nombre de pièces exécutées conformément aux exigences du dessin technique. Cependant elle reste étroitement dépendante de la forme géométrique c'est-à-dire de la variance et des dimensions de certains éléments de la gravure finale dans la matrice d'estampage et des conditions de chargement. La gravure de la matrice est conçue à partir du dessin de définition de la pièce à forger. La figure II.1 montre différents exemples de morphologie et dimensions de leviers [KOVAN].

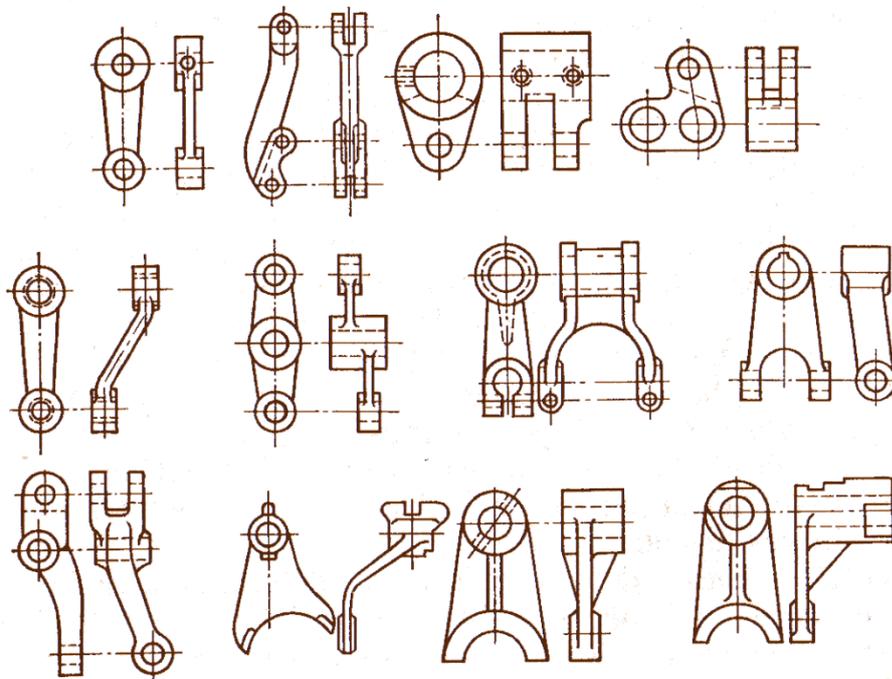


Figure II.1 : Exemples de morphologies de leviers. [KOVAN]

Les leviers comportent un ou plusieurs trous principaux associés à des axes parallèles ou perpendiculaires, d'autre part, ils peuvent avoir des trous à exécuter à la demande des pièces de boulonnerie, des rainures de clavette, des faces et d'autres éléments.

Les prescriptions imposées par la fabrication des leviers sont les suivantes [KOVAN] :

- a) Les trous principaux se font généralement suivant la 7^{ème} et 8^{ème} classe de précision.
- b) Les écarts admissibles des entraxes des trous principaux sont imposés en fonction des conditions de travail des leviers et varient de 0,1 à 0,2 mm ou suivant les tolérances sur les cotes libres.
- c) Le défaut admissible de parallélisme ou de perpendicularité des axes de trous principaux doit être compris entre les limites de 0,05 à 0,25mm et peut atteindre 0,01mm sur une longueur de 100mm.
- d) Le défaut de perpendicularité des faces des têtes par rapport aux axes des trous ne doit pas dépasser 1 à 3 μm par 1mm de rayon de diamètre de tête.
- e) Le défaut de parallélisme des trous principaux exécutés par rapport aux faces de têtes doit se situer entre 0,5 et 2,5 μm par 1mm de diamètre de tête.
- f) L'état de surface des trous doit-être compris entre 0,8 et 3,2 alors que pour les faces il peut dépasser 3,2.

La matière d'œuvre de la pièce à forger est souvent en acier au carbone de construction avec des nuances usuelles, et dans les cas particuliers, en aciers alliés. Les ébauches sont des pièces forgées. Les dimensions et les prescriptions techniques des ébauches sont déterminées à partir des formes et dimensions des pièces finies. Le forgeage des ébauches est réalisé au moyen d'outillages appelés matrices (supérieure et inférieure) possédant des gravures correspondant à l'ébauche à fabriquer. Lorsqu'elles sont portées conjointement selon une gamme de production bien définie, elles doivent reproduire fidèlement l'ébauche. Traditionnellement, le procédé consiste à frapper un lopin chauffé à haute température suffisante pour le rendre malléable, jusqu'à obtenir la forme désirée. Chaque morphologie de levier peut-être caractérisée par son volume dépendant de sa forme spécifique et ses dimensions. La mise en forme dépend aussi de la puissance de frappe qui influence éventuellement sur la durée de vie de l'outillage. A titre indicatif, le tableau II.1 [KOVAN] indique la durée de vie approximative des matrices en fonction de la puissance du marteau qui dépend du volume de

la pièce c'est-à-dire à petit volume correspond puissance faible et à grand volume correspond puissance élevée.

Tableau II.1 : Durée de vie approximative des matrices d'estampage en fonction de la puissance du marteau. [KOVAN]

Puissance en Watt	0,5 à 1,0	1,0 à 1,5	1,5 à 3,0	3,0 à 4,0	4,0 à 6,0	Plus de 6,0
Durée de vie (Nombre de pièces estampées)	10 000 à 18 000	7 500 à 15 000	5 500 à 12 000	4 000 à 9 000	2 500 à 6 000	1 500 à 4 500

Ensuite, la pièce forgée subit des opérations d'usinage et de traitements thermiques pour obtenir la pièce finie qui doit respecter ses prescriptions techniques. Ces dernières sont tellement exigeantes parce que d'elles dépendent le fonctionnement et la sécurité du système automobile.

Par ailleurs, une défaillance non admissible dans la pièce forgée est systématiquement reportée sur la pièce finie, allant jusqu'à provoquer un arrêt de la production qui perturbe la performance de l'entreprise. Le tableau II.1 reste à titre indicatif mais en réalité les forgerons sont confrontés à un grand problème de fréquences d'apparition de défaillances dans l'outillage qui sont aléatoires et donc difficiles à gérer.

Le besoin du forgeron est d'établir un moyen de prise de décision pour le changement de l'outillage au temps opportun et avec la meilleure performance possible.

Ainsi le travail proposé s'inscrit dans ce contexte, à la recherche d'un indice permettant de mesurer la performance d'un système de mise en forme aussi complexe que les ateliers de forgeage qui est devenue accrue, afin d'éviter les arrêts nécessitant une maintenance curative impliquant des coûts de non-maintenance.

II.2 Rôle stratégique d'une unité forge dans un atelier de fabrication mécanique

Dans un atelier de production mécanique, un produit fini est composé de plusieurs composants qui sont montés ensemble pour remplir une fonction donnée. Les composants sont constitués de pièces standards, de pièces spécifiques à fabriquer, et de sous composants ou de pièces à sous-traiter. L'environnement de fabrication comme les ateliers d'usinage, est dynamique et nécessite une planification d'un processus flexible qui définit d'une part les pièces à acheter (standards ou sous-traitées) et d'autre part des pièces à fabriquer.

Habituellement le bureau des méthodes a pour mission de déterminer si la logistique interne, c'est-à-dire ses moyens de production, est en mesure de produire les pièces et fabriquer le produit souhaité à moindre coût et dans les meilleurs délais. Alors, deux dossiers sont ordonnés : le dossier de fabrication et le dossier de montage des composants pour avoir le produit final.

Généralement la gamme d'usinage de chaque pièce à usiner représente le principal document qui permet aux exécuteurs de prendre la décision de fabriquer une pièce donnée avec des formes et des dimensions désirées.

La gamme de fabrication est développée à partir du dessin de définition d'une pièce et énonce les différentes phases successives depuis la préparation des bruts, tels que le tronçonnage, les phases d'usinage, l'ébavurage, le traitement thermique, le traitement de surface, le lavage, les phases de contrôle de qualité.

L'exécution du projet commence alors en définissant les postes et les sections de travail pour chaque pièce en respect à la gamme de fabrication. Cependant la moindre défaillance dans un poste de travail dans la chaîne logistique peut entraîner un retard ou un arrêt de production. La chaîne interne logistique commence par l'acheminement de la matière première qui est stockée sous forme de barres laminées, de profilés, d'ébauches moulées, d'ébauches forgées, de tôles et autres. La matière première prend le nom de brut dès qu'elle est admise dans la gamme d'usinage. Pour obtenir le brut, il faut des moyens de production comme les systèmes de mise en forme des barres laminées, les laminoirs pour l'obtention des tôles, les systèmes de mise en forme des profilés, la fonderie pour les ébauches moulées, les forges pour les pièces forgées, la chaudronnerie pour les composants mécano-soudés et autres.

Traditionnellement, les ateliers de production mécanique sont dotés de forge, de fonderie pour préparer les pièces brutes qui vont subir de l'usinage. Souvent, la morphologie des pièces complique la production car pour chacune des pièces il faut réaliser les outillages qui lui correspondent. La figure II.2 illustre un schéma représentatif des différents procédés de fabrication d'une entreprise de production de pièces de véhicules ferroviaires qui sont caractérisées par le besoin interne de l'entreprise. Le complexe dispose d'ateliers de production généralement composés d'ateliers d'usinage, ateliers de chaudronnerie, d'ateliers de montage, d'ateliers de revêtement et de finition. Ces derniers sont alimentés en matières brutes par des fournisseurs ou bien d'ateliers de production d'ébauche principalement un

atelier de forgeage. La figure II.3 montre quelques produits forgés. Une défaillance de disponibilité de matière première va provoquer un arrêt de la production. Cette disponibilité dépend de la gestion de la logistique externe ou interne. La gestion de la logistique externe est étroitement liée au contrat de traitement d'acquisition des matières premières. La logistique interne dépend des activités de production et de maintenance pour assurer le fonctionnement des ateliers. Dans le cas où le cahier de charge de l'entreprise le permet, l'entreprise peut lancer des produits externes en sous-traitance.

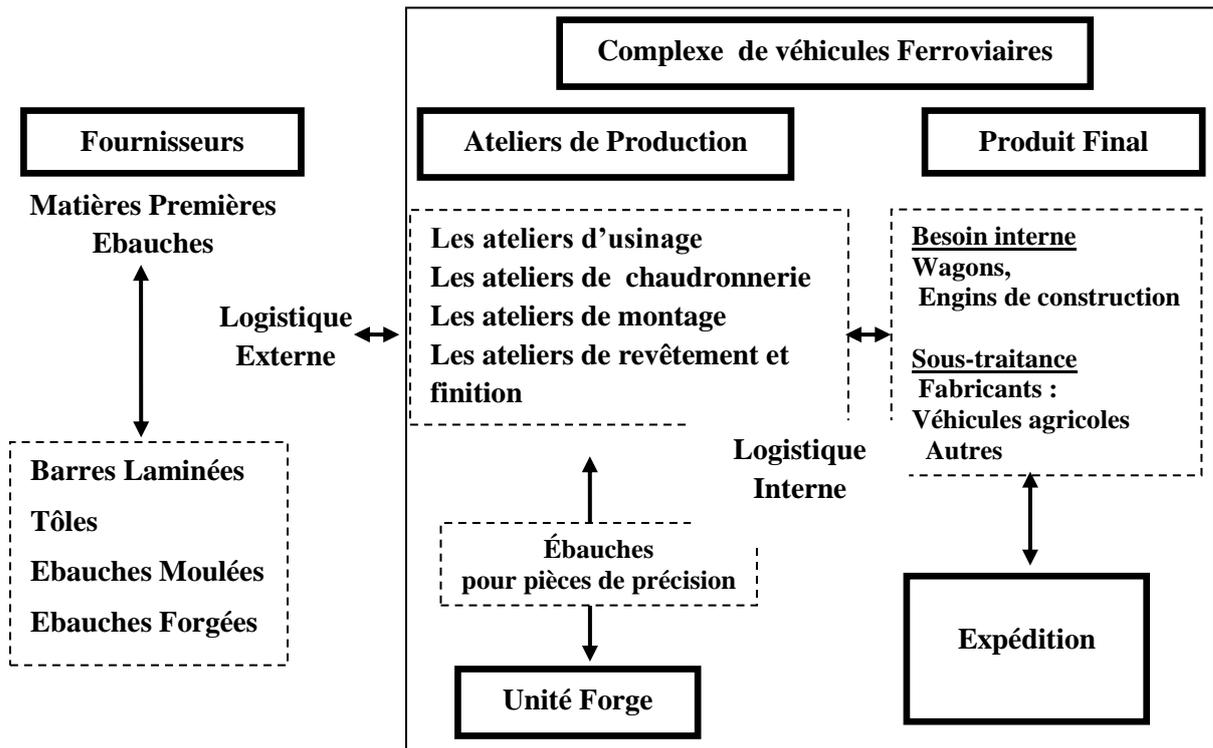


Figure II.2 : Unité forge & soutien logistique dans un atelier de production des véhicules ferroviaires et d'engins de construction de bâtiments.



Figure II.3 : Exemple de pièces forgées, produites pour les véhicules ferroviaires destinés au transport des minerais et des fluides.

(avec l'aimable autorisation de l'E.P.E. Ferroviaire Annaba, Algérie)

www.ferrovial.dz

II.3 Défaillances dans le procédé de forge :

L'outillage reste le sujet qui fait l'objet d'études plus poussées que les machines elles-mêmes; car il subit facilement des dommages. Le problème de l'endommagement de l'outillage est étudié par rapport aux formes des empreintes, la résistance et l'influence des facteurs physiques tels que les échauffements, les vibrations et les déformations. Toutes les observations effectuées par les chercheurs sur l'outillage de mise en forme en forgeage ont permis d'arriver à des résultats d'ordre pratique extrêmement intéressants.

La machine de forgeage n'est qu'un élément de puissance entre l'outillage (les matrices) de mise en forme et la pièce à produire. La machine en effet fournit à l'outillage les déplacements nécessaires à son utilisation; ces déplacements sont plus ou moins rapides suivant la nature du métal constituant la pièce à forger, la forme de cette pièce et de l'empreinte dans les matrices. La machine doit fournir la puissance nécessaire à l'exécution du forgeage. C'est ce qui est défini par les paramètres de mise en forme.

Les études effectuées sur les machines de forgeage ont été longtemps laissées à l'appréciation du personnel d'exécution. Les améliorations reconnues nécessaires d'apporter à la conception et à la fabrication des machines de forgeage ont entraîné un recours de plus en plus accentué à des méthodes autres que la mécanique, en même temps qu'à des études scientifiques et techniques. Les résultats de ces recherches sont une conception parfois révolutionnaire de la

forme des machines et de l'emploi de l'hydraulique, de l'électrotechnique et surtout de l'électronique; notamment dans les transmissions et les contrôles. Les presses de mise en forme sont des machines de plus en plus fiables et performantes.

L'usure, les déformations plastiques et les fissurations par fatigue sont les causes de défaillances des outillages de forgeage, car ils se caractérisent par des déformations complexes susceptibles de produire des instabilités plastiques pouvant aller jusqu'à sa rupture. La figure II.4 montre un exemple de rupture brutale par fatigue d'une matrice destinée pour l'estampage d'un levier de direction de forme cambrée. Pour répondre à un besoin urgent, le service de maintenance a opté pour réparer et d'assembler les deux parties disjointes par soudage en attendant de fabriquer une nouvelle matrice.

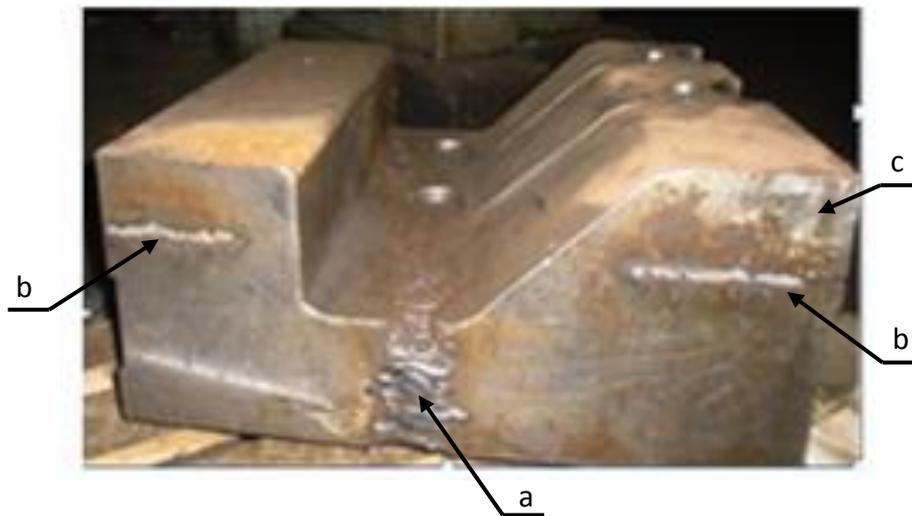


Figure II.4 : Vue de profil d'une matrice inférieure pour l'estampage d'un levier de direction:

(a) Zone de cisaillement (b) Blessures (c) Usure.

(avec l'aimable autorisation de l'E.P.E. Ferroviaire Annaba, Algérie)

www.ferrovial.dz

La matrice présente des sections non uniformes avec des dénivelées très importantes (figure II.4). En plus, l'effort de frappe de la machine, n'étant pas symétrique, provoque un déplacement porté vers la partie de section dangereuse générant ainsi une rupture pouvant apparaître à tout moment de la frappe. Les déformations en forme de rayures et l'usure indiquent que la matrice a subi des chargements extrêmes et est portée au maximum de ses capacités locale. L'aléa dans ce cas est très important puisqu'il est pratiquement difficile d'estimer le nombre de frappes pour lequel la rupture a lieu.

Pour les opérateurs de production ce type de défaillances a des conséquences néfastes sur la production qui est perturbée, voire arrêtée. Le bilan peut-être caractérisé par :

1. Perte de matière première ;
2. Production de pièces mauvaises ;
3. Temps conception et de préparation des outillages (matrices inférieure et supérieure) ;
4. Perte en copeaux de quantités importantes d'un acier noble ;
5. Temps de changement des outils de production ;
6. Gestion des blocs matrices ;
7. Fabrication (TTH, Usinage et Electroérosion) de matrice de production ;
8. Fabrication des électrodes

D'après les retours d'expériences des opérateurs et des mainteneurs, plusieurs points de vue différents ont été recensés autour de cette fracture, mais vraiment aucune preuve évidente n'a été apportée principalement sur le nombre de pièces frappées par cet outil avant rupture. Si une matrice a subi une telle défaillance, c'est par ce qu'il y a une mauvaise prise de décision quant au changement au moment opportun de l'ouillage. Il est question de quantifier la maintenance d'un système de production, à travers des indicateurs caractéristiques et significatifs afin de connaître la situation financière, matérielle et la situation en personnels, de leur service, et aussi de justifier toutes les actions passées, en cours et à venir.

Le recours aux outils de modélisation et de simulations est de nos jours un moyen de quantification de la maintenance tant aux niveaux économique, technique, humain afin d'apprécier les écarts et les analyser pendant la production et d'en prendre les bonnes décisions pour entamer des actions de maintenance. C'est dans ce contexte que nous développons la rubrique suivante de ce chapitre.

II.4 Paramétrage d'un procédé de forgeage

Chaque défaillance du système de production est due à une ou plusieurs causes dont les conséquences sont systématiquement rabattues sur le produit fini. Ainsi, la maintenance a besoin de savoir si le procédé est bien paramétré pour remplir sa fonction dans les meilleures conditions de qualité de production, de délais de production et de sécurité. De nos jours, le paramétrage d'un procédé de mise en forme est réalisé au moyen de codes de calcul disponible sur le marché. La modélisation et les simulations des procédés industriels comme

le forgeage a pour but de résoudre avec précision de nombreux problèmes pratiques. Chaque opération considérée comme un système est modélisée et analysée en intégrant les interactions entre les principales variables associées dans la fabrication de l'outillage de forgeage. Ces interactions impliquent des transferts thermiques dans le processus de forgeage qui sont importants pour l'écoulement de la matière mais aussi sur la durée de vie de l'outillage. En outre, la simulation de l'écoulement du métal permet de vérifier approximativement si les géométries initiale de la billette et de l'empreinte sur le bloc matrice sont conformes et suffisantes pour remplir les cavités des matrices afin de produire la pièce souhaitée, sans aucun défaut de forgeage.

Dans ce travail, la modélisation et les simulations numériques ont été réalisées sous le code de calcul Forge® Nxt qui offre la possibilité de simuler plusieurs mises en donnée, figure II.5. Il a l'avantage de lancer une série de calculs avec des mises en données modifiées progressivement, en fonction des résultats obtenus à chacune des simulations. Une présentation de la simulation sous logiciel Forge® Nxt est donnée en Appendice A2.

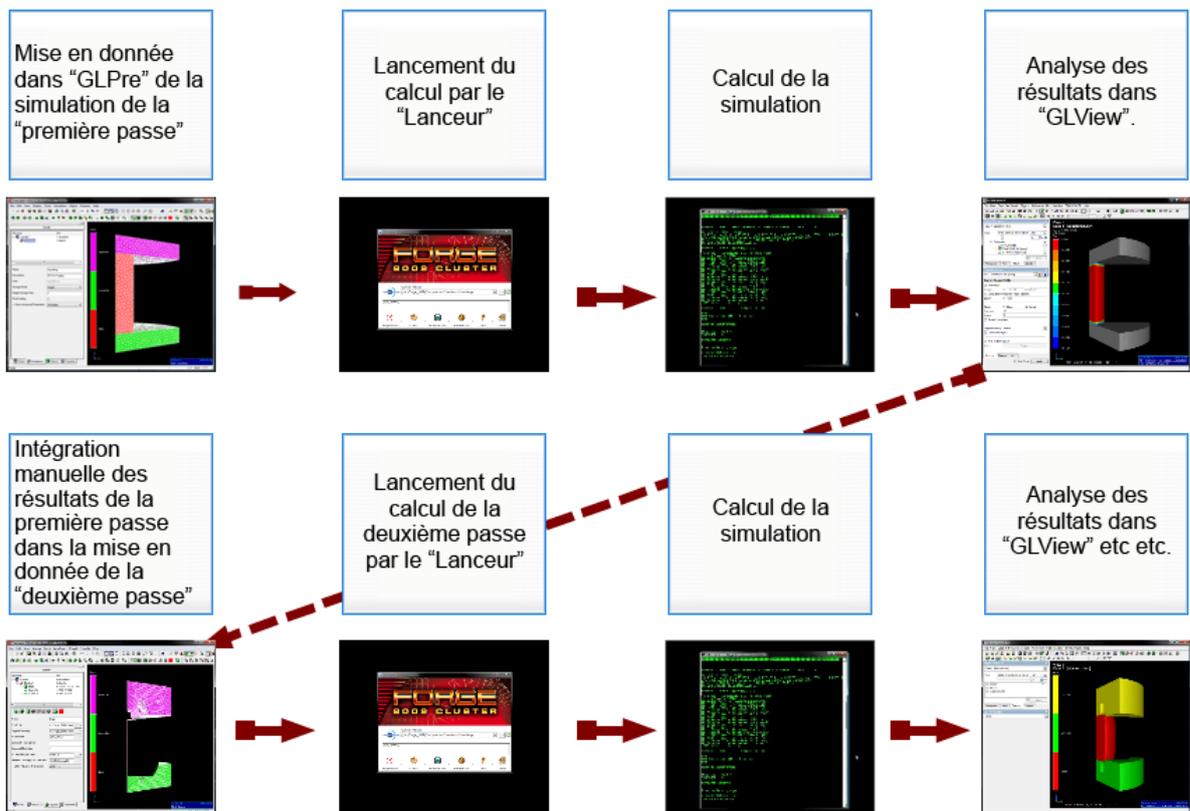


Figure II.5 : Principe de simulation sous Forge® Nxt. [TRANSVALOR]

II.4.1 Analyse du système de production de pièces forgées

II.4.2 Dessin de définition de la pièce forgée

L'étude démarre par l'analyse du dessin de définition de la pièce. L'appendice A 1 (le dessin du levier, page 117) montre un plan technique de l'ébauche du levier de direction. Il est produit, fréquemment, à des cadences qui varient de 1500 à 5000 pièces selon le cahier des charges.

II.4.3 Matériau de la pièce

Le matériau de la pièce est un acier faiblement allié au chrome molybdène 25CrMo4 dont la composition chimique et les caractéristiques mécaniques sont été rapportées par Maurin [MAURIN] et sont données dans les tableaux II.2 et II.3.

Tableau II.2 : Composition chimique moyenne de l'acier 25CrMo4 % (% en élément).

Élément	C	Cr	Mo	Mn	Si	P	S
25CrMo4	0,22/	0,90/	0,15/	0,60/	0,40	0,035	0,034
	0.29	1.20	0.30	0.20	Maxi	maxi	maxi

Tableau II.3 : Caractéristiques mécanique moyennes de l'acier 25CrMo4.

Désignation	Rm N/mm ²	Re N/mm ²	A%
Valeurs	700/1000	450/700	12/15

II.4.4 Matériau de l'outillage d'estampage du levier de direction

Les aciers utilisés pour la réalisation de matrices travaillant à chaud sont de tous les aciers d'outillage les plus fortement sollicités : chocs thermiques, chocs mécaniques, pressions élevées. Ces aciers doivent présenter un certain nombre de propriétés parmi lesquelles :

- La résistance à la température élevée au cours de l'utilisation pour éviter la déformation des gravures.
- La résistance aux actions abrasives de l'écoulement du métal.
- La ténacité élevée pour résister aux contraintes mécaniques les plus dures.

- Du traitement thermique en vue de conserver dans l'épaisseur les caractéristiques mécaniques de la surface sujette à un éventuel endommagement.

Les matrices sont fabriquées en X38CrMoV5, classé dans la gamme des aciers résistants aux chocs thermiques, du fait de la présence du chrome, du molybdène et du vanadium, aspect particulièrement important dans le cadre du forgeage à chaud. Les propriétés chimiques et mécaniques ont été retrouvées dans les travaux de Barrau [BARRAU], et rapportés dans le Tableau II.4 et II.5

Tableau II.4 : Composition chimique moyenne du X38CrMoV5 (*composition massique %*).

Élément	C	Cr	Mn	V	Ni	Mo	Si
X38CrMoV5	0,40	5,05	0,49	0,47	0,20	1,25	0,92

Tableau II.5 : Caractéristiques mécaniques de l'acier X38CrMoV5.

Désignation	Module d'Young (GPa) à 200°C	Module d'Young (GPa) à 300°C	Module d'Young (GPa) à 400°C	Module d'Young (GPa) à 500°C
Valeur	206.4	195	186.6	165.6

II.4.5 Gamme de production du levier

La gamme de production permet de définir les différentes opérations pour obtenir la pièce à partir d'un lopin. Elle établit tout le processus depuis le débitage du lopin jusqu'à la pièce finie en désignant les postes de travail et les conditions de mise en forme. Le tableau II.6 illustre la gamme de production du levier de direction véhicule automobile.

Tableau II.6 : Gamme de production du levier de direction.

Phase	Sous phase	Opération	Machine	Outil de contrôle
1	1-1	Débitage : Procéder au débitage des barres $\phi 45 \times 260 \text{mm}$	Cisaille Ficep	Double Mètre
2	2-1	Contrôler les lopins débités		
3	3-1	Chauffage : Disposer les lopins dans le four à un intervalle de 0.5 - Procéder au chauffage les lopins à la température 1200°C	Four CFI	Pyromètre

4	4-1	Estampage : Déposer le lopin sur la gravure à l'opération - lors du roulage respecter le positionnement du lopin dans la gravure, veuillez au remplissage de la gravure du roulage	Presse KH500	FM734.00.000
	4-2	Pliage : Positionner le lopin sur la gravure du pliage et procéder à l'opération	Presse KH500	
	4-3	Ebauchage : positionner le lopin sur la gravure d'ébauche (ébauchage et finition réalisés sur un même outil) et procéder à l'opération	Presse KH500	
	4-4	Finition : positionner le lopin sur la gravure de finition et procéder à l'opération	Presse KH500	
5	5-1	Ebavurage : positionner la pièce sur la matrice d'ébavurage et procéder à l'opération	Presse KH 250	/
6	6-1	Contrôle : procéder au contrôle des pièces		/
7	7-1	Traitement thermique		/
8	8-1	Grenailage : Procéder au grenailage des pièces	Grenailleuse W ST7	/
9	9-1	Expédition		/

- (avec l'aimable autorisation de l'E.P.E. Ferroviaire Annaba, Algérie). www.ferrovial.dz

L'inspection du procédé de production d'un levier de direction a permis de collecter des informations utiles afin de déterminer les actions à faire pour garantir une meilleure performance. Les principaux constats sont :

a) L'ébauche du levier de direction est obtenue en 4 phases principales. La phase 1 consiste en la préparation d'un lopin d'estampage par débitage, roulage et étirage en forgeage libre (Fig. II.6) suivie de la phase de pliage (phase2), sous une matrice sans empreinte par marteau pilon. Les phases 3 et 4 s'effectuent sur une matrice avec des empreintes d'ébauchage et de finition. Avant la phase de finition, les bavures sont enlevées sur une presse d'ébavurage.



Figure II. 6 : Les 4 phases de mise en forme de l'ébauche d'un levier de direction. [FERROVIAL]

b) Le levier de direction se compose de parties qui présentent généralement une morphologie complexe, sur laquelle beaucoup d'attentions doivent être accordées dans le but d'analyser leur comportement pendant le processus de forgeage.

c) La pièce étant cambrée, la matrice présente un joint brisé (Figure II.7a). Dans ce cas, le bloc inférieur est le plus sollicité par les efforts de frappe et susceptible aux déformations. Ainsi, il est fortement recommandé de prévoir un talon dans le bloc inférieur qui va prendre plus de volume que le bloc supérieur. L'expérience montre que son épaisseur doit être au minimum égale à 1,5 fois sa hauteur [Husson]. L'exécution de telles matrices se fait en production unitaire sur des machines conventionnelles et demandent beaucoup d'arrachements du métal donc de pertes de matière première et un grand temps de fabrication. Globalement la gamme de fabrication des matrices se fait en 3 phases principales :

- usiner une saignée S dans le bloc inférieur,
- usiner le joint brisé,
- graver les empreintes correspondant à la préforme et la pièce finie avec des techniques d'électroérosion et électrochimique. Cette dernière phase nécessite la préparation préalable des électrodes qui doivent reproduire fidèlement les gravures désirées.

Il est intéressant de savoir si l'utilisation d'une matrice à joint plan (Figure II.7 c) comprenant étirage, roulage, gravure d'ébauche et gravure de finition, peut-être adaptée pour créer un

équilibre de forces entre la matrice supérieure et la matrice inférieure, lors des frappes pour la mise en forme.

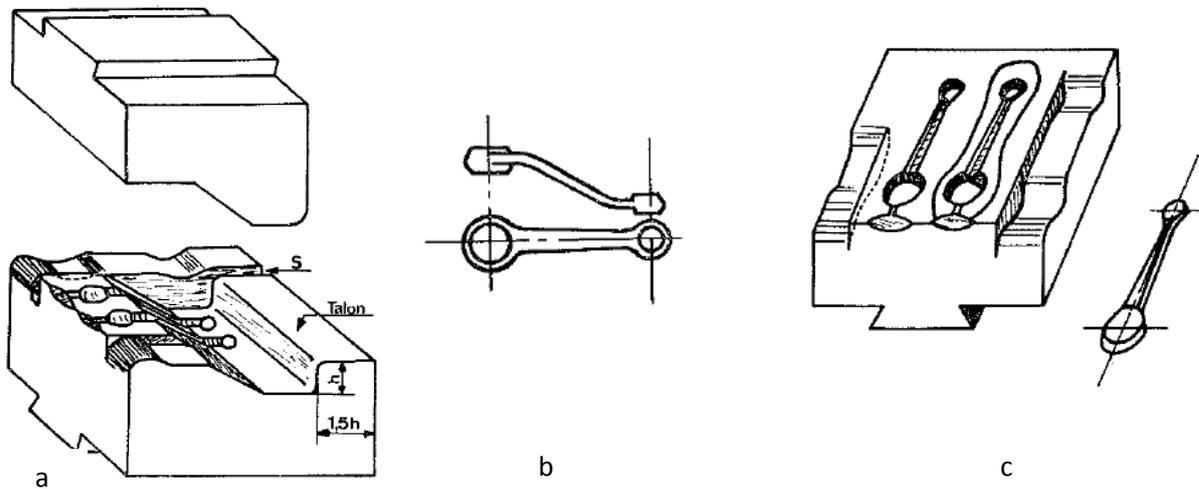


Figure II.7 : a) Matrice à joint brisée ; b) Pièce cambrée ; c) Matrice à joint plan. [Husson]

d) Le contrôle des lopins débités d'une barre laminée, montre que les longueurs sont bien dans les tolérances puisqu'ils sont découpés sur une cisaille à ravitailleur semi-automatique permettant d'ajuster la longueur de prise. Les tolérances sur le diamètre sont données par les tolérances de la barre initiale et peuvent atteindre $\pm 1\text{mm}$. Cette valeur est suffisamment grande pour donner des variations dans les côtes comme les diamètres et les longueurs des têtes du levier et aussi sur le volume des bavures qui posent problème lors d'une opération de forgeage.

e) Compte tenu du nombre d'heures de travail de la presse, elle doit subir des travaux de maintenance préventive définie par le tableau AMDEC qui sont programmés en collaboration avec les services de la production.

f) Le chauffage des lopins jusqu'à 1200°C se fait dans des fours à gaz et le transfert du lopin vers la machine génère une perte de chaleur.

g) Le préchauffage des matrices à une température de 250°C est réalisé par une plaque chauffante qui est doit être retirée lors des frappes. Une attention particulière est donnée à cette méthode de préchauffage puisqu'il existe toujours une chute de température.

Dans la prochaine rubrique, un plan d'expérience est développé pour modéliser le procédé d'obtention du levier sous le code de calcul Forge® Nxt afin d'optimiser le procédé. Ce plan d'expérience intègre les paramètres de forgeage qui doivent permettre de simuler au mieux les

opérations de forgeage et l'optimisation de ces paramètres. Les principaux paramètres peuvent être résumés comme suit:

- Matière de la pièce à forger
- Volume de la pièce de la pièce à forger
- Géométrie de la pièce
- Température de pièce
- Matière de l'outillage
- Température de l'outillage
- Energie de la machine
- Hauteur de frappe
- Nombres de coup

II.5 Modélisation et Simulations du forgeage d'un levier cambré

II.5.1 Simplification du modèle géométrique.

L'analyse du procédé de mise en forme à chaud du levier cambré montre qu'il existe des actions de vérification à prendre en compte pour rendre la maintenance efficace. Dans le contexte de la présente étude, compte tenu de la complexité de la pièce, le nombre de paramètres à prendre en considération est élevé et rend la modélisation et les simulations complexes. Par conséquent, afin de réduire au minimum le nombre de paramètres, et pour une meilleure appréhension de la méthodologie, il a été décidé de simplifier la géométrie du levier de direction pour obtenir un noyau de constant diamètre similaire. La Figure II.8 illustre le cas simplifié d'un levier cambré. Cependant, les paramètres rhéologiques et de forgeage sont respectés selon la gamme de production (Figure II.8).

Deux blocs en acier 30CrNiMo8 forment la matrice d'estampage. Généralement pour les leviers cambrés la matrice est à joint brisée (Figure II.7 a) où l'outil inférieur prend plus de volume que l'outil supérieur, mais les charges ne sont pas équilibrées. Pour équilibrer le volume et les charge entre l'outil inférieur et l'outil supérieur, la matrice est réalisée à joint plan (Figure II.7 b).

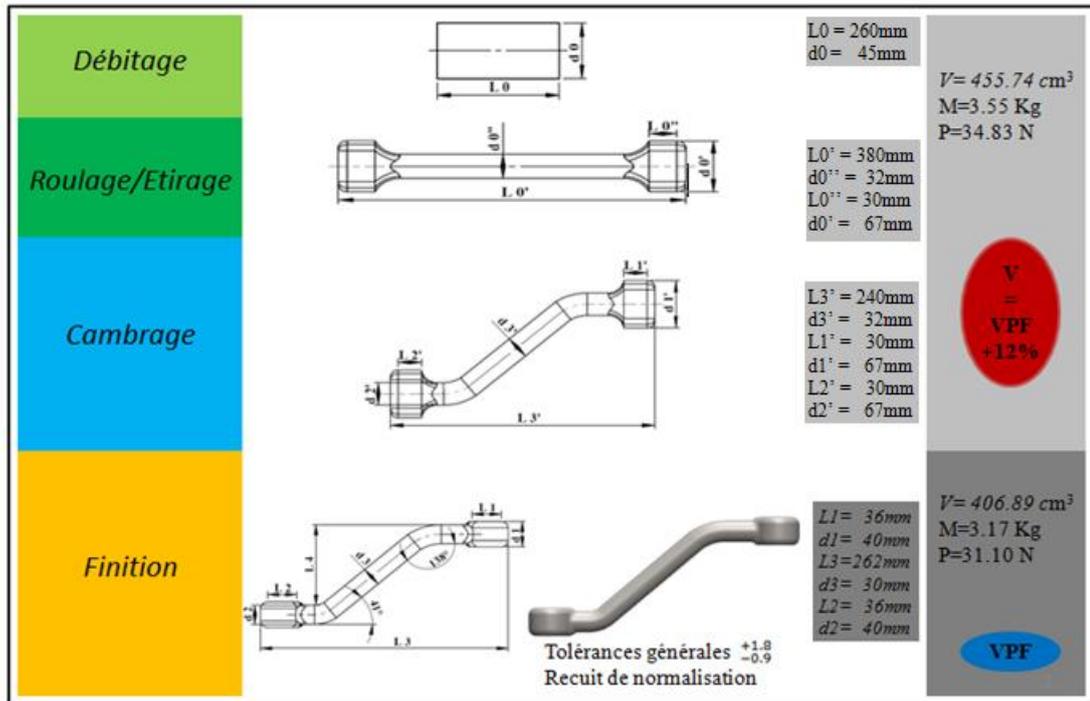


Figure II.8 : Simplification de la géométrie et Gamme de production d'un levier cambré.

II.5.2 Configuration géométrique des matrices d'estampage sous Forge® Nxt

L'avantage de l'utilisation des outils de modélisation et de simulations de mise en forme sont qu'ils permettent d'une part de concevoir virtuellement les matrices selon qu'elles soient à joint plan ou à joint brisé et ensuite rechercher la configuration à retenir pour fabriquer l'outillage et d'autre part d'optimiser le volume du lopin à utiliser. La figure II.9 montre les deux variantes de matrice à joint brisé et à joint plan réalisé sur la base du dessin de définition de la pièce à forgée et la gamme de production (Figure II.7).

Cependant, compte tenu des recommandations des forgerons basées sur leur expérience qui rappellent le problème de manutention de la pièce, il a été décidé de ne pas revenir sur les matrices à joint plan pour les pièces cambrées. Donc la première étape consiste à définir les géométries par une représentation virtuelle CAD en 3D des objets en interaction durant l'opération réelle de forgeage. La figure II.10 montre la modélisation géométrique du procédé de mise en forme du levier de direction, caractérisée par les portes outils, supérieur et inférieur; les outils, inférieur et supérieur et le lopin. L'outil inférieur est plus volumineux présente un talon pour mieux résister aux sollicitations. L'outil supérieur doit être bien aligné pour descendre d'une manière précise dans l'outil inférieur à chaque coup de forgeage.

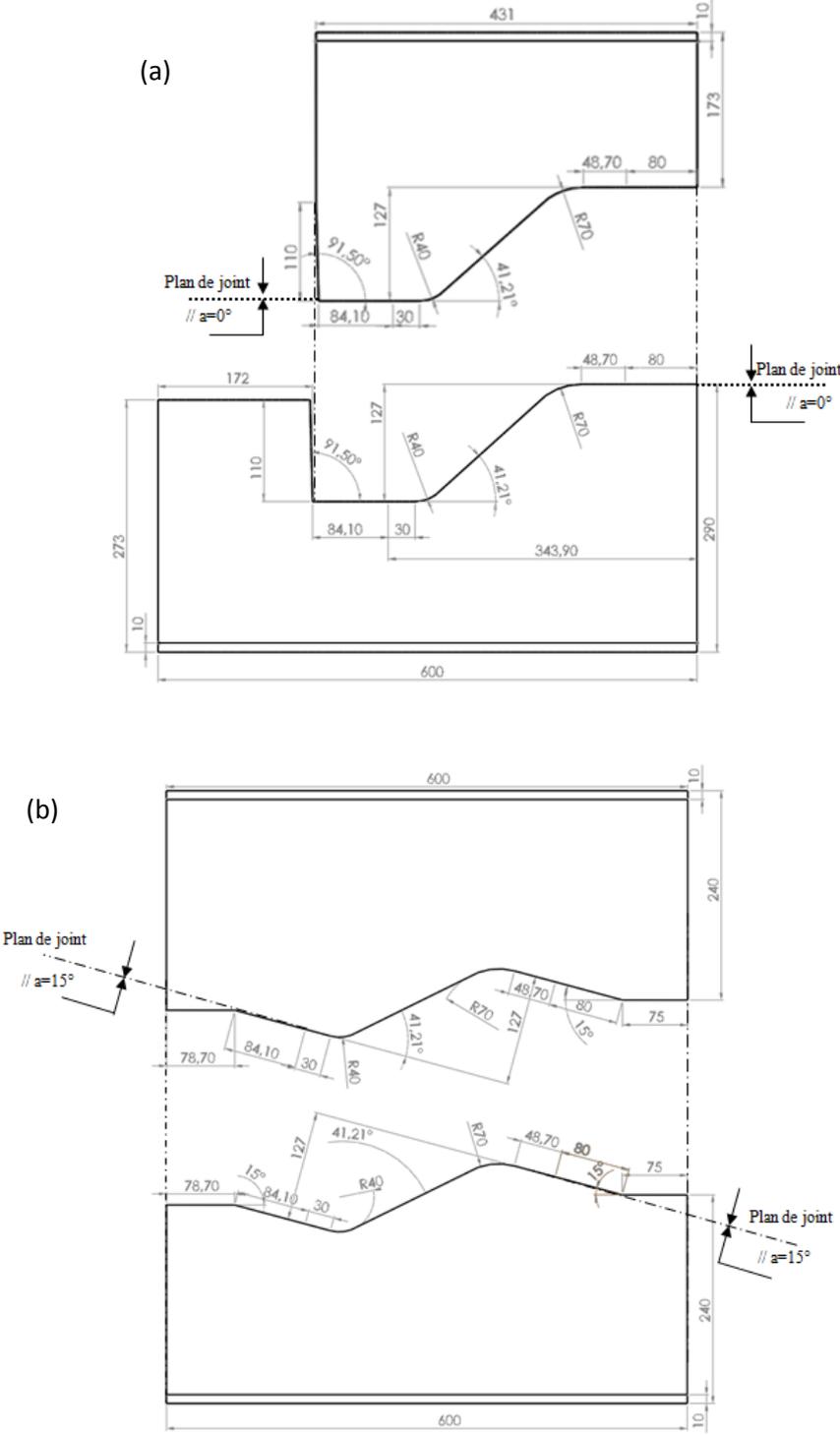


Figure II.9: Conception sous SolidWorks de matrices d'estampage d'un levier cambré, à joint brisé.

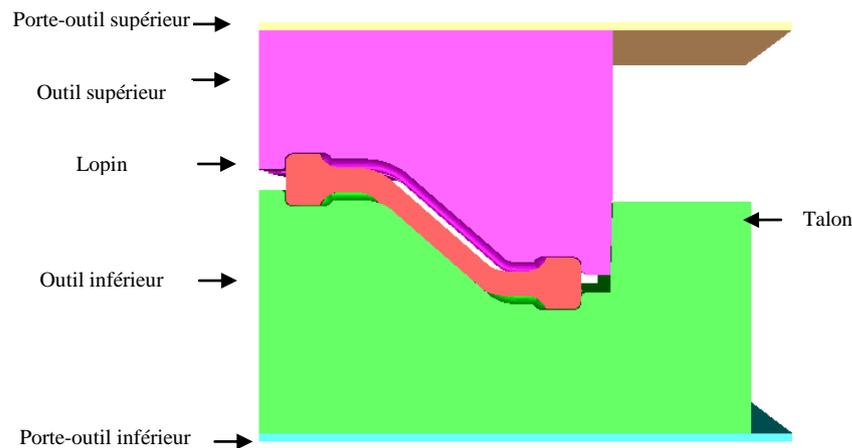


Figure II.10 : Modélisation géométrique du procédé de forgeage du levier de direction.

II.5.3 : Elaboration du plan d'expérience pour le paramétrage du procédé du forgeage

Une fois que la géométrie de chacune des matrices d'estampage est définie, le paramétrage d'un procédé de forgeage se repose sur la bonne connaissance des moyens de production, et la mise en données. La gamme de production est le référentiel pour la mise en données d'un procédé de mise en forme. La simulation du procédé de mise en forme doit permettre d'examiner le comportement du procédé et de mettre en évidence la qualité de mise en forme. Les résultats sont visualisés et évalués à l'écran sous forme de graphiques ou d'animations à l'aide d'un post-processeur. La simulation de forgeage permet de prévoir avec précision l'énergie et les forces de pression, et ces informations permettent la sélection de la presse. Elle donne aussi d'une part, les valeurs maximales des températures pour le lopin et les outils, et d'autre part, la puissance dissipée par déformation plastique, par frottement et etc. Habituellement, le volume du lopin est pris 12% supérieur au volume de la pièce finie.

Le premier objectif des simulations est de déterminer les paramètres optimaux qui doivent permettre l'utilisation rationnelle de l'équipement et particulièrement obtenir la meilleure durée de vie de l'outillage. Mais avant de lancer les premières simulations, le personnel de forge a orienté le plan d'expériences vers des points importants afin d'éviter un plan surchargé. Par ailleurs le code de calcul Forge® Nxt est fiable dans le paramétrage du procédé.

En plus des conditions rhéologiques, et de l'équipement, le paramétrage consiste à déterminer les dimensions moyennes de la bielle prise comme référentiel

Après plusieurs tentatives de simulation, les résultats sont analysés afin de calibrer le procédé, c'est-à-dire de déterminer un référentiel pour varier les simulations du procédé. Ce référentiel est utilisé pour définir un plan d'expérience qui doit être basé sur une logique continue des résultats recherchés. Donc le calibrage a été réalisé comme suit :

L'outillage est chauffé à 250°C, présentant une matrice inférieure avec talon, est destiné à frapper une billette B, chauffée à 1200°C, diamètre de tête 1 de la préforme est égal à 67mm, longueur = 30mm, diamètre de tête 2 égal à 67mm et longueur 30 mm. Pour arriver à cette configuration, les simulations ont été réalisées pour l'outillage à température adiabatique, deux températures 20°C et 250°. Les résultats sont donnés dans l'appendice A3. Donc, il a été convenu, d'une part de voir la réponse de la chauffe de l'outillage sur la qualité de la pièce finie et d'autre part l'effet de la variation des dimensions de la préforme, Figure 8. Le lopin est une ébauche extraite d'une barre laminée de diamètre 45 ±1. Ainsi, un plan d'expérience retraçant deux conditions de préchauffe de l'outillage pour 6 conditions d'utilisation du lopin a été déterminé comme indiqué sur le tableau II.7.

Tableau II.7 : Plan d'expériences pour l'estampage du levier de direction.

N°	Scénario=A	Outil = T (tool)	Température de Outil 0: Adiabatique; 1=20°C; 2= 250°C	Lopin = B (Billet)	Température du Lopin : 0=900°C, 1=1200°C, 2=1250°C	Configuration de l'outil a=0 (0°) outil avec Talon a=1 (15°) outil sans Talon	Diamètre Tête 1 0= 67mm 1= 68 mm, 2 = 69 mm	Longueur de la Tête 1, 0= 30mm 1=31mm 2=32mm	Diamètre Tête 2 0= 67mm 1= 68 mm, 2 = 69 mm	Longueur de la Tête 2, 0= 30mm 1=31mm 2=32mm	Remarques 0 = Calcul terminé 1 = Calcul en cours 2: La création de modèle de simulation sans lancement de calcul. 3 : pas en cours
1	A	T	0	B	1	0	0	0	0	0	0
2	A	T	1	B	1	0	0	0	0	0	0
3	A	T	2	B	1	0	0	0	0	0	0
4	A	T	2	B	1	1	0	0	0	0	0
5	A	T	2	B	1	0	1	0	0	0	0
6	A	T	1	B	1	0	0	1	0	0	0
7	A	T	2	B	1	0	0	1	0	0	0
8	A	T	1	B	0	0	0	0	0	0	0
9	A	T	2	B	0	0	0	0	0	0	0

Les 3 premières simulations ont pris beaucoup de temps, par ce qu'un calibrage des données de simulations a été nécessaire. Les simulations de 4 à 9 ont permis de comprendre le comportement de l'outillage en fonction de la variation des dimensions de la préforme de la pièce. Les résultats de ces simulations sont présentés dans le chapitre V.

II.6 Conclusion du chapitre II

Dans ce chapitre, il a été mis en évidence l'importance de paramétrer le procédé de forgeage pour mener des études sur le besoin de la maintenance. Dans un premier plan, le forgeron a une difficulté dans la prise de décision quant au changement de l'outillage au moment opportun. L'introduction d'un indice de performance de son outillage doit être d'un grand apport. Dans un deuxième temps, la place stratégique qu'une unité de forge peut prendre dans un complexe industriel de fabrication mécanique a été montrée. D'où l'intérêt de calibrer le procédé de mise en forme et de déterminer les paramètres pour optimiser le procédé de mise en forme mais aussi pour assurer le bon fonctionnement du système de production c'est-à-dire rendre le système fiable, maintenable et disponible. Les presses de mise en forme sont des machines de plus en plus fiables et performantes. Par contre l'outillage reste le sujet qui fait l'objet d'études plus poussées à cause de l'usure, les déformations plastiques et les fissurations par fatigue qui forment des phénomènes complexes susceptibles de produire des instabilités plastiques pouvant aller jusqu'à la rupture de l'outillage.

Enfin, une procédure de paramétrage a été développée d'un procédé de mise en forme en s'appuyant sur un cas industriel pour fabriquer un levier de direction.

CHAPITRE III

**Méthodologie d'évaluation d'indices de performance
en maintenance**

III.1 Elaboration d'un concept d'évaluation d'un indice de performance en maintenance

L'état de l'art sur les indices de performance en maintenance montre qu'il existe un grand nombre d'indices de performance auxquels sont confrontés les services de maintenance dans la recherche d'indices explicites permettant de cadrer la gestion de la maintenance. Pour qu'un indice soit significatif et exploitable, il faut que la valeur utilisée qui le compose soit réaliste, mesurable et définie avec précision. Il doit permettre de contrôler et de vérifier l'atteinte des objectifs et le bon fonctionnement du processus. À cet effet, les indicateurs techniques sont les plus réalistes dans le suivi de la production pendant que les indicateurs financiers sont les conséquences d'un bon ou mauvais suivi technique.

Le présent travail propose un concept d'évaluation d'un indice de performance technique qui doit faire l'objet d'outil d'aide à la décision en temps opportun pour activer des actions de maintenance afin d'assurer le fonctionnement de la production pour un objectif de production ciblé.

III.1.1 Comprendre la préoccupation des industriels

L'élaboration d'un concept d'évaluation d'un indice de performance en maintenance se décide quand il s'agit de savoir ce qu'est 'un arrêt de la production' qui peut être classé en 4 types bien définis :

1. Arrêt causé par une défaillance technique
2. Arrêt causé par une défaillance du personnel
3. Arrêt causé par une défaillance externe (manque d'énergie, manque matière première, ...)
4. Arrêt programmé (révision ou pas de cahier de charge).

La défaillance technique ne peut avoir lieu que lorsque la production est en cours selon un cahier des charges qui doit être respecté dans les délais et dans la qualité du produit fini. Pour que le système soit fonctionnel toutes les actions de maintenance préventives et curatives ont été réalisées avant de lancer la production. Hélas, bien que les opérateurs soient qualifiés et expérimentés, souvent une défaillance technique imprévue du système de production engendre automatiquement un retard dans la production ou bien l'arrêt de la production. Si le système de production est bien équilibré, il définit par lui-même les conditions de bon fonctionnement. Cependant, les défaillances techniques qui reviennent pratiquement dans des conditions imprévisibles sont dues à l'usure de l'outillage de production particulièrement dans

les systèmes subissant des chargements et des sollicitations extrêmes comme dans le cas des ateliers de mise en forme à chaud, l'exemple des forges. Donc l'estimation de la durée de vie de l'outillage préoccupe de très près les industriels. Prévenir les défaillances imprévisibles devient donc un challenge qui ne peut être surmonté que si des indicateurs connus alertent d'une éventuelle défaillance technique. Pour acquérir ces indicateurs, il faut adopter une stratégie de leur évaluation qui doit être caractérisés comme des indices de performance. La figure III.1 montre le concept pour évaluer la performance d'un outillage de production de pièces mises en forme à chaud. La méthodologie consiste à adopter une stratégie qui doit respecter des critères d'adoption au moyen d'outils adoptés sur la base de données de production.

III.2 Stratégie d'évaluation des indices de performances en maintenance

La stratégie doit répondre à des besoins industriels qui sont exprimés par la production. Ces besoins sont directement liés aux coûts de production et aux coûts de maintenance. Cette dernière, quand elle est bien gérée, elle est une fonction productrice de richesses. L'usure de l'outillage constitue la principale défaillance technique, préoccupant dans un système de production équilibré. Dans cette conjoncture, le besoin est de trouver un moyen d'estimer la durée de vie de l'ouillage dans les conditions réelles de production afin de prendre des décisions qui doivent mener à la réduction des coûts de maintenance. Ce besoin industriel doit être traduit par un objectif scientifique mettant en évidence l'évaluation d'un indice de performance prédisant la durée de vie de l'outillage. Pour atteindre cet objectif, il faut d'abord comprendre le comportement du système de production d'une part en analysant le procédé par des moyens scientifiques et d'autre part en observant et mesurant les éventuelles détériorations systématiques dans le procédé de production. Ensuite, comme dans

Stratégie	Critères	Outils de support	Données
Besoins industriels	Qualification	Modèles de processus - Modèles géométrique - Modèles mécaniques (Hansel-Spittel Lemaître&Chaboche)	Paramètres (Valeurs nominales) - Matériau - Géométries - Chargement
Cible scientifique - Processus - Fiabilité	Degré de confiance	Méthodes de fiabilité -Premier/ second ordre - Monte Carlo	Données probabilistes - Propriétés mécaniques - Dimensions - Données rologique - Température - Énergie - Pression - ...
Combinaison de modèles de comportement et de dommages Simulations	Scénario de défaillance $G(x_i) = D_c - D(x_i)$	Outils logiciels - Forge - PhimecaSoft	Modes de dommages - Déformation locale - Fatigue thermique - Déformation plastique - fatigue mécanique
Résultats prédictifs Indices de performance		Outils de décision - Indice de fiabilité - Sensibilité	

Figure III.1 : Concept d'évaluation d'un indice de performance dans un procédé de mise en forme.

chaque système de production, il existe toujours de l'aléa dans les conditions de travail, une analyse de la fiabilité du système de production en tenant compte des incertitudes dans les paramètres d'entrée comme le chargement, les températures, les frottements, les déplacements, la géométrie, les conditions de service sont nécessaires pour rendre les réponses plus réalistes.

Dans les deux cas de figure, il est question d'exprimer le comportement du procédé par une loi de comportement qui prend en charge tous les paramètres qui y sont impliqués et aussi d'identifier la défaillance par une loi d'endommagement des éléments sensibles comme l'outillage. Tout l'art dans cette stratégie est d'arriver à combiner ces deux lois afin de simuler la production dans le but de déterminer un indice de performance qui évalue et la durée de vie

de l'outillage. Cette valeur doit rendre la décision simple à prendre quant aux actions d'entretien, ou de rénovation voire même de changement de l'outillage.

III.3 Critères liés à la stratégie d'évaluation des indices de performance

Une stratégie ne peut pas être choisie si les critères adoptés ne sont pas fixés par rapport à l'objectif scientifique à atteindre.

Le premier critère est un critère de qualification. En effet, les besoins industriels sont associés à des critères de qualité du produit dans les meilleurs délais avec des coûts réduits. Les pièces mécaniques produites par mise en forme à chaud, présentent un état de surface brute qui correspond à 1 triangle de la qualité de surface et des tolérances de dimensionnements jusqu'à $\pm 1\text{mm}$. Les exigences de forme, coaxialité, cylindricité, parallélisme, perpendicularité et autres dépendent de la configuration de la pièce à obtenir et de sa fonctionnalité. La configuration géométrique de la pièce, la qualité de surface, les tolérances dimensionnelles, les exigences techniques et le matériau sont indiqués dans le dessin de définition de la pièce. La gamme de production est élaborée sur la base du dessin de définition et de la cadence de travail. Dans un travail en petite et moyenne série le recours à l'outillage spécialisé est systématique comme l'utilisation des matrices d'estampage. Ces dernières sont déterminantes dans le processus de mise en forme de pièces de qualité et donc demandent beaucoup d'attention dans leur conception et de leur fabrication. Il ne s'agit pas seulement d'imprimer une empreinte qui reproduit fidèlement la forme à obtenir, mais aussi de déterminer les logements des bavures qui doivent permettre un écoulement optimum de la matière. Les lopins doivent aussi être bien paramétrés : un excès de matière, implique des sollicitations plus importantes sur les matrices et donc une usure plus rapide et un manque de matière implique des rébus. Cependant même si l'outillage est bien calibré, la qualité du produit fini reste tributaire de l'usure de l'outillage.

Le deuxième critère est le degré de confiance aux méthodes d'analyse du système de production qui lorsqu'elles sont intégrées à ce dernier, l'ensemble devient plus efficace. Dans ce travail, le concept d'évaluation de l'indice de performance dans un système de forgeage se repose sur deux simulations successives : la simulation du comportement du procédé et la simulation de la fiabilité du procédé.

Aujourd'hui, le comportement du système de production est simulé avec des outils puissants . Dans la rubrique I.2 du chapitre I, les outils de simulation numérique, pour analyser le comportement d'un processus de mise en forme, offrent des possibilités qui vont toujours dans le sens d'amélioration de la qualité de la production. Ces outils de modélisation et de

simulation des opérations de forgeage sont exploités d'une manière intense par ce qu'ils ne permettent pas seulement la visualisation des résultats pour des essais virtuels, mais, ils apportent aussi des solutions à des problèmes complexes, tel que l'endommagement et la fissuration de l'outil de forgeage par la prédiction de sa durée de vie. Donc quand un système de production est équipé de ces systèmes intégrés pour le contrôle de la production, le degré de confiance est élevé. La figure III.2 montre un système de production de pièces mécaniques par mise en forme à chaud. La machine principale est une presse de 400 tonnes. Un système de contrôle des paramètres de mise en forme et de saisie de données des paramètres de déformation de la pièce sont intégrées dans la machine. Un bras programmable permet les différentes manipulations : saisie de lopin chaud du four à induction et pose sur la matrice d'estampage ; après frappes, le bras saisi la pièce et la dépose sur le système de contrôle des dimensions de la pièce.



Figure III.2 : Procédé de mise en forme avancé a) Robot de manipulation de la pièce b) système de contrôle des pièces finies c) Presse 400t d) four à induction e) Système de contrôle intégré.

L'analyse de la fiabilité du procédé est réalisée par des outils qui intègrent toutes les incertitudes associées aux paramètres d'entrée, de comportement et de défaillances. L'objectif est de déterminer la robustesse du système de production. Aujourd'hui, ces outils sont disponibles et de plus en plus performants et surtout facilement accessibles. Tout l'art réside dans la clarification du système à analyser en cernant la problématique à travers un modèle géométrique qui doit être défini par un modèle mécanique dans lequel une loi mathématique caractérise le comportement du procédé en tenant compte des risques de défaillance. L'analyse fiabiliste prend en considération les incertitudes associées aux paramètres de calcul qui sont qualifiés par une loi probabiliste définissant la distribution des variables aléatoires.

Le troisième critère concerne le scénario de défaillance qui est exprimé par une fonction d'état limite. Dans le cas d'un procédé de mise en forme il est important de connaître l'évolution de l'endommagement de l'outillage. C'est la grande inconnue jusqu'à l'arrivée des systèmes de contrôle du procédé qui permet d'estimer les déformations générées par les frappes et qui doivent être acceptables jusqu'à une valeur limite au-delà de laquelle l'outillage ne peut plus répondre à la qualité requise du produit. Le troisième critère nécessite le développement de la fonction d'état limite qui doit vérifier la condition de non-défaillance du système c'est-à-dire de l'outillage.

III.4 Supports d'évaluation d'indices de performance

La procédure d'évaluation des indices de performances se résume à une suite logique d'utilisation de supports depuis la mise en données jusqu'à l'obtention d'outils d'aide à l'évaluation d'indices de performance. Donc la procédure est divisée en 4 étapes successives :

Etape 1 : modélisation du procédé : (géométrie et lois de comportement)

Le procédé de mise en forme tel le forgeage est d'abord modélisé géométriquement. Le procédé consiste à frapper un lopin de matériau au moyen de deux matrices dont l'une forme l'enclume et l'autre le marteau. Les matrices comportent des gravures qui retracent fidèlement la forme de la pièce à former. Donc les empreintes sur les matrices doivent concevoir sur la base du dessin de définition de la pièce à forger. L'apport des outils de simulation permet de calibrer et paramétrer les gravures des matrices. La simulation du forgeage consiste à obtenir le principe de production en appliquant une charge sur la matrice supérieure, à une certaine hauteur et frapper le lopin jusqu'à obtenir la pièce finale. Les déformations qui en résultent ainsi que les bavures doivent être conformes au procédé réel. Il faut que le modèle géométrique soit soigneusement réalisé afin d'assurer des simulations conformes à la réalité.

Le comportement du système de production est défini par une loi mathématique qui caractérise les déformations nécessaires qui contribuent à la mise en forme d'un lopin en pièce de forme et de dimensions voulues. Dans le cas du forgeage, la loi rhéologique de Hansel & Spittel est la plus adéquat en intégrant les propriétés mécaniques des matériaux utilisés ; outillages et pièce (équation III.1). Ainsi la modélisation du comportement est caractérisée par la loi de Hansel & Spittel qui est bien intégrée dans les codes de calculs de mise en forme.

$$\sigma = Ae^{m_1 T} T^{m_9} \varepsilon^{m_2} e^{m_4/\varepsilon} (1 + \varepsilon)^{m_5 T} e^{m_7 \varepsilon} \varepsilon^{m_3} \varepsilon^{m_8 T} \quad (III. 1)$$

La plupart des matériaux référencés présentent des valeurs nulles pour les paramètres m_5 à m_9 . Ainsi il est possible simplifier donc l'équation comme ceci [TRANSVALOR] :

$$\sigma = Ae^{m_1 T} \varepsilon^{m_2} e^{m_4/\varepsilon} \varepsilon^{m_3} \quad (III. 2)$$

La principale cause de défaillance de l'outillage est l'usure, cependant les microdéformations qui surviennent dès les premières frappes peuvent générer des microfissures créant un phénomène de propagation par fatigue jusqu'à la rupture de l'outillage. Différentes lois d'endommagement peuvent être appliquées pour le suivi de l'endommagement, comme la loi de Preston-Archard pour l'usure et la loi de Lemaître-Chaboche pour caractériser un endommagement dû à la propagation d'une fissure par fatigue.

La loi d'endommagement de Lemaitre-Chaboche [HERBLAND](équation III.3) permet de calculer directement la durée de vie de l'outillage à partir de certaines données issues du premier cycle de forgeage, elle est intégrée dans le modèle fiabiliste, elle prend en compte l'histoire du chargement et également l'effet de la contrainte moyenne pour tout rapport de contrainte [CETIM].

$$N_f = \frac{\langle \sigma_u - J_{\max} \rangle}{a(\beta+1) \left\langle \frac{\Delta J}{2} - \sigma_l(I_1) \right\rangle} \left[\frac{\frac{\Delta J}{2}}{M(I_1)} \right]^{-\beta} \quad (III.3)$$

Donc la modélisation du procédé d'évaluation d'indice de performance dans un procédé de mise en forme consiste à combiner la loi de comportement du procédé proprement dit avec une loi d'endommagement. L'objectif de mettre en évidence un modèle mécanique qui prend en compte la loi rhéologique du matériau et une loi d'endommagement, sur la base du modèle géométrique ainsi conçu. Ces modèles doivent servir de modèles d'analyse de la fiabilité du procédé.

Etape 2 : Appliquer des méthodes fiabilistes

Aujourd'hui, il existe des outils d'analyse de la fiabilité à la conception très puissants, très simples à utiliser et se basent sur la détermination des indices de fiabilité par une approche d'approximation FORM/SORM ou bien par l'approche de Monté Carlo (voir la rubrique I.3). Le modèle mécanique développé dans l'étape 1 comporte plusieurs paramètres auxquels sont associées des incertitudes qui doivent être prises en considération par leur fonction de densité de probabilité.

Etape 3 : Utilisation des codes de calculs

Dans ce travail, deux principaux codes de calculs ont été utilisés : Forge® NxT et PhimecaSoft. Les simulations de l'opération de forgeage ont été réalisées sous le code de calcul Forge® NxT qui présente une solution logicielle idéale pour la simulation des procédés de mise en forme à chaud et à froid. Il permet d'analyser rapidement et de manière précise le forgeage des composants forgés. Ainsi, il est possible de concevoir et de valider les gammes de forgeage par la prédiction précise des informations suivantes [TRANSVALOR] :

➤ Pour la pièce forgée:

La géométrie finale et les dimensions finales, la matière excédentaire, les replis, le fibrage et la déformation généralisée, l'endommagement, les contraintes résiduelles, la microstructure et bien d'autres (température, vitesse de la déformation, déformation équivalente, usure et toute autre variable complémentaire, spécifique à l'utilisateur...).

➤ Pour l'outil:

L'usure par abrasion, l'endommagement, les contraintes et les risques de rupture, la température durant tout le procédé.

➤ Pour l'équipement:

Le choix du bon équipement grâce à la prédiction exacte de la force de forgeage, de la déflexion de l'équipement.

L'annexe A2 introduit un aperçu général sur le code de calcul FORGE® NxT.

Dans ce présent travail, l'analyse fiabiliste a été réalisée sous le code de calcul PhimecaSoft dont une présentation générale est donnée en annexe A4. Il est proposé aux universitaires et industriels avec un système d'interface qui rend le travail facile et efficace. Avant d'effectuer une étude de fiabilité, trois types de modèles doivent être définis :

- un modèle géométrique
- un modèle physique (ou mécanique),

- un modèle probabiliste,
- une fonction d'état de limite (ou modèle de performance)

Cependant, tout l'art d'utiliser ce type d'outils de calcul de fiabilité réside dans la préparation du travail en clair et dans le développement d'une stratégie d'analyse de la fiabilité.

Etape 4 : Détermination des indices

L'objectif des méthodes d'approximations FORM/SORM est de chercher quelles sont les hypothèses qui permettent de représenter un matériau ou une structure mécanique par un simple problème résistance-sollicitation dans un modèle nommé modèle mécanique. Elles permettent de déterminer l'indice de fiabilité, les facteurs de sécurité et la sensibilité des variables de calcul. Les résultats ainsi obtenus vont être exploités comme des outils d'aide à la décision pour évaluer par exemple un indice de performance exploitable au temps réel.

III.5 Données de départs pour l'évaluation d'indices de performance

Pour évaluer un indice de performance, les données de départs doivent être mises en clair. Il existe 3 types de données de départ pour l'évaluation d'un indice de performance :

a) Les données d'entrée

Elles concernent les données rhéologiques des matériaux (outillages et pièces), la géométrie, les dimensions de la pièce et des outillages, le chargement et conditions de chargement (charge, vitesse, température, déplacement, énergie, pression, coefficient de frottement et autres).

b) Les données probabilistes

Elles doivent prendre en considération les incertitudes exprimées par leur fonction de densité de probabilité. Il s'agit des variations dans les propriétés mécaniques des matériaux, dans l'énergie, dans la pression, dans les dimensions de l'outillage et de la pièce, dans les températures, les données rhéologiques, les dimensions des défauts ou de l'endommagement et autres.

c) Les données sur les modes d'endommagement

Comme les déformations locales, les déformations thermiques, les déformations plastiques, la fatigue, l'usure et autres.

La Figure III.1 montre la disposition de chacune des données par rapport aux supports outils, aux critères de fonctionnement afin de bien cerner chacun des points qui constituent la

stratégie ainsi proposée depuis le besoin industriel aux résultats prédictifs de la durée de vie de l'outillage.

III.6 Conclusion du chapitre III

Dans ce chapitre a été développé le contexte d'évaluation d'un indice de performance dans un procédé de mise en forme. Ce contexte bien qu'il s'inspire d'un cas industriel, il reste valable pour tous les procédés de mise en forme. L'important est de suivre la stratégie développée en mettant au clair les modèles de comportement, d'endommagement, et de les combiner et puis faire des analyses fiabilistes qui donnent des outils d'aide à la décision comme l'indice de fiabilité, les facteurs de sécurité et la sensibilité des variables afin d'évaluer un indice de performance.

Le prochain chapitre présente le développement de notre contribution sur un système de production discontinue pour la fabrication d'un levier de direction par forgeage.

CHAPITRE IV

Contribution à l'évaluation des indices de performance d'une matrice de forgeage à chaud

CHAPITRE IV Contribution à l'évaluation des indices de performance d'une matrice de forgeage à chaud

Dans le troisième chapitre, nous avons montré de quelle manière les outils de modélisation et de simulations des procédés de mise en forme peuvent être adéquats pour proposer des solutions optimisées. Ces solutions intègrent les paramètres d'entrée du procédé afin de veiller sur les conditions d'utilisation des moyens de mise en forme dont l'objectif est d'assurer son bon fonctionnement tout en gardant un œil sur la qualité du produit fini, les délais de production et la sécurité. Une fois que le système est calibré, un plan d'expérience est proposé pour étudier l'effet des variables aléatoires dans le système de production.

Dans le quatrième chapitre, le concept d'évaluation d'un indice de performance en maintenance a été élaboré en s'appuyant sur une stratégie donnée, qui doit respecter des critères bien définis au moyen d'outils d'analyse de simulation du procédé et d'analyse de sa fiabilité en associant les incertitudes dans les paramètres d'entrée et de calcul.

Le présent chapitre met en évidence notre contribution pour évaluer des indices de performance d'un outillage de mise en forme. Cette évaluation se base sur des outils d'aide à la décision qui sont déterminés par une approche mécano-fiabiliste. Conformément à la stratégie adaptée pour la recherche d'indices de performance, Figure IV.1, cette évaluation suit une procédure bien définie qui se compose de 4 étapes principales et une cinquième pour lancer les calculs d'évaluation:

Etape 1 : Analyse des modes de défaillance dans l'outillage de mise en forme

Etape 2 : Mise en données pour l'analyse de la fiabilité de l'outillage

Etape 3 : Calcul de la fiabilité de l'outillage

Etape 4 : Détermination d'outils d'aide à la décision

Etape 5 : Evaluation d'un indice de performance

IV.1 Analyse des modes de défaillance dans l'outillage de mise en forme

L'analyse des modes de défaillances se base sur des résultats d'observation du comportement des matrices d'estampage d'un levier de direction, dont la gamme de production est donnée dans le Tableau II.6.

En service, l'outillage subit des dommages dès les premières frappes, qui sont admissibles jusqu'à apparition de défaut dans la pièce forgée. La figure IV.1 montre l'état de la matrice inférieure après avoir réalisé 2800 leviers de directions. Toutefois, ce chiffre reste indicatif car il est encore très difficile de prédire et optimiser le nombre de pièces auquel la matrice va s'arrêter de produire des pièces conformes.

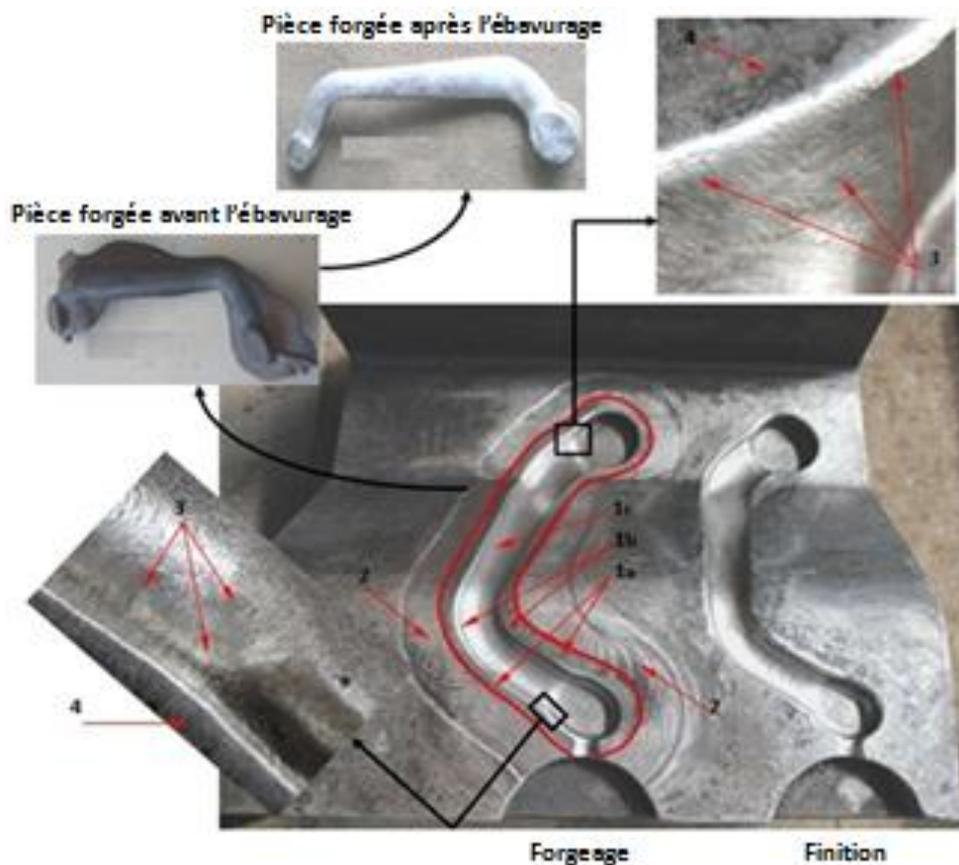


Figure IV.1 : Comportement d'une matrice après le forgeage à chaud d'un levier de direction cambré.

(1a) Surface de bavures (1b) bord (1c) zones descendant empreinte endommagées, (2) des traces de fraisage dans la zone des bavures, (3) déformation plastique, (4) usure.

CHAPITRE IV Contribution à l'évaluation des indices de performance d'une matrice de forgeage à chaud

La zone d'endommagement est concentrée autour de l'empreinte sur la matrice. Trois zones de dommages sont distinctes :

- 1- Le long de la surface de la bavure (fig1a);
- 2- Sur la bordure de l'empreinte (fig1b)
- 3- Dans la surface descendant de l'empreinte (Fig1c)

Ces zones sont les conséquences de l'existence de l'usure et des déformations plastiques qui peuvent générer des microfissures. Ces dernières deviennent des sites d'initiation et de propagation de fissures menant à la rupture de la matrice. Cette propagation est le résultat d'un phénomène de fatigue due à l'effet cumulatif des contraintes qui y sont impliquées. Quand, les travaux d'entretien ne sont pris à temps à cause d'une mauvaise prise de décision, la matrice peut se rompre en deux parties (Figure II.4). Dans l'urgence, des tentatives de réparation comme souder les 2 parties peuvent être réalisées en attendant la fabrication de nouvelles matrices, mais ce n'est que peine perdue devant la qualité requise et la quantité de pièces à réaliser. Par conséquent, une série d'inspection continue, est fortement recommandée afin de gérer la maintenance des matrices. Quand les travaux d'entretien sont programmés, alors des réparations sont donc nécessaires et consistent, traditionnellement en un chargement des zones usées, usinage et finition par électroérosion.

La grande difficulté dans la série d'inspection est de détecter les premières déformations et les premières traces d'usure. Cependant, celles-ci peuvent être obtenues par simulation de l'opération de forgeage, qui permet même d'évaluer la déformation équivalente et ensuite conduire des simulations itératives pour initier des fissures de fatigue.

IV.2 Mise en données pour l'analyse de la fiabilité de l'outillage

La mise en données pour l'analyse de la fiabilité de l'outillage suit la procédure décrite par l'outil de calcul de la fiabilité. Avant de lancer des calculs sous le code calcul de la fiabilité PhimecaSoft, la mise en donnée consiste à:

1. Définir le modèle géométrique
2. Déterminer le modèle mécanique pour l'analyse de la durée de vie de l'outil
3. Déterminer les modèles probabilistes
4. Appliquer un scénario de défaillance exprimé par une fonction d'état limite $G(x)$

La première étape dans l'analyse de la fiabilité consiste à déterminer le modèle physique ou mécanique, qui représente le comportement du processus. Mais avant cela, le processus doit

CHAPITRE IV Contribution à l'évaluation des indices de performance d'une matrice de forgeage à chaud

être modélisé géométriquement afin d'identifier l'exploitation des paramètres du processus. Le modèle géométrique est très déterminant pour la simulation du processus de forgeage qui permet le développement du modèle mécanique pour l'analyse de la fiabilité.

IV.2.1 Modèle géométrique du procédé de forgeage d'un levier de direction:

Le modèle géométrique est déterminé à partir de la pièce à réaliser c'est-à-dire le levier de direction. Ainsi les objets à modéliser sont présentés dans le tableau IV.1.

Tableau IV.1 : Objets de simulation de l'opération de forgeage d'un levier de direction.

Objets	Pièce	Outil déformable 1	Outil déformable 2
Description	Lopin	Matrice inférieure	Matrice supérieure
Fichier de matériau	34CrMo4.tmf	30CrNiMo8.tmf	30CrNiMo8.tmf
Température initiale (°C)	1200	250	250
Masse du lopin (kg)	1.8	/	/
Taille de Maille	2	2	2

La modélisation géométrique des objets est conçue sous un logiciel de CAO qu'il soit intégré dans le code calcul Forge® Nxt ou non. Le plus important est que le fichier soit compatible avec Forge® Nxt. Les objets à modéliser sont présentés dans la figure IV.2 qui correspondent à la matrice supérieure, la matrice inférieure et la pièce à réaliser. Le modèle géométrique de la pièce à réaliser sert à concevoir les empreintes dans les matrices inférieure et supérieure. La figure IV.2 montre le modèle géométrique du procédé de forgeage du levier de direction.

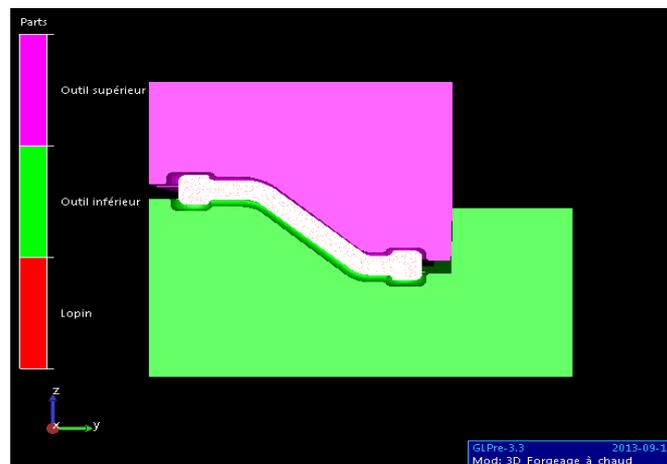


Figure IV.2 : Modèle géométrique du procédé de forgeage du levier de direction.

IV.2.2 Modèle mécanique basé sur le couplage de modèle de comportement rhéologique de l'outillage avec un modèle de d'endommagement

La durée de vie de la matrice, pendant le forgeage à chaud, est principalement dépendante de la résistance du matériau à l'usure, la fatigue thermique, la déformation plastique et la fatigue mécanique.

Le modèle mécanique a pour but de définir la loi de comportement de cette résistance en fonction des différents chargements appliqués; l'énergie, les déplacements, et les phénomènes de dommages. L'approche consiste alors à définir un modèle mathématique combinant une loi décrivant le comportement du processus de forgeage et une loi d'endommagement.

Dans ce travail de thèse, le comportement du processus de forgeage est caractérisé par une loi rhéologique simplifiée de Hansel-Spittel équation (IV.1). Cette loi s'applique au comportement élasto-viscoplastique. Elle est thermo-dépendante et tient compte des phénomènes d'écrouissage ou d'adoucissement. Elle prend en compte la vitesse de déformation du matériau. [TRANSVALOR, AGOUTI et HANSEL]

$$\sigma = A e^{m_1 T} \varepsilon^{m_2} e^{\frac{m_4}{\varepsilon} \cdot m_3} \quad (IV.1)$$

Où σ est la contrainte équivalente (la valeur maximale de l'invariant de VonMises du tenseur des contraintes), A est la cohérence du matériau de la matrice, T est la température de la matrice, m_1 définit la sensibilité du matériau à la température, m_2 et m_4 définissent la sensibilité du matériau à la déformation, m_3 dépend la sensibilité du matériau en fonction de la vitesse de déformation.

Les matrices inférieures à joint brisé, pour levier cambré, présentent souvent un talon qui doit résister au phénomène d'usure et aussi au phénomène de fissuration par fatigue. Si le phénomène d'usure trouve une solution de réparation par rechargement des empreintes endommagées et puis reprises des empreintes par électroérosion et électrochimie, la rupture par fatigue n'a d'autre solution que la fabrication de deux nouvelles matrices dont les temps de réalisation et les coûts sont très élevés. Ce présent travail s'intéresse à la durée de vie des matrices sous un éventuel phénomène de fissuration par fatigue. La loi qui exprime au mieux le modèle d'endommagement en fatigue permettant de calculer directement la durée de vie de

CHAPITRE IV Contribution à l'évaluation des indices de performance d'une matrice de forgeage à chaud

l'outillage est celle développée par Lemaître-Chaboche [LEMAÎTRE, HERBLAND], équation (IV.2)

$$N_f = \frac{\langle \sigma_u - J_{max} \rangle}{a(\beta+1) \left\langle \frac{\Delta J}{2} - \sigma_l(\bar{I}_1) \right\rangle} \left[\frac{\frac{\Delta J}{2}}{M(\bar{I}_1)} \right]^{-\beta} \quad (IV.2)$$

J_{max} est la valeur maximale de l'invariant de VonMises du tenseur des contraintes.

$\sigma_l(\bar{I}_1)$ est l'étendue de contrainte cyclique moyenne et $M(\bar{I}_1)$ est l'effet de la contrainte moyenne, ils sont donnés respectivement par les équations (IV.3) et (IV.4):

$$\sigma_l(\bar{I}_1) = \sigma_{10} \left(1 - \frac{b\bar{I}_1}{\sigma_u} \right) \quad (IV.3)$$

$$M(\bar{I}_1) = \sigma_{10} \left(1 - b \frac{\bar{I}_1}{\sigma_u} \right) \quad (IV.4)$$

Où b , σ_{10} sont des coefficients du matériau.

En combinant les équations (IV.1 à IV.4) une loi empirique est développée pour définir le modèle mécanique dédié à l'analyse de la durée de vie de l'outillage. Dans ce cas, le recours au code de calcul Forge® Nxt est indispensable car il permet notamment la simulation de l'opération de forgeage multi-objets dans le but d'observer la déformation équivalente sur une zone de l'outil. Ainsi, dès le premier cycle de forgeage, une première déformation équivalente ε_{pc} est générée conjointement avec une contrainte maximale σ_{pcmax} . Les notations pour un premier cycle dans l'équation (IV.1) deviennent comme indiqué dans l'équation (IV.5):

$$\sigma_{pcmax} = A e^{m_1 T} \varepsilon_{fc}^{m_2} e^{\frac{m_4}{\varepsilon_{pc}} \cdot m_3} \varepsilon \quad (IV.5)$$

En termes de contraintes générées après le premier cycle de forgeage, J_{max} dans l'équation (IV.2) peut être remplacée par la contrainte correspondante σ_{pcmax} exprimée dans l'équation (IV.6):

$$N_f = \frac{\langle \sigma_u - \sigma_{pcmax} \rangle}{a(\beta+1) \left\langle \frac{\Delta J}{2} - \sigma_l(\bar{I}_1) \right\rangle} \left[\frac{\frac{\Delta J}{2}}{M(\bar{I}_1)} \right]^{-\beta} \quad (IV.6)$$

CHAPITRE IV Contribution à l'évaluation des indices de performance d'une matrice de forgeage à chaud

Lors du remplacement de $\sigma_l(\bar{I}_1)$ et $M(\bar{I}_1)$ par les équations (IV.3) et (IV.4), l'équation (IV.6) devient la suivante:

$$N_f = \frac{\langle \sigma_u - \sigma_{pc \max} \rangle}{a(\beta+1) \left\langle \frac{\Delta J}{2} - \sigma_{l0} \left(1 - b \frac{\bar{I}_1}{\sigma_u}\right) \right\rangle} \left[\frac{\frac{\Delta J}{2}}{\sigma_{l0} \left(1 - b \frac{\bar{I}_1}{\sigma_u}\right)} \right]^{-\beta} \quad (IV.7)$$

La contrainte moyenne \bar{I}_1 est donnée par l'équation (IV.8) lorsque $\sigma_{pc \min}$ est égal à zéro:

$$\bar{I}_1 = \frac{\sigma_{pc \max}}{2} \quad (IV.8)$$

Le dommage total selon Lemaître-Chaboche [LEMAÎTRE, DATTOMA] est modélisé par l'équation (IV.9):

$$D = 1 - \left[1 - \left(\frac{n}{N_f} \right)^{\frac{1}{1-\alpha}} \right]^{\frac{1}{\beta+1}} \quad (IV.9)$$

Où α est une fonction donnée par l'équation (IV.10)

$$\alpha(\Delta J, \bar{I}_1, \sigma_{pc \max}) = 1 - a \left\langle \frac{\frac{\Delta J}{2} - \sigma_l(\bar{I}_1)}{\sigma_u - J_{pc \max}} \right\rangle \quad (IV.10)$$

Enfin, on obtient un loi de comportement, corrélant le modèle Hansel Spittel et le modèle Lemaître-Chaboche conduisant au modèle mécanique pour l'analyse de la fiabilité, équation

(IV.11):

$$D = 1 - \left[1 - \frac{n}{a(\beta+1) \left\langle \frac{\Delta J}{2} - \sigma_{l0} \left(1 - b \frac{\sigma_{pc \max}}{\sigma_u}\right) \right\rangle} \left[\frac{\frac{\Delta J}{2}}{\sigma_{l0} \left(1 - b \frac{\sigma_{pc \max}}{\sigma_u}\right)} \right]^{-\beta} \right]^{\frac{1}{\beta+1}} \left[1 - a \left\langle \frac{\frac{\Delta J}{2} - \sigma_l(\bar{I}_1)}{\sigma_u - \sigma_{pc \max}} \right\rangle \right]^{\frac{1}{\beta+1}} \quad (IV.11)$$

CHAPITRE IV Contribution à l'évaluation des indices de performance d'une matrice de forgeage à chaud

IV.2.3 Association des incertitudes et modèles probabilistes

Pour évaluer la probabilité de défaillance, l'approche traditionnelle déterministe ne peut pas tenir compte des variations physiques incertaines liées aux propriétés des matériaux, des conditions de friction, des surfaces actives de l'outil, les conditions de chargement, les températures, etc. Par conséquent, les incertitudes associées aux paramètres du modèle mécanique doivent être prises en compte à travers leur fonction de densité de probabilité. Le tableau IV.2 illustre les principaux facteurs caractérisant les paramètres de calcul, auxquels sont associées les variables aléatoires avec leur loi de distribution probabiliste.

Tableau IV.2 : Variables aléatoires des paramètres calcul et leur distribution probabiliste.

Type de variables	Symbole	Description	Distribution de probabilité	Valeur moyenne	Coefficient de variation	Source d'information
Facteur loi rhéologique	A	Cohérence Matériau	Normale	1695	0.5%	Base de données rhéologique FPDBase 1.3 Forge®
	m1	Sensibilité du matériau à la température		262.10^{-5}	0.5%	
	m2	Sensibilité du matériau à la déformation		5618.10^{-5}	1%	
	m3	Sensibilité du matériau en fonction de à la vitesse de déformation		13812.10^{-5}	1%	
	m4	Sensibilité du matériau à la déformation		4007.10^{-5}	0.5%	
Facteur résultant de la mise en forme	ϵ	Déformation équivalente issue du premier cycle de forgeage	Normale	0.08	5%	Résultats des simulations Forge®
	T	Température de la matrice		257	2.27%	
Facteur	A	Constant du matériau	Normale	1	1%	[HERBLAND]
	β	Coefficient du		2.94	1%	

CHAPITRE IV Contribution à l'évaluation des indices de performance d'une matrice de forgeage à chaud

fatigue et dommage	σ_{L0}	modèle d'endommagement Coefficient du matériau		480	1%	
	ΔJ	Déviateur des contraintes	Normale	1121	1%	Résultats des simulations Forge®
	Dc	Dommage critique	Normale	0.6	16.66%	[CETIM]

Trois types de facteurs sont impliqués dans le modèle mécanique : i) le facteur, loi rhéologique ; ii) facteur résultant de la mise en forme et iii) le facteur, fatigue et d'endommagement. Chacun de ces facteurs est défini par ses paramètres de calcul qui sont caractérisés par des variables aléatoires exprimées par leur valeur moyenne et leur coefficient de variation. Leurs incertitudes résultent de la géométrie, le chargement, l'énergie, la température, les paramètres de forgeage telle que décrits dans le modèle mécanique. Les paramètres du facteur de loi rhéologique ainsi que les propriétés mécaniques des matériaux sont choisis de la base de données FPDBase intégrée dans le code de calcul Forge®. Les incertitudes sont attribuées aux paramètres A, m1, m2, m3 et m4. Les paramètres du facteur résultant de la mise en forme et du facteur de fatigue et d'endommagement, à défaut, sont déterminés des résultats de simulation sous le code de calcul FORGE®. Les incertitudes liées au facteur de fatigue et endommagement sont associées aux paramètres du matériau a , β , σ_{10} et σ_u . Et enfin les incertitudes données par les résultats de simulation de mise en forme sous Forge®, sont associées aux paramètres ΔJ , ε , T et Jmax. Quant à l'incertitude associée au dommage critique Dc, en raison du manque d'information, les incertitudes peuvent être calculées à partir des valeurs suggérées dans la littérature [CETIM] et qui donne un coefficient de variation de 16,66%.

Les valeurs rhéologiques et les propriétés mécaniques ont été introduit à partir des propriétés de forgeage de base de données de codes Forge®. Les premières simulations consistent à déterminer la première déformation équivalente afin d'estimer la durée de vie de la matrice. Ceci est particulièrement dû au fait que l'iso-valeur de contrainte VonMises n'est pas cumulatif, de plus cet iso-valeur ne permet pas de quantifier la déformation plastique. Tandis que l'iso valeur déformation équivalente est cumulatif ; elle permet au pas de temps final d'observer toutes les zones qui sont rentrées en plasticité. En fait, les outils de forgeage effectuent des cycles pour déterminer leurs endommagements. Ainsi, simuler plusieurs cycles

CHAPITRE IV Contribution à l'évaluation des indices de performance d'une matrice de forgeage à chaud

les uns à la suite des autres, il serait possible d'observer si les déformations plastiques vont se stabiliser, s'accroître ou si de nouvelles zones entrent en plasticité.

Cependant la simulation de plusieurs cycles jusqu'à la rupture est difficilement réalisable. La simulation de plus de 4 à 6 cycles nécessite un grand temps et peut être coûteuse en temps CPU (*central processing unit*). Il existe des lois de fatigue qui permettent de calculer directement la durée de vie des matrices à partir des données issues des premiers cycles de forgeage [CETIM]. Forge® Software offre la possibilité de mise en cycle des frappes comme expliqué dans [CETIM]. Les courses successives sont réalisées avec le calcul découplé. Le but de cette simulation est d'enchaîner plusieurs cycles de forgeage afin d'observer la tenue mécanique des outils. Le calcul découplé peut effectuer rapidement un calcul sur l'outil et récupérer les résultats en tant que données initiales pour un deuxième calcul du même type. Il est donc possible de faire une chaîne de plusieurs calculs découplés pour aller au système mécanique stable, à condition que la température de l'outil soit préservée. La figure IV.3 montre le principe de fonctionnement du processus de simulation de l'enchaînement mis en place sous le logiciel Forge®.

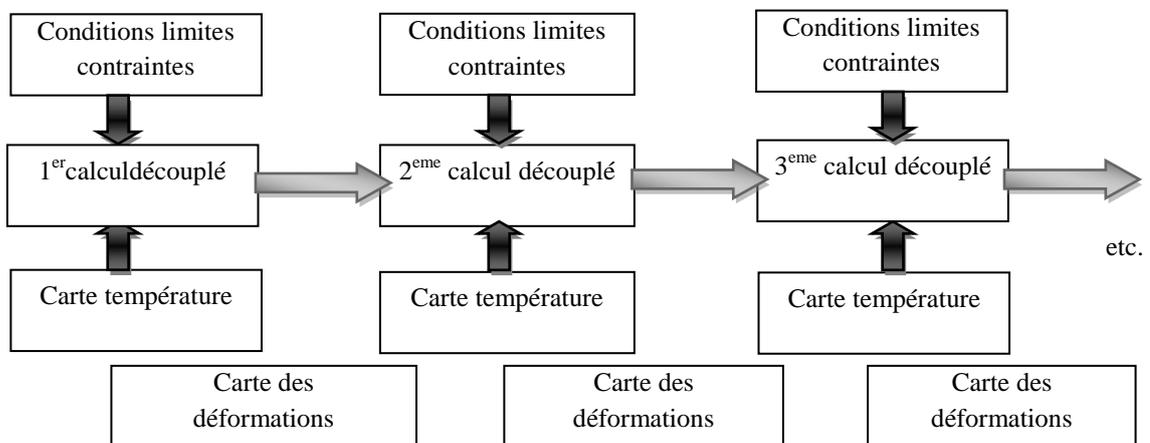


Figure IV.3 : Schéma de principe de fonctionnement de l'enchaînement sous logiciel Forge®.

Un point négatif du calcul précédent est que la carte de température n'évolue pas au cours des cycles. Il est possible d'imaginer, tout comme pour le calcul mécanique, sauvegarder l'échange thermique du calcul mono-domaine, puis réutiliser en découplé ou alors d'utiliser la carte de températures du régime thermique établi [CETIM]. Par ailleurs une série de simulations itératives peut être effectuée afin d'observer l'évolution de la déformation, mais ce temps est consommé quand un grand nombre d'itérations est nécessaire. Le fichier frottement

CHAPITRE IV Contribution à l'évaluation des indices de performance d'une matrice de forgeage à chaud

et d'échange thermique est choisies dans la base FPD1.3 de Logiciel Forge® et données dans le tableau IV.3.

Tableau IV.3 : Fichier frottement et d'échange thermique entre le lopin et la matrice.

	Lopin	Matrice inférieure	Matrice supérieure	
Matrice inférieure	- tresca-fort.tff - acier-chaud-fort.tef	/	- tresca-fort.tff - acier-chaud-fort.tef	frottement Échange thermique
Matrice supérieure	- tresca-fort.tff - acier-chaud-fort.tef	- tresca-fort.tff - acier-chaud-fort.tef	/	Frottement Échange thermique
Porte matrice inférieure	/	- tresca-fort.tff - acier-chaud-fort.tef	/	frottement Échange thermique
Porte matrice supérieure	/	/	- tresca-fort.tff - acier-chaud-fort.tef	frottement Échange thermique

Une bonne interprétation du comportement de la contrainte et de la déformation est donnée dans le guide méthodologique pour l'analyse et l'utilisation informatique des matrices de logiciel Forge® [BRAMLEY]. Donc, dans le tableau IV.2 sont représentées les valeurs moyennes des paramètres de mise en forme et des paramètres de fatigue et d'endommagement avec leur coefficient de variation.

La loi de distribution probabiliste pour chacune des variables est déterminée au moyen du code de calcul PHIMECASoft qui offre des possibilités d'adapter des lois de distribution en cadrant les valeurs moyennes et leur coefficient de variation conduisant à la convergence des résultats. Dans le présent travail, la loi normale est la plus adéquate pour tous les paramètres de calcul. Les paramètres sont implicitement prévus et optimisés dans leurs valeurs moyennes et après la simulation du processus de forgeage en utilisant le code CAE Forge®.

IV.2.4 Identification d'une fonction d'état limite déterminant la durée de vie de la matrice

L'évaluation de la fiabilité dans les matrices présentant un endommagement par fatigue est basée sur un modèle empirique des dommages déterminés ci-dessus dans l'équation (IV.11).

Une fonction d'état limite $G(X_i)$ est réglée pour le calcul de la fiabilité correspondant à la marge de sécurité de durée de vie définie par la différence entre le dommage critique et la valeur de propagation de dommage. Ceci peut être exprimé par la fonction d'état limite de dommage en fatigue (IV.12):

$$G(X_i) = D_c - D(X_i) \quad (IV.12)$$

Où D_c est le dommage critique; selon la littérature [CETIM] : $0,5 < D_c < 0,7$. La probabilité de défaillance est exprimée à travers de l'indice de fiabilité β qui est défini comme la distance minimale entre l'origine et le domaine de défaillance dans l'espace gaussienne u_i . Cet indice est évalué par la résolution de problèmes d'optimisation présentés dans l'équation (IV.13):

$$\beta = \text{minimise } \sqrt{\sum_i u_i^2} \text{ sous la contrainte } G(X_j) \leq 0 \quad (IV.13)$$

Où $u_i = T_i(X_j)$ est le vecteur de variables aléatoires de base dans l'espace normale standard par des mesures appropriées de transformation, $T_i(x_j)$ et $G(x_j)$ représentent la surface de rupture; dans l'espace normal standard, il prend la forme $G(T_j(u_i))$. La solution de cette optimisation peut être obtenue par n'importe quel algorithme d'optimisation standard. Dans notre cas, les algorithmes spécifiques de fiabilité ont été utilisés et combinés avec une procédure de recherche. La solution est habituellement dont nous sommes saisis du point de conception, a noté u_i^* ou P^* . Dans la première méthode de la fiabilité, la probabilité de défaillance P_f est simplement calculée par l'équation (IV.14):

$$P_f = Pr[G \leq 0] = \Phi(-\beta) \quad (IV.14)$$

Où $Pr[...]$ est l'opérateur de probabilité et $\Phi(...)$ est la fonction de probabilité cumulative gaussienne.

CHAPITRE IV Contribution à l'évaluation des indices de performance d'une matrice de forgeage à chaud

Ainsi, simuler plusieurs cycles l'un après l'autre jusqu'à la rupture est difficilement réalisable. En outre, un modèle de fiabilité est conçu pour prédire le nombre de cycles à la défaillance, la loi de l'endommagement du Lemaitre-Chaboche permet de calculer directement la durée de vie de l'outillage à partir de certaines données issues du premier cycle de forgeage, il est intégré dans le modèle de fiabilité, il prend en compte l'historique de chargement et également l'effet de la contrainte moyenne pour chaque rapport de contrainte.

IV.2.5 Calcul de la fiabilité de l'outillage

Le calcul de la fiabilité de l'outillage revient à calculer l'indice de fiabilité β de l'outillage en s'appuyant sur des méthodes d'approximations FORM/SORM ou bien de Monté Carlo. Les variations de la fonction de fiabilité $R(t)$ en fonction du nombre de pièces à forger, dans les conditions décrites au chapitre III, montrent que la durée de vie de l'outillage a une relation directe avec la qualité de l'outillage et son état de surface. Cependant la décision d'admettre que l'outillage est fiable revient à considérer une valeur acceptable de l'indice de fiabilité. Ceci dépend de la gravité et du risque que peut engendrer la défaillance de l'outillage considéré. Dans l'ingénierie, il est recommandé de prendre une probabilité de défaillance de 10^{-4} pour les constructions générales, dans les constructions aéronautiques 10^{-5} et dans les constructions nucléaires, il faut être plus exigeant c'est-à-dire minimiser la probabilité de défaillance à 10^{-6} . Dans le cas ci-présent, la valeur de l'indice de fiabilité acceptable est égale à 3.7191 équivalent à une probabilité de défaillance de 10^{-4} .

Dans ce travail, l'analyse de la fiabilité est réalisée en suivant la procédure proposée par PHIMECA Soft [Lemaire 2002]. Le modèle mécanique représenté par l'équation (IV.11) est d'abord saisi. Puis les modèles probabilistes associant les variables aléatoires ont été appliqués selon le tableau IV.2. Tous les calculs paramétriques sont faits en respectant le scénario de défaillance ou bien la fonction d'état limite décrite par l'équation (IV.12). L'indice est évalué par la résolution de problèmes d'optimisation présentés dans l'équation (IV.13).

IV.3 Détermination de l'indice de performance de l'outillage

L'évaluation de la performance d'une matrice d'estampage consiste à déterminer sa durée de vie. Pour une matrice présentant une fissure initiée de fatigue, la durée de vie dépendra du nombre de frappes de la matrice qui sera étroitement lié aux exigences requises par la gamme de production et du nombre de pièces à forger. Donc, si le système de production, c'est-à-dire

CHAPITRE IV Contribution à l'évaluation des indices de performance d'une matrice de forgeage à chaud

le marteau-pilon, est bien calibré et que les paramètres de production sont optimisés alors la durée de vie de la matrice est fonction du nombre de pièces conformes à produire. L'indice de performance est exprimé par la valeur du nombre de pièces forgées avant le changement de l'outil. Le système est performant quand la production est égale ou supérieure à cet indice.

IV. 4 Conclusion du Chapitre IV

Ainsi, la stratégie contribuant à l'évaluation des indices de performance d'une matrice de forgeage à chaud consiste à lancer des calculs de fiabilité, itératives jusqu'à ce que l'indice de fiabilité β tombe au-dessous de la valeur acceptable de β_{ac} . Les simulations numériques proposent une valeur qui doit servir de référence pour qu'une prise de décision soit faite dans les meilleures conditions.

Chapitre V
Indice de performance d'un outillage de forge :
Analyse et Discussion

V. 1 Première déformation plastique équivalente dans une matrice de forgeage

Les résultats de simulation montrent que des déformations plastiques se manifestent dès les premiers cycles de forgeage laissant apparaître à partir du 6^{ème} cycle, la première déformation plastique équivalente. Le tableau V.1 illustre les valeurs de l'évolution de la déformation plastique dès les premiers cycles de forgeage.

Tableau V.1 : Génération de la première déformation plastique équivalente au 6^{ème} cycle de forgeage.

	Nombre de cycles	Évolution de la déformation
Première coup	1	0,08
Deuxième coup	2	0,11
Troisième coup	3	0,08
Quatrième coup	4	0,095
Cinquième coup	5	0,13
Sixième coup	6	0,14

Remarque: la déformation élastique maximale de l'acier X38CrMoV5 à 250 °C est 0.11.

Il est donc relativement important de trier les 5 ou 6 premières itérations sous FORGE Nxt. Ces dernières révèlent une évolution de déformation élastique jusqu'à atteindre la première déformation plastique suffisamment importante pour initier une fissure de fatigue. La figure V.1 montre l'évolution de la déformation élastique dans la matrice inférieure soumise à une température de 250 °C après 4 premières itérations de simulations.

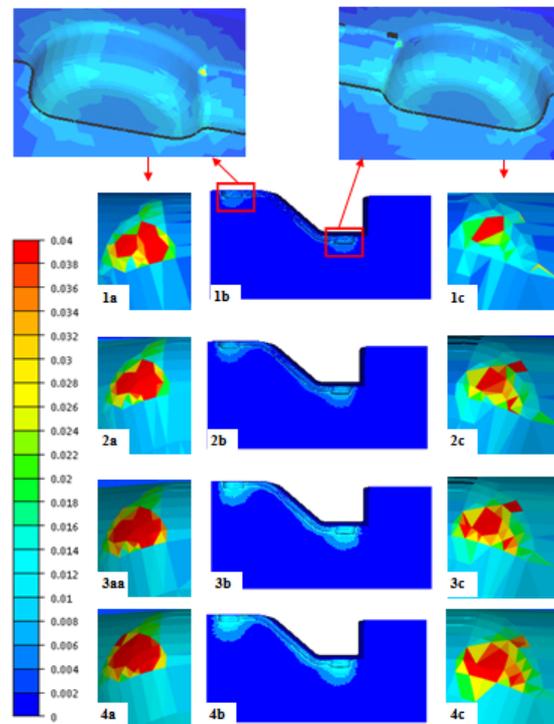


Figure V.1 : Génération de la première déformation plastique équivalente sur une matrice inférieure préchauffée à 250 °C

Au départ, la déformation élastique est augmentée jusqu'à atteindre 0.04 après 4 itérations. . Chaque itération est représentée par un numéro chronologique permettant de voir à chaque étape la déformation. Figures V.1.1b, 2b, 3b et 4b montrent que la déformation est croissante en fonction du nombre d'itérations. Les zones de déformation élastique apparaissent au niveau des empreintes des têtes de la pièce sur les deux matrices supérieure et inférieure, Figures V.1.1a et 6.1c. Toutefois, elle est plus établie sur la matrice inférieure où la zone endommagée prend plus de volume quand le nombre d'itérations augmente. La valeur maximale de la déformation élastique enregistrée est égale à 0.11 et la première déformation plastique équivalente est de l'ordre de 0.14, Tableau V.1 qui sera considérée comme l'éventuelle valeur qui peut engendrer un endommagement par fatigue à savoir l'initiation d'une fissure qui va se propager jusqu'à rupture de la matrice. En réalité, les premières déformations plastiques sont difficiles à détecter visuellement et demandent une attention particulière pour apprécier leur ordre de grandeur qui demande des techniques appropriées pour les mesurer. En conséquence compte tenu du manque d'observations appropriées ou pauvres elles sont souvent ignorées. Cependant, les incertitudes peuvent être estimées selon la partie de la zone plastique où les mesures sont prises et sont estimées à 5%.

V. 2 Effet du nombre de frappe sur la température d'une matrice d'estampage

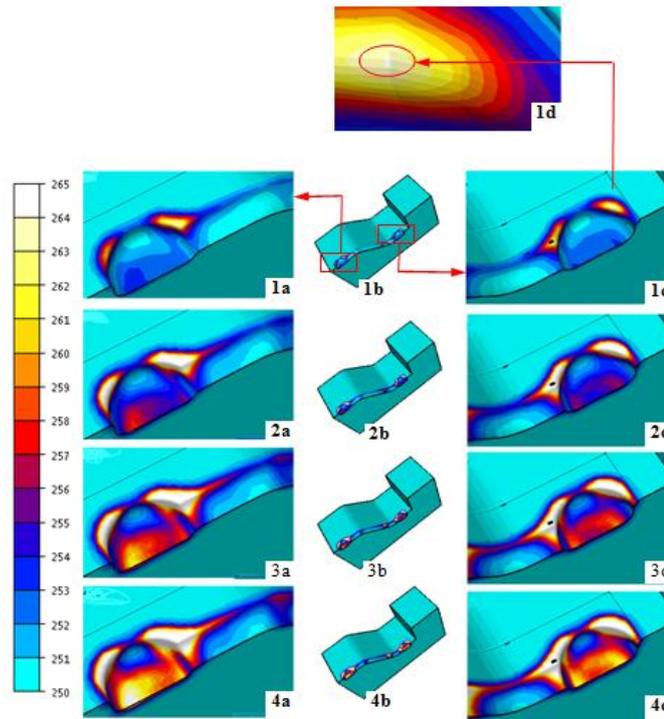


Fig. V.2 : Cartographie des températures sur une matrice d'estampage après 4 itérations.

Même si aujourd'hui, on peut mesurer les températures sur les matrices d'estampage, elles restent difficiles et laborieuses à enregistrer. Donc les simulations itératives permettent de récolter certaines informations fort-intéressantes sur la distribution de la température sur un outil de forgeage. La Figure V.2 montre la cartographie des températures sur une matrice inférieure et son évolution en fonction du nombre d'itération. La matrice initialement préchauffée à 250°C va connaître une augmentation de température jusqu'à 265°C avant de se stabiliser. Néanmoins les incertitudes sont évaluées à partir de la plage effective de valeurs de température pour obtenir un coefficient de variation de 2,27%.

V. 3 Effet des variables aléatoires sur la performance de l'outillage

V. 3.1 Analyse de la fiabilité d'une matrice avec un défaut de fatigue initié

Dans ce cas, la fiabilité est évaluée en fonction des 12 variables aléatoires indépendantes (Tableau V.2). Le logiciel de fiabilité PHIMECASoft permet de calculer l'indice de fiabilité β et la probabilité de défaillance. PHIMECASoft est un logiciel généralement probabiliste, traitant à la fois FORM et SORM approximations et les méthodes appliquées aujourd'hui d'échantillonnage à des problèmes statistiques. Il a la capacité d'être couplé à d'autres outils logiciels d'ingénierie et peut être considéré comme une couche supérieure qui pilote des modèles physiques. Le procédé consiste essentiellement dans la fabrication de preuves comment la mécanique et la fiabilité sont combinées. La littérature [LEMAIRE] offre un bon aspect des bases de PHIMECASoft.

La figure V.3 illustre l'évolution de l'indice de fiabilité en fonction du nombre de pièces forgées. Les résultats montrent que sur un nombre de 1800 pièces forgées, la fiabilité de la matrice peut-être estimée par rapport à la valeur de l'indice de fiabilité β_a , admis par la communauté des ingénieurs. La lecture du graphe est réalisée en fonction des trois niveaux de β_a (3.72 pour les constructions générales, 4.27 pour les constructions à risques supérieures et 4.75 pour les constructions à risques élevées, correspondant respectivement à des probabilités de défaillances acceptées P_f de 10^{-4} , 10^{-5} et 10^{-6}). Eventuellement, plus le niveau de β_a est élevé plus le nombre de pièces forgées à accepter est réduit comme l'indique les valeurs respectives déterminées de la courbe à savoir : 1502, 1371 et 1239 pièces. Dans le cas d'un procédé de forgeage d'un levier de direction, la valeur de β_a est 3.72, donc le nombre de pièces conforme est de 1502 pièces sur les 1800 pièces forgées en simulation.

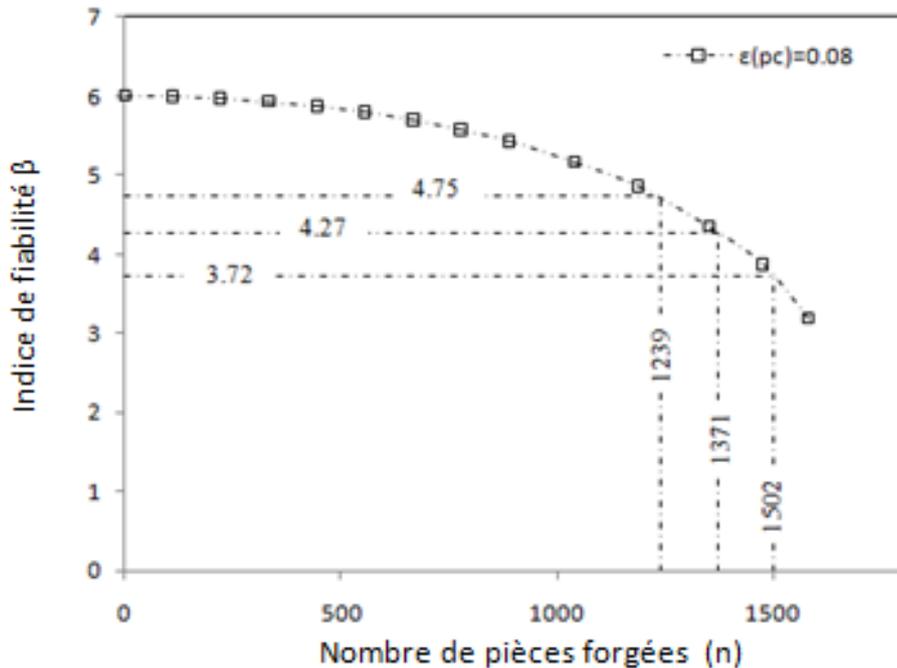


Fig. V.3 : Evolution de l'indice de fiabilité β en fonction du nombre de pièces forgées (Première valeur de la déformation plastique équivalente $\epsilon_{(pc)} = 0,08$).

Du point de vue du coût, il est maintenant facile de savoir de combien peut être le profit, quand la décision doit être effectuée en remplaçant la matrice endommagée par une nouvelle ou réparation. Les déclarations de décision finale à la fois des services de maintenance et d'exploitation qui doivent être en mesure d'observer l'évolution de l'indice du coût en fonction de la qualité des pièces, du délai de livraison, du risque d'endommagement de la matrice et du coût moyen de remplacement de la matrice endommagée.

Cet indice de coût en raison de la durée de vie de matrice peut alors être considéré comme un indice de performance.

V. 3.2 Analyse de la sensibilité des variables de calcul

Les sensibilités des variables α^2 ou bien la contribution des variables aléatoires sur la durée de vie de la matrice sont représentées sur la Fig. V.4. Elles ont été déterminées pour un indice de fiabilité admis β_a égal à 3.72, lorsque le nombre de pièces forgées augmente jusqu'à 1502. Cinq (5) principaux facteurs dans le contrôle de la vie de la matrice, émergent de cette analyse: le dommage critique D_c , la température de la matrice T , les paramètres rhéologiques du matériau de la matrice, la 1^{ère} déformation plastique équivalente, et les paramètres de dommage en fatigue. La variable la plus importante est évidemment le dommage critique D_c qui représente 85,03% de l'ensemble des paramètres globaux.

Tableau V.2 : Évolution de sensibilités des variables α^2 (point de conception dans l'espace réduit) en fonction des niveaux acceptés de probabilité de défaillance P_f .

P_f	10^{-4}	10^{-5}	10^{-6}
B	3.72	4.27	4.75
Variable	α^2 %		
T	0.73	0.55	0.33
A	0.31	0.23	0.14
B	0.16	0.10	0.05
ΔJ	0.48	0.19	0.01
σ_{L0}	0.19	0.06	0.00
ϵ_{pc}	11.84	8.74	5.26
A	0.58	0.46	0.27
m_1	0.25	0.20	0.12
m_2	0.05	0.04	0.02
m_3	0.23	0.18	0.11
m_4	0.15	0.11	0.07
D_c	85.03	89.13	93.62

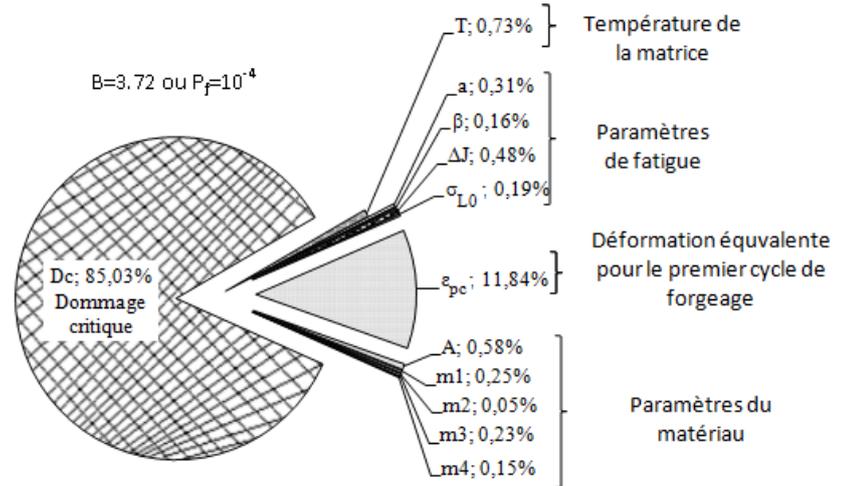


Fig. V.4 : Importance des variables dans une matrice de forgeage à chaud

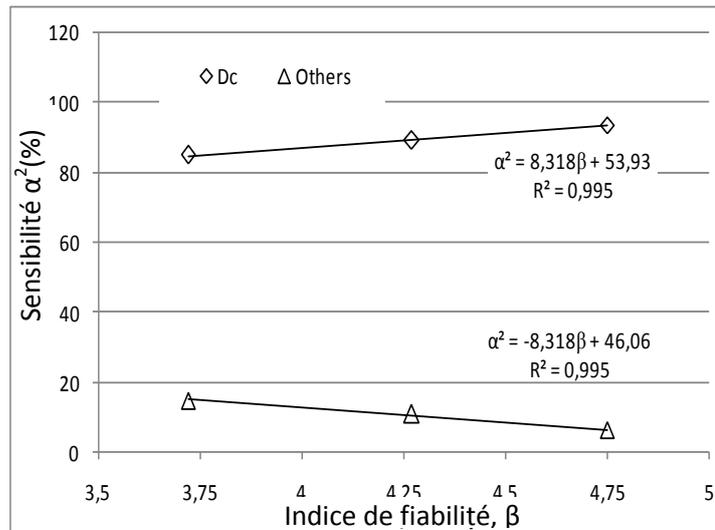


Fig. V.5 : Évolution des sensibilités des variables en fonction du niveau acceptable de la probabilité de défaillance dans une matrice de levier de direction.

La déformation équivalente suit de moins de 12% et le reste est attribué à tous les autres paramètres. En augmentant le niveau de β_a , le dommage critique prend beaucoup plus d'importance et devient dominant avec 93,62% (Tableau V.2) pour une valeur de $\beta_a= 4.75$. La progression de cette domination est représentée sur la Fig V.5 qui montre l'évolution de la sensibilité des variables en fonction de la valeur admise de β_a . Cette évolution est caractérisée par 2 courbes de tendance linéaire dont les coefficients directeurs sont opposés en signe (+ et - 8,318).

V. 3.3 Effet de la variation de la température sur la durée vie de la matrice

Partout où le forgeage est concerné, la température de la matrice est toujours un des facteurs difficile à contrôler car elle peut facilement changer au cours du processus de forgeage. Donc le choix des paramètres des matériaux et de la loi rhéologique doivent être soigneusement entrepris afin de mieux appréhender la durée de vie de la matrice.

Le concept de base développé dans la figure III.1 montre que même si l'on considère un bon outil dans la simulation d'un processus de forgeage il y a une influence remarquable des variables aléatoires sur la durée de vie de la matrice. En égard de l'endommagement par fatigue, évidemment des dommages critiques sont dominants, pour une valeur moyenne de température de 257 °C, avec un coefficient de variation de 2,7%, déterminée à partir d'une simulation allant de 249 à 265 °C (Fig V.2). Une analyse déterministe de la température est plus logique dans l'analyse de l'effet de la température sur la durée de vie de la matrice.

La figure V.6 illustre l'évolution de l'indice de fiabilité β en fonction du nombre de pièces forgées. L'analyse est réalisée pour différentes valeurs déterministes de température allant de 240 °C à 280 °C qui ont été préalablement choisies pour s'inscrire dans la gamme des résultats obtenus par simulation sous Forge® afin d'obtenir la déformation équivalente pour le premier cycle : $\varepsilon_{(pc)} = 0,08$.

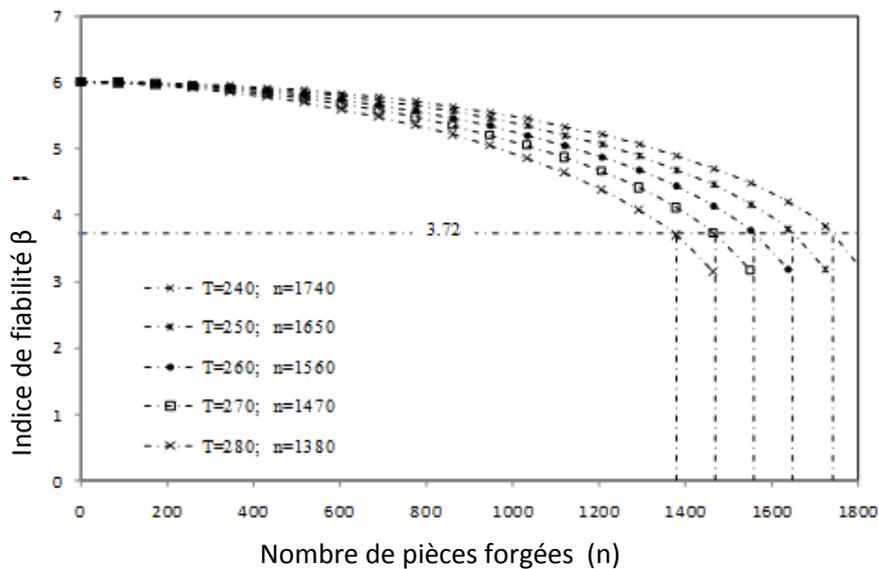


Fig. V.6 : Estimation de la durée de vie de la matrice à travers l'évolution de l'indice de fiabilité β en fonction de la température.

Pour un niveau d'indice de fiabilité β_a de 3,72, il est intéressant de voir que le nombre de pièces forgées augmente par un incrément de 90 pièces lorsque la température de la matrice est soumise à une diminution progressive de 10°C à partir de 280 °C jusqu'à 240 °C. Cependant, cette augmentation de nombre de pièces forgées ne conduit pas à raisonnablement suggérer de ne pas respecter la cartographie de la répartition de la température sur la matrice (Fig. V.2). En fait, à une température de la matrice de 250 °C, le nombre de pièces forgées atteint 1650 pièces conformes ce qui proposent 148 pièces supplémentaires comparativement quand la température de la matrice est de 257°C résultant un coefficient de variation de 2,7%. Ainsi le risque de défaillance de la matrice est augmenté de 2.7%.

V. 3.4 Effet de la première déformation équivalente sur la durée vie de la matrice

L'effet de la température sur la durée de vie de la matrice est corrélé avec la valeur de la première déformation équivalente. Par exemple, dans les conditions indiquées dans le Tableau IV2, cette valeur est de 0,08 avec un coefficient de variation de 5%. Si les propriétés du matériau de la matrice viennent à être modifiées pour quelque raison, ceci conduisant à changer la première déformation équivalente, alors les valeurs déterministes peuvent être appliquées pour évaluer la durée de vie de la matrice. Par conséquent, une étude de l'influence de la valeur de la première déformation équivalente sur la durée de vie de la matrice peut être explorée. La figure 7 montre l'évolution de l'indice de fiabilité β en fonction de nombre de pièces forgées, lorsque la déformation équivalente augmente de 0,06 à 0,1 par incréments de 0,02 et quand la température de la matrice est 257 °C avec un coefficient de variation de 2,7%.

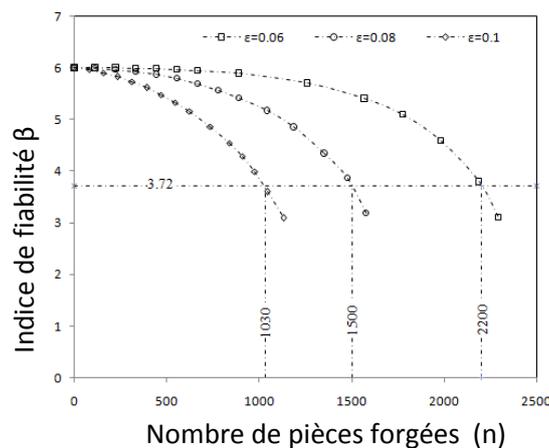


Fig. V.7 : Estimation de la durée de vie de la matrice à travers l'évolution de l'indice de fiabilité β en fonction de la première déformation équivalente.

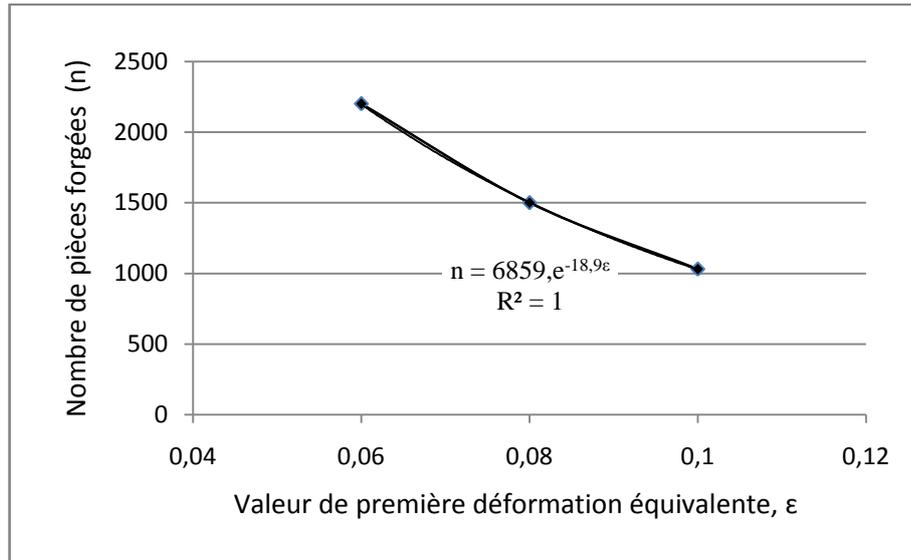


Fig. V.8 : Evolution du nombre de pièces forgées en fonction de la première déformation équivalente.

Une baisse de la valeur de la déformation équivalente d'un incrément de 0,02, de 0,08 à 0,06 génère un gain de 700 pièces qui est très important, mais une augmentation d'même incrément de la déformation équivalente conduit à une diminution drastique du nombre de pièces forgées. Une corrélation peut être établie entre la première déformation équivalente et le nombre de pièces forgées suit une loi exponentielle de la forme donnée dans la courbe d'ajustement (Fig. V.8).

Dans les conditions les mieux appropriées, cette corrélation peut-être aider à intégrer un indice de performance en fonction de la valeur de la première déformation plastique équivalente.

Conclusion générale et perspectives

Conclusion générale et Perspectives

L'indice de performance d'un procédé de forgeage à chaud a été étudié à travers l'évaluation de la durée de vie des matrices utilisées pour forger des leviers de direction sur une presse de 500 tonnes. Cette évaluation est basée sur 2 aspects : d'une part un paramétrage rationnel du processus de forgeage et d'autre part sur une observation rigoureuse des premières déformations observées dès les premières frappes. Souvent dès les premières frappes l'outillage est sujet à des endommagements qui peuvent mener à sa ruine particulièrement quand une fissure de fatigue est initiée et éventuellement va se propager au fur et à mesure que l'on produit. La problématique réside dans la difficulté de respecter en pratique, ces deux aspects car les conditions de service sont aléatoires pour assurer un bon paramétrage et la seule façon de détecter les dommages est d'inspecter la topographie des matrices et en particulier dans les zones sensibles.

Le recours au code CAE, Forge® pour la modélisation et simulation de procédé de mise en forme et au logiciel de fiabilité PHIMECASoft® est d'un apport rationnel et réaliste pour mener au mieux cette étude. Un modèle empirique d'ingénierie combinant d'une part le modèle exprimant le comportement d'un procédé de forgeage et d'autre part un modèle d'endommagement par fatigue a été développé et caractérisé par des variables aléatoires dans le but d'évaluer la durée de vie de l'outillage.

Les principaux résultats peuvent être résumés comme suit:

1. Le modèle empirique de calcul de la durée de vie des matrices d'estampage, est développé en corrélant le modèle rhéologique de Hansel-Spittel et le modèle d'endommagement par fatigue de Lemaître-Chaboche. Il permet la formulation du comportement de la matrice d'estampage sous l'effet de la propagation par fatigue d'une fissure initiée suite à une déformation plastique équivalente générée dès les premières frappes.
2. Les simulations de processus de forgeage ont prédit implicitement les paramètres d'entrée telles que les paramètres géométriques, les paramètres rhéologiques, les températures, les conditions de charge et l'énergie, et aussi les données de sortie, telles que les contraintes de VonMises, la première déformation équivalente, Le processus de forgeage, l'usure et la déformation plastique thermique.
3. L'analyse de la fiabilité consiste à prédire explicitement la probabilité de défaillance du modèle empirique. Les incertitudes ont été associées aux paramètres impliqués et

Conclusion générale et Perspectives

caractérisées par leur probabilité de densité. Une fonction d'état limite a été définie comme la différence entre le dommage critique et la valeur de l'évolution du dommage. Les résultats sont exprimés en termes d'indice de fiabilité β et de sensibilité des variables.

4. L'indice de performance technique d'une matrice de forgeage est attribué au nombre de pièces forgées conformément aux exigences techniques. La performance est exprimée comme suit: plus le nombre de pièces forgées conformes est élevé, plus la durée de vie des matrices est longue.
5. Cinq facteurs principaux ont caractérisé le processus de forgeage d'un levier de direction : les paramètres rhéologiques du matériau, le modèle d'endommagement par fatigue de la matrice, la température de matrice, la première déformation équivalente et l'endommagement critique.
6. L'indice de performance d'une matrice peut être déduit des résultats de fiabilité. Pour un indice de fiabilité $\beta = 3,72$, un nombre de 1502 pièces peut être produit en toute sécurité. Ainsi, pour une première déformation équivalente de 0.08, et quand la matrice est préchauffée à 257°C, l'indice de performance est de 1502, si on admet un dommage critique de 0.6.
7. Les résultats étaient prévisibles par rapport à la sensibilité des variables. En effet l'endommagement critique représente à lui seul de 85% pour un indice de fiabilité de 3,72, et puis suivi par la première déformation équivalente, avec une importance de 11%.
8. Les études paramétriques de la température et de la première déformation équivalente ont conduit à un comportement intéressant de la durée de vie des matrices en fonction des variables aléatoires respectives. Lorsqu'on augmente la température de 10 ° C de 240 à 280 ° C, alors que la première déformation est de 0,08% avec un coefficient de variation de 5%, l'indice de performance diminue par incrément de 90, de 1740 à 1380 unités de pièces fabriquées. Pendant ce temps, lorsque l'on augmente la première déformation équivalente par des incréments de 0,02 de 0,06 à 0,1 et en fixant la température de la matrice à 257 ° C avec un coefficient de variation de 2,5%, on génère une dégradation drastique de la durée de vie de la matrice.
9. Plutôt une fissure est détectée dans une matrice, meilleure est l'évaluation de l'indice de performance. Cela nécessite des inspections fréquentes de la surface des matrices. En fait, s'il n'y a pas de fissure, et dans la mesure où le contrôle du processus est bien

Conclusion générale et Perspectives

fait, alors l'outil atteindra le nombre de pièces pour lequel il a été conçu; Autrement, les résultats de ce travail sont très indicatifs.

En industrie, il faut intégrer des systèmes embarqués pour le contrôle d'outillage et faire une cartographie des dommages en fonction de l'indice de fiabilité β , c'est-à-dire à un certain nombre de pièces réalisées conformes correspondra une valeur de β .

Références bibliographique

Références bibliographique

- [AGOUTI] Agouti S (2012). Etude de l'origine de défauts détectés dans des pièces en alliage d'aluminium de la série 7XXX destinées à l'industrie aéronautique. Thèse de doctorat de l'École nationale supérieure des mines de Paris.
- [ALIMI] Alimi A, Fajoui J, Kchaou M, Branchu S, Elleuch R, Jacquemin F (2015). Multi-scale hot working tools damage (X40CrMoV5-1) analysis on relation to the forging process. *Eng Fail Anal* 62:142–155.
- [ALLAM] Allam Z, Becker E, Baudouin C, Bigot R, Krumpal P (2014). Forging process control: influence of key parameters variation on product specifications deviations. *Procedia Eng* 81:2524–2529.
- [ARBAK] Arbak M, Tekkaya AE, Ozhan F (2005). Comparison of various preforms for hot forging of bearing rings. *J Mater Process Technol* 169:72–82.
- [ASSAF] Assaf SA, Hadidi L A (2014). Performance evaluation and benchmarking for maintenance decision making units at petrochemical corporation using a DEA model. <http://doi.org/10.1007/s00170-014-6422-2>.
- [BACHELET] Bachelet R. (2009). Les outils des méthodes de résolution de problèmes. Cours distribué sous licence Créative Commons, Ecole centrale de Lille.
- [BADAWY] Badawy M, Abd El-aziz A A, Idress AM, Hefny H, Hossam S (2016). A Survey on Exploring Key Performance Indicators. *Future Computing and Informatics Journal*. <http://doi.org/10.1016/j.fcij.2016.04.001>
- [BARRAU] Barrau O. (2004). Étude du frottement et de l'usure d'acier à outils de travail à chaud. Thèse pour obtenir le grade de docteur de l'institut national polytechnique de Toulouse, spécialité, sciences et génie des matériaux.
- [BAYRAMOGLU] Bayramoglu M, Polat H, Geren N (2008). Cost and performance evaluation of different surface treated dies for hot forging process. *J Mater Process Technol* 205(1–3):394–403
- [BELHOMME] Belhomme A (2011). Stratégie de maintenance, Bts mi forges.
- [BRAMLEY] Bramley AN, Mynors DJ (2000). The use of forging simulation tools. *Mater Des* 21(4):279–286

Références bibliographique

- [BRUCELLE] Brucelle O, Bernhart G (1999). Methodology for service life increase of hot forging tools. *J Mater Process Technol* 87:237–246
- [CETIM] CETIM (2009). Centre Technique des Industries Mécaniques, Guide méthodologique d'analyse pour les calculs des outillages avec le logiciel Forge. Code AP no. 015366. www.cetim.fr
- [Chen] Chen P, Zabarar N (2014). Uncertainty quantification for multiscale disk forging of polycrystal materials using probabilistic graphical model techniques. *COMPUTATIONAL MATERIALS SCIENCE*, 84, 278–292. <http://doi.org/10.1016/j.commatsci.2013.12.004>
- [CHOI] Choi C, Groseclose A, Altan T (2012). Estimation of plastic deformation and abrasive wear in warm forging dies. *J Mater Process Technol* 212(8):1742–1752
- [Ciancio] Ciancio C, Citrea T, Ambrogio G, Filice L, Musmanno R (2015). Design of a high performance predictive tool for forging operation. *Procedia CIRP*, 33, 173–178. <http://doi.org/10.1016/j.procir.2015.06.032>
- [DAFFOS] Daffos C (2004). Endommagement des outillages de forgeage traités par Nitruration : Etude et modélisation. Thèse de doctorat de L'institut national des sciences appliquées de Toulouse.
- [DATTOMA] Dattoma V, Giancane S, Nobile R, Panella FW (2006). Fatigue life prediction under variable loading based on a new non-linear continuum damage mechanics model, 28, 89–95. <http://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2005.05.001>
- [DESPUJOLS] Despujols A (2013). Mise en œuvre de la maintenance. *Technique de l'ingénieur* (3e édition), MT 9 565 – 1.
- [EQUBAL] Equbal MI, Kumar R, Shamim M, Ohdar RK (2014). A Grey-based Taguchi method to optimize hot forging process. *Procedia Mater Sci* 6(ICMPC):1495–1504
- [ESCAFFRE] Escaffre L (2000). Les informations continues dans les rapports de gestion : Etude exploratoire. Congrès AFC, Angers.
- [FEKIH] Walid Fekih Ahmed, “Modélisation du comportement du rechargement Stellite-6 déposé par PTA dans les outillages de forge”. Thèse de doctorat de l'Université de Reims Champagne-Ardenne, 2010.

Références bibliographique

- [FERROVIAL] Ferroviaal (2011). Données obtenues durant le stage pratique au sein de l'entreprise de construction de matériels et équipements ferroviaires FERROVIAL, Annaba, Algérie.
- [HANSEL] Hansel A, Pittel TS (1979). Kraft- und Arbeitsbedarf BildsamerFormgebungs Verfahren. VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Lipsk
- [HARTLEY] Hartley P, Pillinger I (2006). Numerical simulation of the forging process. *Comput Methods Appl Mech Eng* 195(48–49):6676–6690
- [HÉLÉNON] Hélénon, F (2004). Modélisation de l'interface lopin / outil lors des opérations de matriçage. Thèse de doctorat de l'Institut National des Sciences Appliquées de Lyon.
- [HERBLAND] Herbland T (2009). Une méthode de correction élastoplastique pour le calcul en fatigue des zones de concentration de contraintes sous chargement cyclique multiaxial non proportionnel. Thèse de doctorat, Mechanics. École Nationale Supérieure des Mines de Paris, France.
- [HORENBEEK] Horenbeek A. Van Pintelon L (2014). Development of a maintenance performance measurement framework — using the analytic network process (ANP) for maintenance performance indicator selection. *Omega*, 42(1), 33–46. <http://doi.org/10.1016/j.omega.2013.02.006>
- [HUSSON] Husson J (1975). Pratique du forgeage. Livre imprimé, Paris : Pyc.
- [INGEXPERT] Société INGEXPERT (2008). Faire évoluer votre maintenance. Conseil, Accompagnement du Management de la Maintenance industrielle, tertiaire, BTP, transport et biomédicale, Fiabilisation des équipements. www.ingexpert.com - 17 F bd Jean Duplessis 13014 Marseille.
- [IVERSEN] Iversen G R, Norpoth H (1987). Analysis of variance. Second edition. Newbury Park Sage Publications.
- [KHALILPOURAZARY] Khalilpourazary S, Dadvand A (2011). Design and manufacturing of a straight bevel gear in hot precision forging process using finite volume method and CAD/CAE technology. *Int J AdvManufTechnol* 56:87–95

Références bibliographique

- [KOVAN]Kovan V, Polonski V (1970). Technologie de la construction mécanique. Moscou : Ed, Mir.
- [KROIB] Kroiß T, Engel U, Merklein M (2013). Comprehensive approach for process modeling and optimization in cold forging considering interactions between process , tool and press. Journal of Materials Processing Tech., 213(7), 1118–1127. <http://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2012.09.004>
- [LAFONTAINE] Lafontaine E (2006). Méthodes et mesures pour l'évaluation de la performance et de l'efficacité des équipements miniers de production. Mémoire présenté pour l'obtention du grade de maître en science, Faculté de sciences et génies, université Laval, Québec.
- [LEMAIRE] Lemaire M, Pendola M (2006). PHIMECA-SOFT. J Struct Safe 28: 130–149
- [LEMAIRE] Lemaire, M (2002). Fiabilité des Structures Mécaniques Couplage Mécano-Fiabiliste Statique. Laboratoire de Recherche et Applications en Mécaniques avancée.
- [LEMAÎTRE] Lemaître J, Chaboche JL (1990). Mechanics of solid materials.Cambridge University Press, Cambridge
- [MAJERUS] Majerus JN, Jen KP, Gong H (1997). Quantitative data for precision, closed-die, forging: internal deformations and computer simulations. Int J Mach Tools Manuf 37(4):523–554
- [MAURIN] Maurin E (2004). Acier de construction allié 25CD4. Catalogue Produits Métallurgiques, Edition PM-1.4.
- [MIHALACHE] Mihalache A G (2007). Modélisation et évaluation de la fiabilité des systèmes mécatroniques : application sur système embarqué. Thèse de doctorat de l'école doctorale d'ANGERS
- [MILESI] Milesi M (2009). Impact des caractéristiques microstructurales des pièces forgées sur leur tenue en fatigue à grand nombre de cycles : modélisation multi-échelles et validation expérimentale. Thèse de doctorat de l'école nationale supérieure des mines de Paris.

Références bibliographique

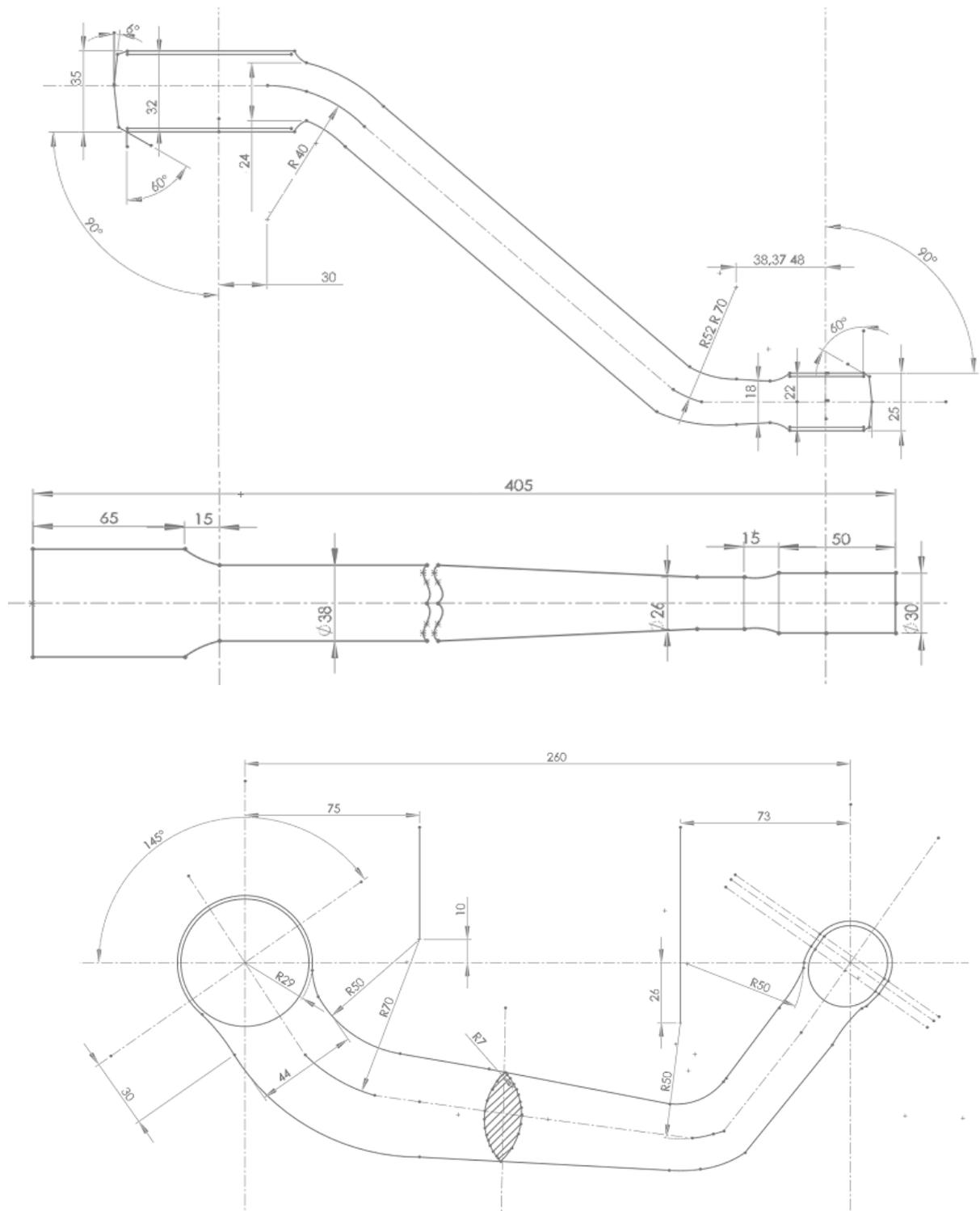
- [MUCHIRI] Muchiri P, Pintelon L, Gelders L, Martin H (2010). Development of maintenance function performance measurement framework and indicators. Intern. Journal of Production Economics, 1–8. <http://doi.org/10.1016/j.ijpe.2010.04.039>
- [NAVINŠEK] Navinšek B, Panjan P, Gorenjak F (2001). Improvement of hot forging manufacturing with PVD and DUPLEX coatings. Surf Coat Technol 137:255–264
- [NING] Ning Z, Jian-hai W, Jia-xin W (2011). Design Study on Human-Computer Interface in Kpi-System of Enterprises, Applied Informatics and Communication 189–195.
- [PARMENTER] Parmenter D (2010). Key performance indicators: developing, implementing, and using winning KPIs. John Wiley & Sons,
- [RAVELOMANANTSOA] Ravelomanantsoa MS (2009). Contribution à la définition d'un cadre générique pour la définition, l'implantation et l'exploitation de la performance : Application à la méthode ECOGRAI. Thèse de doctorat présentée À L'UNIVERSITÉ BORDEAUX 1.
- [REPALLE] Repalle J, Grandhi R V (2005). Design of Forging Process Variables under Uncertainties. JMEPEG, 14:123-131 ©ASM International, DOI: 10.1361/10599490522248.
- [ROJEK] Rojek J, Stocki R, Lasota R, Tazowski P (2013). Efficient reliability analysis of sheet metal forming processes accounting for forming limit curve uncertainty. (CMM-2013 – Computer Methods in Mechanics), Institute of Fundamental Technological Research, Polish Academy of Sciences. ul. Pawińskiego 5B, 02-106 Warsaw, Poland.
- [SATHIYA] Sathiya P, Jaleel A (2010). Grey-based Taguchi method for optimization of bead geometry in laser bead-on-plate welding. Advance in Production Engineering & Management, 4, 225-234. ISSN 1854-6250
- [SENECHAL] Senechal, O. (2004). Pilotage des systèmes de production vers la performance globale. Habilitation à diriger des recherches, présentée à l'université de valenciennes et du Hainaut Cambrésis.
- [SNAPE] Snape G, Clift S, Bramley A (2002). Parametric sensitivity analyses for FEA of hot steel forging. J Mater Process Technol 126:353–360

Références bibliographique

- [ŠRAML] Šraml M, Stupan J, Potrč I, Kramberger J (2004). Computer-aided analysis of the forging process. *Int J AdvManufTechnol* 23:161–168
- [STAUB] Staub C (1998). Modélisation dynamique de procédés de forgeage. Thèse de doctorat de L'institut national des sciences appliquées de Lyon.
- [TANG] Tang J, Wu WT, Waiters J (1994). Recent development and applications of finite element method in metal forming. *J Mater Process Technol* 46(1–2):117–126
- [TERČELJ] Terčelj M, Peruš I, Turk, R (2003). Suitability of CAE neural networks and FEM for prediction of wear on die radii in hot forging. *Tribology International*, 36, 573–583. [http://doi.org/10.1016/S0301-679X\(02\)00246-3](http://doi.org/10.1016/S0301-679X(02)00246-3).
- [TRANSVALOR] Transvalor (2011). Référence documentation, Partie 5 : Données procédés.
- [VELMANIRAJAN] Velmanirajan K, Anuradha K, Abu AS, Ponalagusamy R, Narayanasamy R (2013). Statistical evaluation of forming limit diagram for annealed Al 1350 alloy sheets using first order reliability method. *APPLIED MATHEMATICAL MODELLING*. <http://doi.org/10.1016/j.apm.2013.05.050>
- [WEI] Wei MX, Wang SQ, Wang L, Cui XH, Chen KM (2012). Selection of heat treatment process and wear mechanism of high wear resistant cast hot-forging die steel. *J IronSteelRes Int* 19(5):50–57

Appendice A1

Dessin de définition de la pièce industrielle



Appendice A2
Simulation sous logiciel Forge® Nxt

Simulation d'une pièce simple cambrée sous Forge® NXT

A.2.1 Configuration du modèle de processus

La première étape consiste à définir les géométries par une représentation virtuelle CAD en 3D des objets en interaction durant l'opération réelle de forgeage, figure. 1.

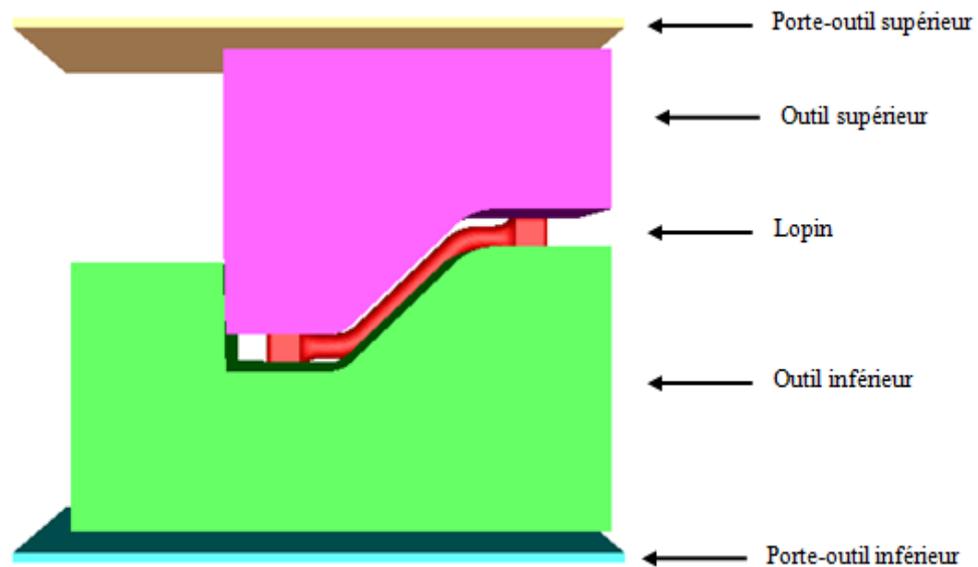


Figure 1 : Géométries CAD

Le modèle géométrique est transmis au Pré-processeur du logiciel. Ensuite, le composant à examiner ou l'espace d'assemblage à considérer est divisé en une multitude d'éléments de petit volume à dimensions définies, les éléments dits finis, figure. 2.

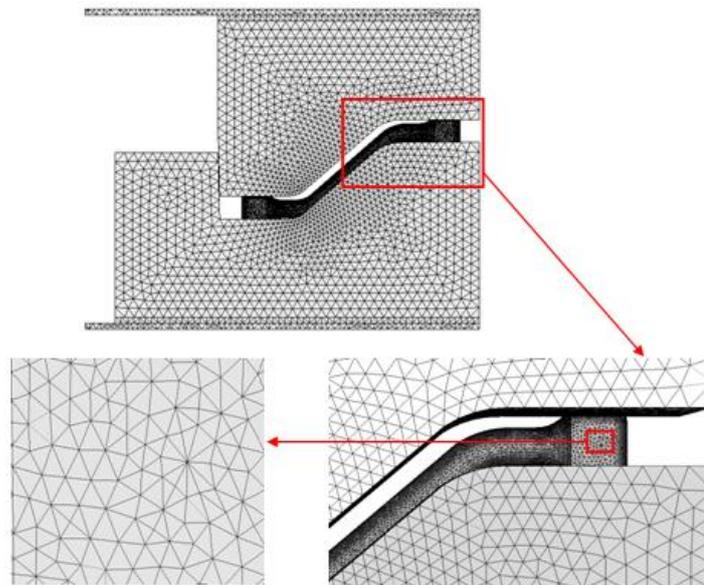


Figure 2 : Pré-processeur.

Les conditions aux limites sont appliquées au modèle d'éléments finis et aux données matérielles ajoutées, figure.3.

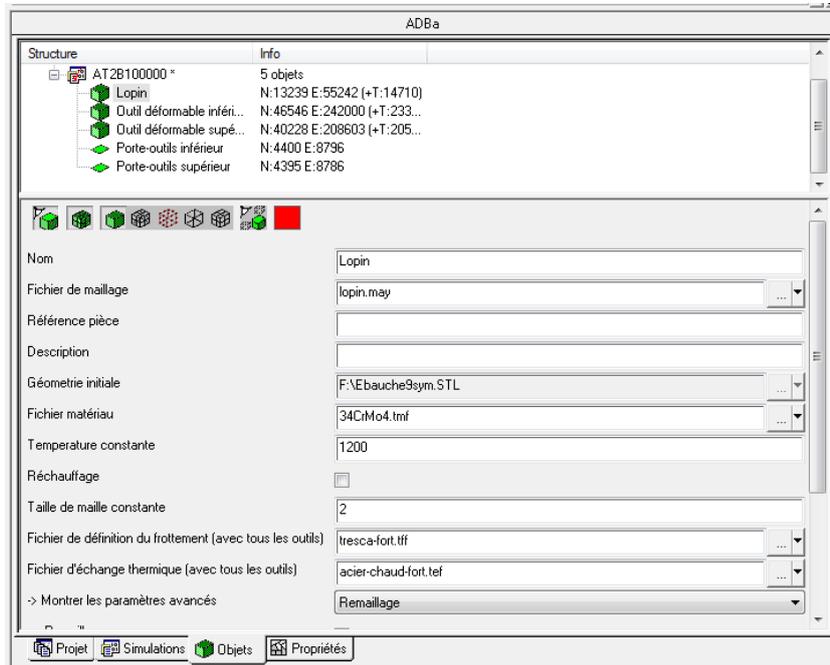


Figure 3 : Données de simulation

Le matériau de la pièce a été simulé avec des propriétés de l'acier 34CrMo4, tandis que les outillages, à savoir matrices à un joint brisé, étaient modélisé par les propriétés de l'acier 30CrNiMo8. Les propriétés chimiques et mécaniques ont été retrouvées dans la base des données rhéologique de logiciel forge, et rapportés dans les figures ci-dessous.

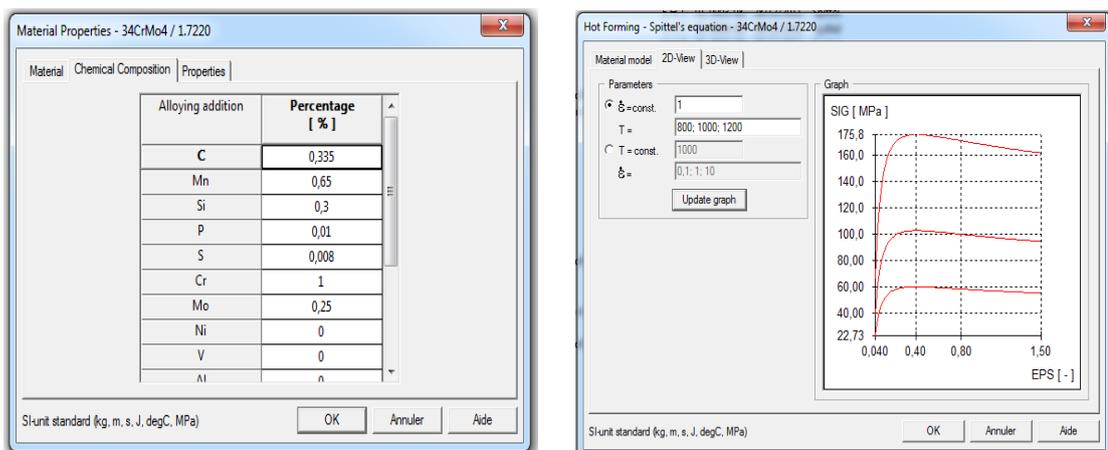


Figure 4 : Propriétés chimiques et mécaniques de l'acier 34CrMo4.

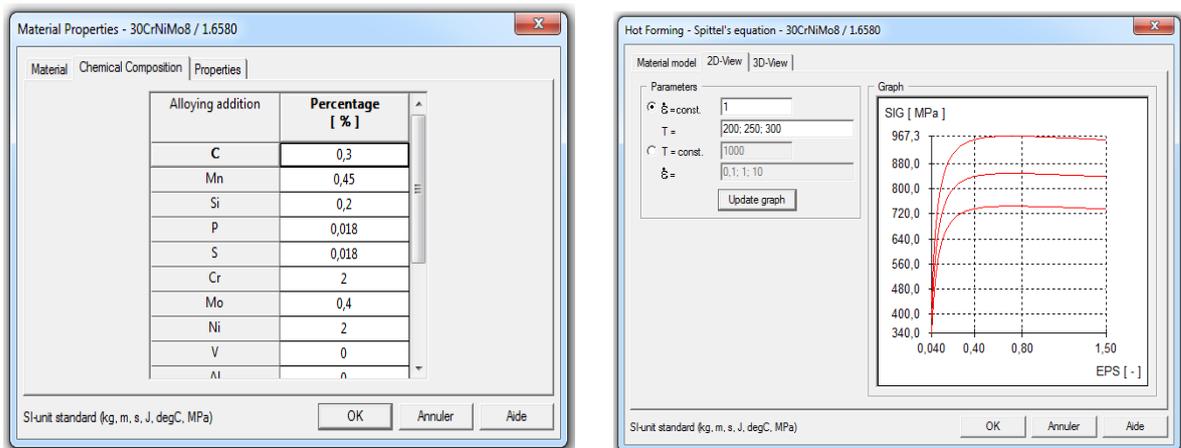


Figure 5 : Propriétés chimiques et mécaniques de l'acier 30CrNiMo8.

La presse est défini par (figure 6) :

Hauteur initiale (mm): -38 ;

Hauteur finale (mm): 0 ;

Direction: - Z ;

Energie max (kJ): 48.73 ;

Masse (kg): 4200.

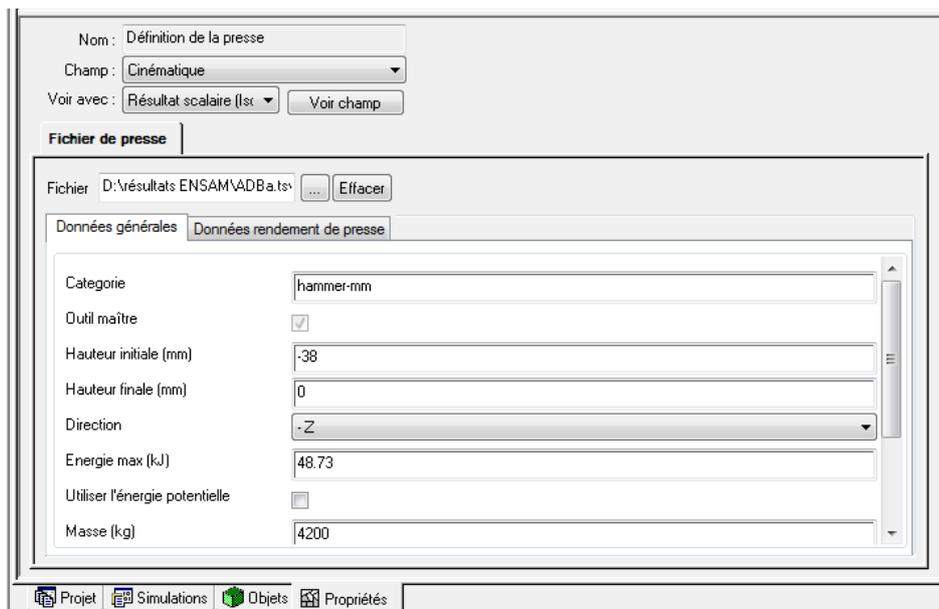


Figure 6. Définition de la presse.

Ensuite, le modèle complet est transféré au soi-disant solveur, qui va calculer une solution, figure.7.

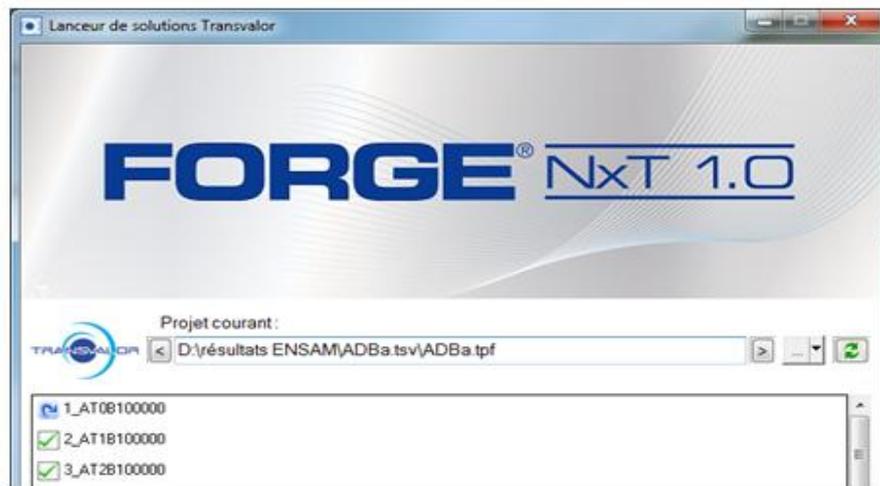
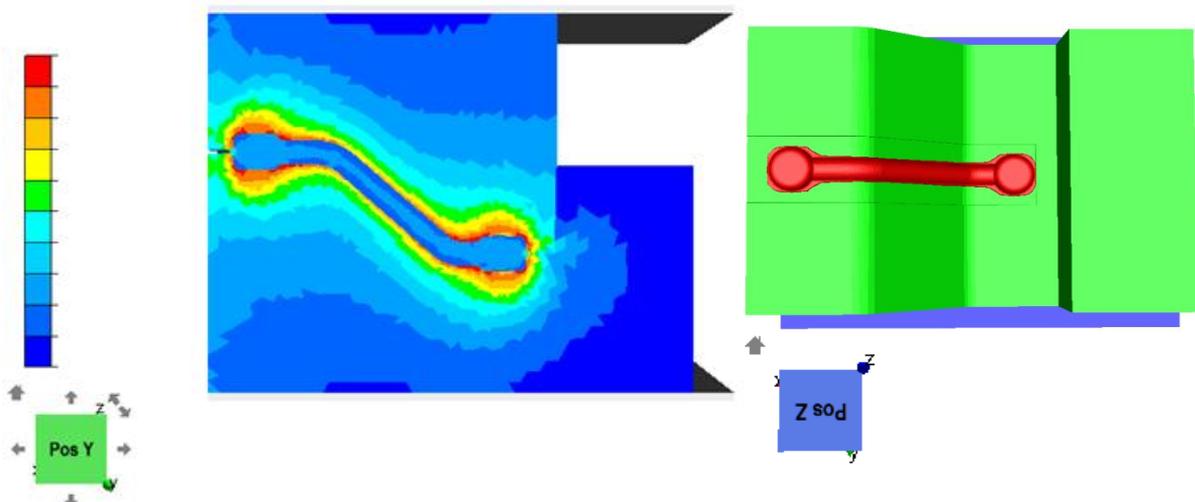


Figure 7 : Solveur.

Les résultats peuvent être visualisés et évalués à l'écran sous forme de graphiques ou d'animations à l'aide d'un post-processeur, figure.8.

Ceci permet de regarder que le lopin est déformé dans le processus de forgeage et le matériau remplit la l'empreinte de la matrice. La figure 8 montre le résultat de l'étape finale de l'opération d'ébauchage, une fois la course finale est atteinte, la pièce est bien mise en forme et les bavures sont en quantité suffisante.



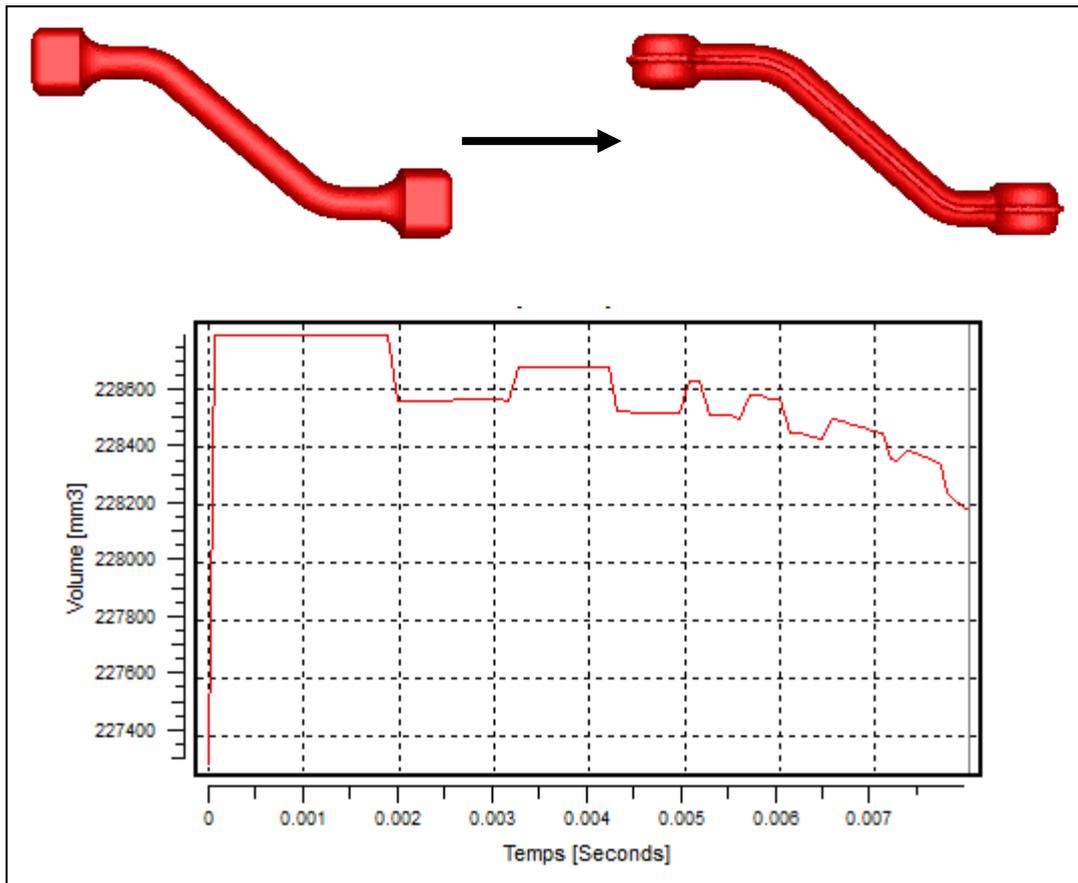


Figure 8: Présentation des résultats.

La simulation de forgeage permet de prévoir avec précision l'énergie et les forces de pressage, et donc elle favorise la sélection de la presse, figure 9.

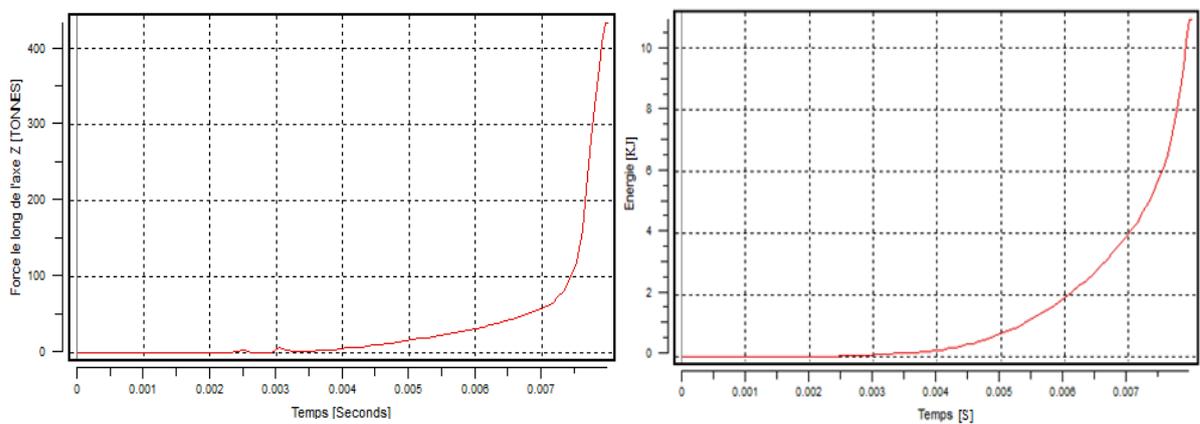


Figure 9 : Représentation graphique (Force & Energie).

Elle permet de prévoir aussi d'un part, les valeurs max des températures pour le lopin et les outils, figure 10, et d'autre part, la puissance dissipée par déformation plastique, par frottement et la puissance totale, figure 11.

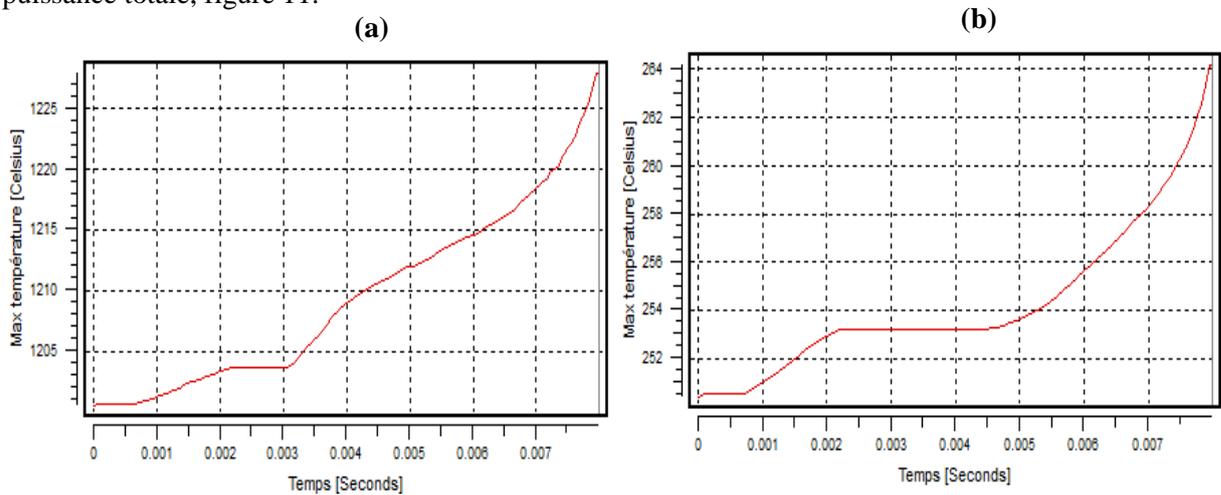


Figure 10 : Max température (a) lopin (b) outil inférieur.

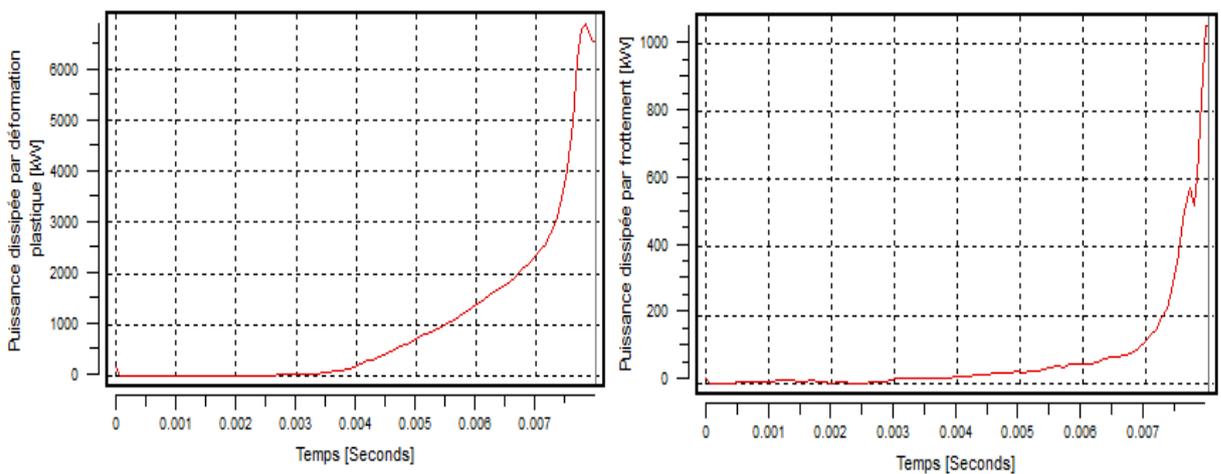


Figure 11 : Puissance durant le processus de forgeage.

La figure 13 représente la répartition des contraintes de Von Mises sur les différents éléments finis au cours de la déformation.

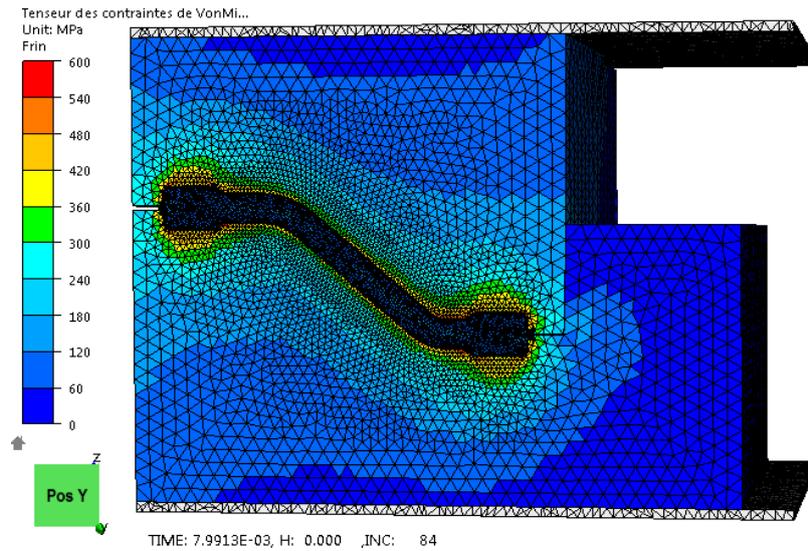


Figure 13 : Représentation de la répartition des contraintes de Von Mises sur les différents éléments finis au cours de la déformation.

La figure 15 met en évidence les déformations équivalentes dans l’outil inférieur. Elle montre que l’on reste dans le domaine élastique au premier cycle de forgeage, le domaine plastique apparaitre à partir une déformation de 0.118 ainsi, les maximums des déformations sont localisés au niveau de gravure.

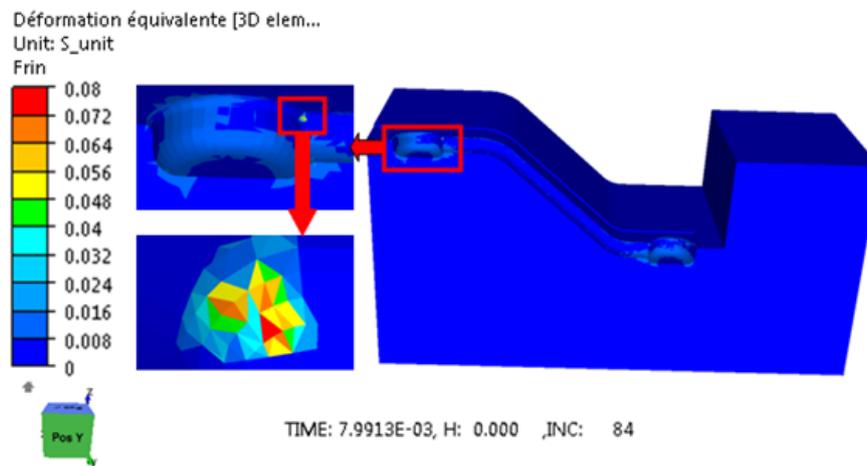


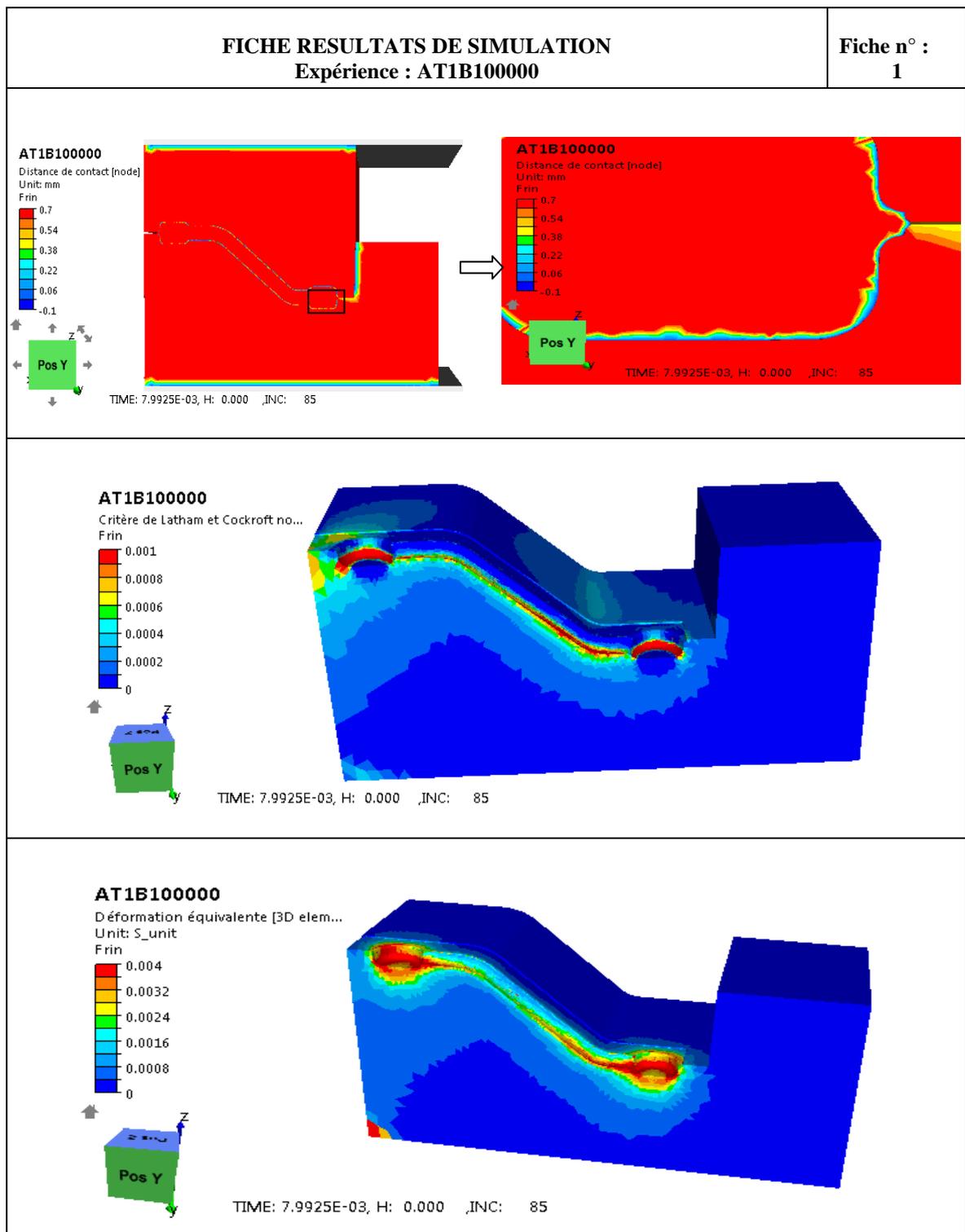
Figure 15 : Déformation équivalente dans la matrice inférieure.

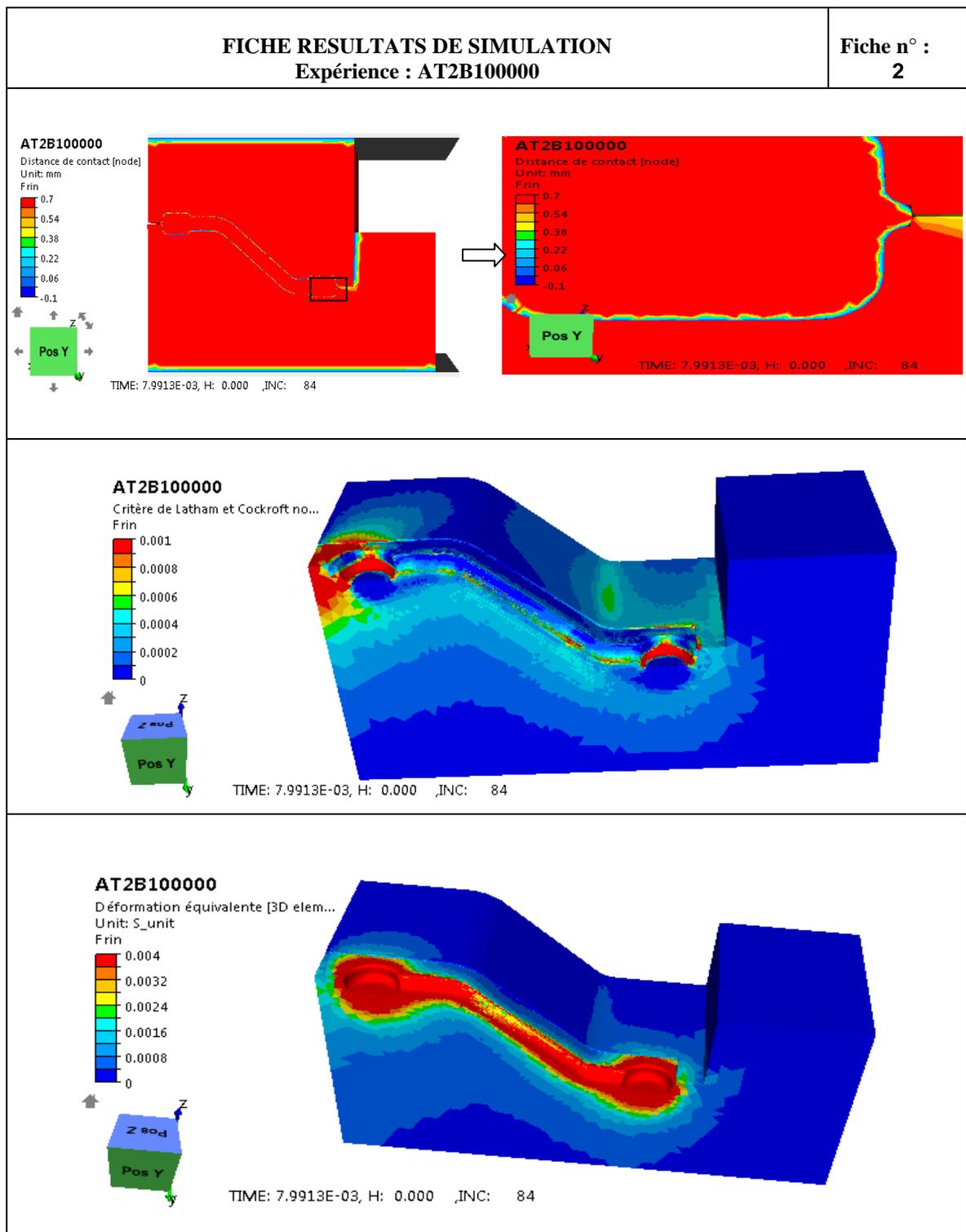
Appendice A3

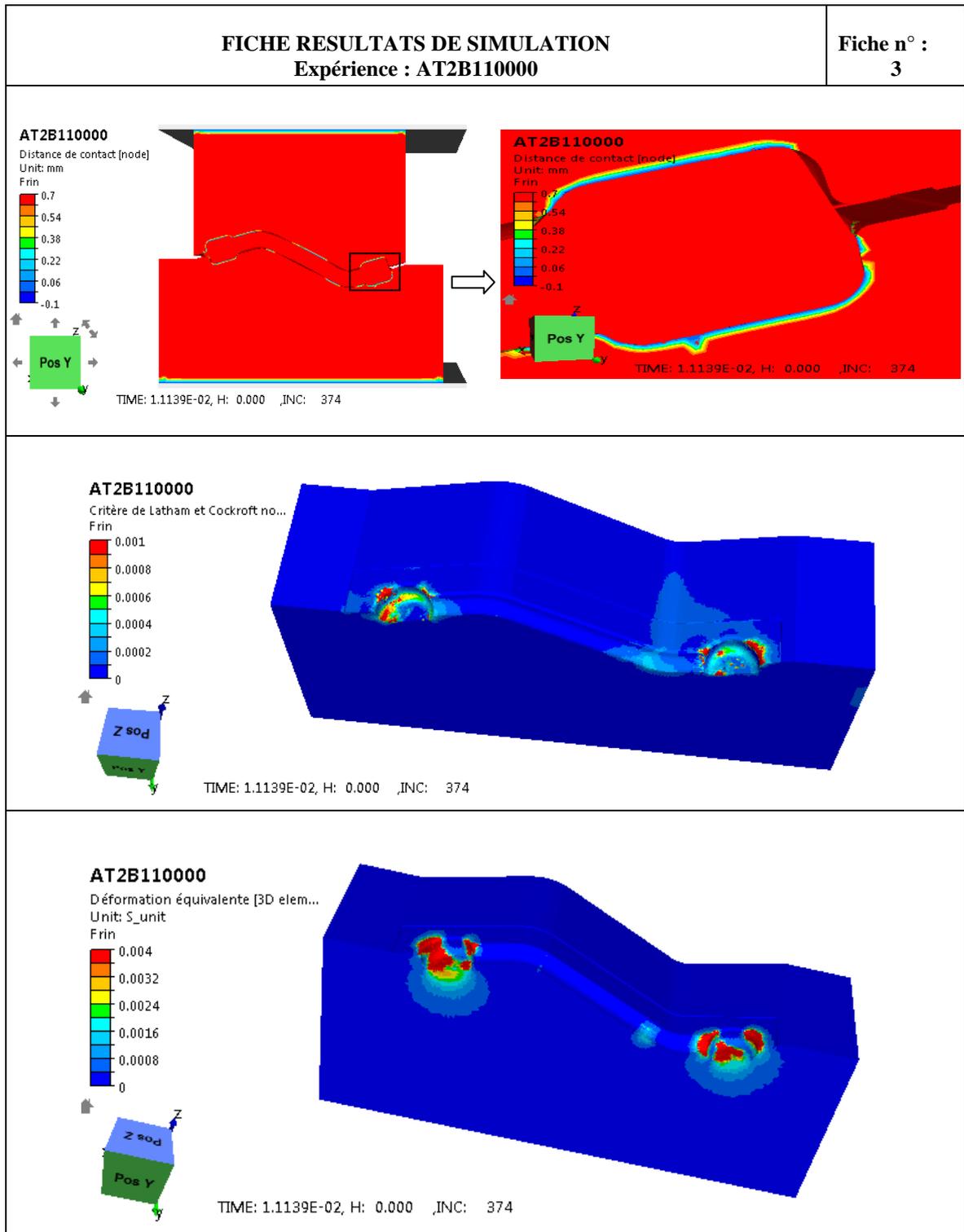
Paramétrage du procédé de forgeage du levier de direction

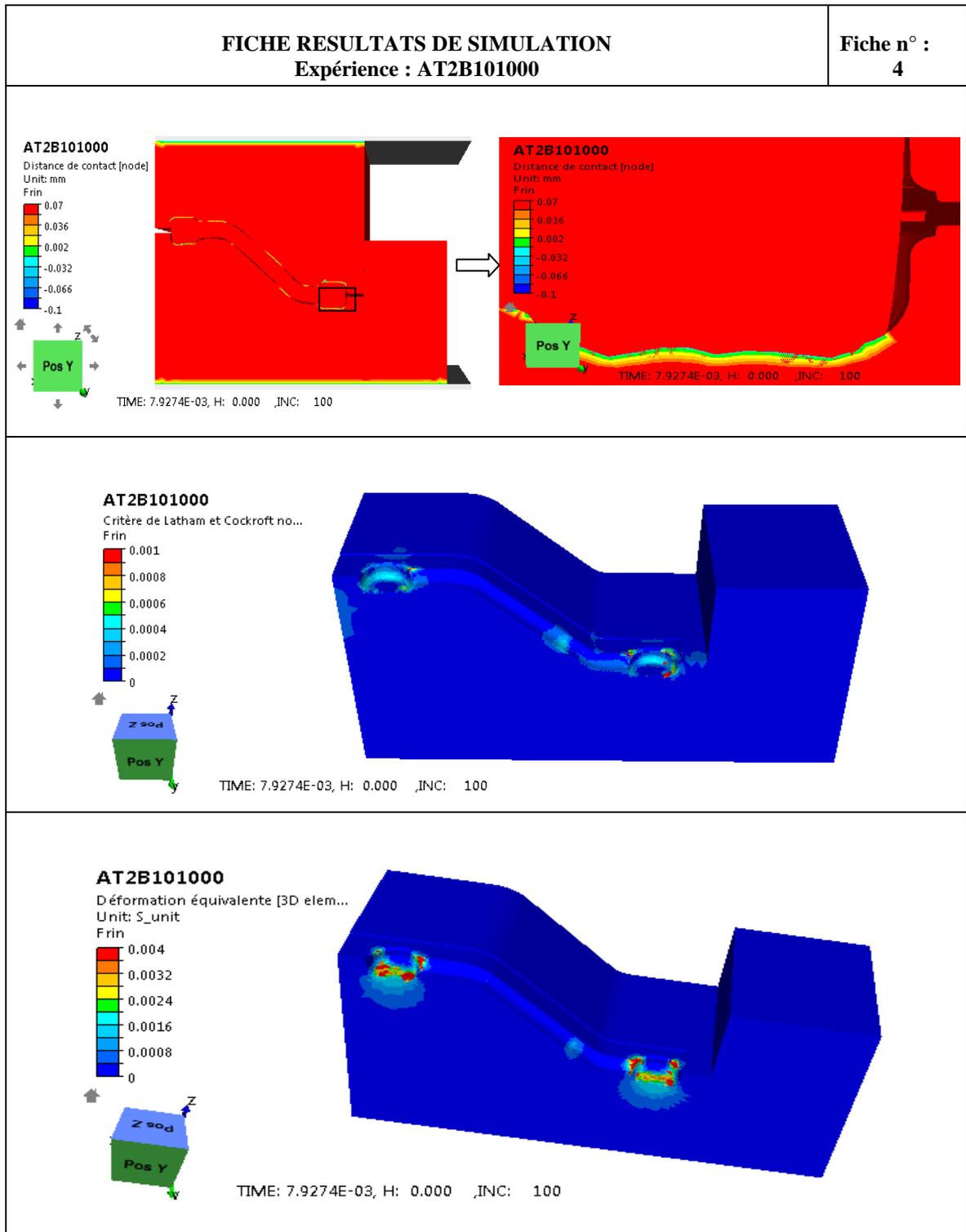
A3.1 : Analyse des résultats pour le paramétrage du procédé de forgeage

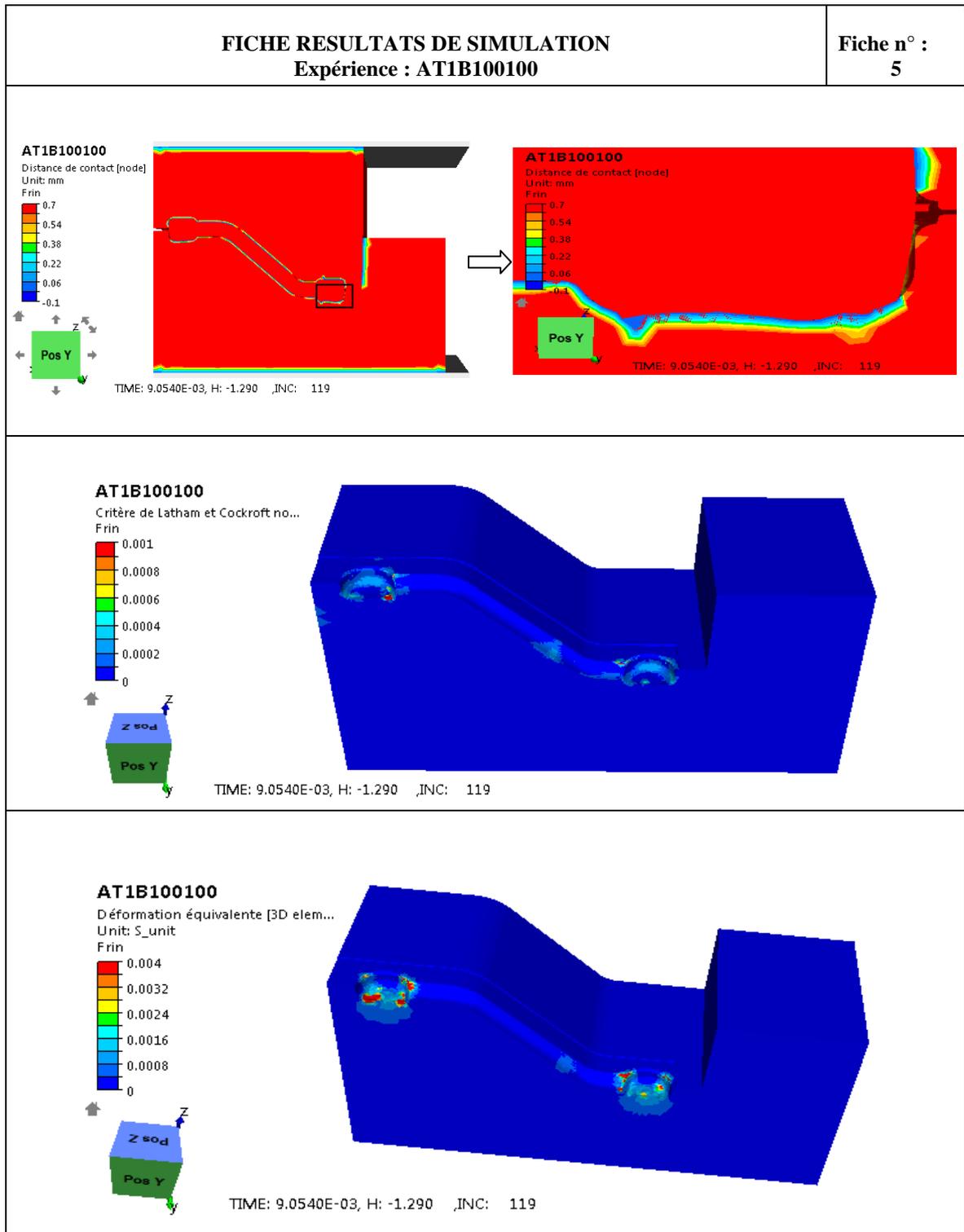
1. La mesure de distance est bornée et ne peut pas être plus grande que $1.015 * D_{penplus}$. Le paramètre $D_{penplus}$ est un des paramètres intervenant dans l'algorithme de contact pénalisé. Sa valeur est déterminée en fonction de la taille de maille.
Par exemple dans le présent cas la taille de maille de 2 millimètre, on va trouver $D_{penplus} = \frac{2}{3} = 0.66$. Le maximum du scalaire affiché ne pourra pas dépasser $1.015 * D_{penplus} = 0.67$.
2. Latham-Cockcroft normalisé est un critère d'endommagement (aussi appelé Oh et Kobayshi), qui permet d'identifier les zones susceptibles d'être détériorées. Il n'a pas de couplage avec la rhéologie, donc il n'y aura pas d'affaiblissement du comportement de la pièce si elle est endommagée (la rhéologie reste inchangée). Ce critère combine la déformation plastique et la traction. Les valeurs limites sont de l'ordre de 1,5 (à chaud) et de 0,5 (à froid).
3. La scalaire déformation équivalente permet de visualiser des phénomènes bien connus comme 'la croix du forgeron'. Il met en évidence les zones ayant subi un durcissement structurel appelé 'écrouissage' ou 'corroyage'.

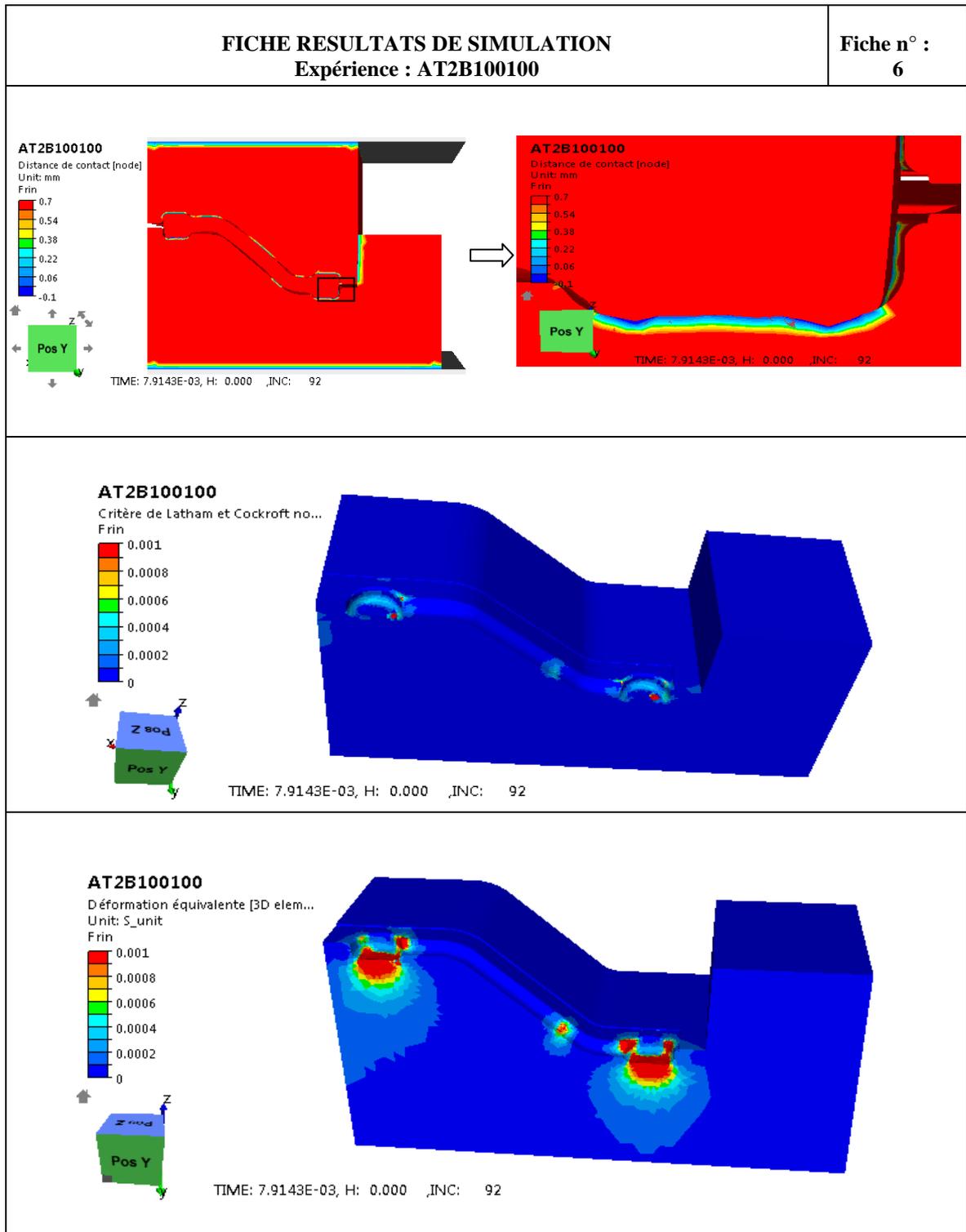


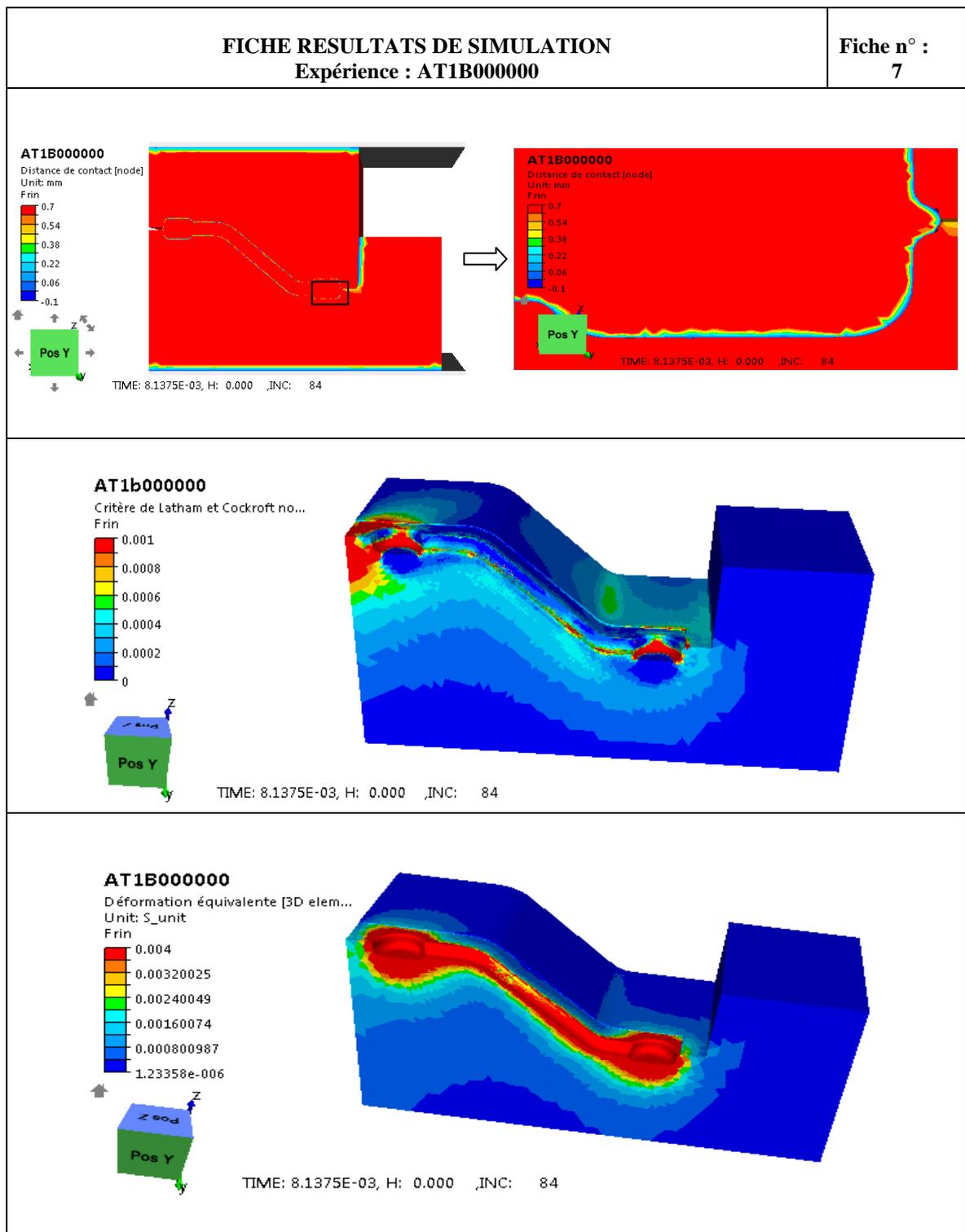


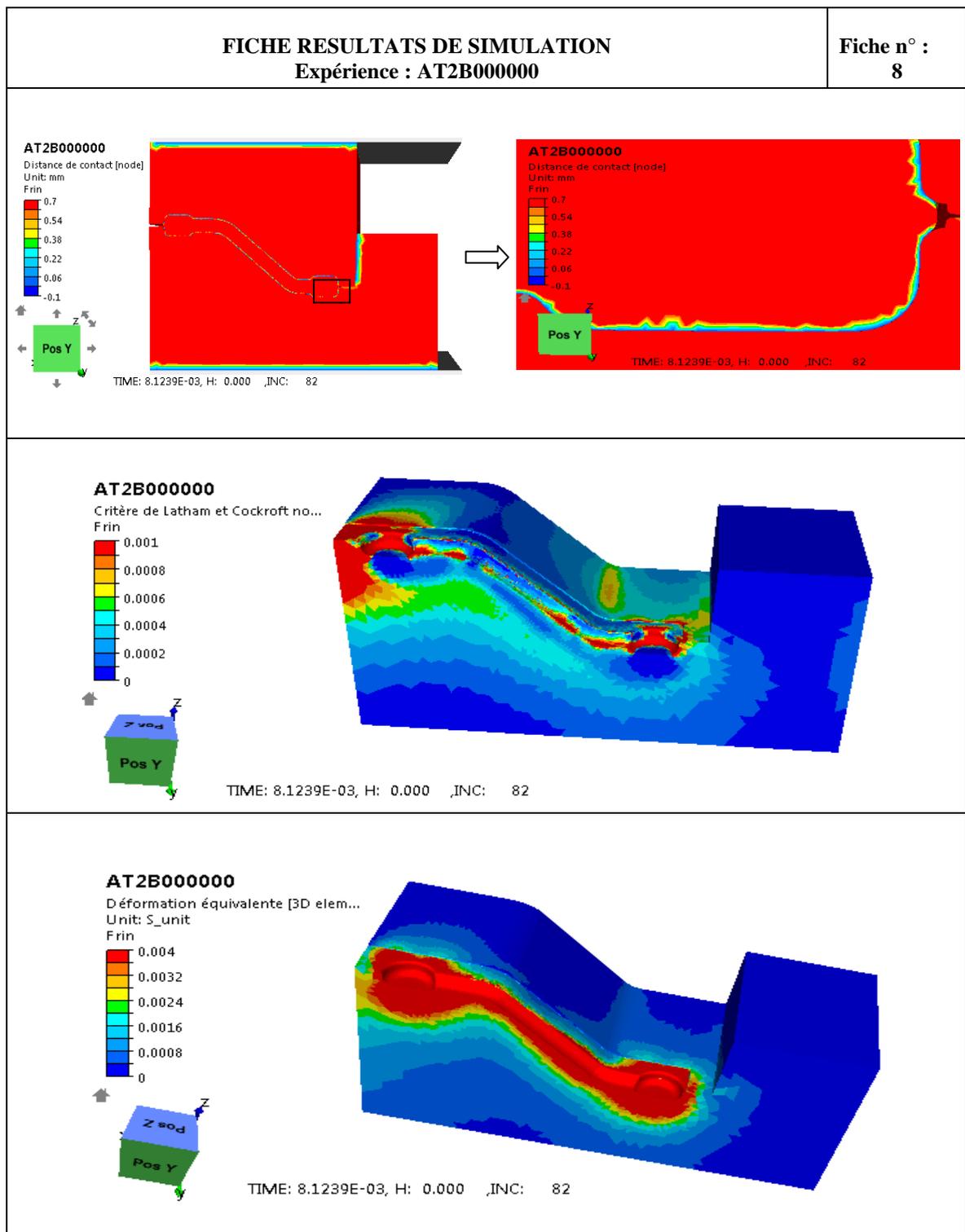












Appendice A4
Procédure d'analyse de la fiabilité mécanique
sous le logiciel PhimecaSoft

Présentation

PHIMECA Software est développé par la société PHIMECA et commercialisé depuis 2002. Il est proposé aux universitaires et industriels. Le système d'interface rend le travail facile et efficace. Avant d'effectuer une étude de fiabilité, trois types de modèles doivent être définis :

1) Un modèle physique (ou mécanique)

Le modèle mécanique consiste à développer une loi mathématique qui gouverne le comportement d'un matériau ou d'une structure sous des conditions de service. Dans le cas de l'analyse de la durée de vie de l'outil de mise en forme par forgeage, le modèle mécanique a été développé en combinant le comportement rhéologique de l'outil à savoir la loi de Hansel and Spittel (équation IV.1) et une loi d'endommagement du matériau, soit la loi de Lemaitre and Chaboche pour la fissuration en fatigue (équation IV.2). Donc, PhimecaSoft invite les utilisateurs à introduire le modèle mécanique (Figure A4.1).

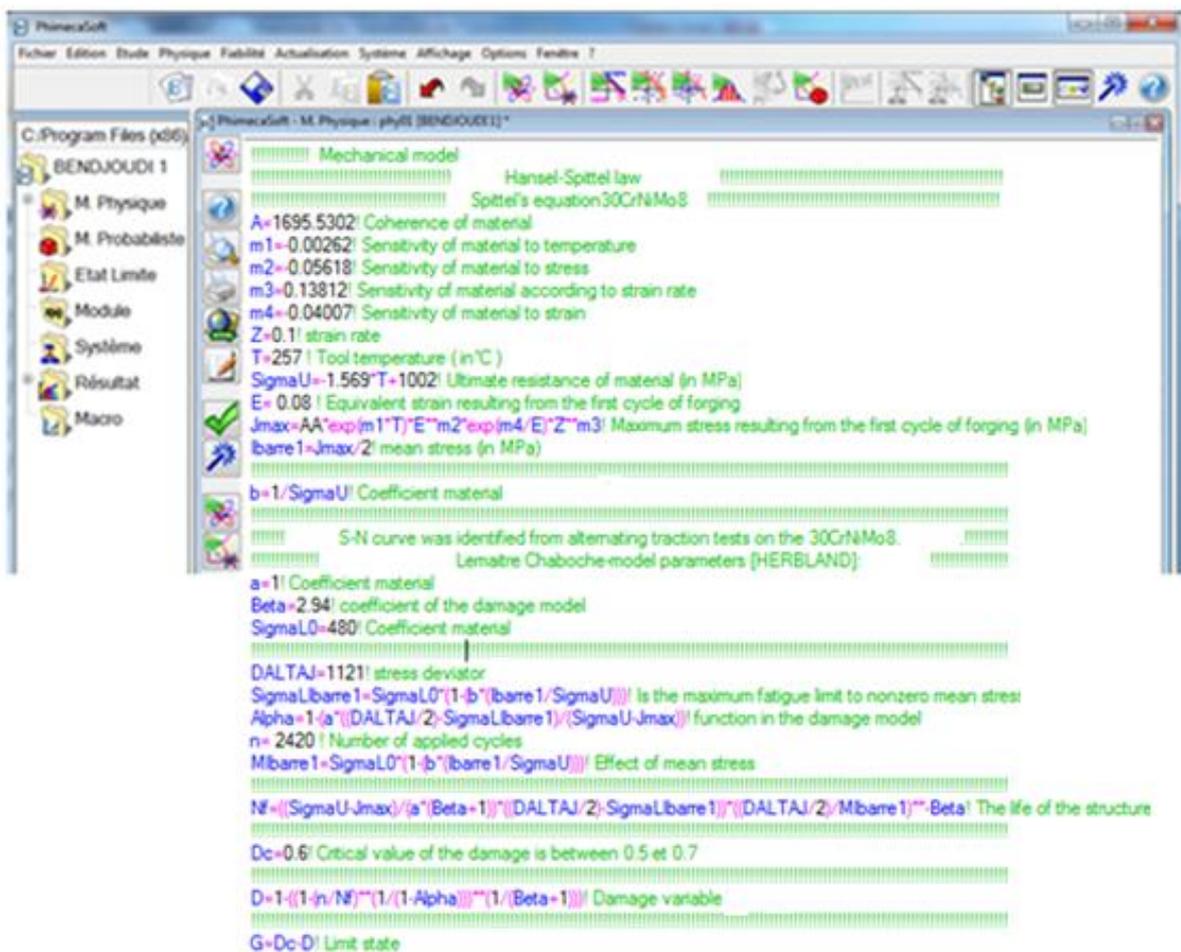


Figure A4.1 : Saisie du modèle mécanique pour l'analyse de l'outil de forge sous PhimecaSoft.

2) Un modèle probabiliste

Le modèle mécanique comporte des paramètres exprimés par des valeurs auxquelles sont associées des incertitudes. Ces incertitudes sont prises en considération à travers des fonctions de distribution probabilistes qui sont intégrées dans le module 'Modèle probabiliste' de PhimecaSoft qui offre une large gamme de lois probabilistes. Le tableau A4.1 montre un exemple de saisie de ces lois probabilistes.

Tableau A4. 1 : Saisie des modèles probabilistes sous PhimecaSoft.

Numéro	Variable	Valeur	Loi	Moyenne	Ecart-type
1	a	1.0000	Normale	1.0000	0.01
2	A	1695.5302	Normale	1695.5302	8.47
3	Beta	2.9400	Normale	2.9400	0.0294
4	DALTAJ	1121.0000	Normale	1121.0000	11.21
5	Dc	0.6000	Normale	0.6000	0.1
6	E	0.0800	Normale	0.0800	0.004
7	m1	-2.62e-003	Normale	-2.62e-003	0.000013
8	m2	-0.0562	Normale	-0.0562	0.000562
9	m3	0.1381	Normale	0.1381	0.001381
10	m4	-0.0401	Normale	-0.0401	0.0002005
11	SigmaL0	480.0000	Normale	480.0000	4.8
12	T	257.0000	Normale	257.0000	5.84

3) Une fonction d'état de limite (ou modèle de performance)

Le calcul sous PhimecaSoft, ne peut pas se réaliser si une fonction d'état limite n'est pas définie. Ainsi, dans le cas de l'analyse de la durée de vie de l'outil de mise en forme par forgeage, l'état limite est défini par l'équation IV.12.

La saisie de cette équation est réalisée tout simplement en l'indiquant dans le module 'Etat limite'.

4) Analyse fiabiliste

L'analyse fiabiliste peut se faire 5 manières : Méthode d'approximation (Directe), Simulations, Analyse de distribution, Problème inverse et Etude paramétrique.

5) Résultats de l'analyse fiabiliste

Nous présentons dans ce qui suit les types de résultats qui nous ont permis de réaliser ce présent travail. Le logiciel PhimecaSoft offre les possibilités de faire des études

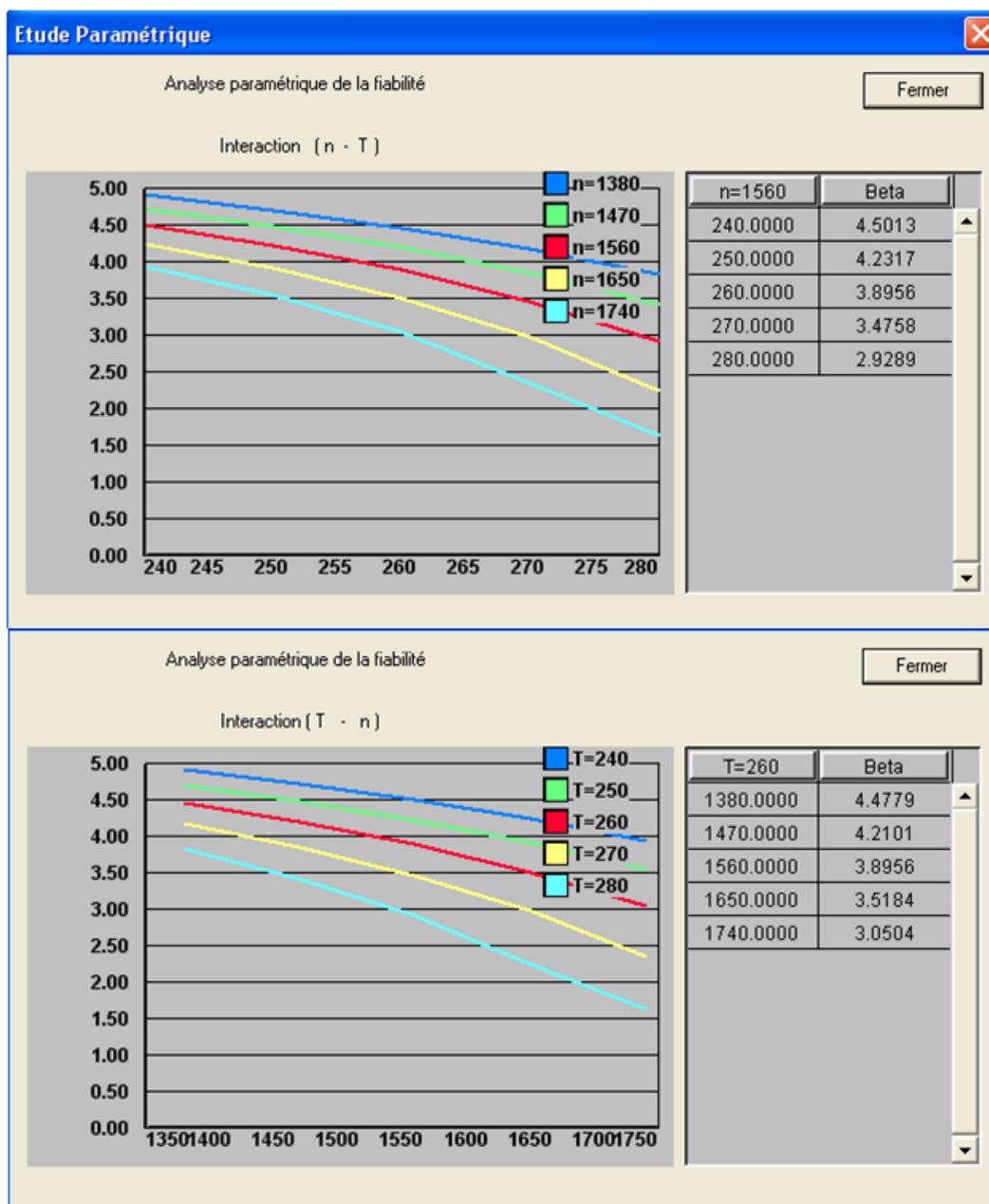


Figure A4.2 : Etudes paramétriques.

Paramétriques déterministes avant de faire des études fiabilistes. Un exemple d'études paramétriques avec la sensibilisé des variables est donnée dans la figure A4.2.

L'étude paramétrique permet de vérifier si le modèle mécanique répond aux différents paramètres et leurs sensibilités. Ainsi, on peut distinguer les paramètres qui éventuellement pourraient jouer un rôle déterminant dans l'analyse fiabiliste.

La figure A4.3 montre un exemple de distribution de variables de calcul obtenu suite à une analyse globale. Les figures A4.4a et A4.4b montrent quelques exemples de cas d'études de sensibilités des variables par la méthode directe.

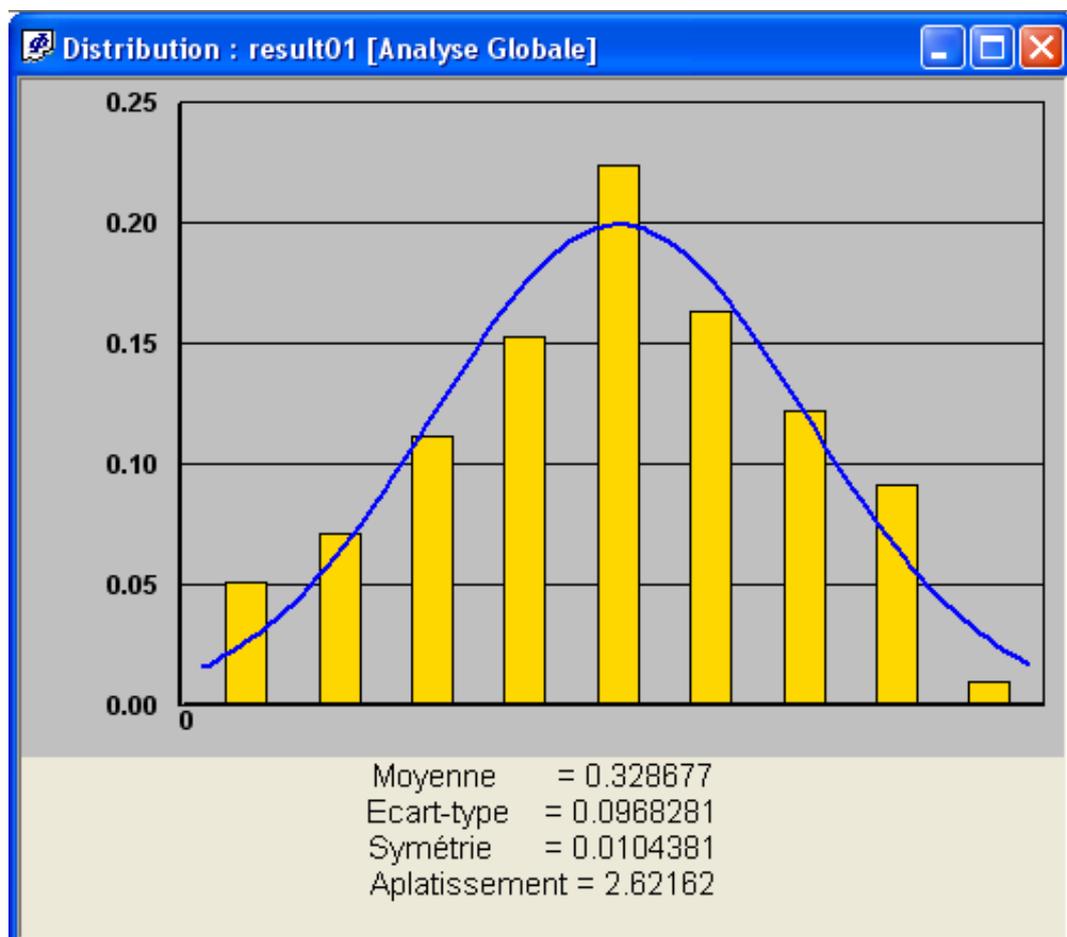


Figure A4.3 : Distribution de variables de calcul.

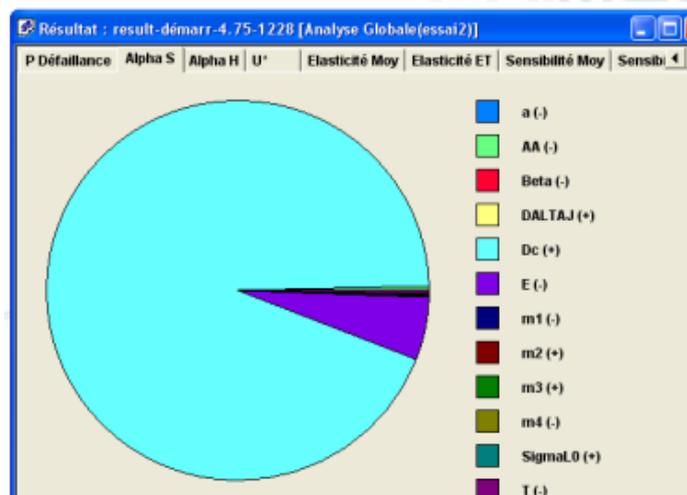
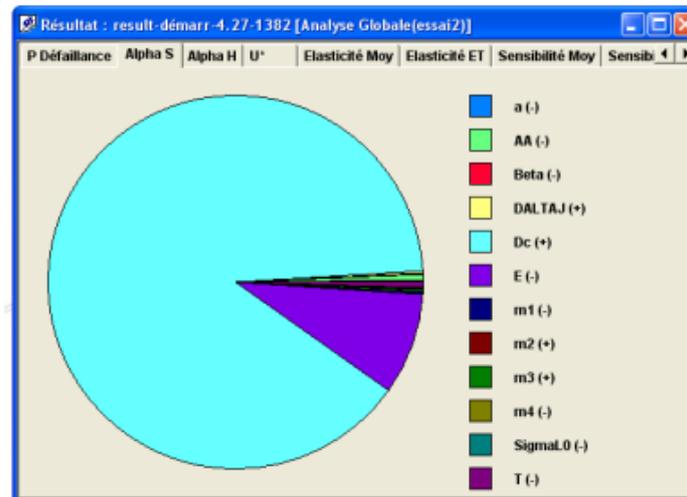
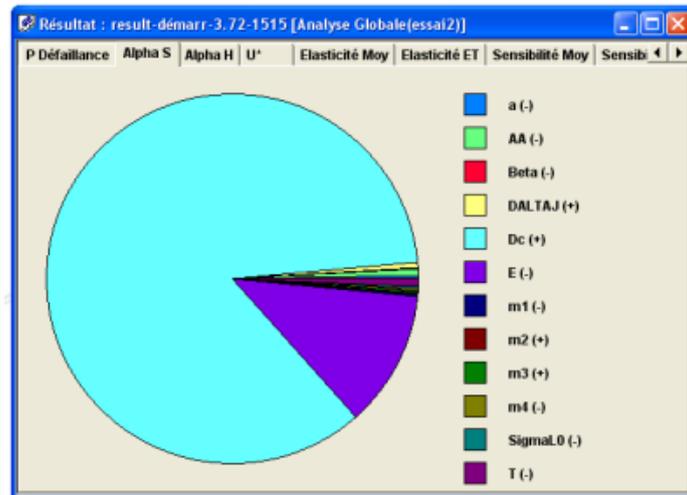


Figure A4.4a : Études de sensibilités des variables par la méthode directe ($\beta=3.72, 4.27$ et 4.75).

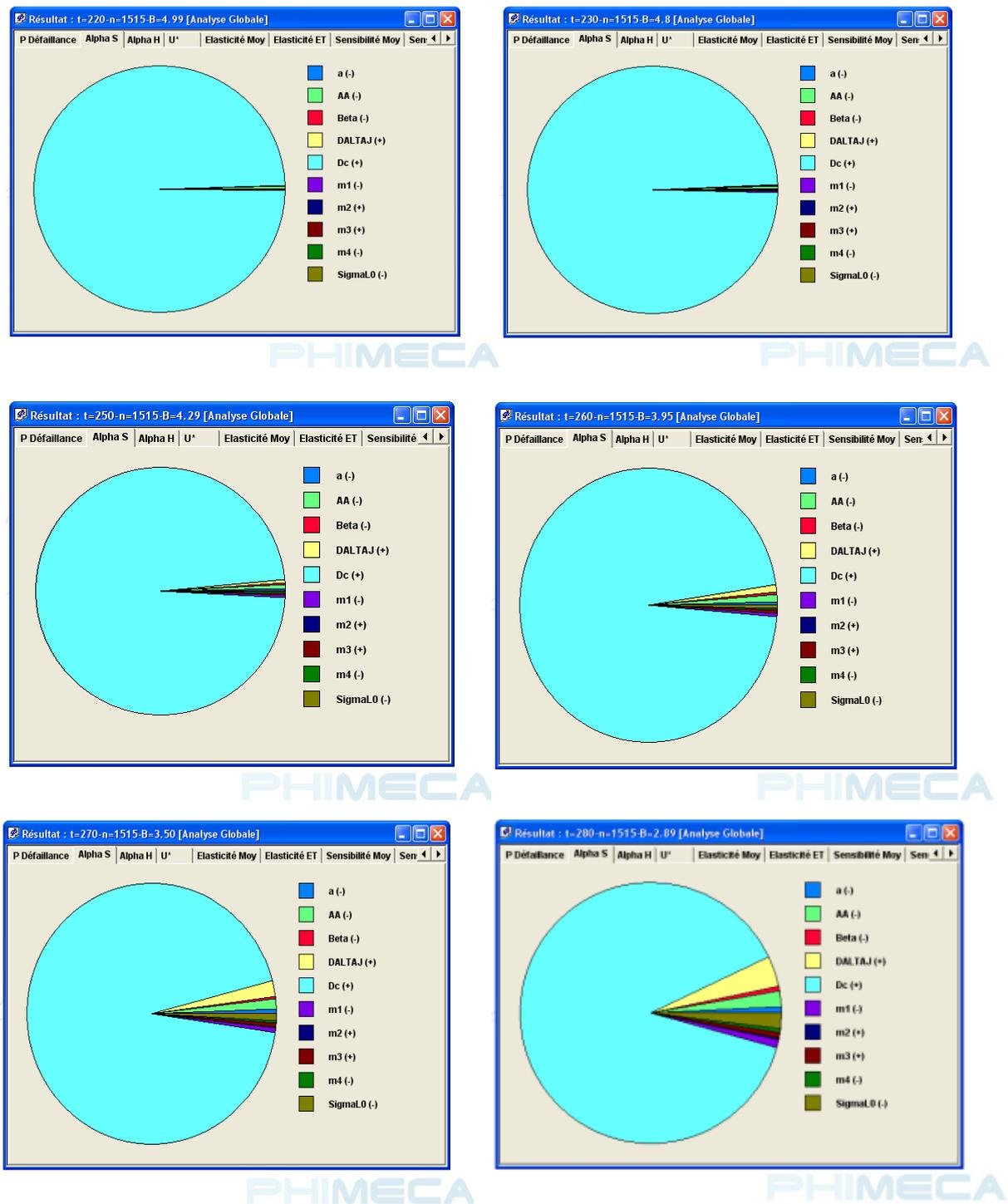


Figure A4.4b : Études de sensibilités des variables par la méthode directe (n=1515).