HAL
open science

Contribution à la mise en place d'une méthodologie générique de contrôle des processus de forgeage dans le but de maitriser les moyens de production

Zakaria Allam

To cite this version:

Zakaria Allam. Contribution à la mise en place d'une méthodologie générique de contrôle des processus de forgeage dans le but de maitriser les moyens de production. Génie mécanique [physics.class-ph]. Ecole nationale supérieure d'arts et métiers - ENSAM, 2014. Français. NNT : 2014ENAM0028 . tel-01087192

HAL Id: tel-01087192

https://pastel.hal.science/tel-01087192

Submitted on 25 Nov 2014

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

2014-ENAM-0028

École doctorale n° 432 : Sciences et Métiers de l'ingénieur

Doctorat ParisTech
T H È S E

Pour obtenir le grade de docteur délivré par

l'École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers

Spécialité "Génie Mécanique – Procédés de fabrication "

Présentée et soutenue publiquement par

Zakaria ALLAM

Le 06 Novembre 2014

Contribution à la mise en place d'une méthodologie générique de contrôle des processus de forgeage dans le but de maitriser les moyens de production

Directeur de thèse : **Régis BIGOT**
Co-encadrement de la thèse : **Cyrille BAUDOUIN**
Co-encadrement de la thèse : **Eric BECKER**

Jury

M. Laurent DUBAR, Professeur des Universités, TEMPO, Université de Valenciennes.	Président
M. Pascal LAFON, Professeur des Universités, LASMIS, Université de Technologie de Troyes.	Rapporteur
M. Sami CHATTI, Maître de Conférences HDR, UIL Université technique de Dortmund, Allemagne	Rapporteur
M. Saïd ETTAQI, Professeur des Universités, ENSAM de Meknès, Maroc.	Rapporteur
M. Cyrille BAUDOUIN, Maître de Conférences, LCFC, ENSAM, Metz.	Examinateur
M. Eric BECKER, Maître de Conférences, LCFC, ENSAM, Metz.	Examinateur
M. Régis BIGOT, Professeur des Universités, LCFC, ENSAM, Metz.	Examinateur
M. Pierre KRUMPIPE, Expert en Forge, CETIM-Saint Etienne.	Invité

T H È S E

Arts et Métiers ParisTech - Centre de Metz
Laboratoire de Conception, Commande & Fabrication (LCFC)

à Damia

Remerciements

Mes remerciements s'adressent dans un premier temps aux membres du jury qui ont accepté d'évaluer mon travail. Je remercie Monsieur Laurent DUBAR, professeur à l'université de valenciennes, pour avoir accepté de présider ce jury. Je remercie également Monsieur Pascal LAFON, Professeur à l'université technologique de Troyes, Monsieur Said ETTAQI, professeur à l'ENSAM de Meknès et Monsieur Sami CHATTI, Maitre de conférences à l'université technique de Dortmund, pour leur lecture attentive du manuscrit.

Je remercie mon directeur de thèse Monsieur Régis BIGOT d'avoir accepté de m'accueillir au sein du laboratoire LCFC, je le remercie également pour sa confiance et ses explications accompagnées de métaphores très expressives. Je remercie Monsieur Cyrille BAUDOUIN pour sa capacité à changer une petite idée en théorie, ses conseils et son implication. Je remercie aussi Monsieur Eric BECKER pour son sens critique et ses encouragements qui m'ont permis d'être plus optimiste et d'enlever les pensées négatives. Et finalement je remercie Monsieur Pierre KRUMPIPE pour ses conseils, son soutien et ses corrections.

Je tiens aussi à remercier Laurent qui m'a fait confiance et m'a appris à aimer la recherche, je le remercie également pour son ouverture d'esprit et sa capacité à voir les autres comme des êtres humains avant qu'ils soient rouges, blancs, bouddhistes ou mexicains. Un grand merci aussi à Tudor qui m'a fait aimer l'enseignement et à Monsieur Patrick MARTIN, Monsieur Gabriel ABBA, Monsieur Ali SIADAT et Monsieur Jean Yves DANTAN pour leur aide.

Et bien sûr je ne peux pas oublier de remercier les amis qui m'ont aidé dans mon travail et qui m'ont permis de passer de bons moments durant ces trois années au LCFC et en France : les sorties, les voyages, les parties d'escrime… J'espère que je n'oublie personne : Alex, Amir, Antoine B, Antoine, Ayoub, Bruno, Catalina, Célia, Céline, Charlotte, Damien, Emrik, Etienne, Florian, François, Gérôme, Guchao, Guillaume, JB, Jinna, Josselin, Karim, Marc, Marc B, Marilyn, Mathieu, Mouna, Olivier, Oussama, Philippe, Philippe M, Renaud, Saad, Samantha, Sandra, Shirin, Simon, Soumia, Stéphane, Stéphanie, Sylvio, Thomas, Véronique, Xavier.

Et finalement un grand merci à ceux qui sont loin des yeux mais près du cœur. Je pense à mes amis à casa : Ali, Amina, Anas, Dragon, Kermousa, Malina, Omar et Zrika. Et je pense bien sûr au soutien de la petite famille : Merci à ma grand-mère, mes parents, l'fekroun et anas, suburachi, sachi, maamrek et azzedine.

Merci à tous !

Zak

Table des matières

Introduction génerale **1**

Chapitre I : Processus de forgeage & Maitrise des moyens de production **5**

1.1. Cadre de l'étude 6
1.2. Emplacement de l'étude 10
1.3. Résultats des investigations 11
1.3.1. Maitriser un processus de fabrication 11
1.3.2. L'identification des sources de déviations 14
1.3.3. Les mesures comme remède aux déviations 15
1.3.4. Analyse des sources de déviations 18
1.3.5. L'amélioration des processus en continue 19
1.3.6. Formalisation de nouvelles règles de travail 20
1.4. Comparaison des différentes méthodes 24
1.5. Conclusion 25

Chapitre II : Méthodologie pour la maitrise du processus de forgeage **29**

2.1. Explication de la démarche 30
2.2. Système d'aide à la décision 35
2.2.1 Architecture et utilisateurs du système 36
2.2.2 Entrées du système d'aide à la décision 38
2.3. Processus de forgeage 40
2.4. Système d'apprentissage 41
2.4.1 Architecture du système 43
2.4.2 Pertinence de contrôle 44
2.5. Conclusion 46

Chapitre III : Modélisation du processus de forgeage et application de la méthodologie **49**

3.1. Modélisation du système d'aide à la décision 50
3.1.1 Principe général 50

3.1.2 Exemple d'utilisation des outils au niveau du SAD 54
3.2. Modélisation du système d'apprentissage 57
3.2.1. Principe général 58
3.2.1. Exemple d'application 61
3.3. Conclusion 63

Chapitre VI : Illustration de la méthodlogie sur des cas d'étude 67

4.1. Moyens expérimentaux 68
4.2. Résultats expérimentaux 69
4.1.1. Dans le cas de l'estampage 69
4.1.2. Dans le cas du Filage direct 77
4.3. Résultats des simulations 85
4.2.1. Dans le cas de l'estampage 85
4.2.2. Dans le cas du filage direct 93
4.4. Comparaison des résultats 95
4.5. Conclusion 98

Conclusion & Perspectives 101

Références bibliographiques 107

Annexe 113

Annexe A : Productions scientifiques 114
Annexe B : Diagramme SADT 115
Annexe C : Glossaire 120
Annexe D : Matrices de corrélation 127
Annexe E : Arbres de causes 129
Annexe F : Abaque pour déterminer $\overline{\boldsymbol{m}}$ (Test de l'anneau) 134
Annexe G : Méthode Monte Carlo 135

Table des figures

Fig.a Emplacement de l'étude par rapport aux travaux réalisés précédemment dans le laboratoire 3
Fig.1.1 Evolution de l'état du produit au cours de l'application de la gamme de forgeage..... 7
Fig.1.2 Matrice de corrélation entre les défauts en forgeage et les paramètres processus classés en fonction des domaines d'interaction en fabrication. 9
Fig.1.3 Classification de quelques paramètres processus suivant les différentes entités entrant en jeu lors de la fabrication en forgeage..... 19
Fig.1.4 Etapes suivies pour la fabrication d'une pièce en forgeage..... 11
Fig.1.5 Les étapes suivies pour l'application de la méthode Six sigma [NF ISO 13053-1]..... 12
Fig.1.6 L'emplacement des différentes méthodes utilisées dans la maitrise d'un processus..... 14
Fig.1.7. Les modules utilisés par le SAD et sa relation avec l'utilisateur [Sprague 1987]..... 15
Fig.1.8 Principe de contrôle in situ du forgeage d'une virole [Zani 2004]..... 16
Fig.1.9 Exemple d'une carte de contrôle utilisé par Sahoo dans le cas de la maitrise du processus de martelage [Sahoo 2008]..... 20
Fig.1.10 Processus de contrôle utilisé par Garcia [Garcia 2005]. 23
Fig.1.11 Equipement expérimental utilisé pour la détection des rides et des fissures en emboutissage [Garcia 2005]..... 23
Fig.1.12 Réseau de neurones utilisant 3 couches et utilisé par Ohdar..... 24
Fig.1.13 Description de l'emplacement des paramètres processus et des variables produit..... 27
Fig.2.1 Arbre de causes/conséquences proposé pour la synthèse bibliographique. 30
Fig.2.2 Arbre de causes/conséquences dans le cas d'un défaut de manque de remplissage..... 31
Fig.2.3 Diagramme IDEF0 représentant les différentes activités à mettre en place pour appliquer la méthodologie proposée. 33
Fig.2.4 Les étapes à suivre pour maitriser le processus de forgeage. 34
Fig.2.5 Diagramme IDEF0 représentant le niveau A1 du diagramme IDEF0 (SAD). 35
Fig.2.6 Diagramme de classe décrivant les entités en interaction dans l'activité A1. 36
Fig.2.7 Les différents utilisateurs du SAD. 38
Fig.2.8 Effort obtenu dans le cas de 3 pièces de morphologies différentes et de même coefficient de complexité de forme. 39

Fig.2.9 Exemple de processus de forgeage dans le cas de l'estampage..... 41
Fig.2.10 Diagramme IDEF0 représentant le niveau A3 du diagramme IDEF0 (SA)..... 42
Fig.2.11 Les étapes suivies par le SA..... 43
Fig.2.12 Le résumé des étapes à suivre pour évaluer la pertinence de la surveillance en utilisant la méthode Monte Carlo (Méthode MC) [Gum 2008]..... 45
Fig.3.1 Représentation du processus de forgeage et des paramètres processus et de l'évolution des variables produit..... 51
Fig.3.2 Etape Avant l'application du SAD (Hypothèse de travail)..... 52
Fig.3.3 Etape d'application du SAD..... 53
Fig.3.4 Exemple d'arbre de causes utilisé dans le cas de la déviation de l'épaisseur E..... 55
Fig.3.5 Représentation de l'évolution de l'état du produit à travers les deux premières étapes..... 56
Fig.3.6 Les étapes suivies par le système d'apprentissage..... 59
Fig.4.1 Moyens utilisés lors des essais expérimentaux en estampage et filage direct..... 69
Fig.4.2 Représentation de la roulette utilisée dans le cas d'étude..... 70
Fig.4.3 Etapes suivies dans le processus d'estampage et l'état des variable produit et des paramètres processus à chaque étape..... 71
Fig.4.4 Arbre de causes renseigné par des experts dans le cas de la variation de l'épaisseur E de la roulette..... 71
Fig.4.5 Anneau utilisé dans le test de l'anneau [Cetim]..... 73
Fig.4.6 Représentation des épaisseurs obtenues après la mise en place des simulations Monte Carlo, en utilisant le modèle de puissance (n= 104)..... 76
Fig.4.7 Pièce obtenue via le filage direct..... 77
Fig.4.8 Représentation de l'emplacement de la pièce par rapport à l'outillage du filage et du jeu existant entre le conteneur et le poinçon..... 78
Fig.4.9 Etapes suivies dans le processus de filage et l'état des variable produit et des paramètres processus à chaque étape..... 79
Fig.4.10 Arbre de causes obtenu dans le cas de la variation des longueurs en filage direct..... 79
Fig.4.11 Représentation de l'évolution de l'effort en fonction du déplacement du coulisseau (Température = 1000°C, Lubrification : Huile + graphite, Longueur du lopin = 86mm)..... 81
Fig.4.12 Représentation des longueurs A obtenues après la mise en place des simulations Monte Carlo, en utilisant le modèle de puissance (n= 104)..... 84
Fig.4.13 Variation de l'épaisseur en fonction de la température et du frottement (Loi de Tresca)..... 87

Fig.4.14 Variation de l'effort en fonction du déplacement du coulisseau (Coefficient de fortement de 0.1)..... 88
Fig.4.15 Courbe d'effort limitée à 40mm en déplacement (Coefficient de fortement de 0.1)..... 88
Fig.4.16 Déplacement de la matière suivant l'axe x (Ecoulement à la position 39.4mm)..... 89
Fig.4.17 Usure de l'outillage dans le cas de trois températures différentes. 89
Fig.4.18 Arbre de causes dans le cas de la déviation de l'épaisseur de la roulette (cas d'un pilon)..... 90
Fig.4.19 Variation de l'épaisseur en fonction du frottement (m) et de la température..... 91
Fig.4.20 Variation de l'épaisseur en fonction de la longueur initiale et la température 92
Fig.4.21 Longueurs A obtenues en utilisant le modèle de puissance (104 tirages). 94
Fig.4.22 Comparaison des valeurs des variables produit obtenues numériquement et expérimentalement dans le cas de l'estampage..... 96
Fig.4.23 Comparaison des valeurs des variables produit obtenues numériquement et expérimentalement dans le cas du filage..... 96
Fig.4.24 Comparaison entre la courbe d'effort obtenue expérimentalement et numériquement dans le cas de la roulette (T°=1000°C, m=0.2, L=60mm)..... 97
Fig.4.25 Comparaison entre la courbe d'effort obtenue expérimentalement et numériquement dans le cas du filage direct (T°=1000°C, μ=0.2, L=86mm)..... 97
Fig.b.1 Schéma décrivant les deux systèmes utilisés et leur emplacement par rapport au processus de forgeage 103
Fig.b.2 Synthèse des travaux réalisés : verrous en noir, solutions proposés en rouge et perspectives en vert..... 105

Table des tables

Table.1.1 Explication des différentes notations utilisées dans le tableau comparatif 1.2. 24
Table.1.2 Synthèse des différentes méthodes de maitrise des processus appliquées en forgeage. 24
Table.3.1 Données d'entrée du système d'apprentissage. 59
Table.4.1 Plan d'expériences utilisé dans le cas de la roulette. 72
Table.4.2 Résultats du plan d'expériences appliqué dans le cas de la roulette (expérimental) 74
Table.4.3 Matrice de corrélation obtenue dans le cas de l'estampage. 75
Table.4.4 Plan d'expériences utilisé dans le cas de la pièce obtenue en filage direct 80
Table.4.5 Résultats du plan d'expérience appliqué dans le cas du filage direct (expérimental) 82
Table.4.6 Matrice de corrélation obtenues dans le cas du filage 83
Table.4.7 Paramètres opératoires utilisés dans la simulation du forgeage de la roulette. 86
Table.4.8 Paramètres opératoires utilisés dans la simulation du forgeage de la roulette (Pilon). 91
Table.4.9 Plan d'expériences utilisé dans le cas du filage direct (simulations) 93
Table.4.10 Matrice de corrélation obtenue dans le cas du filage (simulations). 93
Table.4.11 Comparaison des valeurs des variables produit dans le cas des deux procédés 96

Nomenclatures

CCF	Coefficient de complexité de forme
μ	Coefficient de frottement (Modèle de Coulomb)
$\bar{m}$	Coefficient de frottement (Modèle de Tresca)
σ_0	Contrainte d'écoulement
τ	Contrainte de cisaillement
ε	Déformation
F	Force
L	Longueur du lopin
π_{tkj}	L'influence du paramètre $\mathbf{P_{tk}}$ sur $\mathbf{S_{ij}}$
V_{pij}	L'influence des paramètres produits à l'étape **i-1** sur le paramètre produit $\mathbf{S_{ij}}$
$\Delta\theta$	L'intervalle de confiance
MC	Monte Carlo
P_{tk}	Paramètre processus k utilisé à l'étape t
P*	Paramètre clés
P'	Paramètre processus dans un repère unifié
R	Rayon du conteneur
SAD	Système d'aide à la décision
SA	Système d'apprentissage
δ	Taux de réduction entre la section filée et la section initiale
T	Température de chauffage
S_{ij}	Variable produit j à la sortie de l'étape i du processus
$\widetilde{\Theta}$	Vecteur de solution à l'aide des méthodes des moindres carrées
e	Vecteur d'erreur
$\dot{\varepsilon}$	Vitesse de déformation

Introduction Générale

Une grande variété de pièces métalliques pour l'automobile, l'aéronautique, l'énergie et la construction sont produites à l'aide des procédés de forgeage. Le forgeage est un ensemble d'opérations de mise en forme à chaud ou à froid par déformation plastique d'un métal, en appliquant un effort supérieur à la contrainte d'écoulement du matériau. Il consiste à former par choc ou pressage entre deux outils, un matériau malléable à une température inférieure à sa température de fusion, en vue d'obtenir la forme et les dimensions approchées ou définitives d'une pièce [AFNOR 82].

Des méthodes de maitrise des processus de forgeage existent et doivent encore être améliorées. Un des objectifs des industriels de la forge est de pouvoir déceler au plus tôt les déviations de caractéristiques au niveau d'un produit dans le processus de forgeage, pour éviter de lui donner de la valeur ajoutée s'il va être considéré comme rebus à la fin du cycle. Dans le domaine de la forge, les cadences sont souvent très élevées et les formes des pièces complexes, ceci rend le processus plus difficile à contrôler. Les industriels contrôlent leur processus en mesurant la pièce forgée, même si parfois il est difficile de mettre en place des mesures surtout dans un environnement avec des températures élevées, de la calamine, etc. Il existe des mesures de paramètres contrôlés, comme la température de la pièce, l'effort de frappe, la vitesse d'avance du coulisseau, etc. Cette démarche n'est pas systématique, elle dépend plus de la culture de l'entreprise que d'une démarche rationnelle, elle dépend des pièces à fabriquer, des secteurs d'activités et des contraintes client. C'est pour cette raison que ce travail

propose de mettre en place une méthodologie générique permettant aux forgerons d'améliorer leur processus de fabrication, de fixer une démarche générale et d'utiliser un outil permettant de trouver les liens existants entre processus, type de pièce, type de gamme, etc.

Les forgerons fabricants des pièces unitaires ou en séries utilisent des outils classiques de maitrise. Les déviations au niveau d'une variable produit peuvent être évitées dans certains cas en utilisant des règles métiers. Par exemple, lors de l'apparition de replis sur les pièces en surface, certains industriels ajoutent des surépaisseurs qui sont usinées par la suite et n'engendrant pas de réflexion sur la source de cette déviation. Ceci donne un coût lié à la matière ajoutée à chaque fois, montre que le processus n'est pas optimisé et qu'il y a encore beaucoup à faire concernant la compréhension des phénomènes physiques.

Le contexte économique actuel oblige les forgerons à réduire le coût des pièces et améliorer la qualité en convergeant de plus en plus vers la maitrise des processus de fabrication. Plusieurs études ont été menées au **L**aboratoire de **C**onception, **F**abrication et **C**ommande (LCFC) dans le but de maitriser les processus de forgeage. Par exemple, les travaux de Cyrille Baudouin sur la mesure des engrenages forgés net-shape [**Baudouin 2006**], les travaux d'Alexandre Thibault sur l'intégration Produit-Processus et la capitalisation de la connaissance en forge [**Thibault 2008**], les travaux d'Eric Becker sur la détermination des limites des conditions opératoires en thixoforgeage [**Becker 2008**] et les travaux de Philippe Mangin sur la détermination des paramètres clés en laminage transversal [**Mangin 2012**]. La *Fig.a* représente l'emplacement des études précédentes par rapport aux travaux présentés dans cette thèse. Cette thèse a comme but de répondre à la question : *Comment peut-on maitriser un processus existant de forgeage ?*

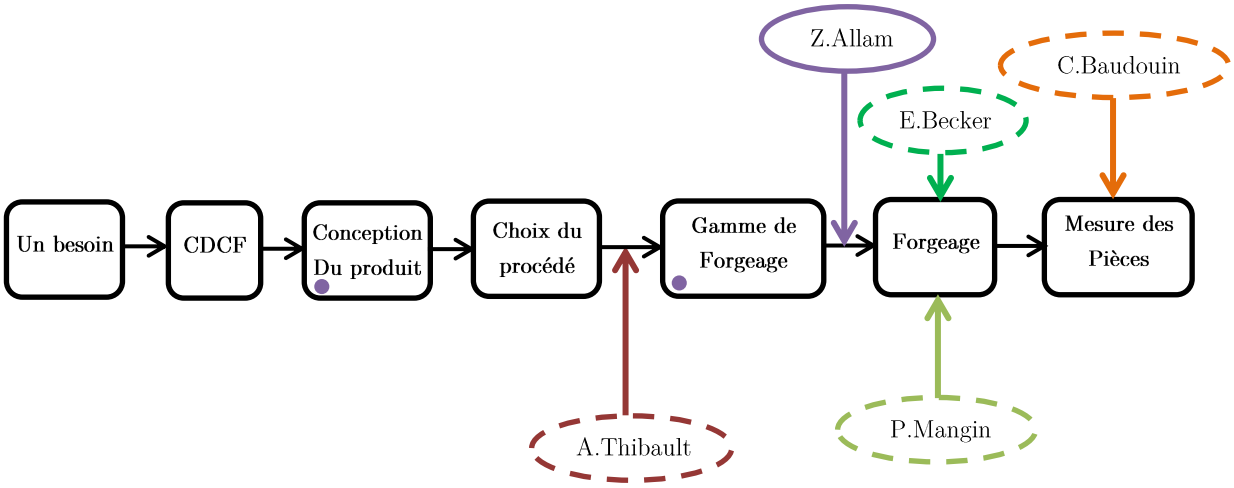


Fig.a Emplacement de l'étude par rapport aux travaux réalisés précédemment dans le laboratoire.

Une méthodologie générique est décrite à travers cette thèse ; cette méthodologie permet de capitaliser les connaissances, de déterminer les paramètres clés à contrôler et les moyens de mesures associés quel que soit le cas d'étude et le processus. Ce manuscrit décrit le contexte de la problématique actuel, certains travaux réalisés dans le domaine, la méthodologie proposée et explique les étapes suivies pour la maîtrise du processus de forgeage.

Dans le chapitre I, il est question de présenter l'état de l'art en relation avec la maîtrise du processus de forgeage, puis de synthétiser les avantages et les inconvénients des méthodes actuelles et ce que peut apporter le travail de thèse par rapport à l'existant. Les verrous à lever sont déduits de l'analyse des inconvénients des méthodes actuelles. Ces verrous sont représentés ci-dessous :

Verrou 1 : Comment identifier les origines des déviations des variables produit en forgeage ?

Verrou 2 : Gagner du temps dans l'analyse des problèmes relatifs aux liens déviations/paramètres réglables et diminuer l'intervention de l'expert.

Verrou 3 : Définir la non-conformité d'une pièce à une étape intermédiaire du processus et évaluer la propagation d'une déviation de variable produit.

Verrou 4 : Avoir un outil utilisable pour différents processus et différents moyens de production en forgeage.

Dans le chapitre II une description détaillée de la méthodologie est faite et des solutions sont proposées pour lever les verrous présentés dans le chapitre I. La description de la méthodologie est faite en présentant les deux systèmes proposés comme solution, à savoir ; le système d'aide à la décision (SAD) et le système d'apprentissage (SA). Dans le troisième chapitre, la modélisation du processus de forgeage est élaborée dans le but d'unifier le langage de communication entre les différents systèmes et de pouvoir identifier facilement les responsables d'une déviation au niveau d'une variable produit. La description faite dans les chapitres II et III est appliquée à deux cas d'études dans le chapitre IV, à travers une application expérimentale et une autre numérique sur l'estampage à chaud et le filage direct.

Chapitre I : Processus de forgeage & Maitrise des moyens de production

L'objectif de ce chapitre est de définir la problématique, le cadre de l'étude et les différents termes utilisés dans le manuscrit. Une description des différentes méthodes de maitrise du processus de forgeage est faite, ainsi que les méthodes utilisées dans d'autres domaines. À la fin de ce chapitre, les verrous sont identifiés à travers une analyse des avantages et inconvénients des différentes méthodes énumérées. Enfin, l'apport de ce travail par rapport à ce qui existe dans la littérature est illustré.

Sommaire

1.1. Cadre de l'étude **6**
1.2. Emplacement de l'étude **10**
1.3. Résultats des investigations bibliographiques **11**
1.3.1. Maitriser un processus de fabrication 12
1.3.2. L'identification des sources de déviations 14
1.3.3. Les mesures comme remède aux déviations 15
1.3.4. Analyse des sources de déviations 18
1.3.5. L'amélioration des processus en continu 19
1.3.6. Formalisation de nouvelles règles de travail 21
1.4. Comparaison des différentes méthodes **25**
1.5. Conclusion **26**

1.1. Cadre de l'étude

De nombreuses pièces sont actuellement produites par forgeage pour des gains en productivité et l'obtention de caractéristiques mécaniques élevées. Les forgerons souhaitent produire des pièces répondant aux exigences qui sont de plus en plus complexes et sévères, par exemple :

- réduire l'engagement matière.
- réduire les surépaisseurs (Near net shape).
- obtenir des pièces avec des caractéristiques mécaniques élevées.
- limiter les rebuts.
- etc

En raison de ces exigences, une maitrise du processus de forgeage est essentielle. *Le processus représente l'ensemble des moyens et d'activités corrélées ou interactives qui transforme des éléments d'entrée en éléments de sortie. Cet ensemble comprend tous les moyens nécessaires : moyens de production, main d'œuvre, mode opératoire, maintenance, etc. [NF EN ISO 9000].* La maitrise passe par une connaissance du processus, des phénomènes physiques et des paramètres responsables des déviations sur le produit fabriqué. Maitriser le processus consiste à être capable de connaitre les sources de déviation au niveau du produit ou de la gamme et d'éliminer, anticiper ou modifier leurs effets. *La gamme représente l'ensemble des opérations de transformation qui changent des éléments d'entrée en éléments de sortie*. Pour mettre en place la maitrise du processus de forgeage, les forgerons définissent des paramètres de contrôle, pas toujours de manière rationnelle **[Malas 1998]** et souvent appliqués au cas par cas. Par exemple, des méthodes sont appliquées pour contrôler la variation de la géométrie de la pièce **[Belur 2004]**, l'usure de l'outillage **[Kong 2002]** ou la microstructure **[He 2008]**. Plusieurs termes sont utilisés dans ce manuscrit, les définitions de ces termes peuvent être retrouvés en Annexe (Annexe C : Glossaire).

La *Fig.1.1* illustre un exemple de processus utilisé en forgeage à chaud. Ce processus est composé de 5 étapes. Chaque étape est liée à des ressources avec des conditions opératoires. Dans cette thèse les ressources représentent l'ensemble des moyens de production pouvant être utilisés dans les étapes du processus de forgeage. Le produit évolue au cours de la mise en œuvre de la gamme et il a un certain nombre de

spécifications à chaque étape. *Les spécifications peuvent être définies comme un document formulant des exigences [NF EN ISO 9000].* Elles sont généralement décrites par un objectif nominal et un domaine d'acceptation autour de cet objectif.

Pour les industriels de la forge l'enjeu est de maitriser leurs processus, même ceux qui sont déjà sous contrôle. Pour ce faire, il faut savoir déceler au plus tôt la dérive d'un processus de fabrication en forgeage. Cette dérive entraine des non-respects des spécifications sur le produit ou sur la gamme. Ce non-respect conduit, dans le meilleur des cas, à une correction de la dérive, sinon à un rebus.

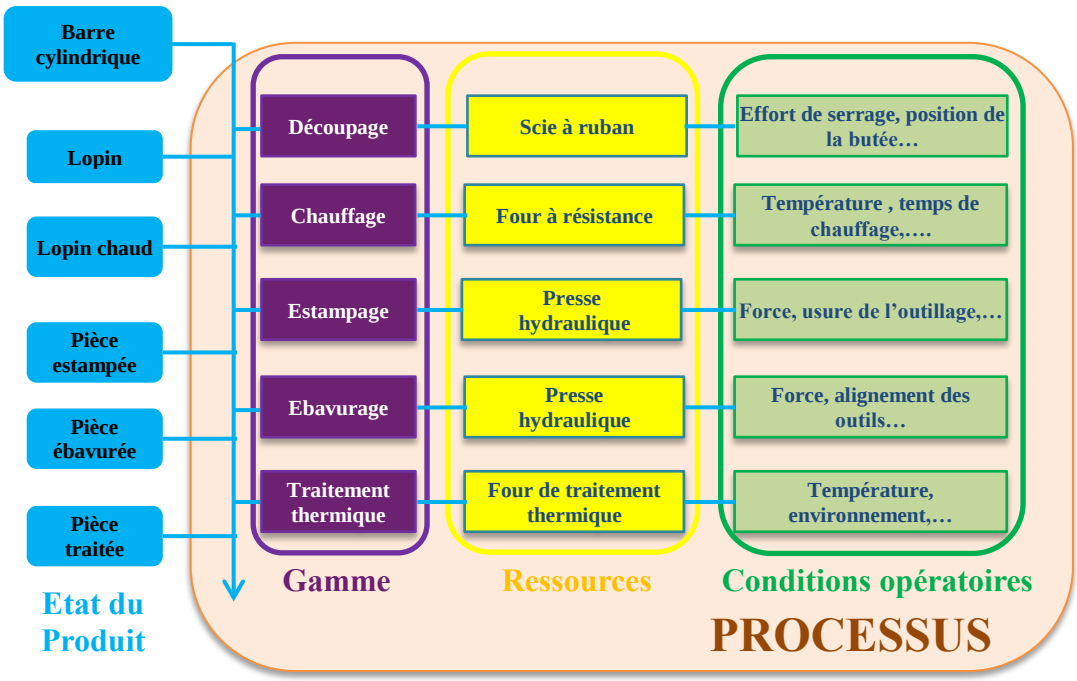


Fig.1.1 Evolution de l'état du produit au cours de l'application de la gamme de forgeage

Pour étudier les déviations au niveau des variables produit, il faut connaitre les spécifications à respecter sur le produit forgé. Une variable produit représente une mesure déterminée sur un produit réel qui est à comparer aux spécifications pour valider ou non la conformité. Par exemple, la hauteur d'une pièce forgée peut être considérée comme variable produit (Ex : $H = 12.02\text{mm}$) et la spécification peut être sous cette forme : $H = 12\text{mm}^{+0.05}_{-0.04}$. Le non-respect des spécifications sur le produit et/ou sur la gamme demande une connaissance des sources de déviations d'une variable produit. Pour ce faire, plusieurs méthodes de maitrise de la qualité sont présentées dans la littérature et utilisées par les industriels, par exemple : MSP (Maitrise Statistique des

Procédés), QFD (Développement des Fonctions de Qualité), AMDEC (Analyse des Modes de Défaillances de leurs Effets et leur Criticité), etc.

Les méthodes citées estiment que le travail de l'expert a déjà été fait en amont et que les paramètres à surveiller sont connus. Pour déterminer les paramètres à surveiller il faut connaitre les spécifications sur le produit. Il est possible de classer ces spécifications en deux catégories :

- Les spécifications explicites : représentent les propriétés voulues et mentionnées dans le cahier des charges du produit (dimensions, géométrie, taille de grain…)

- Les spécifications implicites : représentent les propriétés voulues, mais non mentionnées dans le cahier des charges, par exemple le remplissage d'une empreinte en estampage ou l'absence de replis au niveau de la pièce forgée.

Les spécifications explicites peuvent être identifiées directement au niveau du cahier des charges, par contre il est plus difficile pour les non-experts d'identifier les spécifications implicites. La première étape de la recherche bibliographique consiste à identifier les défauts spécifiques au forgeage, ces défauts sont généralement des spécifications implicites au niveau du produit. La deuxième étape consiste à identifier les phénomènes physiques à l'origine de ces défauts. Ensuite, la troisième étape consiste à lister tous les paramètres processus à contrôler pour remédier à ces problèmes. Enfin, la dernière étape consiste à donner des méthodes et des moyens de contrôle des processus de forgeage. En ce qui concerne les défauts, quatre catégories de défauts peuvent apparaitre lors d'une opération de forgeage **[Gosh 1980]**.

- Les défauts initiaux, c'est à dire dans la matière première (fissures initiales, inclusions, défauts métallurgiques….)
- Les défauts dûs aux traitements thermiques, pré ou post forgeage (durcissement de la matière, problème recuit…)
- Les défauts dûs à l'application de la gamme de forgeage
- Les défauts engendrés par les contraintes résiduelles provenant de la déformation plastique de la pièce

Les défauts étudiés sont ceux qui apparaissent pour une gamme de forgeage définie. Pour présenter les différents défauts décrits dans la littérature, un tableau a été dressé

en annexe (Annexe C : Glossaire), ce tableau liste les défauts de forgeage et leurs définitions. La relation existante entre les défauts et les paramètres contrôlables peut être décrite à l'aide d'une matrice de corrélation comme ce qu'avaient décrit Arentoft & Wanheim [**Arentoft 1995**]. La liste des défauts et des paramètres processus cités n'est pas exhaustive, des défauts peuvent être ajoutés au fur et à mesure des travaux de recherche, et peuvent être classés en fonction du procédé, des phases de fabrication, de la température de la pièce, etc. La forme de la matrice est représentée dans la *Fig.1.2* et la forme complète de la matrice est présente dans l'annexe D.

		Procédé					Produit					Ressources					Matériau			Environnement		
	Défaut \ Causes	Cause 1	Cause 2	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
Type de défaut 1	Défaut 1	●	●		---	---				---	---				---	---			---			---
	Défaut 2				---	---		●		---	---		●		---	---			---	●		---
	...				---	---			●	---	---				---	---			---			---
	...				---	---				---	---			●	---	---		●	---			---
Type de défaut 2	...			●	---	---				---	---				---	---			---			---
	...				---	---	●			---	---				---	---			---			---
	...			●	---	---				---	---		●		---	---			---			---
	...				---	---				---	---				---	---	●		---			---
...	...	●			---	---		●		---	---	●			---	---			---			---
	...	●			---	---				---	---		●		---	---			---			---
	...				---	---				---	---				---	---			---		●	---

Fig.1.2 Matrice de corrélation entre les défauts en forgeage et les paramètres processus classés en fonction des domaines d'interaction en fabrication.

Un travail d'investigation sur les défauts a été fait et synthétisé, plusieurs d'entre eux sont étudiés dans la littérature [**Arentoft 1997**] [**Cetim 2009**] [**Thevenet 1990**]. Les défauts sont énumérés et la connaissance de leur cause permet de comprendre des phénomènes physiques et des paramètres responsables de ces déviations. Une matrice de corrélation peut être mise en place pour relier les défauts aux paramètres processus et ceci en les classifiant suivant les différents domaines entrant en jeu lors de la fabrication, à savoir ; le procédé, le produit, les ressources, le matériau et l'environnement. *Le procédé représente une suite d'opérations chimiques, physiques ou biologiques nécessaires pour la transformation, le transport et le stockage de matériaux ou d'énergie [NF EN ISO 10628]*.

La *Fig.1.3* donne une classification possible des paramètres processus, existant dans le domaine de la forge, en fonction des différents domaines d'interactions. Ces domaines

d'interactions représentent les entités qui rentrent en jeu lors de l'élaboration d'une pièce forgée. Le produit représente l'état de la matière qui subit une transformation à l'entrée de chaque étape du processus de forgeage. Les paramètres liés au procédé sont tous les paramètres qui ne sont pas propres aux moyens de production et qui sont qualifiés de paramètres opératoires. L'environnement représente le milieu dans lequel les opérations de forgeage sont effectuées.

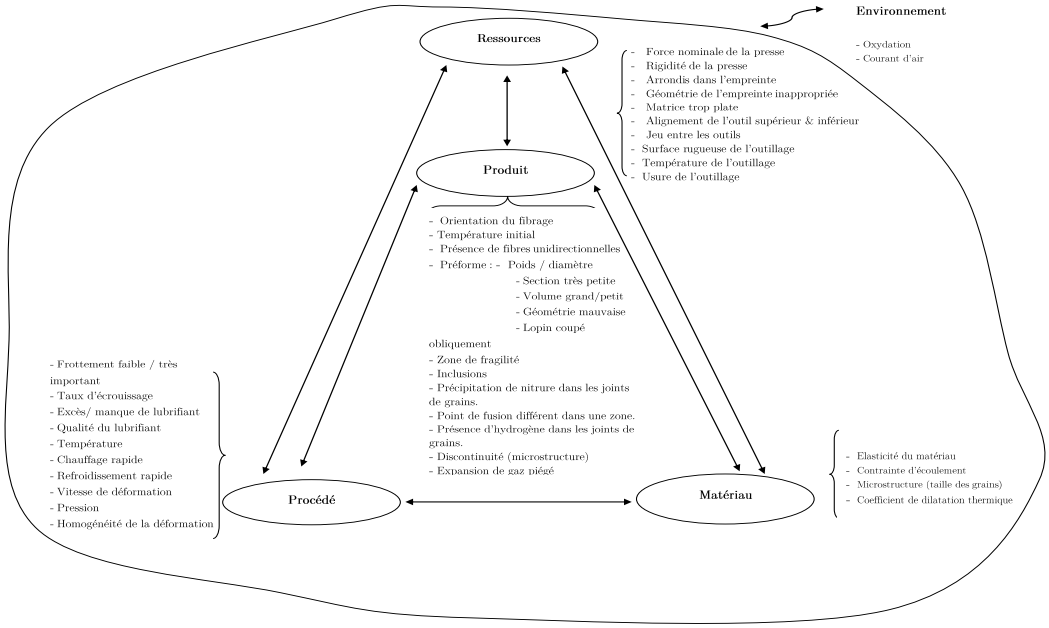


Fig.1.3 Classification de quelques paramètres processus suivant les différentes entités entrant en jeu lors de la fabrication en forgeage.

1.2. Emplacement de l'étude

Dans cette thèse, le processus, les spécifications sur le produit et la gamme de forgeage sont connus. La *Fig.1.4* représente les étapes classiques à suivre pour l'industrialisation d'une pièce. L'étude faite à travers cette thèse se situe entre l'étape (6) et (7). Le résultat de l'analyse d'un manque de maitrise du processus se porte sur la surveillance des paramètres processus. Aucune modification n'est faite au niveau du choix du procédé, des ressources ou bien sur la conception des produits.

Le travail doit se faire sur un processus connu avec des spécifications à respecter au niveau du produit ou la gamme. Les gammes de forgeage ne sont pas robustes tout le temps, leurs modifications ne sont pas proposées comme solution. Mais la solution proposée à la maitrise du processus doit pouvoir être appliquée à n'importe quelle

gamme même si elle n'est pas robuste. Le travail de modification dans le but de corriger se fait soit au niveau de l'application des paramètres opératoires soit au niveau de la mesure du processus de forgeage.

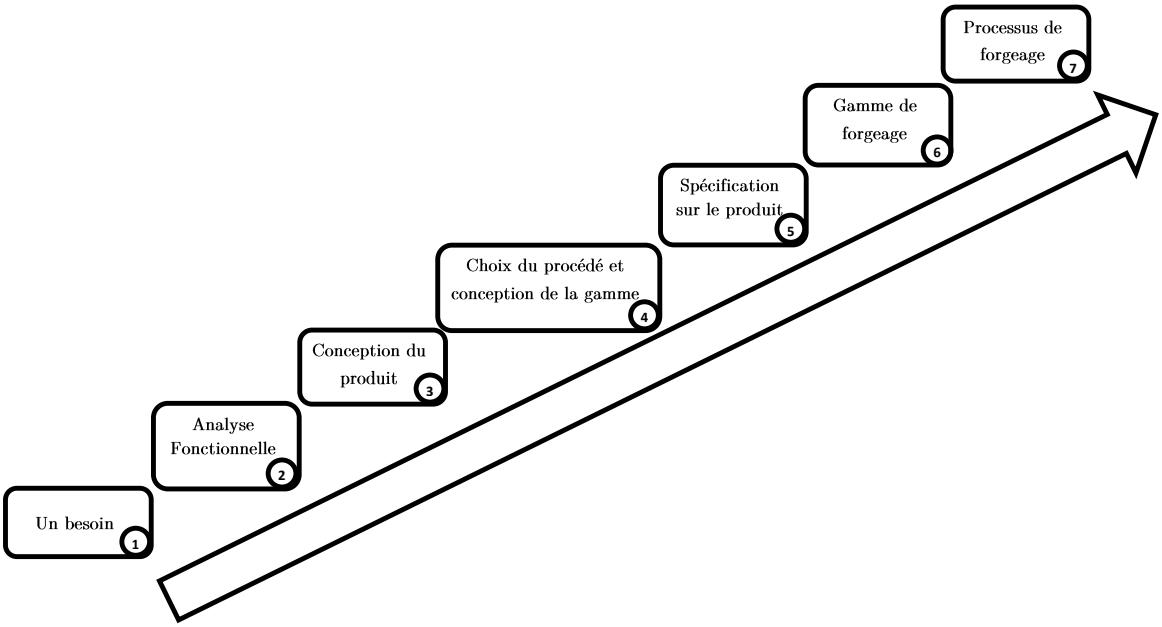


Fig.1.4 Etapes suivies pour la fabrication d'une pièce en forgeage.

1.3. Résultats des investigations bibliographiques

Les recherches bibliographiques ont comme but la détermination des différentes méthodes de maitrise des processus de fabrication et de forgeage en particulier. Par exemple, la méthode Six Sigma, l'utilisation des réseaux de neurones (ANN) ou bien la logique floue peuvent amener aux résultats recherchés. Les paragraphes qui suivent définissent ces méthodes et quelques exemples d'application. Les avantages et les inconvénients des différentes méthodes sont présentés en synthèse. Il faut noter que les avantages et les inconvénients sont expliqués par rapport à la problématique de la thèse et non pas d'une façon générale.

Pour présenter d'une façon ordonnée les différentes méthodes utilisées dans la maitrise du processus de forgeage, une méthode globale est présentée (Six Sigma). Cette dernière s'applique suivant les étapes définies au niveau de la *Fig.1.5*. Les différentes méthodes sont classées et présentées suivant les différentes étapes suivies dans la méthode Six Sigma.

1.3.1. Maitriser un processus de fabrication

La méthode Six Sigma est un concept ayant comme but l'augmentation de la performance des entreprises et leur qualité et ceci en traitant des difficultés récurrentes liées aux activités opérationnelles. La méthode Six Sigma se base sur cinq étapes qui constituent la démarche **D.M.A.I.C** (**D**efini/Définir, **M**easure/Mesurer, **A**nalyse/Analyser, **I**mprove/Améliorer, **C**ontrol/Surveiller). La *Fig.1.5* décrit l'enchainement de ces étapes [***NF ISO 13053-1***].

Define (Définir)
- Dégager tous les problèmes et les classer par ordre de priorité (diagramme Ishikawa, Pareto...)
- Délimiter le problème dans le temps et dans l'espace en utilisant le QQOQCC (Qui, Quoi, Où, Quand, Comment, Combien)

Measure (Mesurer)
- Lister tout ce qui se fait actuellement et en mesurer l'impact
- Décrire la situation actuelle à l'aide de mesures

Analyse (Analyser)
- Définir les résultats recherchés
- Identifier les causes d'origines et les solutions proposées
- Utiliser des méthodes d'analyse de mode de défaillance d'un produit / procédé (AMDEC)

Improve (Améliorer)
- Justifier et valider les différentes solutions proposées dans l'étape d'analyse
- Mettre en place un MSP (maitrise statistique du processus) afin de suivre l'évolution du processus et le surveiller en continu

Control (Surveiller)
- Comparer la situation de départ avec la situation finale et mesurer les résultats en termes de qualité, de coûts et de délais
- Formaliser les nouvelles règles de travail

*Fig.1.5 Les étapes suivies pour l'application de la méthode Six sigma [**NF ISO 13053-1**].*

Plusieurs applications de cette méthodologie sont faites dans le domaine de la forge. Par exemple, Sahoo a travaillé sur la maitrise d'un processus de martelage. Le problème à résoudre était lié aux contraintes résiduelles retrouvées sur les pièces finales [**Sahoo 2008**]. Un autre cas d'étude concerne l'application de la méthode Six Sigma dans le cas de pièces rectifiées (procédé de rectification à l'aide d'une meule), la

méthodologie est appliquée sur une seule pièce avec une gamme et un historique des défauts connus **[Gijo 2011]**.

Les deux cas d'études montrent que la mise en place d'une démarche DMAIC permet de définir d'une façon plus exhaustive le processus. Les mesures permettent d'évaluer les performances du processus et d'en identifier les paramètres de surveillance les plus importants. La phase d'analyse permet de déterminer les corrélations existantes entre les paramètres d'entrée et les défauts obtenus. La phase d'amélioration permet de déterminer des modèles définissant la variation des défauts causant le rebus en fonction des paramètres processus. Enfin, la phase de contrôle sert à assurer la durabilité des résultats en contrôlant et en corrigeant les valeurs des paramètres processus en fonction de l'état des variables surveillées, ensuite il est question de mettre en place un système de contrôle permettant de surveiller ces variables. La *Fig.1.5* représente les étapes suivies lors de l'application de la démarche DMAIC.

La démarche DMAIC peut répondre aux objectifs fixés puisqu'elle permet de maitriser un processus de production en général. Cependant, elle possède des inconvénients rendant son utilisation difficile pour les forgerons au quotidien, par exemple la première étape de la démarche demande une intervention d'un expert à chaque fois, il y a une perte de temps engagée à chaque étude de cas et il existe une indépendance entre les cas d'étude traités.

Jusque-là, il a été question de définir une méthodologie permettant de maitriser les moyens de production en forgeage, en définissant et en contrôlant les paramètres responsables des dérives du processus. Dans la démarche DMAIC, l'étape de contrôle permet de mettre en place les dispositifs nécessaires pour contrôler les variations des paramètres.

La maitrise de la qualité résout une partie du problème de la maitrise du processus, mais reste à compléter pour avoir une maitrise totale du processus. En effet pour assurer la maitrise totale il faut une connaissance des différents phénomènes physiques et des différentes influences des paramètres processus. La connaissance du processus ne peut être faite qu'à travers des expériences ou bien une connaissance métier. C'est pour cette raison qu'il est nécessaire de mettre en place des plans d'expériences ou de se référer à la connaissance métier pour arriver aux résultats escomptés. La *Fig.1.6* représente l'emplacement de quelques méthodes utilisées en maitrise du processus au

niveau de la méthode Six Sigma. Les différentes méthodes sont présentées dans les paragraphes suivant en fonction des cinq étapes.

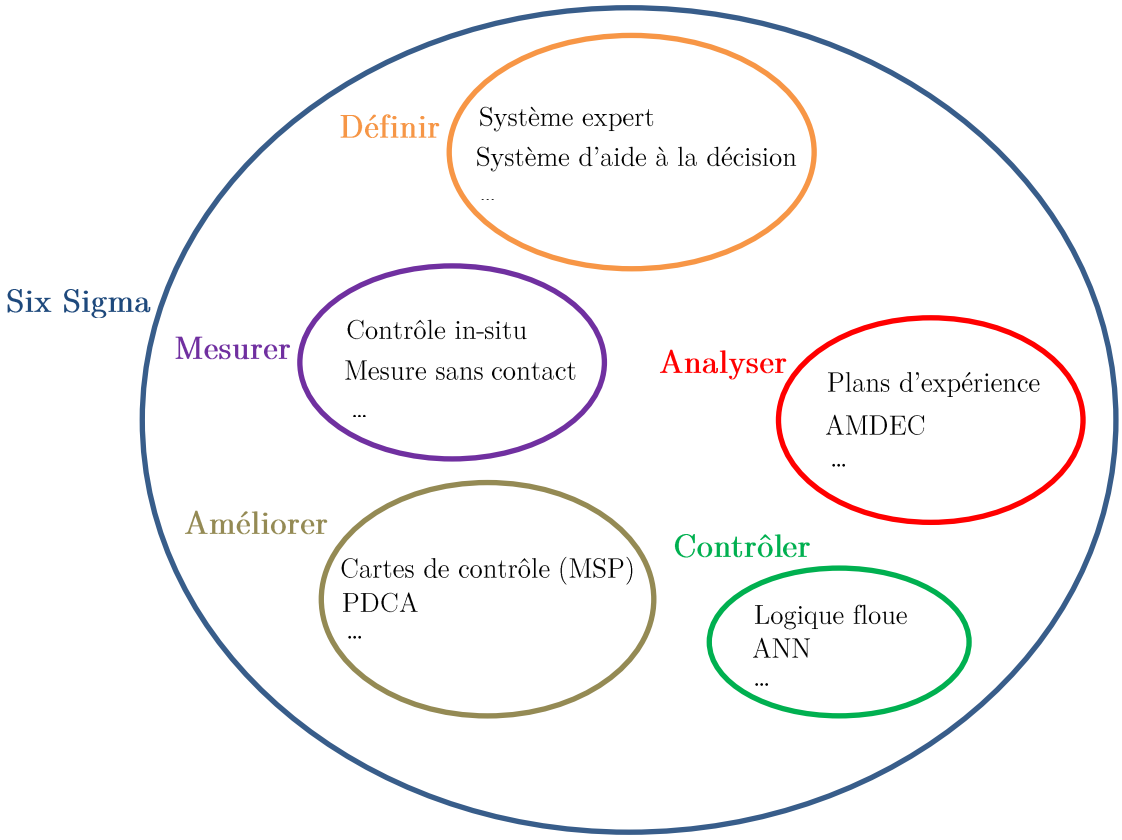


Fig.1.6 Emplacement des différentes méthodes utilisées dans la maitrise d'un processus.

1.3.2. L'identification des sources de déviations

Pour identifier les sources de déviations, plusieurs méthodes peuvent être trouvées dans la bibliographie, par exemple la fouille de données [**PhridviRaja 2014**] ou les systèmes d'aide à la décision. Mais dans cette section seul le système d'aide à la décision est décrit, puisque c'est l'outil le plus en relation avec la problématique de la thèse.

Les systèmes d'aide à la décision

Un Système d'Aide à la Décision (SAD) est un outil permettant d'assister son utilisateur dans la prise de décision. C'est un système de traitement des données permettant l'extraction de l'information de l'expert et de donner à l'utilisateur l'information nécessaire dans la prise de décision. L'utilisateur doit pouvoir accéder à

l'information sous une forme adéquate pour prendre des décisions **[Pomerol 1990] [Duvallet 2001]**.

Un SAD se compose de trois modules (*Fig.1.7*) :

- Un module de **dialogue** qui sert d'interface entre l'utilisateur, les modèles et les données. En effet, les représentations des résultats (pour l'utilisateur) et les questions posées à l'expert pour le renseignement du SAD sont gérées par cette interface.
- Un module de base de **données** permet d'enregistrer les données et de les stocker de façon permanente ou temporaire.
- Un module **modèle** qui contient l'ensemble des procédures utilisées dans les calculs des traitements de données à disposition de l'utilisateur.

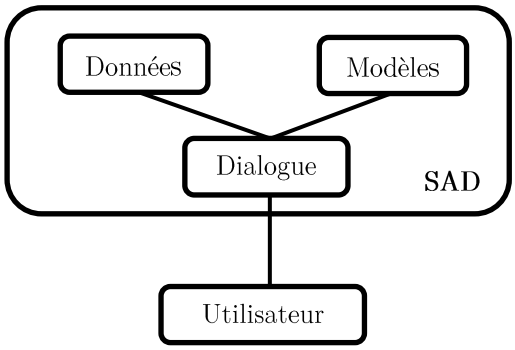


Fig.1.7. Les modules utilisés par le SAD et sa relation avec l'utilisateur ***[Sprague 1987]****.*

Les SAD permettent d'avoir une réponse instantanée en amont du processus de forgeage mais nécessite la capitalisation de connaissances. Ils ont un inconvénient majeur comparé aux autres méthodes ; ils ne permettent pas d'avoir une compréhension du processus sur lequel le travail est effectué.

1.3.3. Les mesures comme remède aux déviations

Pour éviter un non-respect des spécifications sur le produit, il est possible d'utiliser les mesures sur le produit à la fin du processus, puis d'appliquer les actions correctives. Il existe aussi le contrôle in-situ qui est intégré au processus et qui n'intervient pas à la fin du processus mais plutôt au cours de l'application de la gamme.

Contrôle *in-situ*

Il est possible d'utiliser une surveillance en ligne pour maitriser le processus, ceci en rectifiant les déviations le plus tôt possible dans la gamme. Ce type de contrôle s'appelle le contrôle *in-situ*. Par exemple les viroles de 100 à 200T, fabriquées par Creusot Forge, subissent ce type de contrôle **[Zani 2004]**. Ce sont des pièces critiques utilisées dans les réacteurs chimiques, pétrochimiques et dans des générateurs de vapeurs dans le nucléaire. Pour éviter tout défaut vers la fin du processus, deux lasers situés à une dizaine de mètres de part et d'autre de la pièce permettent de déterminer le diamètre externe et interne (*Fig.1.8*). Cette mesure permet d'obtenir un modèle 3D représentatif de l'état géométrique de la pièce en temps réel. En fonction de ces résultats, et tant que la pièce est encore suffisamment malléable, les forgerons peuvent détecter d'éventuels défauts de circularité ou d'épaisseur et les corriger.

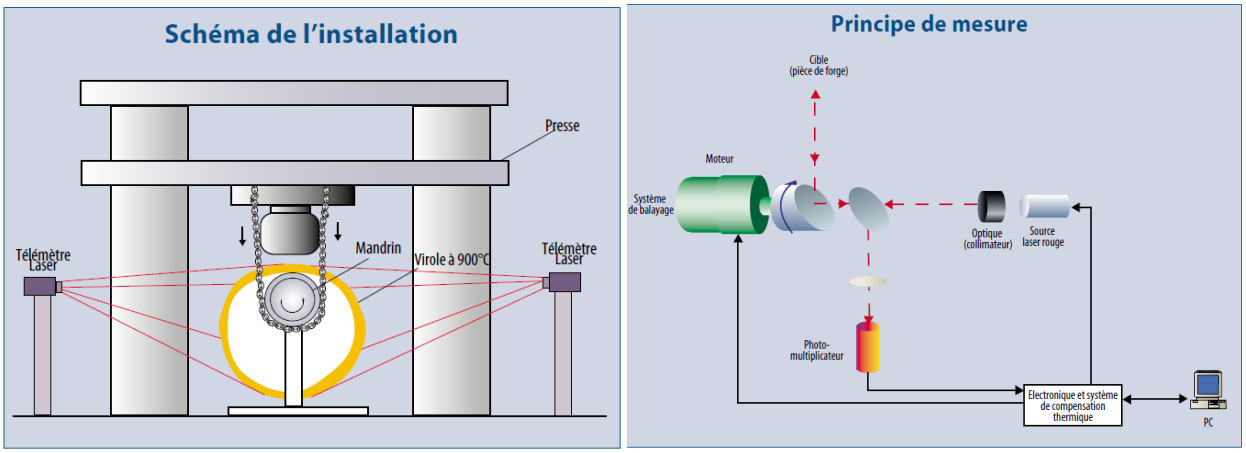


*Fig.1.8 Principe de contrôle in situ du forgeage d'une virole [**Zani 2004**].*

La *Fig.1.8* représente le dispositif mis en place et la façon avec laquelle l'information est traitée. Les télémètres sont associés à un système de balayage à deux axes (suivant l'axe de la pièce et perpendiculairement à celui-ci) permettant d'obtenir une série de sections de la pièce suivant l'axe longitudinal. Par ailleurs, le photomultiplicateur intégré aux télémètres est associé à un filtre interférentiel ne laissant passer que la longueur d'onde du laser. Le bruit dû aux rayonnements parasites est donc atténué **[Zani 2004]**.

Concernant la détection des dérives des paramètres processus, Ge et Du ont travaillé sur la détection de défauts en emboutissage. Plusieurs essais d'emboutissage ont été

réalisés en modifiant un paramètre du processus (alignement d'outil, épaisseur de la tôle…). L'acquisition du signal obtenu lors de l'application de l'effort est réalisée via des capteurs de force. La signature de l'effort est corrélée ensuite à chaque défaut en utilisant un modèle statistique [**Ge 2004**].

Dans le cas de la fonderie, par exemple, plusieurs paramètres sont difficiles à contrôler et parfois inaccessibles ; la température de la coulée, vitesse d'écoulement, etc. L'absence de contrôle de ces grandeurs ne permet pas de conclure sur la qualité de la pièce qui est conditionnée par la valeur de quelques paramètres processus [**Maijer 2009**]. Maijer, dans ses travaux, part de la problématique initiale qui est la présence de défauts sur les jantes fabriquées, le but était de déterminer les corrélations existantes entre les défauts et la température de la pièce. Pour ce faire des thermocouples ont été placés sur les surfaces supérieures et inférieures du moule. Les corrélations ont été établies entre les défauts observés sur les pièces et la température appliquée dans chaque cas. Des résultats de simulations trouvés dans la littérature ont été utilisés dans le but de réguler les paramètres [**Zhang 2007**] [**Maijer 2000**]. Les entrées du système de régulation sont la température de la coulée de l'aluminium et le temps d'ouverture du moule. Les sorties sont la température de la pièce, le temps de chauffage dans le fond du moule et le temps de chauffage dans la surface supérieure du moule [**Maijer 2009**]. Dans ce cas-là les mesurandes ont été modifiés pour mieux maitriser le processus, les mesurandes sont définis comme étant les grandeurs physiques soumises au mesurage [**Gum 2008**]

Actuellement, au niveau des procédés de forge, il est impossible de mettre des capteurs partout pour le contrôle en temps réel. Le seul contrôle dynamique appliqué en forgeage est le contrôle de la vitesse d'avance. D'autres paramètres dans le processus nécessitent eux aussi un contrôle dynamique ; par exemple la température initiale de la pièce, la température de l'outillage, les dimensions de la préforme et la géométrie de l'outillage (usure) [**Malas 1998**].

L'application d'un contrôle du processus en temps réel va permettre de gagner du temps et de l'argent. Ce type de contrôle permet de réguler la valeur des paramètres processus et donne lieu à une réduction dans le nombre total des étapes du processus, une diminution de l'usure de l'outil, une diminution de la probabilité de rupture des outils et une diminution de l'énergie utilisée.

Avant de mettre en place un contrôle *in-situ*, il est nécessaire d'utiliser les théories de modélisation, d'optimisation et de contrôle. Ensuite, il faut considérer le processus comme une entité à part entière et suivre la démarche suivante **[Malas 1998]** :

- Développer des modèles de comportement mécanique et thermomécanique de la pièce, et leurs interactions avec les outils.
- Utiliser ces modèles en les optimisant, et ceci dans le but de déterminer une séquence optimale du processus.
- Mesurer les résultats pour s'assurer que la séquence choisie optimise les valeurs des paramètres du processus et la qualité de la pièce.
- Utiliser les techniques d'intelligence artificielle (automates programmables, régulateur PID…) pour améliorer les performances en continue.

1.3.4. Analyse des sources de déviations

Les déviations des variables produit peuvent apparaitre au cours de l'application du processus. La première étape de la démarche DMAIC (Définition) permet d'identifier les sources des déviations à l'aide d'intervention d'experts et de mise en place de brainstorming (remue-méninges). Néanmoins, même si les sources de déviations sont connues, il reste à mettre en place des méthodes d'analyse pour identifier le degré d'influence de chaque source et de chaque interaction. Deux outils sont présentés dans ce paragraphe en relation avec l'analyse des sources de déviation : les plans d'expériences et l'AMDEC.

1.3.4.1. Plan d'expériences

Pour analyser les phénomènes physiques en liaison avec les déviations et leurs paramètres responsables, plusieurs articles utilisent les plans d'expériences comme outil. Cet outil peut être sous forme de simulations ou bien d'essais expérimentaux. Les plans d'expériences consistent à mettre en place des essais dans le but de voir l'influence de la variation de quelques paramètres sur une variable donnée. Les plans d'expériences permettent de déterminer d'une part l'influence des paramètres d'essais sur la réponse étudiée mais aussi les interactions existantes entre les différents paramètres.

Dans certains cas le nombre des paramètres à analyser peut demander un grand nombre d'expériences, pour remédier à ce problème, la méthode Taguchi est utilisée **[Pillet 1994]**. Cette dernière a été utilisée par quelques auteurs pour analyser les

phénomènes physiques en forgeage [**He 2008**]. Plusieurs articles utilisent les plans d'expériences, dans le but d'analyser un phénomène donné. Par exemple dans le cas de l'étude de la microstructure, He a proposé une méthodologie robuste de contrôle de paramètres dans le but d'améliorer la microstructure [**He 2008**].

Un autre exemple d'utilisation de plan d'expériences est Belur qui a analysé le processus de refroidissement pour déterminer l'effet des paramètres de refroidissement sur les dimensions finales de la pièce [**Belur 2004**]. La méthode des plans d'expériences donne des résultats facilement interprétables et qui aide l'utilisateur de la méthode dans l'explication des phénomènes intervenants. Par contre la mise en place à chaque fois d'un plan d'expériences demande du temps et un coût supplémentaire. Il faut aussi déterminer à chaque cas d'étude les paramètres à analyser, déterminés par l'expert en général, ce qui ajoute un coût supplémentaire.

1.3.4.2. AMDEC

La méthode AMDEC (Analyse des Modes de Défaillance, de leur Effets et leur Criticité), appelée aussi FMECA en anglais, est une méthode applicable à un produit, un procédé ou un projet. L'AMDEC permet d'optimiser la fiabilité en détectant des erreurs et en les prévenant. C'est une méthode préventive et inductive consistant à détecter le plus tôt possible les caractéristiques critiques d'un produit ou d'un procédé afin d'engager des actions préventives. La méthode s'applique au stade de la conception et de l'industrialisation des produits et des procédés [**Lecoz 2001**].

La méthode AMDEC est très répondue dans le domaine industriel. Cette démarche permet de connaitre les sources de déviation et de leur effet sur le processus d'une façon globale. L'inconvénient de cette méthode c'est qu'elle demande l'intervention d'experts à chaque cas d'étude et qu'elle ne propose pas une capitalisation des connaissances.

1.3.5. L'amélioration des processus en continu

Pour maitriser le processus de fabrication, en général plusieurs méthodes sont utilisées. Les cartes de contrôle sont retrouvées dans le domaine de la maitrise statistique des procédés. Ces dernières peuvent être utilisées dans l'étape de conception du produit, de la gamme ou bien lors de l'application de la gamme de fabrication.

Les méthodes de maitrise statistique des processus

La carte de contrôle est une représentation d'une variable produit observée au cours du temps, cette observation décrit la variabilité du procédé [MSP 1992]. Elle est sous la forme d'un graphique représentant des valeurs successives d'une variable prise à une fréquence déterminée en fonction de l'échantillonnage choisi. Le graphique obtenu représente les trois paramètres ci-dessous et qui sont en liaison avec la variable observée. Un exemple de graphique est représenté sur la figure.

- Les valeurs des variables
- La moyenne des valeurs des variables
- Les limites de contrôle inférieures et supérieures résultantes d'un calcul effectué à partir des valeurs relevées

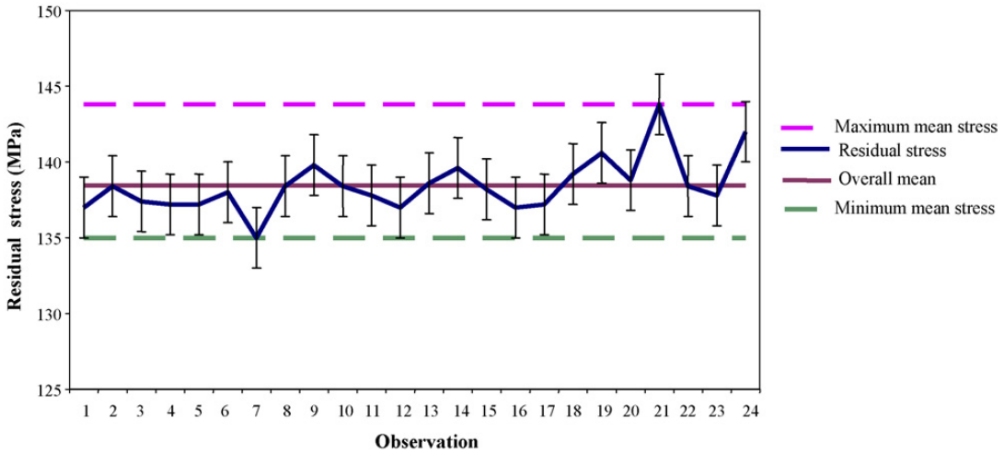


*Fig.1.9 Exemple d'une carte de contrôle utilisé par Sahoo dans le cas de la maitrise du processus de martelage [**Sahoo 2008**].*

C'est le suivi de la valeur de la variable par rapport aux limites calculées qui permet d'évaluer le fonctionnement du procédé et de déterminer le niveau de maitrise d'un procédé donné. Cette méthode permet d'avoir une image de l'état de maitrise du processus à chaque fabrication d'un lot.

Le résultat d'un travail d'investigation fait par Pillet [**Pillet 1993**] montre qu'en termes de suivi et pilotage de la production, les cartes de contrôle restent la meilleure solution à choisir. L'inconvénient majeur de cette méthode, c'est qu'elle nécessite, d'abord, de faire des mesures sur le produit à chaque fois, ce qui peut créer des problèmes surtout dans le domaine de la forge où la mesure peut être difficile à mettre en place dans un environnement avec des températures élevées, de la calamine, etc.

Ensuite effectuer un échantillonnage à chaque application de la méthode et analyser les résultats en aval par un expert pour contrôler le processus. Certains domaines, comme l'aéronautique, nécessitent un contrôle de toutes les pièces, ce contrôle peut être compliqué à mettre en place.

En usinage, une méthode courante consiste à faire des cartes de contrôle et à suivre la production en effectuant des mesures sur un échantillon de pièces fabriquées. Ces mesures doivent permettre de voir une dérive du processus. En forge, les cadences plus élevées, les formes plus complexes et les conditions plus difficiles ne permettent pas de mesurer les pièces entre deux opérations. C'est pour cette raison que l'idée de déplacer les mesurandes peut constituer une bonne solution dans le domaine de la forge.

1.3.6. Formalisation de nouvelles règles de travail

Plusieurs travaux de recherches, en relation avec le domaine de la forge, sont mis en place pour déterminer des modèles décrivant l'écoulement de la matière lors de la déformation en fonction du matériau utilisé, des paramètres opératoires, etc. Mais la compréhension et la modélisation des phénomènes physiques en forgeage n'est pas simple à mettre en place. En effet, les phénomènes rhéologiques et tribologiques interviennent à chaque fois et la variation des paramètres opératoires et leurs interactions sont difficiles à modéliser, surtout que l'état de la plupart des paramètres varie au cours du temps. La simulation numérique est un outil qui permet de donner des résultats exploitables, mais pour certains paramètres la prédiction a ses limites, ajouter à cela le fait que les temps de calcul peuvent augmenter en fonction de la précision recherchée. Plusieurs travaux sont menés sur la formalisation des règles ou de modèles phénoménologiques pour comprendre et avoir une maitrise du processus. Deux méthodes sont expliquées dans cette partie : la logique floue et les réseaux de neurones.

Dans cette thèse, le terme système d'apprentissage (SA) est employé pour désigner tout système capable d'utiliser des données d'entrées et de sortie pour pouvoir créer, adapter ou modifier les lois qui les relient. Plusieurs technologies peuvent être utilisées dans les systèmes d'apprentissage ; les réseaux de neurones, la logique floue, les algorithmes génétiques ou les systèmes experts.

Les algorithmes génétiques ont comme but d'approximer la solution à un problème en testant plusieurs solutions possibles. Si une solution ne répond pas bien à la problématique elle est éliminée, sinon elle est gardée. Ensuite, les bonnes solutions sont

mixées entre elles dans le but d'avoir des solutions optimales **[Sudesh 2002]**. Les systèmes experts utilisent des règles initiales, ces dernières vont être modifiées en fonction des résultats obtenus à chaque essai/itération. Plus les règles sont utilisées, plus elles auront des indices de confiance élevés.

1.3.6.1. La logique floue

La logique floue est utilisée dans plusieurs domaines et notamment en forgeage, elle permet de mettre en place un système d'aide dans le pilotage du processus, sans pour autant avoir une connaissance exacte des phénomènes entrant en jeu. Le professeur Zadeh était le premier à mettre en place cette modélisation, le besoin venait selon lui du fait que «il y a une incompatibilité entre la précision et la complexité. Quand la complexité d'un système augmente, notre capacité à avoir un résultat précis et non trivial concernant son comportement diminue » **[Yager 1987]**.

L'avantage de la logique floue c'est qu'elle permet l'utilisation d'affirmations qui ne peuvent être considérées ni comme vraies, ni comme fausses, mais plutôt « relativement vraies ». Dans le domaine de la forge, il est très difficile d'avoir une idée ou une prédiction exacte sur la valeur de chaque paramètre, relevant de l'environnement dans lequel se passent les opérations de forge (vibrations, bruits, grandes températures, phénomène d'oxydation…). Selon Kopp, il est très difficile de concevoir un modèle mathématique dans le cas du forgeage, parce qu'il y a une relation non linéaire entre les paramètres d'entrées et les résultats, de plus les paramètres utilisés ne sont pas stationnaires (usure de l'outillage, changement de température…). C'est pour cette raison qu'un certain nombre d'auteurs préfèrent utiliser la logique floue à la place d'outils mathématiques exacts **[Kopp 1998]**.

Dans les travaux réalisés par Kopp, le but était de maitriser un moyen de production (presse hydraulique). Les paramètres mesurés à l'aide de capteurs (entrées) et les paramètres avec lesquelles le processus est contrôlé (sorties) ont été définis. Le système étudié a comme entrées la position de l'outil supérieur et la pression dans le cylindre. Ses sorties sont le débit d'huile (pour augmenter l'effort de la presse) et le débit d'huile au réservoir (pour diminuer l'effort de la presse). Pour déterminer les paramètres de contrôle, une mesure de la position et de la pression sont prises, permettant par la méthode de la logique floue d'en déduire la vitesse et ceci en donnant

une valeur à la sortie en fonction de l'état des variables d'entrée. Le débit d'huile est ensuite déterminé et modifié en fonction de la vitesse.

En emboutissage une démarche intéressante consiste à corriger les défauts observables sur les pièces en agissant sur les paramètres processus. Les défauts sont détectés à l'aide de capteurs. Ces données sont envoyées à un système de prise de décision (basé sur la logique floue), capable d'identifier le ou les paramètres processus à modifier pour corriger le ou les défauts. La *Fig.1.10* représente le processus de contrôle/correction mis en place par Garcia **[Garcia 2005]**. Ce dernier s'est intéressé dans ses expériences à la détection de rides et de fissures. Pour les fissures, un système de rétroéclairage puissant est utilisé, avec une caméra permettant de traiter les images obtenues et une autre caméra analogique. Pour les rides, la même technique de traitement d'image est appliquée, la *Fig.1.11* décrit l'équipement expérimental utilisé.

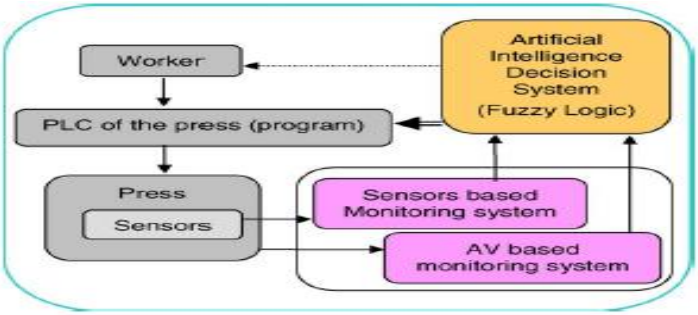


*Fig.1.10 Processus de contrôle utilisé par Garcia **[Garcia 2005]**.*

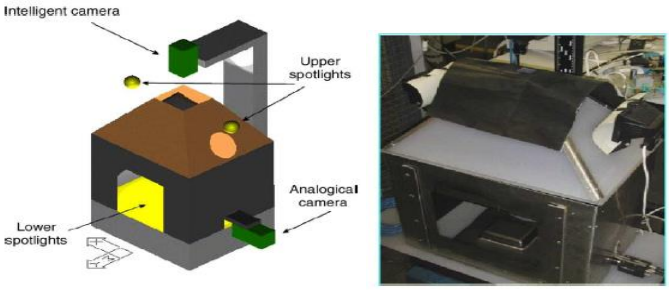


*Fig.1.11 Equipement expérimental utilisé pour la détection des rides et des fissures en emboutissage **[Garcia 2005]**.*

La logique floue est une bonne solution dans le cas du pilotage d'un système dont les phénomènes physiques mis en jeu et les interactions sont inconnus. Néanmoins, une

connaissance des paramètres à analyser est indispensable et la maitrise ne se fait qu'après la réalisation d'un certain nombre d'essais.

1.3.6.2. Les réseaux de neurones

Les réseaux de neurones (ANN) sont devenus très utilisés durant les dernières années, par exemple dans le domaine de l'analyse d'images, de la modélisation ou de la robotique. Le modèle consiste à utiliser un des couches (*Fig.1.12*) dans le but de déterminer la valeur d'une sortie. Chaque couche est composée de neurones et chaque vecteur d'entrée a un poids qui va varier en fonction de la bonne ou mauvaise modélisation de la sortie. La *Fig.1.12* représente un réseau de neurones utilisé par Ohdar et Pasha pour déterminer la densité du métal déformé, dans le cas du frittage, en fonction des variables d'entrée (pression, température, pourcentage de réduction) **[Ohdar 2000]**.

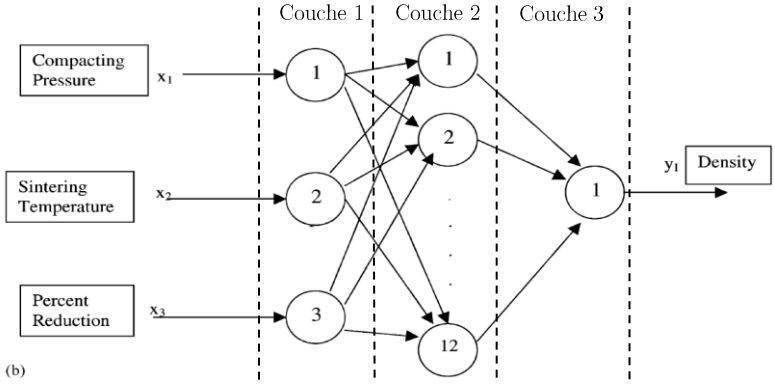


Fig.1.12 Réseau de neurones utilisant 3 couches et utilisé par Ohdar.

Kong et Nahavandi ont aussi utilisé les réseaux de neurones combinés aux éléments finis pour prédire la force et le volume du lopin initial afin de déterminer la géométrie de l'outillage et prédire les efforts engagés durant le forgeage **[Kong 2002]**. Les réseaux de neurones, tout comme la logique floue, permettant de piloter le processus de forgeage après la mise en place d'un certain nombre d'essais et n'agissent pas tous les deux en amont du processus de forgeage.

1.4. Comparaison des différentes méthodes

Pour comparer les différentes méthodes énumérées dans cette synthèse bibliographique, un tableau de comparaison est proposé (*Table.1.2*). L'évaluation des méthodes est replacée dans le contexte du sujet de thèse et à la problématique de maitrise du processus de forgeage avec ses aléas et ses contraintes :

Contraintes	✘	✔
Temps engagé	La méthode demande du temps lors de son utilisation	La méthode utilisée n'est pas chronophage
Intervention de l'expert	La méthode a besoin de l'intervention de l'expert	Il n'y a pas d'intervention de l'expert
Capitalisation	La méthode permet de capitaliser les connaissances	La méthode ne permet pas la capitalisation des connaissances
Complexité	La méthode est difficile à mettre en place et demande une certaine connaissance	La méthode est facile à utiliser
Indépendance	La méthode dépend de l'expert	La méthode est indépendante de l'expert
Compréhension Processus	La méthode aide dans la compréhension du processus	La méthode ne permet pas de comprendre le processus étudié

Table.1.1 Explication des différentes notations utilisées dans le tableau comparatif 1.2.

En termes de capitalisation des connaissances, le SAD reste la solution idéale. Par contre il ne peut pas être efficace tout seul puisqu'il a besoin à chaque fois de l'expert pour assurer le renseignement de la base de données. Les systèmes classiques de maitrise assurent la compréhension du processus mais sont très chronophages à appliquer pour chaque cas d'étude.

	Temps engagé	Intervention de l'expert	Capitalisation	Complexité	Indépendance	Compréhension Processus
Cartes de contrôle	✘	✘	✘	✔	✘	✔
AMDEC	✘	✘	✘	✔	✘	✔
Six Sigma	✘	✘	✘	✔	✘	✔
Plan d'expérience	✘	✘	✘	✔	✘	✔
Logique Floue	✘	✘	✘	✘	✔	✘
ANN	✘	✔	✘	✘	✔	✔
Contrôle *In-situ*	✔	✘	✘	✘	✘	✔
SAD	✔	✘	✔	✘	✘	✘
SA	✔	✔	✘	✔	✔	✔
SAD + SA	✘	✔	✔	✔	✔	✔

Table.1.2 Synthèse des différentes méthodes de maitrise des processus appliquées en forgeage.

1.5. Conclusion

Les recherches actuelles et les plus récentes sur la maitrise du processus de forgeage, portent sur des cas d'étude où le système de production est surveillé en utilisant les réseaux de neurones (ANN) **[Kong 2002]** **[Feng 2000]**. D'autres auteurs utilisent la logique floue, par exemple pour déterminer l'effort nécessaire à la mise en forme en fonction des paramètres opératoires **[Lee 2001]**. La démarche DMAIC est une autre méthode, intégrant les paramètres clés, utilisée pour maitriser le processus de forgeage **[Sahoo 2008]** **[Gijo 2011]**. Le contrôle *in-situ* constitue aussi une bonne solution pour remédier au problème de maitrise du processus **[Zani 2004]** **[Ge 2004]**.

Ces méthodes peuvent répondre aux objectifs fixés, puisqu'elles permettent de mettre en place à chaque fois des démarches pour maitriser le processus, mais elles ont des inconvénients rendant leur utilisation difficile pour les forgerons au quotidien, comme par exemple :

- Le choix des paramètres à surveiller et leurs modifications se fait par l'expert.
- La dépendance d'experts pour les méthodes citées qui décident des choix des paramètres lors de l'étape de définition.
- La perte de temps engagée à chaque étude de cas.
- L'indépendance des cas d'étude traités.
- L'absence de capitalisation de connaissance et de généralisation sur chaque phénomène et chaque paramètre processus à part entière.
- L'absence de liaison entre les causes de déviation et les phénomènes physiques.
- Le manque d'analyse des interactions existantes entre les paramètres.

Les inconvénients cités ci-dessus ont été déterminés après l'étude et l'analyse de l'état de l'art. Ces inconvénients orientent l'étude et permettent de fixer les verrous à lever pour aider les industriels dans la maitrise du processus de forgeage. Les verrous à lever sont cités dans les pages qui suivent.

Verrou 1 : Comment identifier les origines des déviations des variables produit en forgeage ?

Il faut trouver une solution pour remédier aux inconvénients des méthodes utilisées de nos jours dans la maitrise du processus de forgeage. Est-il possible de travailler sur d'autres mesurandes en forgeage ? Les mesurandes sont définis comme étant les grandeurs physiques soumises au mesurage [**Gum 2008**]. Mesurer toutes les pièces pour maitriser le processus sera difficile, il faut envisager de déplacer les mesurandes pour faciliter la maitrise. La signature mesurée sur le produit n'est que l'image de l'application d'un ou plusieurs paramètres processus dans une gamme donnée.

Les mesurandes classiques (*Fig.1.13)* sont remplacés pour avoir une représentation indirecte sur le produit à travers des mesurandes sur le processus de forgeage. Cela dit le mesurage n'est pas appliqué sur le produit, mais plutôt sur le processus en trouvant les liens existant entre les paramètres processus appliqués et les variables produit. En effet le mesurage sur les processus de forgeage est plus simple à mettre en place parce que ses paramètres sont plus accessibles que les grandeurs à mesurer sur le produit lui-même.

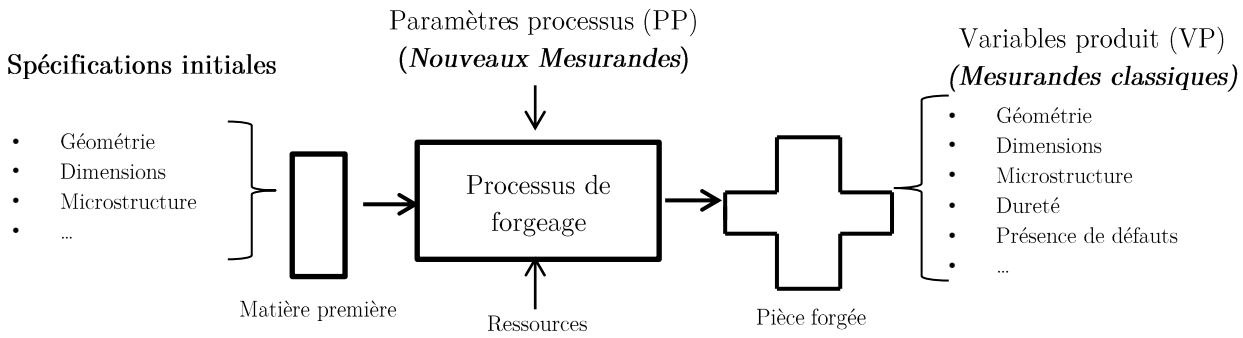


Fig.1.13 Description de l'emplacement des paramètres processus et des variables produit.

Verrou 2 : Gagner du temps dans l'analyse des problèmes relatifs aux liens déviations/paramètres réglables et diminuer l'intervention de l'expert.

Pour utiliser n'importe quelle méthode d'analyse énumérée dans l'état de l'art, il faut une phase de définition au début qui est chronophage. Les méthodes de maitrise, et surtout la phase de définition, demandent l'intervention de l'expert à chaque cas étudié. Est-t-il possible de diminuer l'intervention de ce dernier ?

Verrou 3 : Définir la non-conformité d'une pièce à une étape intermédiaire du processus et évaluer la propagation d'une déviation de variable produit.

Donner de la valeur ajoutée à une pièce qui va être considérée comme rebus est inutile. Comment éviter de donner de la valeur ajoutée à une pièce qui va être défectueuse à la fin du processus ? Est-t-il possible de déceler au plus tôt la non-conformité d'une pièce ?

Verrou 4 : Avoir un outil utilisable pour différents processus et différents moyens de production en forgeage.

Le travail sur des cas d'étude est l'un des inconvénients des méthodes utilisées dans la bibliographie. Est-t-il possible de mettre en place une méthodologie qui donne des résultats en fonction des moyens de production et processus utilisés ?

La méthodologie proposée dans cette thèse contribue à remédier aux inconvénients des méthodes énumérées et donne une solution au problème de la maitrise du processus de forgeage. La solution consiste à déterminer les paramètres clés à surveiller, via un SAD, en utilisant de la connaissance, des lois et des règles métier reliant les spécifications aux paramètres processus.

Le SAD ne peut jamais être efficace si ces lois et ces règles métier n'évoluent pas en fonction du besoin et des moyens de production, c'est pour cette raison que la mise en place d'un système d'apprentissage (SA) en aval est une condition sine qua non pour garantir une efficacité de ce système. Le SA dans ce cadre se doit d'être efficace, le choix du modèle dépend de l'utilisateur (ANN, Logique Floue, Régression…).

La mise en place du SA pour enrichir le SAD s'avère nécessaire à la compréhension du fonctionnement des moyens de production via des lois. Ces dernières permettront de prendre des décisions avant de commencer la fabrication en fonction de l'état des moyens de production. La description de chacun des deux systèmes est faite à travers le chapitre II et III, une application sur deux cas d'étude est proposée dans le chapitre IV.

Chapitre II : Méthodologie pour la maitrise du processus de forgeage

A travers l'état de l'art, les différentes méthodes de maitrise ont été présentées. Ce chapitre explique comment faire pour lever les deux premiers verrous présentés dans le premier chapitre et décrit la méthodologie générale à suivre pour maitriser le processus de forgeage. Une description détaillée est faite des systèmes utilisés, à savoir; le système d'aide à la décision et le système d'apprentissage.

Sommaire

2.1. Explication de la démarche **30**
2.2. Système d'aide à la décision **35**
2.2.1 Architecture et utilisateurs du système 36
2.2.2 Entrées du système d'aide à la décision 38
2.3. Processus de forgeage **40**
2.4. Système d'apprentissage **41**
2.4.1 Architecture du système 43
2.4.2 Pertinence de contrôle 44
2.5. Conclusion **46**

Dans le premier chapitre les différentes méthodes de maitrise du processus ont été exposées, ainsi que leurs avantages et inconvénients. Pour pouvoir remédier aux inconvénients des méthodes classiques, une méthodologie générique adaptable aux différents processus de forgeage est proposée. Cette méthodologie doit prendre en considération les différentes contraintes présentes dans le domaine du forgeage. La méthodologie consiste à mettre en place deux systèmes liés au processus de forgeage :

- Un système d'aide à la décision (SAD) en amont du processus de forgeage, ce dernier sert à déterminer les paramètres clés à surveiller, ceci dans le but d'éviter une déviation des variables produit.
- Un système d'apprentissage (SA) en aval du processus, pour garantir la flexibilité du SAD.

2.1. Explication de la démarche

Il s'est avéré à travers la recherche bibliographique que l'un des outils qui permet d'avoir un meilleur compromis pour la maitrise du processus de forgeage est le SAD. Le premier travail à faire est la mise en place d'un certain nombre d'outils qui vont aider dans la capitalisation des connaissances. Pour regrouper tous les défauts et les causes associées, un arbre de causes est proposé (*Fig.2.1*).

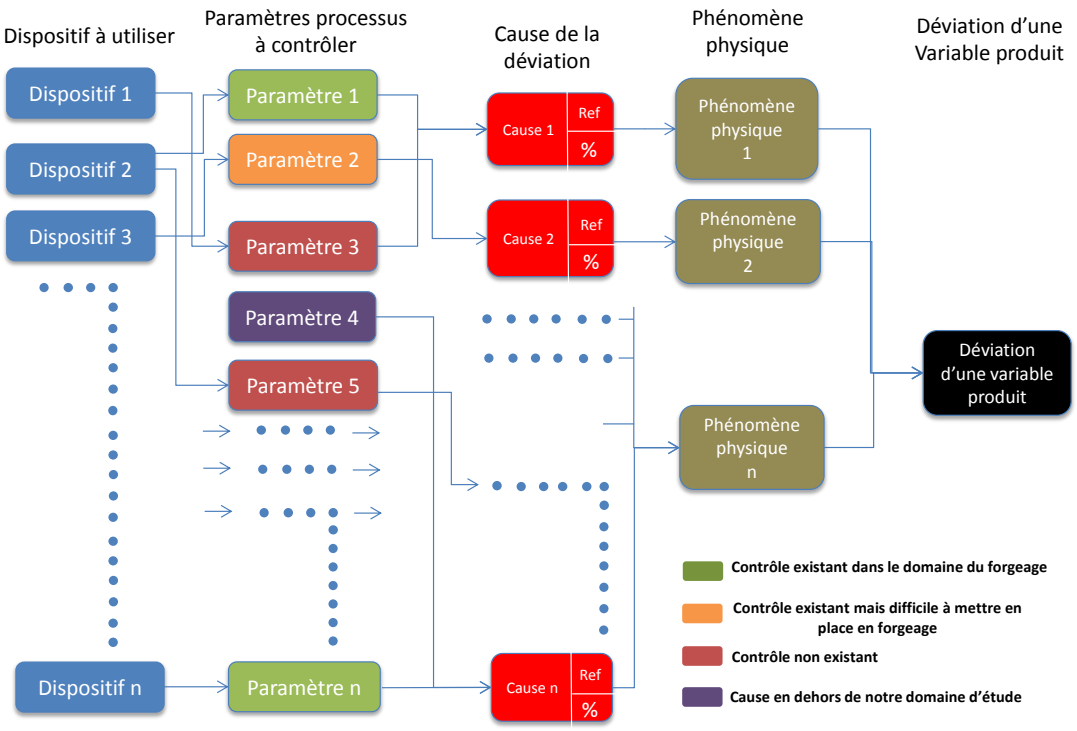


Fig.2.1 Arbre de causes/conséquences proposé pour la synthèse bibliographique.

L'arbre de causes permet de déterminer les phénomènes physiques à l'origine de chaque défaut, les causes de chaque phénomène, les paramètres processus responsable de chaque cause et les dispositifs à mettre en place pour contrôler chaque paramètre. Cette structure représente l'un des outils utilisé par le SAD. Un code couleur permet actuellement de définir qualitativement le niveau de difficulté de mise en place du système de surveillance. Cet outil consigne la traçabilité des liens établis en indiquant une probabilité sur les causes à l'origine de chaque défaut.

Par exemple, lors de l'apparition d'un défaut de remplissage sur la pièce finale (*Fig.2.2*), les phénomènes physiques pouvant être responsables sont l'écoulement de la matière, le manque de matière sur le lopin initial ou la présence d'obstacles sur l'empreinte. Chaque phénomène physique est lié à plusieurs causes, qui à leur tour sont liées à un ou plusieurs paramètres processus. Un mauvais écoulement de la matière peut provenir d'une mauvaise lubrification, cette dernière peut être corrigée soit en modifiant la quantité du lubrifiant (réguler le débit), soit en modifiant la répartition du lubrifiant sur la pièce (difficile à contrôler). Par exemple, pour un problème de positionnement de l'outillage, un contrôle de positionnement peut être mis en place à l'aide de capteurs de positions. Cependant, ce contrôle de positionnement peut s'avérer difficile en raison des vibrations mises en jeu.

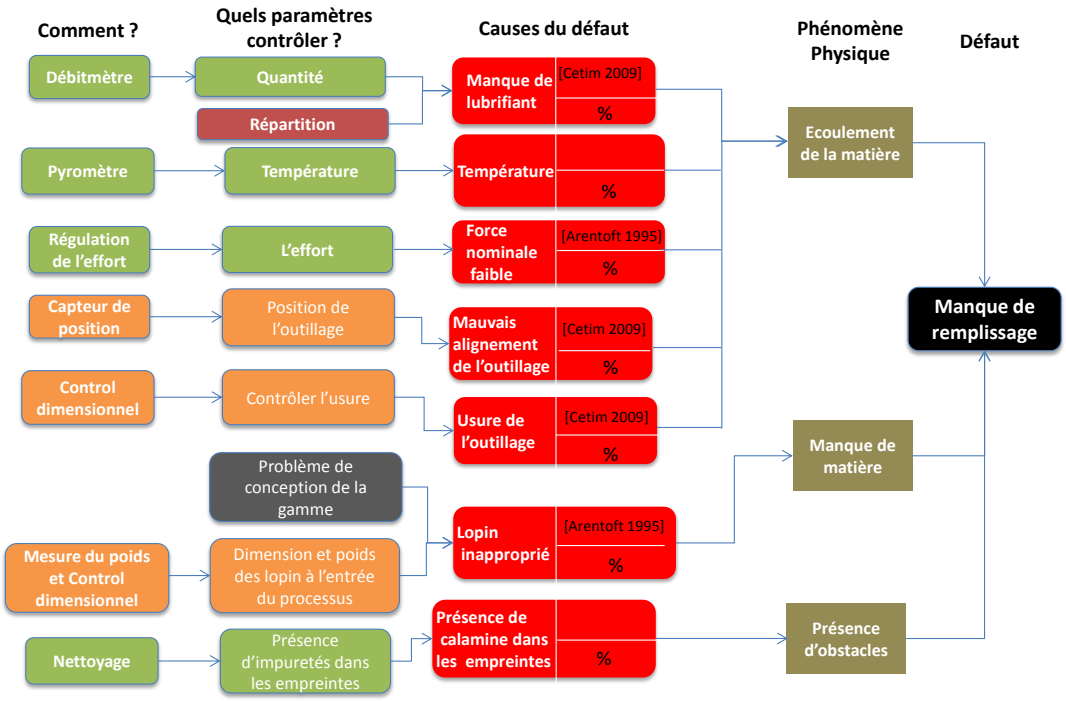


Fig.2.2 Arbre de causes/conséquences dans le cas d'un défaut de manque de remplissage.

Parfois le problème peut provenir de choix malheureux, comme par exemple une mauvaise conception de la gamme de forgeage, mais dont l'étude ne fait pas partie des objectifs de la thèse. Une réflexion plus large reste à mener au niveau du procédé de forgeage et de la topologie des pièces. Il s'agit d'établir un outil permettant d'évaluer les défauts potentiels en fonction de ces deux critères. Des exemples d'arbres de causes dans le cas d'un certain nombre de défauts sont présentés en annexe (Annexe E).

Un travail supplémentaire, mais nécessaire, consiste également à analyser les interactions entre les différents paramètres. Les interactions entre les paramètres processus sont difficiles à déterminer par l'expert. En effet, l'étude des interactions nécessite un calcul basé sur des valeurs de paramètres quantifiables. Par exemple, pour déterminer l'interaction entre le frottement et la température, il faut quantifier les deux paramètres puisque le frottement augmente lorsque la température augmente. Les paramètres clés sont déterminés de telle sorte que l'utilisateur puisse surveiller leurs valeurs.

Un cas envisageable est la variation d'autres paramètres processus en raison du contrôle d'un certain nombre de paramètres clés. Dans ce cas-là, une étude préliminaire des interactions doit être faite en aval du processus de forgeage. Les résultats de cette étude renseignent le SAD pour qu'il puisse donner les paramètres processus en interaction avec chaque paramètre clé et son pourcentage d'influence. L'interaction entre les paramètres n'est pas décrite à l'aide de l'arbre de causes mais elle peut être décrite à l'aide d'autres outils qui sont expliqués dans la phase de modélisation.

Les arbres de causes donnent les paramètres clés responsables d'une déviation de façon générale. Pour pouvoir se placer à chaque fois dans les cas étudiés, des règles métiers sont combinées à l'arbre. Les règles métiers permettent de restreindre le nombre de paramètres clés à surveiller en fonction du moyen de production utilisé, des conditions, etc. Par exemple sur la *Fig.2.2*, la cause liée à l'effort engagé peut être supprimée si le moyen utilisé est un pilon. Pour éviter les déviations les deux systèmes proposés, SAD & SA, sont mis en amont et en aval du processus de forgeage. La *Fig.2.3* représente un diagramme IDEF0 qui situe l'emplacement de ces deux systèmes, leurs entrées/sorties, etc. Les différents niveaux du IDEF0 sont représentés dans l'annexe B.

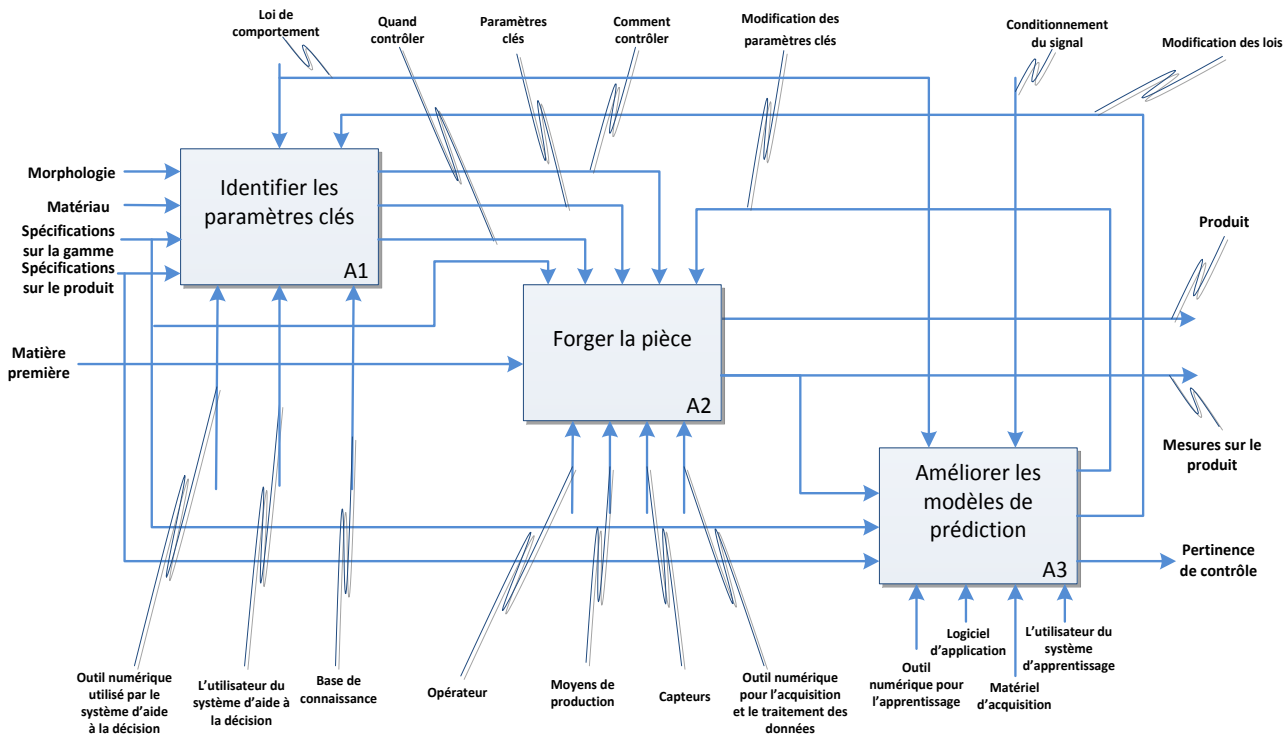


Fig.2.3 Diagramme IDEF0 représentant les différentes activités à mettre en place pour appliquer la méthodologie proposée.

Les différentes étapes à suivre pour appliquer la méthodologie sont représentées sur la *Fig.2.4* . En effet la première étape de la démarche consiste à choisir le moyen de production utilisé et la morphologie de la pièce, ce choix définit le type de lois à utiliser par la suite pour déterminer les liaisons entre les paramètres processus et les variables produit. Le terme loi veut dire, dans cette thèse, toute modélisation à base d'équations reliant les paramètres processus aux variables produit. Ensuite les spécifications sur le produit et sur la gamme sont introduites, ces dernières sont considérées comme connues.

La première étape correspondant à l'introduction de la gamme, ainsi que les informations sur le produit, ne fait pas partie du cadre d'étude. Ensuite lors de la deuxième étape, le SAD, en utilisant les règles métiers et les arbres de causes, permet de déterminer les paramètres clés à surveiller pour éviter une déviation au niveau des variables produit déterminées par l'utilisateur. La deuxième étape est constituée du processus complet suivi pour le forgeage de la pièce. La troisième étape consiste à mettre en place les moyens de mesure, afin de mettre sous contrôle les paramètres identifiés comme étant clés. La sortie de l'étape de forgeage (étape 4) n'est pas seulement le produit forgé, mais aussi les mesures des paramètres processus au cours de la fabrication et les variables produits à surveiller.

Enfin la dernière étape (étape 5) consiste à utiliser le SA pour pouvoir mettre en place des lois reliant les paramètres processus aux variables produit. Cette dernière étape va permettre le bouclage, la modification et/ou l'ajout de nouvelles lois au niveau du SAD. Ces lois sont déterminées à l'aide des différents essais effectués et des mesures faites sur le produit et le processus. La modélisation des lois est sous la forme d'une modélisation phénoménologique qui estime qu'une relation existe entre les paramètres processus mesurés et les variables produit. Le type de modélisation peut varier en fonction du besoin et du type de relation qui existe entre les variables produit et les paramètres processus. Le travail effectué dans cette thèse consiste à identifier l'emplacement des deux systèmes et leurs rôles. Ensuite l'architecture des deux systèmes est définie, ainsi que les entrées et les différents outils utilisés par chaque système. Les paragraphes qui suivent permettent de répondre aux besoins précédents. Le travail d'informatisation n'est pas pris en considération dans cette étude, néanmoins un exemple d'application accompagne chaque outil présenté.

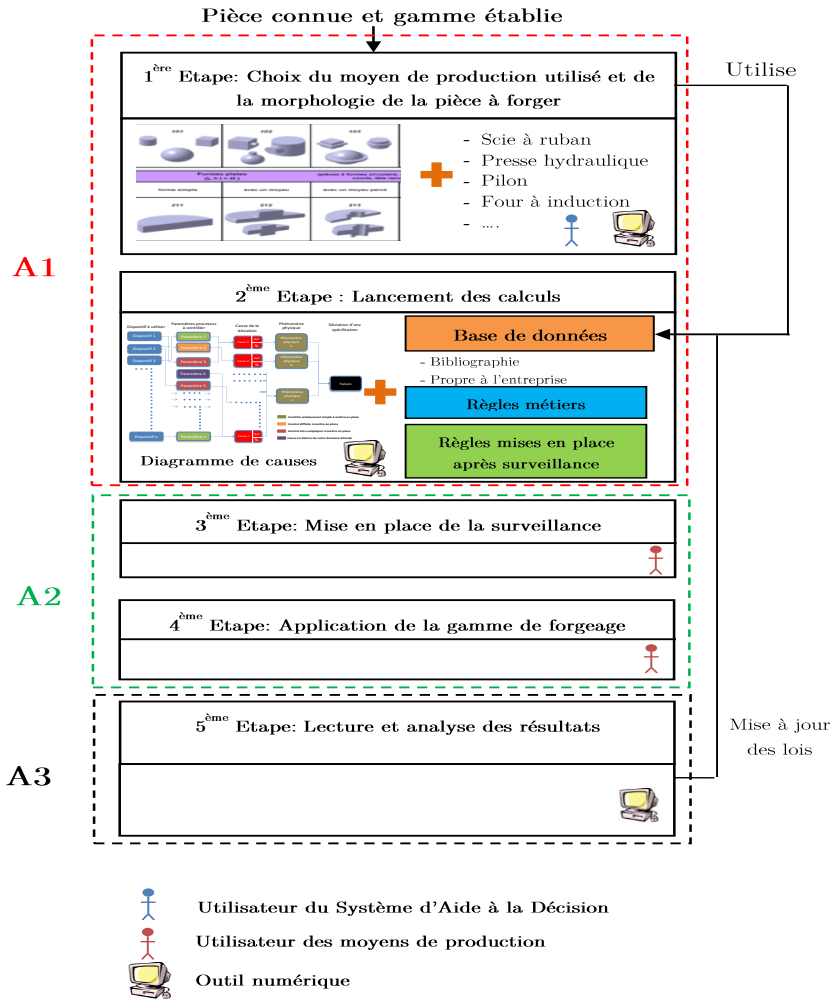


Fig.2.4 Les étapes à suivre pour maitriser le processus de forgeage.

2.2. Système d'aide à la décision

Le système en amont de la fabrication est un SAD dont les entrées sont la morphologie de la pièce, le matériau utilisé, les spécifications sur le produit et sur la gamme. La morphologie de la pièce permet de classifier les pièces forgées en fonction des familles ce qui permet d'avoir les données nécessaires pour définir les spécifications géométriques (tolérance sur les côtes, longueur de bavure…) [**NF EN 10243-1**]. En appliquant des règles métier, des lois trouvées dans la littérature ou bien des lois mises en place à l'aide du SA (A3), le système a comme sorties ; les paramètres processus à surveiller, ainsi que le dispositif de surveillance à utiliser. Ce système est contrôlé à l'aide de lois et a comme mécanisme de support la base de connaissance, l'utilisateur du système et l'outil numérique.

Les spécifications varient en fonction du besoin (exprimé par l'utilisateur) et du système sur lequel va être appliqué la méthodologie. Ce dernier doit être flexible et adaptable au processus de fabrication. La *Fig.2.5* décrit le niveau A1 du diagramme IDEF0, en effet les entrées au niveau du SAD suivent trois étapes. La première étape sert à récolter les données utilisateur et les convertir en données exploitables par le SAD. La deuxième étape consiste à appliquer les lois et les règles métiers en fonction des cas pour pouvoir transformer ces données en résultat. La dernière étape est une étape de conversion où le résultat du traitement des données est convertit en données compréhensible par l'utilisateur.

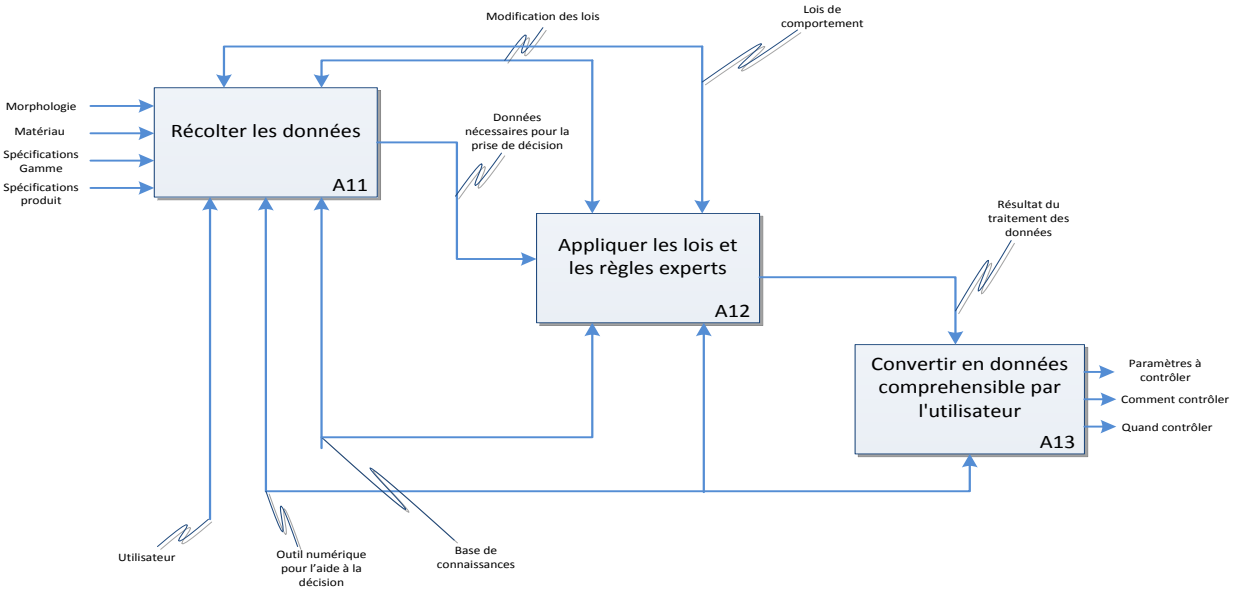


Fig.2.5 Diagramme IDEF0 représentant le niveau A1 du diagramme IDEF0 (SAD).

2.2.1 Architecture et utilisateurs du système

Du point de vue informaticien, l'architecture du SAD est décrite dans la *Fig.2.6.* le système est constitué d'un certain nombre d'entités qui sont en relation entre elles (diagramme de classe), mais aussi de règles logiques qui utilisent les données existantes dans ces entités pour pouvoir donner un résultat. L'entité représente une structure regroupant des objets qui sont définis par un certain nombre de propriétés. L'architecture initiale a déjà été définie en fonction du besoin au niveau de l'expert et de la littérature. Cette architecture peut évoluer en créant de nouvelles entités ou bien de nouvelles liaisons entre ces dernières en fonction du besoin.

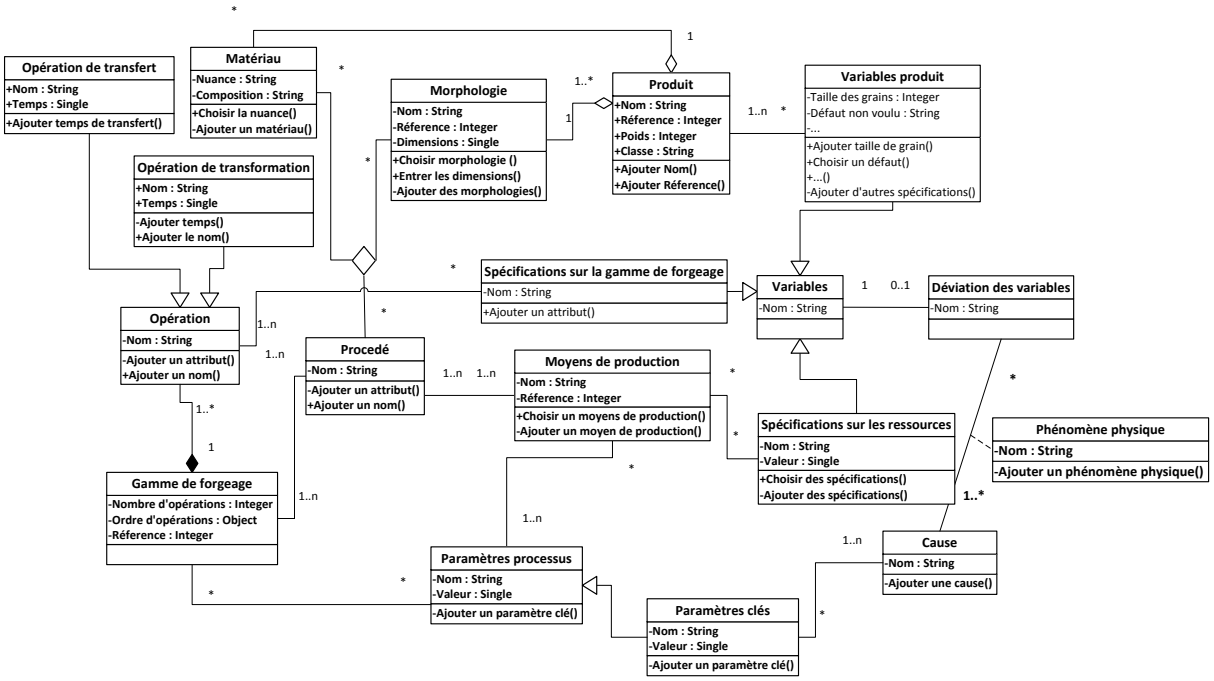


Fig.2.6 Diagramme de classe décrivant les entités en interaction dans l'activité A1.

Chaque **produit** est lié à un **matériau** et une **morphologie** et il a un certain nombre de variables produit. Il y a trois type de spécifications ; les spécifications sur le produit, sur les ressources et sur la gamme. Chaque spécification est représentée par une variable qui peut dévier. Chaque **déviation** est due à une **cause** dont la relation peut être expliquée via un **phénomène physique**. Les causes sont liées à des **paramètres processus** qui sont liés aux **moyens de production** et à la **gamme** utilisée. Chaque moyen de production est utilisé dans un **procédé** qui est déterminé en fonction de la morphologie et du matériau du produit forgé. Finalement une gamme de forgeage est constituée d'un certain nombre d'**opérations de transfert** ou bien de **transformations**.

Pour les règles, il est quasiment impossible de déterminer des lois universelles décrivant le comportement de toutes les variables produit existantes en fonction des paramètres processus. C'est pour cette raison qu'une grande partie de ces règles est renseignée par l'expert. Ce dernier peut renseigner trois outils de décision ; arbres de causes, règles métiers et lois scientifiques. Des lois empiriques sont aussi utilisées par le SAD, ces dernières sont données par le SA mais peuvent aussi être renseignées par l'expert.

Pour pouvoir rendre le SAD flexible et disposant de propriétés intrinsèques à chaque forgeron, il faut mettre en place un certain nombre d'algorithmes rendant le système modifiable par l'expert. Pour ce faire, l'expert doit pouvoir renseigner les outils d'analyse décris précédemment, à savoir ; les arbres, les règles métiers, les lois Scientifiques et Empiriques. En effet, trois acteurs agissent au niveau du SAD : l'utilisateur λ, l'expert et l'informaticien.

- **L'utilisateur λ**
  C'est l'utilisateur habituel du SAD, il connait les spécifications sur la gamme et sur le produit et la variable dont il veut éviter la déviation. Cet utilisateur emploie ce qui a été renseigné par l'expert ou bien le SA et ne change rien au niveau des entités et leur relations. Les seuls éléments intéressants pour cet utilisateur sont les paramètres clés à surveiller pour éviter une déviation.

- **L'expert**
  L'expert renseigne le SAD, en remplissant les arbres de causes et en ajoutant les règles métiers, les critères de choix des paramètres clés, les conditions et les limites d'utilisation de ces derniers.

- **L'informaticien**
  L'informaticien répond à la question comment l'expert doit introduire sa connaissance et comment l'utilisateur λ doit pouvoir introduire les données nécessaires au SAD. Il définit les entités, les relations existantes entre elles, les variables à ajouter pour permettre à l'expert de hiérarchiser les lois et le choix des paramètres clés en fonction de chaque cas.

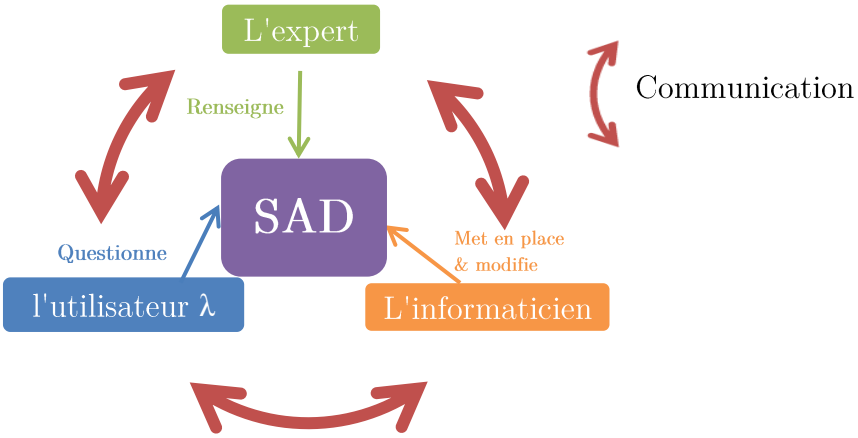


Fig.2.7 Les différents utilisateurs du SAD.

La *Fig.2.7* montre l'emplacement des trois acteurs et leurs interactions avec le SAD. Le rôle de l'informaticien consiste à mettre en place et modifier le SAD. Pour ce faire, il faut déterminer les types d'outils utilisés par le SAD et la façon avec laquelle l'expert va introduire sa connaissance. Pour pouvoir unifier le langage utilisé par le SAD et le SA, une modélisation du processus de forgeage est mise en place. Cette modélisation est expliquée au niveau du chapitre III. Les outils d'analyse servent à mettre en place des variables représentant l'état des variables produit et des paramètres processus à une étape donnée du processus.

2.2.2 Entrées du système d'aide à la décision

Un travail de classification a déjà été effectué au sein du LCFC, le travail de Thibault consistait à déterminer des familles de pièces forgées pour déterminer les gammes associées à chaque famille combinée aux moyens de production utilisés [**Thibault 2008**]. Ces mêmes familles constituent un point de départ au niveau du SAD puisque ces pièces ont des comportements semblables.

Lors de la mise en place des arbres de causes et en analysant la bibliographie et les arbres renseignés par les experts, il s'est avéré que la majorité des déviations des variables produit sont liées au phénomène d'écoulement de la matière. L'impact de ce phénomène physique varie en fonction de la **quantité de matière**, la **vitesse d'écoulement** et **l'environnement d'écoulement**. Les deux premières causes de variation peuvent être contrôlées via les paramètres processus. La troisième source de variation dépend de la température de l'outillage, du coefficient de frottement avec l'outillage et de la morphologie de l'outillage. Donc le seul paramètre fixe et non

variable dans un processus donné est la morphologie de l'outillage. C'est pour cette raison qu'il est très intéressant de classer les lois en fonction de la forme de l'outillage, ou en d'autres termes la morphologie de la pièce. La morphologie de la pièce combinée au coefficient de complexité de forme donne naissance aux catégories mentionnées dans la première étape (*Fig.2.4*). La recherche des différentes lois doit se faire en fonction des catégories. Cela permet de donner un modèle initial du SAD amélioré et complété à l'aide d'informations données par le SA en aval de la production.

En faisant des simulations sur plusieurs formes de pièces isovolumiques en estampage, il est possible de conclure que l'écoulement de la matière se fait de manière différente en fonction de la morphologie et du coefficient de complexité de forme (Formule (2.1)) **[E-10243-1]**. La *Fig.2.8* représente les différentes morphologies et le résultat au niveau de l'effort obtenu quand le coefficient de complexité de forme varie.

$$\text{Coefficient de complexité de forme (CCF)} = \frac{\text{Masse de la pièce forgée}}{\text{Masse du volume enveloppe}} \tag{2.1}$$

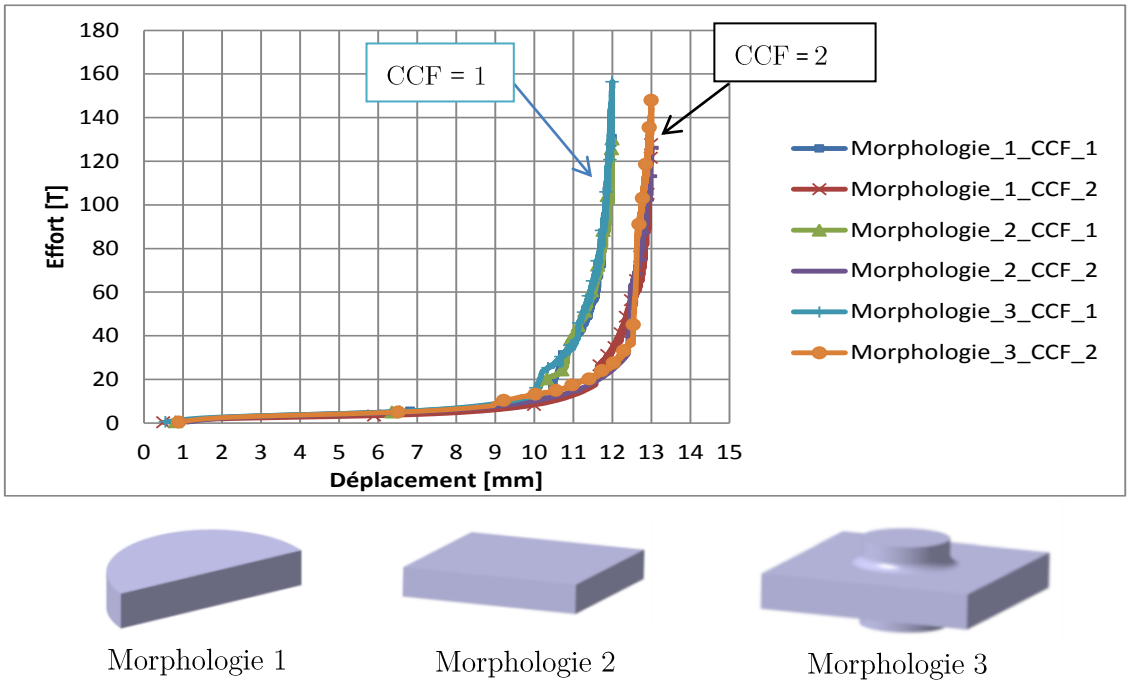


Fig.2.8 Effort obtenu dans le cas de 3 pièces de morphologies différentes et de même coefficient de complexité de forme.

La forme de la courbe évolue de manière significative en fonction de ces deux paramètres. En effet, la forme de la courbe varie quand le CCF varie, la morphologie

quant à elle fait varier l'intensité de l'effort nécessaire pour former la pièce. La morphologie de la pièce combinée au facteur de complexité de forme est un bon critère pour classifier les lois, arbres et règles utilisés pour déterminer les paramètres clés.

Pour renseigner un arbre de causes, l'expert est supposé connaître les défauts de forge ou bien les spécifications à renseigner au SAD. La première donnée à introduire est la variable produit à surveiller. Ensuite les phénomènes physiques, les paramètres processus et les moyens de surveillance sont introduits par l'expert. L'expert peut renseigner, modifier ou bien créer des arbres de causes. Chaque outil a un indice de confiance qui peut changer en fonction de sa fiabilité. L'indice de confiance est sous la forme d'un pourcentage de certitude des informations données par chaque outil. Plus l'outil est renseigné plus il est considéré comme fiable.

Par exemple sur un processus où aucune mesure n'a été faite il n'y aura pas de lois empiriques donc les arbres de causes seront plus fiables que les lois empiriques. Le pourcentage d'influence de chaque paramètre au niveau de l'arbre de causes ne peut être modifié que par l'expert. Ce pourcentage représente la probabilité qu'une cause soit responsable d'une déviation. Le pourcentage d'influence de chaque paramètre processus peut être donné d'une façon qualitative par l'expert.

2.3. Processus de forgeage

Lors de la fabrication, l'entrée du processus de forgeage est la matière première. La sortie du SAD (A1) constitue la partie contrôle du système de forgeage avec le SA (A3), il a comme mécanisme de support l'opérateur assurant l'application de la gamme en utilisant les moyens de production appropriés et les dispositifs d'évaluation pour la récupération des mesures. Le processus de forgeage a comme sortie le produit, les mesures faites sur le produit et les mesures des états des paramètres processus lors du forgeage. L'activité de forgeage suit un processus où l'état de la pièce évolue au fur et à mesure qu'elle passe par les différentes étapes du processus. Les variables produits évoluent au cours du processus en fonction des moyens de production utilisés, la déviation d'une variable produit dans une étape peut en entrainer une autre dans les étapes suivantes. En effet lors de l'étape de forgeage, ce qui est intéressant pour le SAD et le SA sont les paramètres clés à surveiller et les mesures prises après forgeage sur les paramètres processus et les variables produit surveillées.

Par exemple, si un processus d'estampage composé de 4 étapes est utilisé ; découpe, chauffage, estampage, ébavurage. Un lopin découpé lors de la première étape avec une longueur inférieure à la tolérance acceptée peut engendrer un défaut de remplissage lors de l'étape d'estampage [**Arentoft 1997**]. Chaque déviation d'une variable produit lors d'une étape peut être liée à un phénomène physique. Chaque phénomène physique est lié à un certain nombre de causes. Ces dernières permettent de faire la boucle et lier les déviations au processus, puisque chaque cause est liée à un certain nombre de paramètres processus.

La *Fig.2.9* représente la liaison existante entre le processus et l'arbre. Cette figure ressemble à l'arbre de causes illustré dans la *Fig.2.1*, la seule différence est qu'elle permet d'avoir une vision globale du processus. Elle montre que la déviation d'une variable produit à une étape donnée du processus peut avoir une influence au niveau des variables produit de l'étape suivante. Ensuite le but est de trouver la liaison entre ces déviations et les paramètres processus responsables.

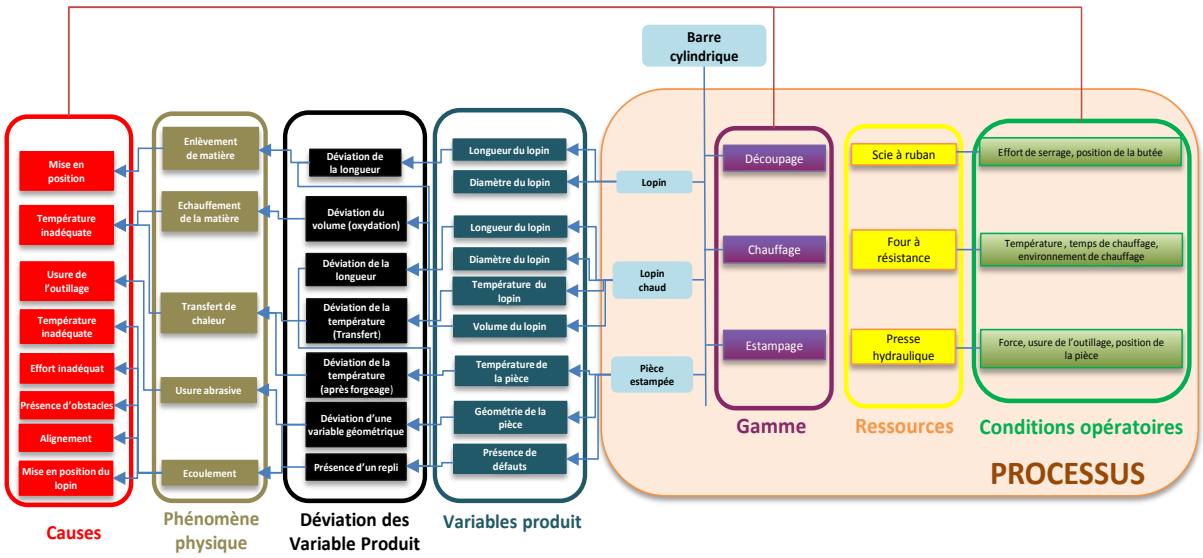


Fig.2.9 Exemple de processus de forgeage dans le cas de l'estampage.

2.4. Système d'apprentissage

Le troisième système correspond à un SA permettant de déterminer les modifications à apporter sur les lois reliant les variables produit aux paramètres processus et leurs valeurs. Ce système a comme entrées les spécifications initiales, les mesures sur les variables produit et les mesures sur l'état des paramètres processus. Il a comme support l'outil numérique et les programmes d'apprentissage (basés sur les réseaux de neurones

par exemple). Les sorties sont sous forme de modifications à apporter aux lois ou bien de nouvelles lois représentant la partie contrôle du SAD (A1). La troisième sortie est nommée «pertinence de contrôle», elle est sous la forme d'un pourcentage qui donne la probabilité d'avoir une variable produit dans un intervalle en fonction des variations des paramètres processus. La méthodologie suppose que les variables produit surveillées sont quantifiables, ce qui n'est pas toujours vrai. Par exemple, dans le cas d'un défaut de repli ou d'une forme de microstructure, il est très difficile de lier des paramètres quantifiables à ces variables produit. Dans ce cas la variable produit peut prendre deux valeurs : 1 si le critère est respecté et 0 sinon. La logique floue peut aussi être utilisée si la valeur de la variable produit dépend de plusieurs observations et qu'elle a plusieurs états de sortie.

La partie liée au SA doit permettre à l'utilisateur de choisir un type de modélisation (ANN, Logique floue, modélisation polynomiale, etc) pour la détermination des liaisons paramètres processus/variables produit. La *Fig.2.10* montre les étapes suivies au niveau du SA ; la première étape consiste à convertir les données, ensuite à appliquer une méthode de modélisation et de mesure de corrélation pour d'une part déterminer les paramètres clés et d'autre part les modèles reliant ces derniers aux variables produit. La dernière étape consiste à utiliser le modèle pour déterminer la pertinence de contrôle expliquée au paragraphe *2.4.2*.

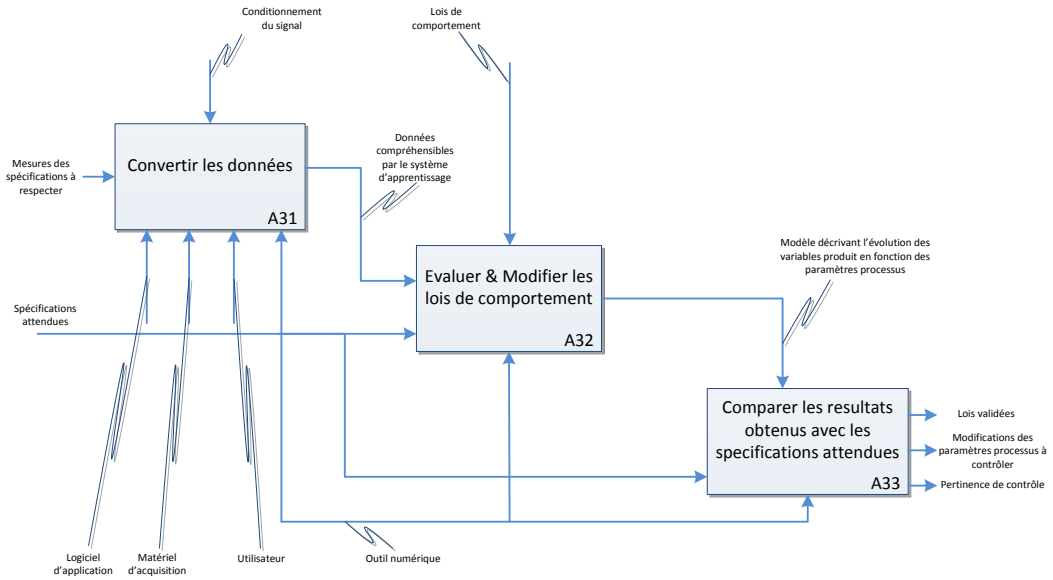


Fig.2.10 Diagramme IDEF0 représentant le niveau A3 du diagramme IDEF0 (SA).

2.4.1 Architecture du système d'apprentissage

La *Fig.2.11* représente les étapes à suivre au niveau du SA. En effet les valeurs des variables produits et des paramètres processus à chaque application de la gamme sont utilisées pour déterminer les interactions entre les paramètres d'une part et l'influence de chaque paramètre processus sur les variables produit étudiées d'autre part. Le calcul de corrélation est l'outil utilisé dans ce cas là pour évaluer l'interaction et l'influence. Ensuite les valeurs des paramètres et des variables sont utilisées pour déterminer des modèles phénoménologiques décrivant l'évolution de chaque variable produit en fonction des paramètres processus.

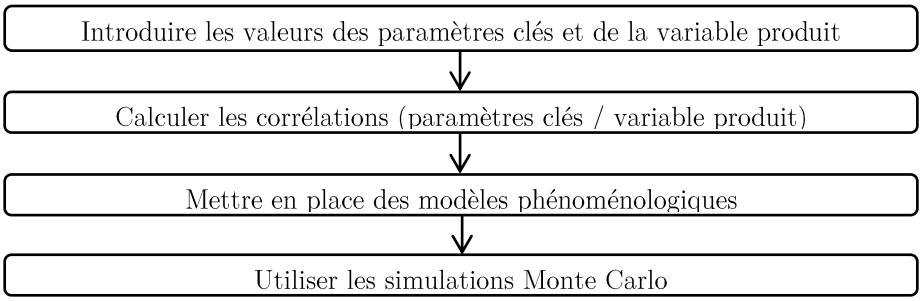


Fig.2.11 Les étapes suivies par le SA.

Différentes modélisations phénoménologiques peuvent être mises en place : ANN, modèle polynomiale, modèle de puissance, etc. La méthode Monte Carlo suppose que le modèle utilisé pour décrire la variable produit est représentatif. Si l'erreur sur le modèle est importante, le résultat au niveau de la pertinence de la surveillance peut être erroné.

Pour pouvoir déterminer les coefficients de la modélisation, plusieurs méthodes de résolution de système d'équations existent ; Moindre carrées, Simplexe, Gauss, etc. L'erreur au niveau du modèle n'est calculée que dans le même domaine, donc ce modèle n'est pas nécessairement valable s'il est utilisé dans un autre domaine. Dans toutes les modélisations, l'intervalle de variation des paramètres processus est identifié au début, certes le modèle peut donner une erreur importante au-delà de cet intervalle, mais dans le cadre de cette étude, seul le comportement dans cet intervalle est étudié. Plus les lois donnent des résultats proches de la réalité, plus le SA est représentatif et aide à la maitrise du processus de forgeage [**Rallo 2002**] [**Ohdar 2003**].

2.4.2 Pertinence de contrôle

La méthodologie générique propose de déterminer les paramètres clés à surveiller pour éviter une déviation au niveau du produit. Le SA s'ajoute en aval du processus de forgeage pour s'adapter aux cas traités et pouvoir créer des modèles décrivant la variation des variables produit en fonction des paramètres processus. Mais on peut s'interroger sur l'intérêt de surveiller une variable produit si elle ne va pas dévier.

Pour répondre à cette question, il faut se placer dans un cas où les intervalles de variation des paramètres processus sont connus. Le principe de la méthode de propagation des incertitudes est utilisé pour répondre à cette question. Cette méthode est utilisée dans le domaine de la métrologie et permet de calculer les incertitudes sur une grandeur calculée à l'aide d'autres grandeurs mesurées. Cette dernière peut être appliquée à l'aide de la méthode Monte Carlo **[Gum 2008]**. Cette méthode (Méthode MC) consiste à mettre en place un certain nombre de simulations pour estimer la distribution d'un modèle suivant la variation des entrées. La méthode consiste à estimer des intégrales $I = \int_{R^D} g(x)dx$ dans $\mathbb{R}^D$ par des sommes de la forme $S_n = \sum_{n=1}^{N} \frac{g(x_n)}{N}$ où D représente la dimension de l'espace et les x_i des vecteurs pseudos aléatoires indépendants et uniformément distribués dans $\mathbb{R}^D$ **[Kalos 1986]**. L'explication détaillée de la méthode MC est faite au niveau de l'annexe (Annexe G).

Les essais appliqués aux simulations numériques ou bien au niveau expérimental montrent que la variation des paramètres clés, identifiés par le SAD, donnent une variation de la variable produit observée. Ensuite, il est question d'utiliser un certain nombre d'essais, avec une gamme nominale fixe, pour déterminer des modèles phénoménologique décrivant la variation de la variable observée en fonction des paramètres clés. La méthode utilisée est la régression linéaire avec une modélisation en puissance. Les résultats ont démontré que l'erreur obtenue au niveau du modèle ne dépasse pas 10% ce qui est acceptable. Cette erreur va diminuer en fonction du nombre d'essais pris en considération.

La mise en place des simulations Monte Carlo est également essentielle dans la compréhension du processus de fabrication. Ces dernières permet de donner une probabilité de variation de la variable produit dans un intervalle donné, ce qui aide dans la détermination de l'utilité de la surveillance et la mise en place des moyens de mesure dans chaque cas.

Malheureusement cette étape de la méthodologie est liée au modèle déterminé par le SA ou bien fourni par le SAD. En effet, le modèle utilisé est basé sur les résultats expérimentaux. Ceci rend le résultat des simulations Monte Carlo discutable si l'erreur au niveau du modèle est assez importante, puisque la méthode se base sur les résultats donnés par un modèle pour calculer la valeur d'une variable produit en fonction de la variation des paramètres clés dans un intervalle. La *Fig.2.12* illustre les étapes à suivre pour déterminer la pertinence de contrôle.

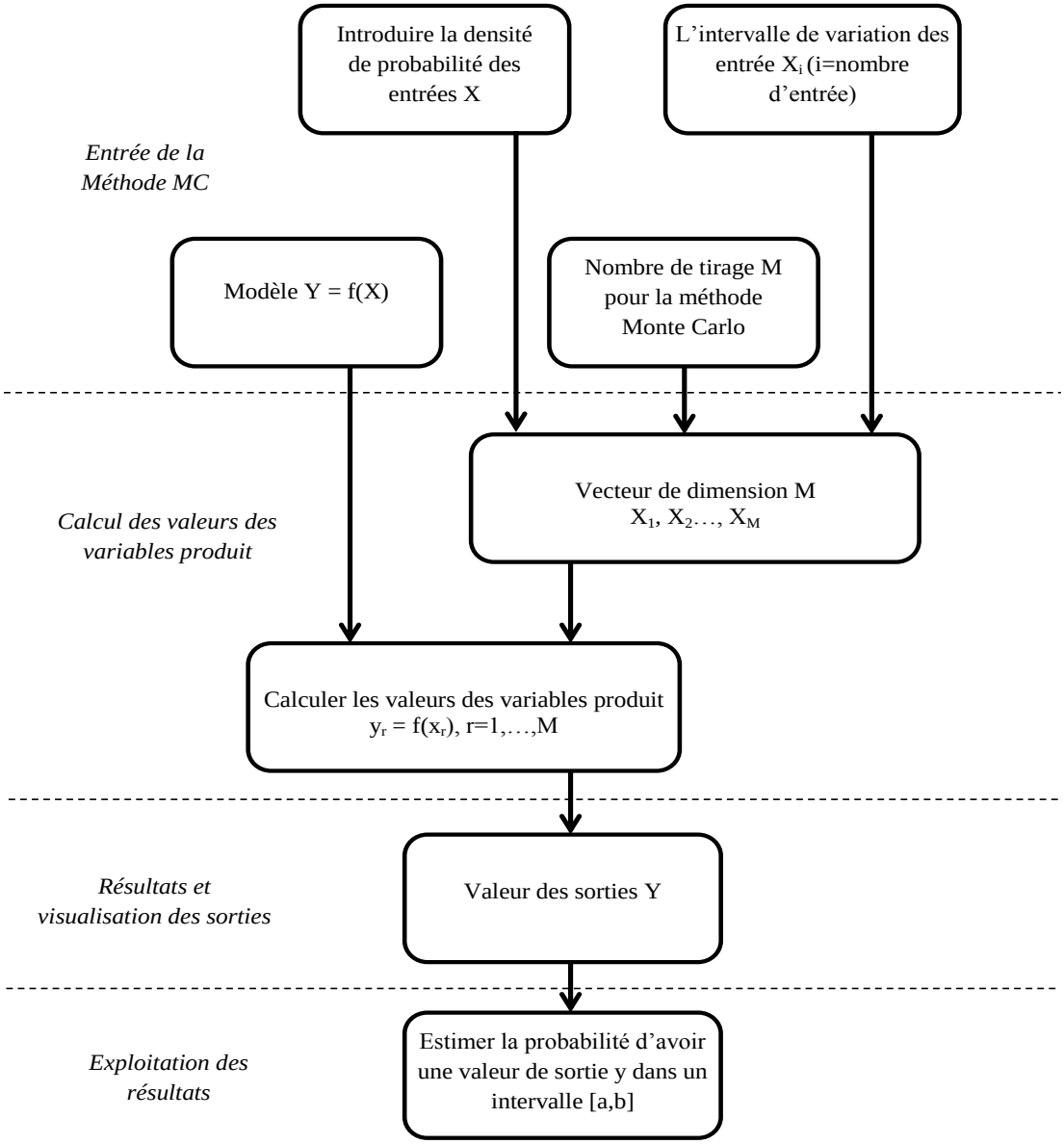


*Fig.2.12 Le résumé des étapes à suivre pour évaluer la pertinence de la surveillance en utilisant la méthode Monte Carlo (Méthode MC) [**Gum 2008**].*

Les quatres étapes suivies sont définies ci-dessous :

- **Entrées de la méthode MC** : cette étape consiste à définir l'intervalle de variation des paramètres processus, la densité de probabilité des paramètres processus, le modèle reliant les paramètres processus à la variable produit et le nombre de tirages.

- **Calcul des valeurs de la variable produit** : Cette étape consiste à utiliser le modèle et le nombre de tirages pour donner M sorties.

- **Résultats et visualtion des sorties** : Obtentions des M valeurs de la variable produit en variant les paramètres processus dans differents intervalles.

- **Exploitation des résultats** : Calcul de la probabilité d'avoir la valeur de la variable produit dans un intervalle [a,b] en calculant le rapport entre le nombre de points dans cet intervalle et le nombre total de tirages.

La pertinence de contrôle est importante à prendre en considération pour déterminer l'utilité de surveillance des variables produit. Les autres sorties du SA sont essentielles à la compréhension du processus et au renseignement du SAD.

2.5. Conclusion

La méthodologie proposée donne une solution au problème de la maitrise du processus de forgeage. La solution consiste à déterminer les paramètres clés à surveiller, via un SAD, utilisant des lois et des règles métier reliant les spécifications aux paramètres processus. Le SAD permet de déterminer les paramètres clés et de capitaliser les connaissances et les règles métiers dont dispose l'expert. Le SAD ne peut jamais être efficace si ces lois et ces règles métier ne changent pas en fonction du besoin et des moyens de production, c'est pour cette raison que la mise en place d'un SA en aval est une condition sine qua non pour l'efficacité de ce système.

Le SA modifie ou crée de nouvelles lois. Ces dernières sont déterminées en fonction des mesures faites sur l'état des paramètres processus choisis au cours de la fabrication, des mesures sur le produit et des spécifications attendues. La mise en place d'un tel système pour enrichir le SAD s'avère nécessaire à la compréhension du fonctionnement des moyens de production via des lois. Ces dernières doivent permettre de prendre des

décisions avant de commencer la fabrication en fonction de l'état des moyens de production.

Le travail réalisé porte sur le fait que les corrélations, directes ou indirectes, entre les paramètres processus et les variables produits peuvent être déterminées via une analyse des phénomènes physiques. Les interactions entre les paramètres doivent aussi être prises en considération, par exemple la température de la pièce ou la lubrification, qui sont des paramètres processus, peuvent avoir des interactions entre elles. La hiérarchisation de l'effet des paramètres processus sur les variables produit doit aussi être déterminée. Enfin, les verrous définis dans le chapitre I peuvent être levés comme suit :

Verrou 1 : ***Comment identifier les origines des déviations des variables produit en forgeage ?***

Un processus existant de forgeage suppose que la gamme, les spécifications et les étapes du processus sont fixes. Pour maitriser ce type de processus, il est possible d'utiliser les outils de maitrise de qualité (SPC, AMDEC, 6 Sigma…) mais l'analyse de ces types de solutions montre qu'ils ont un certain nombre d'inconvénients à savoir :

- La dépendance de ces méthodes des experts décidant des choix des paramètres lors de l'étape de définition.
- La perte de temps engagée à chaque étude de cas.
- L'indépendance des cas d'études traités

Il est également possible d'utiliser les modélisations avec la logique floue ou les réseaux de neurones ou bien les plans d'expériences, mais ces types de solutions ont un inconvénient majeur résidant dans le fait que chaque cas d'étude est traité à part entière et a besoin d'une implication très importante de l'expert durant toutes les étapes. C'est pour cette raison que la mise en place d'un SAD en amont du processus de forgeage constitue un bon compromis entre ces différentes solutions. Ce système va permettre d'identifier les paramètres clés à surveiller pour éviter une déviation du processus, cela dit les mesurandes ne seront plus liés au produit mais plutôt aux paramètres processus. La flexibilité et l'adaptabilité du SAD au processus de forgeage sont assurées par le SA mis en place en aval du processus de fabrication.

Verrou 2 : Gagner du temps dans l'analyse des problèmes liés aux liaisons déviations/Paramètres réglables et diminuer l'intervention de l'expert.

Le temps engagé à chaque fois avec les méthodes classiques est soit lié à l'intervention de l'expert, soit à la complexité de la méthode. La capitalisation de la connaissance permet d'alimenter le SAD et d'avoir de moins en moins besoin de l'intervention de l'expert. Ensuite, la mise en place d'une architecture décrivant les interactions entre les entités au niveau du SAD va permettre de prendre la décision d'une façon simple et sans perte de temps.

La capitalisation des connaissances est absente dans les différents outils présentés dans l'état de l'art. Le SAD va permettre de capitaliser les connaissances et de créer le lien entre les différents cas étudiés, puisque chaque cas est introduit dans le SAD suivant une architecture constituée d'entités. Chaque entité est composée d'un certain nombre de catégories qui vont être réutilisées si un cas similaire est traité par la suite.

Chapitre III : Modélisation du processus de forgeage et application de la méthodologie

La méthodologie générale a été expliquée à travers le chapitre II, ce nouveau chapitre décrit la modélisation utilisée par le système d'aide à la décision et le système d'apprentissage. Une représentation à l'aide de paramètres de modélisation est faite, cette modélisation permet de faire le lien entre les entrées et sorties au niveau du SAD, du processus de forgeage et du système d'apprentissage. L'application de la méthodologie est faite à l'aide des outils représentés dans le chapitre II.

Sommaire

3.1. Modélisation du système d'aide à la décision 50
3.1.1 Principe général 50
3.1.2 Exemple d'utilisation des outils au niveau du SAD 54
3.1.2.1 Utilisation d'une loi 54
3.1.2.2 Utilisation d'un arbre de causes 54
3.2. Modélisation du système d'apprentissage 58
3.2.1. Principe général 58
3.2.1. Exemple d'application 61
3.3. Conclusion 63

Le système d'aide à la décision et le système d'apprentissage utilisent un certain nombre d'outils expliqués dans le chapitre précédent. Pour que ces deux systèmes puissent avoir la même vision du processus, il est important d'utiliser une modélisation unifiée du processus de forgeage. La modélisation utilisée dans les deux cas est basée sur des paramètres de modélisation avec des valeurs qui sont soit renseignées par l'utilisateur, soit renseignées directement par le système d'apprentissage. L'utilisation de cette modélisation n'est pas obligatoire mais sert de repère pour les deux systèmes. La modélisation des deux systèmes est présentée avec leurs applications.

Pour pouvoir maitriser le processus, il faut déterminer les paramètres clés à mettre sous surveillance pour éviter une déviation au niveau du produit forgé. Ces paramètres clés sont choisis parmi les différents paramètres processus appliqués au niveau de la gamme. Il est nécessaire d'avoir une idée sur l'intervention de chaque paramètre processus et de son influence sur les variables produit, ainsi que l'influence de l'état du produit au cours du processus. La modélisation des paramètres processus et des variables produit à travers des variables aide dans la maitrise et la compréhension du processus.

3.1. Modélisation du système d'aide à la décision

3.1.1 Principe général

Pour que le système d'aide à la décision et les autres systèmes puissent avoir le même langage et interagissent entre eux, il faut modéliser les différents paramètres avec lesquels se fait l'analyse du processus. La *Fig.3.1* représente ces différentes variables dans un processus (**P**) avec **n** étapes. Le processus de forgeage **P** est constitué d'un certain nombre d'étapes allant de **1** à **n** et soit **S** l'état d'une variable produit à une étape donnée. Chaque variable produit est reliée à une étape du processus et il existe **m** paramètres, au moins **1** paramètre et au maximum **m**. S_{ij} représente la valeur d'une variable produit j à la sortie de l'étape i du processus / $i \in [0, n]$ & $j \in [1, m]$.

Une variable produit est déterminée au début de chaque étape et elle peut exister uniquement dans cette étape ou se poursuivre ou se modifier dans une étape suivante. P_{tk} représente la valeur du paramètre processus **k** utilisé à l'étape **i** / $t \in [1, n]$ & $k \in [1, z]$. Une variable produit à une étape **i** du processus est le résultat de la variation d'une variable produit à l'étape **i-1**, ceci à l'aide de l'application d'au moins un paramètre processus. Une variation d'une variable produit à une étape **i** du processus

peut affecter la variation d'une autre variable produit à l'étape **i+1**. Cette variation est reliée aux paramètres processus appliqués et à l'état des variables produit à l'étape **i-1**.

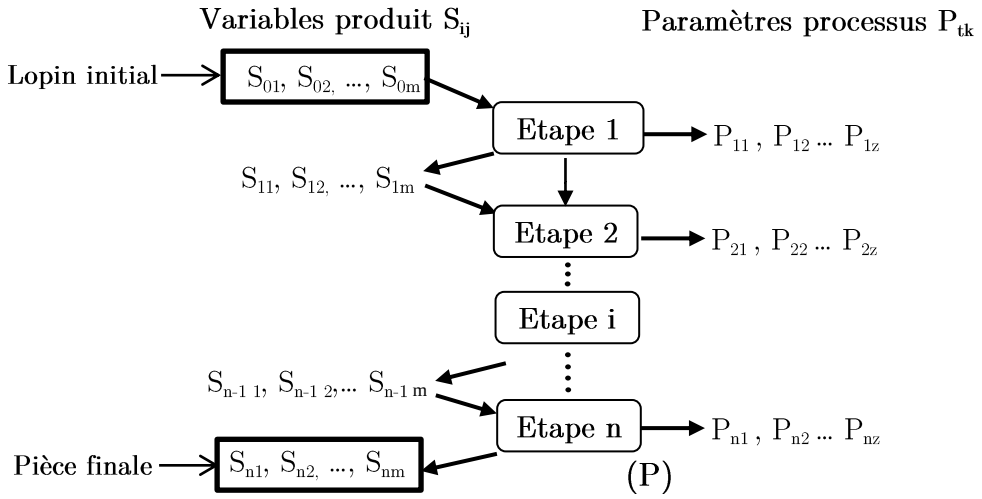


Fig.3.1 Représentation du processus de forgeage et des paramètres processus et de l'évolution des variables produit.

Plusieurs outils sont utilisés par le système d'aide à la décision pour déterminer les paramètres clés. Les différents outils sont introduits par l'expert en fonction des mises en données. L'expert peut renseigner le système d'aide à la décision soit à l'aide d'une loi ou d'un arbre de causes. Les paragraphes qui suivent décrivent la manière avec laquelle l'expert doit renseigner, compléter ou modifier le SAD. Dans cette tâche l'expert est aidé par les outils développés et introduits dans le SAD.

Une loi représente un lien pouvant exister entre paramètre processus et variable produit et peut être décrite sous forme d'équations. Par exemple, ces lois peuvent être sous une forme analytique ou bien les phénoménologique. Une modélisation générale est proposée permettant à l'expert d'introduire une valeur des coefficients pour prendre en considération à chaque fois la loi. $\boldsymbol{\pi}_{tkj}$ représente l'influence du paramètre processus P_{tk} sur S_{ij}, la liaison entre $\boldsymbol{\pi}_{tkj}$ et S_{ij} peut être modélisée sous différentes formes : multiplication, puissance, valeurs obtenues à l'aide de la logique floue, etc. Dans ce chapitre et pour simplifier l'explication, l'influence peut être représentée sous forme d'un résultat d'une multiplication de $\boldsymbol{\pi}_{tkj}$ par la valeur de la variable produit de l'étape i-1 qui a donné lieu à S_{ij}.

$$S_{ij} = \sum_{k=1}^{z} \boldsymbol{\pi}_{tkj} \cdot S_{i-1\,j} + \text{influence des paramètres produits à l'étape i-1}$$

Soit $\mathbf{V}_{pij}$ l'influence des paramètres produits à l'étape **i-1** sur la variable produit $\mathbf{S}_{ij}$ / p ∈ [1, n] \ {j}. Cette influence peut aussi être introduite au niveau de l'équation sous différentes formes. Dans ce chapitre, elle est ajoutée sous forme de somme pour faciliter l'explication. La formule (3.1) donne l'état d'une variable produit j à une étape i du processus en fonction de ces différentes variables décrites précédemment.

$$\boxed{\mathbf{S_{ij}} = \sum_{k=1}^{z} \boldsymbol{\pi}_{\mathbf{tkj}} \cdot \mathbf{S_{i-1\,j}} + \sum_{\substack{p=1 \\ p\neq j}}^{m} \mathbf{V_{pij}}} \qquad (3.1)$$

Dans ce cas-là, les coefficients à introduire par l'expert sont les $\boldsymbol{\pi}_{tkj}$ et $\mathbf{V}_{pij}$. Ces derniers peuvent soit provenir de lois analytiques ou bien de lois empirique propres à l'entreprise. L'étape en amont de la mise en place du SAD est décrite dans la *Fig.3.2*. Dans cette étape les paramètres processus sont déterminés via une étude faite en amont de la fabrication : simulations, bureau d'étude, bureau des méthodes, etc. Ensuite le système d'aide à la décision vient déterminer les paramètres clés, c'est-à-dire les paramètres processus parmi ceux déjà déterminés et dont la variation influence une variable produit donnée.

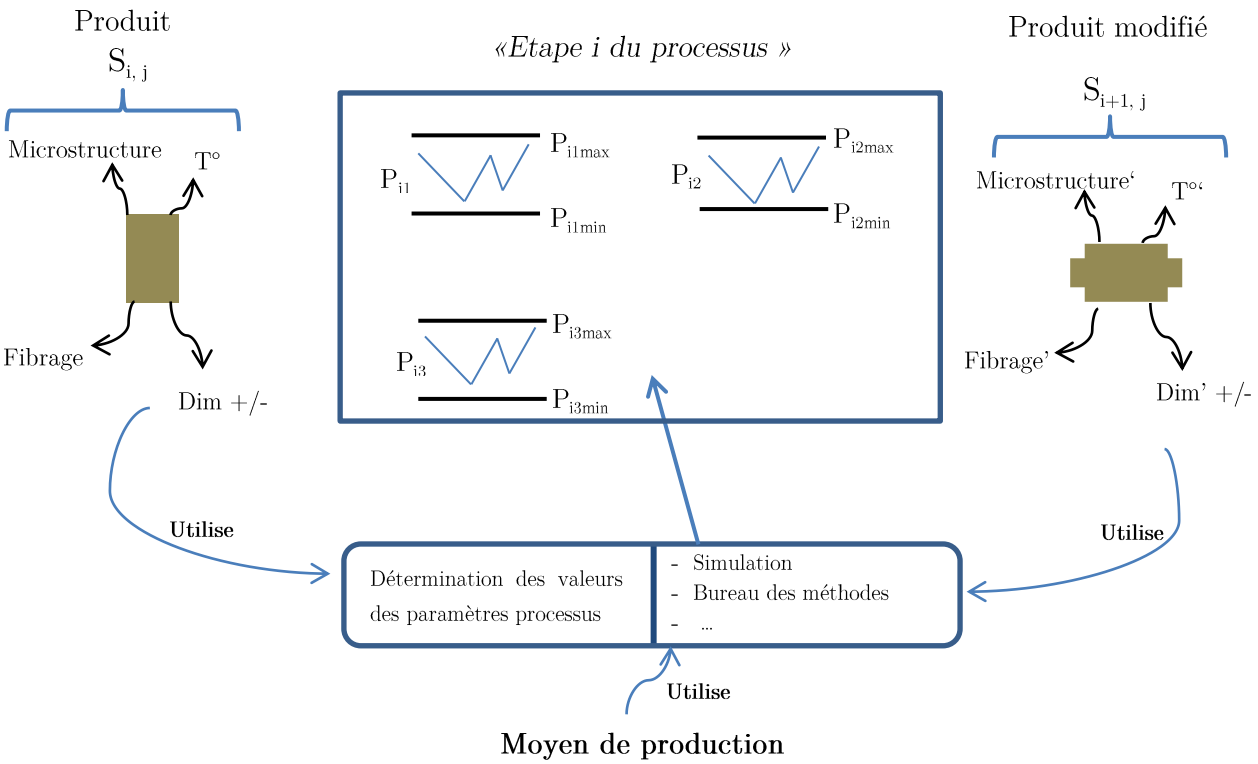


Fig.3.2 Etape Avant l'application du SAD (Hypothèse de travail).

La *Fig.3.3* illustre l'étape d'application du SAD. Dans cette thèse, la valeur de la variable produit est supposée rester dans un intervalle acceptable. C'est la cause d'une variation d'une variable produit qui est étudiée et pas nécessairement le non-respect d'une spécification. Le contrôle d'une déviation d'une variable produit se fait via un contrôle des paramètres processus au lieu des paramètres produit. L'utilisation du SAD permet de déterminer les paramètres clés (P_{tk}^{*}) parmi les différents paramètres processus. C'est la valeur de ces paramètres qui influence la valeur des variables produit à l'étape i+1 ($S_{i+1,\,j}$).

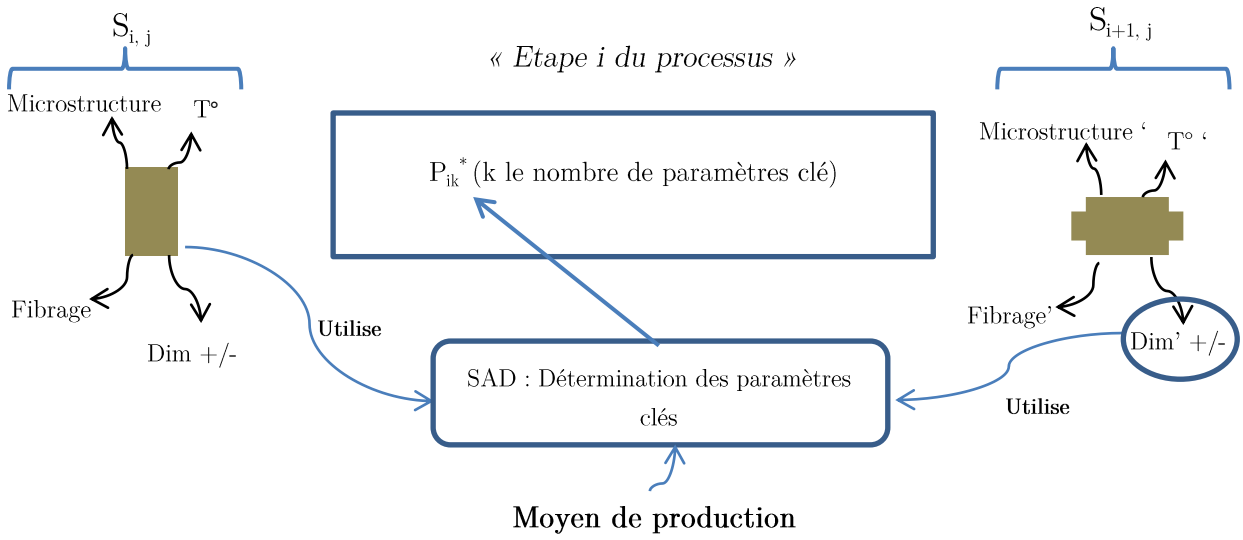


Fig.3.3 Etape d'application du SAD.

Les paramètres processus doivent être déterminés via des lois reliant les variables produit aux paramètres processus. La méthodologie proposée utilise un système d'aide à la décision qui exploite ces lois. Ce système doit être testé, la première chose à faire est de l'alimenter avec des données et des lois initiales. Le système d'aide à la décision ne peut pas être alimenté avec toutes les lois de toutes les pièces forgeables.

Les pièces forgeables doivent être classifiées en fonction des catégories, comme expliqué dans le chapitre II, ces catégories sont définies à l'aide de la morphologie, du matériau, du coefficient de complexité de forme, etc. Chaque catégorie doit utiliser des lois adaptées et spécifiques qui font la liaison entre variables produit et paramètres processus. Par exemple les arbres de causes sont introduits d'une façon générale, après en fonction des cas (matériau, moyen de production, etc) des branches de l'arbre de causes sont éliminées, comme représenté dans l'exemple d'application dans le paragraphe *3.1.2*.

Ensuite pour mieux comprendre l'introduction et l'utilisation de ces règles suivant cette modélisation, un autre exemple de chauffage d'une pièce et de surveillance de ses dimensions est proposé dans le paragraphe *3.1.2*. Les deux exemples illustrent l'application et l'utilisation des outils d'aide à la décision. Ils expliquent aussi l'intérêt de la modélisation proposée au niveau du processus à l'aide d'un exemple simple.

3.1.2 Exemple d'utilisation des outils au niveau du SAD

3.1.2.1 Utilisation d'un arbre de causes

L'arbre de causes est introduit au niveau du SAD d'une façon générale. Ensuite, c'est les catégories choisies par l'utilisateur (matériau, morphologie, procédé, etc) qui font appel à des règles métiers introduites par l'expert. Ces règles métiers servent à supprimer des branches de l'arbre de causes en fonction des cas traités. Ceci diminue le nombre des paramètres responsables de la déviation de la variable produit choisie. Les paramètres restant représentent les paramètres clés et c'est eux qui doivent être mis sous surveillance.

L'exemple suivant est appliqué à un cas avec un arbre de causes et des règles métiers connues. La déviation étudiée est celle de l'épaisseur de la roulette (*Fig.3.4*) forgée à l'aide d'une presse hydraulique en une seule opération. Le but est de combiner ces deux outils pour pouvoir déterminer les paramètres clés à surveiller. Le cas traité est celui de la déviation d'épaisseur sur une pièce mise en forme à l'aide d'une gamme définie. Les règles métiers utilisées sont les suivantes :

- **Si** le chauffage se passe sous atmosphère contrôlée **Alors** présence d'obstacle = 0
- **Si** la série est inférieure à 500 **Alors** Usure de l'outillage = 0
- **Si** le lopin ne bouge pas **Alors** Mise en position = 0

L'arbre de causes est représenté sur la *Fig.3.4*. En utilisant cet arbre et en le combinant avec les règles métiers liées au cas étudié, les branches 1, 4, 5 et 7 de l'arbre sont éliminées. La branche 1 est éliminée car la série fabriquée et inférieure à 500. La branche 4 est éliminée à cause du fait qu'une presse hydraulique est utilisée. La pièce est chauffée sous atmosphère contrôlée donc il n'y a pas de résidus de calamine au niveau de l'outillage (Branche 5). La branche 7 est éliminée car la pièce est fixée au niveau de l'outillage. Les paramètres clés à surveiller dans ce cas sont : La température, l'effort de mise en forme et l'alignement de l'outillage.

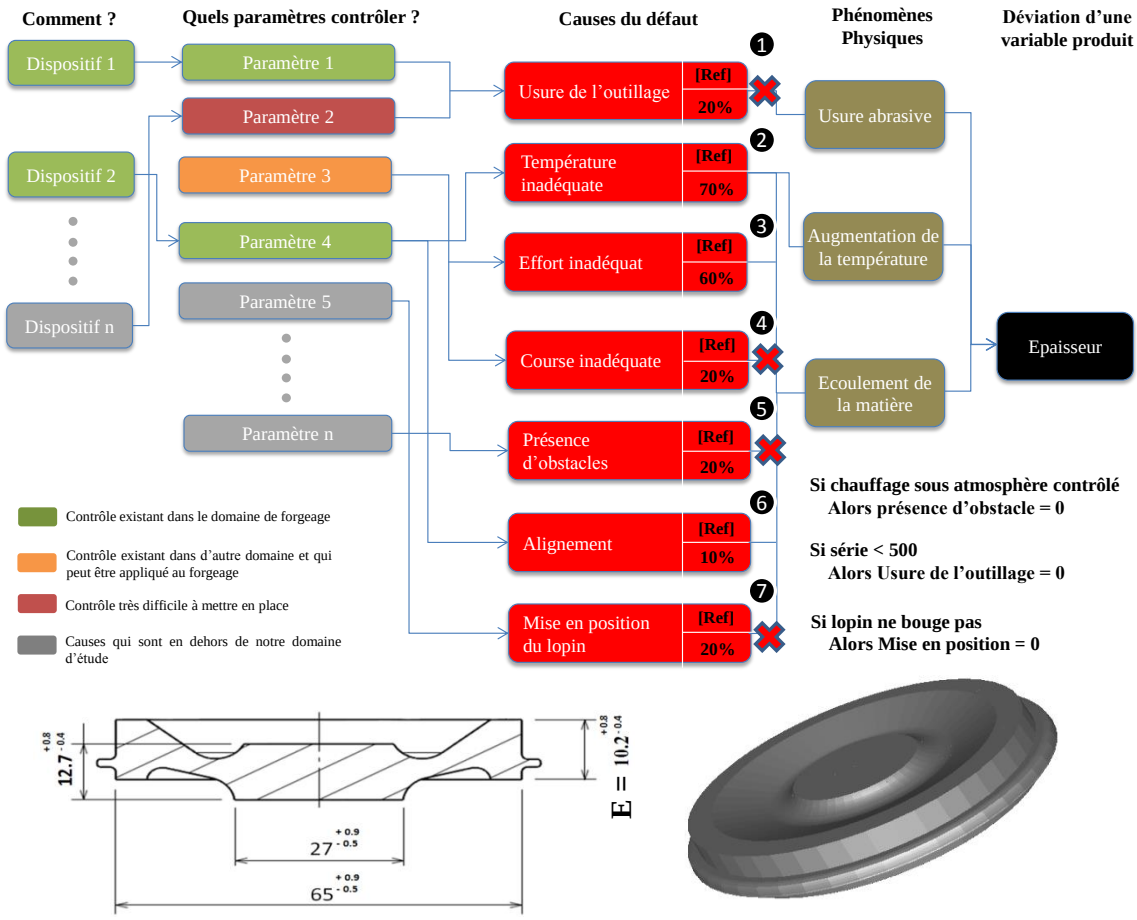


Fig.3.4 Exemple d'arbre de causes utilisé dans le cas de la déviation de l'épaisseur E.

3.1.2.2 Utilisation d'une loi

Soit B une pièce à forger avec un processus en 2 étapes (étape de chauffage et de refoulement), et avec 3 variables produit (hauteur, diamètre et température) et 3 paramètres processus (effort, lubrification et température). Les variables produit surveillées dans ce cas sont les dimensions de la pièce à la sortie de l'étape de chauffage. Les paramètres processus utilisés sont la température, l'effort et la lubrification. La formule (3.2) décrit l'état de la variable produit en fonction des autres paramètres. La *Fig.3.5* représente l'évolution de l'état du produit à travers les deux premières étapes ; le chauffage et le refoulement.

L'influence de la hauteur h1 sur le diamètre final

L'influence de la température $T_{1\ \text{pièce}}$ sur le diamètre final

$$\mathbf{S_{21}} = \Phi_2 = \boldsymbol{\pi}_{211}.\Phi_1 + \boldsymbol{\pi}_{221}.\Phi_1 + \boldsymbol{\pi}_{231}.\Phi_1 + V_{221} + V_{321} \tag{3.2}$$

L'influence de la température T_2 sur la variation du diamètre

L'influence de l'effort F_2 sur la variation du diamètre

L'influence de la lubrification Lub_2 sur la variation du diamètre

Les deux dernières variables produit peuvent aussi être décrites avec les équations (3.3) et (3.4). Pour identifier la variation des variables produit entre la première et la deuxième étape, il faut déterminer les coefficients $\mathbf{V}_{pij}$ et $\boldsymbol{\pi}_{\mathbf{tkj}}$. En supposant que le matériau est isotrope et qu'il n'y a pas d'échange thermique entre la pièce, l'air et l'outil, la variable $\mathbf{S}_{21}$ peut s'écrire sous la forme représentée dans la formule (3.2).

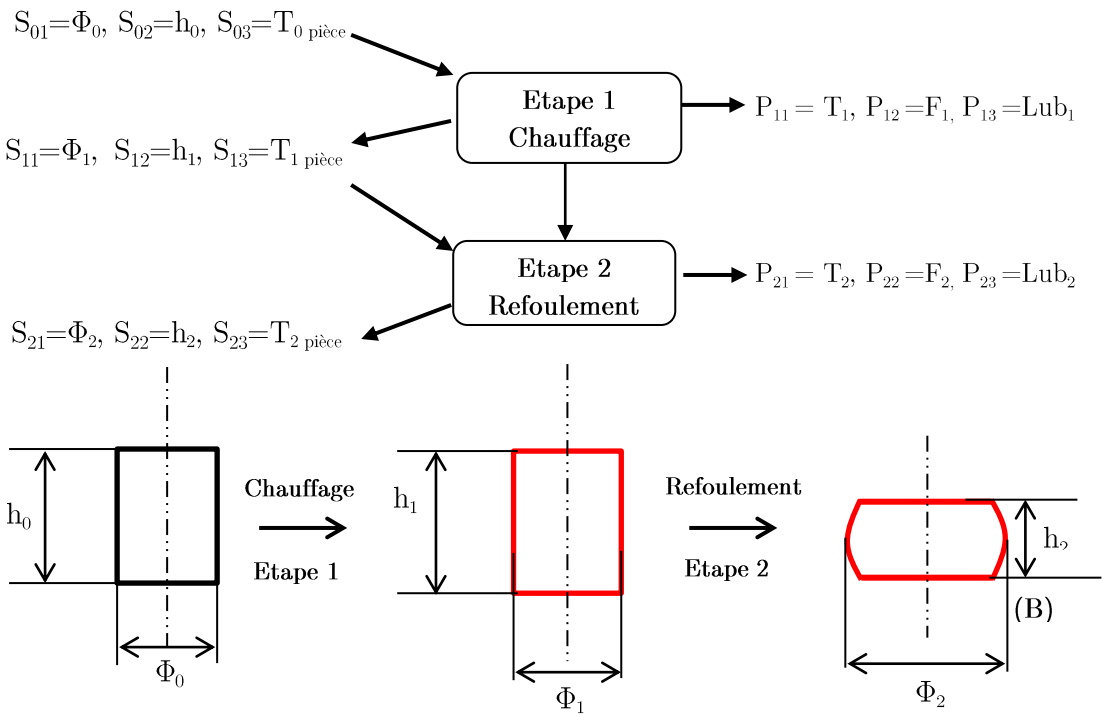


Fig.3.5 Représentation de l'évolution de l'état du produit à travers les deux premières étapes

$$\mathbf{S_{22}} = \mathbf{h_2} = \boldsymbol{\pi}_{212}.h_1 + \boldsymbol{\pi}_{222}.h_1 + \boldsymbol{\pi}_{232}.h_1 + V_{122} + V_{322} \tag{3.3}$$

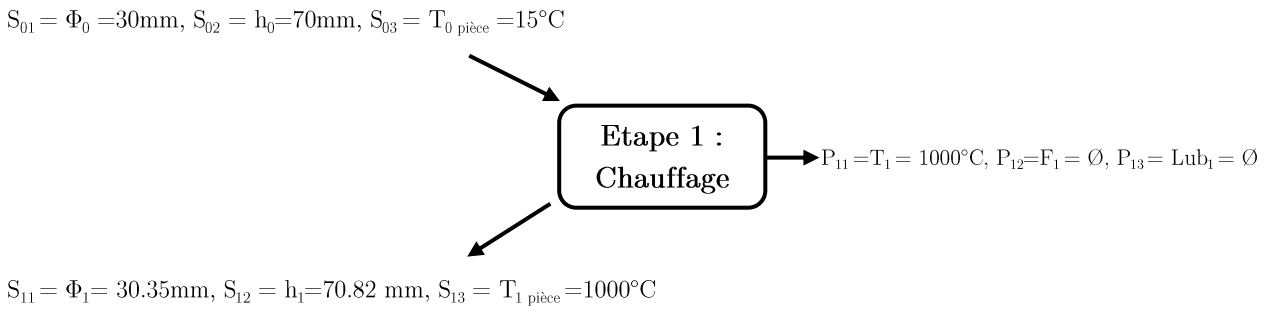
$$\mathbf{S_{23}} = \mathbf{T_{2\ pièce}} = \boldsymbol{\pi}_{213}.T_{1\ pièce} + \boldsymbol{\pi}_{223}.T_{1\ pièce} + \boldsymbol{\pi}_{233}.T_{1\ pièce} + V_{123} + V_{223} \tag{3.4}$$

Avec T_1 =1000°C, $T_{0\ pièce}$ =15°C, h_0 = 70mm et Φ_0 = 30mm, la modélisation des trois variables produit $\mathbf{\Phi_1}$, $\mathbf{h_1}$ et $\mathbf{T_{1\ pièce}}$ peut se faire sous cette forme :

$$\begin{aligned} \Phi_1 &= 1.01182*\Phi_0 \\ h_1 &= 1.01182*h_0 \\ T_{1\ pièce} &= 66.66*\ T_{0\ pièce} \end{aligned} \tag{3.5}$$

Donc en utilisant cette loi et les hypothèses qui vont avec, la matrice $\boldsymbol{\pi}_{1kj}$ peut être dans ce cas représentée ci-dessous, avec : $\boldsymbol{\pi}_{12j}$ = l'influence de l'effort sur les paramètres produit = 0 & $\boldsymbol{\pi}_{13j}$ = l'influence de la lubrification sur les paramètres produit = 0. Cette matrice donne une idée de l'influence de la température sur la variation des 3 variables produit, qui sont : le diamètre, la hauteur et la température de la pièce.

$$\boldsymbol{\pi}_{1kj} = \begin{pmatrix} \boldsymbol{\pi}_{111} & \boldsymbol{\pi}_{121} & \boldsymbol{\pi}_{131} \\ \boldsymbol{\pi}_{112} & \boldsymbol{\pi}_{122} & \boldsymbol{\pi}_{132} \\ \boldsymbol{\pi}_{113} & \boldsymbol{\pi}_{123} & \boldsymbol{\pi}_{133} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1.01182 & 0 & 0 \\ 1.01182 & 0 & 0 \\ 66.66 & 0 & 0 \end{pmatrix} \tag{3.6}$$



Cet exemple montre qu'en renseignant le système d'aide à la décision avec les coefficients mentionnés, le choix des paramètres clés dans ce cas-là se porte sur la température en premier lieu, ce qui est évident certes, mais le résultat est lié aux hypothèses et à la formule utilisée. Plusieurs coefficients sont déclarés comme ayant une influence nulle, ce qui n'est pas vrai puisque les hypothèses utilisées facilitent le calcul, mais la réalité est beaucoup plus complexe. Les coefficients de modélisation peuvent être différents de zéro si d'autres hypothèses sont utilisées, et dans ce cas d'autres paramètres clés doivent être surveillés.

3.2. Modélisation du système d'apprentissage

Le système d'apprentissage, en aval du processus de forgeage, crée ou modifie des lois et renseigne le système d'aide à la décision. La mise en place des lois dépend de la méthode utilisée ; ANN, Logique Floue, Régression linéaire, etc. Le principe général de la modélisation du système d'apprentissage et un exemple d'application sont décrits dans les paragraphes suivants.

3.2.1. Principe général

Au niveau du cas d'étude, l'application est faite sur un modèle phénoménologique en se basant sur la régression linéaire. Un certain nombre d'hypothèses sont utilisées, ces dernières sont définies comme suit.

- L'intervalle de variation des paramètres processus est connu. Cet intervalle va permettre le changement de repère pour pouvoir supprimer l'influence de la grandeur. Par exemple une température ne peut pas dépasser la température du four ou bien l'effort appliqué ne peut pas dépasser la capacité du moyen de production. Le changement de repère se fait à l'aide de la formule (3.7).

$$P' = \frac{P - P_{min}}{P_{max} - P_{min}} \tag{3.7}$$

- La variable produit **S** peut être décrite avec cette équation $S = C + a_1P_1 + a_2P_2 + \ldots + a_NP_N$

$$S = C + a_1P_1 + a_2P_2 + \ldots + a_NP_N \tag{3.8}$$

Après chaque application de la gamme de forgeage, les résultats des mesures sont enregistrés dans la *Table.3.1.* Ces mesures représenteront les entrées du système d'apprentissage. En effet, chaque cas correspond à une application de la gamme avec la mise sous surveillance des paramètres processus et des variables produit.

La prise en compte des interactions entre les paramètres processus est importante. La liaison faite avec les phénomènes physiques à travers l'arbre de causes classifie les paramètres qui sont, potentiellement, en interaction entre eux. Ces interactions doivent être quantifiables pour pouvoir maitriser au mieux le processus. L'un des outils utilisé pour quantifier cette dernière est le calcul du coefficient de corrélation.

	Paramètre processus 1	Paramètre processus 2	...	...	Paramètre processus n	Variable produit 1	Variable produit 2	...	Variable produit n
Cas 1	Valeur de P_1	Valeur de P_2	...	...	Valeur de P_n	Valeur de S_1	Valeur de S_2	...	Valeur de S_n
Cas 2	Valeur de P_1	Valeur de P_2	...	...	Valeur de P_n	Valeur de S_1	Valeur de S_2	...	Valeur de S_n
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
Cas N	Valeur de P_1	Valeur de P_2	...	...	Valeur de P_n	Valeur de S_1	Valeur de S_2	...	Valeur de S_n

Table.3.1 Données d'entrée du système d'apprentissage.

La *Fig.3.6* représente les étapes suivies pour déterminer les paramètres clés et les lois reliant ces derniers aux variables produit **S** (Formule (3.8)). Les corrélations sont calculées pour extraire les paramètres clés et le modèle est mis en place pour déterminer la pertinence de contrôle. Les coefficients $\mathbf{a_i}$ sont déterminés en utilisant la régression linéaire. La formule (3.9) est utilisée pour calculer les corrélations.

$$\mathrm{Cor}(\mathrm{P_{ij}}, \mathrm{S_{ij}}) = \frac{\mathrm{Cov}(\mathrm{P_{ij}}, \mathrm{S_{ij}})}{\sqrt{\mathrm{Var}(\mathrm{P_{ij}}).\mathrm{Var}(\mathrm{S_{ij}})}} \tag{3.9}$$

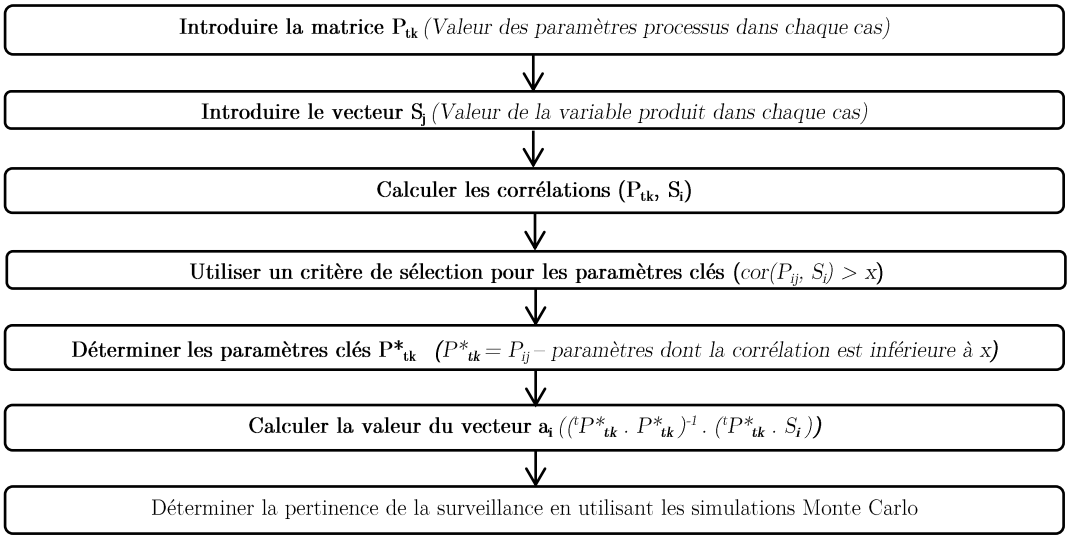


Fig.3.6 Les étapes suivies par le système d'apprentissage.

Les étapes représentées sur la *Fig.3.6* sont suivies pour déterminer la loi reliant les paramètres processus aux variables produit. La première étape de l'algorithme consiste à introduire la matrice P et le vecteur S, obtenus après l'étape de forgeage et les mesures des $\mathbf{P_{ij}}$ et $\mathbf{S_{ij}}$. Les corrélations sont calculées entre la matrice **P** et le vecteur **S**. Un paramètre processus est considéré comme clé si le coefficient de corrélations est supérieur à un seuil déterminé par l'utilisateur. Les coefficients $\mathbf{a_i}$ sont déterminés en utilisant la régression linéaire et le but est de déterminer le vecteur **X**.

$$S = P'_{ij} . X \quad \text{tel que} \quad X = \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \cdots \\ a_n \end{bmatrix} \tag{3.10}$$

En utilisant la méthode des moindres carrés, la solution optimale est représentée au niveau de la formule (3.11). Ensuite le vecteur d'erreur est calculé à l'aide de la formule (3.12). Pour avoir une bonne modélisation phénoménologique, il est important d'avoir un biais proche de zéro. Le but est d'avoir une espérance de $\widetilde{\theta}$ égale à θ, plus le biais (Formule (3.13)) est proche de 0 plus l'estimateur est considéré sans biais.

$$\widetilde{\theta} = (B^T B)^{-1} B^T b \tag{3.11}$$

$$e = b - B.x \tag{3.12}$$

$$\text{Biais } (\theta) = E\,[(B^T B)^{-1}.B^T.e] \tag{3.13}$$

Pour calculer l'incertitude sur les coefficients de modélisation, il faut tout d'abord déterminer la variance (Formule (3.14)). Le vecteur des incertitudes sur les coefficients utilisés est calculé à l'aide de la formule (3.16).

$$\text{Var}(\theta) = \text{VectDiag}\,((B^T B)^{-1}\,\sigma^2) \tag{3.14}$$

Où : $\sigma^2 = \frac{\varepsilon^T \varepsilon}{n_\theta n_k}$ représente l'écart type qui mesure la dispersion d'une série de valeurs autour de leur moyennes, n_k est le nombre d'équations existantes et n_θ le nombre de coefficients à déterminer et l'intervalle de confiance s'écrit sous la forme ci-dessous.

$$\Delta\theta = 3\sqrt{\text{Var}(\theta)} \tag{3.15}$$

$$\text{Incertitude sur les coefficients du modèle} = \frac{\Delta\theta}{\theta} \tag{3.16}$$

Il faut noter que le calcul des corrélations estime qu'il existe une relation linéaire entre les paramètres étudiés. Le calcul des corrélations n'est donc pas adapté aux paramètres ayant des relations non-linéaires ou bien très hétérogènes puisque le calcul de la variance et la covariance repose sur la moyenne. À chaque fois qu'une conclusion est faite au niveau d'une relation entre deux paramètres, ces derniers doivent être liés au même phénomène physique, sinon la conclusion risque d'être fausse et dans ce cas-là il faut utiliser un autre outil pour évaluer cette corrélation.

L'influence de chaque paramètre varie si d'autres paramètres sont ajoutés à l'équation. Pour déterminer la pertinence de contrôle de chaque paramètre processus, des simulations Monte Carlo sont mises en place. Un tirage de 10^6 paramètres est effectué au hasard pour déterminer la probabilité d'avoir une variable produit dans l'intervalle [a,b]. Le résultat détermine si les paramètres clés utilisés dans les simulations Monte Carlo doivent être surveillés pour éviter une déviation de la variable produit étudiée.

3.2.1. Exemple d'application

La pièce représentée sur la *Fig.3.4* est obtenue via l'estampage à chaud. Elle a un certain nombre de spécification à respecter. Dans cet exemple, une seule variable produit est étudiée ; l'épaisseur **E** représentée sur la *Fig.3.4*. Cette épaisseur est surveillée et sa déviation doit être évitée. Les paramètres processus responsables de cette déviation sont déterminés à l'aide du système d'aide à la décision et ceci via les arbres de cause. Ainsi, à la fin de chaque opération de forgeage, les valeurs des paramètres clé sont connues et sont mesurées. Les paramètres clés sont listés ci-dessous.

- La température du lopin
- L'effort
- Le coefficient de frottement

L'intervalle de variation des paramètres processus est connu. Par exemple la température du lopin ne peut pas dépasser la température du four, l'effort appliqué ne peut dépasser la capacité du moyen de production et le coefficient de frottement reste entre 0.05 et 0.8.

Temperature [°C] **P1 = Temperature** **[900,1000]**	Lubrification ($\bar{m}$) **P2 = Lubrication** **[0.05, 0.8]**	Effort [T] **P3 = Effort** **[100, 200]**	E [mm] **S = Epaisseur** **[10,13]**
900	0,2	110	10,88
920	0,3	115	10,87
960	0,1	145	10,66
940	0,3	130	10,82
930	0,2	110	10,88
930	0,3	120	10,86
940	0,6	140	10,77
970	0,7	150	10,76
920	0,4	180	10,71

Table.3.2 Les épaisseurs obtenues et les intervalles de variation des paramètres processus.

Les étapes représentées sur la *Fig.3.6* sont suivies pour déterminer la loi qui relie les paramètres processus aux variables produit. Dans ce cas, la variable produit est l'épaisseur et les valeurs des paramètres clés sont représentées dans la Table.3.2. La première étape de l'algorithme consiste à introduire la matrice P et le vecteur S, obtenus après la mise en place du processus de forgeage. Les corrélations sont calculées entre la matrice P_{ij} et le vecteur S_i.

$$P_{ij} = \begin{bmatrix} 900 & 0.2 & 110 \\ 920 & 0.3 & 115 \\ 960 & 0.1 & 145 \\ 940 & 0.3 & 130 \\ 930 & 0.2 & 110 \\ 930 & 0.3 & 120 \\ 940 & 0.6 & 140 \\ 970 & 0.7 & 150 \\ 920 & 0.4 & 180 \end{bmatrix} \qquad S_i = \begin{bmatrix} 10{,}88 \\ 10{,}87 \\ 10.66 \\ 10.82 \\ 10.88 \\ 10.86 \\ 10.87 \\ 10.76 \\ 10.71 \end{bmatrix} \tag{3.17}$$

$$Cor(P_{ij},S_i) = \begin{bmatrix} 1 & 0.4 & -0.37 & -0.6 \\ 0.4 & 1 & 0.43 & -0.18 \\ -0.37 & 0.43 & 1 & -0.84 \\ -0.6 & -0.18 & -0.84 & 1 \end{bmatrix} \tag{3.18}$$

Un paramètre processus est considéré comme clé si le coefficient de corrélations est supérieur à 0.2. Dans ce cas, la lubrification n'est pas prise en considération dans la mise en place du modèle phénoménologique. Les coefficients $\mathbf{a_i}$ sont déterminés en utilisant la régression linéaire. Le but étant de déterminer le vecteur **X**.

$$S = P^*_{ij} \,.\, X \qquad / \; X = \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \end{bmatrix} \tag{3.19}$$

$$X = ({}^tP^*_{ij} \,.\, P^*_{ij})^{-1} \,.\, ({}^tP^*_{ij} \,.\, S_i) \tag{3.20}$$

Le paramètre clé le plus important à surveiller dans ce cas est la température, pour éviter une déviation de la variable produit E. Le deuxième paramètre qui est intéressant à surveiller est l'effort. Enfin, la lubrification n'est pas intéressante à surveiller si le coefficient de frottement reste entre 0.05 et 0.8. L'influence de chaque paramètre variera si d'autres paramètres sont ajoutés à l'équation.

Pour déterminer la pertinence de surveillance de chaque paramètre processus, des simulations Monte Carlo sont mises en place. Les entrées de la simulation sont l'intervalle de variation de la température et de l'effort, le modèle utilisé et le nombre de tirage. Dans ce cas une valeur de la température est prise au hasard entre 900°C et 1000°C. Une autre valeur de l'effort est prise au hasard entre 400T et 450T. L'utilisation du modèle va permettre de calculer l'épaisseur obtenue à chaque tirage.

Les résultats sont ensuite exploités de sorte à déterminer la pertinence de contrôle. En effet, si l'épaisseur doit absolument rester entre 15,5mm et l5,7mm, le nombre de points existants dans cette zone est calculé et divisé par le nombre total de tirages. Ceci permet de déterminer la probabilité d'avoir l'épaisseur entre 15,5mm et l5,7mm si la température varie entre 900°C et 1000°C et l'effort entre 100T et 200T.

3.3. Conclusion

La modélisation du processus de forgeage met en place un langage similaire entre les deux systèmes (SA & SAD) et les utilisateurs. Le SAD a comme but de déterminer les paramètres clés, de capitaliser la connaissance et de formaliser l'expertise métier. Le SA permet de renseigner le SAD, d'aider dans la compréhension des phénomènes physiques agissant au niveau du processus de forgeage et finalement donne un indicateur de la pertinence de surveillance de chaque paramètre clé.

La mise en place des arbres de cause a permis de savoir qu'une déviation dans une étape i du processus peut être due à une mauvaise surveillance d'un paramètre clé ou bien à une déviation au niveau d'une variable produit à l'étape i-1. La modélisation de ces deux sources de déviations peut être décrite sous forme d'équations. Cette modélisation permet d'avoir un cadre de mise en données pour les deux systèmes utilisés (SAD & SA), ce cadre utilise le même langage ce qui simplifie la communication entre les deux systèmes et le renseignement du SAD par l'expert.

Au niveau du SAD, il s'est avéré que la modélisation du processus permet à l'utilisateur d'introduire des lois scientifiques ou phénoménologiques et d'utiliser ces dernières dans la prise de décision. La modélisation proposée au niveau de ce chapitre a été illustrée sur un cas simple, mais d'autres modélisations peuvent être mises en place à l'aide d'autres outils expliqués dans la bibliographie comme l'ANN ou bien la logique floue. Les arbres de causes permettent d'avoir une idée sur tous les paramètres donnant

une déviation au niveau d'une variable produit, ce nombre de paramètres diminue en fonction des cas, cela dit en fonction du choix de l'utilisateur. Ce choix détermine les règles qui diminuent le nombre de paramètres clés à surveiller en fonction du moyen de production, du procédé, du matériau, etc.

Le système d'apprentissage permet de déterminer des lois reliant les paramètres processus aux variables produit. Ces lois ont été déterminées via le calcul des corrélations et l'utilisation de modèles issus de la régression linéaire. Ces modes d'analyse peuvent aussi être modifiés par l'utilisateur. Le calcul des corrélations permet de déterminer les paramètres clés à surveiller et le modèle phénoménologique est utilisé par le système d'apprentissage pour déterminer la pertinence de contrôle. La justesse de cette dernière est liée d'une part à l'erreur au niveau du modèle et au nombre de tirages utilisé dans la méthode MC. En effet, plus le nombre de tirage est grand plus l'erreur au niveau du résultat est faible. Les deux verrous restants peuvent être levés comme suit :

Verrou 3 : Définir la non-conformité d'une pièce à une étape intermédiaire du processus et son influence sur l'étape qui la suit

La non-conformité d'une pièce est définie comme étant une déviation d'une variable produit à une étape donnée du processus. Cette déviation est décrite en termes d'équation avec les modélisations proposées dans le chapitre II. La déviation peut-être prédite grâce aux modélisations phénoménologiques mises en place par le SA, mais aussi la probabilité de variation dans un intervalle donné qui est déterminée grâce aux simulations Monte Carlo.

L'influence des paramètres processus est une notion très générale. La méthodologie proposée distingue les paramètres clés parmi tous les paramètres processus. Les paramètres sont identifiés via le SAD en se référant à l'expert et aux différentes lois utilisées, chaque paramètre clé peut être identifié avec un pourcentage d'importance. Le SA joue aussi ce rôle puisqu'après un certain nombre d'essais, ce système permet d'identifier les paramètres clés en se référant aux coefficients de corrélation calculés.

Verrou 4 : Avoir un outil utilisable pour différents processus et différents moyens de production en forgeage

Le SAD seul ne peut pas contenir toutes les règles et les descriptions des différents moyens de production. Pour avoir un outil flexible et adaptable aux différents moyens de production, il faut utiliser un SA en aval de la production qui crée des lois intrinsèques aux processus étudiés et alimente le SAD.

Chapitre IV : Illustration de la méthodologie sur des cas d'étude

Dans ce chapitre deux cas d'études illustrent la méthodologie proposée dans les chapitres précédents. Ces cas d'étude sont appliqués expérimentalement pour vérifier l'utilité de la méthodologie et augmenter la connaissance à l'aide du système d'apprentissage. Une application numérique est mise en place pour savoir à quel point l'outil numérique peut enrichir la connaissance. Les résultats des expériences et des simulations sont analysés pour évaluer l'apport de l'utilisation d'un système d'aide à la décision et d'un système d'apprentissage.

Sommaire

4.1. Moyens expérimentaux **68**
4.2. Résultats expérimentaux **69**
4.1.1. Dans le cas de l'estampage 69
4.1.2. Dans le cas du Filage direct 77
4.3. Résultats des simulations **85**
4.2.1. Dans le cas de l'estampage 85
4.2.2. Dans le cas du filage direct 93
4.4. Comparaison des résultats **95**
4.5. Conclusion **98**

La méthodologie et la modélisation décrites dans le chapitre précédent sont appliquées dans ce chapitre. Deux procédés sont utilisés : l'estampage et le filage. L'application du SAD est illustrée ainsi que les résultats obtenus après forgeage et l'application du SA. Le but de ces cas d'étude est, d'abord, de montrer l'utilité de l'application du SAD, c'est à dire d'illustrer le risque du non contrôle d'un paramètre clé sur les spécifications à respecter. Ensuite il est question de montrer à quel point le SAD peut donner des résultats corrects et à quel point la connaissance de l'expert peut être utile à prendre en considération en amont de l'application du processus de forgeage. Ces deux objectifs sont atteints à l'aide de la mise en place d'un plan d'expériences.

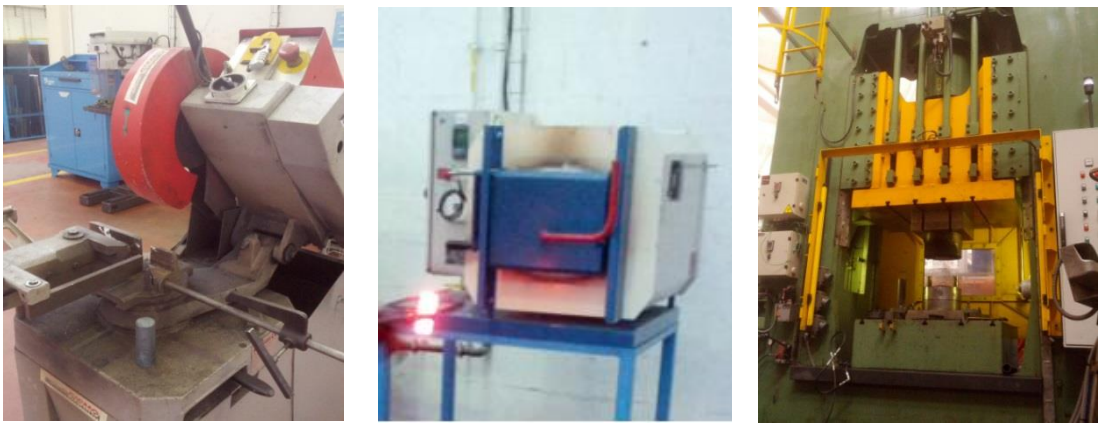
Après l'application des différents plans d'expériences, le système d'apprentissage est mis en place. Ce dernier utilise les résultats de ces plans d'expériences pour d'une part mettre en place des modèles phénoménologiques, et d'autre part évaluer la pertinence de contrôle de chaque paramètre. La pertinence de contrôle est ensuite évaluée en fonction du besoin et permet de savoir s'il est utile de surveiller les paramètres clés.

4.1. Moyens expérimentaux

Les ressources utilisées lors des essais expérimentaux sont des moyens du Laboratoire de Conception Fabrication Commande (LCFC-Metz). Les moyens utilisés en estampage et filage direct sont cités ci-dessous. La *Fig.4.1* représente les trois moyens de production utilisés.

- Une tronçonneuse à disque pour découper les lopins.
- Un four à résistance d'une puissance de 5kW.
- Une presse hydraulique d'une capacité de 6000kN.

Le four électrique a une température maximale de 1200°C, la température n'est pas uniforme dans toutes les zones du four. La température du four est déterminée via des thermocouples installés dans une zone du four. La presse hydraulique a une capacité maximale de 6000kN et une vitesse de descente de 30mm/s. Le pilotage de la presse se fait en effort et ceci en introduisant un pourcentage qui correspond à l'effort maximal qui sera appliqué. Dans ce cas si la valeur 25% est introduite, l'effort maximal appliqué sera de 1500kN.



(a) (b) (c)

Fig.4.1 Moyens utilisés lors des essais expérimentaux en estampage et filage direct.
(a) : Tronçonneuse à disque (b) : Four électrique (c) : Presse hydraulique

Les mesures d'effort et du déplacement coulisseau ont été faites lors des essais expérimentaux d'estampage et de filage. Le dispositif d'acquisition est centralisé et permet de faire des mesures au niveau des moyens de production existants dans le laboratoire.

4.2. Résultats expérimentaux

Le travail expérimental dans le cas du filage et l'estampage a été effectué sur la même presse. Le moyen de production utilisé dans les deux cas ne change pas pour montrer que les paramètres clés peuvent varier si le procédé change et le moyen de production reste le même.

4.1.1. Dans le cas de l'estampage

Pour l'estampage, la pièce utilisée dans le cas d'étude est la roulette représentée sur la *Fig.4.2*, cette pièce possède des spécifications définies au niveau du cahier des charges fonctionnel. La seule variable produit retenue du cahier des charges et surveillée est l'épaisseur représentée sur la *Fig.4.2* .Le processus suivi pour la fabrication de cette pièce est représenté sur la *Fig.4.3*, ce processus est constitué de 3 étapes : découpage, chauffage et estampage. Des barres de 27mm de diamètre sont découpées pour obtenir des lopins d'une longueur de 56mm. Ces lopins sont chauffés à 1000°C et estampés à l'aide d'une presse pilotée en effort. Le cas d'étude est appliqué sur une variable produit géométrique, mais la même démarche peut être appliquée dans le cas d'une variable liée à la microstructure, comme par exemple la taille de grain.

La presse hydraulique a une capacité maximale de 6000kN. Le calcul de l'effort fait à l'aide de la méthode des tranches permet de fixer l'effort de la presse à 200kN. Ensuite ce même effort est appliqué dans toutes les expériences, donc sa variation est négligeable devant les autres paramètres processus. Ce qui est intéressant à voir est l'influence des autres paramètres sur l'épaisseur à effort constant.

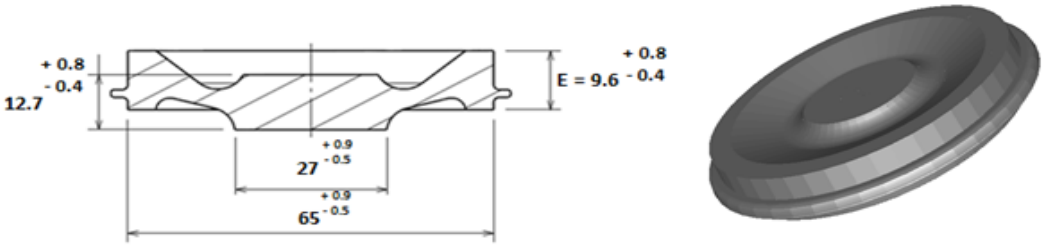


Fig.4.2 Représentation de la roulette utilisée dans le cas d'étude.

La première étape de la méthodologie consiste à utiliser le système d'aide à la décision pour pouvoir déterminer les paramètres clés à surveiller afin d'éviter une déviation de l'épaisseur E. La deuxième étape consiste à calculer les corrélations après la mise en place de la gamme de forgeage et des mesures. Les modèles phénoménologiques sont déterminés au niveau de la troisième étape et la dernière étape consiste à déterminer la pertinence de contrôle. À chaque étape du processus une déviation au niveau d'une variable produit ou d'un paramètre processus peut mener à une déviation au niveau des variables produit finales. La *Fig.4.3* illustre les différents paramètres processus et variables produit existant dans ce processus et leur évolution. La seule étape sur laquelle a été mis en place le plan d'expériences est l'étape d'estampage. Cependant, les autres étapes peuvent être étudiées de la même manière et avec des arbres de causes différents.

En s'appuyant sur la connaissance capitalisée, la déviation de l'épaisseur E dans le cas étudié peut provenir premièrement d'une température inadéquate de la pièce lors du forgeage. La température de la pièce dévie à cause d'un temps d'attente ou de transfert inapproprié, d'une température inadéquate de l'outillage ou bien d'une température inadéquate du lopin à la sortie du four. La deuxième cause de déviation de l'épaisseur est la lubrification. La troisième cause concerne un effort de forgeage inapproprié. Enfin la dernière cause est reliée à la longueur initiale du lopin qui dépend de l'étape de découpe.

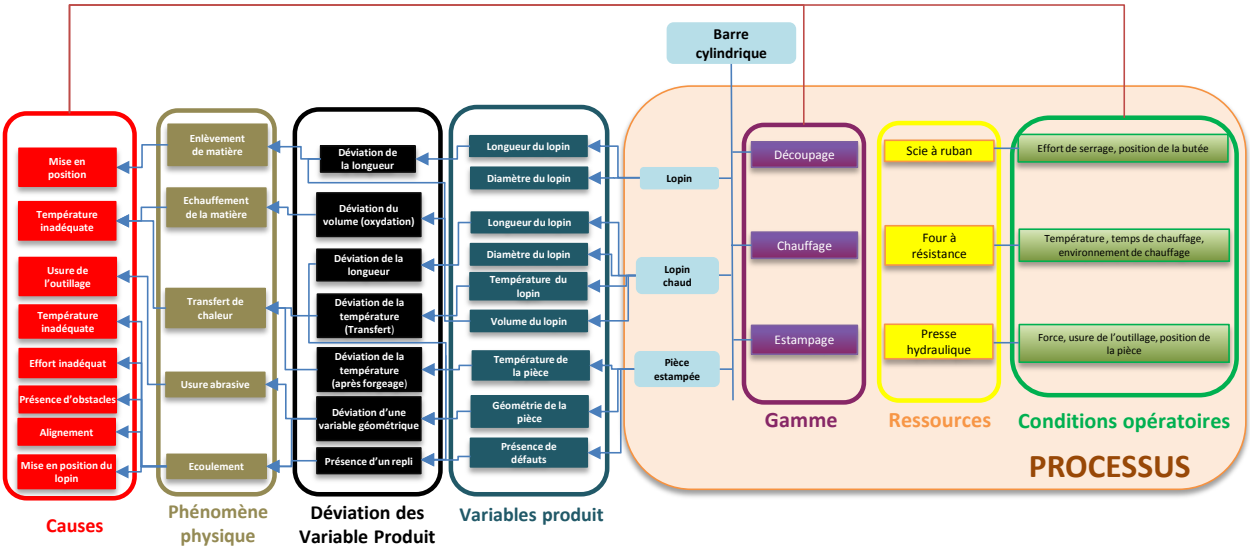


Fig.4.3 Etapes suivies dans le processus d'estampage et l'état des variables produit et des paramètres processus à chaque étape.

La gamme de forgeage et les spécifications initiales sur la pièce sont connues. Un entretien avec un expert en forge a permis de mettre en place un arbre de cause reliant la variation de cette épaisseur à des phénomènes physiques et des paramètres processus. L'arbre de causes est représenté sur la *Fig.4.4*, ensuite des essais ont été réalisés en considérant des déviations au niveau des paramètres processus avec des amplitudes élevées, pour dépasser les incertitudes liées aux moyens utilisés et dans le but d'évaluer la véracité des affirmations données par l'expert. Chaque cause est liée à un pourcentage renseigné par l'expert.

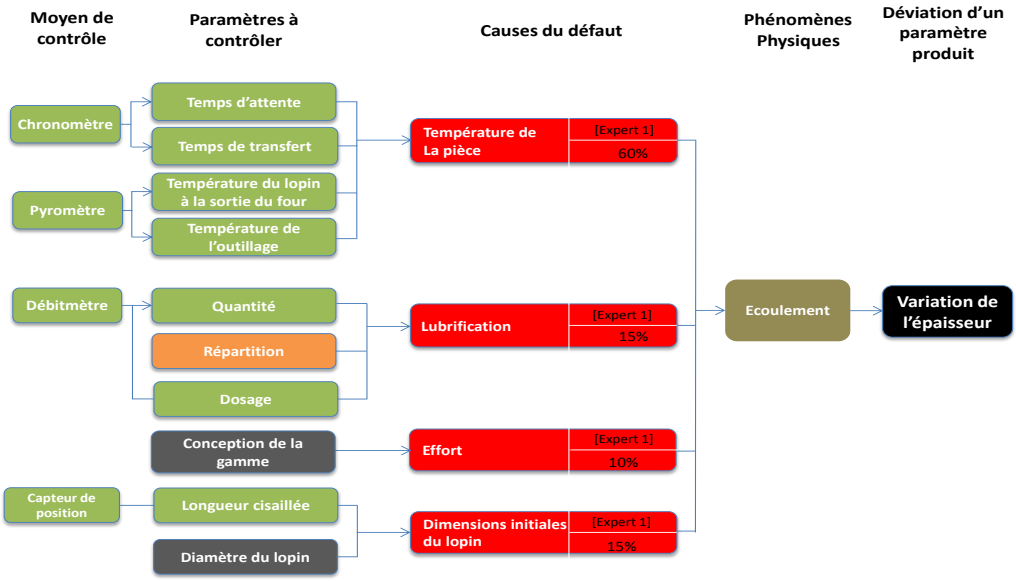


Fig.4.4 Arbre de causes renseigné par des experts dans le cas de la variation de l'épaisseur E de la roulette.

Les essais mis en place suivent le plan d'expériences illustré sur le *Table.4.1.* Le but est de voir la variation de l'épaisseur E lorsque la température, la lubrification et la longueur initiale du lopin varient. La température veut dire, dans ce cas-là, la température du lopin à la sortie du four. Les temps de transfert entre le four et l'outillage ainsi que les temps d'attente au niveau de l'outillage ne sont pas pris en considération dans ces essais. Si la température est considérée comme paramètre clé, ces paramètres opératoires, temps d'attente et de transfert, devraient être surveillés pour éviter une déviation au niveau de la variable produit.

Les paramètres mis en place dans cette étude peuvent être responsables d'une déviation au niveau de l'épaisseur. D'autres déviations peuvent être suivies au niveau de la roulette, par exemple la présence de replis ou bien le manque de remplissage au niveau de l'empreinte. Cependant, ces deux déviations n'ont pas été présentées vu qu'elles demandent une grande variation au niveau des paramètres processus. Pour avoir un repli il faut avoir une mauvaise mise en position du lopin qui ne peut être appliquée sur l'outillage utilisé, vu que la mise en position est assurée par l'outillage. Pour avoir un manque de remplissage, il faut travailler avec un lopin d'une longueur inférieure de 8mm de la nominale, ce qui est improbable dans un processus normal.

Longueur initiale [mm]	Température [°c]	Lubrification
(52 ; 56 ; 60)	(900 ; 1000 ; 1100)	(sans, Graphite, Huile + Graphite)

Table.4.1 Plan d'expériences utilisé dans le cas de la roulette.

La lubrification a été identifiée en considérant qu'elle suit une loi de Tresca représentée dans la formule (4.2), en liant chaque type de lubrifiant à un coefficient de frottement $\overline{m}$. Pour ce faire, le test de l'anneau a été utilisé. Ce test consiste à déterminer le coefficient de frottement $\overline{m}$ entre un outil et un matériau soumis à une déformation plastique et sous des conditions opératoires données. Le but étant d'écraser un anneau représenté sur la *Fig.4.5.* L'écoulement de la matière est différent en fonction des paramètres opératoires utilisés, ceci donne à chaque fois un diamètre intérieur différent, le pourcentage de variation de la hauteur et du diamètre est ensuite corrélé à un coefficient de frottement via l'abaque présenté en annexe (ANNEXE F).

Par exemple, le diamètre intérieur final est plus petit que l'initial si la lubrification est médiocre et inversement si la lubrification est bonne. Ainsi, la valeur du coefficient de frottement va être en fonction du type de lubrifiant et de la nature de la pièce. En effet l'écoulement de la matière dépend de la température de la pièce. Le type de lubrifiant influence la nature de l'interface entre l'outil et la pièce. La température influence l'écoulement de la pièce, ce qui modifie le type de déplacement entre l'outil et la pièce ; une pièce chaude a tendance à adhérer plus à l'outillage contrairement à une pièce moins chaude.

$$\tau = \frac{\overline{m}\ \sigma_0}{\sqrt{3}} \tag{4.1}$$

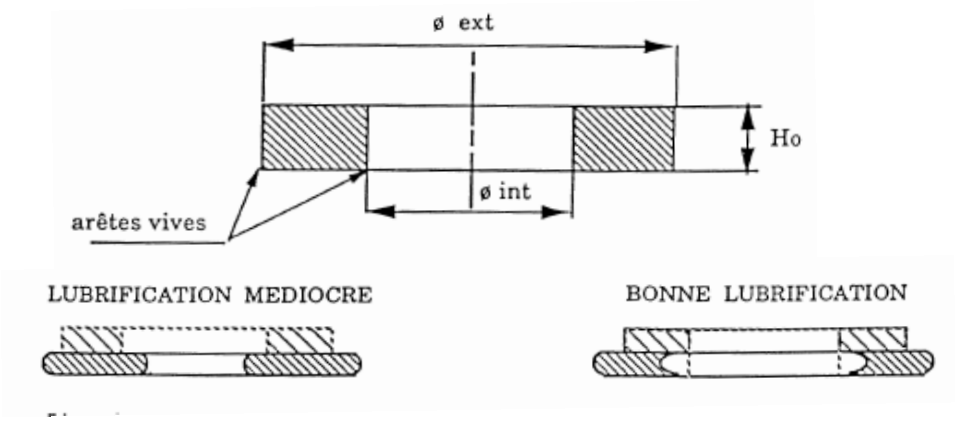


Fig.4.5 Anneau utilisé dans le test de l'anneau [Cetim].

Pour évaluer l'influence de chaque paramètre sur l'épaisseur, le coefficient de corrélation est calculé. La *Table.4.3* illustre la matrice de corrélation obtenue dans le cas de l'estampage. Pour calculer ces coefficients, les formules expliquées au niveau du chapitre III sont utilisées. En effet, les résultats obtenus confirment ce qui a été déterminé par le SAD : le paramètre clé le plus influent est la température, ensuite la longueur et en dernier la lubrification. Les résultats du plan d'expériences sont représentés sur le *Table.4.2* Les mesures des épaisseurs E sont faites à l'aide d'un pied à coulisse.

Essais	Longueur initiale [mm]	Température [°C]	Coefficient frottement	Epaisseur E [mm]
1	52	900	0,46	10,2
2	56	900	0,46	10,7
3	60	900	0,46	11,1
4	52	900	0,19	9,9
5	56	900	0,19	10,5
6	60	900	0,19	10,8
7	52	900	0,2	10
8	56	900	0,2	10,5
9	60	900	0,2	10,9
10	52	1000	0,58	10
11	56	1000	0,58	10,4
12	60	1000	0,58	10,8
13	52	1000	0,24	9,6
14	56	1000	0,24	10
15	60	1000	0,24	10,3
16	52	1000	0,26	9,6
17	56	1000	0,26	10
18	60	1000	0,26	10,4
19	52	1100	0,71	9,6
20	56	1100	0,71	10
21	60	1100	0,71	10,4
22	52	1100	0,29	9,1
23	56	1100	0,29	9,4
24	60	1100	0,29	9,8
25	52	1100	0,32	9,2
26	56	1100	0,32	9,5
27	60	1100	0,32	10

Table.4.2 Résultats du plan d'expériences appliqué dans le cas de la roulette (expérimental)

Le SA est utilisé dans ce cas d'étude pour, d'abord, analyser les résultats obtenus via le plan d'expériences, ensuite déterminer les modèles phénoménologiques et déterminer la pertinence de contrôle de l'épaisseur. Ces trois étapes suivies sont décrites dans les paragraphes qui suivent.

Calcul des corrélations

Le calcul des corrélations montre que le paramètre le plus influent est la température (-0.66) et la longueur initiale du lopin (0.64), par contre la lubrification (0.09) n'a pas une grande influence sur la variable produit E. L'application du système d'apprentissage, suppose que les résultats de forgeage ont déjà été obtenus. Les résultats de ce plan d'expériences sont utilisés comme entrées du système d'apprentissage. Les étapes présentes dans le système d'apprentissage sont illustrées sur la *Fig.3.13*.

	Longueur	Température	Lubrification	Epaisseur (E)
Longueur	1	0	0	0,64
Température	0	1	0,37	-0,66
Lubrification	0	0,37	1	0,09
Epaisseur (E)	0,64	-0,66	0,09	1

Table.4.3 Matrice de corrélation obtenue dans le cas de l'estampage.

Détermination des modèles phénoménologique

La troisième étape consiste à utiliser les résultats obtenus pour déterminer un modèle phénoménologique pour modéliser la variation de E en fonction des trois paramètres processus. Un modèle de puissance est utilisé, il est représenté dans la formule (4.2). La détermination des coefficients de modélisation est faite à l'aide de la régression linéaire en déterminant le vecteur x présent dans la formule (4.4). La matrice B représente la valeur des paramètres processus utilisés à chaque fois et le vecteur b représente la valeur de l'épaisseur obtenue à chaque essai. L'erreur sur le modèle est de 1.6%.

$$E = D\ .L^{\alpha}.T^{\beta}.\bar{m}^{\gamma} \tag{4.2}$$

$$\ln(E) = \ln(D) + \alpha.\ln(L) + \beta.\ln(T) + \gamma.\ln(\bar{m}) \tag{4.3}$$

$$B.x = b\ /\ x = \begin{pmatrix} \ln(D) \\ \alpha \\ \beta \\ \gamma \end{pmatrix} \tag{4.4}$$

Les résultats des calculs des incertitudes sur chacun des coefficients D, α, β, et γ sont respectivement : 15%, 15%, 13% et 27%. Les erreurs sont assez petites, seul le coefficient lié au frottement qui donne une erreur supérieure à 20%, ceci peut être réglé en changeant la modélisation phénoménologique et en travaillant seulement avec 3 paramètres à déterminer. Le type de modélisation peut varier en fonction des cas traités. Un choix de la modélisation peut être fait en fonction des erreurs que donne chaque modélisation.

Pertinence de contrôle

La dernière étape consiste à utiliser les simulations Monte Carlo. Ces dernières vont quantifier la pertinence de surveillance des paramètres clés identifiés. L'intervalle de

variation de la variable produit où la variation est acceptable se situe entre 9.5mm et 10.1mm. La *Fig.4.6* est obtenue en effectuant un certain nombre de tirage et en calculant les résultats via le modèle de puissance. Le calcul montre que si la température varie entre 850°C et 1100°C, la longueur initiale entre 54mm et 58mm et la lubrification entre 0.1 et 0.7, la probabilité pour que l'épaisseur E soit entre 9.5mm et 10.1mm est de 22.4%, donc il faut surveiller la longueur initiale et la température pour éviter cette déviation.

Ce cas d'étude montre d'une part que le système d'aide à la décision peut donner une bonne piste de surveillance s'il est correctement renseigné par un expert et si la connaissance métier est formalisée. Le système d'apprentissage va permettre de renseigner le SAD d'une part mais aussi déterminer les paramètres clés et la pertinence de surveillance à chaque fois.

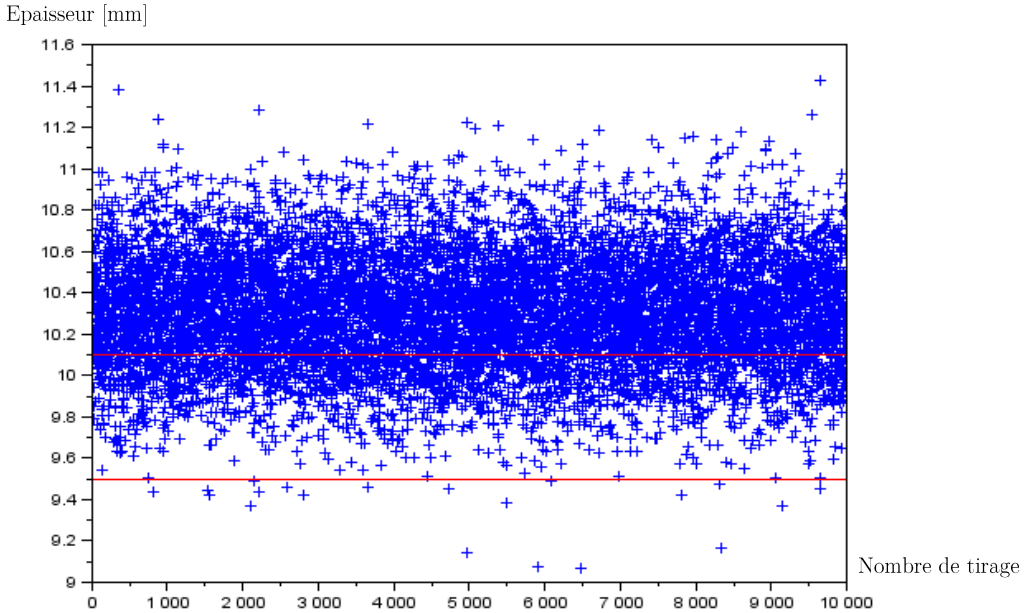


Fig.4.6 Représentation des épaisseurs obtenues après la mise en place des simulations Monte Carlo, en utilisant le modèle de puissance (n= 10^4).

4.1.2. Dans le cas du Filage direct

Dans le cas du filage direct, la pièce filée est représentée sur la *Fig.4.7* .Les spécifications initiales sont définies dans le cahier des charges. Le processus suivi pour le forgeage de la pièce comporte une étape de découpe du lopin à 86mm, ensuite un chauffage à l'aide d'un four électrique à 1000°C et enfin une opération de filage direct en une seule étape à l'aide d'une presse hydraulique pilotée en effort. La variable surveillée du produit est la longueur **A** représentée sur la *Fig.4.8.* En effet, l'outillage utilisé sur la presse hydraulique a un jeu assez important entre le conteneur et le poinçon, ce jeu donne lieu à un défaut sur la pièce filée (Longueur **A** *Fig.4.8*).

La longueur **A** est obtenue via un filage inverse de la matière. Cette longueur est une image de l'écoulement de la matière, en effet plus la longueur est grande (>6mm) plus la matière va filer dans l'outil ce qui donne une idée sur l'état du filage de la pièce. La presse hydraulique est utilisée avec un effort maximum de 400kN. La première étape de la méthodologie consiste à utiliser le système d'aide à la décision pour pouvoir déterminer les paramètres clés à surveiller dans le but d'obtenir une longueur **A** comprise entre 5mm et 7mm.

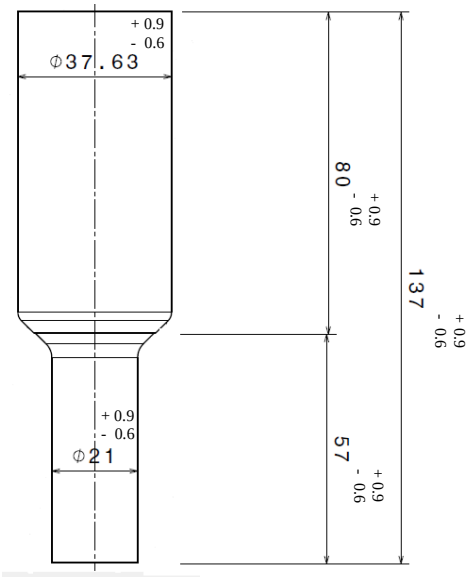


Fig.4.7 Pièce obtenue via le filage direct.

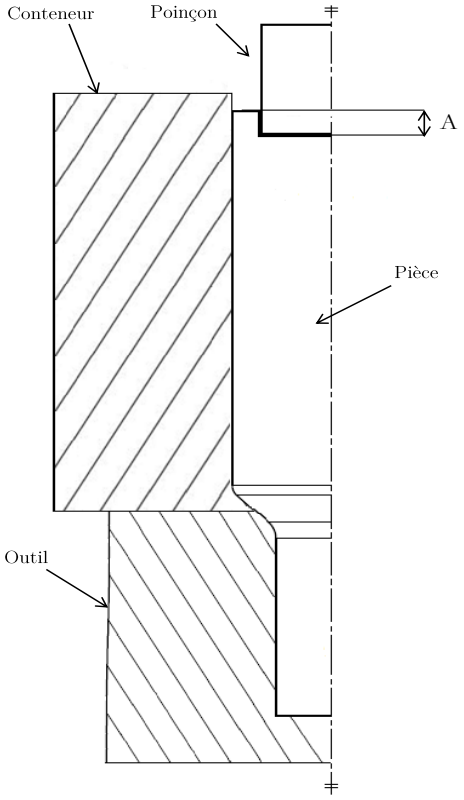


Fig.4.8 Représentation de l'emplacement de la pièce par rapport à l'outillage du filage et du jeu existant entre le conteneur et le poinçon.

La *Fig.4.9* illustre les différents paramètres processus et variables produit existant dans le processus utilisé en filage direct. La seule étape sur laquelle a été mis en place le plan d'expériences est l'étape de filage. D'autres étapes peuvent être étudiées de la même manière et avec des arbres différents. En effet, en filage direct plusieurs déviations peuvent se produire durant le processus, par exemple des déviations au niveau de la géométrie, de la microstructure, de la taille de grain, etc. Dans ce cas, l'étape qui suit celle du filage n'est pas prise en considération dans le processus, cela dit les effets des paramètres processus sur la microstructure ou la taille de grain ne sont pas étudiés. Le seul phénomène étudié est l'écoulement de la matière et son influence sur les dimensions finales de la pièce.

L'étape de filage est étudiée avec une possibilité de déviation des variables produit dans les étapes précédentes et la variation des paramètres processus à l'étape de filage ; la longueur initiale de la pièce est une sortie de la première étape de découpage, la température du lopin est une sortie de la deuxième étape du processus et la lubrification est un paramètre processus de l'étape de filage direct. La gamme de forgeage et les spécifications initiales sur la pièce sont connues. Un entretien avec un

expert en forge a permis de mettre en place un arbre de causes reliant la variation de la longueur **A** en filage à des phénomènes physiques et des paramètres processus avec à chaque fois un pourcentage lié aux causes. L'arbre de causes est représenté sur la *Fig.4.10*. Des essais ont été mis en place, comme dans le cas de l'estampage, pour évaluer les résultats obtenus par le système d'aide à la décision.

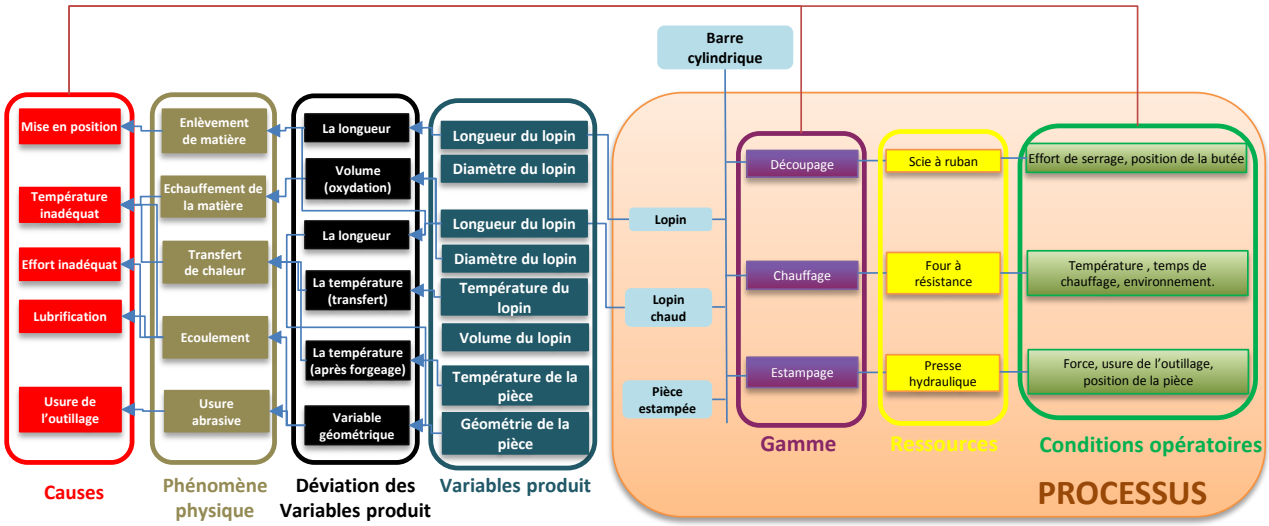


Fig.4.9 Etapes suivies dans le processus de filage et l'état des variables produit et des paramètres processus à chaque étape.

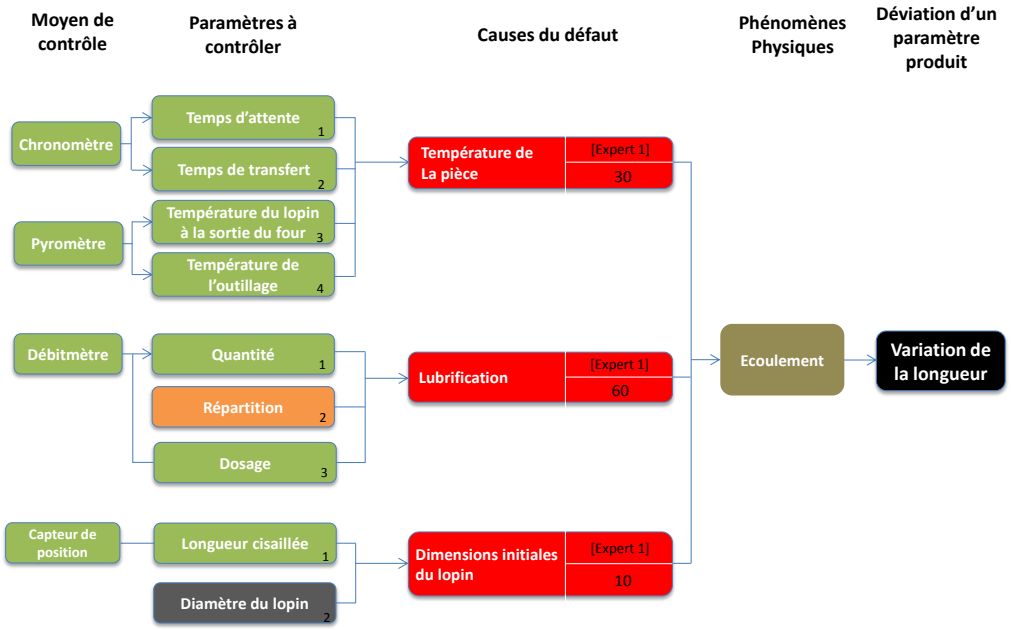


Fig.4.10 Arbre de causes obtenu dans le cas de la variation des longueurs en filage direct.

Les essais mis en place suivent le plan d'expériences illustré sur la *Table.4.4.* Le but étant de varier la température, la lubrification et la longueur initiale du lopin et voir l'influence sur la variable produit A. Pour la température, le paramètre pris en considération est la température du lopin à la sortie du four.

Longueur initiale [mm]	Température [°C]	Lubrification
(81 ; 86 ; 91)	(900 ; 1000 ; 1100)	(Bisulfure de molybdène, Graphite, Huile + Graphite)

Table.4.4 Plan d'expériences utilisé dans le cas de la pièce obtenue en filage direct

Le test de l'anneau a été utilisé dans le cas de l'estampage pour déterminer le coefficient de frottement, dans le cas du filage le coefficient de frottement a été déterminé expérimentalement en supposant que la contrainte d'écoulement dépend de la température, de la déformation et de la vitesse de déformation et que l'effort de filage s'écrit sous la forme représentée dans la formule (4.5) **[Pernot 1993]**.

$$F = \pi R^2 \sigma_0 \ln(\delta) \exp(\frac{2\mu L}{R}) \tag{4.5}$$

F (N) : Force totale appliquée au poinçon
R (mm) : Rayon du conteneur
σ_0 (MPa) : Résistance à la déformation de la matière à filer, à la température de filage.
Rapport de filage : Rapport entre la section du lopin comprimé dans le conteneur et celle du produit filé.
L (mm) : Longueur du lopin
μ : Coefficient de frottement entre le lopin et la paroi du conteneur

La courbe de l'effort est représentée sur la *Fig.4.11*, trois zones sont représentées sur la courbe, la zone de refoulement où le lopin initial est écrasé dans le conteneur. La deuxième zone est la zone de forgeage du convergeant où la matière est comprimée et commence à s'introduire dans la filière. La troisième zone est la zone de filage, dans cette partie la matière est filée dans la filière. La diminution de l'effort est due à la diminution de l'impact du frottement parois/lopin sur l'effort. Les images représentées sur la figure sont issues de la simulation. A l'aide de la superposition des courbes de simulation avec celles obtenues expérimentalement, la forme de la pièce a été illustrée en fonction des différentes étapes d'écoulement de la matière.

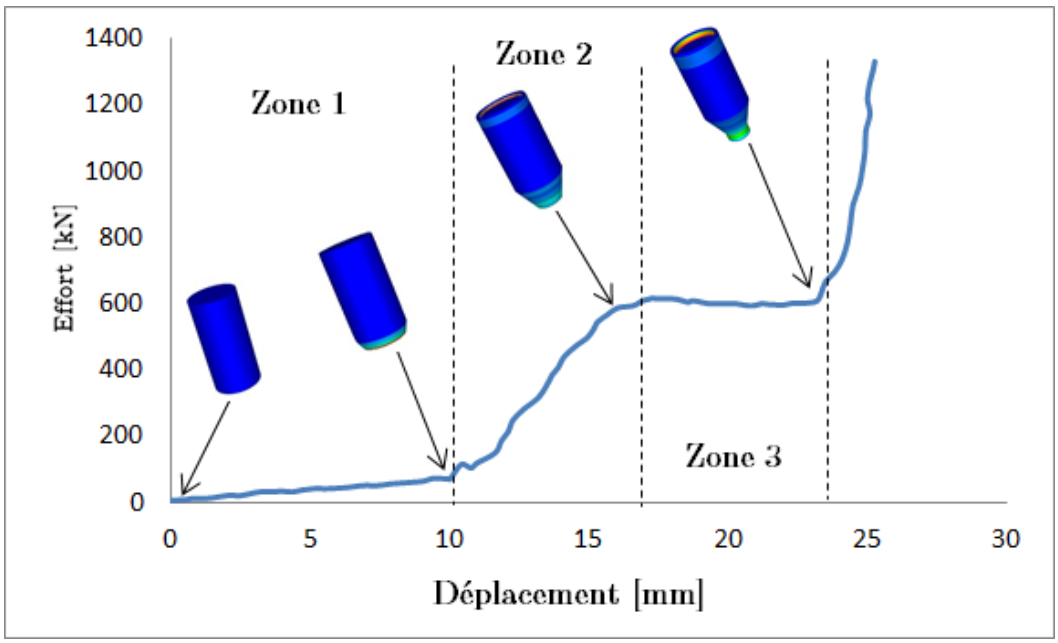


Fig.4.11 Représentation de l'évolution de l'effort en fonction du déplacement du coulisseau (Température = 1000°C, Lubrification : Huile + graphite, Longueur du lopin = 86mm).

Pour pouvoir déterminer les coefficients de frottement dans les différents essais, une acquisition de l'effort de la presse hydraulique a été faite, cette dernière a permis de déterminer la valeur de l'effort à un point donné de la courbe. Ensuite la seule variable inconnue qui restait à déterminer au niveau de la formule 4.6 est la contrainte d'écoulement. Cette dernière a été calculée en utilisant la formule de Spittel (équation 4.6). Les coefficients m_1, m_2, m_3 et m_4 sont connus pour le matériau utilisé. Les autres valeurs des paramètres rhéologiques ont été déterminées à l'aide de la simulation et de la superposition des courbes de simulations avec celles obtenues expérimentalement. La formule (4.6) représente une modélisation de la contrainte d'écoulement en fonction de la température (T), la déformation (ε) et la vitesse de déformation ($\dot{\varepsilon}$).

$$\sigma_0 = A.e^{m_1 T}.\varepsilon^{m_2}.e^{\frac{m_4}{\varepsilon}}.\dot{\varepsilon}^{m_3} \tag{4.6}$$

σ_0 (MPa) : Contrainte d'écoulement.
T (°C) : Température de la pièce.
ε : Déformation.
$\dot{\varepsilon}$ (s^{-1}) : Vitesse de déformation.
m_1, m_2, m_3, m_4 (mm) : Coefficient de modélisation variant en fonction du matériau utilisé.

Les résultats obtenus confirment ce qui a été déterminé par le SAD. Le paramètre clé le plus influent est la longueur initiale du lopin, ensuite la lubrification et en dernier la température. L'application du système d'apprentissage, suppose que les résultats du filage ont déjà été obtenus. Les résultats des mesures de la longueur A en appliquant le plan d'expérience sont illustrés dans la *Table.4.5*.

Essais	Longueur initiale [mm]	Température [°C]	Coefficient frottement	Longueur A [mm]
1	81	900	0,3	3,6
2	86	900	0,31	9,6
3	91	900	0,32	11,6
4	81	900	0,28	2,3
5	86	900	0,29	4
6	91	900	0,29	7
7	81	900	0,31	2,7
8	86	900	0,3	2,5
9	91	900	0,3	4,7
10	81	1000	0,31	4,5
11	86	1000	0,31	10,5
12	91	1000	0,33	12,3
13	81	1000	0,31	6,5
14	86	1000	0,29	10,1
15	91	1000	0,25	25
16	81	1000	0,3	4,2
17	86	1000	0,29	10,1
18	91	1000	0,28	16,7
19	81	1100	0,32	5,2
20	86	1100	0,3	14,6
21	91	1100	0,27	23,8
22	81	1100	0,33	4,2
23	86	1100	0,31	4
24	91	1100	0,26	20,7
25	81	1100	0,33	3,5
26	86	1100	0,32	5,8
27	91	1100	0,29	18,1

Table.4.5 Résultats du plan d'expérience appliqué dans le cas du filage direct (expérimental)

Calcul des corrélations

Les résultats du plan d'expériences précédent sont utilisés comme entrées du système d'apprentissage. Les étapes présentes dans le système d'apprentissage sont illustrées dans le chapitre II. La première étape consiste à calculer les corrélations des différentes données, le calcul de ces corrélations donne la matrice ci-dessous, cette dernière montre que les paramètres les plus influents sont la longueur initiale du lopin et la lubrification contrairement à la roulette où la lubrification n'avait pas une grande influence sur les

variables géométriques. Par contre la température initiale du lopin, avant forgeage, n'a pas une grande influence sur la variable produit A.

	Longueur	Température	Lubrification	Longueur (A)
Longueur	1	0	-0.48	0.71
Température	0	1	0.06	0.35
Lubrification	-0,48	0,06	1	-0.64
Longueur (A)	0,71	0.35	-0.64	1

Table.4.6 Matrice de corrélation obtenues dans le cas du filage

Détermination du modèle phénoménologique

La seconde étape consiste à utiliser les résultats obtenus afin de déterminer un modèle phénoménologique pour modéliser la variation de **A** en fonction des trois paramètres processus. Un modèle de puissance est utilisé, il est représenté dans la formule (4.7). La détermination des coefficients de modélisation est faite à l'aide de la régression linéaire en déterminant le vecteur x présent dans la formule (4.9). La matrice B représente la valeur des paramètres processus utilisés à chaque fois et le vecteur b représente la valeur de la variable **A** obtenue à chaque essai.

$$A = D\ .L^{\alpha}.T^{\beta}.\overline{m}^{\gamma} \tag{4.7}$$

$$\ln(A) = \ln(D) + \alpha.\ln(L) + \beta.\ln(T) + \gamma.\ln(\overline{m}) \tag{4.8}$$

$$B.x = b\ /\ x = \begin{pmatrix} \ln(D) \\ \alpha \\ \beta \\ \gamma \end{pmatrix} \tag{4.9}$$

Pertinence de contrôle

La troisième étape consiste à quantifier la pertinence de contrôle à l'aide des simulations Monte Carlo. Ces dernières vont quantifier la pertinence de contrôle des paramètres clés identifiés. L'intervalle de variation de la variable produit **A** doit être entre 5mm et 9mm. La *Fig.4.12* est obtenue en effectuant un certain nombre de tirages et en calculant les résultats via le modèle de puissance. Le calcul montre que si la température varie de 900°C à 1100°C, la longueur initiale de 81mm à 91mm et la lubrification de 0.2 à 0.4, la probabilité pour que la longueur **A** reste entre 5 et 9mm est de 62% donc il faut surveiller la lubrification pour éviter cette déviation.

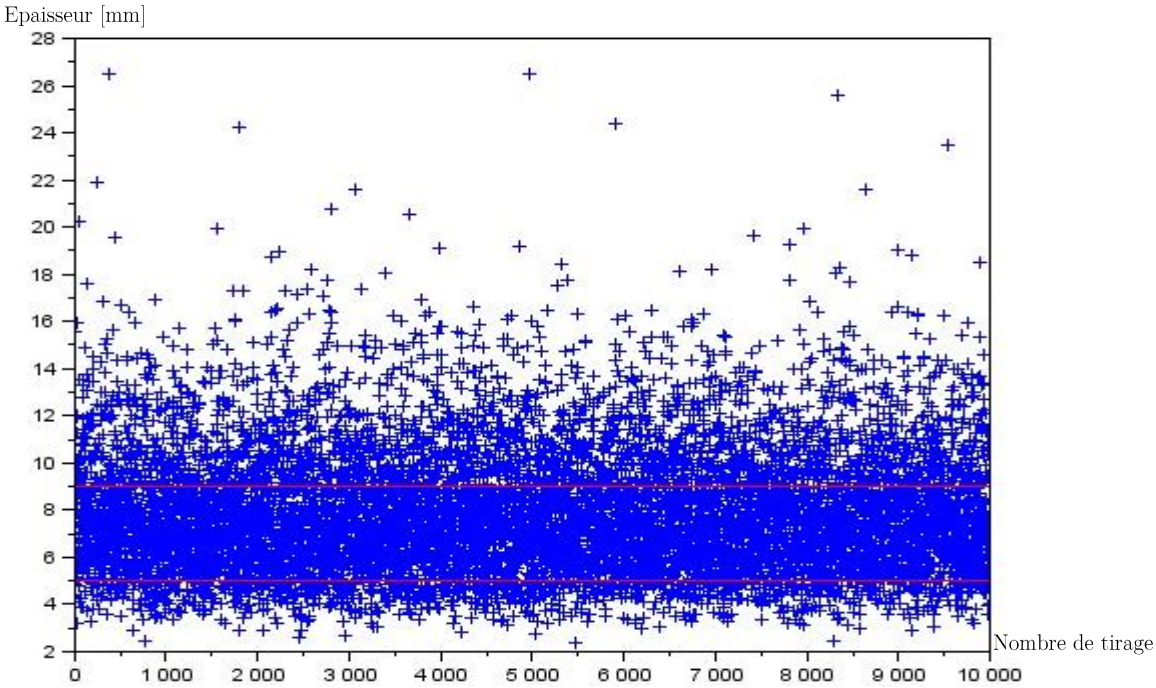


Fig.4.12 Représentation des longueurs A obtenues après la mise en place des simulations Monte Carlo, en utilisant le modèle de puissance (n= 10^4).

L'application du SAD montre que la connaissance experte peut être exploitée en amont de l'application du processus de forgeage. Il s'est avéré que les paramètres clés donnés par le SAD concordent avec les résultats retrouvés au niveau des plans d'expériences. Les étapes suivies après la mise en place du plan d'expériences montrent que les résultats de la surveillance peuvent servir dans la capitalisation et l'analyse des liaisons processus/produit. En effet lors de l'application des étapes existantes dans le SA, il s'est avéré que l'analyse des corrélations et la mise en place de modèles phénoménologiques peut renseigner le SAD. Ensuite la détermination de la pertinence est importante à prendre en considération en fonction de chaque cas d'étude.

La pertinence sert à indiquer s'il est utile de surveiller les paramètres processus pouvant créer des déviations au niveau du produit. Dans les deux cas traités, l'intervalle de variation souhaité des variables produit était assez restreint. Cet intervalle a donné comme résultat une nécessité de surveillance des paramètres clés. La surveillance peut être abandonnée si les intervalles de variation sont plus grands que ceux utilisés dans les exemples traités.

4.3. Résultats des simulations

Il s'est avéré à travers les deux cas d'études expérimentaux appliqués à l'estampage et au filage direct que le système d'aide à la décision est prédictif grâce à la connaissance capitalisée et renseignée par l'expert. Les deux plans d'expériences utilisés dans les essais expérimentaux sont repris en simulations numériques pour d'une part voir l'influence de chaque paramètre sur les variables produit et d'autre part savoir si les résultats des simulations peuvent être utilisés comme données à capitaliser au niveau du SAD. Les résultats des simulations sont transformés en règles métiers utilisables par le SAD ou bien sont renseignés au niveau de l'arbre de causes.

4.2.1. Dans le cas de l'estampage

La pièce utilisée en simulation est la même que celle représentée dans la *Fig.4.2*. Les simulations sont effectuées sur deux moyens de productions : Une presse hydraulique et un pilon. L'utilisation de deux moyens de production différents permet de vérifier si les paramètres clés varient en fonction des moyens de production même si le procédé reste le même.

4.2.1.1. Forgeage dans le cas d'une presse hydraulique

La variable produit surveillée au niveau du processus est l'épaisseur **E**. La presse est pilotée en effort, cela dit le coulisseau descend et s'arrête quand la presse atteint l'effort consigne introduit. Pour assurer le remplissage de l'empreinte en estampage, indépendamment de l'effort appliqué, des cales peuvent être utilisées. Dans ce cas l'effort introduit est l'effort maximal et les cales sont mises au niveau de l'outillage inférieur et servent à limiter le déplacement du coulisseau de la presse à une position donnée. Dans le cas d'une presse hydraulique, la méthodologie est mise en place sur les deux cas ci-dessous :

- Un cas où le travail ne se fait pas sur des cales, dans ce cas l'épaisseur va varier suivant les paramètres décrits au niveau du diagramme de cause (*Fig.4.4*)
- Un cas d'étude où des cales sont utilisées, dans ce cas il n'y aura pas de variation au niveau de l'épaisseur.

Les essais expérimentaux ont été appliqués sans cales, puisque les règles métiers renseignées par l'expert montraient que l'épaisseur ne varie pas si les cales sont

utilisées. Les simulations mises en place à l'aide des cales ont comme but de déterminer l'influence de la variation des paramètres processus sur l'outillage en termes d'usure.

Les paramètres opératoires sont représentés dans la *Table.4.7* . Un plan d'expériences a été utilisé avec 3 valeurs de chacun des deux paramètres processus ; la température (1000°C, 1100°C, 1200°C) et le coefficient de frottement $\overline{m}$ (0.1, 0.5, 0.8) suivant la modélisation de Tresca. La variable produit surveillée est l'épaisseur de la roulette. Les simulations en éléments finis sont effectuées en utilisant Forge 2011®.

La variation de la longueur n'a pas été prise en considération, au début, au niveau de la simulation puisque son influence a déjà été explicitée lors des essais expérimentaux. Néanmoins, des simulations complémentaires dans le cas du pilon ont été mises en place pour voir l'interaction qui peut exister entre la longueur initiale du lopin et la température.

Paramètres	**Valeurs**
Temps d'attente	10s
Température de l'outil	50°C
Matériau	20MnCr5
Dimension du lopin	26 ϕ & h=60mm
Vitesse de descente	30mm/s

Table.4.7 Paramètres opératoires utilisés dans la simulation du forgeage de la roulette.

Si les simulations de forgeage se font sur cale avec un effort illimité, l'épaisseur de la roulette ne varie pas. Par contre l'épaisseur varie si l'effort est limité à 2000kN. La variation au niveau de la longueur est observée quand la température et le frottement varient. La *Fig.4.13* illustre la variation de la variable produit en fonction de la température et du coefficient de frottement. La température influence l'effort nécessaire à la déformation.

Si la température diminue, l'effort nécessaire augmente puisque la matière a besoin de plus d'énergie pour se déformer. Si l'effort est constant, l'épaisseur augmente quand la température diminue. Le coefficient de frottement n'influence pas beaucoup l'épaisseur comparé aux autres paramètres. Mais l'effort requis augmente quand le frottement augmente. Les résultats de la simulation concordent avec ceux obtenus expérimentalement. En effet l'évolution de l'épaisseur en fonction du frottement et de la température est semblable aux résultats expérimentaux.

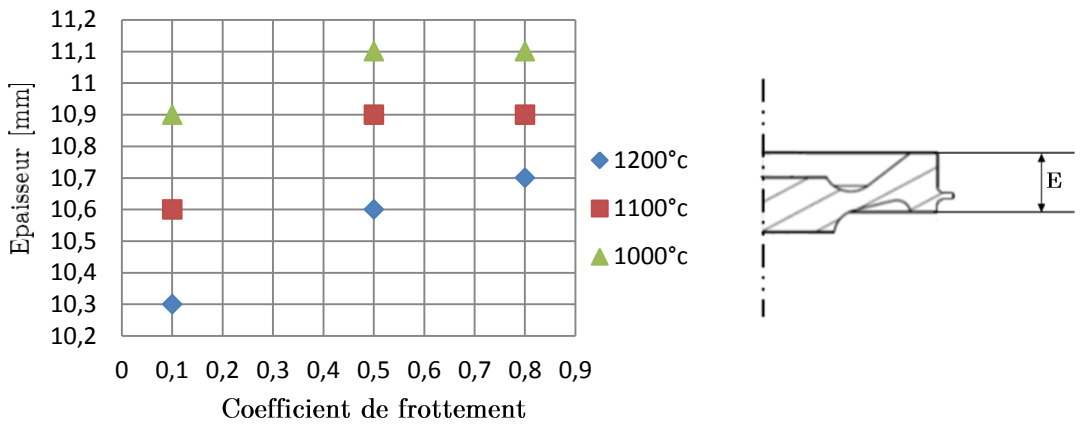


Fig.4.13 Variation de l'épaisseur en fonction de la température et du frottement (Loi de Tresca).

Quand le forgeage est fait sur des cales, l'effort varie en fonction de la valeur des paramètres processus appliqués. Les courbes d'efforts ont été analysées dans le même plan d'expériences, pour comparer la variation du flux de matière en fonction des variations des paramètres processus. La courbe d'effort est l'image de la variation des paramètres processus. En effet, la variation des paramètres processus a obligatoirement un effet sur les sorties du processus. Dans le premier cas, les variations des paramètres processus donnent lieu à une déviation au niveau de l'épaisseur du produit. Lorsque les cales sont utilisées, la déviation de l'épaisseur n'est pas observée, cependant ces variations ont certainement une influence au niveau des sorties processus. La courbe d'effort donne une image du processus et peut illustrer des déviations pouvant venir d'un non contrôle des paramètres processus.

La variation de l'effort en fonction de la descente du coulisseau est représentée sur la *Fig.4.14*, pour trois températures différentes. La différence entre les trois efforts semble faible. La différence entre les trois variations est observable entre 0 et 39.4mm, la *Fig.4.15* représente cet écart. L'effort nécessaire augmente avec la diminution de la température. Ceci est dû au fait que la contrainte d'écoulement augmente avec la diminution de la température. L'existence de deux pentes est due à l'ajout d'un temps d'attente avant le forgeage. La partie inférieure du lopin refroidit et ne s'écoule pas facilement. Cet écoulement retarde l'entrée en contact du matériau avec la partie inférieure de l'outillage.

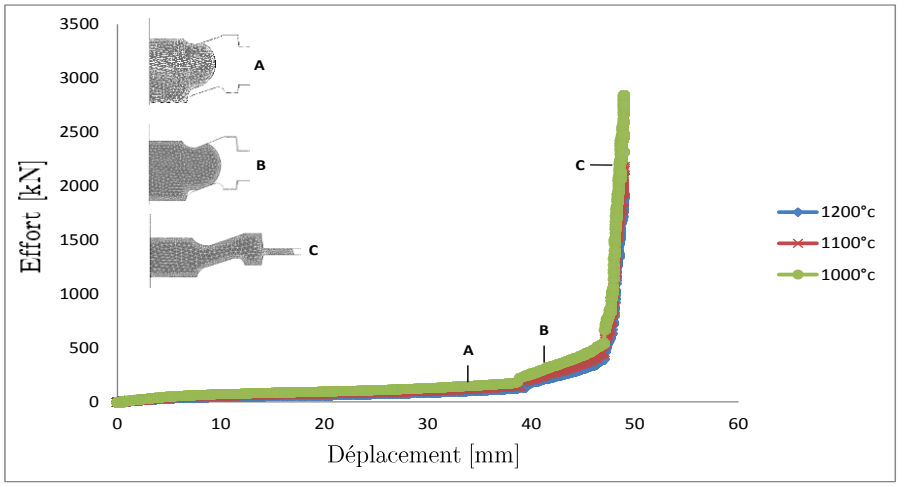


Fig.4.14 Variation de l'effort en fonction du déplacement du coulisseau (Coefficient de fortement de 0.1).

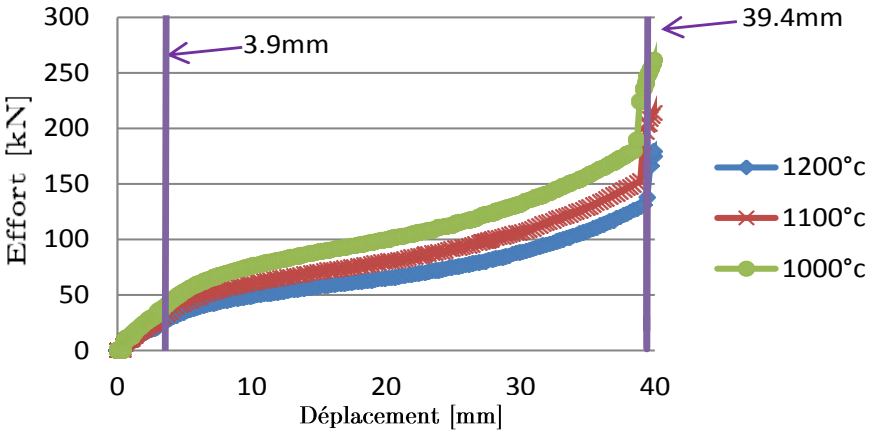


Fig.4.15 Courbe d'effort limitée à 40mm en déplacement (Coefficient de fortement de 0.1).

La variation de la température donne une variation de l'écoulement entre 0 et 39.4mm. La *Fig.4.16* illustre le déplacement de l'écoulement suivant l'axe x pour trois températures différentes, pour la même position du coulisseau. La pièce avec une température de 1200°C s'écoule plus au niveau de l'espace libre, ce qui crée un manque de matière au niveau de la zone P, contrairement aux autres pièces avec des températures plus faibles.

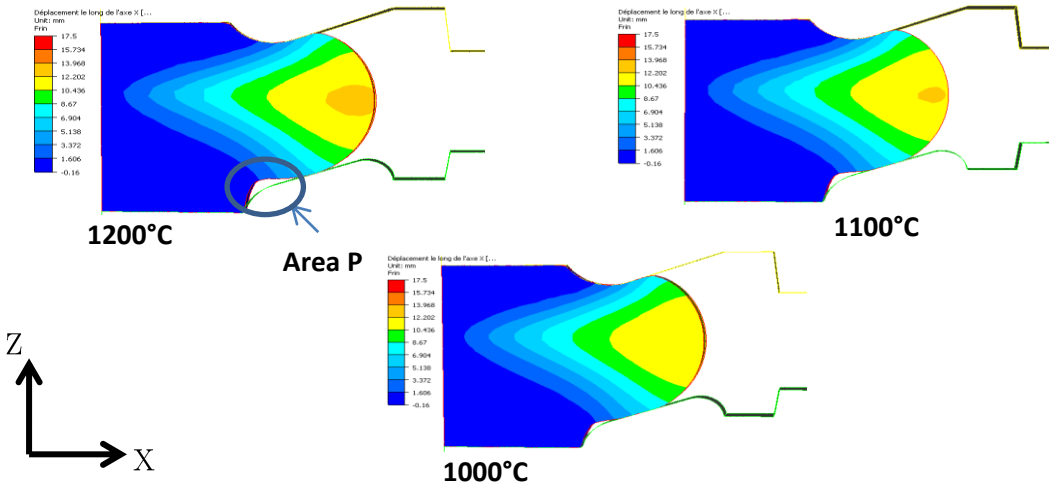


Fig.4.16 Déplacement de la matière suivant l'axe x (Ecoulement à la position 39.4mm).

Au niveau des simulations, il s'est avéré qu'un écart de 50kN au niveau de l'effort donne lieu à une usure au niveau de l'outillage. La *Fig.4.17* montre une estimation de l'usure entre 3 outils avec des mises en données différentes. Dans chaque cas, une température différente est utilisée lors du forgeage. L'usure de l'outillage est calculée à l'aide de la vitesse de glissement et la contrainte normale. Ce scalaire donne uniquement une estimation de la zone où l'usure de l'outil est plus forte, cela donne une information relative et une mesure qualitative. L'usure peut être évitée si la température de l'outillage est mieux maitrisée. La variation de la température donne une variation au niveau de l'usure : quand la température diminue, l'usure de l'outillage augmente. Donc finalement la variation de l'effort peut représenter un indicateur de l'augmentation de la température et par conséquent de l'usure.

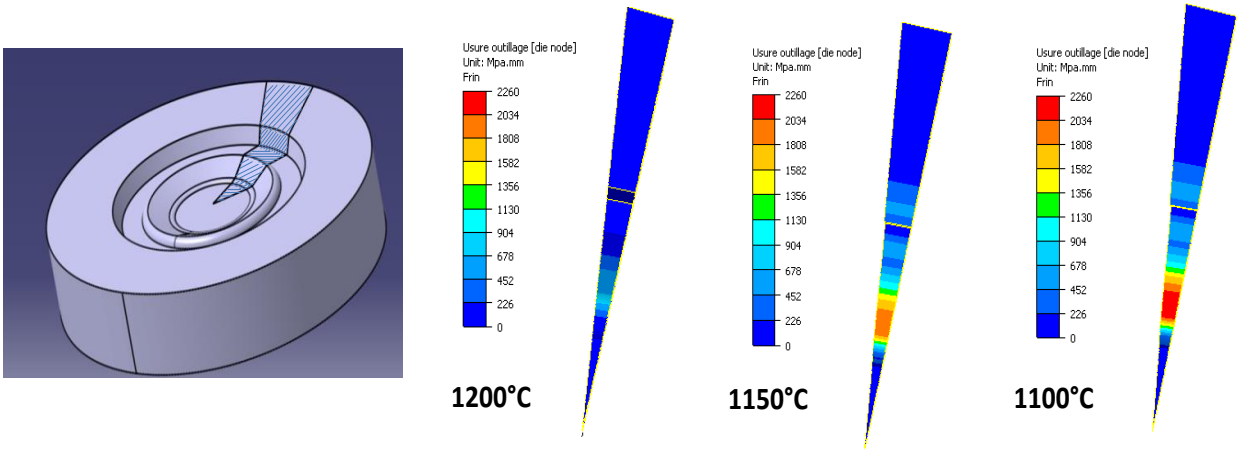


Fig.4.17 Usure de l'outillage dans le cas de trois températures différentes.

Dans le cas de la presse hydraulique, deux cas ont été traités :

- Travail sur cales : la variable produit ne varie pas quand les paramètres clés varient. La valeur de l'épaisseur sera toujours correcte si l'effort et l'énergie appliqués sont majorés. Cependant, la variation des paramètres clés a une influence sur l'usure de l'outillage. La courbe de l'effort dans le cas de la presse hydraulique peut être un bon indicateur d'une variation au niveau des paramètres clés et par conséquent au niveau de l'usure de l'outillage.
- Travail sans cales : La variation des paramètres clés donne une déviation de la variable produit surveillée dans le cas de la roulette (épaisseur).

4.2.1.2. Forgeage dans le cas d'un pilon

Le même plan d'expériences a été mis en place dans le cas d'un pilon. Pour travailler dans le cas d'un pilon, il faut utiliser l'arbre de causes général, ce dernier donne une idée sur les paramètres responsables de la variation de l'épaisseur. La seule branche qui va être enlevée est l'effort, puisque dans le cas de pilon l'effort n'est pas le paramètre opératoire mais l'énergie engagée. Les paramètres processus à surveiller dans ce cas sont la température de la pièce, la longueur initiale du lopin et la lubrification. La *Fig.4.18* montre l'arbre de causes utilisé et la branche supprimée.

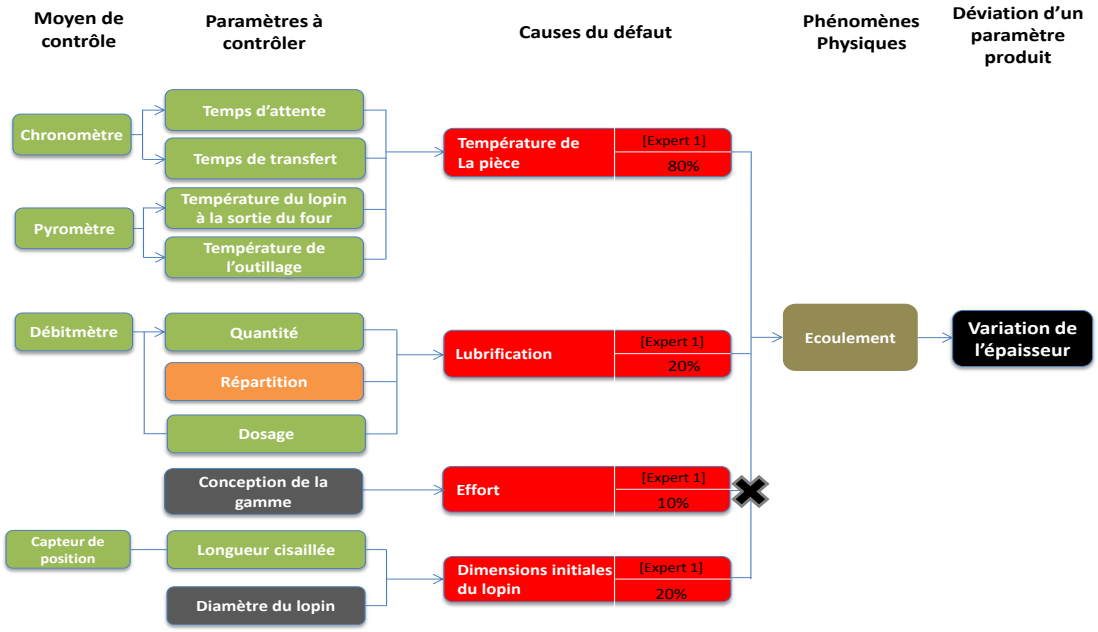


Fig.4.18 Arbre de causes dans le cas de la déviation de l'épaisseur de la roulette (cas d'un pilon)

Les conditions opératoires utilisées dans ces simulations sont représentées dans la *Table.4.8*. Un plan d'expériences est utilisé, avec 3 valeurs de chacun des paramètres processus : température (1000°C, 1100°C, 1200°C) et coefficient de frottement $\overline{m}$ (0.3, 0.6, 0.9). Les simulations sont effectuées à l'aide du logiciel Forge 2011®.

Paramètres	Valeurs
Nombre de frappes	3 (50%, 70% & 100%)
Temps d'attente	5s avant la première frappe et 3s après
Température de l'outillage	200°C
Matériau	20MnCr5
Dimension du lopin	ϕ26 & h=60mm
Energie max	6kJ
Poids	500kg

Table.4.8 Paramètres opératoires utilisés dans la simulation du forgeage de la roulette (Pilon).

La variation de l'épaisseur est observée quand la température varie (*Fig.4.19*). Cette dernière ne varie pas de façon considérable quand le coefficient de frottement varie. Une variation de la température de 100°C peut donner lieu à une variation de l'épaisseur de 0.6mm. Ceci prouve que la température est un paramètre clé à surveiller dans le cas d'un contrôle de l'épaisseur. Pour surveiller la température 4 paramètres processus doivent être surveillés selon le diagramme de cause (*Fig.4.4*); le temps d'attente, le temps de transfert, la température du lopin et la température de l'outil.

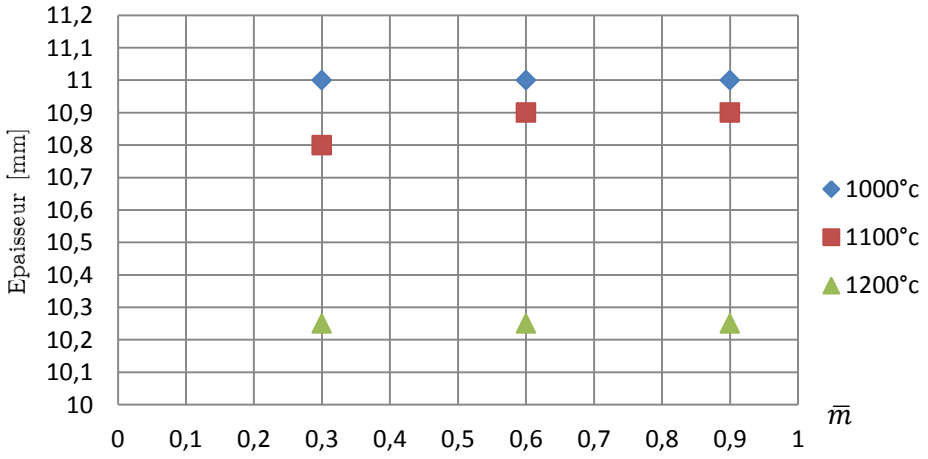


Fig.4.19 Variation de l'épaisseur en fonction du frottement ($\overline{m}$) et de la température.

Contrairement aux simulations appliquées sur la presse hydraulique, la longueur du lopin initial a été prise en considération lors des simulations sur pilon parce que les

essais expérimentaux n'ont pas été faits sur un pilon. Il est intéressant de voir l'influence de la variation de ces longueurs sur la variable produit. Dans le cas d'un pilon, la *Fig.4.20* représente la variation de l'épaisseur en fonction de la température et la longueur initiale du lopin.

La *Fig.4.20* montre qu'il y a une interaction entre la longueur initiale du lopin et la température ; quand la température varie, plus la longueur initiale est grande plus la déviation est grande au niveau de l'épaisseur. La longueur nominale est de 57mm, une variation de 2mm peut donner lieu à une déviation de 0.5mm dans l'épaisseur (longueur initiale de 59mm). La longueur inférieure à 57 mm donne moins de déviation au niveau de l'épaisseur quand la température varie, mais un manque de remplissage est remarqué sur les pièces forgées. Ceci montre que la température est un paramètre clé à surveiller.

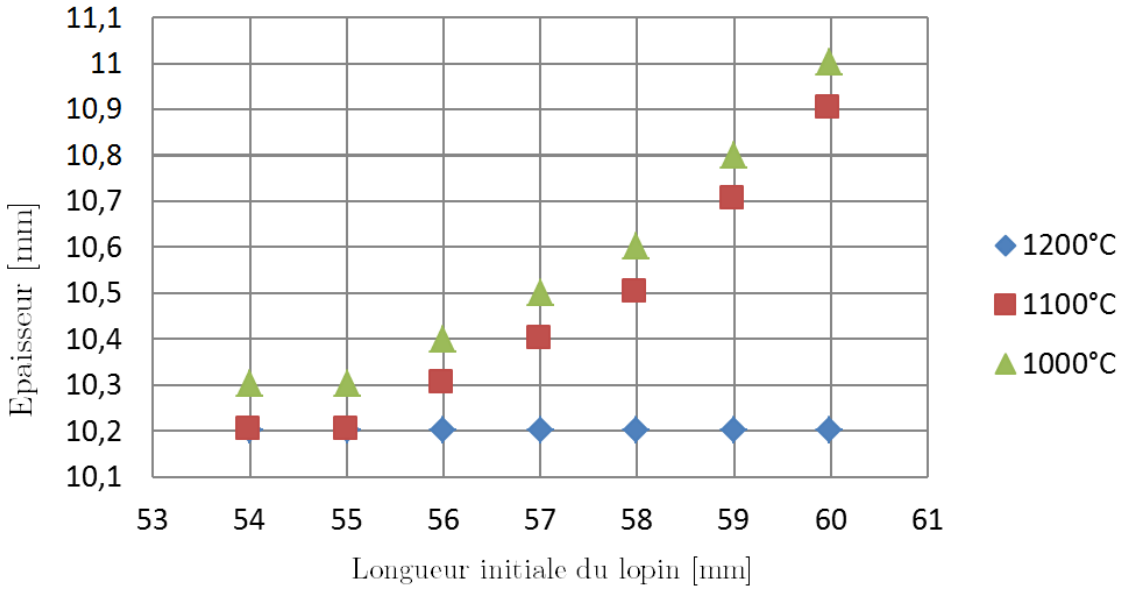


Fig.4.20 Variation de l'épaisseur en fonction de la longueur initiale et la température

Quand le pilon est utilisé, la variable produit (épaisseur) varie en fonction des paramètres clés identifiés par le SAD. L'influence du frottement sur l'épaisseur reste négligeable comparée à la température. Une variation de 0.5mm peut être obtenue s'il y a une variation au niveau de la température. L'influence de la longueur initiale du lopin varie en fonction de la température, et peut donner de grandes déviations si la différence de la longueur nominale est supérieure à 2mm. Les 4 paramètres liés à la température présents dans la *Fig.4.4* (le temps d'attente, le temps de transfert, la

température du lopin à la sortie du four et la température de l'outillage) doivent être surveillés pour éviter une variation de l'épaisseur, à savoir : la température du lopin à la sortie du four, le temps de transfert, la température de l'outillage et le temps d'attente. Dans ce cas-là la variation de la température peut représenter un bon indicateur de la variation de l'épaisseur, et le contrôle de la température est beaucoup plus simple à mettre en ligne qu'un contrôle du produit lui-même.

4.2.2. Dans le cas du filage direct

L'outillage de filage présent dans l'atelier de forge du LCFC donne des pièces avec un défaut. Ce défaut est sous la forme d'une remonté de matière due à un jeu très important entre le poinçon et le conteneur. Cette longueur **A** est représentée dans la *Fig.4.8*. Le but est d'analyser cette variable et les paramètres responsables de son apparition, ceci en gardant le même outillage. Comme expliqué dans la partie expérimentale, cette variable sert d'image du type d'écoulement obtenu ; plus la longueur est élevée plus la matière file dans l'outil. Des simulations ont été faites dans le but de mesurer numériquement la longueur **A** en travaillant sur : le frottement, la température et la longueur initiale du lopin. Le plan d'expériences utilisé est représenté sur la *Table.4.9*.

Longueur initiale [mm]	Température [°c]	Lubrification (μ)
(81 ; 86 ; 91)	(900 ; 1000 ; 1100)	(0.1 ; 0.3 ; 0.5)

Table.4.9 Plan d'expériences utilisé dans le cas du filage direct (simulations).

La première étape de la démarche consiste à extraire la matrice P (valeurs des 3 paramètres processus) et le vecteur S (valeurs de **A**). Ensuite, il faut calculer les corrélations entre les différents paramètres. La matrice de corrélation est représentée ci-dessous, cette dernière montre clairement que le paramètre le plus influent sur la longueur **A** reste la longueur initiale et le frottement.

	Longueur	Température	Lubrification ($\bar{m}$)	Longueur (**A**)
Longueur	1	0	0	0.96
Température	0	1	0	0.18
Lubrification ($\bar{m}$)	0	0	1	0.54
Longueur (A)	0.96	0.18	0.54	1

Table.4.10 Matrice de corrélation obtenue dans le cas du filage (simulations).

Ensuite, une modélisation phénoménologique a été appliquée pour pouvoir déterminer la valeur de **A** en fonction des différents paramètres. Le modèle utilisé est un modèle de puissance (Formule (4.10)). Ce dernier donne une erreur moyenne de 10%. Ce modèle est ensuite introduit dans l'algorithme de calcul de la méthode Monte Carlo pour pouvoir déterminer la pertinence de la surveillance de cette longueur. La *Fig.4.21* représente les points obtenus après calcul.

$$A = B.L_i^{\alpha}.T^{\beta}.\overline{m}^{\gamma} \tag{4.10}$$

Cas 1. Supposant que ce défaut crée un problème s'il est supérieur à 17mm. Le résultat montre que la probabilité que cette longueur soit supérieure à 17mm est de : 25%. Donc sa surveillance n'est pas très importante

Cas 2. Supposant que ce défaut crée un problème s'il est supérieur à 11mm. La probabilité que cette longueur soit supérieure à 11mm est de : 82%. Dans ce cas la surveillance de la lubrification doit être mise en place.

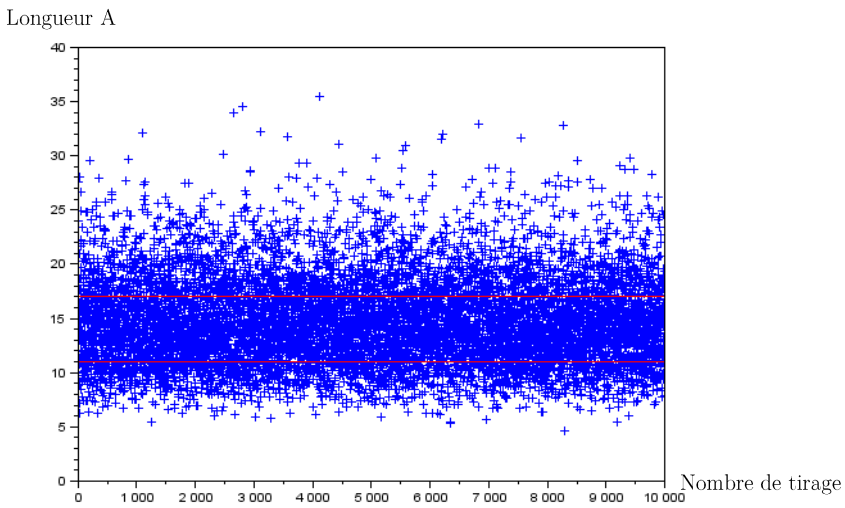


Fig.4.21 Longueurs A *obtenues en utilisant le modèle de puissance (10^4 tirages).*

Cette application au niveau du filage en simulation montre que le SAD donne les bons paramètres clés à surveiller, puisque le premier paramètre clé déterminé par le SAD a donné un coefficient de corrélation de 0.96. La modélisation phénoménologique donne une erreur maximale de 10%, ce qui est acceptable. Ce même modèle est utilisé dans la méthode MC pour déterminer la pertinence de contrôle des paramètres clés. Le

résultat montre que la pertinence de surveillance change en fonction de l'intervalle de variation voulu pour la variable produit.

4.4. Comparaison des résultats

Deux courbes d'effort obtenues dans le cas du filage et de l'estampage sont illustrées dans ce paragraphe. La comparaison des courbes obtenues numériquement et expérimentalement montre que la simulation arrive à prédire l'effort appliqué. La superposition des courbes d'effort numériques et expérimentales est faite à travers les *Fig.4.24* et *Fig.4.25*.

Dans les cas du filage, le même constat est fait au niveau de l'effort. Par contre au niveau des valeurs de la variable produit A, l'écart n'est pas très régulier entre les valeurs numériques et expérimentales. Ceci est dû à la dépendance de la variable produit au frottement qui n'est pas fixe et varie en fonction des conditions opératoires. La *Table.4.11* illustre l'écart existant entre les simulations et les essais expérimentaux.

	Paramètres			Estampage						Filage direct		
Essais	L	T	$\bar{m}$	Epaisseur [mm] (Expérimental)	Epaisseur [mm] (numérique)	Ecart	L	T	µ	Longueur A [mm] (Expérimental)	Longueur A [mm] (Numérique)	Ecart
1	52	900	0,46	10,2	10	0,2	81	900	0,3	3,6	6,8	3,2
2	56	900	0,46	10,7	10,58	0,12	86	900	0,31	9,6	10	0,4
3	60	900	0,46	11,1	11,15	0,05	91	900	0,32	11,6	16,7	5,1
4	52	900	0,19	9,9	10	0,1	81	900	0,28	2,3	3,8	1,5
5	56	900	0,19	10,5	10,63	0,13	86	900	0,29	4	6,5	2,5
6	60	900	0,19	10,8	11,27	0,47	91	900	0,29	7	15,3	8,3
7	52	900	0,2	10	10	0	81	900	0,31	2,7	1,6	1,1
8	56	900	0,2	10,5	10,68	0,18	86	900	0,3	2,5	3,6	1,1
9	60	900	0,2	10,9	11,25	0,35	91	900	0,3	4,7	12,4	7,7
10	52	1000	0,58	10	9,93	0,07	81	1000	0,31	4,5	13,6	9,1
11	56	1000	0,58	10,4	10,41	0,01	86	1000	0,31	10,5	19,8	9,3
12	60	1000	0,58	10,8	10,8	0	91	1000	0,33	12,3	27,2	14,9
13	52	1000	0,24	9,6	9,98	0,38	81	1000	0,31	6,5	8,1	1,6
14	56	1000	0,24	10	10,5	0,5	86	1000	0,29	10,1	13	2,9
15	60	1000	0,24	10,3	10,97	0,67	91	1000	0,25	25	27,3	2,3
16	52	1000	0,26	9,6	10	0,4	81	1000	0,3	4,2	2,4	1,8
17	56	1000	0,26	10	10,55	0,55	86	1000	0,29	10,1	7,9	2,2
18	60	1000	0,26	10,4	11	0,6	91	1000	0,28	16,7	23,1	6,4
19	52	1100	0,71	9,6	9,8	0,2	81	1100	0,32	5,2	21	15,8
20	56	1100	0,71	10	10,15	0,15	86	1100	0,3	14,6	30,8	16,2

21	60	1100	0,71	10,4	10,5	0,1	91	1100	0,27	23,8	38	14,2
22	52	1100	0,29	9,1	9,88	0,78	81	1100	0,33	4,2	12,9	8,7
23	56	1100	0,29	9,4	10,36	0,96	86	1100	0,31	4	18,8	14,8
24	60	1100	0,29	9,8	10,76	0,96	91	1100	0,26	20,7	41,5	20,8
25	52	1100	0,32	9,2	9,92	0,72	81	1100	0,33	3,5	2,2	1,3
26	56	1100	0,32	9,5	10,46	0,96	86	1100	0,32	5,8	10,9	5,1
27	60	1100	0,32	10	10,88	0,88	91	1100	0,29	18,1	36,6	18,5

Table.4.11 Comparaison des valeurs des variables produit dans le cas des deux procédés

Dans le cas de l'estampage, les simulations donnent les mêmes variations de l'épaisseur expérimentalement et numériquement, même s'il y a une différence entre les valeurs mesurées et celles obtenues numériquement. Cet écart peut être réglé en utilisant les résultats expérimentaux pour diminuer l'écart retrouvé numériquement. La *Fig.4.22* illustre la différence qui existe entre les variables produit observées dans les deux cas expérimentalement et numériquement. Les variables produit sont représentées en fonction des essais effectués.

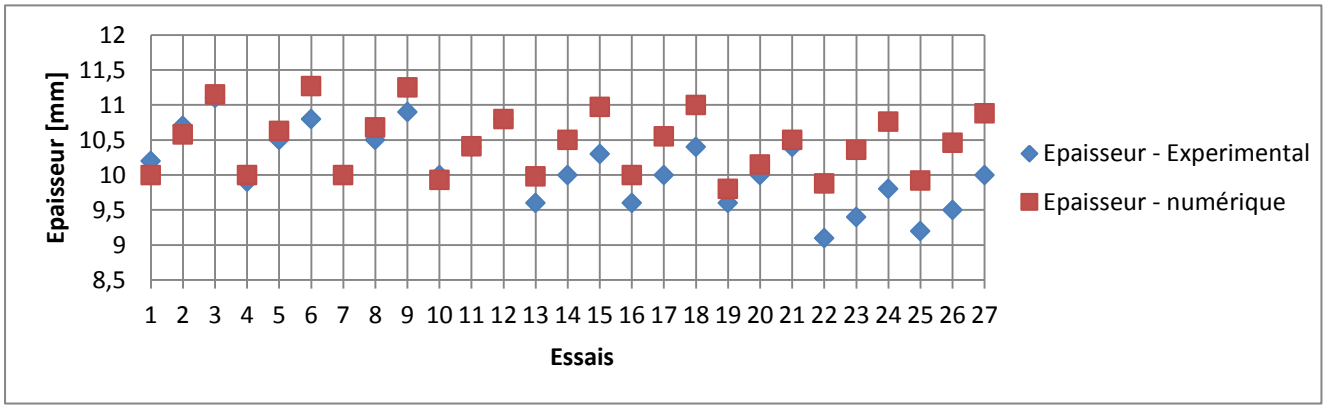


Fig.4.22 Comparaison des valeurs des variables produit obtenues numériquement et expérimentalement dans le cas de l'estampage.

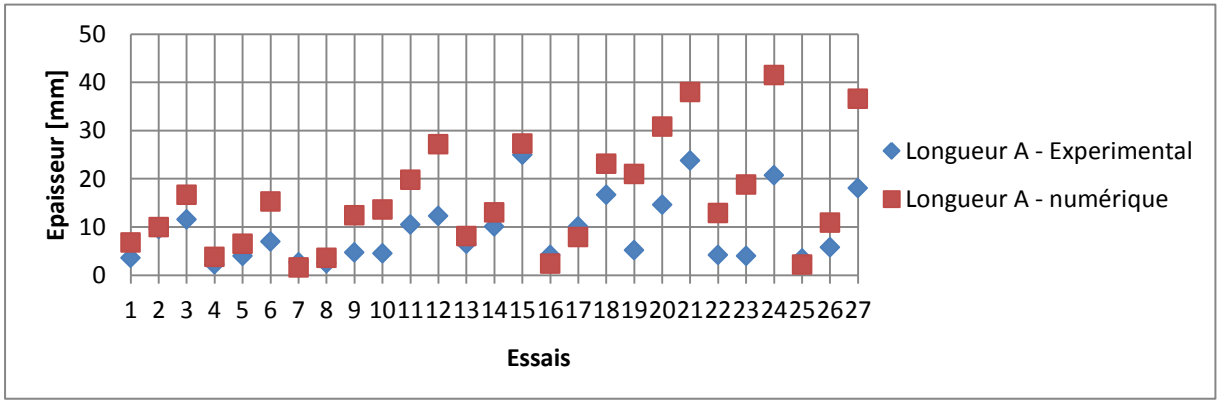


Fig.4.23 Comparaison des valeurs des variables produit obtenues numériquement et expérimentalement dans le cas du filage

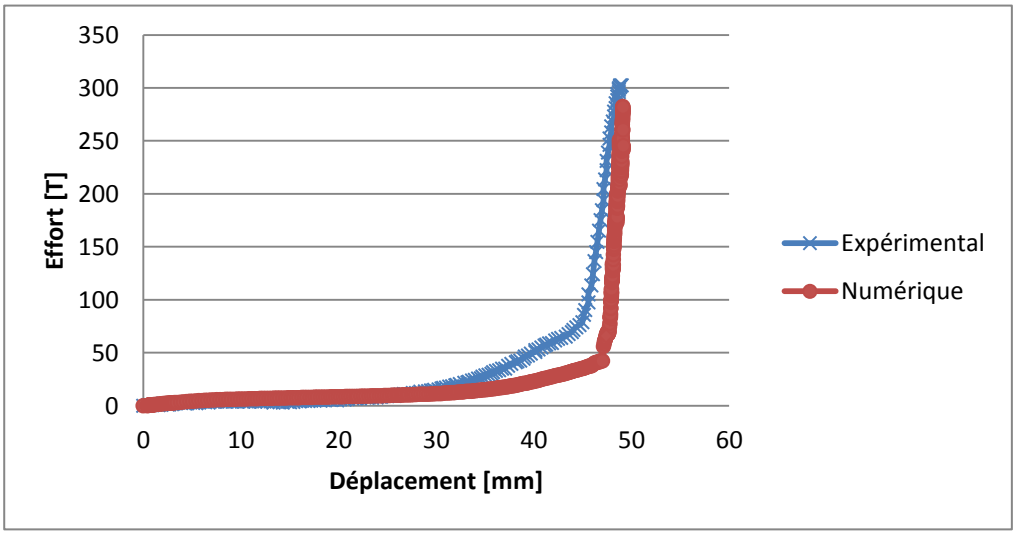


Fig.4.24 Comparaison entre la courbe d'effort obtenue expérimentalement et numériquement dans le cas de la roulette (T°=1000°C, m̄=0.2, L=60mm)

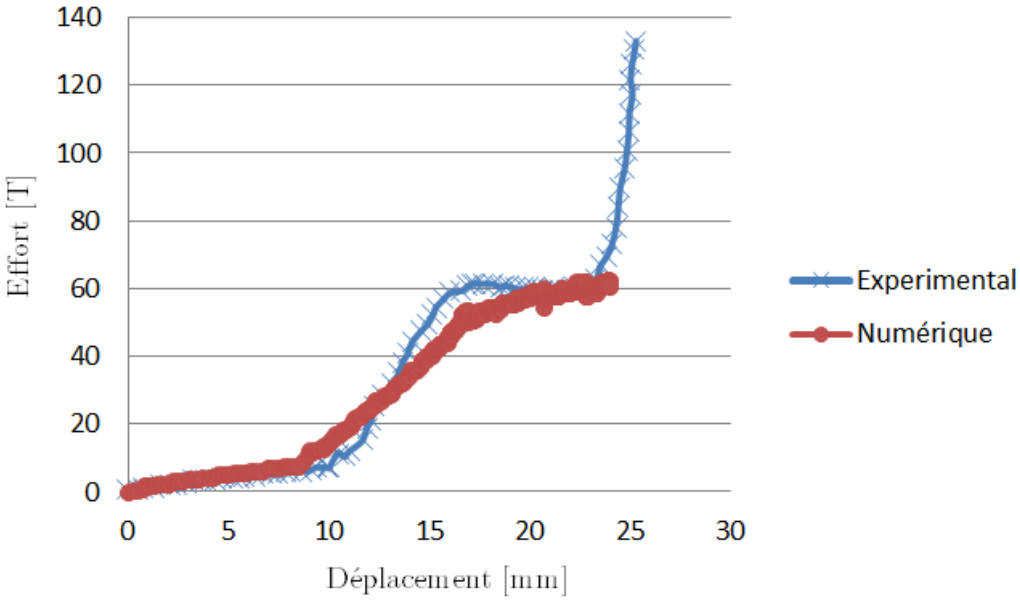


Fig.4.25 Comparaison entre la courbe d'effort obtenue expérimentalement et numériquement dans le cas du filage direct (T°=1000°C, μ=0.2, L=86mm)

Dans le cas de l'estampage, les résultats au niveau de l'épaisseur surveillée montrent que l'évolution des courbes obtenues expérimentalement et numériquement varient de la même façon. Les simulations arrivent aussi à prédire les paramètres clés responsables de la variation de l'épaisseur. Dans le cas du filage, l'évolution de la variable **A** en fonction des paramètres processus est la même, par contre il y a une grande différence au niveau de l'amplitude des longueurs, ce qui est dû aux hypothèses faites sur la

modélisation de la contrainte d'écoulement et du frottement. Donc pour assurer une bonne détermination des paramètres clés à l'aide des simulations, il faut avoir une bonne modélisation et connaissances des phénomènes liés aux frottements et à l'écoulement.

4.5. Conclusion

Les résultats obtenus au niveau des essais expérimentaux et numériques prouvent que le système d'aide à la décision est très utile. Les résultats montrent que la variation d'une variable produit, pouvant amener à un non-respect des spécifications, est très sensible à la variation des paramètres clés. L'influence exacte de ces paramètres n'est vérifiée que via le système d'apprentissage. Le système d'apprentissage montre d'une part que l'influence de chaque paramètre peut être quantifiée et d'autre part que le choix de la surveillance peut être fait au début en utilisant la méthode MC.

Dans le cas de l'estampage, l'utilisation ou non de cales conditionne les paramètres clés à surveiller. Dans le cas d'une utilisation de cales, il n'y a aucune déviation au niveau de l'épaisseur, mais la variation des paramètres processus crée une usure au niveau de l'outillage. Si la pièce est forgée sans cale, il faut surveiller la température, puisqu'elle influence directement l'épaisseur obtenue. Le frottement dans le cas de l'estampage a une influence presque nulle sur la variable produit surveillée.

Dans le cas du filage, les déviations au niveau du paramètre **A** surveillé dépendent de la longueur initiale du lopin, ensuite vient la lubrification et la température. Le paramètre à surveiller pour éviter une déviation du paramètre produit dans ce cas-là est la lubrification. La pertinence de la surveillance va varier en fonction de la zone ciblée au niveau de la valeur du paramètre **A**. Les résultats des simulations Monte Carlo peuvent être utilisés à n'importe quel moment pour estimer la pertinence de surveillance avec un pourcentage.

La comparaison entre le filage et l'estampage montre que les paramètres clés peuvent varier même si les moyens de production ne changent pas. Les modèles extraits de l'analyse faite par le système d'apprentissage permettent de changer l'emplacement du mesurande. En effet, dans un processus classique, les paramètres à surveiller seront directement liés au produit et c'est en fonction de ces mesures que le changement s'opère sur les paramètres processus. Par contre avec l'application de la méthodologie,

les mesurandes deviennent les paramètres processus et leur surveillance donne un contrôle indirect de la variable produit, ceci par l'intermédiaire des modèles phénoménologiques.

Les essais expérimentaux et numériques montrent que la connaissance de l'expert est très prédictive, ce qui prouve que sa formalisation est très utile. La formalisation de la connaissance se fait à travers des arbres de causes et des règles métiers exploités dans un SAD, ce dernier détermine les paramètres clés à surveiller avant de commencer la phase de forgeage. Dans le cas de l'estampage, le cas d'étude a été appliqué à la roulette pour voir l'influence de la température, le frottement et la longueur initiale du lopin sur un paramètre produit. La presse hydraulique peut être utilisée dans le cas de l'estampage de la roulette de deux façons :

- Sans cale : Quand les cales ne sont pas utilisées, le paramètre le plus influent au niveau de l'épaisseur est la température initiale du lopin, par contre le coefficient de frottement (lubrification) n'a pas une grande influence.
- Avec cales : Dans ce cas il n'y a pas de variations au niveau de l'épaisseur de la roulette quand les paramètres processus varient. Par contre la variation des paramètres processus comme la température peut donner lieu à une usure de l'outillage, comme ce qui a été démontré dans le cas des simulations sous Forge 2011®.

Dans le cas du filage direct, la presse hydraulique a été utilisée avec un outillage différent. Les paramètres clés déterminés par le SAD étaient la lubrification, la température et la longueur initiale du lopin. Pour quantifier le frottement utilisé, le coefficient de frottement μ a été déterminé en mesurant l'effort appliqué dans chaque essai. Les résultats de l'analyse montrent que les essais expérimentaux concordent avec les simulations, et le paramètre le plus influent dans le cas du filage est la lubrification.

Les cas d'étude montrent que les paramètres clés varient en fonction du procédé utilisé et des conditions opératoires. Les simulations mises en place prouvent que les règles métiers peuvent être extraites des plans d'expériences numériques. Pour un processus donné, les paramètres clés à surveiller varient en fonction du moyen de production et du procédé utilisés.

Conclusions et Perspectives

Cette étude a comme but de répondre à la question : Comment maitriser un processus existant de forgeage ? La première étape était d'analyser la bibliographie pour pouvoir mettre en place un état de l'art. La recherche bibliographique a permis de savoir qu'il existe un certain nombre d'outils qui répondent à cette question. L'analyse de ces différentes méthodes a permis de faire sortir leurs inconvénients. Les verrous à lever ont été déduits de l'analyse du besoin et des inconvénients de ces méthodes. La méthodologie propose la mise en place de deux systèmes accompagnant le système de forgeage. Le premier système est mis en amont du processus de forgeage (SAD) et le deuxième en avale (SA). Le **premier verrou** à lever était de pouvoir identifier les origines des déviations des variables produit en forgeage. En effet, pour pouvoir identifier l'origine des déviations des variables produit, un SAD est mis en place pour déterminer les paramètres clés à surveiller pour éviter une déviation. Le SAD utilise des outils, comme l'arbre de cause, qui relient les variables produit aux paramètres clés. Ce SAD est renseigné par l'expert et s'adapte au processus à l'aide du SA. Les entrées du SAD sont les spécifications initiales sur le produit, sur la gamme et les moyens utilisés. La mise en place de ce type de système permet d'avoir une maitrise sur le processus d'une part, mais aussi une capitalisation des connaissances non formelles.

Le **deuxième verrou** à lever était lié au gain de temps par rapport à une étude de cas donné. La mise en place d'un tel système permet non seulement de gagner du temps mais aussi d'avoir une liaison entre les différents cas traités. A travers les cas

d'études, il a été démontré que la connaissance de l'expert en forge est souvent prédictive, donc il est très utile de formaliser et utiliser ces règles métiers en amont de la fabrication. Le **deuxième verrou** concernait aussi la diminution de l'intervention de l'expert. L'expert est indispensable pour le système d'aide à la décision puisque c'est lui qui renseigne les outils d'analyse, mais son intervention devient moins considérable, puisque le SAD permet l'utilisation des données renseignées par l'expert et de trouver les liaisons entre les différents cas traités.

Une modélisation du processus de forgeage à travers des variables a été mise en place. Cette modélisation permet d'une part d'unifier le langage des deux systèmes utilisés, de simplifier le renseignement du SAD par l'expert, mais aussi de définir la source de déviation d'une variable produit à une étape donnée du processus. Cette modélisation permet aussi d'introduire les connaissances trouvées dans la littérature ou bien propres à l'entreprise d'une façon simple. Les valeurs des coefficients de modélisation et des indices de confiance de chaque outil sont renseignées par l'expert et leur nature et architecture sont définies par l'administrateur du SAD. La modélisation permet de répondre au besoin exprimé par le **troisième verrou**.

Le deuxième système proposé est le système d'apprentissage. Ce dernier a comme entrées les mesures sur les paramètres processus ainsi que sur les variables produit. Il utilise des algorithmes, pouvant changer, pour déterminer des lois reliant les paramètres processus aux variables produit et leurs corrélations. Ce système renseigne le SAD avec de nouvelles lois, aide à évaluer la maitrise faite sur le processus et permet de déterminer la pertinence de contrôle des paramètres en utilisant les simulations Monte Carlo. Le **quatrième verrou** était de mettre en place un outil utilisable pour n'importe quel processus. Le SAD, à lui seul, ne peut pas s'adapter à n'importe quel processus puisqu'il a besoin de l'expert à chaque fois, d'où l'utilité du système

d'apprentissage. En effet ce dernier rend le SAD plus flexible et adaptable aux différents processus ainsi qu'aux moyens de production utilisés en forgeage. La Fig.b.2 schématise l'emplacement des deux systèmes proposés par rapport au processus de forgeage.

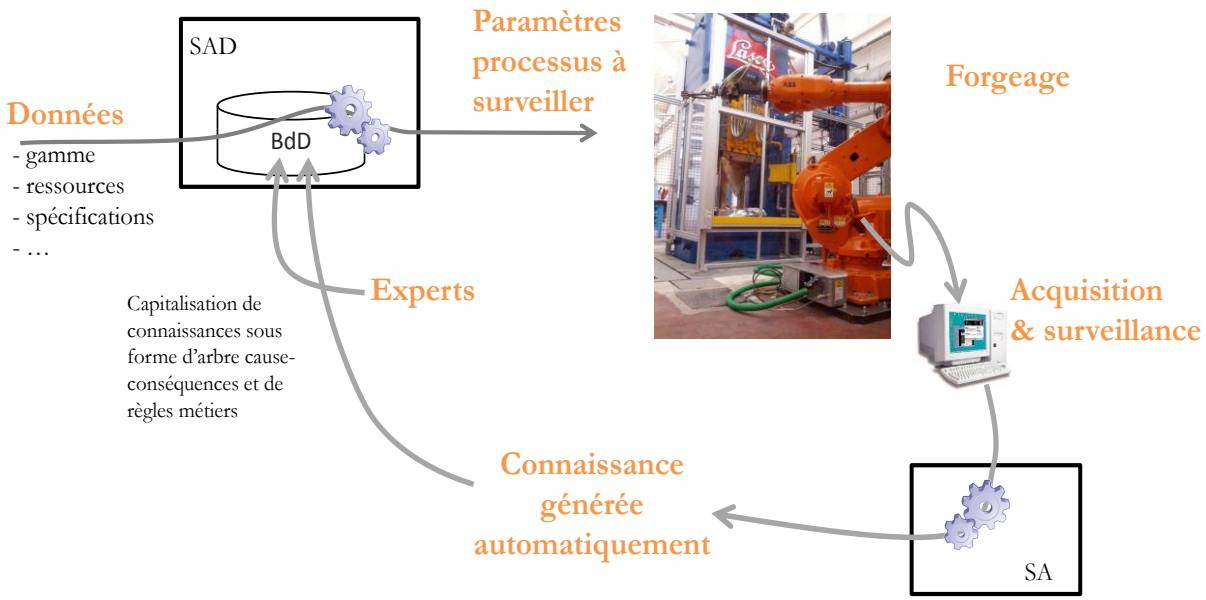


Fig.b.1 Schéma décrivant les deux systèmes utilisés et leur emplacement par rapport au processus de forgeage.

Cette méthodologie est appliquée dans le domaine de la forge, où le contrôle des paramètres processus est très difficile à mettre en place au vue de la quantité de paramètres entrant en jeu lors de la fabrication (température de la pièce, type de matériau, déformation, vitesse de déformation…). Elle peut aussi être utilisée dans d'autres domaines possédant des contraintes similaires, et où il n'y a pas de règles explicites pour définir les valeurs des paramètres clés assurant la maitrise du processus.

Plusieurs perspectives peuvent être proposées pour continuer le travail au niveau de la problématique de cette thèse. Au niveau du cas d'étude, la méthode de modélisation phénoménologique utilisée était la modélisation en puissance. Un outil comparatif des différentes modélisations peut être mis en place pour chaque cas traité.

L'analyse des différentes morphologies et des différents coefficients de complexité de forme a montré que les familles des pièces facilitent le choix des paramètres clés. Il est intéressant de déterminer le type de modélisation phénoménologique approprié à chaque famille de pièce forgée.

Un travail d'informatisation doit être mis en place, dans le but de créer une interface permettant d'acquérir et traiter les données d'une façon autonome. L'interface de renseignement du SAD par l'expert et par le SA doit être créer pour quantifier les difficultés de l'informatisation et des modifications futur de l'interface. Cette dernière permettra aussi de voir l'historique de la variation des lois et des paramètres clés.

Une énumération des différentes méthodes de mesure doit être faite. Celle-ci devrait permettre de déterminer les méthodes de mesure à utiliser pour chaque paramètre processus déterminé comme clé en fonction du procédé et des moyens de production utilisés. La pertinence de contrôle permet de déterminer l'utilité de surveillance d'une variable produit si les intervalles de variation des paramètres clés sont connus. Il serait intéressant aussi de pouvoir déterminer les intervalles acceptables de variation des paramètres processus en fonction de l'intervalle de variation de la variable produit.

Une autre perspective de travail est d'appliquer la méthodologie dans des conditions semi-industrielles au laboratoire LCFC. L'usure sera analysée en augmentant la série à fabriquer et en automatisant le transfert des pièces pour éviter les déviations dues aux temps de transfert et déterminer en même temps l'influence de la variation du temps de transfert sur la variable produit analysée. La *Fig.b.2* synthétise les verrous à lever, les travaux réalisés et les perspectives du travail.

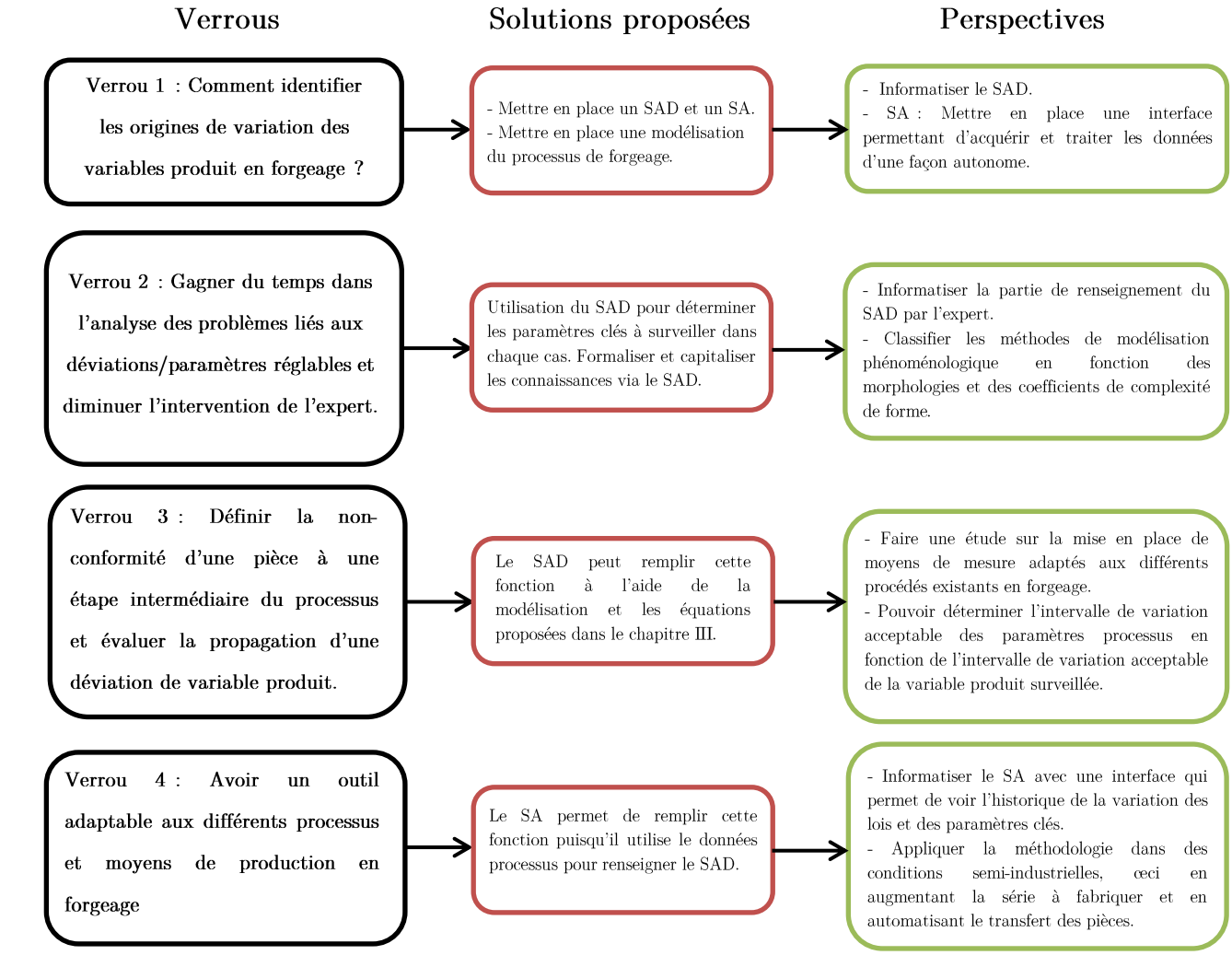


Fig.b.2 Synthèse des travaux réalisés.

Références Bibliographiques

[Allam 2013] Z. Allam, E. Becker, C. Baudouin, R. Bigot, P. Krumpipe, A generic methodology to improve the control of forging process parameters, Key Engineering Materials, Volume 554-557, Pages : 2138-2144, Année : 2013.

[Allam 2014] Z. Allam, E. Becker, C. Baudouin, R. Bigot, P. Krumpipe, Forging Process Control: Influence of Key Parameters Variation on Product Specifications Deviations, Procedia Engineering, Volume 81, Pages 2524–2529, Année : 2014

[AFNOR 82] Norme NF E 82-000 - "Forge par estampage et matriçage - Vocabulaire" - Association Française de Normalisation (AFNOR), 1984

[Al Mousawi 1992] AL-Mousawi M.M., Daragheh A.M., Ghosh S.K., Harrison D.K., Some physical defects in metal forming processes and creation of data base, J. Mater Process Tech., Vol : 32, Pages: 461-470, Année : 1992.

[Arentoft 1997] Arentoft M., Wanheim T., The basis for a design support system to prevent defects in forging, J. Mater Process Tech., Vol : 69, Pages : 227-232, Année : 1997.

[Bataille 2003] Bataille C., Technique de l'ingénieur : Laminage des produits longs-cylindres, calibrage, défauts, Référence : M7903, Année : 2003

[Baudouin 2006] Baudouin C., Contribution à la qualification d'un processus de fabrication par une approche dimensionnelle : application au pignon conique forgé dit "net shape", Thèse à l'école nationale supérieure des arts & métiers (Metz), spécialité : mécanique et matériaux, 2006.

[Becker 2008] Becker E., Investigations expérimentale et numérique pour l'identification des paramètres clés du procédé de thixoforgeage de l'acier sur le produit mis en forme, Thèse à l'école nationale supérieure des arts & métiers (Metz), spécialité : mécanique et matériaux, 2008.

[Belur 2004] Belur B.K., Ramana V.G., Geometric deviations in forging and cooling operations due to process uncertainties, J. Mater Process Tech., Vol : 152, Pages : 204-214, Année : 2004.

[Birkhäuser 1997] Birkhäuser, International Institution for Production Engineering Research, Dictionnaire des techniques de production mécanique, ISBN 3-540-60863-X, Année : 1997.

[Cadith 2011] Cadith J., Maillard S., Mathieu R., Détection de défauts de surface par thermographie-application aux pièces forgées-, La forge N°44, Avril 2011.

[CETIM 2009] CETIM, Classification des défauts de forge, ISBN:978-2-85400-901-9, Année : 2009.

[Cherfaoui 2006] Cherfaoui M., Techniques de l'ingénieur : Essais non destructifs, Références : BM6450, Année : 2006.

[Denape 2001] J. DENAPE, Science Friction – introduction à la tribologie, DEA sciences des matériaux, Année : 2001.

[Dico-compt 2006] Canadian Institute of Chartered Accountants, the Dictionnaire de la comptabilité et de la gestion financière version 1.2, Année : 2006.

[Dunod 2008] Dictionnaire encyclopédique des sciences des matériaux, DUNOD, ISBN 978-210-051216-4, Année : 2008.

[Duvallet 2001] Duvallet C., Des sytèmes d'aide à la décision temps réel et distribués : modélisation par agents, doctorat de l'université du Havre, Année : 2001.

[E 60-181] Norme E 60-181, " Moyens de production - Conditions de réception - Méthode d'évaluation de l'aptitude à réaliser des pièces" – Association Française de Normalisation (AFNOR), Année : 2001.

[EN-10243-1] Norme européenne NF EN 10243-1 Pièces forgées par estampage en acier, Tolérances dimensionnelles. Partie 1 : Pièces exécutées à chaud sur marteaux-pilons ou presses verticales, Année : 1999.

[Feng 2000] Feng J.P., Luo Z.J., A method for the optimal control of forging process variables using the finite element method and control theory, J. Mater Process Tech., Vol : 108, Pages : 40-44, Année : 2000.

[Ferraloy 2011] Ferraloy, http://www.ferralloy.com/forging_glossary.htm (consulté le 11/11/2011).

[Garcia 2005] Garcia C., Artificial intelligence applied to automatic supervision, diagnosis and cotrol in sheet metal stamping processes, J. Mater Process Tech., Vol : 164-165, Pages : 1351-1357, Année : 2005.

[Ge 2004] Ge M., Du R., Xu Y., Hidden Markov Model based fault diagnosis for stamping processes, Mechanical systems and signal processing, Vol :18, Pages : 391-408, Année : 2004.

[Ghosh 1980] Ghosh S.K., Principally on sheet metal forming defects as described in the eleventh biennial congress of the international deep drawing research group (IDDRG), Pergamon Press LTD, Année : 1980

[Gijo 2011] Gijo E.V., Scaria J., Antony J., Application of six sigma methodology to reduce defects of a grinding process, , quality and reliability engineering international, wiley online library, Vol : 27 Pages : 1221-1234, Année : 2011.

[Gonzaga 2009] Gonzaga J.C.B., Meleiro L.A.C., Kiang C., Maciel Filho R., ANN-based soft-sensor for real-time process monitoring and control of an industrial polymerization process, computers and chemical engineering, Vol : 33, Pages : 43–49, Année : 2009.

[Gum 2008] ISO Guide JCGM 100:2008 GUM 1995 avec des corrections mineures. Évaluation des données de mesure — Guide pour l'expression de l'incertitude de mesure.

[He 2008] He X., Yu Z., Lai X., Robust parameters control methodology of microstructure for heavy forgings based on taguchi method, journal of materials and design, Vol : 30, Pages : 2084-2089, Année : 2008.

[Jorgensen 1995] Jørgensen F., Overview of function modeling – IDEF0, Information Management in Computer Integrated Manufacturing, Vol : 973, Pages : 340-354, Année : 1995.

[Kalos 1986] Kalos MH, Whitlock PA (1986), "Monte Carlo methods". John Wiley and Sons, New York.

[Kong 2002] Kong L.X., Nahavandi S., 2002. On-line tool condition monitoring and control system in forging processes. J. Mater Process Tech., Vol : 125, Pages : 464-470, Année : 2002.

[Kopp 1998] Lee Y.H., Kopp R., Application of fuzzy control for a hydraulic forging machine, Fuzzy Sets and Systems, Vol : 118, Pages 99-108, Année : 1998

[Lecoz 2001] AG 1 771 Méthodes et outils de la qualité -Nouveaux outils, Edmond LE COZ, Année : 2001.

[Lee 2001] Lee Y.H., Kopp R., Application of fuzzy control for a hydraulic forging machine, Fuzzy Sets and Systems, Vol : 118, Pages : 99-108, Année : 2001.

[Maijer 2000] Maijer D.M., Wells M.A., Cockcroft S.L., Luciuk T., Hermesmann C., 2000. Mathematical modelling of porosity formation in dice cast A356 wheels. In: Proceedings of the 39th Conference of Metallurgists. CIM, Ottawa, ON, p. 14.

[Maijer 2009] Maijera D.M., Owenb W.S., Vetter R.A., An investigation of predictive control for aluminum wheel casting via a virtual process model, J. Mater Process Tech., Vol : 209, Pages : 1965–1979, Année : 2009.

[Maillard 2010] Maillard S., Cadith J., Eschimese D., Walaszek H., Candore J.C., Bodnar J.L., Towards the use of passive and active infrared thermography to inspect metallic components in the mechanical industry, QIRT congress proceedings, Laval (Quebec), 2010.

[Malas 1998] Malas J.C., Frazier W.G., Intelligent control strategies for Metal forging processes, Materials & Manufacturing Dierectorate, Air force research laboratory, wright – Patterson Air Force Base, Ohio 45433, USA, Pages 7:1 – 7:10, Année : 1998.

[Maldague 1996] Maldague X., Marinetti S., Pulse Phase Infrared Thermography, J. Appl. Phys., Vol : 79 Pages: 2694-2698, Année : 1996.

[Mangin 2012] Mangin P., Identification des paramètres clés du laminage transversal : vers la formalisation des connaissances scientifiques et technologiques, Thèse à l'école nationale supérieure des arts & métiers (Metz), spécialité : Mécanique et matériaux, 2012.

[Mousawi 1992] AL-Mousawi M.M., Daragheh A.M., Ghosh S.K., Harrison D.K., Some physical defects in metal forming processes and creation of data base, J. Mater Process Tech., Vol : 32. Pages: 461-470, Année: 1992.

[MSP 1992] Norme X06-030, Guide pour la mise en place de la Maîtrise Statistique des Processus, 1992.

[NF 5725] Norme NF ISO 5725-1 (1994-12-01) Application de la statistique - Exactitude (justesse et fidélité) des résultats et méthodes de mesure - Partie 1 : principes généraux et définitions. (2ème tirage - 2000-06-01).

[NF EN ISO 10628] Norme NF EN ISO 10628, "Schémas de procédé pour les unités de fabrication/de production" – Association Française de Normalisation (AFNOR), Année : 2002.

[NF EN ISO 9000] Norme NF EN ISO 9000 V2000, "Systèmes de management de la qualité Principes essentiels et vocabulaire" (AFNOR), Année : 2005.

[NF ISO 13053-1] Norme NF ISO 13053-1, Méthodes quantitatives dans l'amélioration de processus - Six Sigma – Partie 1 : Méthodologie DMAIC, Année : 2011.

[Office-Qu] Office québécois de la langue française, http://gdt.oqlf.gouv.qc.ca (consulté le 10 octobre 2012)

[Ohdar 2003] Ohdar R.K., Pasha S., Prediction of the process parameters of metal powder preform forging using artificial neural network (ANN), J. Mater Process Tech., Vol : 132, Pages : 227-234, Année : 2003.

[Pajani 1989] Pajani D., Mesure par thermographie infrarouge, Chap.1 – Introduction, p. 11, ISBN 2-9504171-0-8, Année : 1989.

[Pernot 1993] Pernot M., Filage de l'acier et des métaux difficiles à déformer, technique de l'ingénieur m640, Année : 1993.

[Pillet 1993] PILLET M., Contribution à la Maîtrise Statistique des Procédés - Cas particulier des petites séries - Thèse en Sciences de L'ingénieur - Univ. Savoie – Année : 1993

[Pillet 1994] Pillet M. « introduction aux plans d'expériences par la méthode taguchi »Ed. Les editions d'organisation université - 1994

[Pomerol 1990] J.C. Pomerol, Système experts et SIAD : enjeux et conséquences pour les organisations, TIS, Vol : 3, N°1, Pages : 38-64. Année : 1990.

[PhridviRaja 2014] PhridviRaja M.S.B., GuruRaob C.V., Data mining – past, present and future – a typical survey on data streams, Procedia Technology, Vol : 12, Pages : 255 – 263, Année : 2014.

[Rallo 2002] Rallo R., Ferre-Gine J., Arenas A., Francesc G., Neural virtual sensor for the inferential prediction of product quality from process variables, computers and chemical engineering, Vol : 26, Pages : 1735-1754, Année : 2002.

[Rambaud 1988] Rambaud J.B., Forgeage libre de l'acier, Techniques de l'ingénieur, Référence : M620, Année : 1988.

[Riout 1994] Riout J., Le guide de l'AMDEC Machine (CETIM), ISBN 2-85400-321-8, Année : 1994.

[Sahoo 2008] A.K. Sahoo, M.K.Tiwari, A.R. Mileham, Six sigma based approach to optimize radial forging operation variables, J. Mater Process Tech., Vol : 202, Pages : 125-136, Année : 2008.

[Sprague 1987] Sprague R.H., DSS in context. Decision support system, Vol : 3, Pages : 197-202, Année : 1987.

[Sudesh 2002] M.D. Sudesh, R.Chhabra, Learning systems and their applications: future of strategic expert system, IACIS, Année : 2002.

[Thevenet 1990] Pierre Thevenet, Technique de l'ingénieur: Mise en forme de l'acier par estampage, Référence M710/10, Année : 1990.

[Thibault 2008] Thibault A., Contribution à l'intégration Produit-Processus de fabrication, application au domaine de la forge, Thèse à l'école nationale supérieure des arts & métiers (Metz), spécialité : Génie industriel, 2008.

[Xia 2002] Xia K.L., S.Nahavandi, On-line tool condition monitoring and control system in forging processes, J. Mater Process Tech., Vol : 125, Pages : 464-470, Année : 2002.

[Yager 1987] Yager R.R. (ED.), Fuzzy Sets and Applications: Selected Papers by L. Zadeh, Wiley, New York, Année : 1987.

[Zani 2004] Zani M.L., Le télémètre laser mesure les pièces de forge à chaud... à 5 mm près. Mesures, n°761, Pages : 51-54, Année : 2004.

Annexe

Annexe A: Productions Scientifiques

Articles

Z. Allam, E. Becker, C. Baudouin, R. Bigot, P. Krumpipe, A generic methodology to improve the control of forging process parameters, Key Engineering Materials, Volume 554-557, Pages : 2138-2144, Année : 2013. **(Publié)**

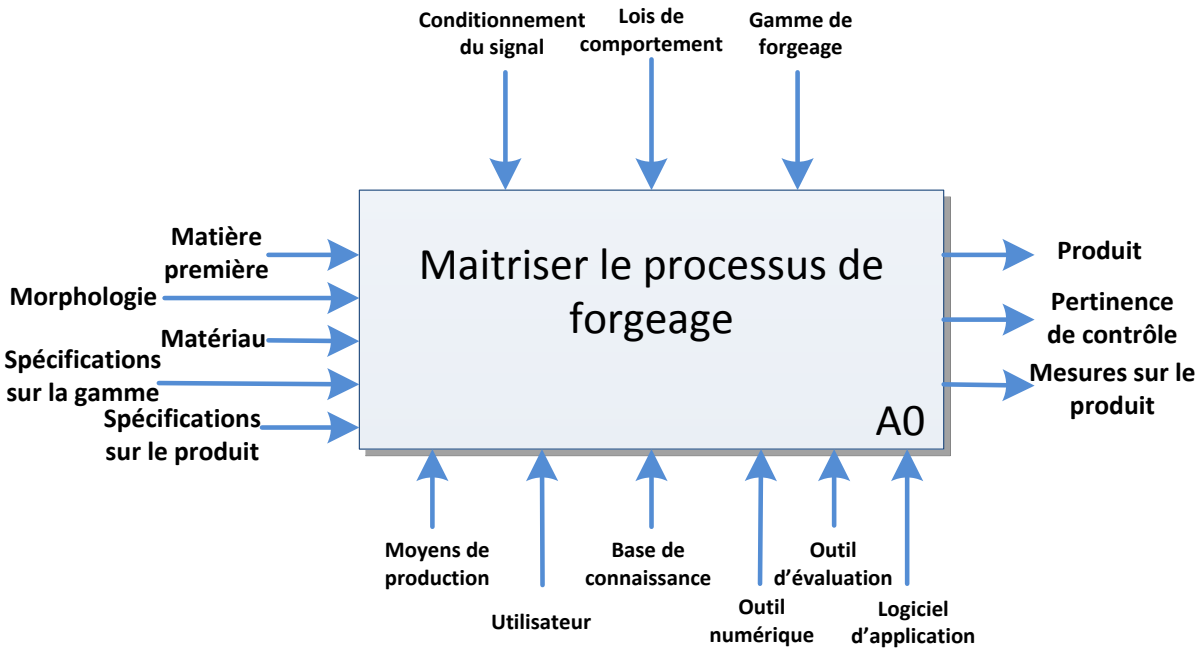
Z. Allam, E. Becker, C. Baudouin, R. Bigot, P. Krumpipe, Forging Process Control: Influence of Key Parameters Variation on Product Specifications Deviations, Procedia Engineering, Volume 81, Pages 2524–2529, Année : 2014 **(Publié)**

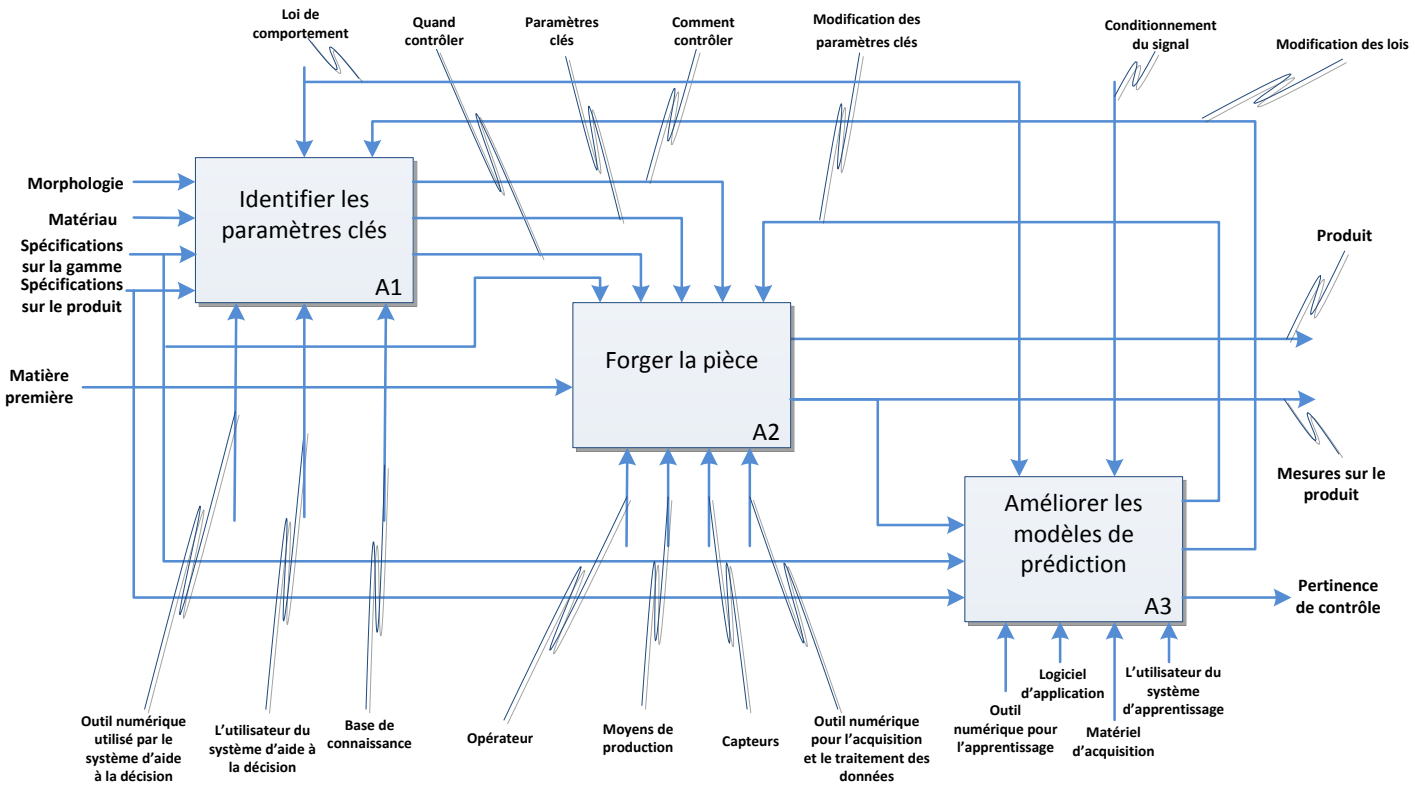
Z.allam, E.Becker, C.Baudouin, R.Bigot, P.Krumpipe, A methodology to improve the forging process control in order to master the means of production, Journal of Engineering Manufacture, 2014 **(Soumis)**

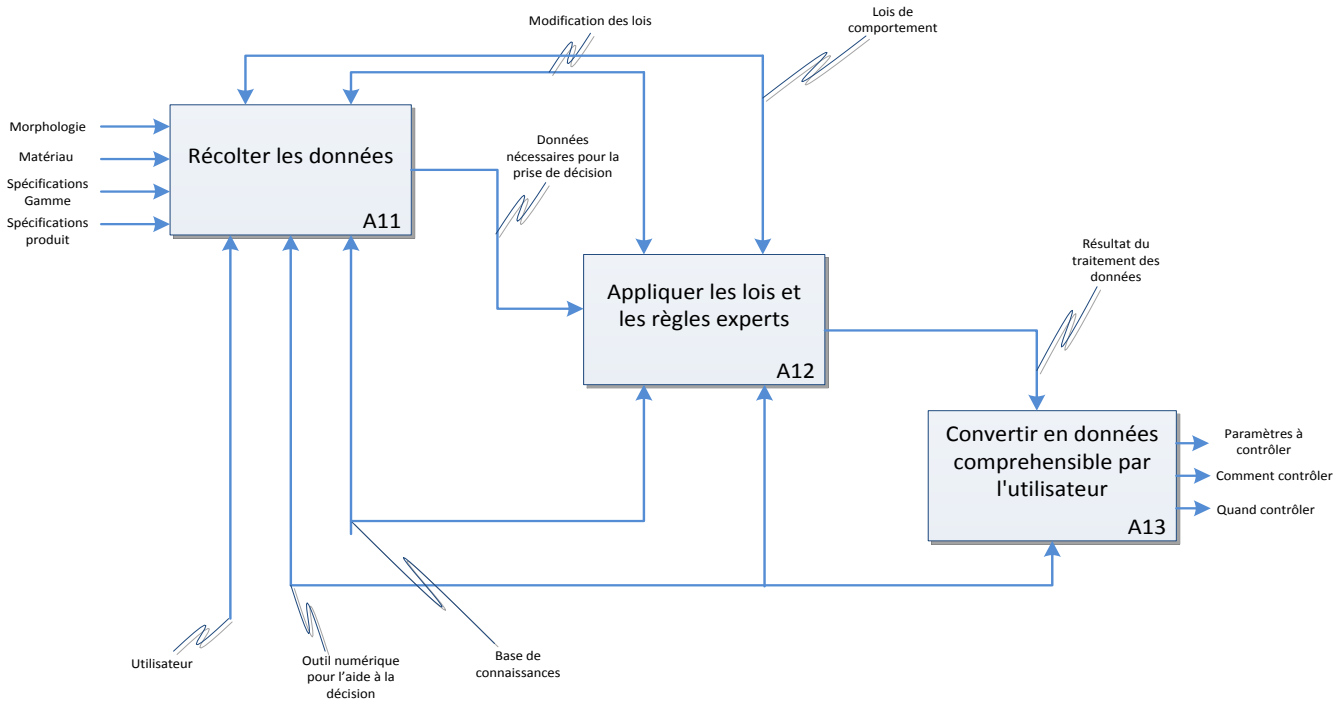
Conférences

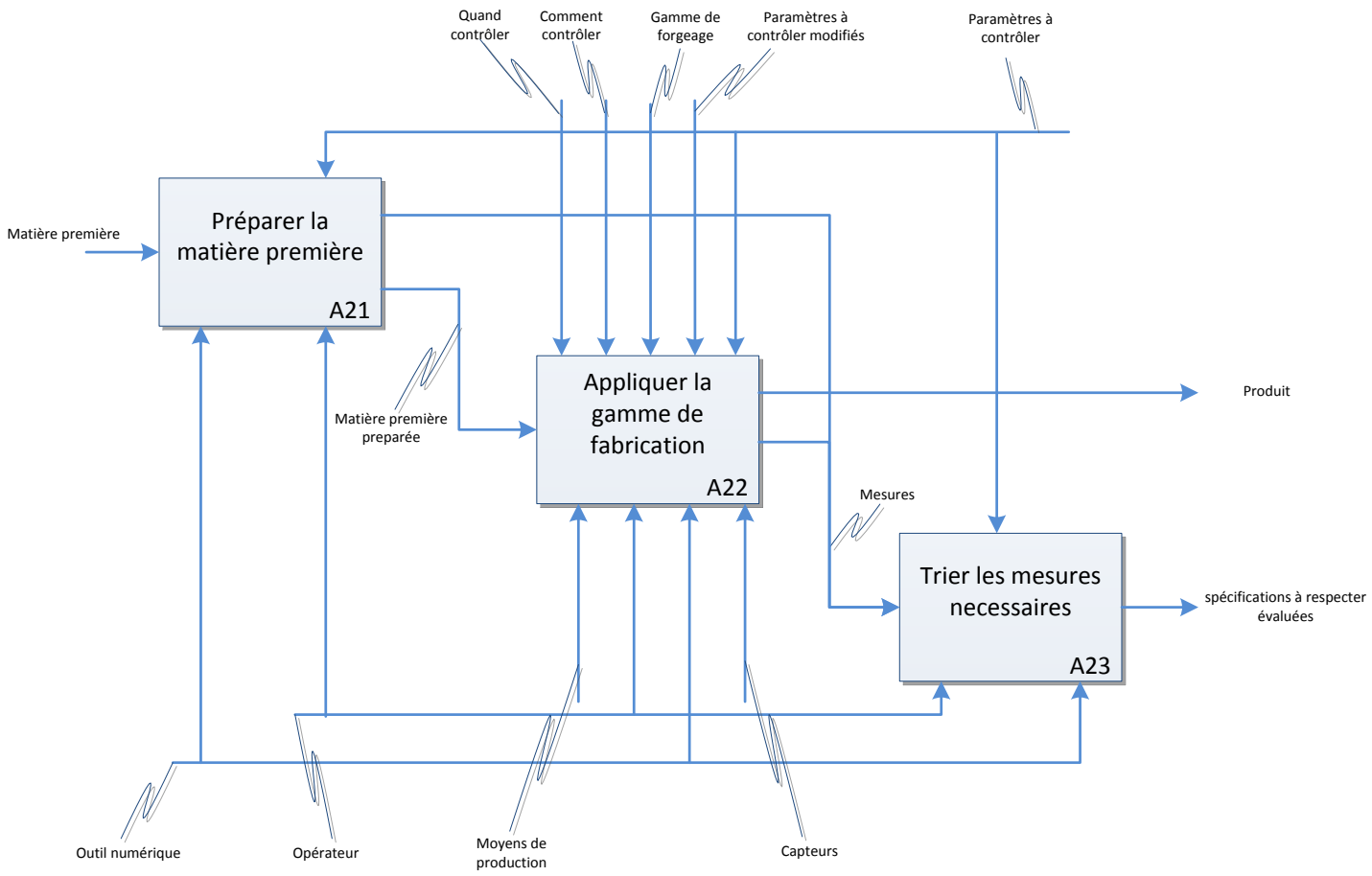
16th annual ESAFORM Conference on Material Forming (Aveiro - Portugal)
22-24 Avril 2013
Journée de la forge à chaud (Saint-Etienne France)
10 Avril 2014
11th International Conference on Technology of Plasticity (Noagoya – Japan), ICTP
19-24 October 2014

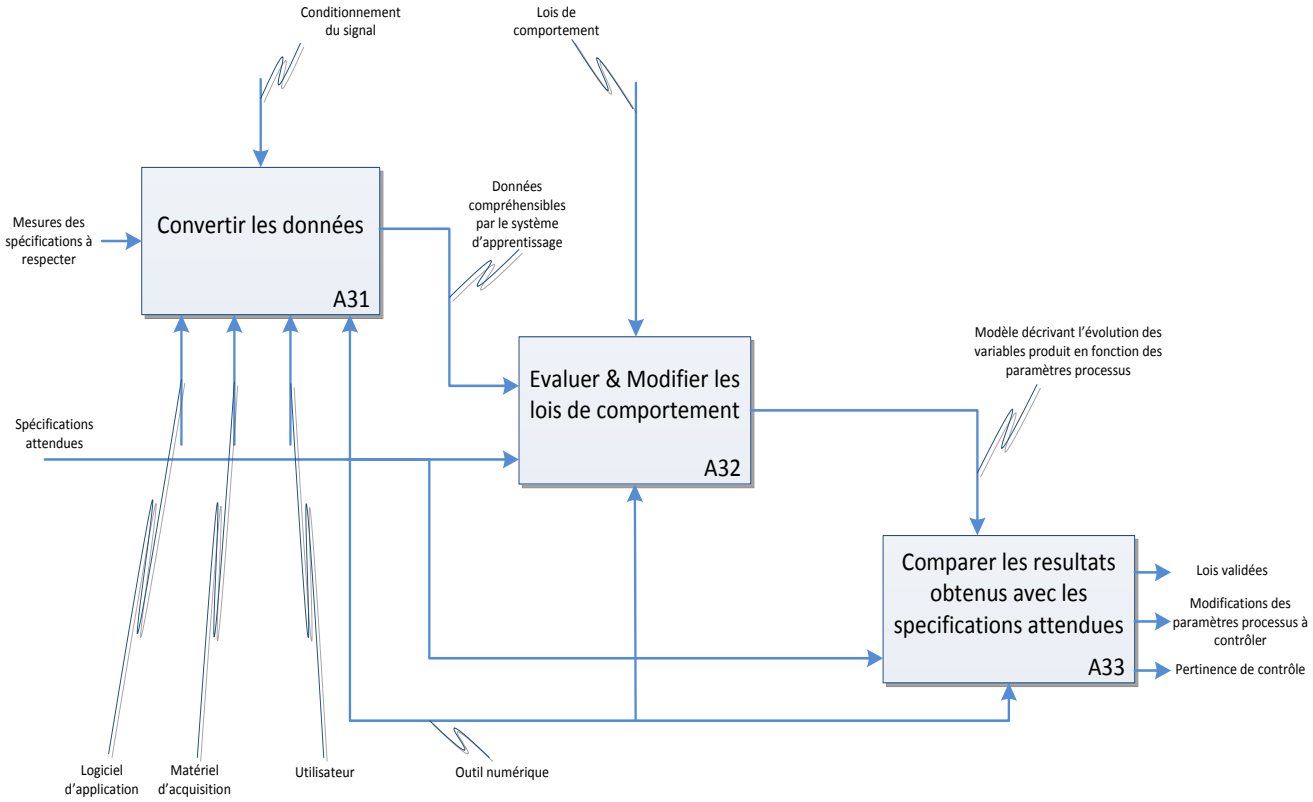
Annexe B: Diagramme IDEF0




Loi de comportement
Quand contrôler
Paramètres clés
Comment contrôler
Modification des paramètres clés
Conditionnement du signal
Modification des lois
Morphologie
Matériau
Spécifications sur la gamme
Spécifications sur le produit
Identifier les paramètres clés
A1
Produit
Forger la pièce
A2
Matière première
Mesures sur le produit
Améliorer les modèles de prédiction
A3
Pertinence de contrôle
Outil numérique utilisé par le système d'aide à la décision
L'utilisateur du système d'aide à la décision
Base de connaissance
Opérateur
Moyens de production
Capteurs
Outil numérique pour l'acquisition et le traitement des données
Outil numérique pour l'apprentissage
Logiciel d'application
Matériel d'acquisition
L'utilisateur du système d'apprentissage


Modification des lois
Lois de comportement
Morphologie
Matériau
Spécifications Gamme
Spécifications produit
Récolter les données
A11
Données nécessaires pour la prise de décision
Appliquer les lois et les règles experts
A12
Résultat du traitement des données
Convertir en données comprehensible par l'utilisateur
A13
Paramètres à contrôler
Comment contrôler
Quand contrôler
Utilisateur
Outil numérique pour l'aide à la décision
Base de connaissances


Quand contrôler
Comment contrôler
Gamme de forgeage
Paramètres à contrôler modifiés
Paramètres à contrôler
Matière première
Préparer la matière première
A21
Matière première preparée
Appliquer la gamme de fabrication
A22
Produit
Mesures
Trier les mesures necessaires
A23
spécifications à respecter évaluées
Outil numérique
Opérateur
Moyens de production
Capteurs


Conditionnement du signal
Lois de comportement
Mesures des spécifications à respecter
Convertir les données
A31
Données compréhensibles par le système d'apprentissage
Evaluer & Modifier les lois de comportement
A32
Modèle décrivant l'évolution des variables produit en fonction des paramètres processus
Spécifications attendues
Comparer les resultats obtenus avec les specifications attendues
A33
Lois validées
Modifications des paramètres processus à contrôler
Pertinence de contrôle
Logiciel d'application
Matériel d'acquisition
Utilisateur
Outil numérique

Annexe C: Glossaire

Définition des termes utilisés :

Terme	Définition	Référence
Activité	Ensemble des tâches ou des travaux exécutés par un individu ou un groupe et qui conduisent à la réalisation de biens ou de services.	[Office- Que 2002]
Contrôle	Évaluation de la conformité par observation et jugement accompagné, si nécessaire, de mesurages, d'essais ou de calibrage.	[NF EN ISO 9000]
Estampage	Procédé permettant de réaliser, dans des matrices reproduisant la forme recherchée à l'usinage près, des pièces en acier ou en alliage de nickel ou en alliage de cobalt.	[AFNOR 82]
Etat	Situation d'une ressource ou d'un élément de procédure à un moment donné.	[NF EN 61512-1]
Forgeage	Le forgeage est un ensemble d'opérations de mise en forme à chaud ou à froid par déformation plastique ; c'est à dire, en appliquant un effort supérieur à la contrainte d'écoulement du matériau. Il consiste à former par choc ou pressage entre deux outils, un matériau malléable à une température inférieure à sa température de fusion, en vue d'obtenir la forme et les dimensions approchées ou définitives d'une pièce.	[AFNOR 82]
Forgeage libre	Procédé de forgeage, entre deux enclumes, de matériaux ferreux ou non ferreux.	[AFNOR 82]
Gamme	Ensemble des opérations de transformation qui transforment des éléments d'entrée en éléments de sortie.	

Matriçage	Procédé analogue à l'estampage, employé dans le cas des alliages non ferreux (titane, aluminium…)	[AFNOR 82]
Moyens de production	Machine ou ensemble de machines de production permettant de réaliser l'ensemble des opérations nécessaires à la production après fourniture livrée jusqu'au produit dans son état de livraison.	[E 60-181]
Procédé	Suite d'opération chimique, physique ou biologiques nécessaires pour la transformation, le transport et le stockage de matériaux ou d'énergie.	[NF EN ISO 10628]
Processus	Ensemble des moyens et d'activités corrélés ou interactives qui transforment des éléments d'entrée en éléments de sortie. Cet ensemble comprend tous les moyens nécessaires : moyens de production, main d'œuvre, mode opératoire, maintenance, etc.	[NF EN ISO 9000]
Produit	Bien fabriqué par l'entreprise; résultat d'une activité créatrice s'exerçant sur les matières.	[Dico-compt 2006]
Phénomène physique	Un changement d'état ou des propriétés de la matière qui est réagi par des lois.	
Ressources	Ensemble des moyens humains, matériels, informationnels et financiers disponibles pour la mise en œuvre des activités planifiées.	[Office-Que 2003]
Spécifications	Document formulant des exigences	[NF EN ISO 9000]

II.1) Non-respect des spécifications (Défauts de forgeage)

Défauts	Définitions	Observations
Bavure incrustée	Une empreinte apparaissant après l'ébavurage et pouvant constituer une amorce de rupture [**Cetim 2009**]	
Brulure	Altération irréversible de la structure et des propriétés, provoquée par un début de fusion intéressant les joints de grain lors du chauffage du lopin au cours de l'opération de formage [**AFNOR 82**]	
Chocs saillants	Une amorce de rupture potentielle apparaissant dans la pièce lorsque cette dernière est chaude et heurtée sur arrête vive [**Cetim 2009**]	
Crique d'huile (coup d'huile)	Fissure qui apparait le long des arêtes des dièdres d'une pièce de section en l ou en H, et qui est due à un excès de lubrification avec un liquide huileux [**AFNOR 82**]	L'excès de lubrification avec un liquide huileux, piégé entre la matrice ou l'insert d'une part et la pièce en cours d'estampage d'autre part, explose sous l'effet de la chaleur et de la compression. Les gaz produits ne pouvant s'échapper normalement tendent à traverser le métal en provoquant une fissure qui ne ressort pas de l'autre côté de la paroi de la pièce [**AFNOR 82**]
Décarburation	Un manque de carbone dans la couche superficielle d'une pièce, dû à un maintien en température élevée en atmosphère décarburante. [**AFNOR 82**]	Quand l'air ambiant contient trop d'oxygène, le carbone se libère de l'acier et brûle lors du refroidissement de l'acier. Il n'est plus possible de durcir la surface de l'acier. On obtient alors une structure ferritique, la norme ISO 898-1 définit la décarburation totale et partielle, et indique avec précision les niveaux de décarburation tolérés [**Birkhäuser 1997**] Le défaut ne peut être révélé que par des examens métallographiques d'une section de la pièce [**AFNOR 82**]
Défaut de fibrage	Non-respect des conditions de fibrage [**AFNOR 82**]	
Déport	Défaut sur la pièce brute dû au déplacement relatif, longitudinal ou latéral, des outillages l'un par rapport à l'autre pendant le travail. [**AFNOR 82**]	Dans le cas particulier des pièces de révolution, le déport se traduit par un décalage des axes des profils supérieurs et inférieurs. [**AFNOR 82**]

Ebavurage défectueux	Pièce marqué localement déformée [Cetim 2009]	
Feuilletage (joint de bavure)	Se présente sous forme de fissure plus ou moins fines, longitudinales, suivant sensiblement le plan médian du joint de bavure [AFNOR 82]	Les fissures sont provoquées par [AFNOR 82] - Un excès d'inclusions dans l'acier - L'utilisation d'un engin trop puissant - Vitesse d'impact très élevée - Mauvaise conception de la gamme (trop de déplacement matière dans la première ébauche) - Un premier coup de pilon trop appuyé en ébauche - Une découpe à froid mal conçue et trop brutale
Incrustation de calamine	Défaut superficiel provoqué par une pénétration locale de la calamine dans le métal de la pièce au cours de l'opération de forgeage. [AFNOR 82]	Les incrustations de calamine se manifestent par des trous après nettoyage des oxydes par grenaillage, sablage, décapage. [AFNOR 82]
Ligne	Défaut débouchant préexistant sur le lopin, qui se trouve mis en évidence ou aggravé lors de la déformation dû à l'opération de forgeage. [AFNOR 82]	Il apparait sous forme de ligne plus au moins ouverte souvent dirigées dans le sens du fibrage. [AFNOR 82]
Manque de matière	Un manque de métal sur certaines parties en relief de la pièce, dû à un remplissage incomplet [AFNOR 82]	Il s'agit d'un manque de métal sur certaine parties en relief de la pièce, qui s'accompagne d'une série de fissures lorsque la pièce n'a pas été battue à fond [Thevenet 1990]
Peau d'orange	Défaut de surface apparaissant sur la pièce (une surface rugueuse) [AL Mousawi 1992]	Quand le lopin est constitué de gros grains, des rides sont créées profondément dans la pièce et ceci donne lieu à une surface rigoureuse [AL Mousawi 1992]
Pompage	Défaut produit par un appel de métal dans l'axe et à la base d'une partie profonde au cours de son remplissage. Ce défaut matérialise la différence de vitesse d'écoulement du métal au centre de la cavité et de ses parois. [AFNOR 82]	

Raclage	Un défaut de même aspect que le repli peut apparaitre dans le cas particulier du raclage. Il s'agit d'un défaut provoqué par la reprise du métal sur la partie horizontale pouvant être produit à l'estampage ou à l'ébavurage. [**AFNOR 82**]	
Repli	Un écoulement de matière contrarié et pouvant donner lieu à une rupture de la pièce [**Cetim 2009**]	Résultant de la superposition dans la même partie de la pièce de deux écoulements du métal se dirigeant l'un vers l'autre et provoquant une discontinuité dans cette région de la pièce [**AFNOR 82**]
Tapure de refroidissement	Une rupture du métal provoquée par des tensions créées par une différence de température entre le cœur et la peau du métal [**Bataille 2003**]	C'est un défaut perpendiculaire à la surface, qui peut se propager au cœur et se développer tout au long de la barre [**Bataille 2003**]

Spécifications à assurer :

Spécifications à assurer	Observations
Dimensions finales	Dimensions de la pièce finale à respecter
Etat de surface	Etat de surface de la pièce finale
Usure de l'outillage	
Microstructure	Peut-être évaluer en déterminant la taille de grain
Décarburation	Apparait lors du contact du métal chaud avec un environnement oxydant
Gain d'énergie	Obtenir le produit avec les spécifications voulues en utilisant le minimum d'énergie possible
Gain de matière	Obtenir le produit avec les spécifications voulues en utilisant le minimum de matière première.
Taux d'écrouissage	

Paramètres à contrôler :

Paramètres processus	Observations
Vitesse de coupe	Utiliser des capteurs de positions pour mesurer la vitesse de passage de l'outil de coupe
Effort de frappe (faible/forte)	Régulation de l'effort de frappe
Chauffage/refroidissement rapide des pièces	Ce paramètre peut être contrôlé ce paramètre en contrôlant le temps de refroidissement ou/et le temps de chauffage, et la température en utilisant des thermocouples
lopin coupé obliquement	Ce paramètre peut être contrôlé en contrôler la force de coupe des lopins et le positionnement des outils
Outil avec des angles très grands	
Poids/diamètre du lopin inadéquat	Pour contrôler les dimensions des lopins une mesure du poids peut être mise en place
Positionnement des outils	Contrôler le positionnement des outils via des capteurs de positions
Présence d'oxygène lors du chauffage	La présence d'oxygène peut être responsable de la décarburation de la pièce
Problème de conception de la gamme	Le non-respect des spécifications peut venir de ce paramètre, mais il n'est pas considéré comme modifiable.
Quantité & Répartition du Lubrifiant	Réguler la répartition et la quantité du lubrifiant à mettre en place, pour la quantité elle peut être contrôlée par un simple contrôle du débit. Mais la répartition est plus difficile à contrôler
Section de la préforme	Contrôler les dimensions du lopin à l'entrée du processus via un dispositif de contrôle de dimension, difficile à mettre en point dans le cas de très grandes cadences

Température de la pièce	Utiliser des thermocouples, difficile à mettre en œuvre au cours de la fabrication surtout dans le cas de grandes cadences
Température de l'outillage	Utiliser des thermocouples pour contrôler cette température
Temps de passage entre les opérations	Calculer le temps de passage entre chacune des opérations

Phénomènes physiques :

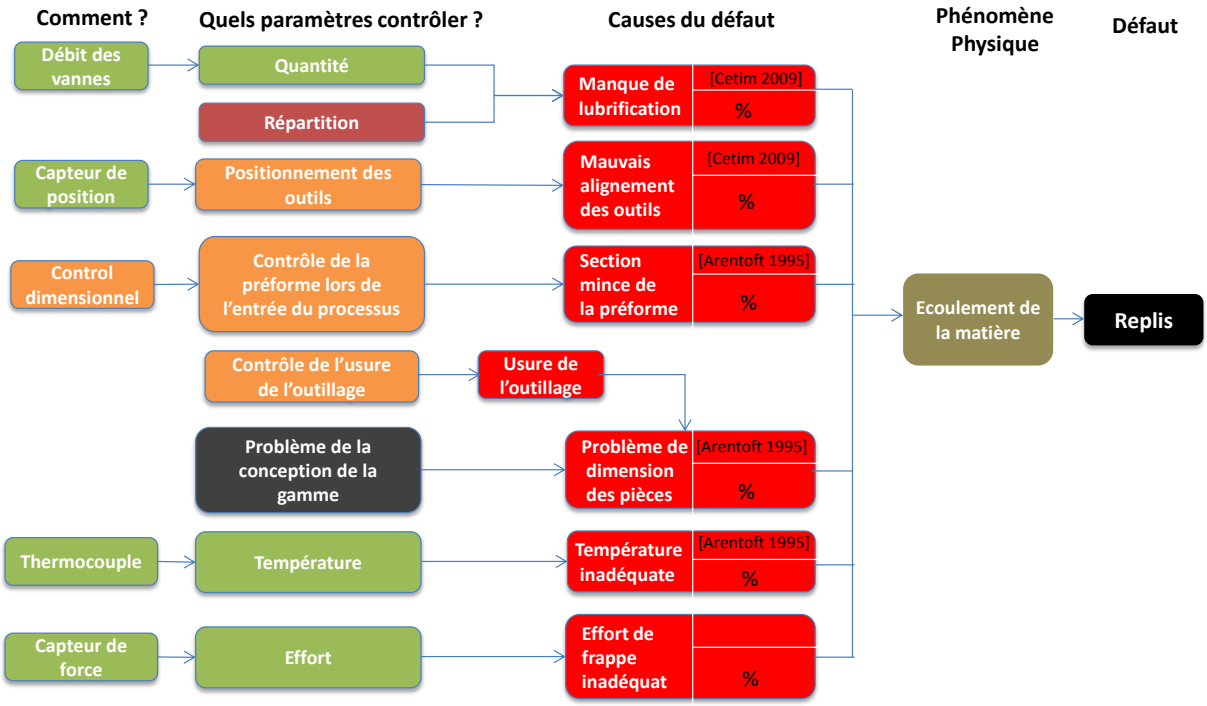
Phénomène physique	Définition
Ecoulement de la matière	Mouvement d'un fluide créé par des différences de pression ou de niveau. **[Office-Que 2001]**
Rupture	Séparation des éléments dont se compose un corps lorsqu'il est chargé ou tiré au-delà de la résistance qu'il peut opposer.
Frottement	Résistance offerte aux mouvements d'un fluide ou d'un corps par son contact avec d'autres corps (frottement externe), ou par sa structure et ses propriétés (frottement interne). **[Office-Que 1992]**
Usure	Désintégration superficielle des pièces métalliques, due au contact avec un autre métal ou un autre matériau et causant des changements dimensionnels. **[Office-Que 1973]**
Echauffement	Élévation de la température d'un produit ferreux
Fatigue	Phénomène de rupture qui apparait lorsque la répartition inégale des efforts dans une section de la pièce produit des contraintes telles qu'il y a des ruptures dans certains cristaux de l'agrégat dont l'orientation s'y prête. Ces ruptures provoquent une augmentation des contraintes dans les cristaux voisins qui se rompent à leur tour. **[Dunod 2008]**

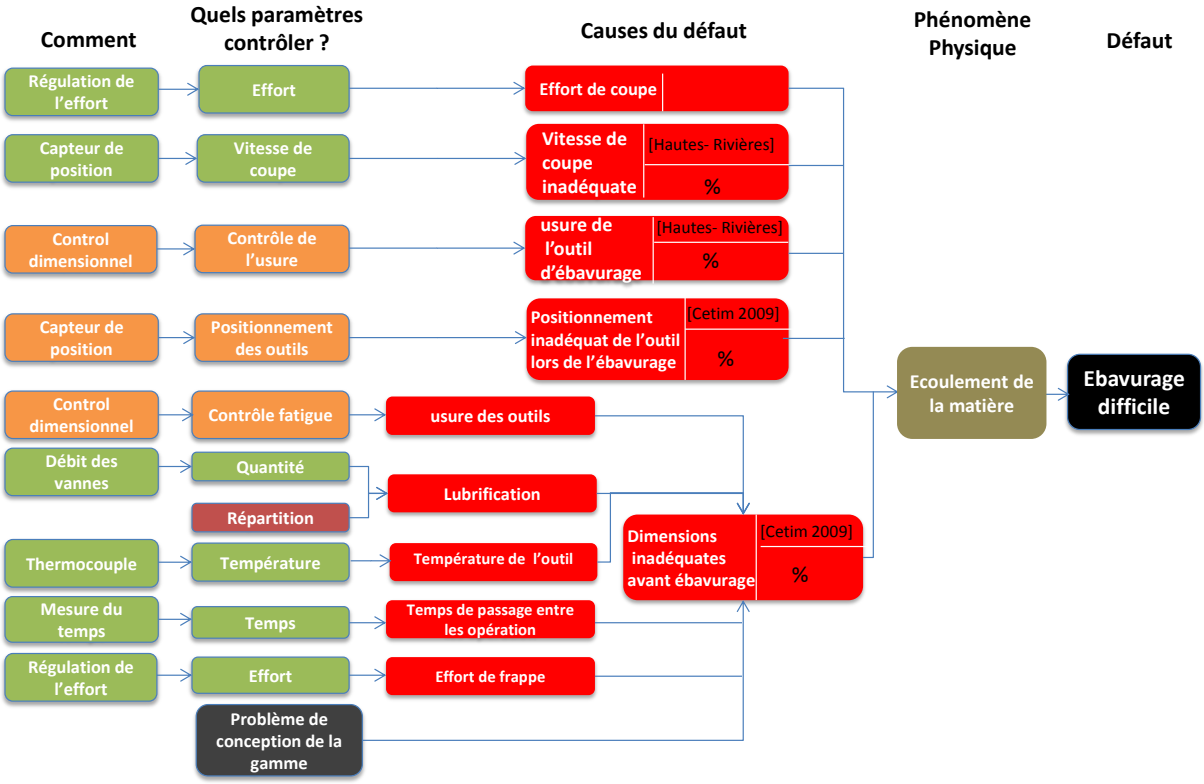
Annexe D: Matrices de corrélation

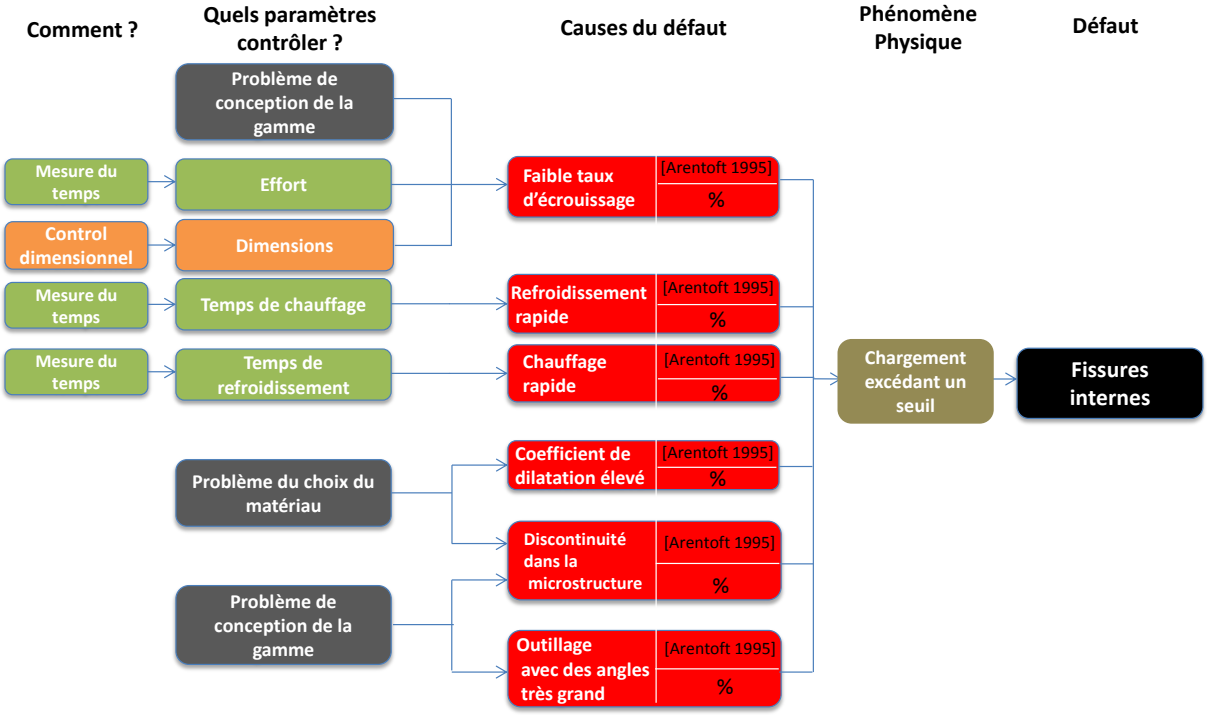
		Procédé										Produit										Ressources					Matériau			Environnement	
Défauts	Causes	Frottement important	Frottement faible	Excès lubrifiant	Manque lubrifiant	Température élevée	Chauffage rapide	Refroidissement rapide	Vitesse de déformation importante	Vitesse d'impact très élevée	Taux d'écrouissage faible	Poids / diamètre inadéquat (lopin)	Volume grand (préforme)	Mauvaise géométrie (préforme)	Découpe à froid mal conçue du lopin	Zone fragiles	Inclusions	Précipitation de nitrure	Présence d'hydrogène (joint de grains)	Discontinuité (microstructure)	Fissures internes	Rayon de raccordement (petit)	Outil avec des angles très grands	Matrice trop plate	Mauvais alignement	Surface trop froide	Gros grains	Coefficient de dilatation élevé	Conduction faible de chaleur	Présence d'oxygène	Courant d'air
Défaut de surface	Peau d'orange						●																				●				
	Séparation de surfaces			●	●																										
	Décarburation					●																								●	
	Tapures de refroidissement					●	●	●														●									
	Incrustation de calamine					●																								●	
Défaut de cisaillemen	Interne	●										●												●							
	Externe	●										●	●	●								●		●	●						
Fissures	Internes		●				●	●			●								●	●			●					●	●		
	Surface de contact					●			●							●			●												
	Surface libre	●						●								●		●			●					●		●	●		
	Bavure incrusté																														
	Crique d'huile (coup d'huile)			●																											
	Feuilletage (joint de bavure)									●					●		●														

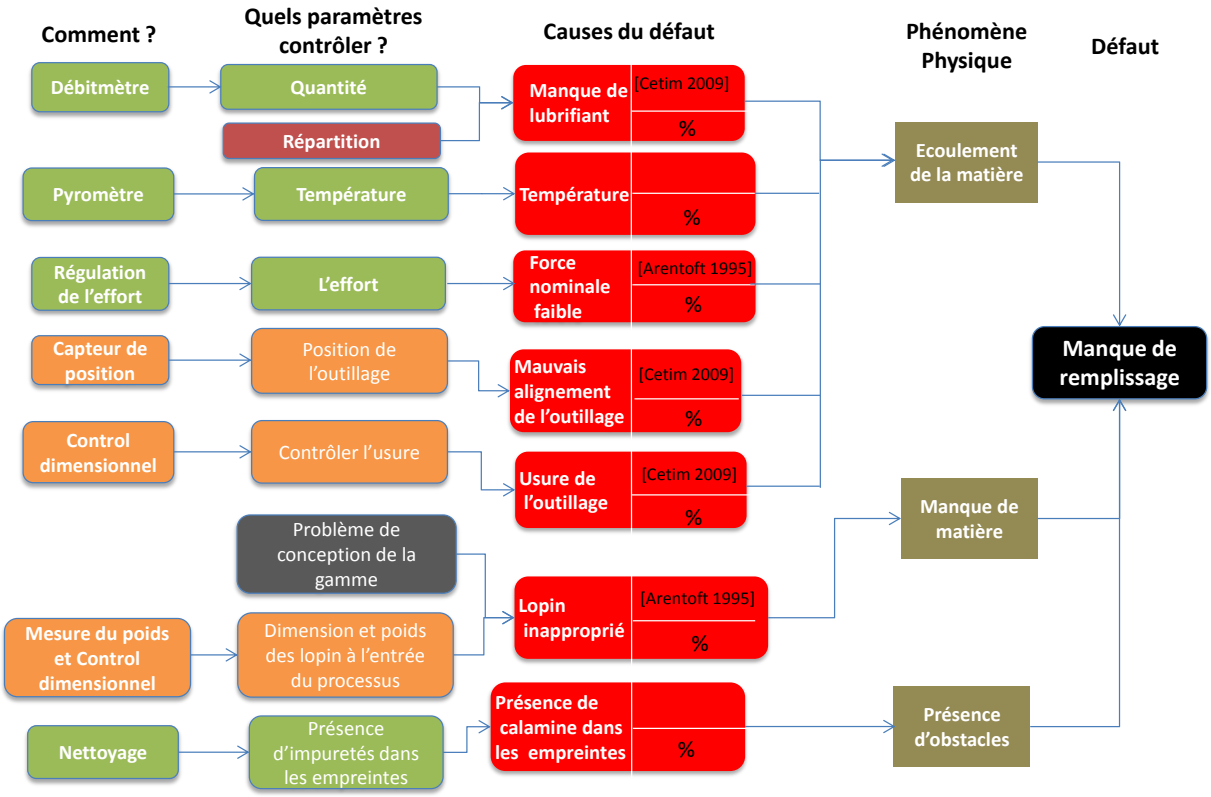
		Procédé							Produit									Ressources										Matériau		Environnement	
Défauts	Causes	Frottement important	Frottement faible	Excès lubrifiant	Manque lubrifiant	Température inadéquate	Vitesse de d'écoulement différente entre parois et centre	Déformation non homogène	Mauvaise orientation du fibrage	Présence de fibres unidirectionnelles	Poids / diamètre inadéquat (lopin)	Arêtes vives	Volume petit (préforme)	Mauvaise géométrie (préforme)	Lopin coupé obliquement	Inclusions	Précipitation de nitrure	Force nominal faible (presse)	Rayon de raccordement (petit)	Outil avec des angles très grands	Géométrie inappropriée des matrices	Effort d'ébavurage non adapté	Mauvais alignement de l'outillage	Surface rugueuse	Usure de l'outil	Plaque d'ébavurage usée	Outil d'ébavurage trop froid	Mauvais positionnement à l'ébavurage	Trop élastique	Gros grains	Trop oxydant	Courant d'air
Défaut de forme	Remplissage incomplet				●						●		●	●				●		●	●		●	●	●							
	Mal aligné														●								●						●			
	Repli	●	●		●	●					●			●					●		●		●									
	Replis dans l'alésage de débouchage				●																				●							
	Chocs saillants											●																				
	Déport																						●									
	Pompage						●																									
Défauts microstructures (métallurgiques)	Propriétés Mécaniques								●																							
	Résistance non homogène							●																								
	Problème formabilité															●	●															●
	Anisotropie									●																						
	Fissures inter granulaires																													●		
	Brulure					●																										
Défauts d'aspect	Déréglage - déport																						●									
	Déréglage en long																						●									
	Ebavurage défectueux																					●			●	●	●	●				

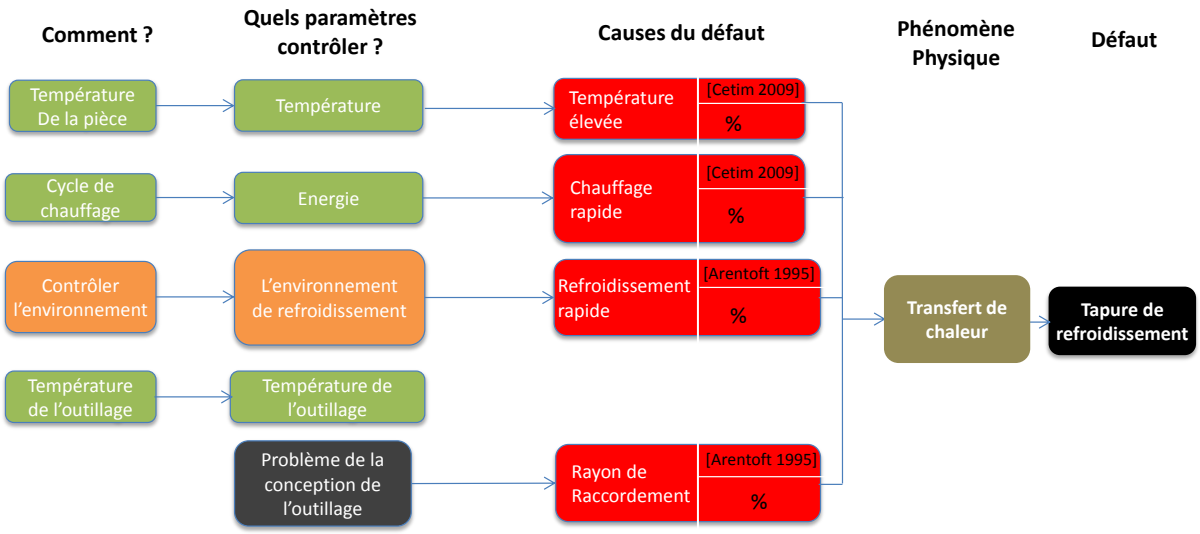
Annexe E: Arbres de causes

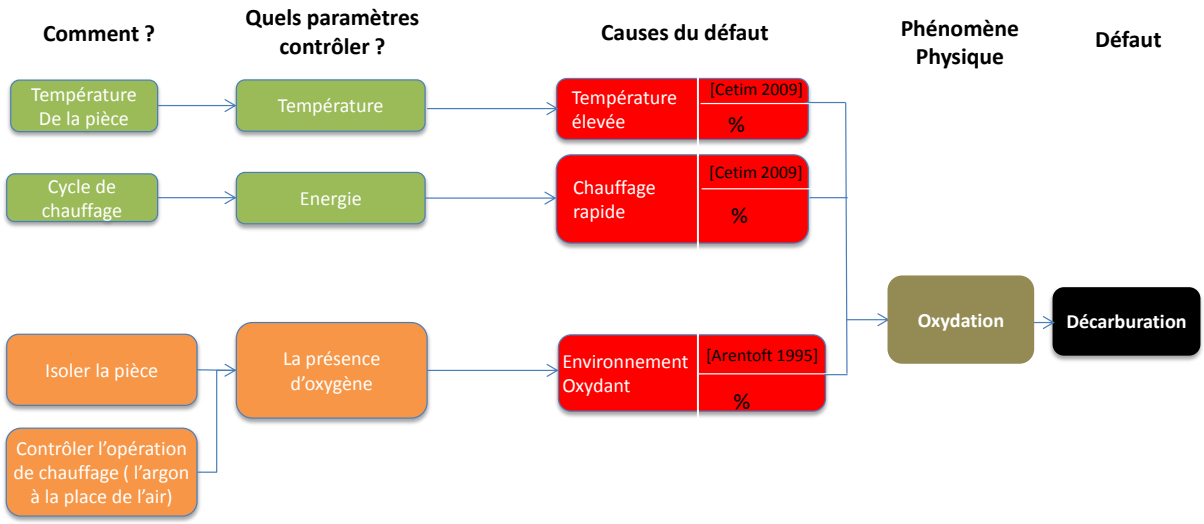



Comment
Quels paramètres contrôler ?
Causes du défaut
Phénomène Physique
Défaut
Régulation de l'effort
Effort
Effort de coupe
Capteur de position
Vitesse de coupe
Vitesse de coupe inadéquate
[Hautes- Rivières]
%
Control dimensionnel
Contrôle de l'usure
usure de l'outil d'ébavurage
[Hautes- Rivières]
%
Capteur de position
Positionnement des outils
Positionnement inadéquat de l'outil lors de l'ébavurage
[Cetim 2009]
%
Control dimensionnel
Contrôle fatigue
usure des outils
Débit des vannes
Quantité
Lubrification
Répartition
Thermocouple
Température
Température de l'outil
Dimensions inadéquates avant ébavurage
[Cetim 2009]
%
Mesure du temps
Temps
Temps de passage entre les opération
Régulation de l'effort
Effort
Effort de frappe
Problème de conception de la gamme
Ecoulement de la matière
Ebavurage difficile

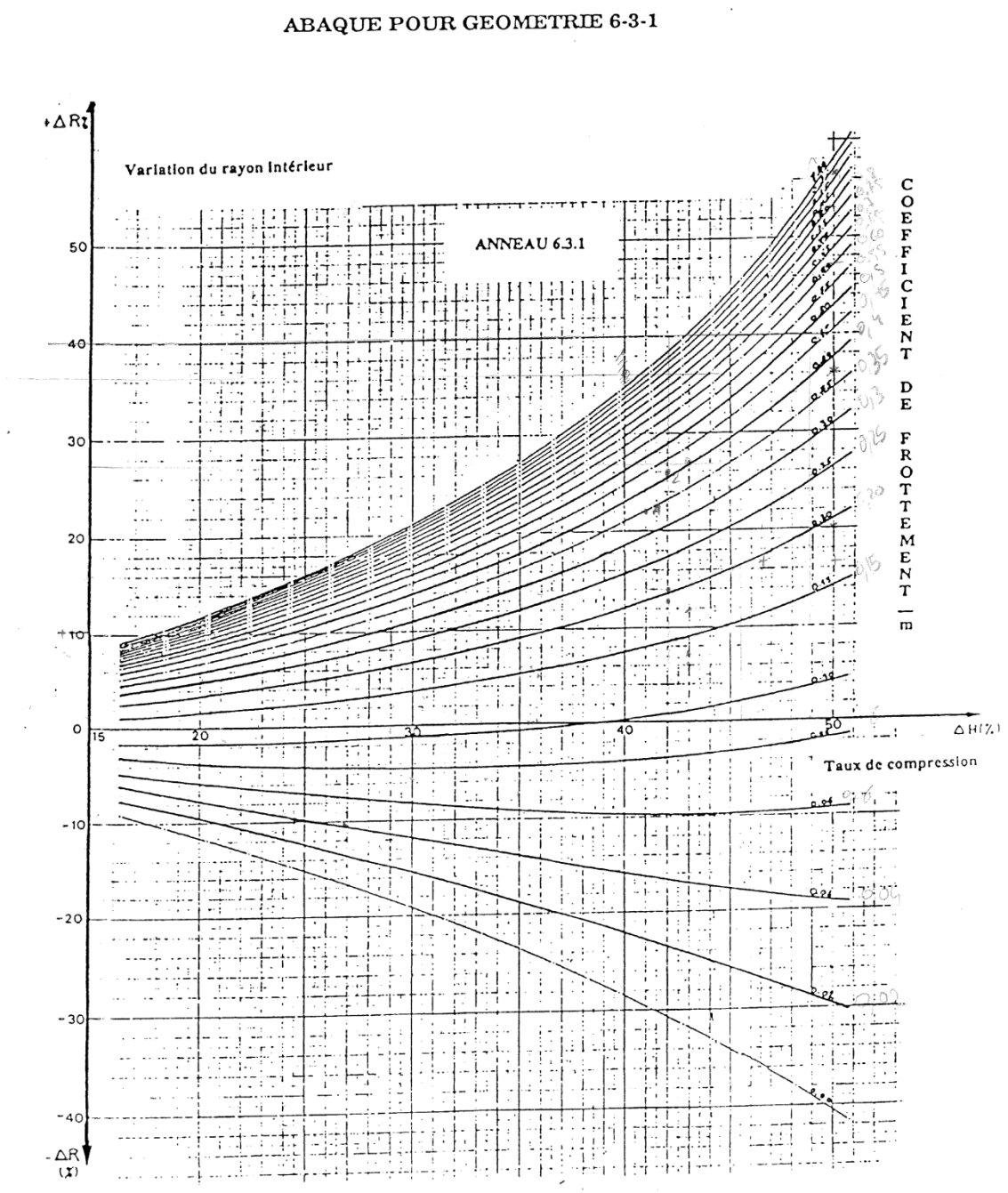

Comment ?
Quels paramètres contrôler ?
Causes du défaut
Phénomène Physique
Défaut
Problème de conception de la gamme
Mesure du temps
Effort
Control dimensionnel
Dimensions
Mesure du temps
Temps de chauffage
Mesure du temps
Temps de refroidissement
Problème du choix du matériau
Problème de conception de la gamme
Faible taux d'écrouissage
[Arentoft 1995]
%
Refroidissement rapide
[Arentoft 1995]
%
Chauffage rapide
[Arentoft 1995]
%
Coefficient de dilatation élevé
[Arentoft 1995]
%
Discontinuité dans la microstructure
[Arentoft 1995]
%
Outillage avec des angles très grand
[Arentoft 1995]
%
Chargement excédant un seuil
Fissures internes


Comment ?
Quels paramètres contrôler ?
Causes du défaut
Phénomène Physique
Défaut
Débitmètre
Quantité
Répartition
Manque de lubrifiant
[Cetim 2009]
%
Pyromètre
Température
Température
%
Régulation de l'effort
L'effort
Force nominale faible
[Arentoft 1995]
%
Capteur de position
Position de l'outillage
Mauvais alignement de l'outillage
[Cetim 2009]
%
Control dimensionnel
Contrôler l'usure
Usure de l'outillage
[Cetim 2009]
%
Problème de conception de la gamme
Mesure du poids et Control dimensionnel
Dimension et poids des lopin à l'entrée du processus
Lopin inapproprié
[Arentoft 1995]
%
Nettoyage
Présence d'impuretés dans les empreintes
Présence de calamine dans les empreintes
%
Ecoulement de la matière
Manque de matière
Présence d'obstacles
Manque de remplissage


Comment ?
Quels paramètres contrôler ?
Causes du défaut
Phénomène Physique
Défaut
Température De la pièce
Température
Température élevée
[Cetim 2009]
%
Cycle de chauffage
Energie
Chauffage rapide
[Cetim 2009]
%
Contrôler l'environnement
L'environnement de refroidissement
Refroidissement rapide
[Arentoft 1995]
%
Transfert de chaleur
Tapure de refroidissement
Température de l'outillage
Température de l'outillage
Problème de la conception de l'outillage
Rayon de Raccordement
[Arentoft 1995]
%


Comment ?
Quels paramètres contrôler ?
Causes du défaut
Phénomène Physique
Défaut
Température De la pièce
Température
Température élevée
[Cetim 2009]
%
Cycle de chauffage
Energie
Chauffage rapide
[Cetim 2009]
%
Isoler la pièce
La présence d'oxygène
Environnement Oxydant
[Arentoft 1995]
%
Contrôler l'opération de chauffage (l'argon à la place de l'air)
Oxydation
Décarburation

Annexe F: Abaque pour déterminer $\overline{m}$ (test de l'anneau)



Annexe G: Méthode Monte Carlo

La Méthode Monte Carlo (Méthode MC) consiste à mettre en place un certain nombre de simulations pour estimer la distribution d'un modèle suivant la variation des entrées. La méthode consiste à estimer des intégrales $I = \int_{R^D} g(x)dx$ dans $\mathbb{R}^D$ par des sommes de la forme $S_n = \sum_{n=1}^{N} \frac{g(x_n)}{N}$ où D représente la dimension de l'espace et les x_i des vecteurs pseudos aléatoires indépendant et uniformément distribué dans $\mathbb{R}^D$ **[Kalos 1986]**. Par exemple la méthode MC peut être utilisée pour générer un certain nombre de point dans un intervalle [0,1]. Le modèle utilisé est $g(x) = x$, tel que x est un vecteur pseudo aléatoire indépendant et uniformément distribué sur [0,1], un certain nombre de tirages et effectué et les points sont représentés sur la Fig.c. Le nombre de point existant dans la zone 1 peut être utilisé pour estimer la surface de cette zone.

La méthode MC peut être appliquée dans la méthodologie même si le but n'est pas le même. La méthode dans notre cas est utilisée pour déterminer le pourcentage de variation d'une variable produit dans un intervalle en fonction des incertitudes sur les paramètres processus. Le nombre de tirage dans le cas de la méthode MC détermine la justesse des résultats selon la distribution utilisée (Normale, exponentielle…), par exemple avec 10^6 tirages 95% de justesse est assurée. Une fois le nombre de tirage fixés, la durée du calcul dépend du modèle utilisé. La surface de la zone 1 est estimée en calculant le rapport entre le nombre de points existant dans cette zone et le nombre de tirage.

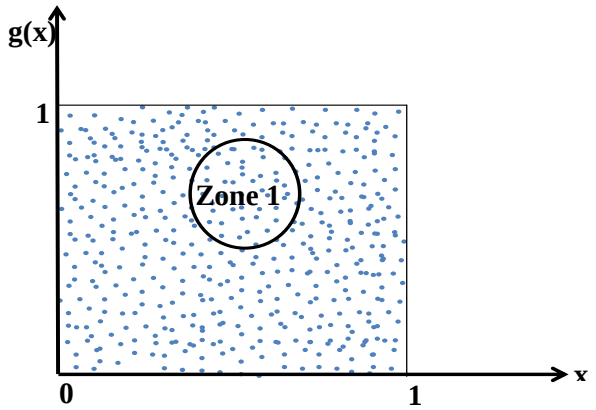


Fig.c Estimation de la surface d'une zone en utilisant la méthode Monte Carlo

L'équation (a) représente la variance de l'estimateur utilisé [Kalos 1986], ceci montre que l'erreur d'estimation diminue quand le nombre de tirage augmente. La méthode MC est utilisé dans cette étude pour déterminer la pertinence de la surveillance d'un certain nombre de paramètres processus en appliquant la méthode sur des modèles liants les paramètres processus au variables produit.

$$\mathrm{Var(Sn)} = \sum_{n=1}^{N} \frac{\mathrm{Var(g(x_n))}}{N^2} = \frac{\mathrm{Var(g(x_n))}}{N} \qquad \text{(a)}$$

CONTRIBUTION À LA MISE EN PLACE D'UNE MÉTHODOLOGIE GÉNÉRIQUE DE CONTRÔLE DES PROCESSUS DE FORGEAGE DANS LE BUT DE MAITRISER LES MOYENS DE PRODUCTION

RESUME : Actuellement, les moyens et les méthodes de mesure et de contrôle des procédés de mise en forme, en particulier pour le forgeage, restent limités. Ils ne sont pas systématiques et sont très souvent développés pour des cas particuliers. La robustesse de ces procédés de mise en forme dépend de la capacité à mettre en œuvre des méthodes de maitrise du processus et des contrôles efficaces. Des méthodologies existantes, comme la DMAIC, permettent de déterminer les paramètres à contrôler et leur influence sur les variables produit, cependant cette démarche possède des inconvénients rendant difficile son application, par exemple, la dépendance de cette méthode aux experts décidant des choix des paramètres. L'idée est de mettre en place une méthodologie générique permettant aux forgerons de maitriser leur processus de fabrication de manière efficace et efficiente. La méthodologie consiste à mettre en place deux systèmes en amont et en aval du processus de forgeage. Le premier système, en amont, est un système d'aide à la décision reliant les spécifications sur le produit (géométrie, absence de défauts…) et sur les moyens de production aux paramètres processus. Ce premier système doit permettre de déterminer les paramètres clés à surveiller pour éviter des déviations au niveau des variables produit. Le deuxième système, en aval, est un système d'apprentissage dont le but est d'aider dans la compréhension du processus, renseigner le système d'aide à la décision et déterminer la pertinence de contrôle.

Mots clés : Contrôle du processus, Forgeage, Paramètres Processus, Système d'aide à la décision, Système d'apprentissage.

A GENERIC METHODOLOGY TO IMPROVE THE FORGING PROCESS MONITORING IN ORDER TO MASTER THE MEANS OF PRODUCTION

ABSTRACT : The mastering of the forging process is one of the principal objectives of the forging industry. To master a forging process, the key process parameters must be identified and controlled through a specified methodology. Some controlled parameters exist, like the stroke length or the lubrication, which are identified and controlled through a systematic approach. Their control depends on the part to produce or on customer's constraints, rather than a rational approach. A methodology is proposed to master the forging process and to avoid a process deviation. There are some methodologies that already exist such as the DMAIC, but it has certain drawbacks. The aim is to develop a generic methodology to improve the forging process monitoring. The methodology uses two systems in the upstream and the downstream of the forging process. The first system is a decision support system that connects product specifications (geometry, absence of defects…) or other forging process specifications (tool wear, energy…) to the process parameters, using the empirical rules and physical laws. The first system determinates the key parameters to control in order to avoid product variable deviations. The second system is a learning system, this latter helps in process understanding, supply the decision support system with laws and determinate the control pertinence.

Keywords : Process control, Forging, process parameters, Decision support system, Learning system

ARTS ET MÉTIERS ParisTech

ParisTech
INSTITUT DES SCIENCES ET TECHNOLOGIES
PARIS INSTITUTE OF TECHNOLOGY