



**HAL**  
open science

# Optimisation des procédés de mise en forme par approche couplée plans d'expériences, éléments finis et surface de réponse

Daniel Lepadatu

► **To cite this version:**

Daniel Lepadatu. Optimisation des procédés de mise en forme par approche couplée plans d'expériences, éléments finis et surface de réponse. Sciences de l'ingénieur [physics]. Université d'Angers, 2006. Français. NNT: . tel-00338415

**HAL Id: tel-00338415**

**<https://theses.hal.science/tel-00338415>**

Submitted on 13 Nov 2008

**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.

**OPTIMISATION DES PROCEDES DE MISE EN FORME PAR  
APPROCHE COUPLEE PLANS D'EXPERIENCES, ELEMENTS  
FINIS ET SURFACE DE REPONSE**

**THESE DE DOCTORAT**

Spécialité : Sciences de l'Ingénieur

**ECOLE DOCTORALE D'ANGERS**

Présentée et soutenue publiquement

Le 21 Décembre 2006

A l'Institut des Sciences et Techniques de l'Ingénieur d'Angers

Par Daniel LEPADATU

Devant le jury ci-dessous :

<b>Philippe PICART</b>	Rapporteur	Professeur à l'Université de Franche-Comté
<b>Abdellatif IMAD</b>	Rapporteur	Professeur à l'Université des Sciences et Technologies de Lille1
<b>Daniel BADIE LEVET</b>	Examineur	Maître de Conférences à l'ENSAM d'Angers
<b>Ali MKADDEM</b>	Examineur	Maître de Conférences à l'ENSAM Chalons
<b>Fabrice GUERIN</b>	Examineur	Professeur à l'Université d'Angers
<b>Ridha HAMBLI</b>	Examineur	Professeur au Polytech'Orléans
<b>Abdessamad KOBİ</b>	Examineur	Professeur à l'Université d'Angers

Directeur de thèse : **Abdessamad KOBİ**

Co-encadrant : **Ridha HAMBLI**

Laboratoire : **Laboratoire en Sûreté de Fonctionnement, Qualité et Organisation  
UPRES EA 3858  
62, avenue Notre Dame du Lac, 49000 ANGERS**



# Avant-propos

Les travaux de recherche présentés dans ce mémoire ont été réalisés à l'Institut des Sciences et Techniques de l'Ingénieur d'Angers (ISTIA), dans le Laboratoire en Sécurité de fonctionnement, Qualité et Organisation (LASQUO), au sein de l'équipe Maîtrise Statistique de Processus.

Le financement de cette thèse a été possible grâce aux efforts faites par deux institutions :

- **ISTIA - LASQUO**
- **Communauté d'Agglomération du Grand Angers.**



---

*A ma femme*

**DANIELA**

*A mon petit garçon*

**VLAD DAVID**

---



# Remerciements

**M**es sincères remerciements vont aux personnes qui ont contribué au bon déroulement et à l'aboutissement de cette thèse.

**E**n premier lieu, je tiens à exprimer ma profonde reconnaissance à Monsieur A. Kobi, Professeur à l'Université d'Angers et Directeur du laboratoire LASQUO, qui m'a donné la chance de réaliser ces travaux. Je tiens à lui remercier pour avoir accepté de diriger cette thèse avec une formidable compétence. Grâce à ses conseils et à son intérêt, il m'a été possible de mener cette thèse à son terme. Je tiens aussi à dire merci à Monsieur R. Hambli, Professeur au Polytech'Orléans, qui a également encadré ce travail malgré les nombreuses activités dont il a la charge.

**R**emerciements et profonde gratitude vont également aux membres de la commission d'examen. J'exprime ainsi toute ma reconnaissance à Monsieur P. Picart, Professeur à l'Université de Franche-Comté, pour avoir accepté d'examiner mon travail. J'adresse aussi mes sincères remerciements à Monsieur A. Imad, Professeur à l'Université des Sciences et Technologies de Lille1, qui a également accepté d'être rapporteur de ce mémoire. Je les remercie de l'intérêt réel qu'ils ont manifesté sur la teneur de ce rapport. Je remercie à Monsieur D. Badie Levet, Maître de Conférences à l'ENSAM d'Angers ainsi qu'à Monsieur A. Mkaddem, Maître de Conférences à l'ENSAM Chalons, qui m'ont fait l'honneur de participer à ce jury. Je remercie également à Monsieur F. Guerin, Professeur à l'Université d'Angers, qui a accepté de participer à ce jury, pour ses remarques constructives ainsi que pour les encouragements et la confiance qu'il m'a redonné durant les derniers mois de la rédaction de ce mémoire.

**C'**est avec chaleur et sincérité que je salue les membres du laboratoire, et plus particulièrement M. Barreau, B. Dumon, T. Tiplica, C. Robledo, R. Chassagnon, C. Crespin, avec lesquels j'ai passé ces années. J'exprime aussi mes remerciements pour mes collègues de bureau, notamment F. Babus, S. Verron et P. Lantieri avec lesquels j'ai pu collaborer durant ce travail. Je n'oublierai pas l'atmosphère de sérieux et de détente mêlés qu'ils ont su entretenir, créant ainsi les conditions nécessaires à une bonne activité de recherche. Je voudrais plus particulièrement exprimer ma reconnaissance envers Monsieur X. Bague-nard ainsi qu'à son directeur de thèse Professeur L. Jaulin, avec qui une collaboration scientifique fructueuse s'est très vite établie.

**I**l me serait impossible, enfin, de ne pas dire un grand MERCI à ma femme DANIELA et à mon petit garçon VLAD-DAVID, ainsi qu'à nos familles pour le soutien et leurs encouragements qu'ils n'ont pas cessé, tout au long de cette période qui a été parfois très difficile. Je suis sûr que sans leur présence, je ne serais pas arrivé à finir cette thèse.



# Table des matières

<b>Introduction générale</b>	<b>1</b>
<b>1 Méthodes d'optimisation des procédés de mise en forme</b>	<b>9</b>
1.1 Introduction	11
1.2 Procédés de mise en forme	13
1.3 Prévision des défaillances lors du formage	15
1.3.1 Défaillances lors de l'emboutissage	16
1.3.2 Défaillances lors du pliage	24
1.3.3 Défaillances lors de l'extrusion	30
1.3.4 L'usure des outils	35
1.3.5 Fatigue des outils	37
1.4 Méthodes d'optimisation existantes pour la mise en forme	39
1.5 Modélisation mathématique d'un problème d'optimisation	45
1.6 Méthodes déterministes	46
1.7 Méthodes non-déterministes	48
1.8 Conclusions	52
<b>2 Stratégies d'optimisation par plans d'expériences numériques.</b>	<b>55</b>
2.1 La méthodologie des plans d'expériences	57
2.1.1 Historique	57
2.1.2 Expérimentations	58
2.1.3 Modélisation de la réponse	59
2.1.4 Intérêt du codage des variables	60
2.1.5 Principales composantes de la méthodologie des plans d'expériences	61
2.1.6 Technique du screening	62
2.1.7 La Méthodologie des Surfaces de Réponse	64
2.2 Technique pour la vérification de l'effet quadratique pour les plans d'expériences numériques.	71

2.2.1	Introduction . . . . .	71
2.2.2	Approche proposée . . . . .	72
2.3	L'optimisation multicritères . . . . .	74
2.3.1	Méthode de Ch'ng . . . . .	75
2.4	Approche hybride pour l'optimisation des procédés . . . . .	78
2.4.1	Introduction . . . . .	78
2.4.2	Tolérancement mécanique . . . . .	79
2.4.3	Analyse par intervalles . . . . .	81
2.4.4	Nouvelle méthode d'optimisation pour obtenir une Surface de Réponse par Intervalle ( <i>SRI</i> ) . . . . .	87
2.5	Conclusions . . . . .	88
<b>3</b>	<b>Modélisation numérique des défaillances des procédés de mise en forme</b> . . . . .	<b>89</b>
3.1	Problématique . . . . .	91
3.1.1	Endommagement et rupture . . . . .	92
3.2	Modélisation par éléments finis des défaillances de procédés de mise en forme . . . . .	100
3.2.1	Modélisation de l'endommagement des métaux . . . . .	100
3.2.2	Prédiction de l'usure des outils par éléments finis . . . . .	106
3.2.3	Prédiction de la fatigue par éléments finis . . . . .	112
3.3	Conclusions . . . . .	114
<b>4</b>	<b>Presentation du logiciel OPTIFORM</b> . . . . .	<b>117</b>
4.1	Introduction . . . . .	119
4.2	Principe de fonctionnement d' <b>OPTIFORM</b> . . . . .	120
4.3	Interface graphique - aspect visuel . . . . .	121
4.4	Processus d'optimisation avec <b>OPTIFORM</b> . . . . .	126
4.4.1	Identification des paramètres du processus . . . . .	128
4.4.2	Établissement de la fonction objectif à optimiser . . . . .	129
4.4.3	Réalisation des essais par plans d'expériences numériques . . . . .	130
4.4.4	Optimisation de la fonction objectif . . . . .	131
4.4.5	Validation numérique en conditions optimales . . . . .	132
4.5	Conclusions . . . . .	133
<b>5</b>	<b>Applications</b> . . . . .	<b>135</b>
5.1	Optimisation du procédé de pliage . . . . .	137
5.1.1	Introduction . . . . .	137

5.1.2	Le choix des variables du processus . . . . .	137
5.1.3	Modélisation par éléments finis du procédé de pliage . . . . .	138
5.1.4	Analyse de screening . . . . .	140
5.1.5	Analyse par Surface de Réponse . . . . .	142
5.1.6	Optimisation du procédé . . . . .	147
5.1.7	Conclusions . . . . .	147
5.2	Optimisation du procédé d'extrusion . . . . .	148
5.2.1	Introduction . . . . .	148
5.2.2	Étude du processus d'usure pendant l'extrusion . . . . .	148
5.2.3	Analyse statistique . . . . .	154
5.2.4	Optimisation multicritères pour le procédé d'extrusion . . . . .	156
5.2.5	Conclusions . . . . .	162
5.3	Optimisation du procédé d'emboutissage . . . . .	163
5.3.1	Introduction . . . . .	163
5.3.2	Simulation numérique de l'emboutissage 3D . . . . .	163
5.3.3	Optimisation de l'emboutissage à l'aide de la Surface de Ré- ponse par Intervalles . . . . .	165
5.3.4	Bilan . . . . .	166
5.4	Conclusions . . . . .	167
	<b>Conclusions et perspectives</b>	<b>169</b>
	<b>Publications nationales et internationales</b>	<b>173</b>
	Références . . . . .	177



# Table des figures

1	Facteurs influençant la variation des caractéristiques des pièces. . . . .	1
2	Les deux axes sensibles des procédés de mise en forme. . . . .	2
3	Les disciplines de l'optimisation des procédés. . . . .	3
4	Boucle d'optimisation basée sur le couplage des <b>Plans d'Expériences</b> - <b>Éléments Finis - Surfaces de réponse.</b> . . . . .	5
1.1	Évolution des outils d'amélioration de la qualité des produits. . . . .	12
1.2	Principaux facteurs influant en fabrication [Ben01]. . . . .	12
1.3	Schématisation d'une opération de formage. . . . .	13
1.4	Principaux procédés de mise en forme [Fel00]. . . . .	14
1.5	Diagramme d'Ishikawa pour les défaillances mécaniques. . . . .	16
1.6	Les principaux défauts pour les procédés de mise en forme. . . . .	16
1.7	Procédé d'emboutissage : Photo [Emb02] . . . . .	17
1.8	Principaux modes de déformation par emboutissage. . . . .	18
1.9	Défauts structuraux d'emboutissage : rupture [Lih04]. . . . .	18
1.10	Défaut d'emboutissage : Formation des plis [Yos04]. . . . .	19
1.11	Retour élastique après l'emboutissage. . . . .	19
1.12	La modification de la géométrie avec le contrôle de la surface. . . . .	20
1.13	Différents types de plis durant l'emboutissage. . . . .	21
1.14	Formation des plis durant l'emboutissage - simulation par éléments finis. . . . .	22
1.15	Initiation des fissures pendant l'emboutissage. . . . .	22
1.16	Simulation numérique des plis et de la rupture en hydroformage. . . . .	23
1.17	Pièces obtenues par emboutissage : a) petites pièces b) pièces de gros volume. . . . .	23
1.18	Procédé de pliage - Photo : [Ben01]. . . . .	24
1.19	a) Pliage en V b) Pliage en l'air - Photo : [Ben01] . . . . .	24
1.20	a) Pliage en frappe b) Pliage en L - Photo : [Ben01] . . . . .	25
1.21	Paramètres géométriques du pliage - Photo : [Bou30]. . . . .	25

1.22	Apparition des fissures pendant le pliage - Photos : [Ben01, Mka03]. . . . .	26
1.23	Retour élastique après le pliage - Photo : [Ben01]. . . . .	26
1.24	Solutions pour diminuer le retour élastique - Photo : [Zaf04] . . . . .	27
1.25	Pliage en V - solutions pour diminuer le retour élastique - Photo : [Ben01] . . . . .	27
1.26	Retour élastique obtenue expérimentalement. . . . .	29
1.27	Pièces obtenues par pliage. . . . .	29
1.28	Opération d'extrusion. . . . .	30
1.29	a) Ecrasage simple b) Filage inverse central. . . . .	31
1.30	a) Filage direct central b) Filage latéral. . . . .	31
1.31	La rupture du lopin. . . . .	32
1.32	Influence de la lubrification sur l'écoulement du métal a) sans lubri- fication b) avec lubrification - Photo :[Col72] . . . . .	32
1.33	Fissuration externe durant l'extrusion. . . . .	33
1.34	Défaut en chevron. . . . .	33
1.35	Le mécanisme de formage des défauts en chevron - Photo : [Ext01] . . . . .	34
1.36	Pièces obtenues par extrusion. . . . .	35
1.37	Usure des outils. . . . .	36
1.38	Chargement cyclique - fatigue - Photo : [Pay04] . . . . .	37
1.39	Les périodes de dégradation par fatigue [Lep05d]. . . . .	38
1.40	La dégradation d'une pièce par fatigue - Photo : [Mad69] . . . . .	38
1.41	Optimisation des défauts d'emboutissage. . . . .	40
1.42	Différents profils de la matrice d'extrusion. . . . .	41
1.43	Optimisation de la forme d'une matrice d'extrusion. . . . .	42
1.44	Différents types de courbes pour la forme de la partie active de la matrice d'extrusion. . . . .	43
1.45	Principales méthodes déterministes. . . . .	46
1.46	Méthode du Simplex. . . . .	48
1.47	Principales méthodes non déterministes. . . . .	48
1.48	Organigramme d'un Algorithme Génétique [Man02] . . . . .	49
1.49	Structure d'un réseau de neurones artificiel. . . . .	50
2.1	La <b>boîte noire</b> du processus . . . . .	57
2.2	Plan de régression pour deux variables. . . . .	60
2.3	Surface de Réponse. . . . .	65
2.4	Plan composite centré pour 3 facteurs. . . . .	69
2.5	Addition des points au centre du domaine . . . . .	73

2.6	Pièce dessinée et cotée. . . . .	79
2.7	Pièce réelle fabriquée. . . . .	80
2.8	Conditions fonctionnelles d'un produit - Photo : [Pairel E] . . . . .	80
2.9	Le coût de fabrication en fonction des tolérances mécaniques. . . . .	81
2.10	Exemple d'estimation pour une solution non robuste . . . . .	85
2.11	L'estimation des paramètres pour une fonction exponentielle . . . . .	85
2.12	L'algorithme proposé par le calcul par intervalles . . . . .	86
2.13	Critère de sélection pour la boîte $a_i$ . . . . .	86
3.1	Dégradation subie par les outils . . . . .	92
3.2	Modes de propagation de fissures - Photo : [Fis01] . . . . .	93
3.3	Éléments de volume endommagé et vierge. . . . .	98
3.4	Mécanismes d'endommagement et de la rupture. . . . .	100
3.5	Projection de la contrainte sur la surface de la fonction de charge. . . . .	101
3.6	Schéma de principe de l'approche couplée. . . . .	104
3.7	Mécanisme de l'usure abrasive. . . . .	107
3.8	Les défauts causés par l'usure. . . . .	107
3.9	Profil d'un outil usé. . . . .	108
3.10	Pression normale de contact et forces de contact sur les noeuds. . . . .	109
3.11	Évolution de l'usure des outils. . . . .	110
3.12	Modélisation du contact . . . . .	111
4.1	Les trois fonctions de OPTIFORM . . . . .	120
4.2	Outil d'optimisation. . . . .	121
4.3	Fenêtre principale . . . . .	121
4.4	Boîte de dialogue pour les plans de screening. . . . .	122
4.5	Plan composite centré à 2 facteurs- génération automatique. . . . .	122
4.6	Base de données - plans d'expériences spéciaux. . . . .	123
4.7	Boîte de dialogue - plans d'expériences pour surfaces de réponse . . . . .	123
4.8	Le schéma d'optimisation du processus de pliage. . . . .	124
4.9	Menu Procédé. . . . .	125
4.10	Informations sur le procédé . . . . .	125
4.11	Régression pas à pas et tableau ANOVA . . . . .	126
4.12	Organigramme du processus d'optimisation avec OPTIFORM . . . . .	127
4.13	Identification des paramètres du processus . . . . .	128
4.14	Diagramme d'Ishikawa . . . . .	128
4.15	Établissement de la fonction objectif à optimiser . . . . .	129
4.16	Réalisation des essais par plans d'expériences numériques . . . . .	130

4.17	Optimisation de la fonction objectif . . . . .	131
4.18	Validation numérique en conditions optimales . . . . .	132
5.1	Diagramme d'ISHIKAWA pour le pliage. . . . .	137
5.2	Les étapes de la simulations numérique du pliage. . . . .	139
5.3	Les paramètres et la géométrie du modèle de la simulation numérique du pliage. . . . .	139
5.4	Diagramme de Pareto . . . . .	141
5.5	Diagramme de Pareto pour le retour élastique . . . . .	142
5.6	Diagramme de Pareto - cas I . . . . .	144
5.7	Surface de réponse interaction AB. . . . .	144
5.8	Diagramme de Pareto - cas II . . . . .	146
5.9	Le diagramme d'Ishikawa. . . . .	149
5.10	Modèle axisymétrique pour le processus d'extrusion. . . . .	149
5.11	Déformation du lopin après l'extrusion. . . . .	150
5.12	La partie active de la matrice et l'épaisseur d'usure. . . . .	152
5.13	Surfaces de réponse pour l'usure. . . . .	153
5.14	Diagramme de Pareto. . . . .	154
5.15	La pression du contact et la distance de glissement pour le procédé d'extrusion. . . . .	155
5.16	La distance de glissement, respectivement la pression normale fonc- tion des points interrogés. . . . .	155
5.17	Le profil d'usure . . . . .	155
5.18	Le cycle de vie d'une matrice. . . . .	157
5.19	Le procédé d'extrusion . . . . .	158
5.20	Simulation numérique du procédé d'emboutissage . . . . .	164
5.21	Modèle éléments finis pour l'emboutissage. . . . .	164

# Liste des tableaux

2.1	Calcul des niveaux des facteurs . . . . .	69
2.2	Valeurs de $\delta$ fonction du nombre de points au centre du domaine. . . . .	71
4.1	Liste des menus et sous-menus de l'application. . . . .	121
5.1	Caractéristiques des facteurs . . . . .	138
5.2	Caractéristiques de la réponse du problème . . . . .	138
5.3	Caractéristiques des matériaux. . . . .	139
5.4	La matrice d'expériences et les résultats. . . . .	140
5.5	L'importance des facteurs . . . . .	141
5.6	Analyse de screening . . . . .	142
5.7	Plan Composite Centré - 1 point au centre. . . . .	143
5.8	Analyse de la variance. . . . .	144
5.9	Plan Composite Centré plusieurs points au centre. . . . .	145
5.10	Analyse de la variance. . . . .	145
5.11	Caractéristiques du matériau . . . . .	149
5.12	Les niveaux des facteurs étudiés. . . . .	150
5.13	La matrice d'expérience pour le plan composite centré. . . . .	151
5.14	Les effets des facteurs pour le point A. . . . .	152
5.15	Les effets des facteurs pour le point B. . . . .	153
5.16	Le codage des paramètres. . . . .	160
5.17	La matrice d'expériences pour le plan composite centré . . . . .	160
5.18	Les coefficients de régression pour les modèles générés . . . . .	160
5.19	$LSL$ , $USL$ , $T$ et leurs désirabilités associées. . . . .	161
5.20	Les solutions optimales trouvées à l'aide de la technique de Ch'ng. . . . .	161
5.21	Le codage des paramètres. . . . .	165
5.22	La matrice d'expériences pour le plan composite centré . . . . .	165
5.23	Équations pour ORSM et IRSM . . . . .	166



# Introduction générale

Depuis quelques années, le secteur de la mise en forme de pièces métalliques a subi un développement important du principalement aux besoins de plus en plus exigeants des constructeurs automobiles. En effet, les entreprises de mise en forme sont confrontées à des problèmes quotidiens de plus en plus complexes concernant la qualité de leurs produits.

L'objectif premier d'une opération de mise en forme est de conférer à une pièce métallique des dimensions situées dans une fourchette de tolérances données, ainsi que des caractéristiques de qualité demandées par le client.

Au cours de ces dernières années, les exigences de qualité et sûreté de fonctionnement, exprimées par les clients, ont contraint les entreprises à concevoir et réaliser de nouveaux produits exempts de défaillances dans leurs utilisations nominales. De ce fait, les contraintes au niveau de la fabrication sont de plus en plus sévères. Dans le cas des procédés de mise en forme (pliage, emboutissage, extrusion ou découpage), la maîtrise, l'optimisation et la réduction de la variation des caractéristiques (Figure 1) des pièces fabriquées sont des composantes essentielles de la qualité des produits.

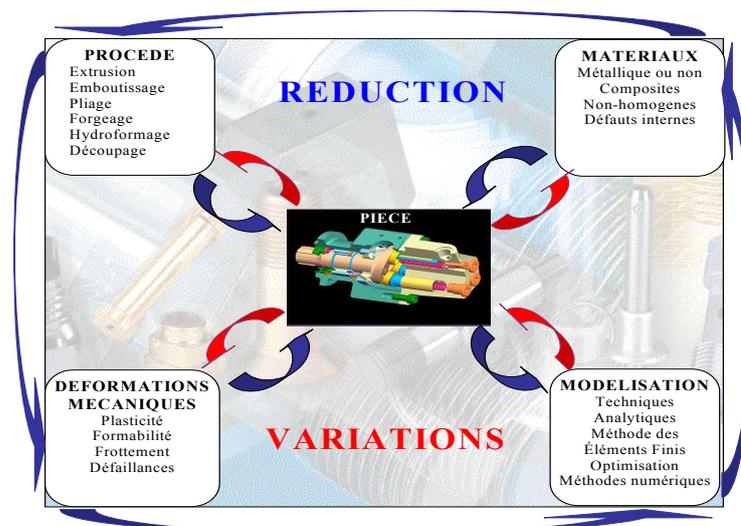


FIG. 1 – Facteurs influençant la variation des caractéristiques des pièces.

Pour mieux répondre à ces besoins nous avons retenu deux axes de recherche (Figure 2). Le premier concerne la modélisation des défaillances des outils telles que l'usure et la fatigue, influencées par des conditions de formage. Le second est orienté vers l'optimisation des conditions de formage des pièces. La prévision des modes de

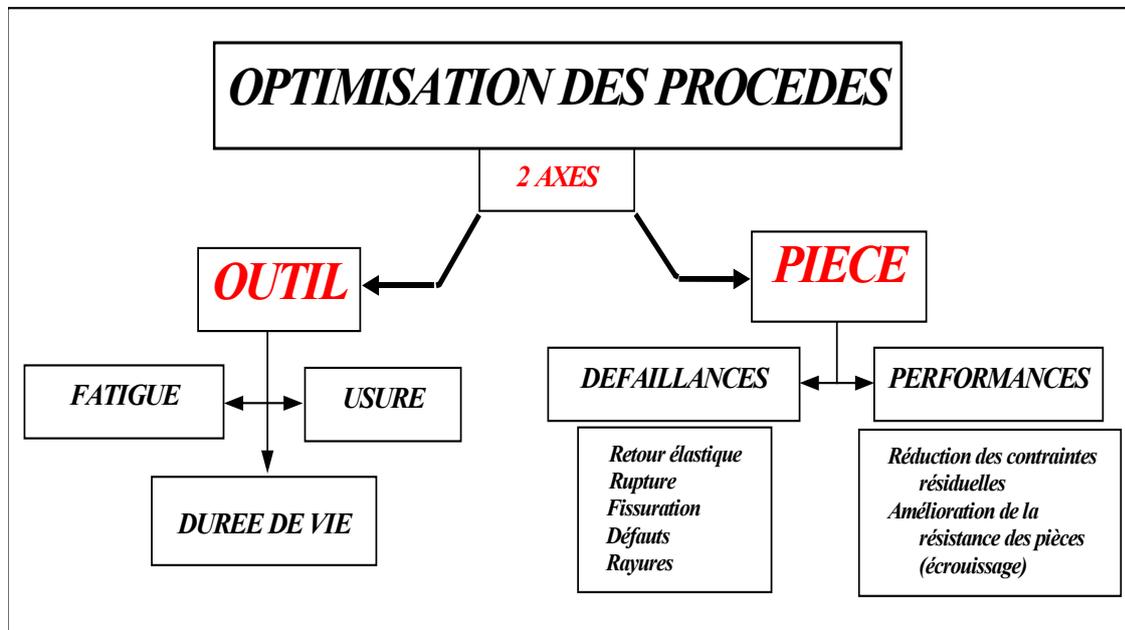


FIG. 2 – Les deux axes sensibles des procédés de mise en forme.

défaillances engendrées par la mise en forme des métaux est un enjeu industriel de premier ordre. Dans le cas des outils, les actions mécaniques et thermiques peuvent être très importantes et conduire à une plastification partielle, induire des fissurations par fatigue et usure (Figure 2). Dans le cas des pièces, le formage implique des défauts comme les rayures, les fissures, le retour élastique, etc. (Figure 2).

Actuellement, les méthodes d'optimisation des procédés de mise en forme sont basées sur des approches essentiellement empiriques qui ne permettent pas d'estimer rigoureusement la sensibilité des performances du produit par rapport aux paramètres influents du procédé. Ces méthodes consistent, généralement, à effectuer des calculs aléatoires permettant d'identifier l'optimum.

Malgré les progrès réalisés dans ce domaine il existe encore de nombreuses pistes d'amélioration telles que :

- Prise en compte des modes de défaillances observés (pièces, outillages)
- Développement de méthodes d'optimisation rapides et paramétrées
- Développement d'un support informatique pour une utilisation industrielle conviviale

L'optimisation des procédés de mise en forme consiste à déterminer les conditions

opérateurs de formage optimales afin de :

- Minimiser ou réduire un mode de défaillance redouté (usure, fatigue, etc.)
- Minimiser les coûts de la production
- Maximiser une performance recherchée (durée de vie de l'outil, cadence, résistance des pièces, etc.)

L'optimisation des procédés reste une préoccupation majeure des chercheurs [Bor90, Duc80, Flo94]. La prise en considération de l'ensemble des contraintes liées à la modélisation numérique constitue une difficulté rencontrée pendant l'élaboration d'un modèle pour un procédé de fabrication et la qualité de celui-ci, a comme conséquence directe la qualité du produit final. Le processus d'optimisation, nécessite des connaissances qui vont souvent au-delà de leurs spécialisations. Par conséquent on peut dire que l'optimisation des procédés est à l'interface de trois disciplines :

1. Les **MATHEMATIQUES** qui fournissent les algorithmes et les stratégies d'optimisation
2. La **MECANIQUE** qui offre les modèles, les hypothèses et les outils de simulations numériques
3. **L'INFORMATIQUE** qui permet la mise en oeuvre des deux disciplines précédentes afin d'automatiser le calcul (Figure 3).

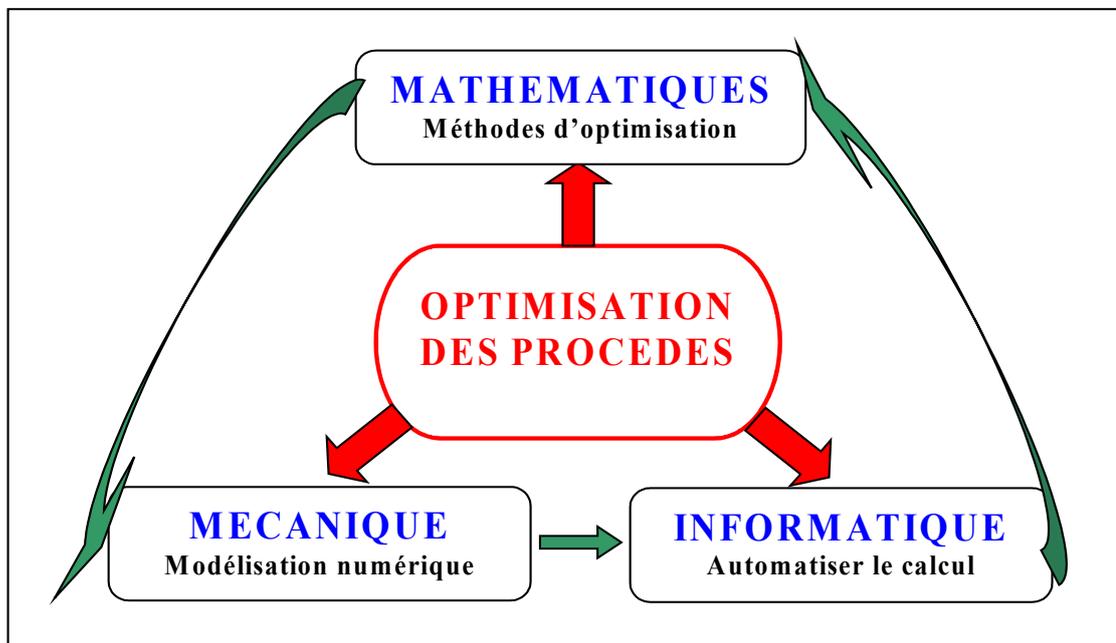


FIG. 3 – Les disciplines de l'optimisation des procédés.

Pour pallier les insuffisances des méthodes actuelles, l'objectif de cette thèse est de développer une stratégie d'optimisation des procédés de mise en formes rapide,

paramétrée et multicritères. L'approche intègre des phénomènes souvent négligés tels que les défaillances des outils et la prédiction de la rupture ductile des pièces. La **méthode des éléments finis** a été mise en oeuvre pour la simulation des procédés.

Les objectifs poursuivis dépendent du procédé concerné. Principalement, il s'agit des aspects suivants :

- La maîtrise du retour élastique en fin de formage.
- Améliorer la durée de vie des pièces en service.
- Réduire le risque de rupture des pièces en cours de fabrication.
- Réduire l'usure des outils : minimiser les pressions internes sur les outils.
- Augmenter la durée de vie des outils vis à vis de la fatigue.
- Optimiser les pressions et les efforts sur les serre-flans.

Cette liste n'est pas exhaustive, il existe d'autres critères spécifiques à chaque procédé. Généralement, les paramètres d'optimisation portent sur le matériau, la géométrie des outillages ainsi que les paramètres du procédé et la géométrie des pièces. Tous ces paramètres peuvent être contraints par des limitations de natures technologiques ou économiques à prendre en compte dans la résolution du problème d'optimisation. Les stratégies d'optimisation envisagées sont de plusieurs natures en fonction des problèmes d'optimisation et d'identification à résoudre. Parmi les différentes stratégies d'optimisation, on a retenu des méthodes de type **Plan d'Expériences** et **Surface de Réponse** pour le calage et le contrôle des paramètres de procédés et conditions opératoires. Dans ce cas, les simulations sont réalisées pour un échantillonnage du domaine de conception aussi précis que possible, lié au temps de calcul disponible ; l'analyse fournit alors en chaque point du Plan d'Expériences les valeurs des critères de qualité. Un des avantages est de pouvoir calculer en ces points, sans coût supplémentaire, plusieurs *réponses* (critères/limitations). Une interpolation fournit ensuite en tout point du domaine échantillonné, des expressions explicites de ces critères de qualité, après vérification de la précision.

Dans un cadre industriel, un logiciel convivial et interactif baptisé **OPTIFORM** (Figure 4) a été développé permettant d'intégrer en une seule plate-forme informatique les différentes disciplines nécessaires pour la gestion et la conduite d'un calcul d'optimisation.

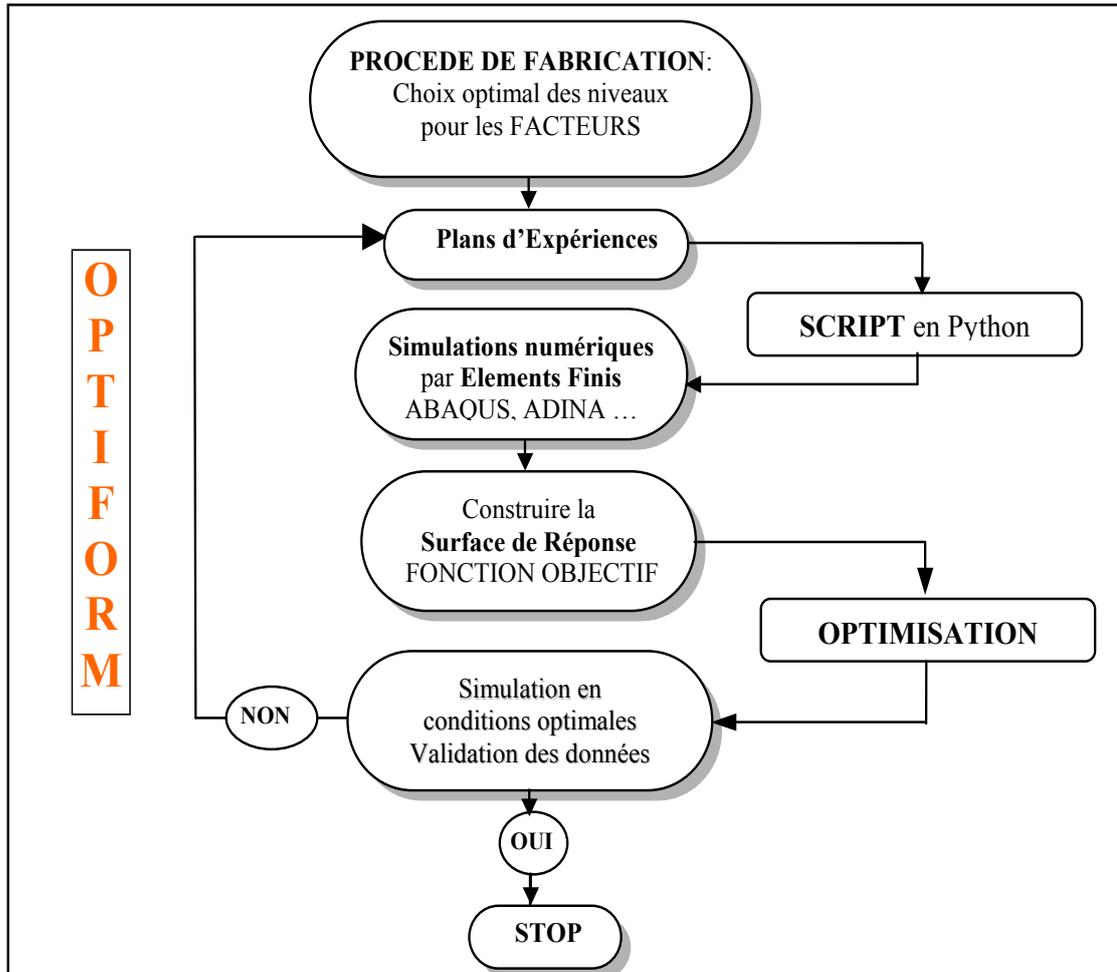


FIG. 4 – Boucle d’optimisation basée sur le couplage des **Plans d’Expériences - Éléments Finis - Surfaces de réponse**.

Dans l’esprit de l’objectif général rappelé plus haut, le document présente notre travail sur le développement d’un algorithme itératif d’optimisation des procédés basé sur le couplage de : **méthodologie des plans d’expériences, méthode des éléments finis et méthode de surfaces de réponse**. Il s’articule en 5 chapitres :

### Chapitre 1

Le premier chapitre de la thèse aborde l’aspect **Mathématique** en exposant les méthodes d’optimisation des procédés de mise en forme. Il s’agit d’une étude bibliographique sur les procédés de mise en forme avec les principaux modes de défaillances rencontrés lors du formage. Les méthodes d’optimisation les plus utilisées, pour améliorer la qualité des pièces fabriquées et pour éviter l’apparition des défaillances, seront présentées dans cette partie. Cette partie a comme principal but de faire un état des lieux sur l’existant et de situer la place de la méthodologie des plans d’expériences avec ses avantages et ses inconvénients parmi les autres

méthodes.

## Chapitre 2

L'aspect **Mathématique** reste encore notre préoccupation durant ce chapitre. Nous présentons ici la **Méthodologie des Plans d'Expériences** qui est un outil d'analyse privilégié pour les ingénieurs du fait qu'on réalise d'abord un minimum d'expériences afin d'obtenir les facteurs influents d'un procédé par la technique de screening et par la suite une modélisation par surface de réponse nous permet d'atteindre l'optimum avec le moindre coût. Différentes stratégies d'optimisation par plans d'expériences développées par notre équipe, seront présentées dans cette partie. Afin de couvrir un manque existant dans les techniques d'optimisation par plans d'expériences numériques nous avons proposé une technique nouvelle nécessaire à la vérification du caractère non linéaire d'une modélisation. Dans un contexte d'optimisation globale, l'optimisation multicritères est une approche de plus en plus utilisée. Afin de s'inscrire dans cette voie, qui répond notamment à un besoin économique, nous avons utilisé l'approche proposée par Ch'ng [Ch'05]. La combinaison de deux ou plusieurs méthodes d'optimisation donne à celles-ci une efficacité qui ne peut pas être atteinte par aucune d'elles individuellement. C'est pourquoi, nous avons proposé une méthode originale d'optimisation de type hybride afin d'obtenir ce qu'on va appeler une **surface de réponse par intervalle**. La méthode proposée, combine trois approches : la méthodologie de surface de réponse, les tolérances mécaniques et le calcul par intervalle.

## Chapitre 3

Le troisième chapitre est consacré au développement **Mécanique**. On présente ici la modélisation numérique des principales défaillances exposées au chapitre 1. Ces défaillances, par leurs effets sur la fabrication, pourront engendrer des coûts très élevés. Différents critères de rupture non-couplés et des lois de comportement couplées à l'endommagement de type Lemaître ont été implémentés au code ABAQUS à travers la routine utilisateur UMAT, ce qui a permis de prédire et d'optimiser les procédés vis-à-vis de la rupture des pièces. Pour la modélisation de l'outillage un certain nombre de lois de fatigue ainsi que la loi d'usure d'Archard ont été implémentés ce qui pourrait permettre une optimisation multicritères des procédés.

## Chapitre 4

La contribution au niveau **Informatique** est présentée dans le quatrième chapitre. Le développement du logiciel **OPTIFORM**, conçu pour automatiser et faciliter l'application de la **Méthodologie des Surfaces de Réponse** à partir des simulations numériques, est décrit dans cette partie. Il s'agit d'un outil informatique qui permet de déterminer de manière automatique et rapide, la combinaison

optimale des paramètres d'un processus, permettant d'obtenir des produits respectant les spécifications données. Son interface graphique permet aux concepteurs une utilisation conviviale.

### **Chapitre 5**

La validation des méthodes proposées est exposée dans ce cinquième chapitre. Un certain nombre d'applications sont détaillées mettant en oeuvre les contributions des chapitres 1, 2 et 3. On commence par la nouvelle approche sur la détermination du caractère non linéaire de la réponse d'un système obtenu par des simulations numériques. Cette approche est utilisée afin de réduire le retour élastique après le pliage. L'optimisation du procédé d'extrusion est faite à l'aide des modèles numériques qui nous ont permis d'abord la prévision de l'usure de la matrice mais aussi la prévision de la durée de vie dans un contexte d'optimisation multicritères. L'approche hybride que nous avons développée (Chapitre 2) est appliquée dans le cas d'une opération d'emboutissage afin d'optimiser le retour élastique.



# Chapitre 1

## Méthodes d'optimisation des procédés de mise en forme

Dans ce chapitre nous essayerons d'abord de présenter brièvement les principaux procédés de mise en forme. Notre attention sera ensuite focalisée sur l'extrusion, le pliage et l'emboutissage, procédés pour lesquelles plusieurs détails seront présentés. Une attention particulière sera accordée à la présentation des mécanismes de défaillances souvent négligés tels que : l'usure des outils, la rupture des pièces ou le retour élastique. Un état des lieux sur les méthodes qui proposent l'optimisation des procédés de mise en forme sera fait dans le but de mettre en évidence les principaux travaux dans le domaine ainsi que de trouver les moyens pour les améliorer. Ces méthodes seront par la suite abordées plus en détail avec un objectif qui ne sera ni de comparer la performance de chacune, ni de montrer tous les détails concernant leurs implémentations mais plutôt de mettre en évidence les caractéristiques qu'elles ont en commun. La particularité des procédés de mise en forme nous a incité à choisir, parmi les méthodes d'optimisation évoquées dans cette partie, la méthodologie des **plans d'expériences**. Cette méthode répond mieux à notre objectif et elle sera présentée au chapitre suivant.



## 1.1 Introduction

La mise en forme de matériaux métalliques est une opération qui assure la fabrication des pièces en production de grande série à faible coût. Rapportés à la qualité des pièces finales obtenues, les procédés de mise en forme restent la forme la plus économique d'obtention des produits par déformation plastique des métaux. Au cours du formage les pièces subissent des variations dimensionnelles ou des caractéristiques fonctionnelles qui peuvent affecter d'une manière considérable leur qualité finale. Afin de réduire ces effets les ingénieurs ont fait appel à la modélisation par éléments finis permettant de prédire le comportement des pièces. La simulation numérique par éléments finis est la méthode la plus utilisée pour aider à la prise de décisions avant de lancer la fabrication des nouveaux produits.

Les problèmes d'optimisation, notamment pour les procédés industriels, sont de plus en plus complexes. La difficulté essentielle tient au coût de chaque simulation et à la formulation des problèmes. Nous aborderons le problème de l'optimisation tout d'abord du point de vue mathématique pour définir le cadre conceptuel (le modèle mathématique), mais aussi du point de vue d'un ingénieur pragmatique qui cherche à trouver des solutions simples pour des problèmes de plus en plus complexes causés par les variations des caractéristiques des procédés.

Le principal but de ce chapitre est de répondre à la première discipline évoquée dans ce rapport les **mathématiques**. Les outils mathématiques qui seront abordés dans cette partie, vont assurer la création de modèles appropriés aux procédés de fabrication, par des méthodes spécifiques, en vue de leur optimisation.

L'amélioration de la qualité technique des pièces mécaniques nécessite l'optimisation de leurs procédés de fabrication. L'optimisation des procédés est un enjeu industriel d'une importance capitale qui vise à trouver les caractéristiques des procédés de fabrication en accord avec la meilleure qualité possible des produits

Au cours de ces dernières années, les exigences de qualité et de sûreté de fonctionnement, exprimées par les clients, ont contraint les entreprises à concevoir et réaliser de nouveaux produits exempts de défaillances dans leurs utilisations nominales. Parallèlement on constate l'émergence de la culture de *Near-Shape Forming* dans le domaine de la fabrication qui consiste à produire des pièces *conformes* en une seule opération dans la mesure du possible ce qui nécessite une connaissance et une maîtrise accrues des procédés de fabrication. L'évolution des méthodes permettant d'améliorer la qualité des pièces, a conduit progressivement les spécialistes ces dernières années à développer des outils d'optimisation des procédés (Figure 1.1) facilitant leurs utilisation.

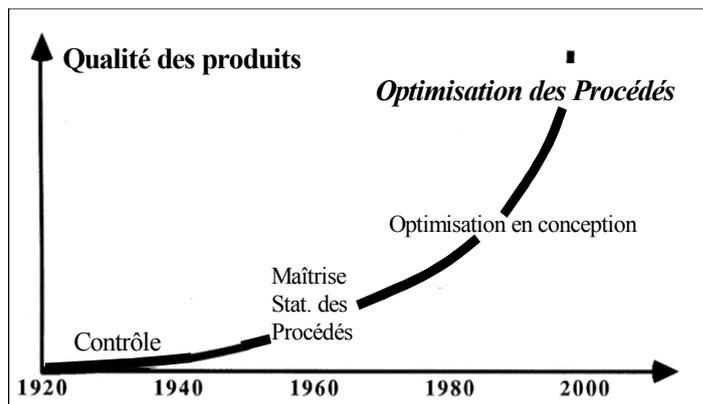


FIG. 1.1 – Évolution des outils d'amélioration de la qualité des produits.

La qualité des pièces fabriquées dépend d'un certain nombre de facteurs qui affectent leurs caractéristiques mécaniques et géométriques en cours de fabrication. La durée de vie des pièces en service est fortement influencée par les conditions opératoires du formage. La figure 1.2 présente les principaux facteurs exerçant une influence sur les pièces fabriquées.

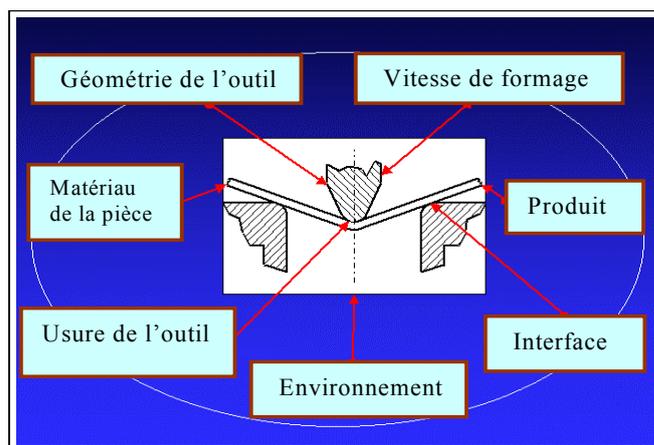


FIG. 1.2 – Principaux facteurs influant en fabrication [Ben01].

Pour assister les concepteurs dans la démarche de mise au point de la gamme de fabrication, on peut envisager d'appliquer les techniques d'optimisation. Plusieurs méthodes et techniques sont utilisées depuis une dizaine d'années dans le calcul des structures élastiques. On peut citer par exemple les méthodes de gradient, recuit simulé, simplex, recherche tabou, réseaux de neurones, méthodes hybrides, etc.. Toutes ces méthodes nécessitent des centaines voire des milliers de calculs stochastiques pour aboutir à l'optimum. Dans le domaine de la mise en forme, la méthode d'optimisation la plus adaptée consiste à mettre en oeuvre une approche exigeant la paramétrisation correcte du procédé concerné.

Parmi les différentes stratégies d'optimisation qui seront présentées par la suite dans le cadre de cette thèse, nous avons décidé d'utiliser la méthodologie des plans d'expériences qui est mieux adaptée pour le calage et le contrôle des paramètres des procédés et les conditions opératoires. Cette méthode présente l'avantage d'être moins coûteuse en temps de calcul parce qu'elle propose une expérimentation factorielle avec un nombre minimum d'essais. Étant une méthode adaptée aux phénomènes de type **boîte noire**, la méthodologie des plans d'expériences permet de détecter, parmi un ensemble de combinaisons des paramètres de fabrication (jeux de données), la combinaison optimale. Il est important de préciser aussi le fait que l'utilisation de la méthodologie des plans d'expériences pour optimiser les procédés de fabrication permet la paramétrisation du calcul par des modèles numériques correspondant à chaque procédé.

Comme l'objectif principal envisagé dans ce mémoire est l'optimisation des procédés de mise en forme, on présentera par la suite un bref rappel sur les principaux procédés de formage, ainsi que les causes qui contribuent à la réduction de la qualité des pièces fabriquées - les défaillances. Un état des lieux sera fait sur les méthodes d'optimisation des procédés de mise en forme, qui ont été utilisées afin de diminuer les conséquences de ces défaillances.

## 1.2 Procédés de mise en forme

Un procédé de mise en forme consiste à conférer à une pièce, une géométrie donnée, décrite par une forme et des directions spécifiées par le bureau d'étude. On met en oeuvre généralement un outillage (outil + matrice), permettant de transformer la matière en pièce finale (Figure 1.3).

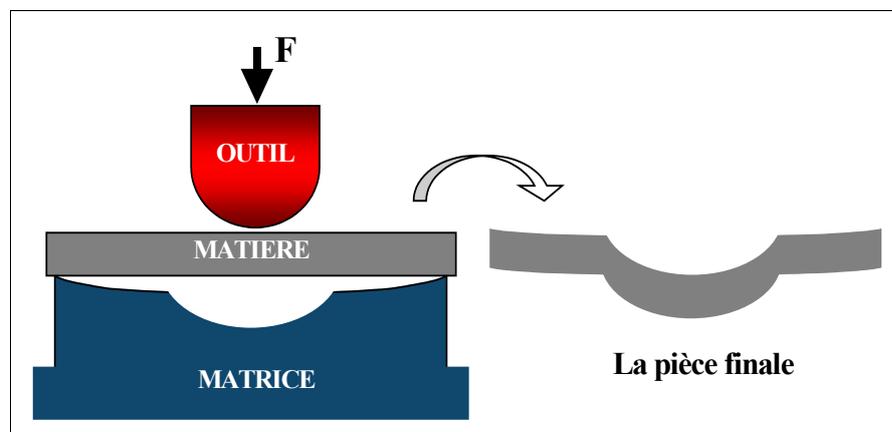


FIG. 1.3 – Schématisation d'une opération de formage.

La figure 1.4 représente schématiquement la famille des procédés de fabrication.

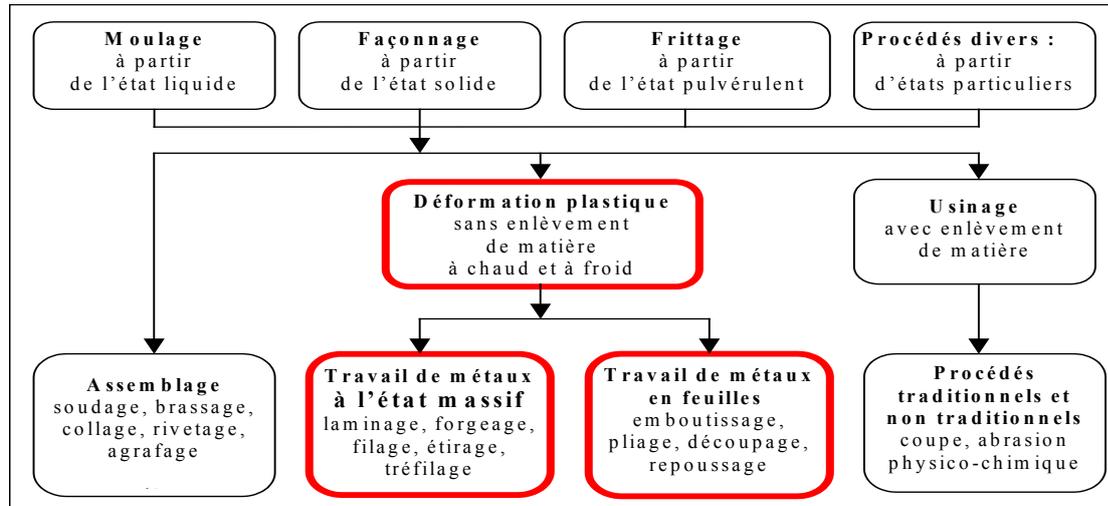


FIG. 1.4 – Principaux procédés de mise en forme [Fel00].

Les procédés de mise en forme qui font l'objet de cette étude concernent la déformation plastique (sans enlèvement de matière) (Figure 1.4) et pourront être classées en deux grandes catégories :

1. Le travail des métaux à l'état massif :
  - laminage, forgeage, matriçage, estampage, filage ou extrusion, étirage, tréfilage, etc.
2. Le travail des métaux en feuilles :
  - pliage, emboutissage, fluotournage, repoussage, découpage, etc.

La demande de plus en plus forte du marché des pièces obtenues par la mise en forme a déterminé une évolution de leurs conditions de mise en oeuvre tout en gardant les spécificités du chaque procédé. Cette évolution suit trois grandes tendances [Fel00] :

- tout d'abord par une substitution des procédés qui ont permis le remplacement de diverses opérations d'usinage peu économes en matière première et énergie.
- par une suppression ou réduction des traitements de finition des pièces qui vise à produire directement et sans opérations supplémentaires la pièce avec toutes ses spécifications tant dimensionnelles que mécaniques.
- par un enchaînement continu des diverses opérations afin d'éliminer progressivement les temps morts. Le caractère continu des diverses opérations a en effet un double avantage : réduction des coûts de stockage et amélioration de la qualité du produit final.

## 1.3 Prédiction des défaillances lors du formage

Les procédés de mise en forme des métaux ont une importance économique assez forte, qui correspond pour un pays développé à quelques pour-cents du produit national brut (PNB) [Fel00]. Les ingénieurs ont comme tâche principale l'obtention de produits de qualité avec un taux de défaillance proche de zéro, c'est ce qu'on appelle le principe du **zéro défaut** introduit pour la première fois par Crosby [Cla50].

*On considère qu'une pièce est défaillante à partir du moment où elle ne remplit pas sa fonction ou l'assure de manière dégradée.*

De façon générale, il faut admettre que toute pièce peut-être affectée par des défaillances techniques ou mécaniques et cela se traduit par une augmentation du coût de la non-qualité. L'identification et l'amélioration de la fiabilité de pièces sont des préoccupations quotidiennes pour les ingénieurs car les effets sur le procédé peuvent être parfois catastrophiques [Fau04].

Il existe plusieurs modalités de classification des défaillances [Vil88] mais on ne présente ici que la classification fonction des effets. D'après leurs effets, il existe aussi plusieurs modes de défaillances mais habituellement on considère quatre catégories : défaillances mineures, défaillances significatives, défaillances critiques, défaillances catastrophiques. Les origines des défaillances sont multiples mais elles peuvent être dues [Aub04] :

- au matériau : défauts de matériau, cristallisation, ségrégation,
- aux procédés de fabrication : pliage, extrusion, emboutissage, etc.,
- à la conception : sous-dimensionnement, conception imparfaite,
- à l'utilisation : surcharge, utilisation non conforme,
- à l'humidité ou à la température,
- aux agressions de l'environnement [Vil88].

Dans ce travail nous avons étudié notamment les défaillances des procédés de mise en forme qui seront présentées par la suite. Le diagramme d'Ishikawa (Figure 1.5) résume les plus importantes causes de défaillances, parmi lesquelles on peut citer : la rupture, l'usure, la fatigue des outils, le retour élastique, fissuration, etc..

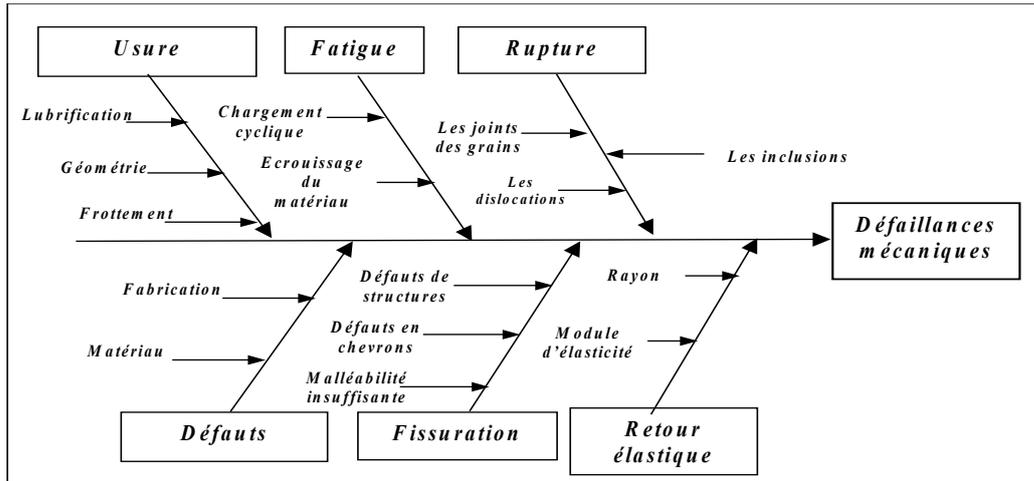


FIG. 1.5 – Diagramme d’Ishikawa pour les défaillances mécaniques.

Compte tenu du fait qu’il existe une dépendance très forte entre les défaillances et les défauts, sur la figure 1.6 on présente d’une manière synthétique les principaux défauts pour les procédés de mise en forme. Plusieurs détails seront présentés par la suite dans ce paragraphe.

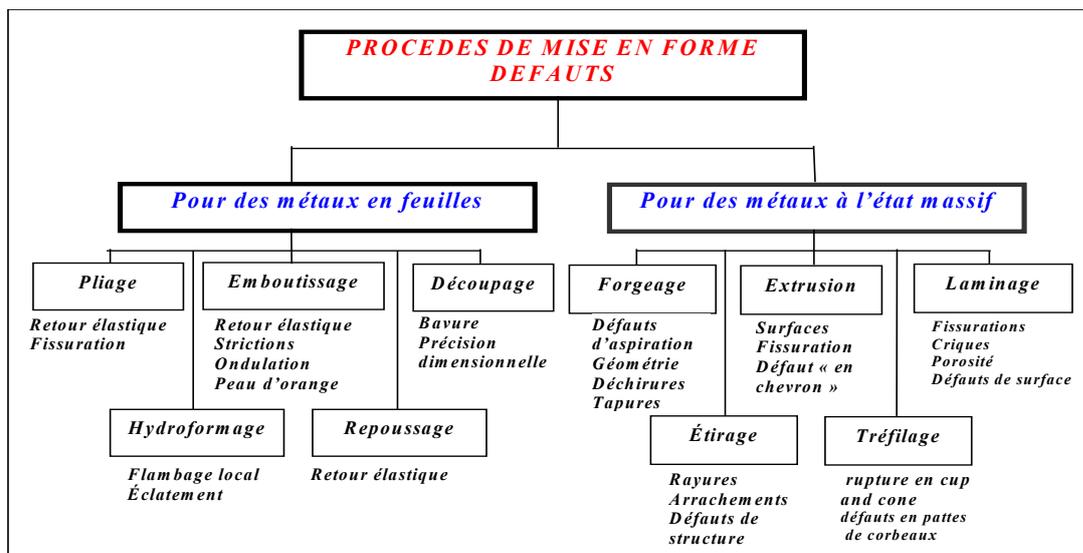


FIG. 1.6 – Les principaux défauts pour les procédés de mise en forme.

### 1.3.1 Défaillances lors de l’emboutissage

#### 1.3.1.1 Description du procédé

L’emboutissage est un procédé de formage par déformation plastique à chaud ou à froid des métaux. Il transforme une feuille de métal appelée flan en une surface généralement non développable [Ren10].

L'opération de l'emboutissage de tôles [Fel00, RO40] nécessite une presse à emboutir de forte puissance munie d'outillages spéciaux qui comportent, trois pièces (Figure 1.7) :

- Un poinçon coulissant suivant l'axe vertical, et déformant la tôle.
- Une matrice qui sert d'appui à la tôle et lui donne la forme extérieure finale.
- Un serre flan qui a le rôle de maintenir le flan afin d'assurer un écoulement homogène du métal et de prévenir les risques de plis ou autres défauts d'emboutissage.

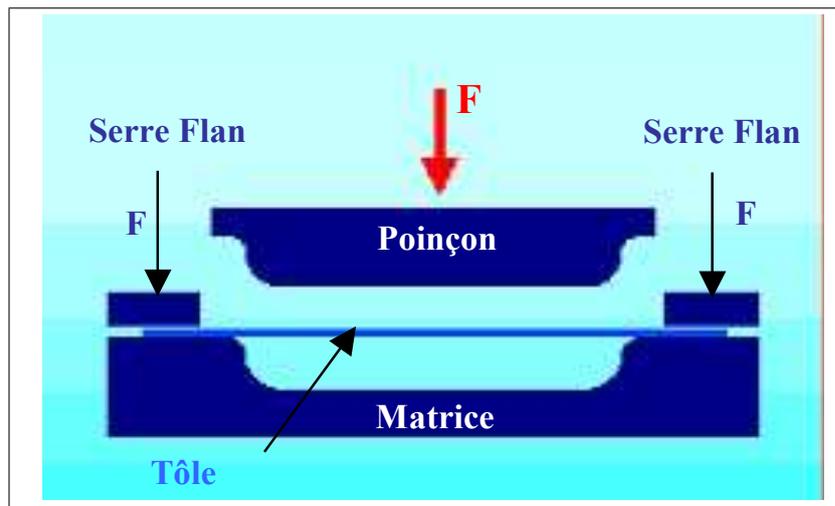


FIG. 1.7 – Procédé d'emboutissage : Photo [Emb02]

En fonction de la température de formage, il existe deux techniques d'emboutissage :

- **L'emboutissage à froid** qui consiste à former des pièces à la température ambiante. Cette technique présente l'avantage d'obtenir une meilleure précision dimensionnelle [Bou66] et un coût réduit, parce qu'elle ne nécessite pas l'échauffement du flan et de la matrice. Mais elle a certains inconvénients tels que : les contraintes résiduelles qui peuvent provoquer un risque de rupture par fatigue, l'épaisseur des tôles à emboutir et les caractéristiques mécaniques sont limitées. Pour la fabrication de pièces de grandes épaisseurs il est nécessaire d'effectuer cette opération en plusieurs passes.
- **L'emboutissage à chaud** [Bou30] qui consiste à former des pièces sur des presses hydrauliques par chauffage du flan et de la matrice ce qui évite l'écrasement et la formation des contraintes résiduelles. Cette technique facilite la déformation du matériau, mais à une cadence de production moins élevée par rapport à celle de l'emboutissage à froid. Les pièces finies sont de moins bonne qualité, que ce soit au niveau de l'état de surface ou du dimensionnement.

Durant l'emboutissage, afin d'obtenir la forme désirée, le métal est soumis à

des déformations plastiques [Mon00, Pom95], qui consistent en un allongement ou rétreint local de la tôle [Cun42]. Les zones d'étirement subissent un amincissement (Figure 1.8 a) qui doit rester limité pour éviter la rupture et les zones de rétreint (Figure 1.8 b) subissent une combinaison d'épaississement et de plissement. Afin d'optimiser l'écoulement du métal entre le poinçon et la matrice il faut savoir réaliser le meilleur compromis entre ces deux modes de déformations (Figure 1.8).

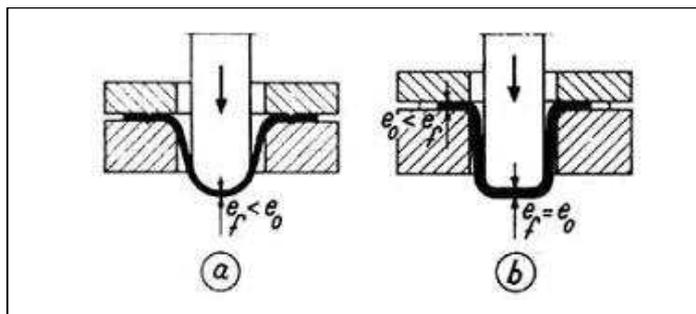


FIG. 1.8 – Principaux modes de déformation par emboutissage.

Pendant cette opération les déformations [Col11, Col10] sont très complexes et entraînent des défauts qui sont difficilement maîtrisables [Ham00b, Has02, Lih04, Ren10]. Ces défauts peuvent être regroupés en deux catégories :

- Défauts structuraux : rupture (Figure 1.9), zone insuffisamment tendue, striction localisée, fissurations, etc. [Has02, Ren10, Xu04]
- Défauts de forme : ondulations, formation des plis (Figure 1.10), peau d'orange, retour élastique, etc. [Lih04]



FIG. 1.9 – Défauts structuraux d'emboutissage : rupture [Lih04].

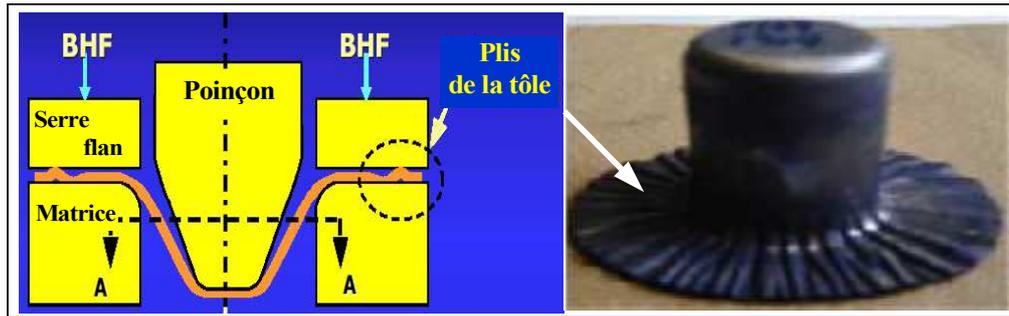


FIG. 1.10 – Défaut d'emboutissage : Formation des plis [Yos04].

Le procédé d'emboutissage est influencé par une gamme très variée de facteurs : lubrification, cadence, pression de serre flan, etc.. Mais une influence importante est engendrée par des facteurs qui sont liés à la métallurgie de la tôle tels que : la limite d'élasticité, la surface de la tôle, la taille des grains, le coefficient d'anisotropie, l'homogénéité du matériau etc. [Col11, Mon00]. Le facteur le plus important influençant l'écoulement du métal est considéré comme étant la géométrie du flan [RO40].

### 1.3.1.2 Le retour élastique

Lorsque le poinçon se retire après la phase de mise en forme, la pièce ainsi formée n'est plus soumise à la force de maintien. Il se produit un retrait de la matière du à l'élasticité du matériau et aux contraintes résiduelles après le formage (Figure 1.11). Ce phénomène s'appelle retour élastique [Kyu00, Lia02, Sta02, SW04] et il est d'autant plus important que la limite d'élasticité du matériau est elle même élevée. Les conséquences du retour élastique après l'emboutissage sont :

- défauts de forme
- variations des caractéristiques géométriques des pièces.

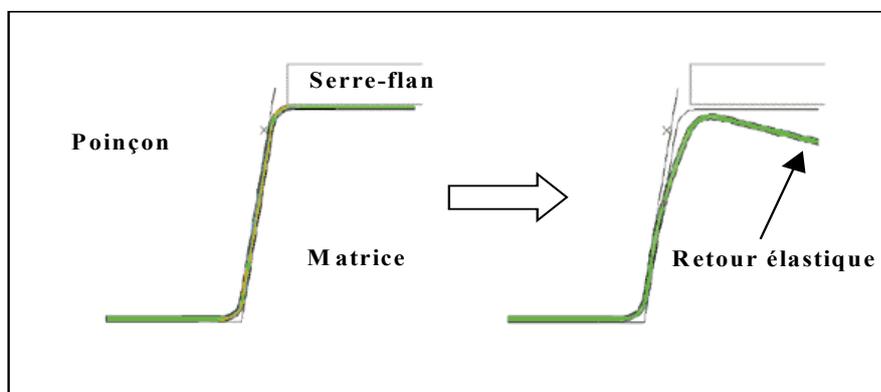


FIG. 1.11 – Retour élastique après l'emboutissage.

La compréhension et la prédiction du retour élastique [Kyu00, Lia02, SW04] des pièces est un travail qui nécessite la maîtrise des paramètres opératoires et de leurs interactions. Pour cela les caractéristiques à prendre en compte sont principalement : l'élasticité du matériau, les rayons de raccordement, le jeu entre le poinçon et la matrice, le frottement, la cadence [RO40], l'épaisseur de la tôle ou la force de serre flan, etc..

Lingbeek et al [Lin05] présentent deux méthodes pour compenser le retour élastique après l'emboutissage. Pour la première méthode appelée **méthode de l'ajustement du déplacement** ou en anglais *smooth displacement adjustment (SDA)*, l'auteur propose une compensation du retour élastique par un déplacement supplémentaire de l'outil dans le sens inverse du retour élastique. Dans la deuxième méthode appelée **méthode de contrôle de la surface de l'angle d'ouverture** ou en anglais *surface controlled overbending (SCO)*, l'auteur garde le même principe que pour la première en ajoutant différents types de maillage pour l'outil, et la tôle tout en gardant une surface de référence appelée surface de contrôle (Figure 1.12).

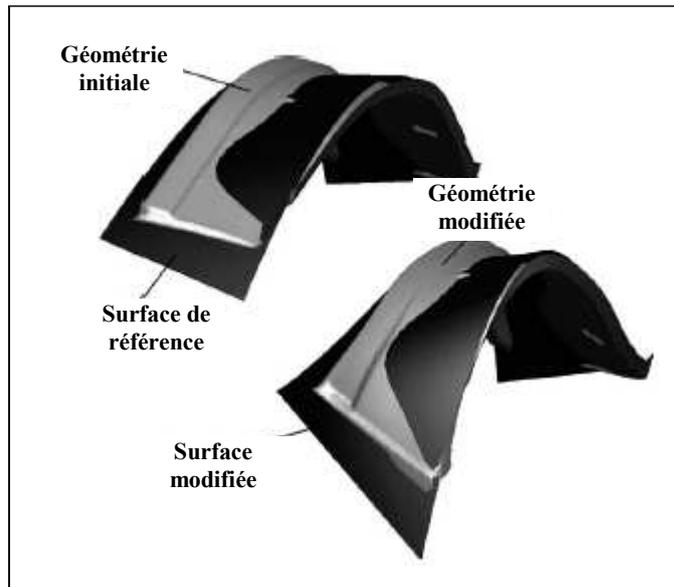


FIG. 1.12 – La modification de la géométrie avec le contrôle de la surface.

Les deux méthodes sont efficaces et elles donnent des résultats appropriés. Les résultats obtenus par simulation numérique ont été comparés à des expérimentations réelles et les conclusions ont été satisfaisantes. Une autre approche basée sur la méthodologie de la surface de réponse [Mon01] est proposée par Stander [Sta02]. L'auteur garde la même idée de compensation de l'angle du retour élastique. Le processus d'optimisation est en effet un processus d'itérations successives pour les surfaces de réponses qui modélise le retour élastique. A chaque itération, l'objectif est

de trouver les variables du procédé qui minimisent le retour élastique. Les variables qui ont été considérées durant les itérations sont : les paramètres géométriques de la tôle, les rayons de la matrice, la force de serrage, etc.. Le processus s'arrête quand les tolérances imposées par l'utilisateur pour chaque paramètre ont été atteintes. Malgré le temps du calcul qui est d'autant plus long que les paramètres sont nombreux, cette méthode donne des résultats fiables. Afin de réduire les défauts engendrés par le retour élastique après l'emboutissage, nous avons développé une méthode hybride d'optimisation (Chapitre 2) qui sera validée par une application à ce procédé (Chapitre 5).

### 1.3.1.3 Réduction de la formation des plis durant l'emboutissage

La formation des plis pendant le procédé d'emboutissage est un problème difficile qui a été largement étudié par différents chercheurs [AH91, Bal93, Cao97, Maz87, Nar95, Sob92a, Sza91, Wan94] notamment à partir de l'influence des caractéristiques des matériaux. Narayanasamy [Nar05] présente dans son étude l'influence du frottement sur le processus de formation de plis (Figure 1.13).

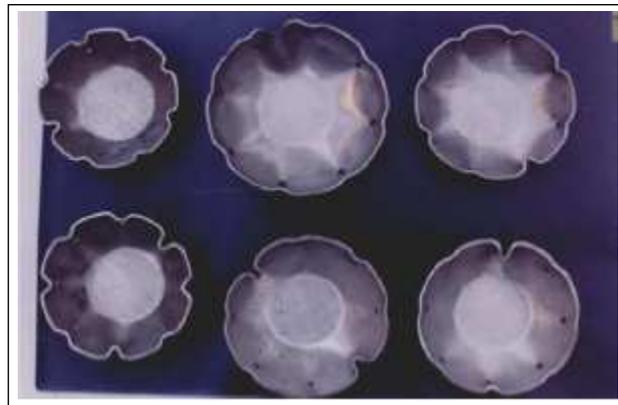


FIG. 1.13 – Différents types de plis durant l'emboutissage.

Le travail de référence pour l'étude de ce défaut est celui développé par Yoshida [Sza91]. Il propose un test pour déterminer les conditions d'apparition des plis qui porte son nom - **Yoshida buckling test**. Di et Thomson [Di97] ont utilisé les réseaux de neurones pour prédire le même phénomène. Leur approche est basée sur les paramètres de matériau proposés par Yoshida.

Une modélisation en 3D par éléments finis est proposée par Fan et al [Fan05] sur la formation des plis durant l'emboutissage (Figure 1.14).

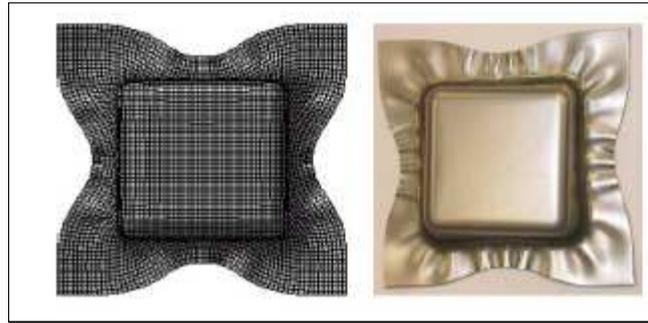


FIG. 1.14 – Formation des plis durant l'emboutissage - simulation par éléments finis.

Les auteurs montrent que l'état de l'endommagement dépend fortement de l'histoire du chargement et son évolution est influencée par le frottement et la force de serrage. Ils proposent également le couplage endommagement-éléments finis afin de localiser le processus d'initiation des fissures (Figure 1.15). Les résultats expérimentaux obtenus ont permis la validation de la méthode par la corrélation avec les simulations numériques. Étudiant le même défaut, Correia et al [DMC01] ont pu conclure que l'anisotropie du matériau a une influence négligeable sur le niveau de la contrainte critique de plissement.

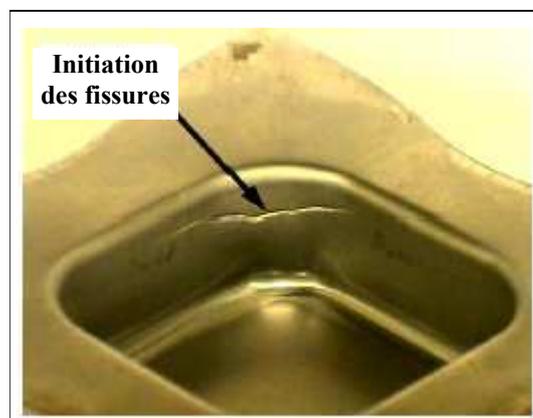


FIG. 1.15 – Initiation des fissures pendant l'emboutissage.

Même si maintenant à la place du poinçon on peut utiliser un fluide sous pression qui va déformer la tôle (procédé d'hydroformage) tout en éliminant le frottement entre la tôle et le poinçon, le risque d'apparition des défauts, tels que la rupture de la tôle et la formation de plis, est toujours présent. Une approche par éléments finis (Figure 1.16) est proposée par Nader [Nad05] afin de corriger ces défauts.

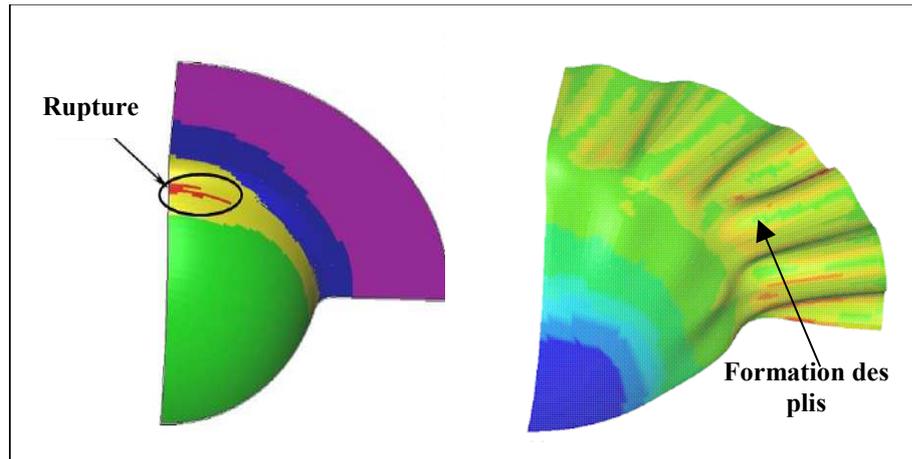


FIG. 1.16 – Simulation numérique des plis et de la rupture en hydroformage.

L'emboutissage sous presse présente de nombreux intérêts tant par son aspect économique que qualitatif. Cette technique de mise en forme permet d'obtenir des pièces à des prix bas avec des cadences de production très élevées. Les applications de cette opération de mise en forme sont extrêmement larges. On les trouve notamment dans les domaines suivants : transports (automobile pièces extérieures - carrosserie et intérieures - renforts), électroménager (radiateurs, machines à laver), ménager (casseroles - Figure 1.17), sanitaire (lavabos métalliques), emballage (boîtes de boisson, conserves), pièces mécaniques, etc..

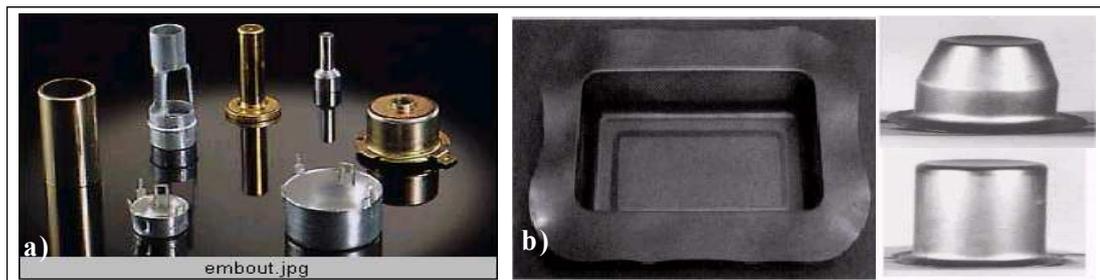


FIG. 1.17 – Pièces obtenues par emboutissage : a) petites pièces b) pièces de gros volume.

On peut rappeler également que dans le domaine de l'automobile les carrosseries obtenues par emboutissage représentent à travers le monde environ 20 millions de tonnes d'acier par an [Che04].

## 1.3.2 Défaillances lors du pliage

### 1.3.2.1 Description du procédé

Le pliage est la technique la plus utilisée dans la mise en forme. Une pièce pliée est formée par l'action verticale d'un poinçon rectiligne, sur une tôle supportée par une matrice (Figure 1.18) dont les rayons d'attaque sont parallèles à l'arête du poinçon [Bou30].

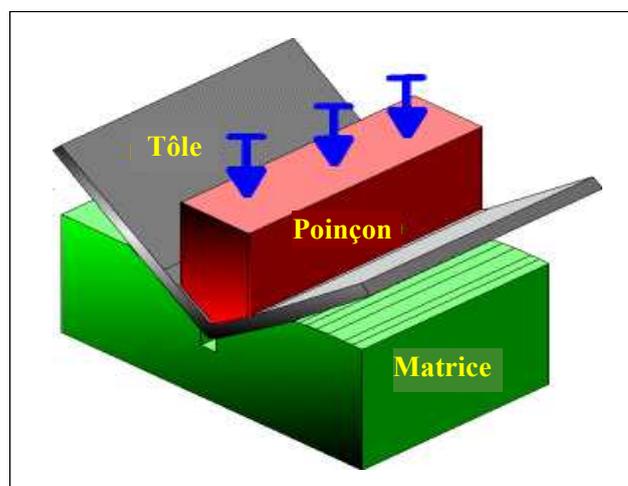


FIG. 1.18 – Procédé de pliage - Photo : [Ben01].

Cependant il existe plusieurs types de pliage tels que : le pliage en V, le pliage en l'air, le pliage à double matrice ou en L, le pliage en U etc. (Figures 1.19,1.20).

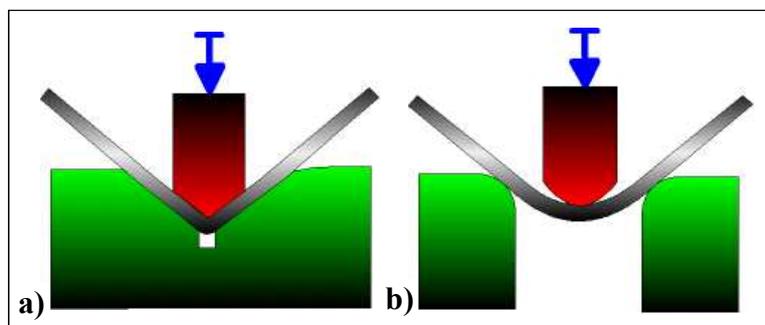


FIG. 1.19 – a) Pliage en V b) Pliage en l'air - Photo : [Ben01]

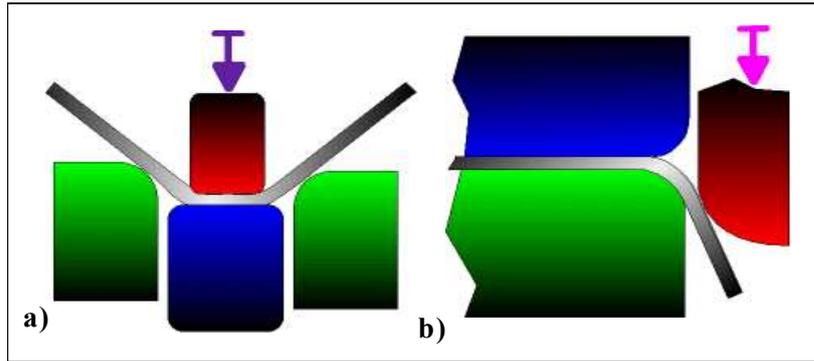


FIG. 1.20 – a) Pliage en frappe b) Pliage en L - Photo : [Ben01]

La figure 1.21 présente schématiquement les différents paramètres géométriques du pliage comme l'épaisseur de la tôle, la longueur pliée, le rayon et l'angle de pliage. Durant ce procédé la tôle est soumise à des contraintes de traction sur la partie qui vient en contact avec le poinçon et la compression sur la face opposée.

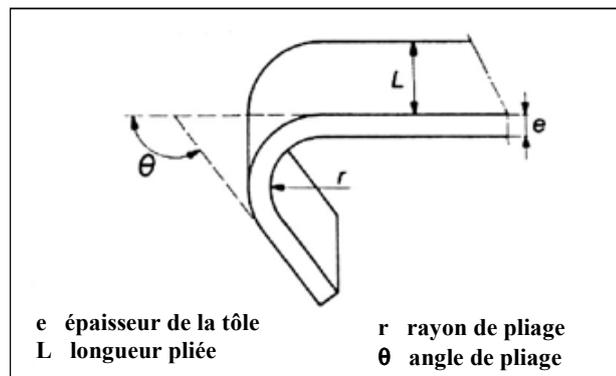


FIG. 1.21 – Paramètres géométriques du pliage - Photo : [Bou30].

De ce fait, sur la partie tendue il existe le risque d'apparition de fissures, quand le rayon de la matrice est trop petit, comme il est montré dans la figure 1.22. Ces fissures peuvent être évitées si on respecte un rayon minimal de pliage pour la matrice. Le rayon déterminé est fonction de l'épaisseur de la tôle et peut être influencé aussi par : la nature du métal, la géométrie de la pièce pliée, l'état du bord découpé [Bou30].

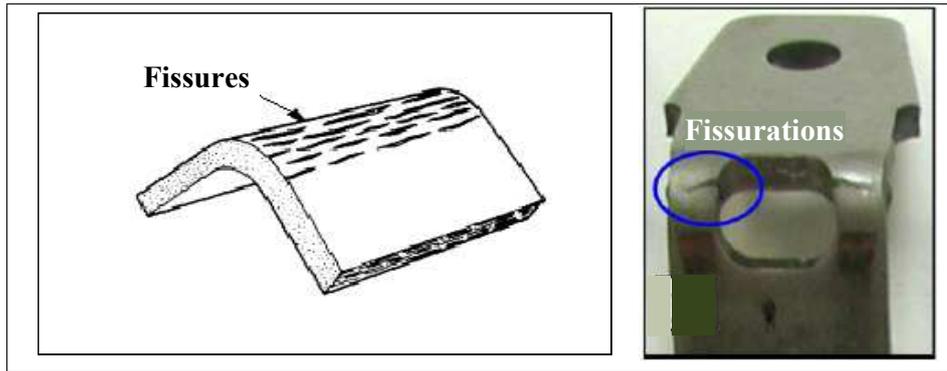


FIG. 1.22 – Apparition des fissures pendant le pliage - Photos : [Ben01, Mka03].

### 1.3.2.2 Retour élastique

Après l'opération de pliage lorsque le poinçon se relève, la tôle sous l'action des contraintes élastiques résiduelles se relâche. Ce phénomène s'appelle retour élastique (Figure 1.23).

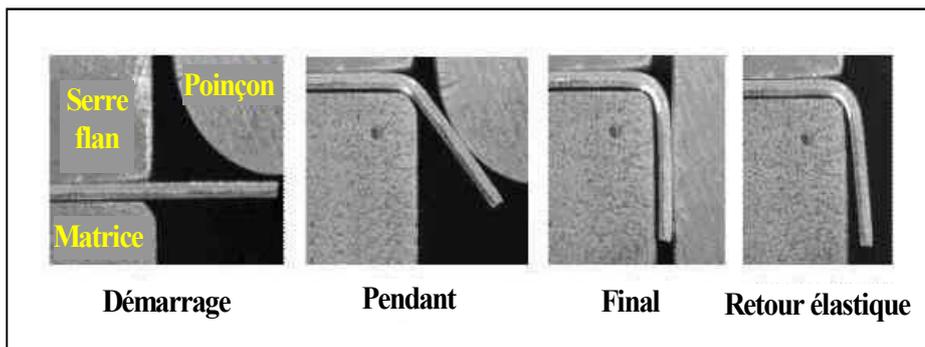


FIG. 1.23 – Retour élastique après le pliage - Photo : [Ben01].

La forme finale de la pièce pliée diffère de celle obtenue par la force du poinçon car il y a ce défaut de **retour élastique** [Ber74] qui est appelé aussi ressaut [Mar99] (Figure 1.23). Il entraîne des variations de la géométrie finale de la pièce et constitue la principale difficulté à maîtriser pour le processus de pliage. Le retour élastique dépend de plusieurs facteurs tels que : l'élasticité du matériau, le rayon de la matrice, l'épaisseur de la tôle, la lubrification, le jeu entre le poinçon et la matrice, la distribution des contraintes dans l'épaisseur de la tôle, la cadence, l'angle et la force de pliage [Mka03], etc.. La dépendance du retour élastique du matériau est importante et elle peut être exprimée par le fait que celui-ci sera d'autant plus grand que :

- la tôle est mince,
- la limite d'élasticité est faible,

– le module d'élasticité est grand.

### 1.3.2.3 Diminution du retour élastique

De nombreuses études [Cho99, Lep04a, Wer97, Zaf04] proposent ou rappellent différentes méthodes pour la diminution du retour élastique en jouant sur l'angle de pliage (Figure 1.24). Ces méthodes empiriques sont basées sur la connaissance a priori du retour élastique du matériau, ce qui n'est pas toujours possible à cause de la non-homogénéité du matériau et aussi de la variation des paramètres opératoires du pliage.

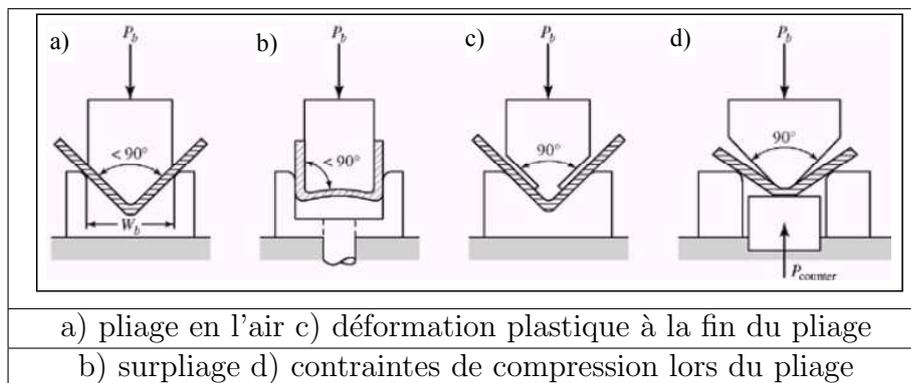


FIG. 1.24 – Solutions pour diminuer le retour élastique - Photo : [Zaf04]

Par exemple pour un pliage en V, on peut réduire le retour élastique en forçant le poinçon à s'appuyer sur le fond du V (Figure 1.25 a). Une autre technique est de forcer le poinçon à s'appuyer sur les deux arrêts de la matrice (pliage en V - (Figure 1.25 b), complétée en même temps par un jeu très petit qui va empêcher la tôle de se relâcher, mais cette solution présente l'inconvénient de surcharger les machines (50-60 % plus d'effort supplémentaire que dans le pliage en l'air [Ben01]) et de n'être applicable qu'aux presses mécaniques.

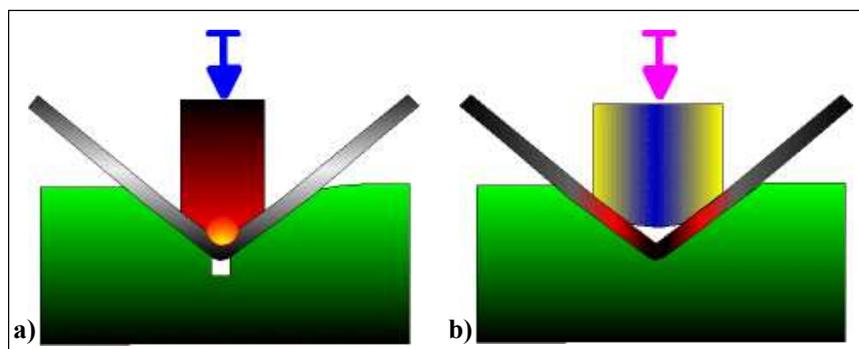


FIG. 1.25 – Pliage en V - solutions pour diminuer le retour élastique - Photo : [Ben01]

Plusieurs chercheurs [Bah05, For98, Ina02, Lia02, Mat02, Wer97, Zaf04] ont proposé différentes méthodes pour la diminution du retour élastique.

Bahloul et al [Bah05] montrent dans leur travail que, pour un rayon petit de pliage même si le retour élastique n'est pas significatif, la tôle subie des fissurations importantes (Figure 1.22).

Une étude sur l'influence de certains paramètres de pliage sur la géométrie finale des pièces est proposée par Mkaddem [Mka03]. Il propose une analyse du comportement d'éprouvettes en lieu et place des attaches réelles. L'originalité de cette approche consiste d'abord en l'introduction des différentes caractéristiques du matériau obtenues par des essais réels sur des modèles numériques afin d'améliorer son comportement pendant le pliage. Une des conclusions énoncée durant cette étude est que le retour élastique est fort dépendant du rayon de pliage.

Les effets du rayon d'arrondissement du poinçon (Figure 1.25) sur le retour élastique, pour le pliage en V, ont été envisagés par Forcellese et al [For98]. Durant leur investigation avec des modèles par éléments finis, ils ont mis en évidence une influence significative du rayon d'arrondissement du poinçon sur le retour élastique. Les résultats obtenus par simulations numériques ont été validés expérimentalement.

Pour le pliage en l'air Inamdar et al [Ina02] ont étudié l'influence de l'interaction entre les paramètres opératoires du procédé et ceux du matériau sur le retour élastique pour différents types de matériaux. Ils ont pu montrer que le retour élastique est essentiellement affecté par le rapport entre l'ouverture de la matrice et l'épaisseur de la tôle.

Dans son travail, Samuel [Sam00] montre que le retour élastique est fortement dépendant de l'anisotropie du matériau ainsi que de la force de pliage. Il trouve que la courbure des parois latérales (pliage en U) varie inversement au rayon de la matrice ce qui est due, selon lui, à la force de serrage appliquée par le serre flan.

Pour le pliage en L une étude sur la prévision et l'élimination du retour élastique à l'aide des calculs par éléments finis est présentée par Livatyal et al [Liv02]. Les résultats des simulations numériques obtenues par des codes de calculs différents (Abaqus, Deform, ou Bend) sont comparés avec des résultats expérimentaux afin de montrer les performances de chaque code de calcul. Par exemple, de façon générale, les prévisions des charges de formage avec Abaqus se sont avérées plus proches des résultats expérimentaux que celles obtenues avec Deform. Alors que Abaqus donne des résultats légèrement plus précis, Deform a l'avantage d'une interface graphique facile à utiliser avec des routines de pré et de post-traitement puissantes.

Gau et al [Gau01] ont fait une investigation expérimentale afin d'étudier l'influence de l'effet Bauschinger sur la prédiction du retour élastique (Figure 1.26).

Après l'analyse des résultats ils ont conclu que le retour élastique n'est pas influencé d'une manière significative par l'effet Bauschinger.

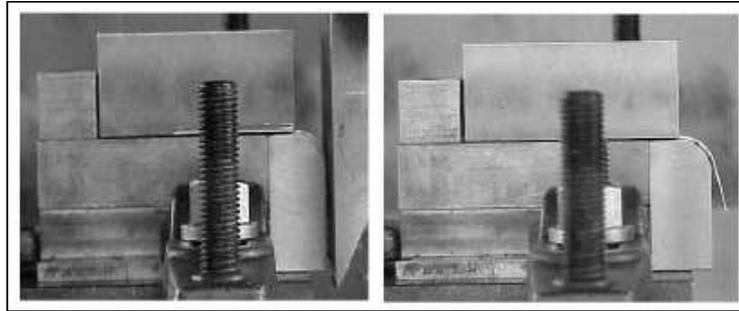


FIG. 1.26 – Retour élastique obtenue expérimentalement.

Une grande partie de la littérature dans le domaine de mise en forme par pliage [Cho99, LP01, Liv02, Liu02, Sam00] est consacrée à la prédiction par éléments finis couplé ou non avec une analyse expérimentale du retour élastique, afin de proposer la diminution des effets engendrés par ce défaut.

Malgré ces propositions, le retour élastique reste encore un problème pour le processus de pliage. Dans ce contexte nous allons proposer dans le chapitre 2 une nouvelle méthode d'optimisation applicable notamment car il s'agit des essais basés sur des simulations numériques et le phénomène étudié à un fort caractère non-linéaire. Le procédé de pliage étant un processus non-linéaire nous a permis de montrer les avantages d'utilisation de cette nouvelle méthode dans le processus d'optimisation.

Le procédé de pliage est très répandu, dans l'industrie parce qu'il peut-être utilisée aussi bien pour la fabrication des pièces de grandes dimensions que pour des petites pièces (Figure 1.27).



FIG. 1.27 – Pièces obtenues par pliage.

Cette technique de mise en forme présente l'avantage de faire appel à des outillages simples pour la réalisation des pièces de formes complexes (Figure 1.27) Ces

inconvénients sont liés au fait que la longueur de pli est limitée à la longueur de la machine et l'élasticité résiduelle (retour élastique) reste difficilement contrôlable.

### 1.3.3 Défaillances lors de l'extrusion

#### 1.3.3.1 Description du procédé d'extrusion

L'extrusion (Figure 1.28), est un procédé de filage assez récent, qui consiste à porter les métaux à une température adéquate, puis à les faire passer, sous une très forte pression, à travers une filière (matrice) dont les ouvertures définissent le profil recherché.

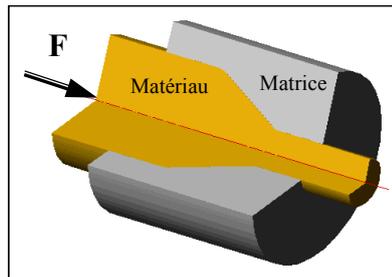


FIG. 1.28 – Opération d'extrusion.

Il existe plusieurs techniques d'extrusion. On présente ici les plus utilisées en les classant en fonction du type d'extrusion ainsi qu'en fonction du type de la pièce finale (pleine ou creuse) [Bos85] :

#### **Ecrasage**

- pour les pièces pleines - simples ou semi-encastées (Figure 1.29 a)
- pour les pièces creuses - écrasement d'anneau ou écrasement semi-encasté

#### **Filage inverse**

- pour les pièces pleines - filage inverse extérieur ou central (Figure 1.29 b)
- pour les pièces creuses - filage inverse extérieur ou central

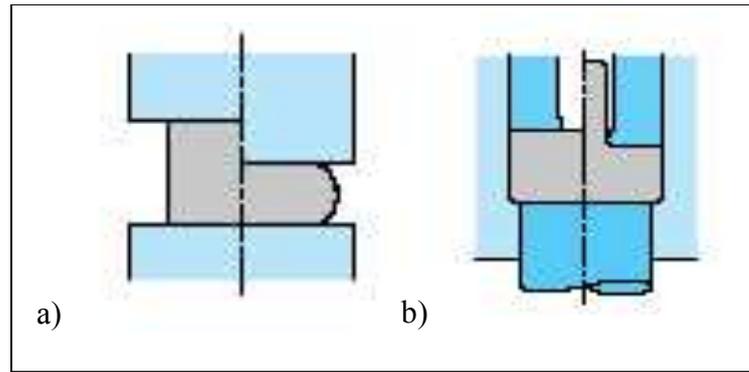


FIG. 1.29 – a) Ecrasage simple b) Filage inverse central.

### Filage direct

- pour les pièces pleines - filage direct extérieur ou central ( Figure 1.30 a)
- pour les pièces creuses - filage direct creux ou extérieur

### Filage latéral

- pour les pièces pleines (Figure 1.30 b)

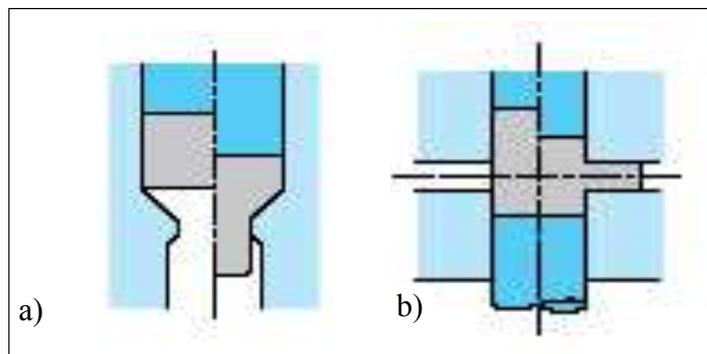


FIG. 1.30 – a) Filage direct central b) Filage latéral.

### 1.3.3.2 Les principaux défauts d'extrusion

Pour le procédé d'extrusion les principaux défauts sont [Ram20] :

- les défauts provenant du métal (inclusions, défauts internes, fissures externes)
- les défauts provenant de la transformation par forgeage (rupture du lopin - Figure 1.31, fissures internes - Figure 1.34)

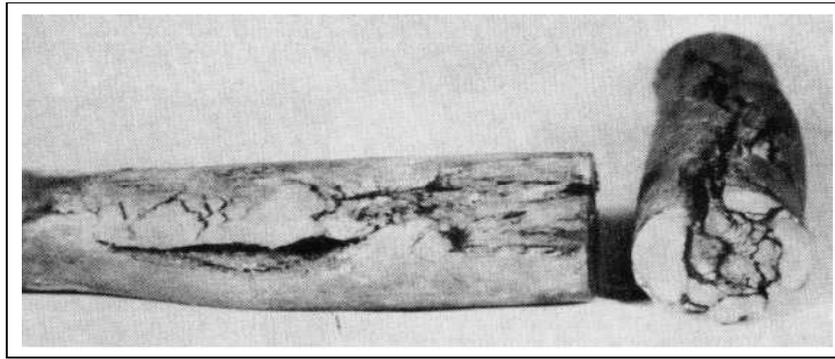


FIG. 1.31 – La rupture du lopin.

- les défauts provenant du chauffage et du refroidissement lors du forgeage
- les défauts dus au traitement thermique
- les erreurs d'usinage
- les défauts dus aux outils (usure, fatigue)

L'écoulement du matériau (Figure 1.32) est un facteur qui peut entraîner des défauts durant le formage des pièces par ce procédé. Collinet [Col72] montre par une étude expérimentale l'influence de la lubrification sur l'écoulement du matériau (Figure 1.32). On voit bien sur les deux figures que, l'absence de lubrifiant met en évidence une baisse de la vitesse d'écoulement au voisinage de la paroi, ce qui entraîne une déformation hétérogène et un risque de cisaillement du métal [Per40].

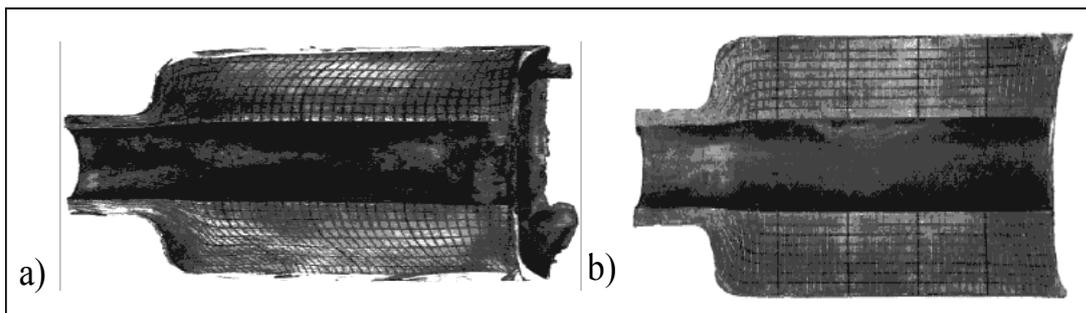


FIG. 1.32 – Influence de la lubrification sur l'écoulement du métal a) sans lubrification b) avec lubrification - Photo : [Col72]

La maîtrise du frottement est nécessaire du fait qu'elle peut influencer aussi les efforts du formage, la nature des déformations et les états de surface (fissures externes Figure 1.33) obtenus après déformation [Bos85].

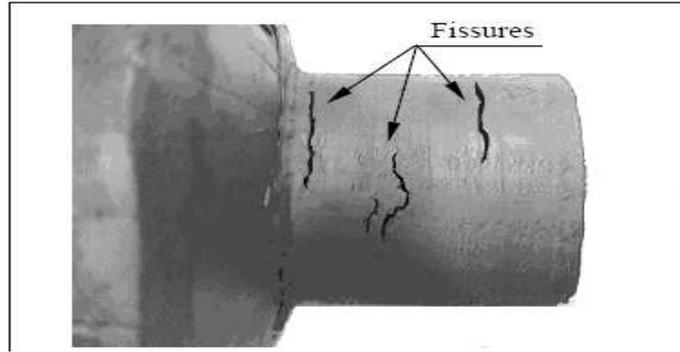


FIG. 1.33 – Fissuration externe durant l’extrusion.

Les fissurations (Figure 1.34) dans la zone centrale sont des défauts très souvent rencontrés lors de l’extrusion [Ko00] qui sont dus à un état de tension hydrostatique dans la ligne centrale de la zone de déformation du lopin. Ces défauts sont connus dans la littérature aussi par le nom de défauts en **chevron**.

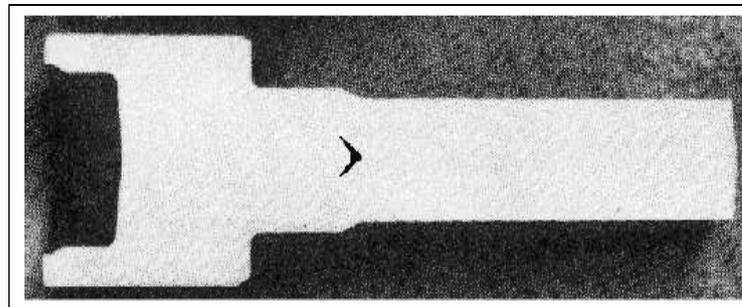


FIG. 1.34 – Défaut en chevron.

La figure 1.35 présente schématiquement le mécanisme de formation de ces fissures pendant l’écoulement du matériau. En effet, les déformations plastiques subies par le métal lors du formage n’arrivent pas à se réunir avant la sortie de la matrice ce qui se traduit par l’apparition de défauts en chevron. Sur la figure (Figure 1.35) on peut distinguer la formation des défauts en chevron dans la partie centrale du lopin. La ressemblance entre les deux images (schématisation du mécanisme d’apparition des défauts et l’expérimentation) confirme les hypothèses faites ci-dessus.

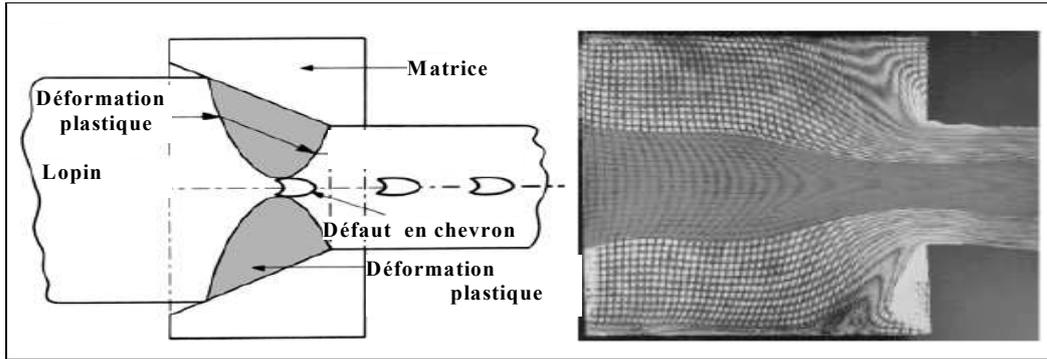


FIG. 1.35 – Le mécanisme de formage des défauts en chevron - Photo : [Ext01]

Pour résoudre ce problème [McV05] propose une solution par voie numérique capable de prédire l'apparition de fissures dans la zone centrale du lopin en fonction des paramètres opératoires. D'autres chercheurs [Ari86, Ara86, Kaz03, Kom99, Red96, Shi90] ont proposé des solutions analytiques afin de diminuer ce type de défaut mais ils n'ont pas encore établi une périodicité dans l'apparition de celui-ci. Kazutake [Kaz03] fait une analyse sur l'évolution du défaut en chevron pendant le formage. Par la même occasion il étudie l'influence sur ce défaut des effets de la rupture ductile, modélisée par différentes approches telles que : critères de Gurson, Oyane, Cockcroft et Latham, Brozzo et Freudenthal. Après cette analyse il a pu conclure que les critères de Gurson et Oyane, sont conformes aux résultats expérimentaux, le critère de Cockcroft et Latham est à peu près conformes aux résultats expérimentaux, tandis que les critères de Brozzo et Freudenthal ne sont pas conformes à ces derniers. Une autre solution citée dans la littérature pour réduire les défauts en chevron est d'utiliser un fluide à la place du poinçon (compression hydrostatique) afin de réduire significativement le frottement.

Au cours de son utilisation, l'outillage subit des sollicitations cycliques et un échauffement engendré par le travail des actions de contacts entre, le lopin et la matrice et par la puissance dissipée au sein de la matière. Il en résulte des problèmes de cassure, d'écaillage ou de grippage (rupture locale sur le bord de l'outil) ainsi que une usure [Car66, Ham01a, Lee99] progressive des parties actives. L'usure de l'outil (matrice) peut entraîner des écarts sur la précision dimensionnelle ou la dégradation de la surface des pièces obtenues par ce procédé. Ce phénomène qui survient pendant l'opération d'extrusion pour la matrice est un problème qui a été largement étudié par différents chercheurs [Ari03, GD03, Ham00a, Nam02, Yeo01]. Ils ont pu établir une dépendance entre l'usure et certains paramètres opératoires tels que : rayon, frottement, coefficient de réduction, angle de la matrice, etc.). Comme nous avons consacré une partie de cette recherche à l'étude de l'usure [Lep05c], on présentera

plus en détail ce phénomène à la suite de ce paragraphe, ainsi que dans le chapitre 3, là où il sera montré la modélisation par éléments finis.

Les pièces obtenues par extrusion à l'aide des presses mécaniques de grandes dimensions, sont des pièces identiques à sections égales qui ont un très bon état de surface permettant souvent de les utiliser sans usinage complémentaire. Leurs domaines d'application sont très variés tels que : pétrochimie, sidérurgie et métallurgie, mécanique, énergie hydraulique, énergie nucléaire, marine, armement, aéronautique et autres [Ram20]. Le procédé d'extrusion est une opération de formage, qui présente de nombreux avantages parmi lesquels on peut citer [Bos85] :

- une cadence élevée de production,
- une économie de matière par rapport au forgeage à chaud ou l'usinage (la perte étant comprise entre 5 et 20 % ) ;
- l'obtention de tolérances précises
- pièces de géométrie complexe (Figure 1.36)



FIG. 1.36 – Pièces obtenues par extrusion.

### 1.3.4 L'usure des outils

Dans le domaine de la mise en forme des pièces par extrusion [Ham00a] l'augmentation des cadences dans un souci de productivité industrielle entraîne une augmentation des sollicitations thermomécaniques des outils ainsi qu'une augmentation du taux de rebut par altération de leur surfaces qui sont liées à des mécanismes d'usure comme l'abrasion ou l'adhésion.

L'usure est une caractéristique utilisée souvent pour décrire l'état d'un système mécanique. Elle est une conséquence due au frottement entre deux pièces en mouvement l'une par rapport à l'autre. Concrètement, l'usure (Figure 1.37), avec ses

deux composantes, l'adhésion et l'abrasion, entraîne une micro-détérioration de surface par arrachement de particules. Ce phénomène peut entraîner des modifications dimensionnelles, géométriques et structurales par une augmentation des jeux fonctionnels.



FIG. 1.37 – Usure des outils.

Dans l'ensemble des secteurs industriels concernés par l'usure plus des deux tiers des problèmes rencontrés relèvent de la mécanique (dans ce domaine, 30% des avaries sont imputables à l'usure) [Car66]. D'après une étude réalisée par le CETIM <sup>1</sup>, le coût de l'usure dans les années 1990 en France, se chiffrait à 25 milliards d'euros, soit 3% du PIB.

Compte tenu de la complexité d'un tel phénomène, les premiers chercheurs ont défini l'usure par des lois générales, souvent empiriques, où ils ont fait appel à l'expérimentation. Mais la pratique nous a appris que les résultats issus des expériences sont difficilement extrapolables d'une situation à l'autre, à cause des conditions opératoires qui ne peuvent pas être reproduites d'une manière identique.

Le premier chercheur qui a modélisé l'usure fut Tonn en 1937, qui a proposé une équation empirique pour prédire l'usure abrasive [Lee99]. En 1940, Holm pose les bases d'une théorie sur l'usure qui a été utilisée plus tard par Archard [Arc53] pour donner enfin l'équation appelée loi d'usure d'Archard, qui sera présentée en détail au paragraphe 3.2.2.2. Cette loi est utilisée pour prédire ce phénomène dans l'hypothèse d'une évolution linéaire. Le phénomène d'usure fut aussi une préoccupation pour d'autres auteurs [GA99, Ham00a, Hor99, Jen98, Pai96].

---

<sup>1</sup>CETIM - Centre Technique des Industries Mécaniques

### 1.3.5 Fatigue des outils

Le phénomène de fatigue (Figure 1.38) se manifeste sur les matériaux soumis à des chargements de faible intensité, qui individuellement ne présenteraient pas de danger, mais qui, appliqués de façon cyclique, conduisent à l'amorçage puis à la propagation de fissures, d'abord microscopiques, puis macroscopiques, conduisant à la ruine du matériau et donc de la structure dont il fait partie.

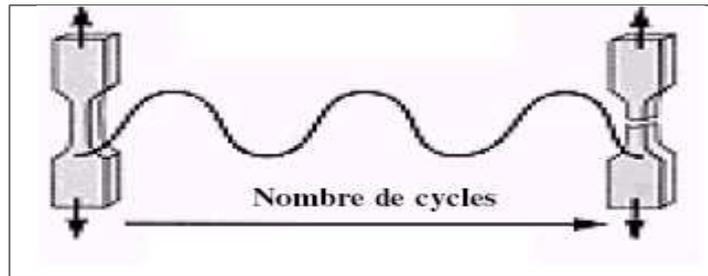


FIG. 1.38 – Chargement cyclique - fatigue - Photo : [Pay04]

D'une manière générale la fatigue décrit les défaillances qui conduisent à la fissuration et à la ruine des matériaux. La majorité des composants mécaniques critiques se ruinent sous des sollicitations mécaniques alternées. En tant que mode de dégradation, la fatigue est associée à 50 à 90% des cas de défaillances des systèmes mécaniques [Lu43]. L'incident le plus fréquent et le plus grave susceptible de survenir à un outil en service est sa rupture par la fatigue, d'où la nécessité de prendre en compte ce phénomène.

La fatigue des outils [Ju01, Par05] correspond à une succession, apparemment continue, de phénomènes complexes : écrouissage, détérioration locale du matériau, qui entraînent l'apparition des premières microfissures (phase d'amorçage), puis, la progression lente ou rapide de ces microfissures aboutit à la rupture finale de la structure (phase de propagation). Habituellement on distingue trois périodes pour décrire la ruine des outils par la fatigue (Figure 1.39) :

- période de germination ou période d'initiation des fissures,
- période de propagation des fissures,
- rupture brutale ou fracture.

Ces trois périodes représentent des fractions de durée de vie différentes suivant les matériaux et les caractéristiques des sollicitations. Des études récentes [And05] montrent qu'il existe une variation de la durée de vie par fatigue fonction de la taille des grains. La variation des dimensions des grains entraîne une prolongation de la durée de vie par rapport à une structure avec des grains de même taille.

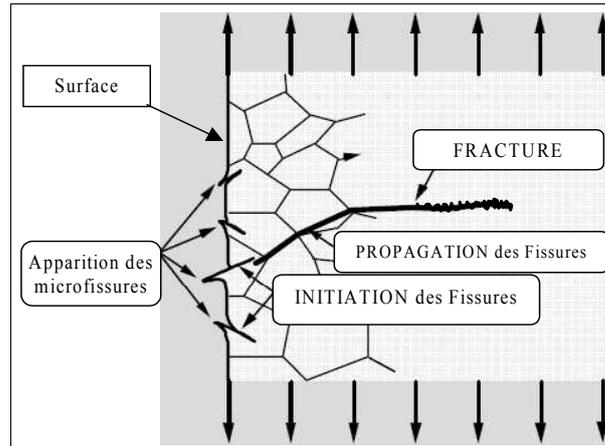


FIG. 1.39 – Les périodes de dégradation par fatigue [Lep05d].

Les théories modernes sur la fatigue proposent une analyse séparée pour chaque phase. Les théories de l'initiation des fissures [Dra99] sont fondées sur l'hypothèse que les fissures par fatigue sont initiées par les contraintes locales à la surface de la pièce (Figure 1.40).

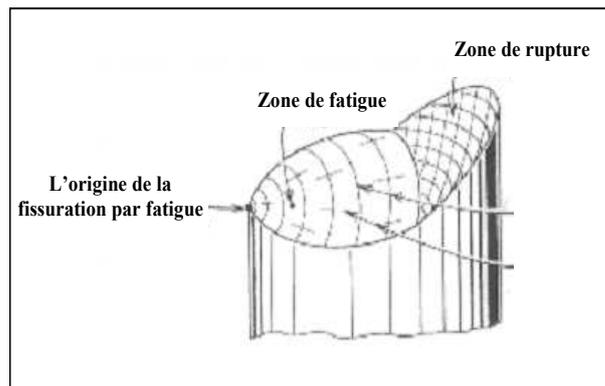


FIG. 1.40 – La dégradation d'une pièce par fatigue - Photo : [Mad69]

Pour la pièce sollicitée en fatigue les théories de propagation des fissures relient la progression de celles-ci aux efforts extérieurs. La rupture finale est analysée en utilisant la mécanique de la rupture. Des recherches récentes ont montré que le processus d'initiation de la propagation des fissures en fatigue part de défauts initiaux très petits [Dra99]. L'étude du phénomène de la fatigue des outils permet :

- de mieux maîtriser la prise en compte de la présence de défauts dans les matériaux métalliques qui sont utilisés pour la fabrication de ces outils,
- d'évaluer les conditions d'amorçage et de propagation d'une fissure dans les outils soumis à des sollicitations cycliques.

## 1.4 Méthodes d'optimisation existantes pour la mise en forme

L'optimisation des procédés de mise en forme est une tâche quotidienne pour les ingénieurs compte tenu de l'évolution rapide du marché qui entraîne une concurrence de plus en plus forte. Suite à cette évolution, les méthodes d'optimisation des procédés de formage ont, elles aussi évoluées au fil du temps. Parmi les fonctions objectif recensées lors du processus d'optimisation on peut citer d'abord la forme de l'outil de formage qui a été abordée par différents auteurs [Bal96, Chu97, Sri00, Shi04, Uly02] qui ont proposé différentes méthodes d'optimisation telles que : analyse de sensibilité, algorithmes de Simplex, quasi-Newton, méthode du gradient, algorithmes génétiques, réseaux de neurones ou autres. D'autres auteurs [Bro03, Cho03, For04, Ham05a, Sou06] durant leurs recherches ont choisi comme fonctions objectives : l'usure, le risque de rupture, l'écoulement du matériau, la force d'emboutissage, le retour élastique, etc.

L'optimisation des procédés de mise en forme est un domaine qui a été introduit par les travaux de Park [Par83]. La méthode proposée dite de **forgeage inverse** utilise les éléments finis pour déterminer le chemin inverse de la déformation permettant de réaliser la pièce finale.

Pour optimiser la forme finale de la pièce après le formage, Srikanth [Sri00] propose une approche qui a comme objectif d'évaluer le gradient de la fonction donnée par la différence entre la forme théorique et la forme finale de la pièce. Pour évaluer ce gradient l'auteur utilise l'analyse de sensibilité de forme qui est une approche d'optimisation très répandue.

Toujours dans l'optimisation de la forme, Shi [Shi04] développe une méthode qui utilise l'algorithme de simplex couplé à la modélisation par éléments finis. Par son algorithme il propose l'optimisation de la forme de la matrice afin d'éviter des défauts d'emboutissage tels que : la rupture (Figure 1.41 zone A) et la formation de plis (Figure 1.41 zone B et C). L'algorithme d'optimisation a été conçu de façon à diminuer le temps de calcul pour le processus d'optimisation (diminution du nombre des étapes d'optimisation) ainsi que pour les simulations numériques.

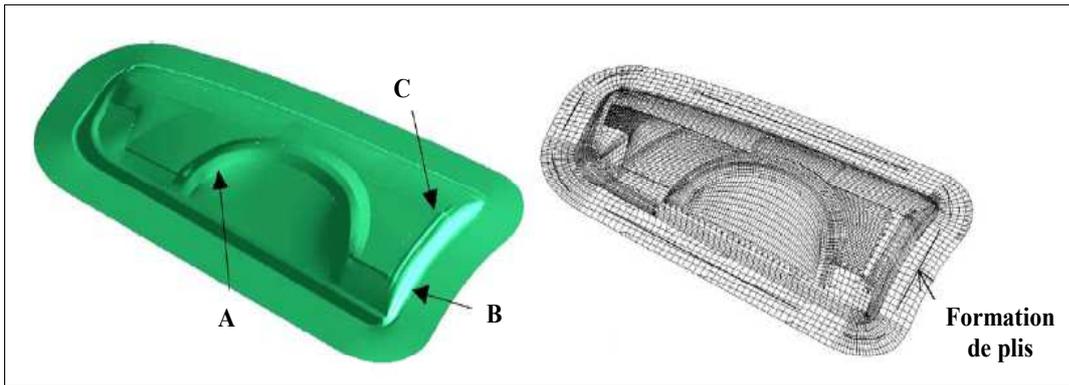


FIG. 1.41 – Optimisation des défauts d'emboutissage.

La méthode du Simplex est utilisée aussi par Khalfallah [Kha04] afin de diminuer l'écart entre les réponses obtenues par simulations numériques et les résultats expérimentaux durant son travail. En effet, son objectif est l'identification des lois de comportement élastoplastique anisotrope à partir des essais expérimentaux en vue de leur implémentation par éléments finis.

D'autres applications de cet algorithme ont été proposées. Otaha [Oha98] l'utilise pour optimiser un procédé 3D de mise en forme de plaques en deux opérations. Coupez et al [Cou99] propose son utilisation pour l'optimisation du profil de champs de vitesse dans le procédé d'injection 3D.

Balan [Bal96] présente dans ses travaux de recherche une méthode d'optimisation inverse basée sur un algorithme de quasi-Newton. Par cette méthode il propose l'optimisation de la forme des outils de forgeage. La particularité de cette approche est qu'elle tient compte du caractère non stationnaire du procédé et de principaux phénomènes qui en découlent : l'évolution du contact et la nécessité des remaillages.

Un problème d'identification des paramètres par une méthode d'optimisation inverse est développé par Kleiner mann [Kle03]. Cette approche est en effet un problème d'optimisation pour lequel l'objectif est de réduire au minimum l'écart entre les résultats obtenus par simulations numériques et les résultats expérimentaux. Pour résoudre d'une manière efficace un problème inverse, il faut utiliser une méthode d'optimisation adaptée au problème posé. D'une manière générale une méthode d'optimisation peut être efficace pour un problème et complètement inefficace pour un autre. C'est pourquoi les auteurs proposent l'utilisation combinée de plusieurs méthodes [Kle99] durant l'optimisation, méthodes qui sont changées dès qu'elles ne sont plus efficaces. On trouvera plus de détails pour leurs implémentations dans [Kle99].

Ulysse [Uly02] dans son travail développe une approche d'optimisation de forme de la matrice capable d'assurer un écoulement homogène du matériau. Le modèle

numérique utilise la méthode des éléments finis en 3D combinée avec des techniques de la programmation mathématique (Sequential Quadratic Programming (SQP)). L'étude met en évidence que la forme de la matrice est influencée par des facteurs comme : les caractéristiques du matériau, les paramètres opératoires du procédé et la vitesse d'écoulement. La simulation en 3D a été préférée parce qu'elle dépasse les limites de la modélisation en 2D applicable seulement pour l'extrusion des pièces à sections minces.

Pour obtenir le profil optimal de la matrice d'extrusion (Figure 1.42), Lin et ses collègues [Lin03] proposent une approche efficace de type séquentielle basée sur la méthode du gradient. La géométrie de la matrice optimisée diminue sensiblement l'usure, parce qu'elle permet un écoulement plus uniforme de la matière. Différents profils ont été testés (Figure 1.42 1 - profil optimal, 2 - profil de type courbe spline et 3 - profil incliné  $\alpha = 45^\circ$ ) pour choisir enfin celui qui maximise la durée de vie de la matrice.

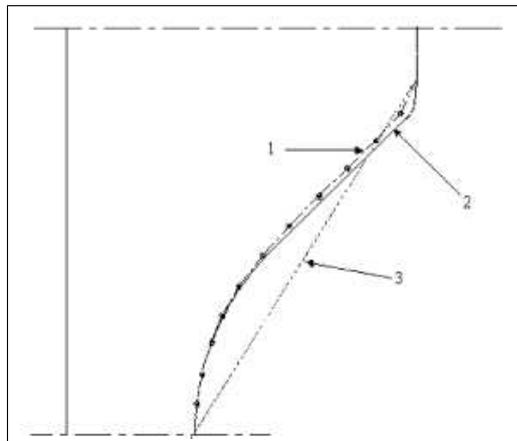


FIG. 1.42 – Différents profils de la matrice d'extrusion.

Les algorithmes génétiques sont utilisés par Chung et al [Chu97] pour optimiser la forme de la matrice d'extrusion. Il propose la modélisation par une courbe de type spline pour décrire la forme de la matrice (Figure 1.43). Par cette approche les auteurs ont essayé de résoudre trois problèmes : minimisation de la force d'extrusion, homogénéisation des déformations sur la pièce extrudée et minimisation du pic de pression à l'entrée de la matrice.

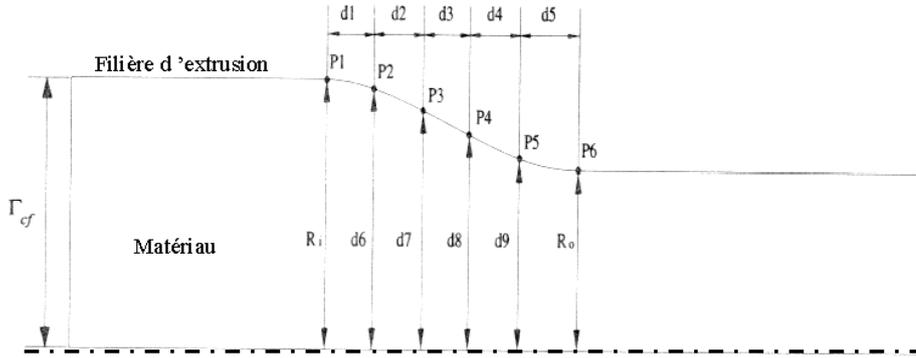


FIG. 1.43 – Optimisation de la forme d'une matrice d'extrusion.

Une analyse de sensibilité sur le procédé de forgeage est proposée par Laroussi [Lar03]. Cette méthode consiste à calculer le gradient de la fonction objectif à optimiser par rapport à un nombre plus ou moins grand de paramètres. Parmi les fonctions objectif envisagées on peut citer : l'énergie totale de mise en forme, la force maximale de forgeage, les défauts géométriques, replis, aspiration etc.. Il existe plusieurs méthodes d'analyse de la sensibilité [Vie99], mais l'auteur propose l'utilisation de la méthode de l'état adjoint parce que celle-ci est une méthode plus adaptée au problème posé : le nombre de critères à minimiser est limité (1 ou 2 au plus) tandis que le nombre de paramètres peut être élevé (une dizaine).

Pour répondre aux attentes des industriels, Vieilledent [Vie99] a eu comme objectif de développer un logiciel d'aide à la conception optimale en forgeage. L'analyse de sensibilité a tout d'abord été fiabilisée par la prise en compte des déformations ou les phases de calage des outils. En effet, le problème d'optimisation posé consiste à déterminer les valeurs optimales des paramètres permettant de forger la pièce finale aux dimensions requises et sans défaut majeur tel que les replis, en connaissant la forme de la pièce à obtenir. Le défaut de repli étant un point clé dans la conception des gammes de forgeage, par cette étude il a mis en place une technique de maillage pour la détection et le traitement des replis.

Yanran [Yan95] présente une méthode d'optimisation de la forme de la matrice d'extrusion notamment sur la partie active de la matrice qui est responsable de plusieurs types des défauts causés pendant le processus de fabrication. Afin de réduire la force d'extrusion, parmi les différents types de courbes proposées (en H, cosinus, elliptique ou droite - Figure 1.44), pour le même diamètre et la même longueur de la matrice l'auteur recommande la forme elliptique (Figure 1.44 c). Durant cette étude les essais numériques basés sur des modèles éléments finis ont été comparés à des expérimentations réelles afin de valider les résultats.

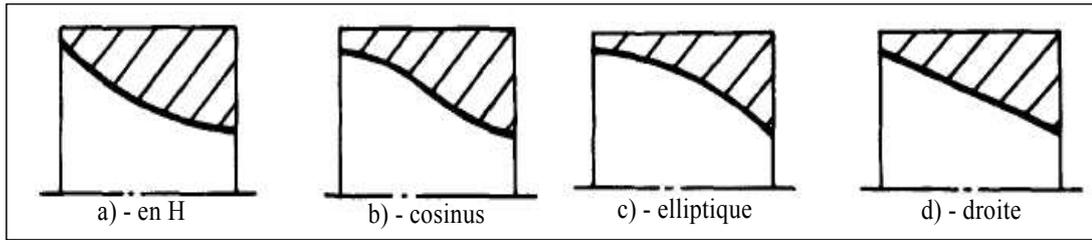


FIG. 1.44 – Différents types de courbes pour la forme de la partie active de la matrice d'extrusion.

Pour optimiser les procédés, Ouabiba et al [Oua01] proposent une boîte à outils basée sur le couplage entre l'environnement de simulation par éléments finis (code de calcul Arena) et l'environnement de calcul numérique et de visualisation graphique Matlab. Ce couplage permet par ailleurs de bénéficier de l'intégration des méthodes particulièrement adaptées à une démarche de simulation-optimisation telle que Nelder et Mead, recuit simulé ou algorithmes génétiques.

Pour modéliser les processus de fabrication d'une façon stochastique (variabilité de tous les paramètres de l'opération), il devient nécessaire de développer des modèles de calcul *très rapides* pour générer des milliers de calculs. En utilisant les méthodes numériques de calcul (différences finies, éléments finis), les temps de simulation restent longs et interdisent une modélisation globale multicritères *précise* [Fou96b, Fou96a, Gan02].

Dans cette démarche Hambli [Ham05a] a développé une technique qui intègre l'utilisation couplée des réseaux de neurones artificiels et la méthode des éléments finis. Cette approche a été appliquée avec succès dans le cas d'une opération d'extrusion d'une pièce cylindrique afin d'analyser la sensibilité du processus par rapport au risque de rupture de la pièce au cours du formage.

Le travail de Choudhury et al [Cho03] se concentre sur l'utilisation de la méthode des plans d'expériences couplée avec les réseaux de neurones pour réduire l'usure de l'outil pendant le procédé de fabrication. Les réponses prévisionnelles obtenues par les deux méthodes ont été comparées avec des essais réels afin de pouvoir décider du choix de la technique qui se rapproche le mieux de la réalité. Les avantages de chaque méthode utilisée ont été présentés par les auteurs afin de proposer la meilleure stratégie d'optimisation fonction de la caractéristique de qualité qui doit être optimisée.

Forestier [For04] a eu comme but le développement d'une méthode d'optimisation automatique couplée à un code de simulation tridimensionnel de procédés de mise en forme de métaux. Afin d'atteindre ses objectifs, il utilise l'analyse de la sensibilité, notamment pour l'optimisation de forme du lopin ou de la matrice. Durant la mise en

forme, le matériau est caractérisé par des déformations importantes qui induisent un écoulement hétérogène. L'approche proposée par l'auteur vise aussi l'optimisation de ce phénomène qui peut être influencé par : la géométrie de l'outillage ou de la pièce, le frottement, le comportement complexe de la matière (anisotropie, écrouissage), etc.

Sousa [Sou06] présente une méthode d'optimisation inverse du retour élastique pour le procédé de pliage. Le couplage entre la méthode des éléments finis et les algorithmes génétiques a permis d'obtenir les paramètres optimaux du procédé qui minimisent le retour élastique. L'approche proposée a été validée sur deux exemples (pliage en V et U) ainsi que par des essais réels, les résultats ont été encourageants.

Les algorithmes génétiques sont utilisés aussi par Antonio et al [Ant04] afin d'optimiser le profil de l'outil pendant le forgeage. Les résultats sont satisfaisants mais l'auteur craint, qu'une hybridation des algorithmes génétiques avec d'autres méthodes d'optimisation telles que l'analyse de sensibilité ou d'autres puisse donner des résultats meilleurs.

Une étude expérimentale du procédé d'emboutissage a été effectuée par [Bro03] dans le but d'optimiser la force d'emboutissage ainsi que de minimiser la variation de l'épaisseur de parois. Les auteurs proposent d'abord d'effectuer une étude de criblage des paramètres opératoires par la méthode des plans d'expériences, afin de déterminer leurs niveaux optimaux et aussi d'éliminer ceux qui ont peu d'influence. Les facteurs influençant le procédé d'emboutissage qui ont été considérés durant l'expérimentation sont : le profil du poinçon, le profil de la matrice, la force de serre flan, la force d'emboutissage, la cadence, la lubrification, ainsi que la position de la lubrification (du côté de la matrice ou du côté du poinçon ou les deux). Les auteurs ont pu conclure que l'utilisation de la lubrification mixte s'avère très efficace, bien que la lubrification du côté de la matrice seulement, ait donné des résultats meilleurs que la lubrification du côté du poinçon. Une autre conclusion de cette analyse est que les paramètres qui ont une influence significative sur la force d'emboutissage sont : la pression de serre flan, le profil du poinçon et celui de la matrice ainsi que la position de la lubrification.

Gantar et al [Gan05] ont développé une méthode d'optimisation pour le procédé d'emboutissage basée sur le couplage éléments finis, surface de réponse et la méthode de Monte Carlo. Le processus d'optimisation proposé par les auteurs peut être décrit en deux étapes. Premièrement la modélisation par surface de réponse d'un critère de qualité (réponse du système) influencé par les paramètres d'entrée, a permis une diminution du nombre de simulations numériques nécessaires au processus d'optimisation. Deuxièmement la surface de réponse ainsi obtenue a été utilisée

pour obtenir les paramètres optimaux du procédé par la méthode de Monte Carlo. Cette approche a été utilisée afin d'assurer la stabilité du processus vis à vis des dispersions des paramètres opératoires : les propriétés du matériau, le frottement, la force d'emboutissage, etc..

Afin de mieux comprendre certaines particularités des méthodes d'optimisation citées ci dessus, utilisées pour améliorer la qualité finale des pièces fabriquées, on présente brièvement par la suite les avantages et les inconvénients de ces méthodes sans entrer dans les détails mathématiques. Cette présentation a comme principal but de justifier notre choix pour la méthodologie des plans d'expériences qui est une méthode vivement conseillée pour des phénomènes de type procédés de fabrication pour lesquels on ne connaît que les facteurs d'entrée (paramètres opératoires du procédé) et la sortie (la qualité finale de la pièce fabriquée). Il faut ajouter aussi le fait que la méthodologie des plans d'expériences propose un nombre minimum d'essais qui se traduit par un temps de calcul réduit et par conséquent une diminution de coût évidente.

## 1.5 Modélisation mathématique d'un problème d'optimisation

D'une manière générale pour un problème d'optimisation, on définit une fonction objectif (fonction réponse, Exemple : usure d'un outil, retour élastique), que l'on cherche à optimiser (minimiser ou maximiser) par rapport à des paramètres (ou degrés de liberté - ddl) concernés. Une telle fonction objectif présente habituellement une seule réponse mais les enjeux industriels d'aujourd'hui font qu'on ne peut plus rester sur cette idée. Donc, il faudrait passer à l'optimisation multiréponses ou multicritères (notion qui sera présentée en détail dans le chapitre 2) afin de pouvoir répondre aux besoins des entreprises pour lesquelles l'optimisation globale a une conséquence directe - la réduction des coûts.

Un problème d'optimisation de dimension  $n$  peut être écrit sous la forme :

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Min ou Max } f(x) \in \mathfrak{R}^n \\ g_i(x) \leq 0, \quad i = 1 \dots n \\ h_j(x) = 0, \quad j = 1 \dots q \\ x_{k \min} \leq x_k \leq x_{k \max}, \quad k = 1 \dots n \end{array} \right. \quad (1.1)$$

où :

- $f(x)$  est la fonction objectif qui doit-être minimisée ou maximisée,

- $x$  est un vecteur à  $n$  variables  $x_k$  qui représente les paramètres du problème à optimiser,
- $g_i(x)$  et  $h_j(x)$  représentent les contraintes d'inégalité respectivement d'égalité,
- $x_{kmin}$  et  $x_{kmax}$  désignent les limites ou les bornes du domaine d'étude,
- $\mathfrak{R}$  est l'espace de recherche borné par les limites du domaine.

Après avoir défini la fonction à optimiser, il faut choisir une méthode d'optimisation adaptée au problème posé. Les méthodes d'optimisation utilisées par différents auteurs pour la mise en forme peuvent être classées en méthodes déterministes et méthodes non-déterministes.

## 1.6 Méthodes déterministes

Les méthodes déterministes (Figure 1.45) sont généralement efficaces quand l'évaluation de la fonction est très rapide, ou quand la forme de la fonction est connue a priori.

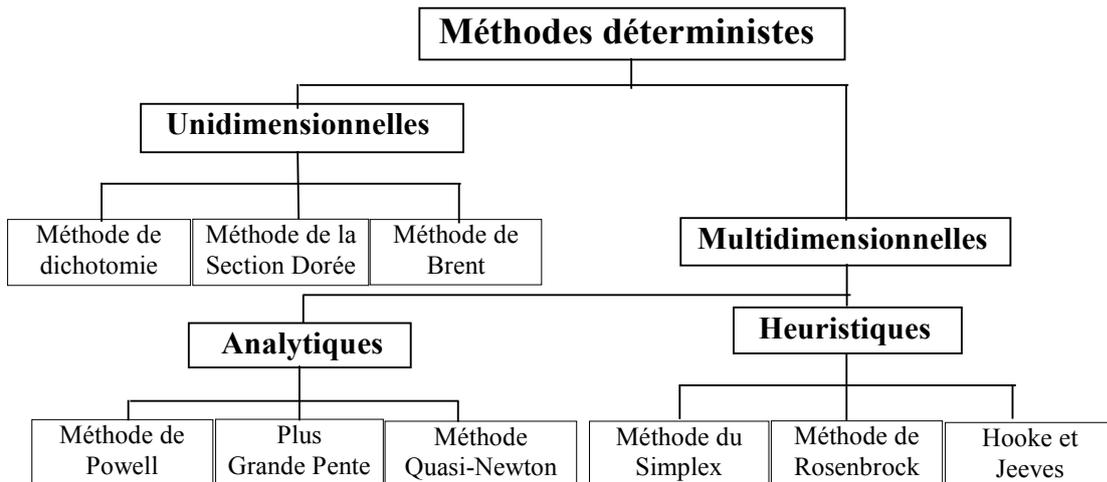


FIG. 1.45 – Principales méthodes déterministes.

La figure 1.45 présente une classification des principales méthodes déterministes d'optimisation.

Afin de trouver les extrêmums d'une fonction  $f$  il faut résoudre un système de  $p$  équations à  $p$  inconnues, linéaires ou non :

$$\frac{\partial f}{\partial z_i}(z_1, \dots, z_p) = 0 \tag{1.2}$$

Pour cela on peut utiliser des méthodes classiques telles que la **méthode du gradient** ou la **méthode de Gauss-Seidel** [Cia94, Man98, Nou87]. Le principe de

cet algorithme consiste à suivre la ligne de plus grande pente de la fonction objectif pour descendre vers le minimum. Cette méthode est basée sur la constatation que la direction opposée à celle du gradient de la fonction représente une direction de descente [Pre92]. Pour cela il faut calculer la valeur du gradient, à partir d'un point initial  $x_0$  et utiliser une méthode de recherche linéaire pour minimiser la fonction dans la direction de descente opposée. Cette minimisation permet de calculer la valeur du pas optimal  $\alpha_n$  qui nous emmène à un nouveau point de recherche à chaque itération du processus, en utilisant l'équation [Cal01] :

$$x_{n+1} = x_n - \alpha_n \nabla f(x_n) \quad (1.3)$$

où :

- $x_n$  est le point de recherche à l'itération  $n$
- $x_{n+1}$  est le nouveau point de recherche calculé à partir de la minimisation de  $f$  dans la direction opposée à son gradient.

La **méthode du gradient conjugué** [Cia94] est une méthode itérative permettant entre autres de trouver les extrêmes d'une fonction de plusieurs variables. Plus finement, la méthode du gradient conjugué fait partie des méthodes dites de descente selon une direction privilégiée. Elle présente l'avantage d'être facilement programmable (toutefois, il existe d'autres méthodes plus efficaces) et d'être susceptible d'une extension au cas où l'équation de mesure n'est pas parfaitement linéaire.

La découverte par G. Danzing en 1947, de l'**algorithme du simplexe** [Cha96, Cia94, Pel71, Sak84] consiste certainement une étape décisive dans l'histoire de l'optimisation. La méthode du Simplex a été développée ensuite par Nelder et Mead [Nel65], qui ont eu l'idée de modifier un simplexe de façon à ce qu'il atteigne le point d'optimisation. Le simplexe est une figure géométrique de dimension  $n$ , créée à partir de  $n + 1$  points, où chaque dimension correspond à un paramètre du problème à optimiser. Un simplexe de deux dimensions est donc représenté par un triangle, un simplexe de trois dimensions par un tétraèdre, etc..

Pour déplacer le simplexe vers la région optimale, l'algorithme vérifie la valeur de la fonction sur chacun des sommets du simplexe original et déplace le point où la fonction présente sa plus grande valeur, vers la direction opposée. Cette transformation s'appelle réflexion et elle est appliquée de façon à conserver le volume original du simplexe. Il existe aussi des situations spécifiées par la méthode où le point est déplacé soit par une expansion soit par une contraction du simplexe, comme le montre la figure 1.46. Il y a d'autres méthodes dérivées de la méthode du Simplex comme la méthode Multiple-Move [Por29] qui a été proposée par Hendrix pour accélérer

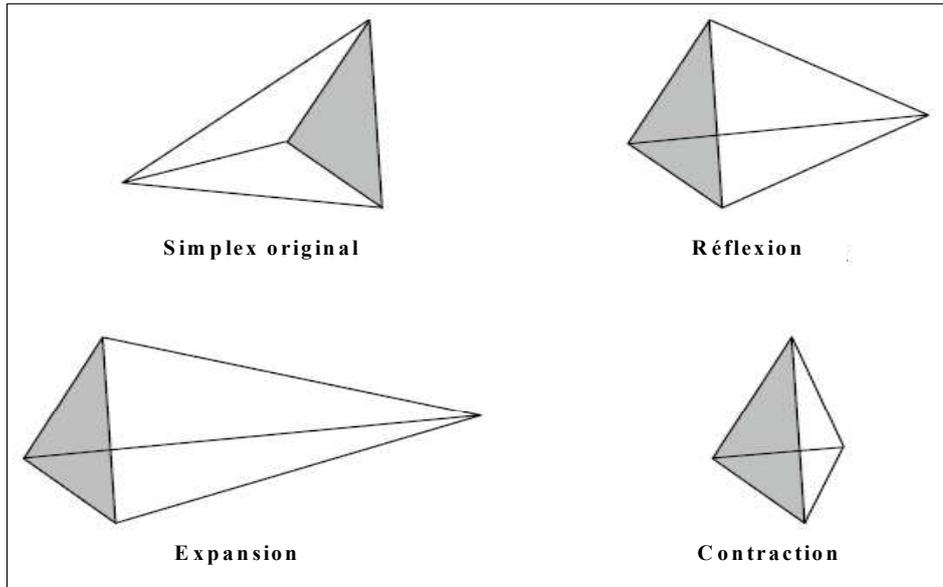


FIG. 1.46 – Méthode du Simplex.

l'évolution du simplex.

## 1.7 Méthodes non-déterministes

Ces méthodes (Figure 1.47) font appel à des tirages de nombres aléatoires. Elles permettent d'explorer tout l'espace de recherche et ont une grande capacité à trouver l'optimum global d'un problème. Contrairement à la plupart des méthodes déterministes, elles ne nécessitent ni de point de départ, ni la connaissance du gradient de la fonction objectif pour atteindre la solution optimale. Cependant, elles demandent un nombre important d'évaluations avant d'arriver à la solution du problème. La figure 1.47 présente une classification des principales méthodes non déterministes d'optimisation.

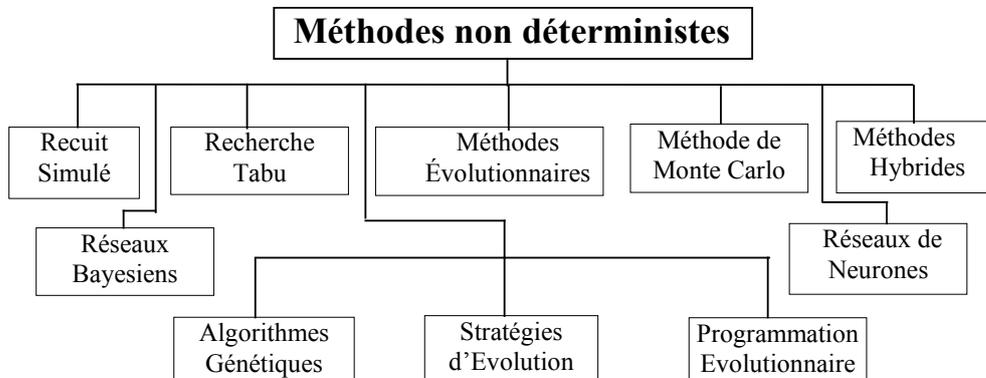


FIG. 1.47 – Principales méthodes non déterministes.

La **méthode Monte Carlo** [Lap98] ou la méthode de recherche aléatoire est la plus simple des méthodes non déterministes. Dans cette méthode, la fonction est évaluée en un grand nombre de points choisis aléatoirement. La méthode consiste en des simulations expérimentales ou numériques de problèmes mathématiques ou physiques, basées sur le tirage de nombres aléatoires. Généralement on utilise des séries de nombres pseudo-aléatoires générées par des algorithmes spécialisés [Fis97]. Les nombreuses critiques [Lap98] à propos des ces méthodes viennent du fait qu'elles ont la réputation de converger lentement et d'être peu fiables. Certaines sont largement fondées, et la lenteur de convergences en fait une méthode qu'il convient d'utiliser essentiellement dans des situations où l'on ne dispose pas d'autres méthodes numériques plus efficaces.

Les **Algorithmes Génétiques** (AG) [Hei97, Man02, Pha00, Vie99], sont des méthodes basées sur les principes de la sélection naturelle. Ils reposent sur l'analogie avec l'un des principes Darwiniens les plus connus : la survie de l'individu le mieux adapté (Figure 1.48). Les AG opèrent sur une population d'individus. Ces individus évoluent au cours des générations, grâce à des opérateurs génétiques, vers un individu optimal qui est la solution du problème d'optimisation. Ces individus sont appelés chromosomes et les opérateurs génétiques qui définissent leurs évolutions sont : la sélection, le croisement et la mutation (Figure 1.48). Les AG diffèrent des méthodes déterministes par trois principaux aspects :

- ils ne nécessitent pas le calcul d'un gradient,
- ils traitent une population dans son ensemble plutôt qu'un seul individu qui évoluerait vers l'optimum,
- ils font intervenir des opérateurs aléatoires ou semi-aléatoires. De ce fait, ce sont des algorithmes très robustes ; ils sont capables d'optimiser des fonctions multimodales, non convexes, non différentiables

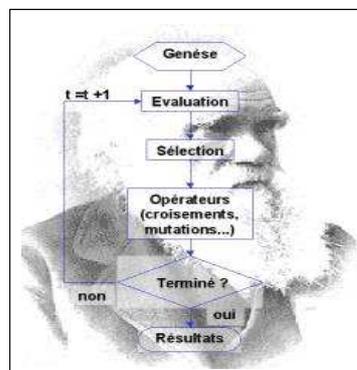


FIG. 1.48 – Organigramme d'un Algorithme Génétique [Man02]

Un **réseau de neurones** est un outil puissant de modélisation qui peut capter et représenter des rapports complexes entre des entrées et des sorties [Hay94, Jen97, Pap96, Raf01, Was01]. L'origine du développement de la technologie des réseaux de neurones provient du désir de développer un système artificiel capable d'accomplir des tâches *intelligentes* similaires à celles exécutées par le cerveau humain. Les réseaux de neurones ressemblent au cerveau humain de deux façons (Figure 1.49) :

- Un réseau de neurones acquiert la connaissance par l'apprentissage,
- La connaissance d'un réseau de neurones est stockée dans des forces de connexion inter-neuronaux connues sous le nom de *poinds synaptiques*.

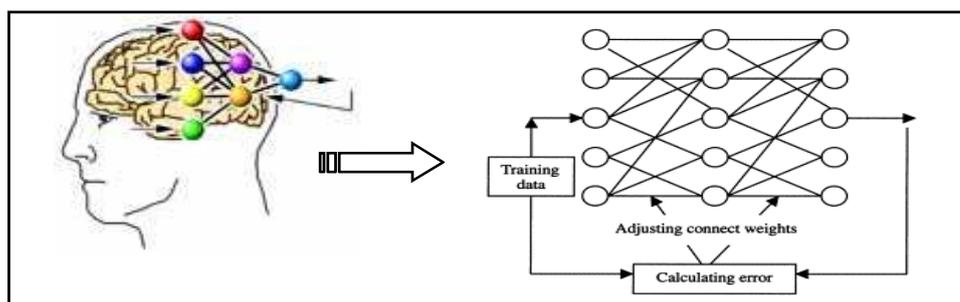


FIG. 1.49 – Structure d'un réseau de neurones artificiel.

Le réseau de neurones apprend comment faire l'association entre un ensemble d'entrées et un ensemble correspondant de sorties désirées en utilisant la série de données historique. Le but est que le réseau de neurones soit utilisé pour prendre des entrées dans un nouvel ensemble et pour produire une sortie utile quand la sortie désirée est inconnue.

Les réseaux de neurones présentent deux avantages fondamentaux :

1. Capacité à représenter n'importe quelle fonction, linéaire ou pas, simple ou complexe. Les réseaux de neurones sont ce qu'on appelle en mathématiques des *approximateurs universels* (théorème de Kolmogorov, 1957).
2. Faculté d'apprentissage à partir d'exemples représentatifs, par *rétropropagation des erreurs* [AO99, Bug98, EK01].

Le réseau de neurones fournit des réponses, mais pas des explications. En effet, l'apprentissage analyse les corrélations (associations intuitives) et non pas les causes et les conséquences (explications). L'examen d'un réseau de neurones ne livre que des coefficients dépourvus de signification par eux-mêmes. Il s'agit d'une **boîte noire**. Les réseaux de neurones sont à l'origine une tentative de modélisation mathématique du cerveau humain. Les premiers travaux datent de 1943.

L'idée principale des réseaux de neurones *modernes* est la suivante : On se donne

une unité simple, un neurone, qui est capable de réaliser quelques calculs élémentaires. On relie ensuite entre elles un nombre important de ces unités et on essaye de déterminer la puissance de calcul du réseau ainsi obtenu. Il est important de noter que ces neurones manipulent des données numériques et non pas symboliques.

Les **méthodes hybrides** sont de plus en plus utilisées pour les problèmes complexes d'optimisation rencontrés dans l'industrie telle que la variabilité d'un procédé ou d'un processus. L'idée essentielle de cette hybridation consiste à exploiter pleinement la puissance de recherche de chacune des méthodes recombinaisonnées. Par exemple l'hybridation d'un algorithme évolutionniste avec des méthodes de voisinage [Hao99] ou l'utilisation de la méthode de gradient en partant d'un grand nombre de points choisis aléatoirement. On peut ainsi espérer déterminer au fur et à mesure tous les optimums locaux de la fonction.

*Les techniques hybrides consistent à combiner plusieurs heuristiques ou méta heuristiques pour leurs avantages et leurs facultés à résoudre les problèmes [Ren95].*

Malgré ces inadéquations entre certains algorithmes utilisés et parfois un temps de calcul qui peut devenir très long, les méthodes hybrides resteront sans doute parmi les méthodes les plus puissantes d'optimisation.

Parce que l'optimisation des procédés reste un problème difficile à résoudre par les méthodes classiques présentées ci-dessus, l'utilisation d'une méthode hybride apporte une solution robuste aux ingénieurs. Dans le chapitre 2, il sera détaillé une méthode hybride [?] développée dans le cadre de cette thèse. Cette nouvelle méthode combine trois approches : les tolérances géométriques, la méthodologie de surface de réponse et le calcul par intervalle, afin de rendre acceptable plusieurs produits ayant des spécifications de qualité comprises entre des tolérances qui les mentieront toujours opérationnels.

Les méthodes d'optimisation présentées dans ce chapitre nous ont permis de mettre en évidence les différentes lacunes existantes lors de l'optimisation des procédés de mise en forme telles que :

- les méthodes présentées ne sont pas paramétrables,
- l'absence d'une solution mathématique applicable à tous les problèmes,
- l'absence de modèle structuré pour la construction de la fonction objectif,
- l'absence d'une méthode capable d'identifier les paramètres opératoires susceptibles d'influencer un procédé de fabrication.

Les procédés industriels sont des procédés très complexes et leur modélisation reste un problème difficile à maîtriser par des méthodes traditionnelles. Le plus souvent, l'étude d'un phénomène peut-être schématisée de la manière suivante : on s'intéresse à une grandeur,  $Y$  que nous appellerons par la suite **réponse** qui dépend

d'un grand nombre de variables,  $x_1, x_2, \dots, x_n$ , que nous nommerons par la suite **facteurs**. La modélisation mathématique consiste à trouver une fonction  $f$  telle que

$$Y = f(x_1, x_2, \dots, x_n) \tag{1.4}$$

Par les méthodes classiques on mesure la réponse  $Y$  pour plusieurs valeurs de la variable  $x_i$  tout en laissant fixe la valeur des autres variables. Mais le nombre très grand d'expérimentations qui en résulte, fait qu'il n'est plus possible d'accepter un tel choix. Il faut donc chercher une autre solution. L'utilisation de la méthodologie des plans d'expériences constitue la meilleure stratégie dans le choix des méthodes d'optimisation pour résoudre des problèmes industriels pour lesquels la variation des caractéristiques des pièces fabriquées constitue un vrai problème. La méthodologie de plans d'expériences offre un outil spécifique pour l'optimisation des procédés, par sa capacité d'adaptation aux phénomènes de type **boîte noire**. Le succès de cette méthodologie expérimentale est lié au fait qu'elle propose une optimisation efficace pour un nombre minimal d'expériences, ce qui induit une réduction de prix importante. La nouveauté apportée par cette méthode, est qu'elle propose une expérimentation factorielle, c'est-à-dire que tous les facteurs varient simultanément. Plus de détails sur son application seront présentés dans le chapitre suivant.

## 1.8 Conclusions

Pour répondre à la première discipline évoquée dans cette thèse, la **mathématique**, dans ce premier chapitre nous avons présenté les méthodes les plus utilisées pour le processus d'optimisation de procédé de mise en forme. Après avoir commencé par une présentation des procédés de mise en forme et leurs limites - les défaillances, nous avons fait un état des lieux des techniques d'optimisation qui ont visé l'amélioration de ces défaillances. Suite à cette présentation nous avons pu remarquer que selon leurs caractéristiques, les méthodes d'optimisation ont été classées en deux grandes catégories : les méthodes déterministes et les méthodes non-déterministes.

Les méthodes déterministes ont à leur avantage un coût faible, mais elles nécessitent souvent un point de départ et la connaissance du gradient de la fonction objectif pour résoudre le problème. Par contre, les méthodes non-déterministes ne demandent rien de tout ça. Elles ont aussi une faiblesse, le nombre important de calculs pour arriver à la solution optimale. Malgré cet inconvénient ces méthodes présentent un grand avantage : la capacité à trouver l'optimum global du problème.

Mais la particularité des procédés à optimiser pour lesquels la variation des caractéristiques fonctionnelles est un vrai problème, nous a amené à choisir parmi ces méthodes, la méthodologie des plans d'expériences, qui est la plus adaptée à notre problématique, par sa capacité à modéliser des problèmes de type **boîte noire** ainsi que par le petit nombre des expériences qu'elle nécessite. Ce choix n'exclut pas l'utilisation d'autres méthodes d'optimisation, parce qu'il y a des cas où nous sommes obligés de faire appel à celles-ci.



## Chapitre 2

# Stratégies d'optimisation par plans d'expériences numériques.

La méthodologie des plans d'expériences sera présentée dans ce chapitre ainsi que les nouvelles stratégies développées à l'aide de cette technique. La technique de screening est traitée ici par l'introduction aux plans factoriels, complets et fractionnaires. A l'aide de cette technique le nombre de facteurs supposés influents pour un procédé sera fortement diminué et les facteurs ayant peu d'influence seront éliminés. Par la suite, est présentée la méthodologie de la surface de réponse, avec les plans composites centrés qui sont largement utilisés dans le processus d'optimisation des phénomènes complexes et non-linéaires. La modélisation par surface de réponse des caractéristiques de qualité (réponses) d'un système nous aidera à diminuer le temps du calcul nécessaire au processus d'optimisation sans avoir à faire appel à cette méthode. Cette approche nous permet de définir la fonction objectif nécessaire au processus d'optimisation. Vu le manque d'informations qui existait dans la littérature, concernant l'utilisation des plans d'expériences numériques afin de déterminer le caractère non-linéaire d'un modèle, nous avons mis au point une technique nouvelle qui sera présentée dans ce chapitre. L'optimisation globale étant une manière plus efficace pour les entreprises d'optimiser plusieurs réponses simultanément, nous avons utilisé la technique de Ch'ng [Ch'05] pour les aider à atteindre cet objectif. Les bases théoriques de cette approche seront également présentées. Enfin la dernière partie de ce chapitre est consacrée à la présentation d'une méthode hybride originale développée dans le cadre de ce travail qui permet d'utiliser trois approches simultanément : méthodologie de surfaces de réponse, calcul par intervalles et tolérances mécaniques afin d'obtenir ce qu'on a appelé Surface de Réponse par Intervalle. La validation de ces nouvelles méthodes sera faite au dernier chapitre de ce mémoire par des applications à l'optimisation des procédés de mise en forme.



## 2.1 La méthodologie des plans d'expériences

### 2.1.1 Historique

La Méthodologie des Plans d'Expériences (*MPE*) est une méthode qui a été initiée dans les années 20 par Sir R. A. Fisher (statisticien anglais - 1925). Les premiers utilisateurs de cette méthode furent les agronomes qui ont vite compris l'intérêt des plans d'expériences. Vers les années soixante, grâce aux travaux de Taguchi, les plans d'expériences sont utilisés au Japon dans l'industrie pour améliorer la variabilité des procédés. Après le Japon les plans d'expériences sont utilisés aux États Unis dans les années 80 et en Europe dans les années 90.

La *MPE* peut s'appliquer à tous les phénomènes type **boîte noire** (Figure 2.1) où l'on cherche à optimiser les données de sortie (les réponses) en réglant les données d'entrée (les facteurs). Les données d'entrée sont connues dans la littérature comme étant des facteurs qui peuvent être contrôlés, mais il existe parfois des facteurs qui ne peuvent pas l'être, par conséquent ils ont reçu l'appellation de **facteurs bruits**.

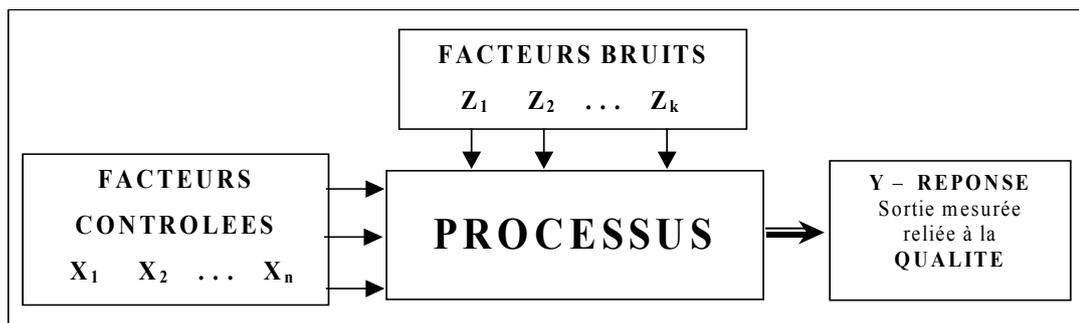


FIG. 2.1 – La **boîte noire** du processus

**Les objectifs des plans d'expériences sont de :**

- diminuer le nombre d'essais (ou de calculs),
- connaître les effets des paramètres,
- déduire les paramètres influents,
- évaluer les interactions entre paramètres,
- avoir une meilleure précision sur les résultats,
- établir une modélisation mathématique de la réponse.

Le terme **plans d'expériences** vient de l'anglais *Design of Experiments* qui se traduit par **planification des expériences**. En fait la méthode englobe aussi bien la définition de la séquence d'essais à réaliser pour étudier un problème donné que l'analyse statistique des résultats de ces essais.

Comme nous l'avons rappelé ci-dessus, les plans d'expériences peuvent être utilisés pour étudier des phénomènes complexes souvent non linéaires, afin de comprendre leur fonctionnement et d'optimiser leurs performances [Ben94b]. D'une manière générale cette technique est expérimentale et les réponses sont obtenues à partir d'essais (ou calculs numériques simulant les essais). La méthode des plans d'expériences permet d'obtenir un maximum d'informations concernant l'influence des paramètres opératoires sur un processus ou un système [Sch98], ainsi que la meilleure précision possible sur la modélisation des résultats [Gou99]. Notre choix pour cette technique est justifié parce que la *MPE* nous propose un nombre minimum d'essais, ce qui réduit le coût des expérimentations lors de la conception de nouveaux produits.

### 2.1.2 Expérimentations

Une expérimentation est une évaluation ou une série d'évaluations permettant d'explorer, de définir et de construire des données (résultats d'essais) pour modéliser ou prévoir le comportement d'un système ou d'un procédé [Fow98].

Classiquement, les expériences dans la *MPE* sont des expériences réelles pour lesquelles la modification des conditions expérimentales correspond à des variations plus ou moins importantes sur la réponse à étudier. Les réponses expérimentales sont soumises à des erreurs expérimentales et aux erreurs de mesure.

Les simulations numériques permettent de modéliser des phénomènes complexes, de mieux les comprendre et de procéder à des expérimentations par voie numérique en modifiant certains de leurs paramètres. Cette technique met en oeuvre des modèles théoriques qui sont les *clones* de phénomènes réels, souvent très difficiles à modéliser. Si leur utilisation est généralement plus économique et plus souple que les expériences réelles, des validations expérimentales sont toujours nécessaires pour garantir leur pertinence.

Malgré cet avantage économique, les simulations numériques sont des essais qui ne peuvent pas être répétés, parce que la variabilité naturelle des réponses n'est plus présente. Chaque réponse correspondant à un essai, est obtenue à partir d'une seule simulation numérique. Par contre il existe aussi de nombreuses sources de variations présentes lors de l'initialisation et du déroulement des processus d'expérimentation numérique.

Indépendamment de la *MPE*, parmi les sources de variations on peut citer :

- précision des données d'entrée, compréhension du phénomène à modéliser,
- les possibilités réelles des logiciels utilisés pour la modélisation,
- degré de simplification adopté pour le modèle proposé,

- caractéristiques du maillage du modèle,
- capacité de l'ordinateur, etc.

De plus il faut tenir compte aussi des inconvénients liés à la *MPE* :

- type de plan utilisé,
- type de modélisation utilisée, etc.

### 2.1.3 Modélisation de la réponse

Lorsqu'on réalise une étude expérimentale (ou des simulations numériques), d'un phénomène ou d'un procédé, on la caractérise par des réponses dont on suit les variations de en fonction divers paramètres (facteurs) influents. Généralement, l'illustration des résultats est donnée par la représentation graphique de la réponse (surface de réponse) en fonction de deux paramètres (on est limité à l'espace en trois dimensions).

Si on considère une réponse théorique  $Y_{th}$ , dépendant de  $n$  paramètres (facteurs)  $x_1, x_2, \dots, x_n$  on peut écrire :

$$Y_{th} = F(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (2.1)$$

Mais la réponse théorique est différente de la réponse obtenue par voie expérimentale ou numérique  $Y_{exp}$  à cause des erreurs expérimentales (ou numériques) inhérentes.

L'expression précédente devient :

$$Y_{exp} = Y_{th} + \varepsilon = F(x_1, x_2, \dots, x_n) + \varepsilon \quad (2.2)$$

D'une manière générale pour la modélisation d'un système n'ayant que deux variables, on peut écrire le modèle comme suit :

$$Y = \beta_0 + \beta_1 \cdot x_1 + \beta_2 \cdot x_2 + \beta_3 \cdot x_3 \quad (2.3)$$

Ce modèle explique la variation de la réponse  $Y$  en fonction des deux variables considérées  $x_1, x_2$ , en supposant que la relation est linéaire. Cette hypothèse nous amène à utiliser la régression linéaire [Dea00, Mon01] pour obtenir les coefficients du modèle dont la représentation géométrique est un plan de régression (Figure 2.2).

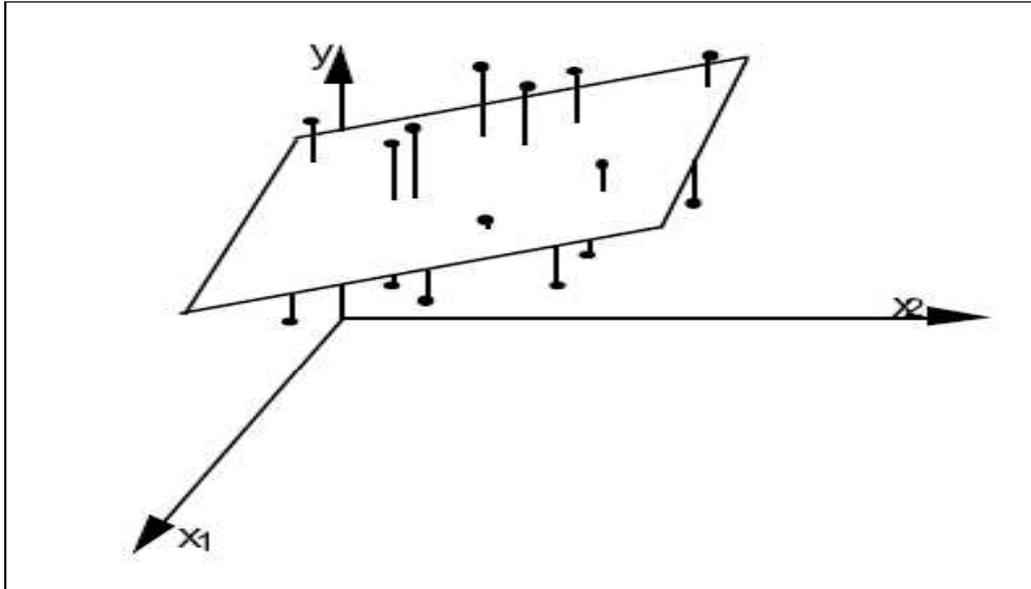


FIG. 2.2 – Plan de régression pour deux variables.

Le plan est ajusté selon le principe des moindres carrés où les sommes des carrés des erreurs d'estimation de la variable dépendante sont minimisées (Figure 2.2). S'il y a plus de deux variables, on peut étendre la méthode en ajoutant les variables et leurs paramètres :

$$Y = \beta_0 + \beta_1 \cdot x_1 + \beta_2 \cdot x_2 + \dots + \beta_p \cdot x_p \quad (2.4)$$

Cette équation est celle d'un hyperplan à  $p$  dimensions. Les paramètres  $\beta_i$  sont les *pentés* de l'hyperplan dans les dimensions considérées, et sont appelés *coefficients de régression*.

#### 2.1.4 Intérêt du codage des variables

L'intérêt du codage de variables, tient à l'homogénéité de l'équation polynomiale (modèle) que l'on établit pour la représentation mathématique de la réponse. D'une manière générale on peut affirmer que les paramètres ou les variables d'origine pour un modèle donné, notés  $P_k$ , n'ont pas nécessairement les mêmes dimensions ce qui rend difficile la comparaison de leurs coefficients. Dans le cas où les variables sont codées, toutes varient entre les mêmes valeurs minimales et maximales (respectivement  $-1$  et  $+1$  notation largement acceptée quand il y a deux niveaux par facteur) elles n'ont plus de dimension, et les coefficients  $\beta_i$  ont tous alors la dimension de la réponse.

D'après Goupy [Gou99], lorsque l'on attribue la valeur  $-1$  au niveau bas et la

valeur +1 au niveau haut, on effectue deux modifications importantes :

- on change l'unité de mesure,
- on déplace l'origine des mesures.

Ces deux modifications entraînent l'introduction de nouvelles variables que l'on appelle variables centrées réduites ou variables codées (centrées pour indiquer le changement d'origine et réduites pour signaler la nouvelle unité).

Le passage des variables d'origine  $P_k$  aux variables centrées réduites  $x_k$  et inversement, est donné par la relation suivante [Dro97] :

$$x_k = \frac{P_k - P_k^o}{\Delta P_k} \quad (2.5)$$

avec :

- $x_k$  - la valeur de la variable codée  $k$  ;
- $P_k$  - la valeur de la variable naturelle  $k$  ;
- $P_k^o$  - la valeur de la variable naturelle  $k$  au centre du domaine d'étude.
- $\Delta P_k$  est appelé pas de variation et il mesure la variation de la variable réelle  $k$  associée à une variation d'une unité de la variable codée correspondante.

Les variables  $x_k$  sont appelées variables centrées réduites et elles sont utilisées pour faciliter les comparaisons et l'étude des variations. En travaillant avec ces variables codées, nous pouvons comparer directement leurs différents effets sans tenir compte de leurs unités.

### 2.1.5 Principales composantes de la méthodologie des plans d'expériences

La *MPE* est une approche visant tous les phénomènes de type **boîte noire** pour lesquelles on cherche les valeurs optimales des données d'entrée - **les facteurs**, qui permettent une meilleure maîtrise des données de sortie - **les réponses**. Les deux principales composantes de la *MPE* qui nous intéressent dans ce rapport sont :

- la **technique de criblage** (ou de **screening** - appellation anglo-saxonne)

L'analyse d'un système ou d'un processus commence toujours par une identification de toutes les causes susceptibles d'influencer d'une manière significative le bon déroulement du processus. Parmi les facteurs recensés par l'expérimentateur, la technique de criblage permet de déterminer ceux qui ont une influence statistiquement non négligeable sur la variation de la réponse. Cet outil nous permet aussi une simplification du problème (appelée aussi débroussaillage). La question pour laquelle il faut trouver une réponse en utilisant cette tech-

nique est :

*Pourquoi la réponse varie et surtout en fonction de quels facteurs ?*

- la **méthodologie des surfaces de réponse** Dans le processus d'optimisation on cherche à améliorer le comportement d'un système ou d'un processus, dans un domaine expérimental bien défini, influencé par une ou plusieurs variables. La méthodologie de surface de réponse permet de trouver d'une façon empirique mais économique le lien qui existe entre les paramètres (les facteurs) d'un processus ou d'un système et les caractéristiques de qualité (les réponses) recherchées par l'expérimentateur.

D'une manière générale on peut rappeler que les objectifs de la MPE sont multiples, en présente ici quelques uns ainsi que les plans d'expériences concernés :

- diminuer le nombre d'essais (réels ou simulations numériques)
- étudier un nombre très grand de facteurs (plans fractionnaires)
- détecter les facteurs influents (plans de criblage)
- détecter les interactions entre les facteurs (confusion ou alias)
- rechercher l'optimum (nominal ou extrêmemum)
- réduire la variabilité ou d'étudier la robustesse d'un processus (plans produits)
- obtenir la meilleure précision sur le résultat (réponse)
- modéliser et optimiser les résultats ou les réponses (plans pour surface de réponse)

### 2.1.6 Technique du screening

Comme nous l'avons dit auparavant **la technique du screening** [Seo03] permet de déterminer, parmi un ensemble initial de facteurs, les éléments influents d'un processus. Il s'agit donc d'un procédé de sélection ou de criblage [Ben94b, Sch98].

A l'aide de cette technique, on réalise la comparaison entre les variations de la réponse engendrées par deux sources différentes :

1. les variations des facteurs étudiés ;
2. les variations de grandeurs considérées comme n'ayant pas d'effet sur la réponse (facteurs bruit).

Un facteur est jugé influent (ou déterminant) si son action sur la réponse étudiée est statistiquement supérieure à un certain niveau, fixé par l'expérimentateur. Il s'agit en fait de l'analyse de la variance, présentée plus précisément au cours de ce chapitre. D'une façon plus large, cette analyse permet de détecter et de hiérarchiser les influences des paramètres d'un modèle [Ben94b].

La technique du screening, [Mat40] permet d'avancer dans la compréhension de tout procédé parce qu'elle nous permet la détection des facteurs qui ont ou non, une influence significative pour le procédé étudié. Elle constitue une étape importante avant toute analyse plus *fine*, pouvant être notamment assurée par la *Méthodologie des Surfaces de Réponses (MSR - Voir paragraphe 2.1.7)*. Durant cette analyse, l'expérimentateur a tout intérêt à tester l'influence d'un grand nombre de facteurs, même s'il suppose la présence de paramètres non influents.

**Inconvénient :**

- dans cette approche, les facteurs qui, séparément, n'ont aucun effet, sont éliminés à l'étape du **criblage**. Or ils peuvent avoir un effet lorsqu'ils sont couplés.

La technique de screening ou criblage est une étape décisive dans le déroulement de l'étude d'un système et elle doit répondre aux exigences suivantes [Mat40] :

- être la plus rapide possible ;
- mettre en évidence le sous-ensemble de facteurs qui semblent avoir une influence prépondérante sur les propriétés recherchées (réponses) ;
- permettre de choisir le ou les niveaux les plus favorables de certains facteurs, ou d'éliminer du domaine d'étude les niveaux sans intérêt, etc..

Le modèle mathématique utilisé dans toute étude de criblage est donc un modèle polynomial du premier degré et il peut être représenté par l'équation (2.6) :

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^n \beta_i x_i + \varepsilon \quad (2.6)$$

Généralement pour l'étude de screening [Mat40] on utilise des plans factoriels complets tant que le nombre de facteurs n'est pas très grand, mais il est toujours possible d'utiliser le plan le mieux adapté à la problématique étudiée. Ces plans ont été largement exploités [Dea00, Mon01, Pil97] et sont très faciles à utiliser. Parce qu'on a rarement les moyens de réaliser des plans complets (coût élevé des essais et aussi du temps de réalisation), on peut utiliser des fractions des plans complets appelés aussi plans fractionnaires. Mais le fractionnement d'un plan complet entraîne une confusion des effets ou alias entre les facteurs qui n'est pas identifiable, leurs effets étant soit estimables indépendamment soit complètement confondus [Dro97].

L'orthogonalité est une propriété qui confère aux plans d'expériences des propriétés remarquables (un meilleur modèle de régression, une meilleure précision sur les coefficients, etc.). On considère qu'une matrice d'expérience  $X$  est dite orthogonale si sa matrice de dispersion  $(X^T X)^{-1}$  est diagonale. Il existe aussi le critère d'orthogonalité d'Hadamard pour les matrices qui satisfont la relation (2.7) et qui portent son nom. Dans cette équation  $I_n$  représente la matrice identité d'ordre  $n$ .

Ces matrices sont très populaires dans le milieu de l'expérimentation et elles peuvent être reconnues aussi sous l'appellation des matrices de Plackett et Burman ou tables de Taguchi [Gou99].

$$X^T X = I_n \quad (2.7)$$

Fisher et Yates ont montré qu'une matrice orthogonale conduit à l'indépendance des estimations des coefficients du modèle. Hadamard a démontré que pour obtenir en  $n$  expériences une variance minimale, les matrices d'informations devront satisfaire à la relation 2.7. [Dro97]. Pour calculer les effets d'un facteur indépendamment des autres facteurs la propriété d'orthogonalité est une condition nécessaire [Ale95].

### 2.1.7 La Méthodologie des Surfaces de Réponse

L'optimisation de procédé cherche à trouver l'ensemble des conditions de fonctionnement pour les variables du procédé qui ont comme conséquence la meilleure performance du processus. La **Méthodologie des Surfaces de Réponse** (*MSR*) [Bye03, Gua01, Noo03, Onu03] est une collection de stratégies expérimentales de méthodes mathématiques et statistiques qui permet à un expérimentateur de choisir la meilleure des combinaisons des niveaux des paramètres qui optimise un processus. La *MSR* est une approche d'optimisation développée au début des années 50 par Box et Wilson [Box51]. De nombreux chercheurs ont contribué à enrichir cette méthode [Cor90, Que04, Mon01] et elle a été introduite en Europe vers les années 1988 - 1990.

L'objectif d'une telle méthodologie est de :

- déterminer les conditions de fonctionnement optimales pour un système ou un processus,
- déterminer une région de l'espace des facteurs dans laquelle des caractéristiques de fonctionnement (les réponses) sont satisfaites,
- modéliser et analyser un processus pour lequel la réponse est influencée par plusieurs variables,
- établir un rapport (équation de la surface de réponse) entre la réponse et les variables indépendantes qui est dans la plupart des cas inconnu.

Cette technique, issue des techniques de plans d'expériences, vise à déterminer d'une façon quantitative les variations de la fonction réponse vis-à-vis des facteurs d'influence significative d'un certain processus ou système. À l'origine, la *MSR* a été développée pour modéliser des réponses expérimentales [Box87, Gou99], puis, pour modéliser des expériences numériques (peu développé) vers les années 1995. Mais à

cause d'un développement rapide du marché et d'une concurrence importante, ces dernières années les chercheurs ont commencé à utiliser de plus en plus les expériences numériques [All00, Bur04, Koe96, Sac89a, Sac89b, Tro03] pour une bonne et simple raison : c'est bien moins cher par rapport aux expérimentations réelles.

La *MSR* est basée sur une relation d'approximation entre la **réponse mesurée**  $y$  et  $n$  **variables aléatoires** (les facteurs étudiés) en utilisant les données observées d'un processus ou d'un système. La réponse est généralement obtenue par des essais réels ou des simulations numériques. Dans la plupart des cas, la fonction  $Y$  qui est une approximation de la réponse mesurée  $y$ , est un modèle polynomial du premier ou deuxième degré. Généralement le modèle est donné par :

$$Y = \beta_0 + \sum_{j=1}^p \beta_j x_j + \sum_{j=1}^p \beta_{jj} x_j^2 + \sum_{i < j}^p \beta_{ij} x_i x_j \quad (2.8)$$

Ce modèle est appelé surface de réponse (Figure 2.3) et il est très classique pour décrire des phénomènes physiques. Afin de prévoir plus exactement la réponse, un

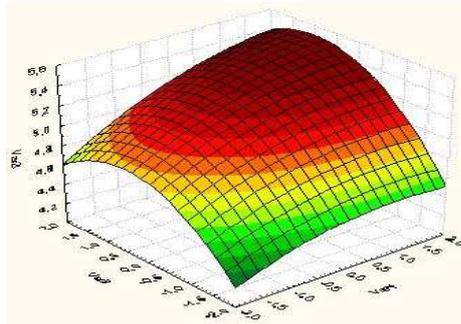


FIG. 2.3 – Surface de Réponse.

modèle de second ordre est utilisé pour chercher le caractère non linéaire du phénomène étudié. De même la fonction  $Y$  d'approximation, peut-être écrite sous la forme matricielle comme suit :

$$Y = X \cdot \beta + \varepsilon \quad (2.9)$$

Dans la relation ci dessus  $X$  est la matrice de calcul des effets ou la matrice d'expériences, le vecteur  $\beta$  est le vecteur des coefficients du modèle qui contient seulement les coefficients du modèle qui ne sont pas connus, mais qui sont déterminés généralement en minimisant la somme des carrés des résidus  $\varepsilon$ .

### 2.1.7.1 Régression multilinéaire

L'objectif de la régression multilinéaire est de trouver un ensemble de coefficients qui résout le mieux possible le système d'équations ci dessus (équation 2.9). Si on fait l'hypothèse de moindres carrés [Dea00, Mon01], on cherche le jeu de coefficients qui minimise la somme des carrés des écarts. Sous la forme matricielle on peut écrire :

$$\varepsilon^t \cdot \varepsilon \quad (2.10)$$

La somme sera minimale, par rapport aux coefficients si :

$$\frac{\partial \varepsilon^t \cdot \varepsilon}{\partial \beta} = 0 \quad (2.11)$$

En utilisant la méthode de moindres carrés la solution est donnée par :

$$\hat{\beta} = (X^t \cdot X)^{-1} \cdot X^t \cdot Y \quad (2.12)$$

Cette relation est fondamentale pour la compréhension de l'hypothèse des moindres carrés. Le jeu de coefficients ainsi obtenu, appelé aussi coefficients de régression, est utilisé par la suite pour obtenir les réponses dans tout le domaine d'étude.

$$\hat{Y} = X \cdot \hat{\beta} \quad (2.13)$$

### 2.1.7.2 Recherche globale de l'ajustement du modèle

Si on reprend l'équation 2.9 on peut écrire que

$$Y = \hat{Y} + \varepsilon = X \cdot \hat{\beta} + \varepsilon \quad (2.14)$$

On peut démontrer aussi que la somme des carrés des réponses mesurées est égale à la somme des carrés de réponses prédites augmentée de la somme des carrés des résidus, soit :

$$Y^t \cdot Y = \hat{\beta}^t \cdot X^t \cdot X \cdot \hat{\beta} + \varepsilon^t \cdot \varepsilon \quad (2.15)$$

L'équation 2.15 s'appelle l'équation de l'analyse de la variance et elle représente la synthèse de l'analyse statistique.

- la somme des carrés des réponses mesurées ou la Somme des Carrés Totaux (*SCT*)
- la somme des carrés de réponses prédites ou la Somme des Carrés due à la

Régression ( $SCR$ ).

- la Somme des Carrés des résidus ou due à l'Erreur ( $SCE$ ).

Pour évaluer le degré d'explication du modèle par rapport aux réponses mesurées, on établit le rapport  $R^2$ .

$$R^2 = \frac{SCR}{SCT} \quad (2.16)$$

Ce rapport s'appelle **coefficient de corrélation multiple**, ou **coefficient de détermination**, il nous donne une indication sur la qualité de l'ajustement. En fait, il représente le rapport entre la variance expliquée par le modèle ou due à la régression ( $SCR$ ) et la variance totale ( $SCT$ ). Il nous donne des informations sur l'existence d'une relation linéaire entre les variables considérées.

Le rapport  $R^2$  (équation 2.16) varie entre 0 et 1. S'il vaut zéro c'est que le modèle n'explique rien. S'il vaut 1 c'est que le modèle explique toutes les réponses mesurées. Ce rapport ( $R^2$ ) n'est pas une garantie absolue de la qualité du modèle. Un coefficient de corrélation nul ne signifie pas l'absence de toute relation entre les variables considérées. Il peut exister une relation non-linéaire. Cependant dans le contexte de la régression multiple, cela pose le problème de la sur-paramétrisation du modèle. Plus on ajoute de variables explicatives (les facteurs), plus le  $R^2$  augmente, même si les nouvelles variables explicatives sont très *reliées* à la variable dépendante (la réponse). Tout dépend du nombre de résultats et du modèle choisi. Pour éviter ce phénomène, on calcule le coefficient  $R^2$  ajusté.

### 2.1.7.3 Le $R^2$ ajusté

Par définition, ce coefficient  $R^2$  ajusté -  $R_A^2$  est donné par la relation [Gou99] :

$$R_A^2 = 1 - \frac{SCE/(N - p - 1)}{SCT/(N - 1)} \quad (2.17)$$

où :

- $p$  est le nombre de facteurs
- $N$  correspond au nombre total de simulations du plan d'expériences.

### 2.1.7.4 Stratégie de sélection du meilleur sous-modèle

Lorsque le nombre de facteurs est grand, il n'est pas raisonnable d'explorer tous les modèles possibles afin de sélectionner le **meilleur**. Différentes stratégies sont donc proposées qui doivent être choisies en fonction de l'objectif recherché et des moyens

de calcul disponibles. Trois types d'algorithmes utilisés souvent dans la littérature [Bes03, Gou99] sont résumés ci-dessous :

1. Pas à pas pour lequel il y a trois modalités :
  - Sélection (forward)
  - Élimination (backward)
  - Mixte (stepwise)
2. Par échange pour lequel il y a deux modalités :
  - Maximisation de  $R^2$
  - Minimisation de  $R^2$
3. Global
  - L'algorithme de Furnival et Wilson

### 2.1.7.5 Plans Composite Centraux

#### Introduction

Les Plans Composites Centraux [Dea00, Gou99, Mon01] sont un bon complément des plans orthogonaux, de par leurs propriétés statistiques, mais aussi parce qu'ils sont meilleurs que les plans orthogonaux pour certains problèmes. Ils sont développés, en particulier, dans la Méthodologie des Surfaces de Réponse, et ils permettent l'étude d'un modèle quadratique, dans la plupart des cas des phénomènes non linéaires. Tous les facteurs pour lesquels on souhaite tester l'influence quadratique auront 5 niveaux. Les plans composites centraux sont constitués de trois parties, ce qui permet une démarche séquentielle [Ben94b] :

1. Le point au centre du domaine expérimental (Figure 2.4), usuellement noté par  $\mathbf{0}$  répété plusieurs ( $n_0$ ) fois pour estimer la variance de répétabilité.
2. Un plan orthogonal en  $N_F$  essais, qui est le plus souvent un plan factoriel ou un plan de Box-Hunter, et qui combine des facteurs à 2 niveaux usuellement notés  $+1$  et  $-1$ .
3. Les points en étoile (Figure 2.4). Ces points représentent 2 essais par facteur, usuellement notés  $+\delta$  et  $-\delta$ .

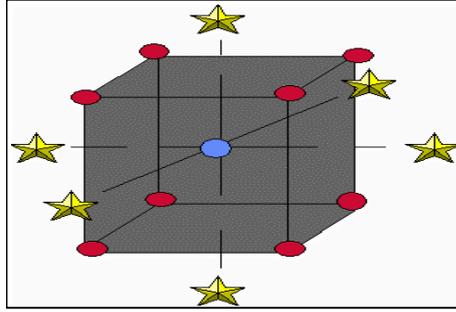


FIG. 2.4 – Plan composite centré pour 3 facteurs.

Le domaine de variation des facteurs est ramené à  $[-\delta ; +\delta]$ . Ainsi, un facteur variant dans l'intervalle  $[\text{Min} ; \text{Max}]$  sera découpé en 5 niveaux :  $-\delta, -1, 0, +1, +\delta$  calculés selon le tableau 2.1.

Niveau	Valeurs réelles
$-\delta$	Min
-1	$\frac{\text{Min}+\text{Max}}{2} - \frac{1}{\delta} \left( \text{Max} - \frac{\text{Min}+\text{Max}}{2} \right)$
0	$\frac{\text{Min}+\text{Max}}{2}$
1	$\frac{\text{Min}+\text{Max}}{2} + \frac{1}{\delta} \left( \text{Max} - \frac{\text{Min}+\text{Max}}{2} \right)$
$+\delta$	Max

TAB. 2.1 – Calcul des niveaux des facteurs

Le paramètre  $\delta$  est supérieur à 1 et est calculé grâce à la formule :

$$\delta = \sqrt[4]{N_F} \quad (2.18)$$

où :

–  $N_F$  est nombre d'essais du plan orthogonal

Le nombre total des essais  $N$  peut être calculé grâce à la formule :

$$N = N_F + N_\delta + n_0 = 2^k + 2 \cdot k + n_0 \quad (2.19)$$

où :

–  $N_F = 2^k$  est le nombre des essais pour le plan factoriel  $2^k$  (Figure 2.4 - les points en rouge)

–  $N_\delta = 2k$  est le nombre des essais appelé en étoile (Figure 2.4)

- $n_0$  est le nombre des essais au centre du domaine pour estimer la variance de répétabilité. (Figure 2.4 - le point en bleu ou le point central)

### Propriétés des plans composites centrés

La qualité d'un modèle dépend de la matrice de dispersion  $(X^T X)^{-1}$ , donc des éléments de la matrice d'information  $(X^T X)$ , et par conséquent de la structure de la matrice d'expériences et de la forme analytique du modèle. Il est donc nécessaire de classer les matrices d'expériences de bonne qualité, qui, si le modèle postulé représente bien le phénomène étudié, nous permettra de connaître en n'importe quel point du domaine expérimental d'intérêt la valeur de la réponse. Il existe plusieurs critères de qualité mais dans ce rapport on ne présente que les propriétés d'isovariance par rotation et presque orthogonalité qui confèrent aux plans d'expériences par surfaces de réponse une meilleure qualité de la modélisation.

Un plan d'expériences remplit la propriété d'isovariance par rotation si la variance des réponses prédites est la même en tous les points du domaine d'étude [Dea00]. La propriété d'isovariance par rotation est une condition nécessaire à l'obtention d'une précision uniforme. La propriété d'isovariance par rotation pour un plan composite centré est remplie si la distance entre les points en étoile (Figure 2.4) satisfait la condition :

$$\delta = (2^k)^{1/4} \quad (2.20)$$

où :  $k$  est le nombre de facteurs étudiés.

A la place de l'isovariance par rotation, on peut respecter le critère d'orthogonalité. Pour cela il faudrait une disposition des points qui entraîne une matrice d'information  $(X^T X)$  diagonale. Mais cela n'est pas possible car on ne peut pas annuler les éléments correspondant aux termes constants et aux termes carrés qui sont différents de zéro et ne se retrouvent pas sur la diagonale de la matrice d'information. Pour cela il faut donc envisager un autre critère, celui de la presque orthogonalité. Pour aboutir à ce critère il faut que la sous-matrice, obtenue en éliminant la première ligne et la première colonne de l'inverse de la matrice d'information  $(X^T X)$ , soit diagonale. On peut démontrer [Gou99] que cela est possible si :

$$\delta = \left( \frac{N_F (\sqrt{N} - \sqrt{N_F})^2}{4} \right)^{\frac{1}{4}} \quad (2.21)$$

Le nombre de points des plans factoriels et de points en étoile est, en général défini par l'expérimentateur avant les essais. La valeur de  $\delta$  est donc fonction du nombre des points au centre  $n_0$ . Le tableau 2.2 permet de choisir ce nombre et la valeur de  $\delta$  pour respecter le critère de presque orthogonalité [Dro97].

Valeur de $n_0$	Nombre de facteurs						
	1	2	3	4	5	6	7
$n_0 = 1$	1	1,215	1,414	1,547	1,596	1,724	1,761
$n_0 = 2$	1,078	1,287	1,483	1,607	1,662	1,784	1,824
$n_0 = 3$	1,147	1,353	1,547	1,664	1,724	1,841	1,885
$n_0 = 4$	1,21	1,414	1,607	1,719	1,784	1,896	1,943

TAB. 2.2 – Valeurs de  $\delta$  fonction du nombre de points au centre du domaine.

## 2.2 Technique pour la vérification de l'effet quadratique pour les plans d'expériences numériques.

### 2.2.1 Introduction

Avant de commencer la présentation de la nouvelle approche nous allons essayer de répondre à la question suivante :

**Quelle est l'utilité des points au centre du domaine d'étude ?**

Parce qu'un plan composite centré n'est pas orthogonal (l'inverse de la matrice d'information ou matrice de dispersion n'est pas diagonale - voir la propriété d'orthogonalité) et ne peut jamais l'être [Ben94b], en augmentant le nombre de répétitions des essais au centre du domaine on tend vers l'orthogonalité. Les points au centre du domaine d'étude changent les propriétés des plans utilisés et nous apportent aussi des informations supplémentaires sur le modèle utilisé. Lorsque le nombre de points centraux augmente, on obtient une zone dans laquelle l'erreur de prédiction est uniforme [Gou99] et par conséquent la qualité de la modélisation croît. Les essais au centre du domaine d'étude sont des essais répétés plusieurs fois dans les mêmes conditions afin d'estimer la variance de répétabilité. Dans le cas où les expériences sont des simulations numériques ces informations sont d'un réel intérêt. Malgré leur grand avantage économique, les simulations numériques sont des essais

pour lesquelles la variabilité naturelle des réponses n'est plus présente. Pour ce type d'essais il n'y a pas de différences entre deux essais réalisés dans les mêmes conditions. Du point de vue numérique deux essais répétés dans les mêmes conditions ont toujours des résultats identiques. A partir de cette observation nous avons mis au point une méthodologie [Lep04a] qui permet d'étudier la variabilité pour le cas où les essais sont des simulations numériques. Cette nouvelle approche sera détaillée par la suite dans ce chapitre et elle sera validée par une application au procédé de pliage pour réduire le retour élastique (chapitre 5). Cette méthodologie comble un vide qui existe pour les utilisateurs des plans d'expériences numériques. La méthode propose l'optimisation du procédé de pliage à l'aide d'un plan composite centré en deux situations : plan composite avec un seul point au centre et plan composite avec plusieurs points au centre. Les points au centre du domaine d'étude sont un outil nécessaire pour obtenir une information sur la présence ou non d'un effet quadratique pour un modèle postulé. Ces points sont utilisés aussi pour estimer l'erreur expérimentale et particulièrement pour chercher si le modèle proposé est adéquat. Par exemple pour un plan composite centré afin d'obtenir une variance uniforme sur la modélisation il faut ajouter 3 à 5 points centraux [Mon01].

### 2.2.2 Approche proposée

Au cours de nos recherches, utilisant des plans d'expériences numériques (moins coûteux) [Cra99, Cra01, DeL00, Par01] nous nous sommes aperçus qu'il n'existe pas une méthode pour étudier la variabilité au centre du domaine d'étude car les essais ne sont que des simulations numériques. A partir de ce constat nous avons développé une technique [Lep04a] qui peut nous apporter des informations sur la variabilité au centre du domaine d'étude. La technique est basée sur la génération de points **peu décalés** (Figure 2.5) par rapport au centre du domaine d'étude. Plusieurs simulations nous ont permis de déterminer la distance maximale d'emplacement des points ( $d_1 = 0.046 \cdot d$  - Figure 2.5) au-delà de la quelle on ne peut plus parler de variabilité car on n'est plus au centre du domaine d'étude.

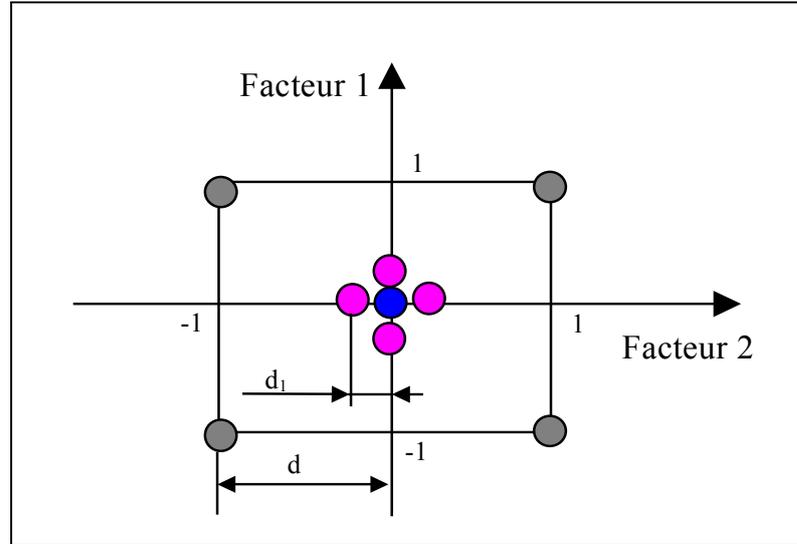


FIG. 2.5 – Addition des points au centre du domaine

Ces points nous permettent d'estimer la variabilité au centre du domaine d'étude et par conséquent de constater l'existence ou non d'effet quadratique pour le modèle étudié (Équation 2.22).

$$Y = \beta_0 + \sum_{j=1}^k \beta_j x_j + \sum_{j=1}^k \beta_{jj} x_j^2 + \sum_{i < j} \beta_{ij} x_i x_j \quad (2.22)$$

La relation qui permet le calcul de la somme de carrés pour déterminer l'effet quadratique pour un seul degré de liberté associé à l'hypothèse non nulle (Equation 2.23), est donnée par l'équation 2.24 [Mon01] :

$$H_1 : \sum_{j=1}^k \beta_{jj} \neq 0 \quad (2.23)$$

$$SS_{pure-quadratique} = \frac{N_F \cdot n_0 (\bar{y}_F - \bar{y}_C)^2}{N_F + n_0} \quad (2.24)$$

où :

- $SS_{pure-quadratique}$  - somme de carrés pour l'effet quadratique pur,
- $\bar{y}_F$  la moyenne des réponses pour les points du plan factoriel,
- $\bar{y}_C$  la moyenne des réponses pour les points du centre du domaine.

La variance au centre du domaine d'étude (en anglais Mean Square Error  $MSE$ )

est obtenue par :

$$CME = \frac{SCE}{n_0 - 1} = \frac{\sum_{center-points} (y_i - \bar{y})^2}{n_0 - 1} \quad (2.25)$$

où :

- $CME$  est le carré moyen associé au résidu ou la variance du résidu,
- $SCE$  est la somme des carrés des résidus ou due à l'erreur.

La statistique de Fischer, qui permettra d'identifier l'effet quadratique par comparaison avec la valeur critique, est donnée par :

$$F = \frac{SS_{pure-quadratique}}{CME} \geq F_{critique} \quad (2.26)$$

$$F_{test} = F_{(\alpha, \nu_1, \nu_2)} \quad (2.27)$$

Si  $F \geq F_{test} \Rightarrow$  l'hypothèse  $H_1$  est acceptée

où :  $\alpha$  est le risque d'acceptation de l'hypothèse  $H_1$ ,  $\nu_1$  et  $\nu_2$  sont les degrés de liberté du numérateur et respectivement du dénominateur de l'équation 2.26.

Pour vérifier l'effet quadratique du modèle on ajoute des points près du centre du domaine d'étude, points qui seront placés à la même distance par rapport au centre du domaine d'étude (Figure 2.5).

Pour un plan d'expériences, lorsque le nombre de points centraux augmente, la qualité de la modélisation croît et en plus ces points nous aident à :

- Obtenir le respect de certaines propriétés comme nous venons de le montrer,
- Obtenir une information sur la variabilité du phénomène,
- Diminuer les variations de l'erreur de prédiction dans le domaine d'étude,
- Tester l'effet quadratique ou la présence d'une courbure,
- Tester la validité du modèle.

## 2.3 L'optimisation multicritères

Typiquement, dans l'analyse des données industrielles il y a beaucoup de réponses (variables) qui devront être étudiées en même temps. En plus, pour optimiser ces réponses individuellement on peut rencontrer des contradictions pour les différents niveaux de facteurs acceptables pour une réponse et non pour les autres. Le but de l'optimisation multicritères est de minimiser au mieux les différents objectifs [Yan02].

En effet, la solution que l'on obtient est une solution de compromis. Elle minimise un certain nombre d'objectifs tout en dégradant les performances sur d'autres objectifs. Mais finalement la solution acceptée va assurer une satisfaction globale sur le processus parce qu'elle répondra à plusieurs objectifs en même temps. Le but de ce paragraphe est de vous présenter une méthode d'optimisation multicritères, qui sera appliquée afin d'améliorer les performances du procédé d'extrusion (Voir Chapitre 5).

### 2.3.1 Méthode de Ch'ng

D'une façon générale, le coût de production est exprimé comme une somme de la non qualité et du coût de fabrication. L'optimisation multicritères mesure la sensibilité des réponses pour la qualité finale des produits.

Cette méthode propose pour chaque réponse  $Y_j(x)$ ,  $j = 1, 2, \dots, p$ , une fonction  $d_j(Y_j(x))$  qui peut prendre des valeurs entre 0 et 1, valeurs qui mesurent la sensibilité de la réponse et qui s'appelle fonction de désirabilité. Ici  $x$  signifie le vecteur des facteurs ou des variables indépendantes  $x^T = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ . Après avoir défini les fonctions pour chaque réponse individuellement, une fonction objectif globale est définie comme une moyenne géométrique des différentes désirabilités.

$$D(x) = [d_1(Y_1(x)) \cdot d_2(Y_2(x)) \cdot \dots \cdot d_p(Y_p(x))]^{\frac{1}{p}} \quad (2.28)$$

La fonction de désirabilité  $d_j(Y_j(x))$  a été proposée originalement par Harrington [Har65] de deux façons :

$$d_j(Y_j(x)) = e^{Y_j(x)} \quad (2.29)$$

$$d_j(Y_j(x)) = e^{-|Y_j(x)|} \quad (2.30)$$

Puisque les transformations (2.29 ou 2.30) ne sont pas très flexibles dans le sens où ces fonctions ne peuvent pas assumer une variété de formes, Derringer et Suich [Der80] ont proposé deux autres fonctions :

$$d_j(Y_j(x)) = \begin{cases} 0 & \text{si } Y_j(x) \leq Y_{\min j} \\ \left(\frac{Y_j - Y_{\min j}}{Y_{\max j} - Y_{\min j}}\right)^r & \text{si } Y_{\min j} \leq Y_j(x) \leq Y_{\max j} \\ 1 & \text{si } Y_j(x) \geq Y_{\max j} \end{cases} \quad (2.31)$$

$$d_j(Y_j(x)) = \begin{cases} \left( \frac{Y_j - Y_{\min j}}{T_j - Y_{\min j}} \right)^s & \text{si } Y_{\min j} \leq Y_j(x) \leq T_j \\ \left( \frac{Y_j - Y_{\max j}}{T_j - Y_{\max j}} \right)^t & \text{si } T_j \leq Y_j(x) \leq Y_{\max j} \\ 0 & \text{si } Y_j(x) \notin [Y_{\min j} ; Y_{\max j}] \end{cases} \quad (2.32)$$

Dans les équations 2.31 et 2.32,  $r$ ,  $s$  et  $t$  sont des variables définies par l'utilisateur fonction de leur expérience permettant à celui-ci d'indiquer les limites de la fonction de désirabilité autour de la valeur cible ( $T_j$ ) pour une réponse  $j$ .

Les quantités  $Y_{\min j}$  et  $Y_{\max j}$  représentent les limites de désirabilité pour la réponse  $j$  [Har65]. L'approche de la fonction de désirabilité repose en effet sur l'utilisation de la méthodologie de la surface de réponse pour la modélisation polynomiale de chaque réponse  $Y_j(x)$ , par une substitution des polynômes dans les équations 2.31, 2.32, afin de faire encore une substitution par les désirabilités individuelles dans l'équation 2.28. Finalement, il reste une seule fonction objectif pour chercher la solution  $x$ , tout en maximisant la désirabilité totale  $D(x)$ .

Comme il a été indiqué par Castillo, Montgomery et al [Cas96], l'existence de points de discontinuité dans la fonction de désirabilité ne permet pas l'utilisation des algorithmes à base de gradient pour l'optimisation. Ainsi, Castillo et al [Cas96] ont proposé une fonction de désirabilité modifiée pour résoudre ce problème, de telle sorte que l'algorithme généralisé du gradient réduit (Generalized Reduced Gradient GRG) puisse être appliqué. Ils ont utilisé une fonction de désirabilité continue par intervalles pour laquelle le point de discontinuité a été corrigé en utilisant un polynôme quadratique de la forme :

$$f(Y) = A + BY + CY^2 + DY^3 + EY^4 \quad (2.33)$$

pour laquelle  $A, B, C, D$  et  $E$  sont des paramètres. Ils ont proposé cinq conditions à satisfaire par l'équation 2.33. Plus de détails au sujet de cette méthode peuvent être trouvés dans Castillo et al [Cas96].

L'approche proposée par Ch'ng [Ch'05] n'a aucun point de discontinuité dans la fonction de désirabilité. Par ailleurs, cette approche permet l'utilisation de l'algorithme GRG qui trouve les configurations optimales pour les  $p$  réponses.

Pour la méthodologie de la surface de réponse l'utilisation des variables codées (ou des variables centrées réduites) pour trouver le modèle de régression pour  $p$  variables est une pratique courante. La relation la plus répandue pour la transformation des variables réelles en variable codées a été proposée par Khuri et Cornell

[Khu87] :

$$x = \frac{2 \cdot t - (u + l)}{u - l} \quad (2.34)$$

pour laquelle :

- $u$  est la valeur supérieure pour  $t$
- $l$  est la valeur inférieure pour  $t$
- $t$  est la valeur cible étudiée avec  $l \leq t \leq u$
- $x$  est la valeur codée qui correspond à  $t$ .

L'approche par la fonction de désirabilité est l'une des méthodes les plus utilisées dans l'industrie, pour traiter l'optimisation des procédés à réponses multiples. Dans une démarche d'optimisation globale, nous proposons dans ce rapport l'application de la technique de Ch'ng [Ch'05] afin d'optimiser plusieurs réponses simultanément. La clef de la méthode consiste en l'addition de  $\mathbf{1}$  dans la relation du changement de variables réelles en variables codées. Cette modification donne la nouvelle forme de la fonction de désirabilité :

$$d^*(Y) = \frac{2 \cdot Y - (USL + LSL)}{USL - LSL} + 1 = \left( \frac{2}{USL - LSL} \right) \cdot Y + \left( \frac{-2LSL}{USL - LSL} \right) \quad (2.35)$$

pour laquelle :

- $USL$  est la valeur limite supérieure pour la réponse  $Y$
- $LSL$  est la valeur limite inférieure pour la réponse  $Y$
- $Y$  est la réponse ou une caractéristique de qualité avec  $LSL \leq Y \leq USL$
- $d^*(Y)$  est la désirabilité proposée pour la fonction objectif avec  $0 \leq d^*(Y) \leq USL$

La motivation de l'auteur [Ch'05] pour l'addition de  $\mathbf{1}$  est de convertir la fonction de désirabilité ou de s'assurer qu'elle n'est pas négative.

La fonction de désirabilité  $d^*(Y)$  proposée par cette méthode est utilisée pour transformer la qualité de la réponse par une valeur de désirabilité souhaitée.

$$0 \leq d^*(Y) \leq 2 \quad (2.36)$$

La désirabilité totale proposée par Ch'ng [Ch'05] est obtenue par une somme pondérée avec les poids  $e_i$  (degré d'importance) de chaque réponse individuelle.

$$Desirabilite\ Totale = \frac{\sum_{i=1}^p e_i \cdot |d_i(Y_i) - d_i(T_i)|}{p} \quad (2.37)$$

Pour laquelle :

- $d_i(Y_i)$  est la désirabilité individuelle pour la réponse  $Y_i$
- $d_i(T_i)$  est la désirabilité individuelle ciblée  $T_i$  pour chaque réponse
- $e_i$  est le degré d'importance pour chaque réponse individuelle, avec la relation :

$$\sum_{i=1}^p e_i = 1 \quad (2.38)$$

L'utilisation de cette approche d'optimisation est conseillée pour des phénomènes à caractère fortement non linéaire comme les procédés de fabrication. Son efficacité sera prouvée dans le chapitre d'applications (Chapitre 5) afin d'optimiser plusieurs réponses simultanément durant le processus d'extrusion.

Les avantages de l'utilisation de la technique de Ch'ng sont :

- par cette approximation la fonction de désirabilité n'a pas des points de discontinuité. Cette fonction est continue, donc différentiable.
- l'approximation polynomiale n'est pas exigée.
- de plus la méthode proposée permet l'utilisation de l'algorithme GRG pour trouver l'optimum.

## 2.4 Approche hybride pour l'optimisation des procédés

### 2.4.1 Introduction

Dans un processus de fabrication, la qualité du produit final est sensiblement affectée par des variables de conception de produits et de processus. Cependant, historiquement la recherche sur les tolérances s'est principalement concentrée sur l'utilisation des tolérances basées sur des caractéristiques de conception de produits pour chaque composant. Ce travail propose l'extension des pratiques de tolérancement courantes, et présente une nouvelle méthode d'optimisation pour le tolérancement des systèmes mécaniques en utilisant le calcul par intervalle pour la prévision de la réponse du système. La méthodologie proposée est une approche hybride qui est basée sur le développement et l'intégration de trois approches pour l'optimisation de procédés : tolérancement mécanique, méthodologie des surfaces de réponse, et la méthode de calcul par intervalle.

## 2.4.2 Tolérancement mécanique

Les imperfections inhérentes aux processus de fabrication engendrent une dégradation des caractéristiques fonctionnelles du produit et donc de sa qualité. Le tolérancement [Ngo98] est défini comme une spécification qui limite les variations géométriques des pièces afin de garantir un certain niveau de qualité [Dan03]. La maîtrise imparfaite du tolérancement [Bjo89, Voe98, Zha96] entraîne des coûts importants lors de la fabrication des pièces : taux de rebuts important. Le tolérancement a pour objectifs essentiels :

- de réduire les contraintes de précision et par la suite le coût du produit-processus
- de faire une cotation au juste nécessaire traduisant la satisfaction du besoin du client
- d'utiliser un langage univoque qui évite les malentendus et assure une compréhension entre tous les métiers de la conception et de la production.
- de créer les conditions d'un dialogue objectif entre les concepteurs et les réalisateurs.

Un mécanisme idéal nécessiterait des pièces s'ajustant parfaitement, et donc ayant des formes parfaites : plan parfait, cylindre de révolution parfait, etc. (Figure 2.6)

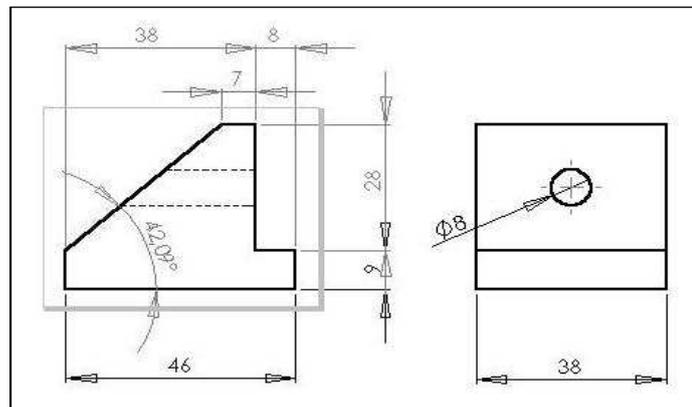


FIG. 2.6 – Pièce dessinée et cotée.

Mais les pièces fabriquées ne sont jamais parfaites (Figure 2.7). Il y a toujours des cotes ou des surfaces qui même si le produit reste fonctionnel, ne sont pas parfaites.

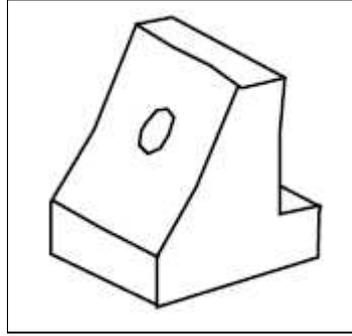


FIG. 2.7 – Pièce réelle fabriquée.

Il est donc nécessaire de définir l'ensemble des géométries réelles acceptables du point de vue fonctionnel. Un produit pour être fonctionnel doit répondre aux conditions suivantes :

- assemblage : jeu minimal imposé; (Figure 2.8)
- précision de positionnement ou de guidage entre deux surfaces d'un mécanisme : jeu maximal;
- localisation des contacts : limite les écarts géométriques.

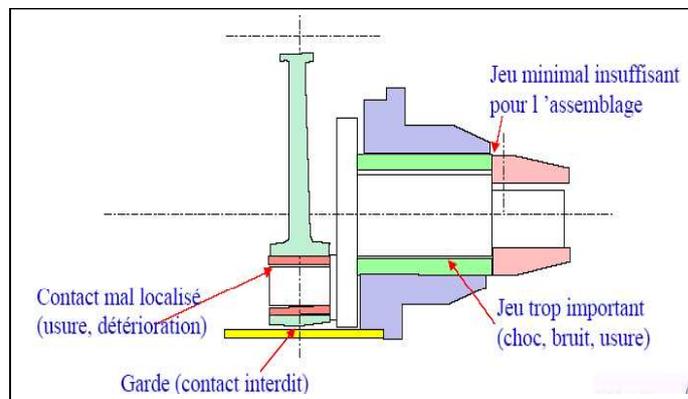


FIG. 2.8 – Conditions fonctionnelles d'un produit - Photo : [Pairel E]

Historiquement les tolérances fournissent les moyens pour la communication entre le produit et les concepteurs de processus [Mil02, Ser03]. Une précision plus élevée signifie une tolérance inférieure et par conséquence de meilleures machines sont nécessaires pour fabriquer les pièces entraînant ainsi une majoration du coût de production [Ger97, Tra00]. Les tolérances mécaniques sont des facteurs clés pour la détermination du coût total dans un processus de fabrication. Le rapport entre les tolérances et le coût de fabrication est montré sur la figure 2.9.

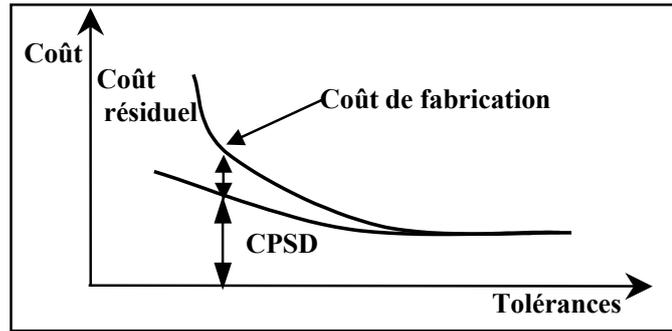


FIG. 2.9 – Le coût de fabrication en fonction des tolérances mécaniques.

Le coût de fabrication est divisé en deux parties :

1. *Le Coût de Production pour les produits acceptés Sans Défauts - CPSD.*
2. *Le coût résiduel* - Le coût déterminé par les pièces rejetées qui sont hors tolérances

L'expérience montre que le tolérancement s'inscrit dans une démarche générale de conception, et contribue à l'amélioration de la qualité du produit. Notre but est de réduire le coût du aux produits rejetés par une meilleure considération des tolérances mécaniques. Afin d'atteindre cet objectif nous proposons une nouvelle méthode qui va agrandir l'intervalle d'acceptation pour les pièces fabriquées dans l'optimisation du processus de mise en forme des métaux. Le tolérancement devrait être avec le modèle numérique (modèle éléments finis) le support privilégié de la conception intégrée du produit et de son procédé de fabrication.

### 2.4.3 Analyse par intervalles

#### 2.4.3.1 Introduction

Le principe fondamental de l'arithmétique par intervalles consiste à remplacer tout nombre par un intervalle le contenant et à effectuer les calculs sur des intervalles, tout intervalle calculé contenant le résultat du calcul exact [Rev01]. Le premier intérêt est de pouvoir prendre en compte les incertitudes de mesure dans le cas où les données sont des valeurs expérimentales. Le second intérêt est de permettre de manipuler sur ordinateur, en utilisant le calcul flottant, des quantités qui ne sont pas exactement représentables : par exemple, le nombre  $\pi$  sera représenté par  $[3,14 - 3,15]$  sur une machine qui calcule en base 10 avec 3 chiffres de mantisse. Cet intervalle contient de façon sûre la valeur de  $\pi$  et tout calcul impliquant cet intervalle contiendra le résultat du calcul avec  $\pi$ . Cette propriété de résultats garantis constitue l'avantage essentiel de l'arithmétique par intervalles ; comme il est de

plus possible de préserver cette propriété avec une implantation basée sur l'arithmétique flottante. La force de l'arithmétique par intervalles est en effet la fiabilité des résultats. L'arithmétique d'intervalles définie par Moore dans les années 1960 [Moo66] apporte une solution fiable à la représentation des données incertaines. Un intervalle [Ale83] est un ensemble connexe de nombres réels. Les opérations arithmétiques sont étendues aux opérandes intervalles de façon à ce que le résultat exact de l'opération appartienne à l'intervalle calculé. Quand les opérandes sont remplacés par des intervalles dans une expression, polynomiale par exemple, le résultat calculé est un intervalle contenant toutes les valeurs possibles de cette expression pour toute valeur ponctuelle de l'intervalle d'entrée : cette propriété s'appelle résultat garanti et constitue l'avantage essentiel de l'arithmétique par intervalles. Cependant, ce résultat peut surestimer trop largement l'ensemble des valeurs possibles et dépend de la forme choisie pour l'expression à évaluer, parmi plusieurs mathématiquement équivalentes. Dans ce qui suit, un intervalle sera représenté par ses extrémités :

$$x = [\underline{x} \ \bar{x}] = \left\{ x \in R / \underline{x} \leq x \leq \bar{x} \right\} \quad (2.39)$$

Tout nombre réel  $x$  sera confondu avec l'intervalle  $[\underline{x}; \bar{x}]$ . Il est possible d'étendre les opérations arithmétiques usuelles aux intervalles grâce aux relations suivantes [Neu90, Moo79].

Si  $[x_1][x_2]$  sont deux intervalles on a :

$$\begin{cases} [x_1] = [a, b] \text{ et } [x_2] = [c, d] \\ [x_1] + [x_2] = [a, b] + [c, d] = [a + c, b + d] \\ [x_1] - [x_2] = [a, b] + (-[c, d]) = [a - d, b - c] \\ [x_1] \times [x_2] = [\min \{ac, ad, bc, bd\}, \max \{ac, ad, bc, bd\}] \\ 1/[x_1] = [1/b, 1/a], 0 \notin [a, b] \end{cases} \quad (2.40)$$

L'analyse par intervalles peut être utilisée avec succès dans beaucoup de domaines comme :

- l'optimisation globale [Han92, Rat98],
- déterminant des racines d'une fonction [Kea97],
- calcul différentiel [Ham95],
- robotique [Jau01],
- l'estimation des erreurs de frontières [Bra01].

D'autres développements tiennent compte des avantages discrets de propagation de contrainte [Cle87, Dav87]. La propagation de contraintes sur les intervalles [Gra02a] fournit de nouveaux outils pour résoudre le problème de dépendance et une

autre manière de considérer des tels problèmes.

### 2.4.3.2 Le Problème de la Satisfaction de Contrainte (*PSC*)

Un Problème de la Satisfaction de Contrainte (*PSC*) est défini par :

- un ensemble  $V$  de  $n$  variables  $x_1, \dots, x_n$  du  $\mathfrak{R}$
- un ensemble  $D$  de  $n$  sous-ensembles  $[x_1], \dots, [x_n]$  du  $\mathfrak{R}$ , appelés domaines
- un ensemble  $C$  de  $m$  contraintes  $c_1, \dots, c_m$ , reliant les variables  $x_1, \dots, x_n$

Sur ce *PSC* nous pouvons réduire des domaines avec la propagation de contraintes. Le but de la propagation de contraintes est de donner le plus petit carré pour les domaines comprenant toutes les solutions satisfaisant les contraintes. Les solutions de ce *PSC* sont définies par l'ensemble suivant :

$$S = \left\{ x \text{ dans } [x], c_1(x), c_1(x), \dots, c_m(x) \right\} \quad (2.41)$$

Un exemple sur la propagation de contraintes est donné dans la prochaine section mais beaucoup de logiciels libres sont disponibles pour caractériser l'ensemble de solutions d'un *PSC* [Bag04, Dao01, Gra02b].

### 2.4.3.3 Propagation des contraintes

Un *PSC* peut être défini par la contrainte suivante :

$$\begin{cases} c_1 : x_1 + x_2 = x_3, \\ x_1 \text{ dans } [1, 3], x_2 \text{ dans } [0, 2], x_3 \text{ dans } [0, 2] \end{cases} \quad (2.42)$$

La contrainte est une relation entre plusieurs variables. Si des variables sont incluses dans les intervalles, des déductions peuvent être faites. Pour certains couples de points  $(x_1, x_2)$  nous ne pouvons pas trouver dans l'autre intervalle  $[x_3]$  une valeur pour satisfaire la contrainte. Ces valeurs s'appellent **non conformées**. Il n'y a aucune valeur  $x_3$  pour les couples  $(x_1, x_2) = (3, 2)$  et aucune valeur de  $(x_1, x_2)$  pour  $x_3 = 0$ , ces valeurs ne sont pas des valeurs conformées pour ce *PSC*. La technique de propagation de contraintes supprime des valeurs contradictoires et réduit les domaines d'intervalle. Dans notre *PSC*, les domaines obtenus après la propagation de contraintes sont :

$$[x_1] * [x_2] * [x_3] = [1, 2] * [0, 1] * [1, 2] \quad (2.43)$$

L'implémentation de la *PSC* est défini par :

$$\begin{cases} [x_1] := [x_3] \cap ([x_1] + [x_2]) \\ [x_1] := [x_1] \cap ([x_3] - [x_2]) \\ [x_2] := [x_2] \cap ([x_3] - [x_1]) \end{cases} \quad (2.44)$$

L'opérateur pour la propagation de contraintes pour des contraintes primitives peut également être défini comme :

$$\begin{cases} c_2 : x_1 * x_2 = x_3, \\ c_3 : \sin(x_1) = x_2, \\ c_4 : \exp(x_1) = x_2, \dots \end{cases} \quad (2.45)$$

Toutes les expressions analytiques sont une composition des opérateurs :  $+$   $-$   $*$   $/$  ou des fonctions telles que : *sin*, *cos*, *exp*... . Par conséquent toutes les contraintes du *PSC* ont à l'origine des contraintes primitives. La propagation des contraintes utilise ces contraintes primitives pour réduire le domaine sur intervalle de chaque variable. La propagation de contraintes n'est pas la seule méthode qui contracte des domaines. Un opérateur, appelé **contractor**, peut être défini pour toutes les techniques qui réduisent des domaines [Jau01].

#### 2.4.3.4 Le problème de l'estimation

Pour illustrer ce problème on peut considérer la fonction :

$$f(x) = a_1 \cdot \exp(a_2 \cdot x) \quad (2.46)$$

Afin d'estimer les valeurs  $a_1$  et  $a_2$  nous considérons l'équation 2.47.

$$S_1 = \left\{ a, x_i \text{ dans } [x_i], f(a, x_i) \text{ dans } [y_i] \right\} \quad (2.47)$$

Sur la figure 2.10 les domaines de l'intervalle pour  $x_i$  et  $y_i$  sont représentés par les boîtes grises. Une solution incluse dans l'ensemble  $S$  est donnée par la courbe foncée. Cette courbe correspond à un couple de points  $(a_1, a_2)$  qui représente une solution pour notre problème d'estimation. La ligne pointillée est une non solution (Figure 2.10). Dans ce cas  $[f(x_2, a)]$  n'est pas incluse à l'intérieur de  $[y_2]$ . Pour notre problème, nous devons obtenir une valeur sur intervalle pour chaque  $a_i$ , qui nous permettra de choisir notre valeur.

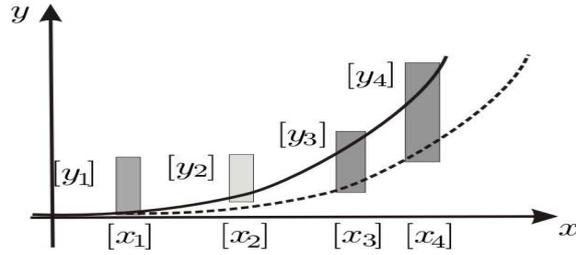


FIG. 2.10 – Exemple d'estimation pour une solution non robuste

On peut également essayer de trouver une meilleure solution pour laquelle les contraintes sont satisfaites pour toutes les valeurs  $[x_i]$  [Rat00]. L'ensemble des solutions est donné par :

$$S_1 = \left\{ a, \forall x \text{ dans } [x], f(x) \text{ dans } [y] \right\} \quad (2.48)$$

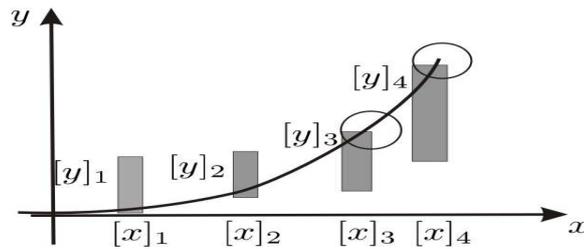


FIG. 2.11 – L'estimation des paramètres pour une fonction exponentielle

Une valeur non robuste est montrée sur le figure 2.11. Dans les cercles de la figure 2.11, il y a un certain nombre de valeurs qui ne sont pas incluses dans l'intervalle  $[y_i]$ . Cet ensemble de valeurs  $S_2$  est inclus dans l'ensemble  $S_1$ . Pour notre application nous sommes plus intéressés par ce type particulier d'ensemble parce que, ayant la solution sur intervalle, nous pouvons choisir une valeur pour  $x_i$ .

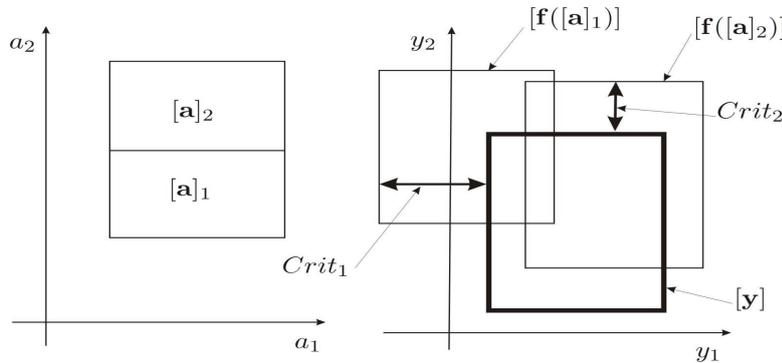
#### 2.4.3.5 L'algorithme proposé

D'abord on applique une méthode locale [Bag05], ce qui va nous permettre de trouver une solution locale pour  $a_i$ . Cette solution nous apporte des informations sur les domaines initiaux  $[a_i]$ . Avec ces informations et les domaines d'intervalles pour  $x_i$  et  $y_i$ , nous pouvons écrire le *PSC*. La prochaine étape réduit les domaines des intervalles dans une propagation de l'avant vers l'arrière sur toutes les contraintes. Cette étape s'appelle  $CS([a], [x], [y])$  (Figure 2.12).

<b>Algorithm <i>RSNP</i></b>	
<i>input</i> : $[a]$ $[x]$ , $[y]$ .	
<i>output</i> : $[a]$ .	
1	<i>if</i> ( $width([a]) > \epsilon$ )
2	$[x_{old}] := [x]$ ; $[y_{old}] := [y]$ ;
3	$C_S([x], [a], [y])$ ;
4	$[y_0] := Evaluation_S([x], [a])$ ;
5	<i>if</i> ( $Criterion([y_0], [y_{old}]) < 0$ )
6	$[a]$ <i>solution</i> ;
7	<i>else</i> <i>bisection</i> ( $[a], [a_1], [a_2]$ );
8	$[y_1] := Evaluation_S([x], [a])$ ;
9	$[y_2] := Evaluation_S([x], [a])$ ;
10	<i>if</i> ( $(Criterion([y_1], [y_{old}]) < Criterion([y_2], [y_{old}]))$ )
11	$RSNP([a_1], [x], [y_{old}])$ ;
12	<i>else</i> $RSNP([a_2], [x], [y_{old}])$ .

FIG. 2.12 – L’algorithme proposé par le calcul par intervalles

Deuxièmement nous divisons par deux (critère de bisection) un des intervalles  $a_i$ . Nous avons fait une évaluation d’intervalles du  $f(a, x)$  pour chaque partie du domaine et avons choisi l’un d’eux. Le critère utilisé (Figure 2.13) est une fonction qui compare deux boîtes, par exemple  $[f([a]_1)$  et  $[y]_i$ ]. Le résultat est la plus grande distance séparant les deux boîtes. Si nous appliquons le critère d’évaluation  $[a]_i$ , nous obtenons deux valeurs de distances facilement comparables.


 FIG. 2.13 – Critère de sélection pour la boîte  $a_i$ .

Si l’évaluation  $[f([a]_1)]$  se trouve à l’intérieur de  $[y]_i$ , pour toutes les valeurs de  $i$ , le critère est négatif. Par conséquent nous avons trouvé une boîte qui représente la solution pour  $[a]_i$ . Naturellement l’algorithme a choisi une boîte  $[a]_i$ , qui aurait pu perdre des solutions, mais le critère dépend de l’initialisation. L’algorithme peut-être encore amélioré pour réduire la perte de solutions. Ce premier algorithme a été fait pour montrer les possibilités de la méthode par intervalles pour ce type de problème et pour d’autres développements futurs. Par exemple quelques variables se produisent plus d’une fois. Le problème de dépendance peut causer la surestimation dans l’évaluation d’intervalles, et la méthode de contraction ne donne pas la plus

petite boîte. Nous pouvons utiliser la contraction de boîte pour renforcer la contraction [Ben94a]. La progression dans la contraction peut également être faite avec des contraintes spécifiques telles que la méthode d'élimination de Gauss.

#### 2.4.4 Nouvelle méthode d'optimisation pour obtenir une Surface de Réponse par Intervalle (SRI)

Ce travail vise à définir une nouvelle méthode d'optimisation développée par notre équipe qui utilisera les trois approches présentées ci-dessus :

1. **La méthodologie des surfaces de réponse** [Box51, Cor90, Mon01]
2. **Le calcul par intervalles** [Neu90, Moo79]
3. **Le tolérancement mécanique** [Bjo89, Voe98, Zha96].

En effet nous allons tolérer à chaque niveau des facteurs  $X_{i_{\min}}^{\max}$  avec un  $\pm\Delta_i$  spécifique, ce que nous permettra après d'utiliser l'analyse par intervalles afin d'obtenir ce qu'on va appeler **Surfaces de Réponse par Intervalles**.

L'équation de la surface de réponse par intervalles obtenue, nous permettra de choisir plusieurs ensembles de *jeux* de paramètres afin de rendre le système plus flexible. Ce qui est le plus important à préciser, c'est le fait que pour l'ensemble des *jeux* de paramètres la réponse à optimiser restera toujours *sous forme d'intervalles de tolérance*. C'est à dire que, dans un intervalle d'acceptation de la réponse établi a priori par des experts ou par les ingénieurs tout en respectant les spécifications recommandées par le bureau d'étude, la réponse ne sera plus une *cible* sur seulement une valeur. Ces spécifications prennent souvent la forme d'une valeur cible (la valeur nominale)  $m$  avec des tolérances bilatérales  $\pm\Delta_i$ . Notre objectif est d'éliminer le concept d'ingénierie à la cible, par une meilleure considération des tolérances des pièces fabriquées. L'existence des tolérances permettra aussi de donner une certaine flexibilité au processus de fabrication et donc d'agrandir les chances d'acceptation des produits avec des limites tolérables d'un point de vue fonctionnel .

Cette nouvelle méthode apportera une souplesse sur les paramètres à régler pour trouver l'optimum d'un procédé de fabrication et surtout pour l'optimisation multicritères où la probabilité de jouer sur l'ensemble des paramètres pour trouver un optimum acceptable est moins forte. La validation ainsi que l'efficacité de l'approche proposée, sera prouvée lors de l'optimisation du retour élastique pendant le procédé d'emboutissage dans le chapitre d'applications (Chapitre 5) de ce mémoire. Plus de détails concernant son application seront présentés à cette occasion.

## 2.5 Conclusions

Dans ce chapitre nous avons pu faire une introduction à la méthodologie des plans d'expériences ainsi qu'une présentation des nouvelles stratégies d'optimisation en utilisant cette approche. La **Méthodologie des Plans d'Expériences (MPE)** nous offre un outil adapté, permettant de résoudre des situations délicates rencontrées dans le processus d'optimisation des procédés de fabrication. Cette méthode permet une interprétation rapide et sans équivoque des résultats en fournissant un modèle mathématique précis du système étudié.

*La variété des plans d'expériences disponibles pour cette méthodologie est tellement importante que l'on est tenté de considérer qu'ils représentent une approche universelle des démarches expérimentales.* [Pil02]

L'hybridisation entre la *MPE* et une autre méthode d'optimisation donne une puissance qui ne peut pas être atteinte par aucune d'elles. C'est pourquoi nous avons proposé d'une façon originale une méthode hybride d'optimisation, qui exploite la puissance de trois approches : la méthodologie des surfaces de réponse, le tolérancement mécanique et le calcul par intervalle

Pour déterminer le caractère non linéaire d'une modélisation nous avons proposé une méthode spécifique aux plans d'expériences numériques. La réduction du retour élastique après le pliage sera optimisée en utilisant cette approche. L'optimisation multicritère par la méthode de Ch'ng sera utilisée afin de prolonger la durée de vie de la matrice pour le procédé d'extrusion.

Les stratégies d'optimisation présentées dans ce chapitre seront validées dans le chapitre 5 de ce mémoire par des applications aux procédés de mise en forme qui ont été réalisées à l'aide d'un logiciel - **OPTIFORM**, conçu dans le but de rendre le processus d'optimisation plus accessible et qui permet la mise en oeuvre de la méthodologie des plans d'expériences.

## Chapitre 3

# Modélisation numérique des défaillances des procédés de mise en forme

La modélisation numérique par éléments finis est une approche puissante utilisée de plus en plus pour simuler des phénomènes complexes. Elle permet de modifier facilement les paramètres, tels que la géométrie locale, les caractéristiques mécaniques des matériaux, le chargement et les conditions limites. Dans ce chapitre nous proposons l'implémentation par éléments finis des défaillances des procédés présentées au chapitre 1. On commence par une introduction à la modélisation de l'endommagement des métaux par éléments finis. Plusieurs critères de rupture seront présentés à cette occasion. Pour prédire le risque de rupture, différentes lois couplées à l'endommagement ont été implémentées dans le code de calcul par éléments finis **Abaqus** [ABA]. Compte tenu du fait qu'il y a de nombreuses pièces fabriquées qui sont par la suite rejetées à cause de l'usure, une modélisation éléments finis de l'usure des outils (matrice d'extrusion) nous a permis de proposer des solutions à ce problème. Dans la mise en forme, les outils sont soumis à des sollicitations cycliques qui font que la fatigue peut intervenir à tout moment et entraîner des dégâts très importants. La prévision d'un tel phénomène s'avère nécessaire plus particulièrement pour des procédés pour lesquels la durée de vie des outils devra être importante. Grâce à la puissance de la modélisation éléments finis l'ingénieur peut aujourd'hui résoudre les problèmes les plus complexes avec un degré de raffinement qui ne serait pas envisageable avec les méthodes traditionnelles. Cela permet de réduire le temps de conception ainsi que d'entraîner des coûts moins importants.



## 3.1 Problématique

La maîtrise des différents défauts ou défaillances d'un procédé de fabrication est difficile pour différents raisons (technologiques, conceptuelles ou autres). Les paramètres opératoires constituent la principale cause qui entraîne des variations des cotes ou défauts de forme. Dans ce sens, pour maîtriser ces paramètres, des approches et des techniques diverses ont été développées et mises en place par différents chercheurs, qui utilisent la simulation numérique par éléments finis. Le recours à cette technique se fait principalement dans deux cas :

1. Le premier correspond au cas où l'expérimentation directe est impossible à réaliser pour des raisons telles que : temps, coût, technologique, etc.
2. Le second correspond au cas où on ne dispose pas de bases théoriques suffisantes, capables de modéliser la réalité du problème dans toute sa complexité.

La simulation numérique est une technique particulière de modélisation et d'évaluation des procédés qui est utilisée depuis les années 60. Outil puissant de modélisation des systèmes de nombreuses disciplines, la simulation numérique n'a cessé d'évoluer depuis sa découverte.

L'apport si important de cette approche dans un contexte d'évolution industrielle très rapide, réside dans ses capacités de modélisation et de prédiction. En effet elle fournit une aide appréciable dans la conception des nouveaux produits, pour tester de nouvelles hypothèses trouvées par des chercheurs et qui seront peut-être à l'origine de nouvelles lois. La simulation numérique peut-être utilisée dans l'ensemble des phases du cycle de vie d'une pièce mécanique : la conception, la fabrication et l'exploitation.

Des lacunes, des problèmes et des difficultés subsistent encore aussi bien dans les approches que dans les outils de modélisation (les codes de calcul par éléments finis - Abaqus, Adina, Cosmos, etc.), d'où l'intérêt de ce travail.

C'est pourquoi nous proposons dans ce chapitre la modélisation par éléments finis des défaillances le plus souvent rencontrées dans la mise en forme telles que : la rupture des outils ou pièces, l'usure ou la fatigue des outils (Figure 3.1). L'originalité de nos approches réside dans le fait que nous proposons des modèles qui sont paramétrables et qui utilisent la technique des plans d'expériences afin de réduire le temps de calcul par un nombre réduit d'essais nécessaires pour leur mise en oeuvre.

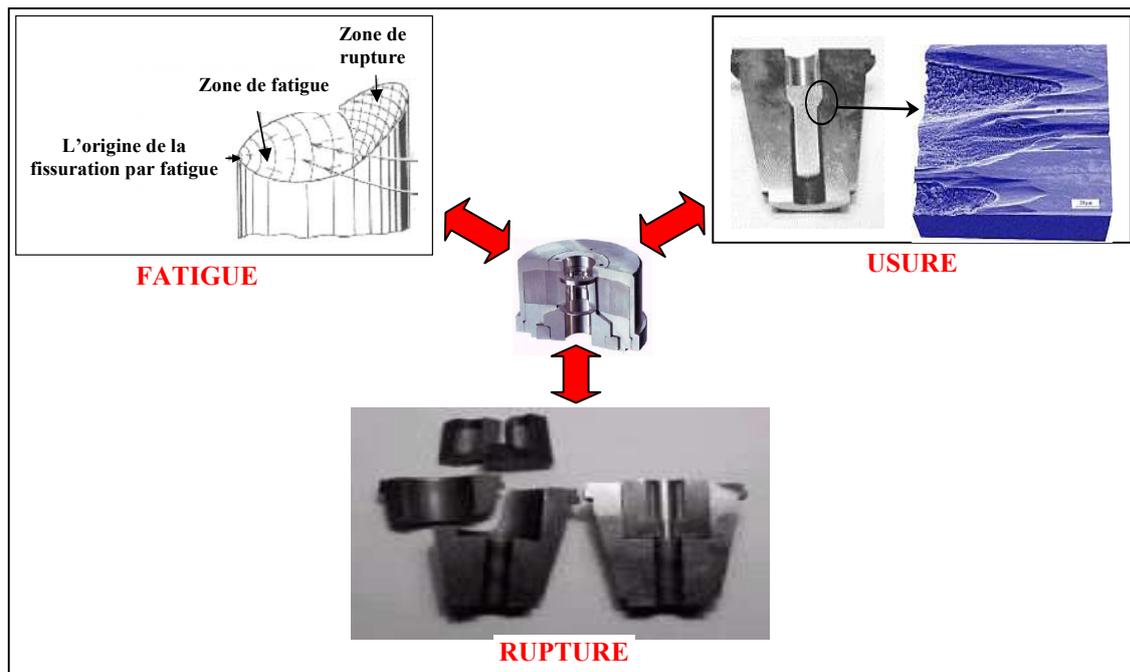


FIG. 3.1 – Dégradation subie par les outils

### 3.1.1 Endommagement et rupture

Le mécanisme de rupture est très complexe mais il commence toujours à partir d'une discontinuité existante dans la structure du matériau de type fissure (Figure 1.15) ou défaut (Figure 1.34). Comprendre ce phénomène permet de prévoir en fonction des dimensions d'une fissure et l'état de chargement, la vitesse de propagation de la fissure, et par conséquent d'empêcher la rupture brutale de la pièce ou de l'outil (Figures 1.9 et 3.1). La rupture d'un matériau peut-être fragile sans déformation plastique, tout en libérant une énergie cinétique qui peut-être importante [Pro96]. Il existe plusieurs types de rupture (rupture fragile, rupture intergranulaire et rupture ductile [Fra26]) mais nous ne sommes intéressés ici que par la rupture ductile.

La rupture ductile résulte de la naissance de cavités, puis de leurs croissances et de leurs coalescences sous l'effet de la déformation plastique. L'apparition des cavités a lieu surtout dans ou à proximité des inclusions, par rupture de ces dernières ou par décohésion de leur interface avec la matrice.

Le mécanisme de la rupture [Pre97] commence par la propagation lente des fissures qui vont vite fragiliser la résistance du matériau et par conséquent du système dont il fait partie intégrante. L'analyse du processus de rupture est très complexe par le fait qu'aux moins les facteurs suivants y jouent un rôle : la température, la vitesse de déformation locale, le taux local de triaxialité de contraintes, la structure du matériau (le plus souvent non homogène),

La propagation des fissures dans l'état le plus général se fait par une superposition de trois modes de propagation [Eng60] (Figure 3.2) :

- mode I (mode par ouverture) : les surfaces de la fissure se déplacent dans des directions opposées et perpendiculairement au plan de fissure ;
- mode II (glissement de translation) : les surfaces de la fissure se déplacent dans le même plan et dans une direction perpendiculaire au front de fissure ;
- mode III (glissement de rotation) : les surfaces de la fissure se déplacent dans le même plan et dans une direction parallèle au front de la fissure.

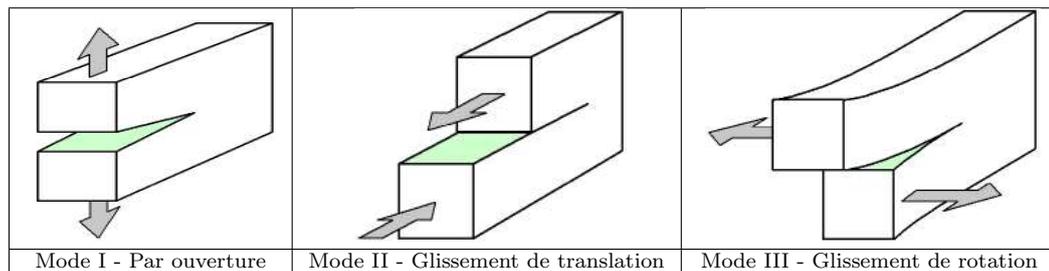


FIG. 3.2 – Modes de propagation de fissures - Photo : [Fis01]

On considère que la rupture est plate si elle correspond au mode I et si la rupture est inclinée elle correspond aux modes II et III. Les fissures peuvent être de trois types : superficielles, internes, traversantes sous forme semi-elliptique, elliptique ou en coin, etc. Ces fissures sont généralement planes, c'est-à-dire que leurs deux faces sont très voisines d'un plan moyen et se rejoignent selon un bord anguleux.

### 3.1.1.1 Critères de rupture

Pour prédire le risque de rupture, différents auteurs ont proposé leurs critères de rupture [Atk97, Bro72, Bro95, Cli90, Coc66, Fis95, McC68, Mor78, Oya80, Zhu95]. Dans le cas isotrope, ces critères sont des fonctions scalaires qui s'expriment à l'aide des composantes des tenseurs des contraintes ou/et des déformations, et dépendent de certains coefficients caractéristiques du matériau. La plupart de ces critères sont de nature empirique c'est à dire qu'aucune base théorique ne les justifie. On les obtient généralement à partir d'essais rhéologiques sur des éprouvettes dont la rupture est identifiée avec une valeur critique atteinte par une fonction qu'on suppose représentative du phénomène [Atk97, Bro72, Cli90, Duf80, Fis95]. McClintock [McC68], Rice and Tracey [Ric69], et d'autres, ont étudié à l'échelle microscopique la rupture ductile des métaux en l'identifiant à des mécanismes de croissance et de coalescence de cavités simulant les vides préexistants dans le matériau. Ils ont proposé des lois de croissance qui sont des fonctions de la déformation plastique

équivalente  $\epsilon_{eq}$ , de la contrainte équivalente  $\sigma_{eq}$ , de la contrainte hydrostatique  $\sigma_H$  et de certains coefficients du matériau. La rupture ductile est le résultat de l'instabilité des grandes déformations locales engendrées au voisinage des défauts cristallins [Cha81, Cha88, Gur77, Kac58, Lem00, Nee72, Tve90]. Les défauts responsables de l'amorçage de la rupture ductile sont :

1. les inclusions,
2. les particules d'éléments d'addition dans les alliages,
3. les empilements de dislocations,
4. les précipités de mise en solution par traitements thermiques,
5. les joints de grains.

Au voisinage de ces défauts, les sollicitations extérieures créent des concentrations de contraintes qui engendrent de grandes déformations plastiques. Le défaut étant en général moins ductile que la matrice, par effet d'instabilité il y a décohésion à l'interface créant ainsi l'amorçage d'une microfissure ou d'une cavité. La rupture ductile des métaux résulte de l'amorçage de la croissance et de la coalescence des cavités aboutissant à une surface de cassure présentant des cupules.

### Modèles de croissance et de coalescence des cavités

Le volume critique des cavités constitue une voie intéressante pour développer des critères de rupture ductile. La déformation volumique d'une cavité est en effet une fonction du tenseur des contraintes locales  $\sigma_{ij}$ . Suivant Oyane [Oya80] on écrit :

$$\frac{dV}{V} = f\left(\frac{\sigma_{ij}}{\sigma_{eq}}\right) d\epsilon_{eq} \quad (3.1)$$

En négligeant les termes du second ordre dans le développement limité de (Equation 3.1), on obtient

$$\frac{dV}{V} = \left(a + b\frac{\sigma_H}{\sigma_{eq}}\right) d\epsilon_{eq} \quad (3.2)$$

L'intégration d'équation 3.2 donne l'expression du critère sous la forme :

$$\ln\left(\frac{V}{V_0}\right) = \int_0^{\epsilon_R} \left(a + b\frac{\sigma_H}{\sigma_{eq}}\right) d\epsilon_{eq} \quad (3.3)$$

où  $\sigma_{eq}$  désigne la contrainte équivalente,  $\sigma_H$  la contrainte hydrostatique,  $\epsilon_{eq}$  la déformation équivalente, et  $\epsilon_R$  la déformation équivalente.  $V_0$  désigne le volume initial des cavités. Le critère de rupture ductile donné par Oyane se met sous la forme suivante :

$$\int_0^{\epsilon_R} \left( 1 + \frac{\sigma_H}{A\sigma_{eq}} \right) d\epsilon_{eq} - B = 0 \quad (3.4)$$

$A$  et  $B$  sont deux constantes inhérentes au comportement du matériau.

### Modèle de McClintock

McClintock [McC68] a étudié la rupture ductile des métaux par le processus de croissance et coalescence des cavités. Ce processus conduisant à la rupture ductile peut être interprété comme une progression du dommage. Dans le cas de structures bidimensionnelles, les auteurs considèrent qu'un certain nombre de trous cylindriques équidistants et de même diamètre, sont répartis d'une façon uniforme dans le matériau. Le domaine matériel est supposé être divisé en cellules contenant chacune un trou central. La distance entre deux cavités est supposée suffisamment grande par rapport au diamètre, pour que le mouvement d'un trou soit déterminé d'une façon indépendante des autres. En d'autres termes, l'interaction entre les trous est négligée et on fait l'étude d'un trou dans un milieu infini. Les auteurs proposent une fonction décrivant la rupture sous la forme :

$$\ln \left( \frac{R_R}{R_0} \right) = \int_0^{\epsilon} \left[ \frac{\sqrt{3}}{2(1-n)} \cdot \sinh \left( \frac{\sqrt{3}(1-n)}{2} \cdot \frac{(\sigma_1 + \sigma_2)}{\sigma_{eq}} \right) + \frac{3}{4} \cdot \frac{(\sigma_1 - \sigma_2)}{\sigma_{eq}} \right] d\epsilon_{eq} \quad (3.5)$$

- $\sigma_1$  et  $\sigma_2$  sont les contraintes dans les directions 1 et 2.  $\frac{R_R}{R_0}$  définit le rapport entre la taille actuelle et la taille initiale de la cavité.

### Modèle de Rice et Tracey

Dans cette étude [Ric69], les auteurs se proposent de déterminer un modèle de croissance d'une cavité sphérique dans une matrice évoluant dans un état de déformation plastique parfait. Après certains développements mathématiques, ils

proposent le critère de rupture suivant :

$$\ln \left( \frac{R_R}{R_0} \right) = 0.283 \cdot \int_0^{\varepsilon_R} \exp \left( \frac{3}{2} \cdot \frac{\sigma_H}{\sigma_{eq}} \right) d\varepsilon_{eq} \quad (3.6)$$

### Critères empiriques

D'autres auteurs ont essayé de caractériser la rupture à l'aide de variables mécaniques, et de nombreux critères de ruptures en mode ductile ont été proposés. Nous en faisons un bref rappel dans ce qui suit. L'idée générale qui sous-tend ces approches est la suivante : On postule que lorsqu'une fonction  $f_R$ , supposée être représentative du phénomène de rupture ductile d'un élément de volume en état de charge élastoplastique, dépasse une valeur critique  $C_c$ , la rupture se fait. D'une manière générale, ces critères ont la forme suivante :

$$f_R - C_c = 0 \quad (3.7)$$

### Critère de déformation plastique équivalente

Ce critère met en oeuvre la déformation plastique équivalente  $\varepsilon_{eq}$ . Quand sa valeur atteint une valeur critique  $\varepsilon_R$ , on a rupture de l'élément de volume. La valeur de  $\varepsilon_R$  est déterminée expérimentalement pour chaque matériau à partir d'un essai de traction. On écrit donc :

$$\varepsilon_{eq} - \varepsilon_R = 0 \quad (3.8)$$

### Étude comparative de Clift

Clift et al. [Cli90], ont basé leur étude comparative sur un modèle éléments finis pour étudier les problèmes de mise en forme des métaux en tenant compte des phénomènes de rupture. Le comportement du matériau étant décrit par la loi de Prandtl-Reuss associée au critère de Von Mises. Ils ont simulé numériquement la rupture, en utilisant chacun des différents critères empiriques trouvés dans la littérature. Pour valider leur programme, les auteurs ont réalisé des essais expéri-

mentaux tels que la compression d'un cylindre ou l'extrusion d'un lopin cylindrique. En comparant les deux résultats, ils concluent que certains critères sont en accord avec l'expérience pour certains procédés de mise en forme et certaines géométries, et sont en désaccord dans d'autres cas. Seul le critère énergétique de Freudenthal qui s'identifie à l'énergie plastique dissipée a donné entière satisfaction.

La majorité de ces critères ont été développés à partir de travaux expérimentaux qui, d'après Clift [Cli90], ont un domaine d'application limité. Beaucoup sont spécifiques à un type de sollicitation et à une géométrie particulière. D'une façon générale, on distingue trois types de critères qu'on peut classer comme suit :

1. Des critères de rupture ductile basés sur des approches macroscopiques traduites sous la forme de courbes limites de formage (cas de l'emboutissage par exemple). Ces approches purement macroscopiques et descriptives, n'intègrent pas les effets des mécanismes d'endommagement. En vue de la simplicité de ces notions, ces courbes ne sont valables que pour des évolutions de contraintes et de déformations bien particulières.
2. Des critères de rupture ductile basés sur l'observation des grandeurs mécaniques. Ces critères ne tiennent compte que qualitativement des constatations expérimentales. Ils sont déterminés de façon à privilégier l'influence des grandeurs mécaniques les plus déterminantes pour la rupture (déformation, triaxialité des contraintes ..etc..).

Ces critères ont très souvent la forme suivante :

$$\int_0^{\varepsilon_R} f(\sigma, \varepsilon_{eq}) d\varepsilon_{eq} - C_c = 0 \quad (3.9)$$

$f(\sigma, \varepsilon_{eq})$  est une fonction des contraintes et des déformations et  $C_c$  est la valeur critique du critère de rupture.

3. Des critères de rupture ductile basés sur des études microscopiques décrivant l'évolution de cavités sphériques au sein des matériaux.

### 3.1.1.2 Lois d'endommagement de Lemaître

Dans cette approche [Lem00], l'endommagement est isotrope, caractérisé par la variable scalaire  $D$ . Dans le cas unidimensionnel on la définit comme étant le rapport entre la surface des défauts  $\Delta A_v$  et la surface apparente de la section d'un élément de volume  $\Delta A$  conformément à la figure 3.3 :

$$D = \frac{\Delta A_v}{\Delta A} \quad (3.10)$$

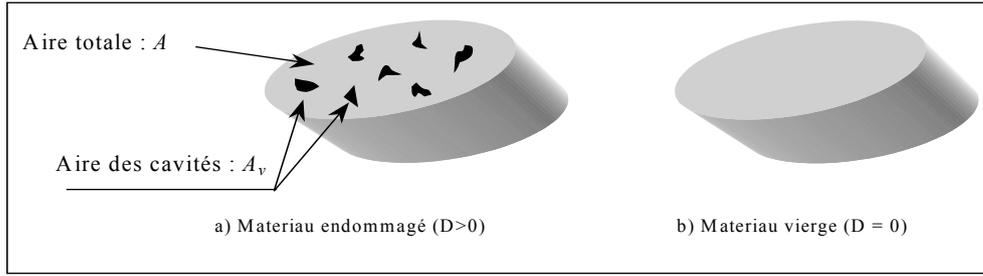


FIG. 3.3 – Éléments de volume endommagé et vierge.

Pour modéliser le phénomène d'endommagement, on peut se placer dans le cadre de la thermodynamique des milieux continus. Dans ce cas l'énergie libre est utilisée comme potentiel thermodynamique d'état peut se mettre sous la forme [Lem92] :

$$\Psi = \Psi (\varepsilon_{ij}^e, D) \quad (3.11)$$

$\varepsilon_{ij}^e$  est le tenseur des déformations élastiques. La loi de comportement couplée à l'endommagement est donnée par :

$$\sigma_{ij} = \rho \frac{\partial \Psi}{\partial \varepsilon_{ij}^e} \quad (3.12)$$

Le développement de l'équation 3.12 donne la relation classique :

$$\sigma_{ij} = \frac{(1-D)E}{1+\nu} \left[ \varepsilon_{kk}^e - \frac{\nu}{(1-2\nu)} \varepsilon_{kk}^e \delta_{ij} \right] \quad (3.13)$$

$D$  est la variable d'endommagement,  $E$  est le module de Young,  $\nu$  est le coefficient de Poisson,  $\rho$  est la masse volumique du matériau et  $\delta_{ij}$  est la fonction de Dirac (1 pour  $i = j$ , 0 si  $i \neq j$ ). La relation (3.13) peut se mettre sous la forme suivante :

$$\sigma_{ij} = (1-D) C_{ijkl} \varepsilon_{kl}^e \quad (3.14)$$

$C_{ijkl}$  désignent les composants de l'opérateur élastique de Hooke.

La variable force thermodynamique associée à la variable d'endommagement s'écrit sous la forme [Lem92] :

$$-Y = -\rho \frac{\partial \Psi}{\partial D} = \frac{\sigma_{eq}^2}{2E(1-D)^2} \left[ \frac{2}{3}(1+\nu) + 3(1-2\nu) \left( \frac{\sigma_H}{\sigma_{eq}} \right)^2 \right] \quad (3.15)$$

$\sigma_H$  est la contrainte hydrostatique et  $\sigma_{eq}$  est la contrainte équivalente de von Mises

donnée par :

$$\sigma_{eq} = \sqrt{\frac{3}{2} S_{ij} S_{ij}} \quad (3.16)$$

avec  $S_{ij}$  le déviateur des contraintes défini par :

$$S_{ij} = \sigma_{ij} - \delta_{ij} \sigma_H \quad (3.17)$$

En suivant l'approche de Lemaître [Lem92], la fonction de charge affectée par le dommage est donnée par la relation :

$$f = f_1(\sigma_{ij}, \sigma_0, D) + f_D(-Y, \varepsilon_{eq}, D) \quad (3.18)$$

$f_1$  est le potentiel plastique associé à l'écoulement,  $f_D$  est le potentiel plastique associé à l'endommagement et  $\sigma_0$  est la loi d'écrouissage.

Pour les matériaux qui respectent le critère de von Mises  $f_1$  prend la forme :

$$f_1 = \frac{\sigma_{eq} - \sigma_0}{1 - D} - \sigma_{el} \quad (3.19)$$

$\sigma_{el}$  désigne la limite élastique du métal.

Les lois d'écoulement et d'évolution des variables internes sont obtenues dans l'hypothèse de dissipation normale et s'écrivent :

$$d\varepsilon_{ij}^p = d\lambda \frac{\partial f_1}{\partial \sigma_{ij}} = \frac{d\lambda}{1 - D} \cdot \frac{3S_{ij}}{2\sigma_{eqij}} \quad (3.20)$$

$d\varepsilon_{ij}^p$  est le tenseur incrément de déformation plastique.

$$d\lambda = (1 - D) d\varepsilon_{eq} \quad (3.21)$$

$$d\varepsilon_{eq} = \sqrt{\frac{2}{3} d\varepsilon_{ij} d\varepsilon_{ij}} \quad (3.22)$$

$$dD = -d\lambda \cdot \frac{\partial f_D}{\partial Y} = \frac{-Y}{S_0} \cdot \frac{d\lambda}{1 - D} \quad (3.23)$$

$S_0$  est un coefficient matériau. Finalement, Lemaître propose la loi d'endommage-

ment suivante :

$$dD = \frac{D_c}{\varepsilon_R - \varepsilon_D} \left[ \frac{2}{3}(1 + \nu) + 3(1 - 2\nu) \left( \frac{\sigma_H}{\sigma_{eq}} \right)^2 \right] (\varepsilon_{eq})^{\frac{2}{n}} d\varepsilon_{eq} \quad (3.24)$$

$n$  est l'exposant d'écrouissage,  $\nu$  est le coefficient de Poisson,  $\varepsilon_D$  est la déformation seuil en deçà de laquelle l'endommagement est nul ou négligeable et  $\varepsilon_R$  est la déformation à rupture pour laquelle l'endommagement est égal à sa valeur critique  $D_c$ .

## 3.2 Modélisation par éléments finis des défaillances de procédés de mise en forme

### 3.2.1 Modélisation de l'endommagement des métaux

Dans ce paragraphe, nous présentons des modèles numériques permettant de traiter par la méthode des éléments finis les problèmes d'endommagement et de rupture ductile générés par la déformation plastique des pièces durant leur mise en forme (Figure 3.4). L'implantation numérique dans un code de calcul par éléments

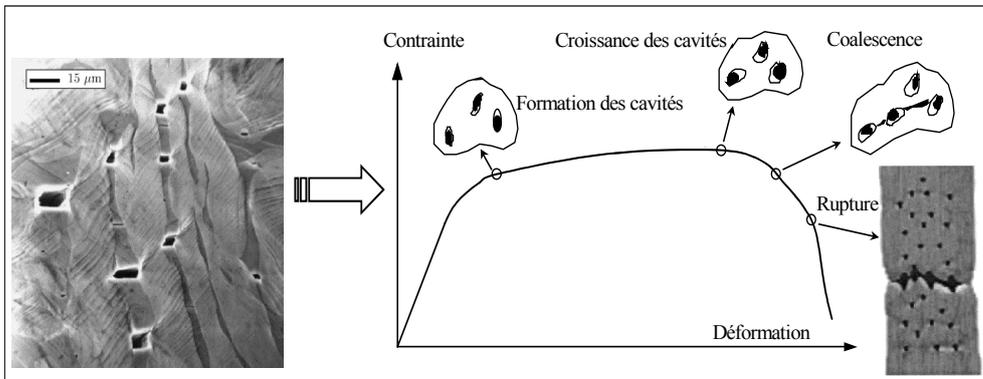


FIG. 3.4 – Mécanismes d'endommagement et de la rupture.

finis de critères d'endommagement est un outil très utile pour étudier les risques des structures. Par exemple dans le domaine de la mise en forme des métaux, on cherche très souvent à éviter ou à réduire le risque d'apparition de fissure au sein du produit à fabriquer [Ari03, Cli90, Coc66, Che03, Gou00, Guo02, Gel98, Ham00a, Ko96, Lem85, Lau97, Mka02, Oya80, Zhu95]. Dans ce cadre, nous avons mis au point un algorithme de calcul implicite qui permet d'intégrer localement plusieurs critères d'endommagement en chaque élément fini et pour chaque itération du processus global. Le schéma d'intégration implicite que nous avons choisi, est bien adapté

aux fortes non-linéarités de la loi de comportement car il présente l'avantage d'être inconditionnellement stable [ABA, ABA93, Cho96, Mar84, Zab00]. Ce travail a été implanté au code de calcul ABAQUS à l'aide de la routine utilisateur UMAT qui permet d'introduire une loi de comportement utilisateur [ABA, ABA93].

### 3.2.1.1 Modélisation du dommage

Dans toute la suite de cette étude, on considère que le comportement élasto-plastique endommageable peut être décrit en supposant un découplage entre les parties déviatoriques et sphériques des tenseurs des contraintes et des déformations [ABA, ABA93, Cri91]. Le problème d'évolution élastoplastique peut être traité comme un problème à déformation contrôlée et les algorithmes de calcul font partie d'un problème d'analyse convexe [ABA, Cri91]. Du point de vue numérique, le problème consiste à projeter un point d'essai (l'indice  $T$  désigne le terme test) de l'espace des contraintes sur la surface d'un convexe selon la plus petite distance entre le point et le convexe représentant la surface de charge [ABA, Cri91]. Ceci est illustré sur la figure 3.5 dans l'espace des contraintes.

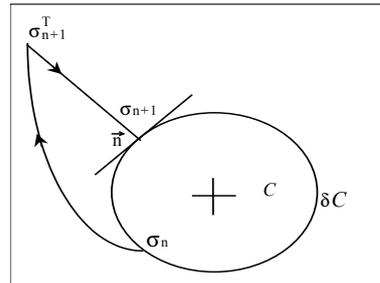


FIG. 3.5 – Projection de la contrainte sur la surface de la fonction de charge.

Dans le cas de la plasticité, le point d'essai est obtenu par un état élastique à l'aide de la relation incrémentale :

$$\sigma_{n+1}^T = \sigma_n + \Delta\sigma = (1 - D_n) [C] \left[ (\varepsilon_{tot})_{n+1} - (\varepsilon_{pl})_n \right] \quad (3.25)$$

$\sigma_n$  désigne le tenseur des contraintes au début de l'incrément  $\Delta\sigma$ , tenseur incrément des contraintes supposé être purement élastique.  $(\varepsilon_{tot})_{n+1}$  est la déformation totale à l'incrément  $n+1$ ,  $(\varepsilon_{pl})_n$  est la déformation plastique à l'incrément  $n$ ,  $D_n$  est la valeur du dommage à l'incrément  $n$  et  $[C]$  est l'opérateur élastique de Hooke. Suivant la valeur obtenue, la fonction de charge  $f$  permet de situer le point d'essai.

- Si  $f < 0$ . Le point est à l'intérieur du domaine, on a chargement élastique. Dans ce cas, la prédiction est bonne et on peut écrire que le tenseur des contraintes

vraies est égal au tenseur des contraintes de l'essai élastique :

$$\sigma_{n+1} = \sigma_{n+1}^T \quad (3.26)$$

- Si  $f \geq 0$  On a un chargement élastoplastique et le point d'essai est extérieur au convexe.

Pour s'y ramener, on cherche la projection la plus proche de  $\sigma_{n+1}^T$  sur la frontière de  $C$  ( $\delta C$ ). On définit ainsi un algorithme à deux pas :

1. Prédiction élastique : à partir d'une valeur  $\Delta\sigma$

$$\sigma_{n+1}^T = \sigma_n + \Delta\sigma \quad (3.27)$$

2. Correction plastique avec retour radial sur la frontière :

$$\sigma_{n+1} = P(\sigma_{n+1}^T) \quad (3.28)$$

L'application projective (algorithme de correction plastique)  $P : R^5 \rightarrow \delta C$  dénote la projection orthogonale de la contrainte d'essai  $\sigma_{n+1}^T$  sur la frontière  $\delta C$ . Les variables d'états à  $t_{n+1}$  doivent satisfaire les conditions de convergence suivantes :

$$f = 0 \quad (3.29)$$

$$\sigma_{n+1} - (1 - D_{n+1}) [C] [(\varepsilon_{tot})_{n+1} - (\varepsilon_{pl})_n] = 0 \quad (3.30)$$

$$\Delta H^\alpha = h^\alpha (\Delta \varepsilon_{ij}, (\sigma_{ij})_{n+1}, H_{ij}^\alpha, D_{n+1}) \quad (3.31)$$

$\Delta H^\alpha$ ,  $\alpha = 1, 2, \dots, n$ , représente un ensemble de variables d'état et  $h^\alpha$  les fonctions d'évolution des variables  $H^\alpha$ . Dans le cas d'une analyse non linéaire engendrant des grandes déformations, la formulation des équations constitutives et d'évolution doit vérifier le principe de l'indifférence matérielle dit principe d'objectivité [Cri91, Daw97, Pic92]. Ce principe exprime que toute loi de comportement doit satisfaire l'invariance vis-à-vis d'un mouvement de corps rigide.

$$\sigma_{ij}^t \Delta t = C_{ijkl}^{EP} \Delta \varepsilon_{kl} \quad (3.32)$$

Le tenseur  $C_{ijkl}^{EP}$  est donné par :

$$[C]^{EP} = \left( \frac{\partial \sigma}{\partial \varepsilon} \right) \quad (3.33)$$

L'équation 3.33 peut s'écrire sous la forme suivante :

$$[C]^{EP} = \left\{ [C_{el}] - \frac{[C_{el}] \mathbf{n} \mathbf{n}^T [C_{el}]}{H + \mathbf{n}^T [C_{el}] \mathbf{n}} \right\} \quad (3.34)$$

$\mathbf{n}$  désigne le vecteur normal à la surface de charge  $f$  :

$$[\mathbf{n}]^T = \left\{ \frac{\partial f}{\partial \sigma_x}, \frac{\partial f}{\partial \sigma_y}, \frac{\partial f}{\partial \sigma_z}, \frac{\partial f}{\partial \sigma_{xy}}, \frac{\partial f}{\partial \sigma_{yz}}, \frac{\partial f}{\partial \sigma_{zx}} \right\} \quad (3.35)$$

$H$  est la dérivée de la loi d'érouissage :

$$H = \frac{d\sigma_0}{d\varepsilon_{eq}} \quad (3.36)$$

La contrainte vraie à  $t + \Delta t$  s'obtient en appliquant la dérivée de Jaumann ou dérivée corotationnelle qui prend la forme suivante :

$$\sigma^t = \dot{\sigma} + \sigma \cdot \Omega + \Omega^t \cdot \sigma \quad (3.37)$$

$\Omega$  est le tenseur de vitesses de rotation à l'instant  $t$ .

L'algorithme de correction plastique est détaillé dans [Ham96]. Contrairement à l'approche découplée dont le principe est de rompre brusquement l'élément de volume au delà d'une valeur critique atteinte par une fonction décrivant l'évolution d'un critère de rupture, l'approche couplée présente les avantages suivants :

- Des bases théoriques et physiques existent pour le développement de lois d'endommagement. Le comportement de la matière est décrit d'une façon couplée à l'endommagement.
- La dégradation de la matière est décrite progressivement.

Le schéma de principe de cette approche est donné par la figure 3.6 [Ham05b].

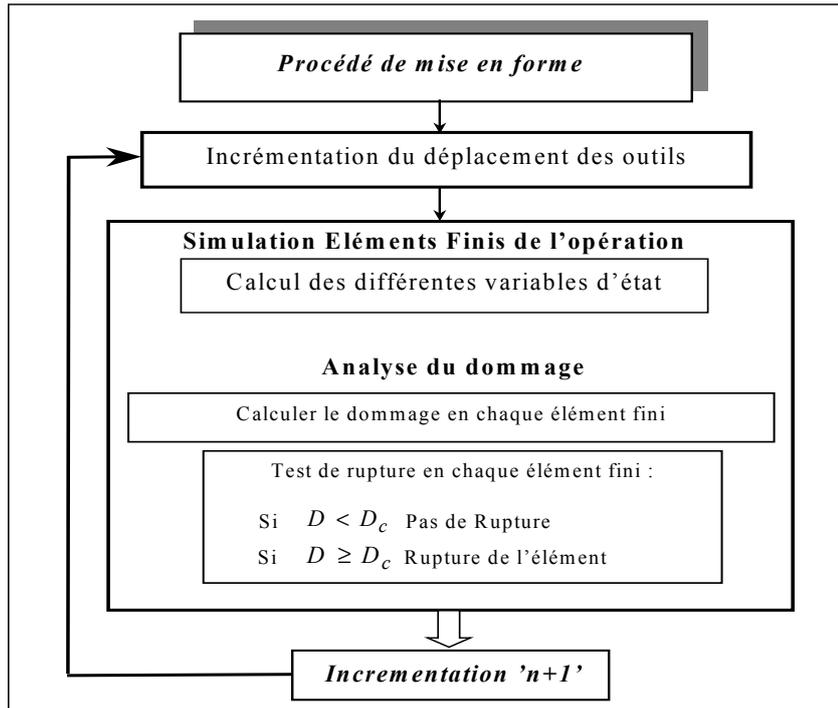


FIG. 3.6 – Schéma de principe de l'approche couplée.

L'utilisation de lois de comportement élasto-plastique couplées à l'endommagement pour le calcul des structures, par la méthode des éléments finis, nécessite le développement d'algorithmes robustes et rapides. Dans la littérature, on dispose de plusieurs algorithmes spécialement adaptés à la résolution de problèmes non-linéaires [ABA, Cri91, Guo02, Saa01]. Dans ce cadre, nous avons mis au point un algorithme de calcul [Lep04b] implicite qui permet d'intégrer localement les équations constitutives en chaque élément fini et pour chaque itération du processus global. Le schéma d'intégration retenu, semble bien adapté aux fortes non-linéarités de la loi de comportement car il présente l'avantage d'être inconditionnellement stable [ABA, Cri91]. Nous avons développé ce travail à l'aide de la routine utilisateur UMAT qui permet d'implémenter des lois de comportement quelconques au code de calcul Abaqus [ABA, ABA93]. Plus de détails sur ce travail seront présentés par la suite dans le chapitre d'applications. Les équations d'équilibre global sont résolues d'une façon itérative et à cette fin, plusieurs algorithmes sont disponibles correspondant à [ABA] :

- la méthode de Newton, citée comme la plus stable [Bha87, Coc68]
- la méthode de quasi-Newton, développée pour éviter la décomposition coûteuse de la matrice des rigidités [ABA],
- la méthode de Riks, développée pour mieux contrôler le chargement lors du passage du point limite du comportement global [ABA].

Les performances de la méthode de Newton pour résoudre les équations d'équilibre global sont directement liées à la précision avec laquelle est calculée la matrice de rigidité à chaque itération du processus itératif global [ABA, Cri91]. Cette matrice est à son tour évaluée à l'aide du module tangent  $J$ , caractérisé par le rapport entre les vitesses des contraintes et les vitesses des déformations. La façon selon laquelle est calculée la matrice  $J$  est d'une grande importance. En effet pour réduire le temps de calcul global, il est indispensable d'évaluer le module tangent d'une façon précise et cohérente avec l'algorithme de calcul local [ABA, Ham00a, Saa01].

### 3.2.1.2 Algorithme de calcul global

Dans le cadre de la formulation en déplacement de la méthode des éléments finis, les équations d'équilibre global à satisfaire à chaque instant  $t_{n+1}$  peuvent être écrites sous la forme suivante [ABA] :

$$F(U_{n+1}) = 0 \quad (3.38)$$

$F$  désigne un système d'équations non linéaires en déplacements et  $U_{n+1}$  désigne la solution exacte à l'incrément  $n + 1$ .

Si la méthode de Newton est utilisée pour résoudre ce système non linéaire, à chaque itération globale  $r$ , on cherche la solution du système :

$$F(U_{n+1}^r) + (K_{n+1}^r)(U_{n+1}^{r+1} - U_{n+1}^r) = 0 \quad (3.39)$$

$K_{n+1}^r$  est la matrice de rigidité à l'incrément  $n + 1$  et l'itération  $r$ , donnée par la relation :

$$K_{n+1}^r = \left( \frac{\partial F}{\partial U} \right)_{n+1}^r = \int_{\Omega} B^T J_{n+1}^r B d\Omega \quad (3.40)$$

$B$  est la matrice déformation-déplacement :

$$\Delta \varepsilon^{r+1} = B(U_{n+1}^{r+1} - U_{n+1}^r) \quad (3.41)$$

$J_{n+1}^r$  est le module tangent donné par :

$$J_{n+1}^r = \left( \frac{\partial \sigma}{\partial \varepsilon} \right)_{n+1}^r \quad (3.42)$$

### 3.2.1.3 Algorithme de calcul local

D'un point de vue numérique, le problème consiste à résoudre les équations constitutives à la fin de l'incrément de temps. L'ensemble des équations qui définissent le problème découlent de :

1. La décomposition de la déformation en une partie élastique et une partie plastique :

$$\varepsilon_{tot} = \varepsilon_{el} + \varepsilon_{pl} \quad (3.43)$$

2. La loi de comportement couplée à l'endommagement :

$$\sigma_{ij} = (1 - D) (\lambda_e \delta_{ij} \varepsilon_{kk}^{el} + 2 \mu_e \varepsilon_{ij}^{el}) \quad (3.44)$$

$\lambda_e$  et  $\mu_e$  sont les coefficients de Lamé.

3. La loi d'écoulement plastique :

$$\varepsilon_{ij}^{pl} = \lambda \frac{\partial f}{\partial \sigma_{ij}} \quad (3.45)$$

$\lambda$  étant le multiplicateur plastique déterminé par la condition de consistance plastique.

4. La définition de la loi d'endommagement :

$$D = D(\sigma_{ij}, \varepsilon_{ij}, a_k) \quad (3.46)$$

5. La définition de la fonction de charge couplée au dommage :

$$f = \sigma_{eq} - \sigma_{el} - (1 - D) \sigma_0 \quad (3.47)$$

## 3.2.2 Prédiction de l'usure des outils par éléments finis

### 3.2.2.1 Introduction

Le phénomène d'usure présente aujourd'hui un grand intérêt pour les industriels parce qu'il entraîne une dégradation de l'outil et par la suite une perte de qualité sur la géométrie finale des produits fabriqués. Une partie de cette recherche est dédiée à la modélisation de l'usure des outils de fabrication par éléments finis [Bat95, Imb95]. Le développement des modèles numériques permet de traiter des problèmes de défaillances des pièces ou des outils rencontrés durant les opérations de formage.

L'usure peut être définie aussi comme une perte de matière à l'interface de deux solides en contact par phénomène de frottement [Chr97, Hor99] (Figure 3.7).

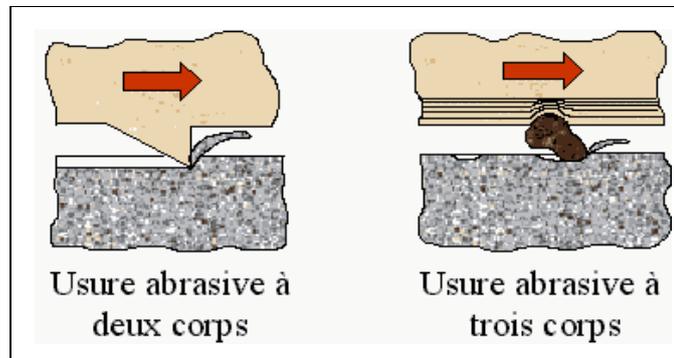


FIG. 3.7 – Mécanisme de l'usure abrasive.

Si la prédiction de l'usure des outils qui résulte des contacts entre solides est d'une grande importance pour les applications industrielles, elle est cependant difficile à mener, à cause de l'absence d'outils de modélisation. Au cours de son utilisation, l'outillage subit des sollicitations cycliques et un échauffement engendré par le travail des actions de contacts entre la tôle, le poinçon et la matrice et par la puissance dissipée au sein de la matière. Il en résulte des problèmes de cassure, d'écaillage ou de grippage (rupture locale sur le bord de l'outil) ainsi que l'usure progressive des parties actives. Pour le produit fini, apparaissent des défauts de fabrication qu'on peut classer comme suit :

- Variation de cotes,
- Apparition de défauts de forme (Figure 3.8),
- Formation de bavures,
- Dégradation des caractéristiques mécaniques du matériau.

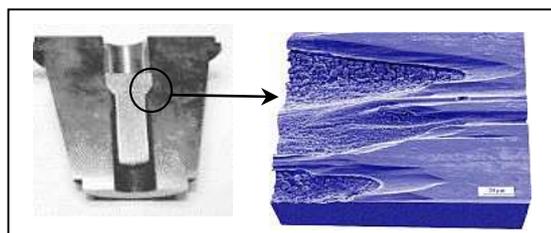


FIG. 3.8 – Les défauts causés par l'usure.

L'usure est étudiée depuis longtemps, mais de façon assez empirique. C'est pourquoi, malgré de très nombreuses études déjà réalisées (plus de 5000 articles parus dans les revues *Wear et Wear of Materials* et plus de 300 lois dénombrées depuis

1947), très peu de travaux ont été consacrés à la prédiction de l'usure des outils par éléments finis. L'élimination des dégradations de surface est très importante du point de vue de la fiabilité car elle augmente la durée de vie des mécanismes en évitant les dysfonctionnements [Jeo01, Sob92b]. Celle-ci nécessite de pouvoir contrôler l'usure qui, comme de nombreuses autres composantes de la tribologie, dépend des propriétés mécaniques, physico-chimiques et topographiques des surfaces. De nombreux travaux expérimentaux ont été réalisés sur ce thème mais la modélisation numérique de l'usure est encore peu développée. L'objectif de ce paragraphe est de développer une approche éléments finis permettant de prédire l'évolution de l'usure des outils de presses.

### 3.2.2.2 Modélisation de l'usure par éléments finis

Pour modéliser l'évolution de l'usure du poinçon, nous avons développé un algorithme de calcul mettant en oeuvre la loi d'usure d'Archard [Arc53] qui se met sous la forme suivante :

$$V = \gamma_w F_N s \quad (3.48)$$

$V$  est le volume de matière disparu de la surface de l'outil par phénomène d'usure,  $\gamma_w$  est un coefficient d'usure abrasive qui dépend du matériau ( $10^{-2} - 10^{-7} \text{mm}^2/\text{N}$ ),  $F_N$  est la force normale de contact appliquée à l'outil et  $s$  est la distance de glissement (déplacement tangentiel relatif entre l'outil et la pièce). Différentes études ont montré que l'usure des outils engendre une augmentation du *Rayon de courbure* de son bord tranchant [Ham96, Jen98, Jeo01, Sob92b, Tro92]. La figure 3.9 illustre le profil d'usure d'un outil [Ham01a].

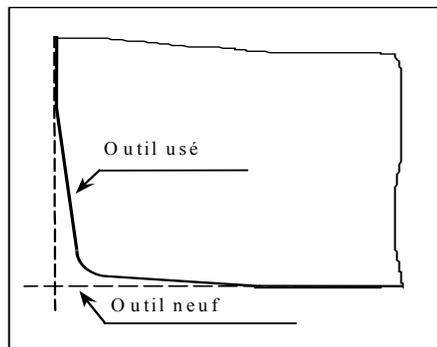


FIG. 3.9 – Profil d'un outil usé.

L'équation 3.48 fait intervenir un seul coefficient qui caractérise l'interaction du couple métal de l'outil et métal de la pièce. Du point de vue éléments finis, en

chaque noeud  $i$  appartenant à la ligne de contact, l'équation 3.48 peut se mettre sous la forme :

$$V_i = (\gamma_w)_i (F_N)_i s_i \quad (3.49)$$

Le modèle d'usure (Équation 3.49) peut être exprimé par la relation incrémentale suivante :

$$dV = \gamma_w dF_N ds \quad (3.50)$$

$dV$  et  $dF_N$  prennent la forme suivant

$$dV = dD_w d\Omega \quad (3.51)$$

$$dF_N = P d\Omega \quad (3.52)$$

$dD_w$  est la profondeur d'usure,  $d\Omega$  est la surface de contact et  $P$  la pression normale de contact (Figure 3.10).

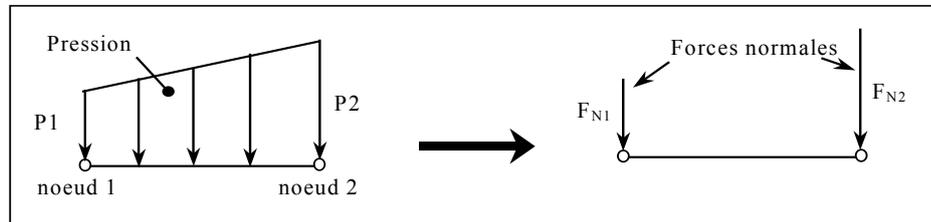


FIG. 3.10 – Pression normale de contact et forces de contact sur les noeuds.

La combinaison des équations 3.50, 3.51 et 3.52 donne :

$$\Delta D_w = \gamma_w P \Delta s \quad (3.53)$$

La forme discrétisée de l'équations 3.53 permet d'écrire :

$$\Delta D_w = \gamma_w \sum_{i=1}^n P_i \Delta s_i \quad (3.54)$$

$n$  est le nombre de noeuds appartenant à la surface de contact outil/pièce.

Pour l'intégration numérique de la loi d'usure, on considère donc un intervalle

de temps  $[t_n, t_{n+1}]$  correspondant aux incréments  $n$  et  $n+1$  ce qui permet d'écrire :

$$(D_w)_{n+1} = (D_w)_n + \gamma_w [P_{n+1} (s_{n+1} - s_n)] \quad (3.55)$$

La figure 3.11 montre l'allure générale d'évolution de l'usure d'un outil traduite en termes de perte de masse en surface. Sur cette courbe on distingue en particulier 3 domaines :

- OA : Usure rapide (Rodage).
- AB : Usure progressive linéaire (domaine d'utilisation de l'outil).
- BC : Usure rapide et dégradation de l'outil.

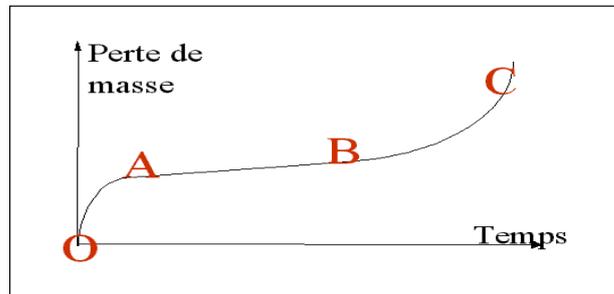


FIG. 3.11 – Évolution de l'usure des outils.

Si on néglige la phase de rodage (domaine OA), on constate que l'usure évolue d'une façon linéaire jusqu'à la dégradation finale de l'outil.

Le volume d'usure en fonction du nombre de pièces fabriquées peut être alors obtenu en appliquant l'équation (3.54). Dans ce cas, on peut écrire :

$$D_w = N_{pf} \times \gamma_w \sum_{i=1}^n P_i \Delta s_i \quad (3.56)$$

$N_{pf}$  est le nombre de pièces fabriquées.

Le comportement du matériau à l'interface tôle/poinçon et tôle/matrice est modélisé par la loi de frottement de Coulomb, et on l'utilise pour le calcul des éléments d'interface entre les deux solides susceptibles d'entrer en contact. Un système de coordonnées locales est construit pour calculer la pression et la contrainte tangentielle lorsque les noeuds appartenant au solide A entrent en contact avec le solide B comme montré sur la figure 3.12

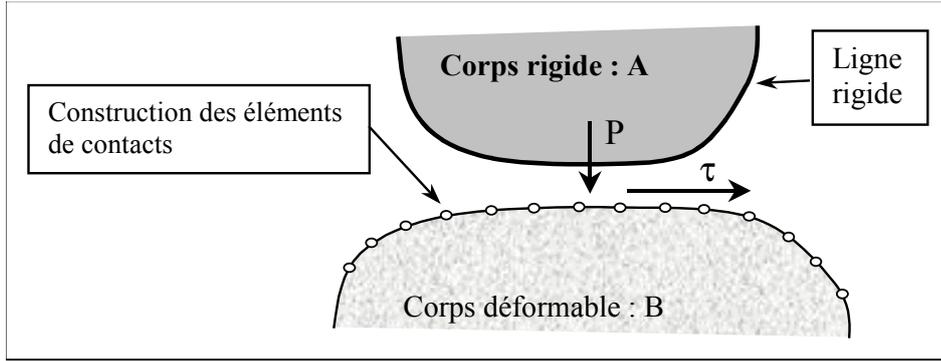


FIG. 3.12 – Modélisation du contact

Le comportement de l'élément peut être décomposé en deux phases [ABA, Car94] :

- une phase pseudo-élastique qui correspond à une phase de glissement réversible,
- une phase pseudo-plastique qui correspond à une phase de glissement irréversible.

Si on applique l'hypothèse de partition des déformations, l'incrément de déformation s'écrit :

$$d\gamma = d\gamma_{el} + d\gamma_{gliss} \quad (3.57)$$

$\gamma_{el}$  désigne le glissement élastique tangentiel et  $\gamma_{gliss}$  désigne le glissement irréversible.

Le comportement restant élastique tant que la contrainte tangentielle ne dépasse pas la contrainte critique de glissement  $\tau_{crit}$ , on a :

$$\gamma_{el}(t + \Delta t) = \gamma_{el}(t) + \Delta\gamma \quad avec \quad \gamma_{gliss} = 0 \quad (3.58)$$

$\tau_{crit}$  est donné par la relation :

$$\tau_{crit} = \mu P \quad (3.59)$$

$\mu$  désigne le coefficient de frottement et  $P$  la pression de contact.

Dans ce cas, la loi élastique est donnée par :

$$d\tau = K_s d\gamma \quad (3.60)$$

$K_s$  est la raideur de collage.

Si  $\tau \geq \mu \cdot P$ , il y a glissement relatif irréversible entre les deux solides. Dans ce

cas l'expression de la contrainte tangentielle devient :

$$d\tau = K_s d\gamma + \frac{\tau}{P} dP \quad (3.61)$$

La loi d'écoulement normale fournit l'expression du glissement irréversible comme suit à l'aide du multiplicateur plastique  $\lambda$  :

$$d\gamma_{gliss} = \lambda d \left( \frac{\tau}{\mu P} \right) \quad (3.62)$$

Ces équations définissant le comportement à l'interface, il suffit de les intégrer sur un incrément de temps pour obtenir les valeurs de la pression et la contrainte tangentielle engendrées par le contact.

### 3.2.3 Prédiction de la fatigue par éléments finis

#### 3.2.3.1 Introduction

Comme nous l'avons déjà rappelé, d'une manière générale le phénomène de fatigue se manifeste dans tout type de structure soumise à des chargements cycliques. Le danger essentiel est que la rupture peut se produire à tout moment en service pour des contraintes nominales souvent en-dessous de la limite élastique. De plus cette rupture n'est accompagnée d'aucune modification de la forme globale de la structure ou de la pièce autrement dit sans déformation préalable. Un des moyens les plus efficaces pour éviter cette rupture soudaine est d'essayer de prédire la durée de vie des pièces sollicitées en fatigue par une modélisation par éléments finis.

#### 3.2.3.2 Critère de von Mises. Application en fatigue

Le chargement cyclique entraîne un état complexe du comportement du matériau. Afin de comprendre et de modéliser le comportement du matériau soumis au chargement cyclique on peut utiliser les critères de rupture sous contraintes statiques au cas de la fatigue en vue de déterminer la limite d'endurance sous contraintes combinées.

Comme les fissures de fatigue se propagent généralement à la surface, on peut considérer uniquement un état biaxial de contraintes (une des trois tensions principales étant nulle).

Si  $c_1$ ,  $c_2$  représentent les amplitudes des contraintes principales en surface, la

limite d'endurance en sollicitations simples  $\sigma_e$ , le critère de Von Mises s'écrit :

$$c_1^2 + c_2^2 + c_1 c_2 = \sigma_e^2 \quad (3.63)$$

### 3.2.3.3 Fatigue multiaxiale en utilisant les contraintes équivalentes

Comme la fissuration par fatigue commence habituellement à la surface d'un composant, sous sollicitations combinées, l'état de contraintes induit dans la pièce est un état de contraintes complexe triaxial au milieu et biaxial (ou état de contraintes planes) en surface. La fatigue étant un phénomène de surface, l'étude de cet état de contraintes complexe se ramène donc à un problème d'état de contraintes planes. L'hypothèse essentielle est basée sur la réduction du problème multiaxial à un problème uniaxial. L'équation uni-axiale de la durée de vie par fatigue basée sur la contrainte locale est [Dra99] :

$$\frac{\Delta\varepsilon}{2} = \frac{\sigma_f}{E}(2 \cdot N_f)^b + \varepsilon_f(2 \cdot N_f)^c \quad (3.64)$$

où :  $\Delta\varepsilon$  est l'amplitude de la déformation,  $N_f$  est la durée de vie par fatigue,  $E$  est le module d'Young,  $\sigma_f$ ,  $\varepsilon_f$ ,  $b$  et  $c$  sont des coefficients du matériau.

Il existe aussi d'autres méthodes pour l'étude en fatigue multiaxiale. Pitouset [Pit01] dans ses travaux de recherche a utilisé des méthodes spectrales afin d'analyser le comportement en fatigue des structures métalliques sous chargements aléatoires multiaxiaux. Une autre approche pour le cas de la fatigue multiaxiale est de maintenir la forme de l'équation 3.64, mais d'utiliser un autre paramètre pour la déformation du côté gauche de l'égalité, tout en faisant les changements correspondants aux paramètres du côté droit. Liu et al [Liu05] proposent une relation empirique pour la modélisation de la fatigue multiaxiale à charges d'amplitude constante.

### 3.2.3.4 Dommage en fatigue

Une des lois les plus utilisées pour le calcul du dommage en fatigue est celle proposée par Miner [Min45]. L'hypothèse sur laquelle cette loi repose est la suivante : l'application de  $n_i$  cycles au niveau de contrainte  $c_i$  pour lequel le nombre moyen de cycles à rupture est  $N_i$  entraîne un accroissement du dommage égal à  $n_i/N_i$ .

La rupture intervient quand :

$$\sum_{i=1} \frac{n_i}{N_i} = 1 \quad (3.65)$$

Quand on veut calculer le dommage cumulé par une pièce qui a subi plusieurs

sollicitations cycliques on peut superposer leurs effets. Followell [Fol91] a calculé le dommage total subi par une pièce sollicitée en même temps par deux types de chargements cycliques. Il s'agit de vibrations et de sollicitations thermiques.

Dans un premier temps, il a calculé le dommage pour chaque sollicitation cyclique :

Pour les vibrations le dommage  $D_v$  sera :

$$D_v = \frac{n_v}{N_v} \quad (3.66)$$

Pour les sollicitations thermiques le dommage  $D_t$  sera :

$$D_t = \frac{n_t}{N_t} \quad (3.67)$$

Avec :

- $n_v$  le nombre actuel de cycles en vibration
- $N_v$  le nombre de cycle en vibration qui va entraîner la ruine
- $n_t$  le nombre actuel de cycles en sollicitation thermique
- $N_t$  le nombre de cycle en sollicitation thermique qui va entraîner la ruine

Le dommage total  $D$  est calculé par la combinaison suivante :

$$D = \left[ \sum \left( \left( \frac{n_v}{N_v} + \frac{n_t}{N_t} \right) \leq 1 \right) \right] \quad (3.68)$$

Le dommage total est plus petit ou égal à 1 parce que la ruine de la pièce n'est pas souhaitée.

### 3.3 Conclusions

La Méthode des Éléments Finis est devenue aujourd'hui une technique courante dans le calcul mécanique. La tendance actuelle dans l'industrie est d'améliorer la qualité des produits, par l'intégration d'algorithmes d'optimisation adaptés et l'automatisation des processus correspondants afin d'augmenter leur productivité. Dans ce but ce chapitre vient de répondre aux exigences actuelles de l'industrie en proposant des modèles éléments finis originaux couplés avec des approches modernes d'optimisation par plan d'expériences présentées au chapitre précédent et des algorithmes d'endommagement pour résoudre des problèmes de défaillances comme l'usure des outils pendant l'extrusion ou le retour élastique pendant le pliage ou l'emboutissage de tôles. Dans le chapitre suivant nous allons présenter un outil d'op-

timisation conçu pour faciliter la mise en oeuvre des nouvelles méthodes proposées dans ce rapport.



# Chapitre 4

## OPTIFORM

### Logiciel d'OPTImisation des procédés de mise en FORMe.

Ce chapitre est consacré à la présentation d'un logiciel d'optimisation, appelé **OPTIFORM**, conçu dans le but de fournir à l'utilisateur un moyen simple et efficace lui servant de support pour le processus d'optimisation. **OPTIFORM** permet une meilleure maîtrise de la variation des caractéristiques opératoires des procédés par la présentation des nouvelles méthodes d'optimisation par plans d'expériences numériques. Les plans d'expériences les plus utilisés tels que les plans complets, les plans fractionnaires ou les plans pour surfaces de réponse sont implémentés dans l'application. Ces plans permettent tout d'abord une diminution du nombre des facteurs d'un processus par la technique de criblage (plans complets ou fractionnaires) et par la suite l'optimisation de la fonction objectif proposée par les plans d'expériences pour surfaces de réponse (plans composites centrés ou D-optimal [Mon01]). L'interface graphique réalisée, facilite la communication avec l'utilisateur. Finalement on présente les étapes à suivre pour optimiser un processus avec **OPTIFORM**.



## 4.1 Introduction

Dans la majorité des cas l'expérimentation sur le système réel, n'est pas pratique, voire impossible et les coûts qui en résultent sont très élevés sans pouvoir prévoir le comportement du système pendant ou après l'expérimentation. Dans le processus d'optimisation les expérimentations réelles sont évidemment très longues et très chères comparées aux simulations numériques. Cependant, des modèles numériques remplacent de plus en plus les phénomènes réels et couplés à un algorithme approprié d'optimisation, peuvent être efficacement utilisés pour réduire au minimum les risques provoqués par de différents modes de défaillances (rupture, usure, fatigue) lors de la mise en forme. A part les expérimentations sur le système réel, la simulation numérique est la seule technique disponible pour l'analyse du comportement d'un système quelconque.

Le caractère numérique des expériences justifie la création et la mise au point d'un outil d'optimisation, afin d'automatiser et de faciliter l'application de la **Méthodologie des Plans d'Expériences (MPE)** et celle des stratégies d'optimisation par plans d'expériences à partir de simulations numériques. Il s'agit d'un outil informatique qui permet de déterminer de manière automatique et rapide, l'optimum d'un certain processus, permettant d'obtenir des produits respectant un certain nombre de critères de qualité.

Pour le rendre plus convivial et faciliter l'utilisation de cet outil d'optimisation, nous avons développé une interface graphique. La réalisation de cet outil informatique a nécessité la mise au point de plusieurs aspects tels que :

- Le développement de plusieurs algorithmes pour la génération automatique des plans d'expériences les plus utilisés et adaptés à notre besoin.
- Le développement d'une interface graphique afin de permettre l'utilisation de cet outil de façon conviviale.
- L'utilisation et l'implémentation des différentes bases de données déjà existantes [Ben94b] concernant les différents types de plans d'expériences pour des problèmes particuliers.
- La préparation des modèles types par Éléments Finis implémentés dans le code de calcul ABAQUS [ABA], correspondant à plusieurs procédés de mise en forme : pliage, extrusion, découpage, emboutissage, etc.
- L'intégration dans cet enchaînement des différentes techniques d'optimisation afin de rendre le système fiable et capable de répondre à des conditions d'utilisation de plus en plus sévères.

## 4.2 Principe de fonctionnement d'OPTIFORM

Plus généralement, **OPTIFORM** va être conçu de façon à servir de structure d'accueil aux développements portant sur l'optimisation des procédés industriels de mise en forme.

Le développement de cet outil est nécessaire à l'application de la méthodologie des plans d'expériences et des techniques d'optimisation par plans d'expériences ou par d'autres méthodes parce qu'il facilite la tâche de l'utilisateur et il le rend utilisable même pour des non initiés à la statistique. Notre application possède des fonctionnalités pouvant être regroupées en 3 parties (Figure 4.1).

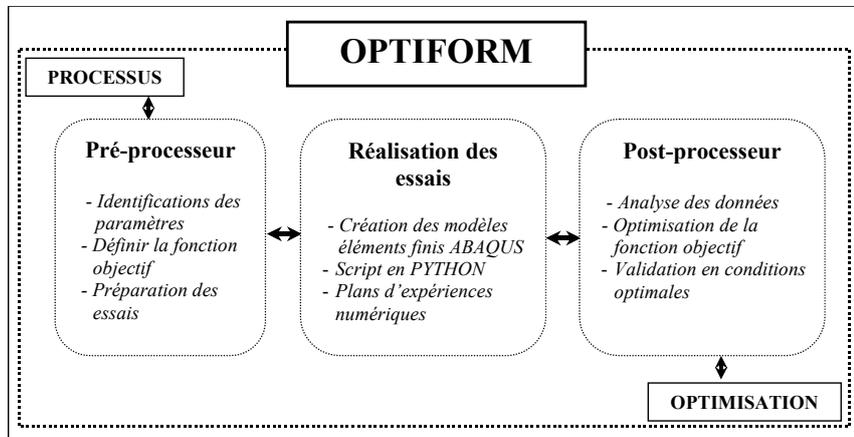


FIG. 4.1 – Les trois fonctions de OPTIFORM

1. Définir et élaborer les plans d'expériences (pré-processeur). Préparer la configuration du fichier qui va générer les  $N$  *essais numériques* donnés par la configuration de chaque plan d'expériences, fonction de l'objectif proposé.
2. Réalisation des calculs (Simulations numériques par **ABAQUS**) [ABA]. Élaborer le modèle éléments finis du processus proposé pour l'optimisation. Chaque configuration du plan d'expériences va être simulée par **ABAQUS** [ABA] de façon automatique.
3. Exploitation des résultats (post-processeur). Une fois les calculs achevés, l'exploitation des résultats peut être menée. On considérera ici :
  - l'analyse des données de simulation (Analyse statistique)
  - la représentation graphique des données de simulation.



facteurs les plus influents d'un certain processus - plans de criblage ou de screening (Figure 4.4).

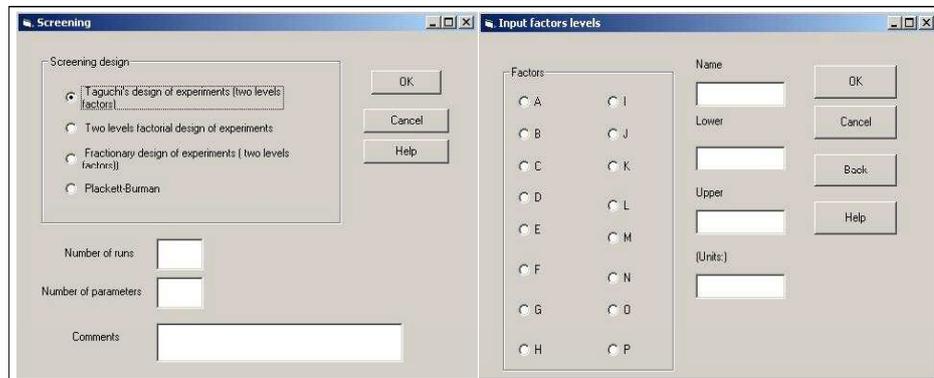


FIG. 4.4 – Boîte de dialogue pour les plans de screening.

Ces plans (Figure 4.5) sont générés automatiquement par des sous-programmes écrits en langage Fortran [Del02, Gou83, Kri75, Pel71, Str86].

-1.000	-1.000
-1.000	1.000
1.000	-1.000
1.000	1.000
-1.414	0.000
1.414	0.000
0.000	-1.414
0.000	1.414
0.000	0.000
0.000	0.000

FIG. 4.5 – Plan composite centré à 2 facteurs- génération automatique.

En fonction du degré de complexité du problème étudié on peut utiliser aussi les différents plans d'expériences - plans multifactoriels [Ben94b], plans proposés par la base de données implémentée dans l'application (Figure 4.6)

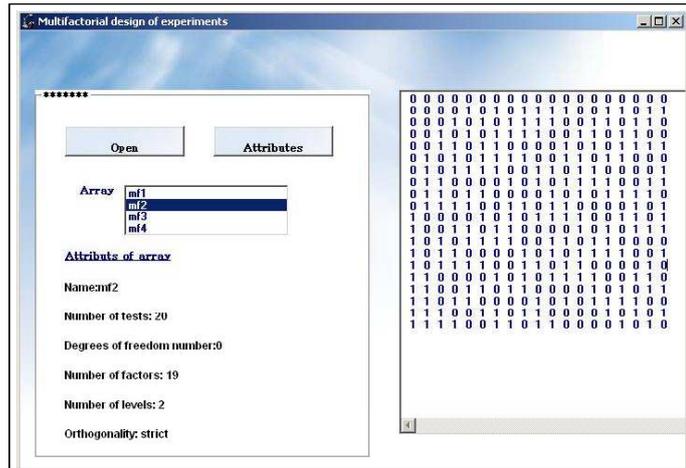


FIG. 4.6 – Base de données - plans d'expériences spéciaux.

Dans le cas où le problème a un caractère fortement non-linéaire on utilise des plans d'expériences pour surfaces de réponse (Figure 4.7) qui sont les mieux adaptés pour résoudre un tel problème.

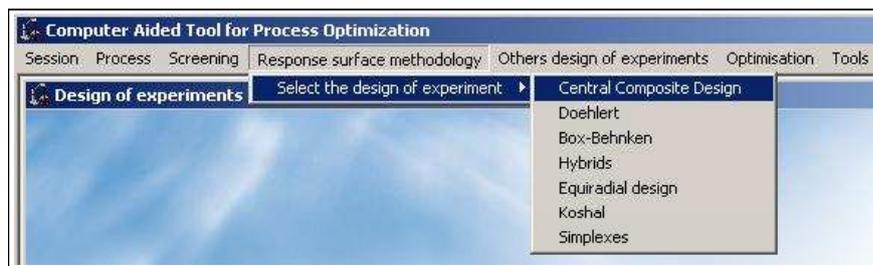


FIG. 4.7 – Boîte de dialogue - plans d'expériences pour surfaces de réponse

Un **SCRIPT** en langage Python permet l'automatisation du calcul numérique. Ainsi pour chaque configuration de la matrice d'expériences, un nouveau *set de valeurs* est transmis automatiquement au **Modèle Eléments Finis (MEF)** établi a priori et qui correspond au processus étudié (Exemple - pliage - Figure 4.8).

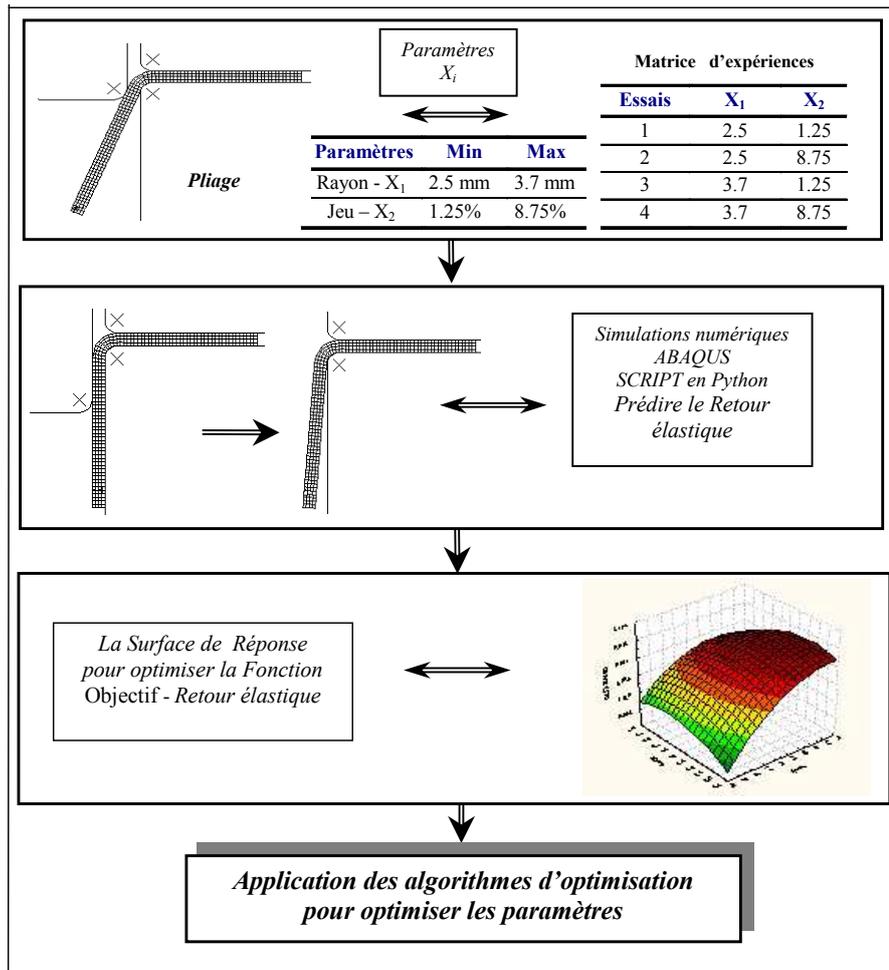


FIG. 4.8 – Le schéma d'optimisation du processus de pliage.

Dans cette approche le temps nécessaire pour changer manuellement tous les paramètres correspondant à une configuration donnée, est d'autant plus grand que le nombre de paramètres est plus important. Un **MEF** a été défini a priori pour chaque procédé qui va être étudié. Notre intérêt dans ce travail a été orienté vers des processus de mise en forme (pliage, extrusion, emboutissage, etc.), mais l'application peut-être utilisée pour optimiser tout processus ou système, à condition de pouvoir lui associer un **MEF**. Le menu procédé (Figure 4.9) a été introduit pour que l'utilisateur trouve facilement des informations sur le procédé à optimiser ainsi que les conditions particulières imposées pour celui-ci.

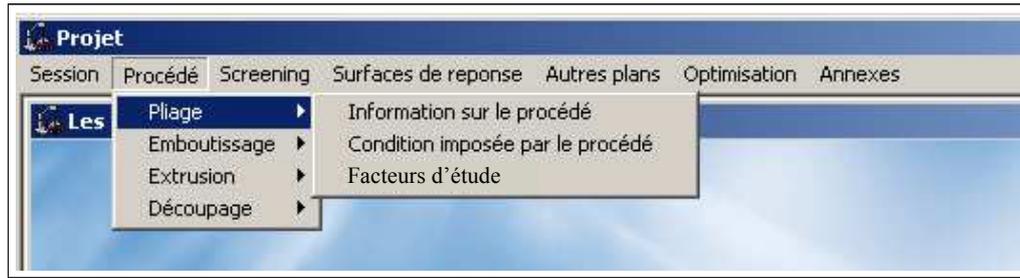


FIG. 4.9 – Menu Procédé.

Dans les sous-menus (Figure 4.10) on peut trouver des informations sur les facteurs supposés être les plus influents, facteurs qui ont été implémentés dans le modèle éléments finis, défini a priori pour chaque procédé.

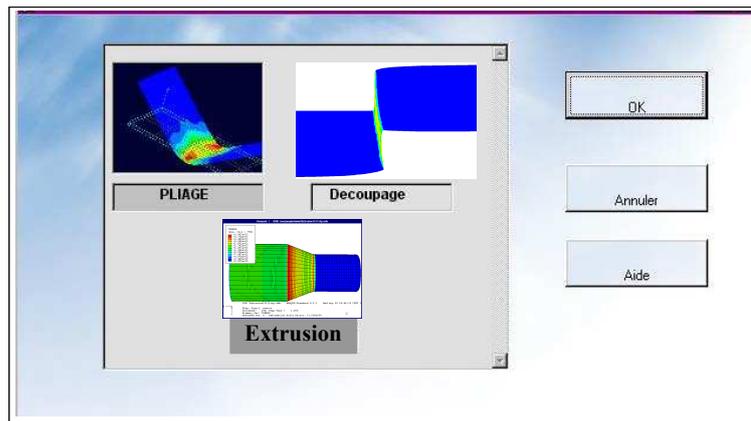


FIG. 4.10 – Informations sur le procédé

L'exploitation des résultats est faite dans l'étape de post-processeur d'abord par une analyse statistique pour identifier les paramètres influents du processus, mais aussi par des représentations graphiques (Surfaces de Réponse). L'utilisation des différents algorithmes d'optimisation (la méthode de régression pas à pas) (Figure 4.11) nous permet l'obtention du meilleur sous modèle qui explique la fonction objectif, ou la minimisation/maximisation (l'algorithme de Newton) de la réponse souhaitée. Ces algorithmes ont été intégrés dans le module d'optimisation. Dans le même but ont été développés des algorithmes d'optimisation multicritères (Technique de Ch'ng) [Lep05d] et aussi l'optimisation à l'aide du calcul par intervalles qui est une nouvelle méthode abordée dans cette thèse [Lep05a].

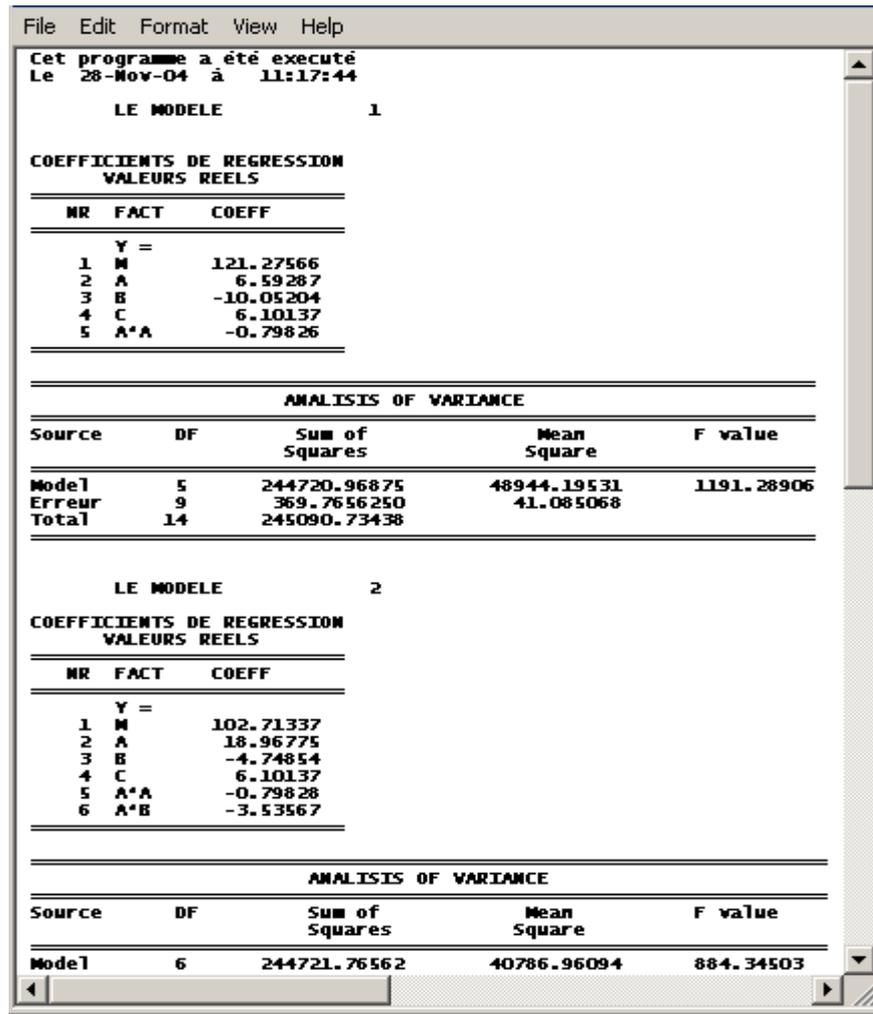


FIG. 4.11 – Régression pas à pas et tableau ANOVA

Dans le menu Annexes on peut trouver différents tableaux pour des matrices d'expériences ainsi que des informations théoriques sur les statistiques de base et sur les différents types d'algorithmes. Ces informations ont pour but de familiariser l'utilisateur avec les fonctions de l'application ainsi que de lui offrir des connaissances minimales sur chaque module.

## 4.4 Processus d'optimisation avec OPTIFORM

Afin de rendre l'outil convivial, **OPTIFORM** propose une optimisation simple, par plans d'expériences à partir des simulations numériques. En effet son fonctionnement est de type séquentiel, il sera présenté en détail par la suite.

La figure 4.12 présente les 5 étapes à suivre pour optimiser un procédé avec **OPTIFORM**.

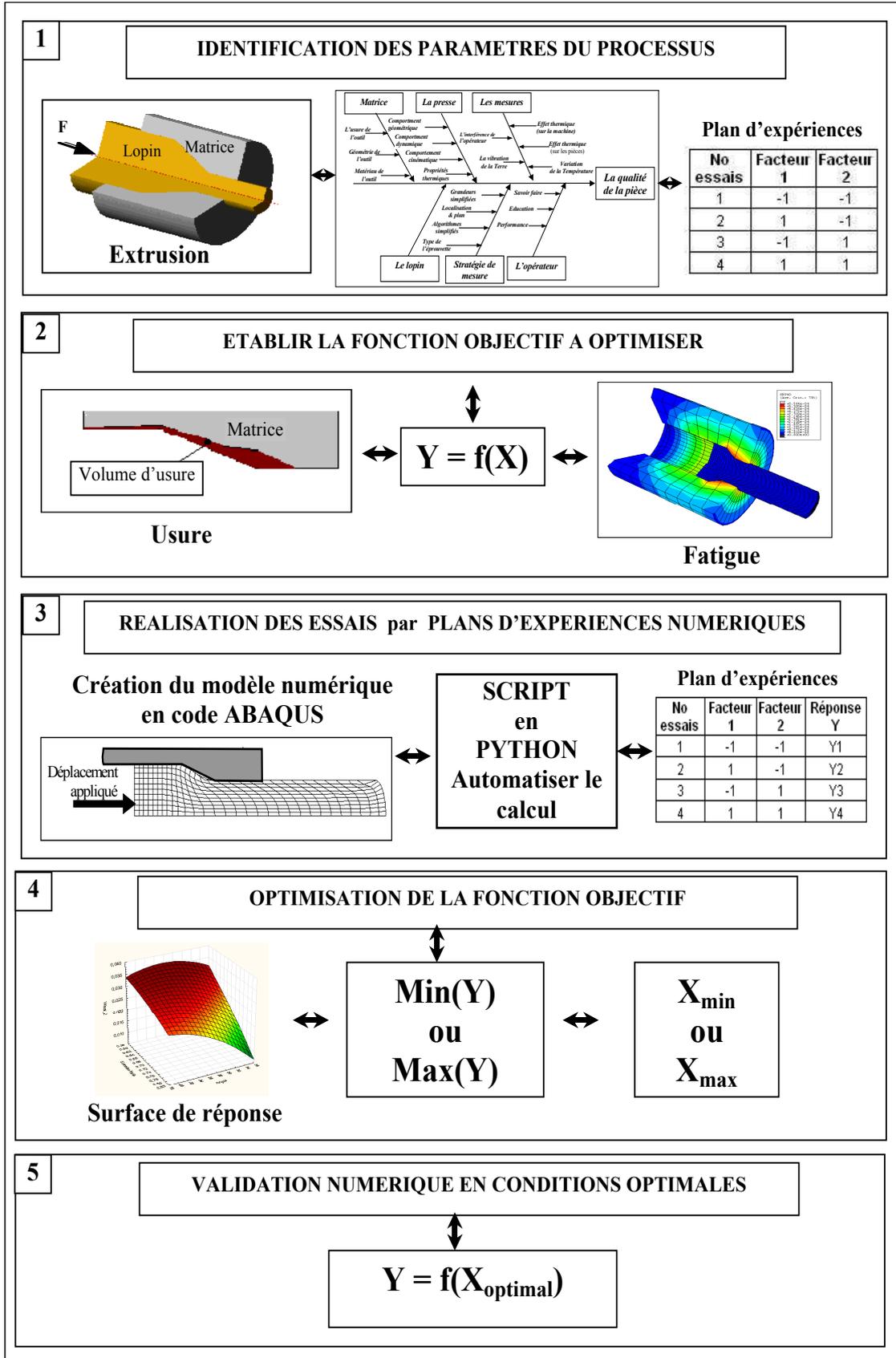


FIG. 4.12 – Organigramme du processus d'optimisation avec OPTIFORM

### 4.4.1 Identification des paramètres du processus

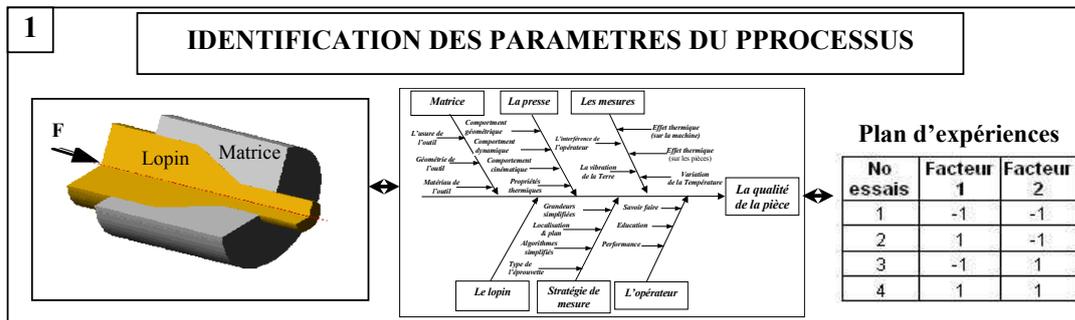


FIG. 4.13 – Identification des paramètres du processus

Pour un processus de fabrication il existe de nombreuses sources de variations et les ingénieurs ont la difficile tâche de les identifier. Les paramètres du processus susceptibles d'influencer de manière significative le bon déroulement de celui-ci sont des variables parfois peu connues comme celle de l'environnement qui est très difficile à maîtriser. Mais, même si on connaît toutes les variables du processus, il existe des interactions entre celles ci qui peuvent expliquer les variations des caractéristiques de fabrication des pièces mécaniques comme il est montré dans le diagramme d'Ishikawa (Figure 4.14). A l'aide de ce diagramme, on peut identifier d'une façon précise les causes des défaillances du processus à optimiser qui ont comme conséquence directe la réduction de la **QUALITE**.

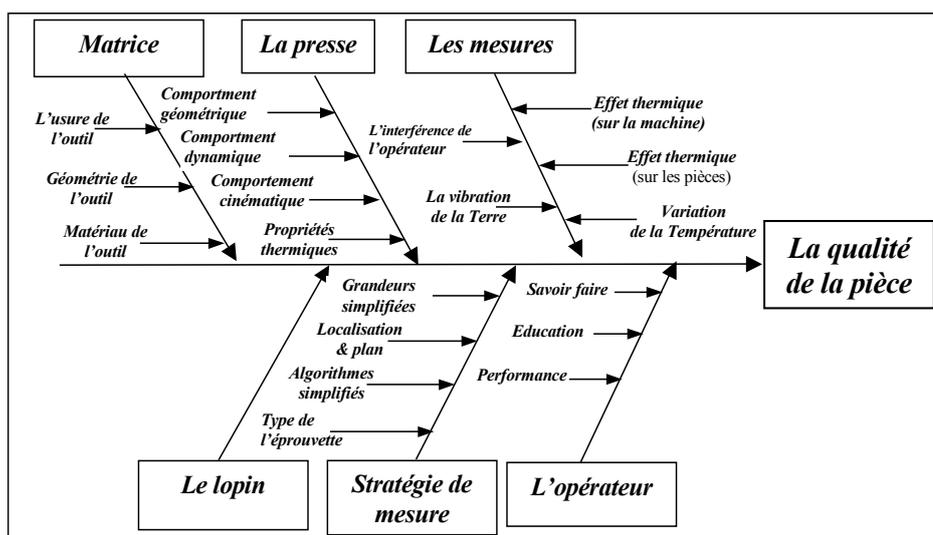


FIG. 4.14 – Diagramme d'Ishikawa

L'identification des paramètres d'un processus (Figure 4.14) peut-être faite :

- par expérience (retour d'expériences, connaissances a priori ou l'avis d'experts)
- en consultant la littérature spécialisée dans le domaine (revues, articles, etc.)
- par déduction (nécessite une grande expérience).

Après avoir identifié tous les facteurs susceptibles d'influencer le processus il faut chercher à diminuer leur nombre, faute de quoi, il y aura un grand nombre d'essais à faire afin de réduire la variabilité, et par conséquent une augmentation du coût du processus d'optimisation. Afin de réduire le nombre des facteurs influençant le processus nous avons utilisé la technique de screening ou la technique de criblage. Par cette technique issue de la méthodologie des plans d'expériences nous avons réussi à éliminer tous les facteurs ayant peu ou pas d'influence sur le processus.

Les plans d'expériences utilisés le plus souvent pour atteindre cet objectif (réduire le nombre des facteurs) sont des plans factoriels complets à deux niveaux.

L'identification des paramètres ayant une influence significative sur le processus à optimiser détermine une meilleure maîtrise de celui-ci, qui va se traduire essentiellement par une réduction du taux de rebut et un resserrement de la dispersion des caractéristiques des produits.

#### 4.4.2 Établissement de la fonction objectif à optimiser

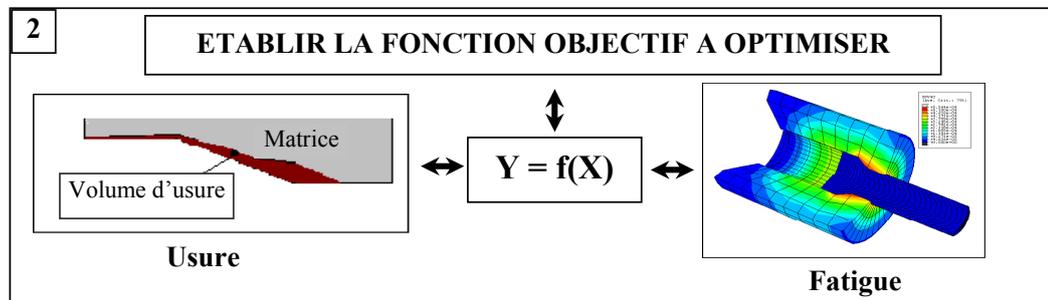


FIG. 4.15 – Établissement de la fonction objectif à optimiser

Dans le processus d'optimisation, le choix de la fonction objectif (Figure 4.15) ou réponse du système à optimiser, est une tâche lourde pour les ingénieurs. Tout d'abord parce que les défaillances d'un processus sont difficilement maîtrisables par une fonction objectif contenant une seule réponse à optimiser. Si on prend par exemple le processus d'extrusion on ne sait pas laquelle des deux réponses (l'usure ou l'apparition des fissures dans le lopin) il faut privilégier. L'idéal serait de prendre une fonction multiobjectifs, mais cela demande plusieurs paramètres à régler et l'optimisation sera difficile à réaliser. L'optimisation globale d'un processus industriel est une démarche de plus en plus utilisée car elle a une incidence économique forte.

Le choix de la fonction objectif est en effet lié aux intérêts économiques de l'entreprise et bien entendu fonction des défaillances apparues dans le procédé de fabrication. Ces défaillances représentent en effet le coût de la *non-qualité* payé par l'entreprise qui risque de devenir un facteur majeur pour les politiques économiques des entreprises. A titre d'exemple, on peut présenter les défaillances pour les procédés de pliage, d'emboutissage ou d'extrusion qui pourront être choisies comme fonctions objectifs afin d'optimiser le processus concerné. Comme nous l'avons dit auparavant une défaillance majeure pour les procédés de pliage et d'emboutissage est le retour élastique qui peut entraîner des variations dimensionnelles de la géométrie finale des pièces. Ces variations pourront conduire à un taux de rebut important et par conséquent il faut réduire voir éliminer la cause - le retour élastique.

En ce qui concerne le processus d'extrusion il existe de nombreuses sources de défaillances mais nous avons orienté notre étude sur le phénomène d'usure de la matrice qui est un phénomène très complexe qui peut engendrer des variations dimensionnelles et de rugosité importantes. Toujours sur l'extrusion nous avons étendu notre recherche par une nouvelle modélisation par éléments finis, afin de pouvoir prendre en compte la fatigue influencée très fortement par la température.

#### 4.4.3 Réalisation des essais par plans d'expériences numériques

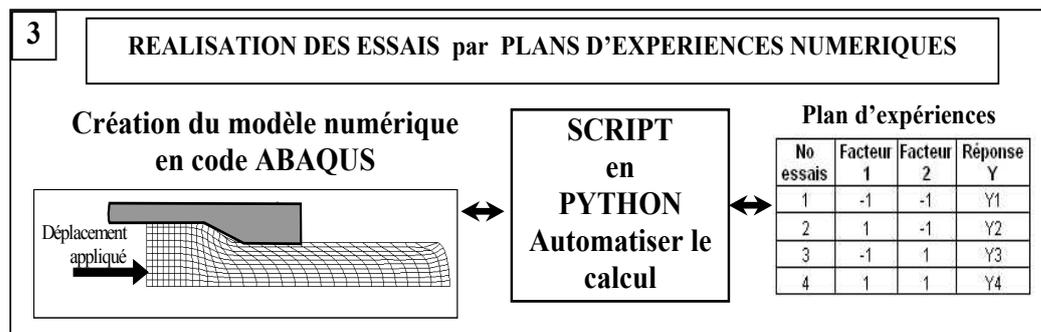


FIG. 4.16 – Réalisation des essais par plans d'expériences numériques

Le développement des méthodes de calcul (éléments finis, techniques de résolution et de discrétisation) associé à l'efficacité croissante des moyens informatiques permettent à l'aide d'investissements relativement modestes de simuler le comportement de procédés industriels dans des conditions générales de plus en plus adaptées à un marché concurrentiel. De plus, ces outils constituent maintenant un moyen efficace de conception en s'appuyant sur des procédures d'optimisation, des tech-

niques d'approximation et de plans d'expériences numériques évitent la réalisation de maquettes intermédiaires toujours très coûteuses. L'optimisation d'un processus de fabrication a par exemple pour cadre soit l'amélioration de l'existant par modification des paramètres vis à vis de nouveaux objectifs ou limitations, soit l'émergence de nouvelles conceptions par l'optimisation de la variabilité sous tous ses aspects.

La réalisation des essais numériques (Figure 4.16) est faite à partir des modèles éléments finis pour chaque procédé. Ces modèles doivent répondre à un certain nombre d'exigences de façon à reproduire le plus fidèlement possible le phénomène réel proposé par cette modélisation. C'est à cette étape qu'il faut être très vigilant car les résultats des simulations dépendent beaucoup de cette modélisation et l'objectivité des conclusions est par conséquent liée à celle-ci. Des modèles éléments finis de différents procédés comme le pliage, l'extrusion ou l'emboutissage ont été utilisés dans ce rapport afin de proposer des solutions pour diminuer la variation de leurs paramètres opératoires.

En fonction du nombre des paramètres pris en considération pour le processus d'optimisation il est très probable que le nombre des essais à réaliser soit très grand et que le temps nécessaire pour les changements demandés à chaque configuration du plan d'expériences soit lui aussi en même temps très grand. Afin de pallier à cet inconvénient nous avons développé un SCRIPT en langage Python qui permet le changement automatique des paramètres pour toutes les configurations proposées par le plan d'expériences utilisé.

#### 4.4.4 Optimisation de la fonction objectif

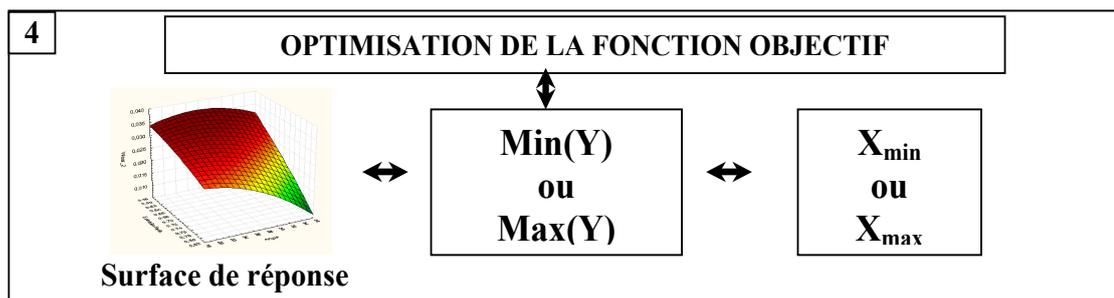


FIG. 4.17 – Optimisation de la fonction objectif

L'élaboration d'un produit, passe toujours par une phase d'optimisation destinée à minimiser les coûts ou/et maximiser ces performances. De façon schématique un problème d'optimisation consiste à maximiser ou à minimiser une fonction appelée fonction objectif ou réponse sous un certain nombre de conditions appelées

contraintes. Le but d'une telle démarche est de minimiser le volume de calculs nécessaires à la réalisation des produits afin de réduire au minimum le temps de conception, facteur clef de la réussite d'une entreprise. Mais il ne faut pas oublier que le processus de fabrication dans sa complexité est soumis à un très grand nombre de contraintes telles que :

- Contraintes techniques,
- Contraintes du marché dont les besoins évoluent sans cesse (attentes des clients, nouveaux produits concurrents...),
- Contraintes économiques.

La méthodologie des plans d'expériences nous a permis de définir une surface de réponse pour chaque fonction objectif à optimiser (Figure 4.17). L'équation de la surface de réponse établie par cette voie permet de déterminer les conditions optimales du processus en utilisant soit l'analyse canonique [Mon01] qui est une analyse spécifique à la méthodologie de la surface de réponse, soit d'autres algorithmes d'optimisation (algorithme de Newton, calcul par intervalle ou d'autres algorithmes) développés avec des routines en langage fortran ou  $C^{++}$ .

#### 4.4.5 Validation numérique en conditions optimales

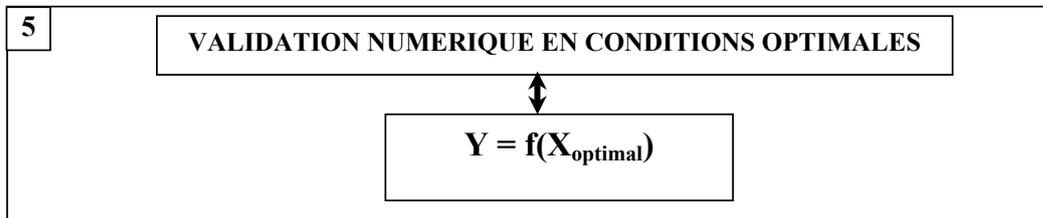


FIG. 4.18 – Validation numérique en conditions optimales

L'expérimentateur devra vérifier que la prédiction donnée par le modèle théorique ne s'éloigne pas trop de la réalité. En effet, on vérifiera que le modèle théorique donne une bonne image du système au voisinage de la configuration optimale. Il faut vérifier cette hypothèse avant d'adopter définitivement les conclusions du plan d'expériences utilisé. L'idéal est de réaliser une validation en conditions optimales par des essais réels si on dispose des moyens financiers pour les réaliser.

Si la validation en conditions optimales (Figure 4.18) ne donne pas les résultats attendues on devra mener les actions suivantes :

- réalisation d'autres simulations numériques
- remise en question du modèle obtenu par la surface de réponse

- changement du modèle éléments finis pour obtenir une meilleure correspondance entre la modélisation numérique et la réalité.

## 4.5 Conclusions

Dans ce chapitre, nous avons présenté la discipline (**Informatique** rappelée au début de ce rapport). En effet, il a été dédié à la présentation de l'outil d'optimisation (**OPTIFORM**) conçu pour venir en aide à l'utilisateur qui ne sera pas forcément un spécialiste des méthodes statistiques. Cet outil sert aussi de structure d'accueil pour les méthodes d'optimisation implémentées ayant comme principale fonction d'automatiser le calcul et de rendre ces méthodes plus conviviales et plus simples à l'utilisation. Il peut être adapté à tout processus qui supporte une modélisation par la méthode des éléments finis, ainsi que, pour des processus qui seront étudiés par des essais réels.



# Chapitre 5

## Applications

Dans les précédents chapitres nous avons présenté des méthodes d'optimisation ainsi que de nouveaux modèles éléments finis, capables de prendre en compte des phénomènes complexes à caractère fortement non-linéaire comme ceux rencontrés lors de la fabrication des pièces mécaniques.

L'objectif de ce chapitre est de valider les méthodes d'optimisation proposées par des applications aux procédés de mise en forme tels que le pliage, l'extrusion ou l'emboutissage. Dans ce contexte le retour élastique pour le processus de pliage est diminué grâce à l'utilisation de la **nouvelle approche par plans d'expériences numériques**. L'optimisation du procédé d'extrusion est faite par des modèles numériques qui nous ont servi à la réduction de l'usure en utilisant la **loi d'Archard**. La **méthode de Ch'ng** a été utilisée ici pour une optimisation simultanée de plusieurs réponses dont la durée de vie de la matrice est parmi la plus importante. Parce que la fatigue est une défaillance qui peut intervenir à tout moment, nous avons proposé une nouvelle modélisation par éléments finis pour le procédé d'extrusion, afin de pouvoir prendre en compte l'influence de la température. La **méthode hybride** développée dans ce rapport a été utilisée afin de réduire le retour élastique après l'emboutissage. L'application de ces méthodes dans le processus d'optimisation permet à la fois la validation de celles ci ainsi que de rendre les procédés de fabrication de plus en plus robustes à toute sorte de variation. Pour faciliter la mise en oeuvre de ces applications nous avons utilisé **OPTIFORM** qui a été conçu dans ce but.



## 5.1 Optimisation du procédé de pliage

### 5.1.1 Introduction

Dans ce paragraphe, on présente la validation de la nouvelle méthodologie d'optimisation par plans d'expériences numériques présentée au premier chapitre. A l'aide de cette technique on propose l'optimisation des paramètres opératoires du procédé de pliage, procédé présenté au même chapitre. L'approche s'appuie en effet sur un manque dans l'étude des systèmes ou des processus par simulations numériques. Elle concerne la méthodologie des plans d'expériences et par cette méthode on peut étudier des processus avec un caractère fortement non linéaire. Pour connaître le caractère d'un processus qui est représenté par un modèle polynomial il faut d'abord pouvoir réaliser une variabilité au centre du domaine d'étude. Pour les essais obtenus par simulations numériques il n'existe pas de variabilité car les conditions pour chaque simulation resteront toujours les mêmes. Cette méthode nous apporte la solution en proposant des points **peu décalés** autour du centre du domaine d'étude.

### 5.1.2 Le choix des variables du processus

Le Diagramme d'ISHIKAWA (cause/effet), ou diagramme en arête de poisson (Figure 5.1) est un excellent outil, simple et rapide permettant d'identifier les causes possibles qui affectent la qualité du procédé de pliage. Parmi ces causes on peut citer : les outils (poinçon et matrice), le matériau, l'environnement, l'opérateur, le produit, etc.

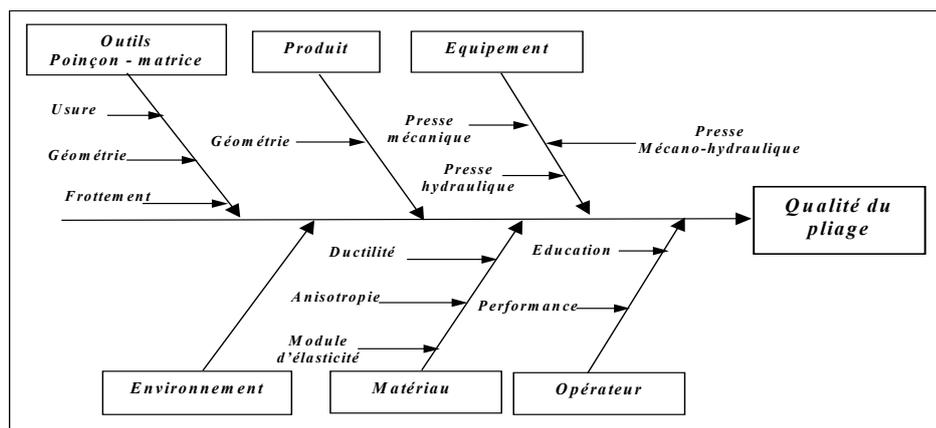


FIG. 5.1 – Diagramme d'ISHIKAWA pour le pliage.

#### Facteurs :

Pour un matériau donné il existe de nombreuses causes qui peuvent influencer son

comportement pendant le formage. Pour cette analyse nous avons considéré qu'il était nécessaire de contrôler les facteurs, qui sont donnés dans le tableau 5.1.

Réponse	Type	Unité	Limite inf	Limite sup	Description
<b>A</b>	continu	mm	4	6	Rayon de pliage
<b>B</b>	continu	mm	3	4	Épaisseur de la tôle pliée
<b>C</b>	continu	mm	1	3	Jeu
<b>D</b>	continu	mm	50	70	Longueur du pli
<b>E</b>	qualitatif		Acier 1 - Acier 2		Type de matériau des tôles pliées

TAB. 5.1 – Caractéristiques des facteurs

### Réponse :

Le retour élastique (Table 5.2) a été choisi comme fonction objectif. Il est considéré parmi les causes principales qui peuvent entraîner des défauts après le procédé de pliage (Voir chapitre 1).

Réponse	Unité de mesure	Description
Y	0	Retour élastique

TAB. 5.2 – Caractéristiques de la réponse du problème

### Problème d'optimisation.

Les objectifs de cette étude sont :

- hiérarchiser les facteurs - étude de screening.
- valider la nouvelle technique qui vérifie l'effet quadratique d'un modèle pour des plans d'expériences numériques.
- optimiser (minimiser) la réponse **Y - Le retour élastique**.

### 5.1.3 Modélisation par éléments finis du procédé de pliage

Dans ce qui suit, le procédé sera simulé à l'aide d'OPTIFORM afin de mieux comprendre le comportement des pièces après pliage (le retour élastique) et de déceler les paramètres importants de cette opération. Les caractéristiques des matériaux ( $E$  - le module d'élasticité,  $\nu$  - le coefficient de Poisson,  $\sigma_y$  - la limite élastique,  $K$  - le module de déformation ou de compressibilité,  $n$  - coefficient d'érouissage) prises en considération durant les simulations numériques, peuvent être retrouvées dans le tableau 5.3

Materiu	$E(MPa)$	$\nu$	$\sigma_y(MPa)$	$K(MPa)$	$n$
Acier 1	210000	0.3	250	1045	0.2
Acier 2	200000	0.3	560	800	0.7

TAB. 5.3 – Caractéristiques des matériaux.

Le contact à l'interface entre la tôle et l'outil est modélisé en adoptant une hypothèse de corps rigide utilisant des lois de surfaces de contact définies par un modèle de frottement de type Coulomb. Des valeurs typiques du coefficient de frottement sont indiquées par [Kal91, Kur85] pour différentes combinaisons des contacts entre matériaux. Pour le contact acier/acier, la valeur typique du coefficient de frottement est égale à 0.1. La figure 5.2 présente les différentes étapes de la simulation numérique du processus de pliage [Lep05b] et la figure 5.3 les paramètres opératoires du même processus.

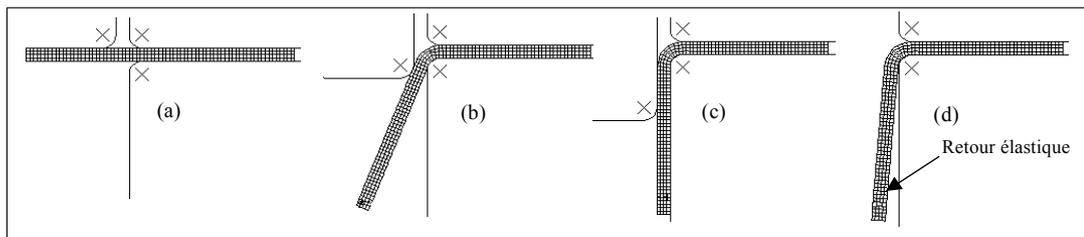


FIG. 5.2 – Les étapes de la simulations numérique du pliage.

Le maillage de la tôle comprend des éléments en déformation plane bilinéaire à trois et à quatre noeuds de type CPE3 respectivement CPE4 pour le code Abaqus. Dans cette application, les outils ont été modélisés par des corps rigides. La géométrie et la position initiale des outils sont reportées sur la figure 5.3.

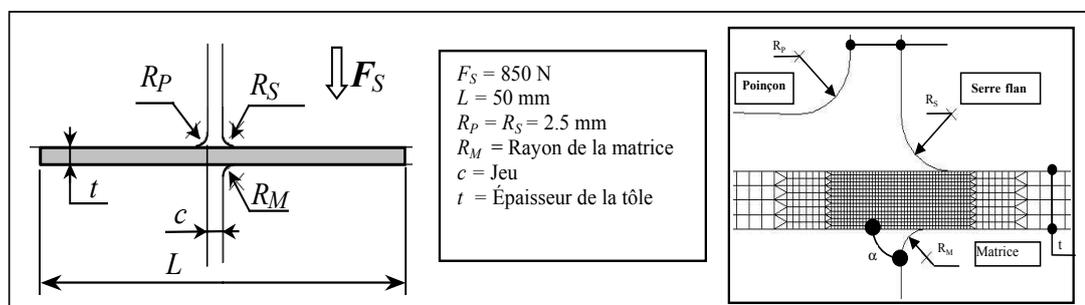


FIG. 5.3 – Les paramètres et la géométrie du modèle de la simulation numérique du pliage.

### 5.1.4 Analyse de screening

On recherche dans un premier temps les influences réelles des 5 facteurs vis-à-vis des variations de la réponse. On réalise pour cela une analyse de screening.

#### Plan complet

L'étude d'un plan complet consiste à étudier toutes les combinaisons possibles des facteurs pris en considération dans l'analyse. Tous les facteurs comportent 2 niveaux chacun. Le nombre des expériences ( $N$ ) ou **simulations**, nécessaire, pour l'ensemble des combinaisons peut être calculé facilement par l'expression.

$$N = 2^k \quad (5.1)$$

où :  $k$  est le nombre de facteurs.

No ess	A	B	C	D	E	A	B	C	D	E	Y
	Niveaux codés					Niveaux réels					
1	-1	-1	-1	-1	-1	4	3	1	50	1	2.7433
2	1	-1	-1	-1	-1	6	3	1	50	1	3.1858
3	-1	1	-1	-1	-1	4	4	1	50	1	2.5727
4	1	1	-1	-1	-1	6	4	1	50	1	2.8683
5	-1	-1	1	-1	-1	4	3	3	50	1	3.0503
6	1	-1	1	-1	-1	6	3	3	50	1	3.4928
7	-1	1	1	-1	-1	4	4	3	50	1	2.8797
8	1	1	1	-1	-1	6	4	3	50	1	3.1753
9	-1	-1	-1	1	-1	4	3	1	70	1	2.7433
10	1	-1	-1	1	-1	6	3	1	70	1	3.1858
11	-1	1	-1	1	-1	4	4	1	70	1	2.5727
12	1	1	-1	1	-1	6	4	1	70	1	2.8683
13	-1	-1	1	1	-1	4	3	3	70	1	3.0503
14	1	-1	1	1	-1	6	3	3	70	1	3.4928
15	-1	1	1	1	-1	4	4	3	70	1	2.8797
16	1	1	1	1	-1	6	4	3	70	1	3.1753
17	-1	-1	-1	-1	1	4	3	1	50	2	2.6852
18	1	-1	-1	-1	1	6	3	1	50	2	2.9977
19	-1	1	-1	-1	1	4	4	1	50	2	2.5878
20	1	1	-1	-1	1	6	4	1	50	2	2.7433
21	-1	-1	1	-1	1	4	3	3	50	2	3.156
22	1	-1	1	-1	1	6	3	3	50	2	3.4685
23	-1	1	1	-1	1	4	4	3	50	2	3.0586
24	1	1	1	-1	1	6	4	3	50	2	3.2141
25	-1	-1	-1	1	1	4	3	1	70	2	2.6852
26	1	-1	-1	1	1	6	3	1	70	2	2.9977
27	-1	1	-1	1	1	4	4	1	70	2	2.5878
28	1	1	-1	1	1	6	4	1	70	2	2.7433
29	-1	-1	1	1	1	4	3	3	70	2	3.156
30	1	-1	1	1	1	6	3	3	70	2	3.4685
31	-1	1	1	1	1	4	4	3	70	2	3.0586
32	1	1	1	1	1	6	4	3	70	2	3.2141

TAB. 5.4 – La matrice d'expériences et les résultats.

Les plans d'expériences factoriels complets sont théoriquement parfaits pour une étude de screening, mais les délais et les coûts d'expérimentation deviennent impor-

tants dès que l'on dépasse 4 facteurs [Ale95]. Dans notre cas les expérimentations sont des simulations numériques, donc cet inconvénient n'a pas lieu d'être.

Après avoir effectué *les expérimentations*, nous avons trouvé que parmi les 5 facteurs étudiés le facteur  $D$  (la longueur du pli) n'a aucune influence sur la réponse. Donc l'analyse continue sans tenir compte de ce facteur.

Le diagramme du Pareto (Figure 5.4) nous montre l'influence de chacun des 4 facteurs analysés. Le plus influent est le facteur  $C$  (le jeu) suivi par  $A$  (le rayon),  $B$  (l'épaisseur) et  $E$  (matériau). Le tableau 5.5 résume cette analyse :

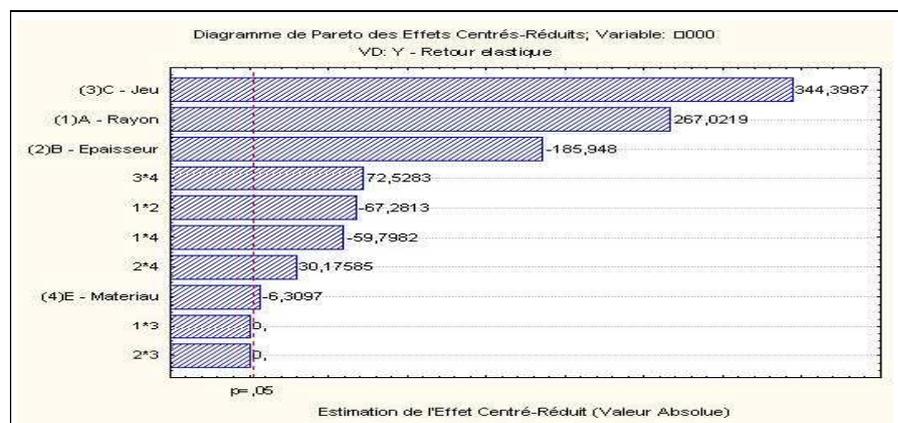


FIG. 5.4 – Diagramme de Pareto

Facteurs	A	B	C	E
Ordre d'importance	2	3	1	4

TAB. 5.5 – L'importance des facteurs

Parmi les 4 facteurs analysés nous avons montré dans le tableau 5.1 que le facteur  $E$  (matériau) est un facteur qualitatif. Notre analyse (analyse par surface de réponse) ne peut pas prendre en considération par la suite un tel facteur [Pil97].

Parce que le nombre des facteurs est maintenant de 3 il faut refaire l'étude de screening pour vérifier si l'influence de chacun de ces facteurs sur la réponse reste la même.

No ess.	A	B	C	Y
1	-1	-1	-1	2,7433
2	1	-1	-1	3,1858
3	-1	1	-1	2,5727
4	1	1	-1	2,8683
5	-1	-1	1	3,0503
6	1	-1	1	3,4928
7	-1	1	1	2,8797
8	1	1	1	3,1753

TAB. 5.6 – Analyse de screening

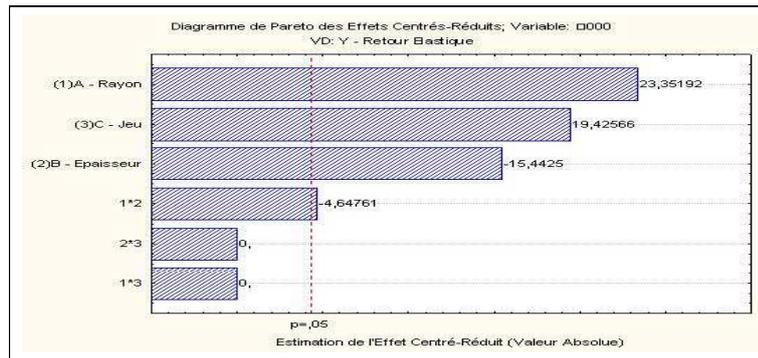


FIG. 5.5 – Diagramme de Pareto pour le retour élastique

Le diagramme de Pareto (Figure 5.5) nous montre que les trois facteurs restent influents pour l'étude, mais l'ordre d'importance entre les facteurs  $A$  et  $C$  a changé. L'explication réside dans le fait que le facteur  $E$  (matériau) a une influence plus grande pour le facteur  $C$  par rapport au facteur  $A$ . La tendance s'est inversée une fois que le facteur  $E$  a été retiré de l'étude.

Donc on voit bien que les deux facteurs les plus influents pour l'étude du retour élastique sont le rayon de la matrice et le jeu entre le poinçon et la tôle, conclusion confirmée par [Mka03] et vérifiée expérimentalement dans ses travaux.

## 5.1.5 Analyse par Surface de Réponse

### 5.1.5.1 Vérification de l'effet quadratique du modèle proposé

Comme nous l'avons rappelé au deuxième chapitre cette application est utilisée pour valider la méthode que nous avons proposée (Paragraphe 2.2). Cette nouvelle approche nous permettra de connaître si la modélisation proposée pour un processus est bien adaptée au phénomène étudié. En utilisant les relations (2.24, 2.25, 2.26 - Chapitre 2) on obtient :

$$SS_{pure-quadratique} = \frac{8 \cdot 7(2.996 - 2.971)^2}{8 + 7} = 2.322 \cdot 10^{-3} \quad (5.2)$$

$$CME = \frac{8.068 \cdot 10^{-4}}{6} = 1.3446 \cdot 10^{-4} \quad (5.3)$$

Si  $F_{ratio} \geq F_{test} \Rightarrow$  l'hypothèse  $H_1$  est acceptée

$$F_{ratio} = 17.268 \geq F_{(0.05,1,6)} = 5.99 \quad (5.4)$$

La statistique  $F$  nous confirme l'existence de l'effet quadratique. Donc l'hypothèse non nulle  $H_1 : b_{11} + b_{22} + b_{33} \neq 0$  est acceptée. On va vérifier cette hypothèse par un plan composite centré, en deux variantes afin de mettre en évidence l'apport de la nouvelle méthode.

### 5.1.5.2 Modèle quadratique avec un seul point au centre.

Le premier cas, cas I, consiste à étudier le plan composite centré avec un seul point au centre (Tableau 5.7) afin de le comparer avec celui pour lequel on ajoute des points peu décalés au centre du domaine d'étude (Figure 2.5).

	A	B	C	Y
1	-1	-1	-1	2,7433
2	1	-1	-1	3,1858
3	-1	1	-1	2,5727
4	1	1	-1	2,8683
5	-1	-1	1	3,0503
6	1	-1	1	3,4928
7	-1	1	1	2,8797
8	1	1	1	3,1753
9	-1,682	0	0	2,682
10	1,682	0	0	3,3064
11	0	-1,682	0	3,2629
12	0	1,682	0	2,8272
13	0	0	-1,682	2,6059
14	0	0	1,682	3,1741
15	0	0	0	2,9625

TAB. 5.7 – Plan Composite Centré - 1 point au centre.

Le diagramme de Pareto (Figure 5.6) nous montre l'existence de l'effet quadratique pour la variable B, observation confirmée aussi par l'analyse de la variance (Tableau 5.8).

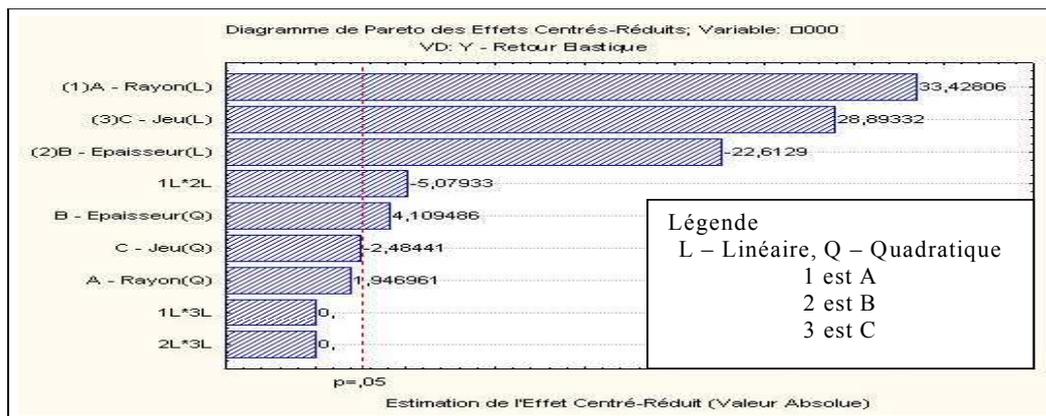


FIG. 5.6 – Diagramme de Pareto - cas I

ANOVA - Variable Y					
$R^2 = 0,99804$ ; $R^2_A = 0,99452$					
	SC	dl	MC	F	p
A (Linéaire)	0,46733	1	0,46733	1117,435	<b>0</b>
A (Quadratique)	0,001585	1	0,001585	3,791	0,109094
B (Linéaire)	0,213852	1	0,213852	511,343	<b>0,000003</b>
B (Quadratique)	0,007063	1	0,007063	16,888	<b>0,009269</b>
C (Linéaire)	0,349137	1	0,349137	834,824	<b>0,000001</b>
C (Quadratique)	0,002581	1	0,002581	6,172	0,05554
A(L) * B(L)	0,01079	1	0,01079	25,8	<b>0,003837</b>
A(L) * C(L)	0	1	0	0	1
B(L) * C(L)	0	1	0	0	1
Erreur	0,002091	5	0,000418		
Total SC	1,068981	14			

TAB. 5.8 – Analyse de la variance.

L'analyse de la variance (Tableau 5.8) nous montre que le seul effet quadratique est celui de la variable B.

La figure 5.7 représente la surface de réponse pour l'interaction entre les variables A et B.

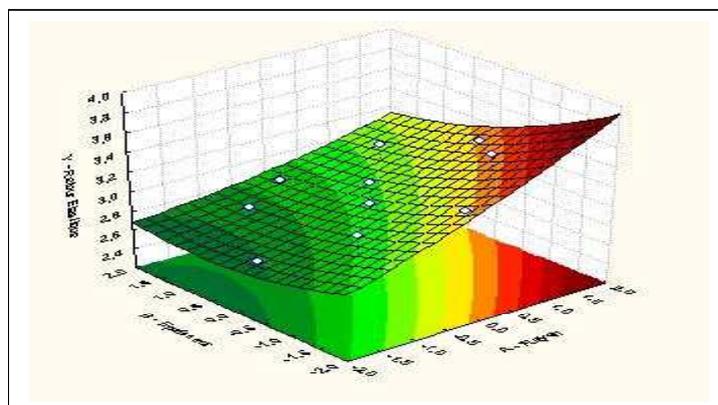


FIG. 5.7 – Surface de réponse interaction AB.

### 5.1.5.3 Modèle quadratique avec plusieurs points centraux.

Pour le deuxième cas, cas II, on va étudier l'effet d'avoir ajouté des points **peu décalés** (Figure 2.5), ou des répétitions au centre du domaine d'étude. La distance maximale ( $d_1 = 0.046 \cdot d$  - Figure 2.5) d'emplacement des points autour du centre du domaine d'étude, a été déterminée avec exactitude après avoir effectué plusieurs simulations numériques.

	A	B	C	Y
<b>1</b>	-1	-1	-1	2,7433
<b>2</b>	1	-1	-1	3,1858
<b>3</b>	-1	1	-1	2,5727
<b>4</b>	1	1	-1	2,8683
<b>5</b>	-1	-1	1	3,0503
<b>6</b>	1	-1	1	3,4928
<b>7</b>	-1	1	1	2,8797
<b>8</b>	1	1	1	3,1753
<b>9</b>	-1,682	0	0	2,682
<b>10</b>	1,682	0	0	3,3064
<b>11</b>	0	-1,682	0	3,2629
<b>12</b>	0	1,682	0	2,8272
<b>13</b>	0	0	-1,682	2,6059
<b>14</b>	0	0	1,682	3,1741
<b>15</b>	0	0	0	2,9625
<b>16</b>	0	0	0	2,9676
<b>17</b>	0	0	0	2,9712
<b>18</b>	0	0	0	2,9835
<b>19</b>	0	0	0	2,9878
<b>20</b>	0	0	0	2,9551
<b>21</b>	0	0	0	2,9699

TAB. 5.9 – Plan Composite Centré plusieurs points au centre.

Le diagramme de Pareto (Figure 5.8) nous signale déjà l'apparition des effets quadratiques aussi pour les deux autres variables  $C$  et  $A$ , observation confirmée par l'analyse de la variance (Tableau 5.10).

ANOVA - Variable Y					
$R^2 = 0,9986$ ; $R_A^2 = 0,995$					
	SC	dl	MC	F	p
A (Linéaire)	0,46733	1	0,46733	1747,569	<b>0</b>
A (Quadratique)	0,002238	1	0,002238	8,368	<b>0,014632</b>
B (Linéaire)	0,213852	1	0,213852	799,695	<b>0</b>
B (Quadratique)	0,013678	1	0,013678	51,149	<b>0,000019</b>
C (Linéaire)	0,349137	1	0,349137	1305,59	<b>0</b>
C (Quadratique)	0,009104	1	0,009104	34,043	<b>0,000113</b>
A(L) * B(L)	0,01079	1	0,01079	40,348	<b>0,000054</b>
A(L) * C(L)	0	1	0	0	1
B(L) * C(L)	0	1	0	0	1
Erreur	0,002942	11	0,000267		
Total SC	1,070445	20			

TAB. 5.10 – Analyse de la variance.

L'analyse de la variance (Tableau 5.10) nous confirme l'hypothèse faite au départ qui consiste à vérifier l'effet quadratique pour un modèle obtenu par un plan d'expé-

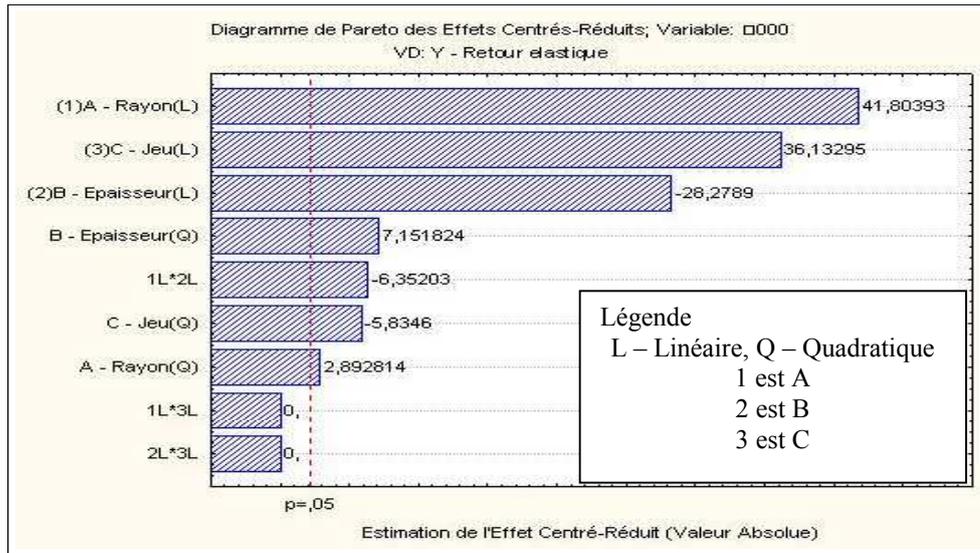


FIG. 5.8 – Diagramme de Pareto - cas II

riences, suite à l'addition des points au centre du domaine d'étude. On voit bien ici que l'addition des points **peu décalés** au centre du domaine d'étude apporte plus d'informations pour les variables d'études.

On peut ajouter aussi que, l'addition de points **peu décalés** centraux pour les plans d'expériences numériques, a une influence significative sur les propriétés de la matrice d'expériences (précision uniforme) et nous apporte des informations supplémentaires (effets quadratiques pour les variables  $C$  (Jeu) et  $A$  (Rayon)) qui augmentent la performance du modèle proposé et qui donne une qualité meilleure pour le modèle de travail. Pour cette raison les points au centre du domaine d'étude sont appelés **points de contrôle** ou *control runs* en anglais.

Dans cette analyse nous avons présenté une nouvelle technique d'étude pour mettre en évidence l'effet quadratique d'un modèle car les essais sont obtenus par des simulations numériques. Cette technique permet aussi d'apporter plus d'informations sur le modèle étudié, et elle ne dégrade surtout pas le modèle de départ. D. Benoit dans son ouvrage [Ben94b] dit que, *un plan composite centré n'est pas orthogonal et ne peut jamais l'être*. Mais, *en augmentant le nombre de répétition de l'essai au centre on tend vers l'orthogonalité*.

Par cette analyse nous avons ouvert une voie vers l'utilisation des plans d'expériences numériques pour l'étude de certains problèmes pour lesquels le modèle du premier degré est inadéquat et qui peuvent être expliqués par des modèles du deuxième degré, donc qui ont un caractère fortement non linéaire.

### 5.1.6 Optimisation du procédé

Afin d'établir un modèle pour expliquer la réponse il faut tout d'abord vérifier la qualité de celui-ci. Le test statistique qui mesure la qualité de la modélisation est le Coefficient de corrélation multiple ( $R^2$ ), qui exprime le rapport entre la variance expliquée par le modèle et la variance totale. Pour déterminer le meilleur sous-modèle, pour chacun des sous-modèles candidats nous avons calculé  $R^2$ . La méthode pas à pas utilisée, par son algorithme d'élimination (en anglais backward stepwise) démarre du modèle complet et à chaque étape, la variable associée à la plus grande valeur  $p$  (Table ANOVA) est éliminée du modèle [Bes03]. Cette méthode nous a permis de classer selon le degré d'ajustement et de choisir comme modèle l'équation (en valeurs codées) :

$$Y = 2.971 + 0.185 \cdot A - 0.125 \cdot B + 0.16 \cdot C + 0.012 \cdot A^2 + 0.03 \cdot B^2 - 0.025 \cdot C^2 - 0.037 \cdot A \cdot B \quad (5.5)$$

La valeur du  $R^2 = 0.99725$ , signifie que la réponse est très bien expliquée par le modèle proposé. L'équation du modèle choisi permet aussi de déduire les facteurs principaux et les interactions correspondantes, ayant le moins d'influence (les facteurs manquants) sur la perte de qualité du modèle original (modèle complet,  $R^2 = 0.9986$ ).

### 5.1.7 Conclusions

Dans ce paragraphe nous avons présenté une méthode originale qui peut être utilisée pour les plans d'expériences numériques. A l'aide de cette méthode on peut établir si un modèle présente ou pas des effets quadratiques. L'approche proposée présente un réel intérêt pour étudier des phénomènes, qui par leur complexité seront susceptibles d'être non linéaires. L'application à l'optimisation du procédé de pliage nous a permis de vérifier la méthode et de prouver son efficacité.

## 5.2 Optimisation du procédé d'extrusion

### 5.2.1 Introduction

Ce paragraphe est consacré à l'optimisation du procédé d'extrusion. Une introduction sur le procédé et ses défaillances a été présentée au premier chapitre. Le phénomène d'usure qui représente la principale cause de défaillance pour la matrice est analysé ici. Ensuite nous présentons une analyse statistique sur les données, notamment sur les composantes principales influençant le processus de dégradation par l'usure. La partie finale de cette application est représentée par une optimisation multiréponse qui utilise une nouvelle technique d'optimisation [Ch'05]. Cette technique est utilisée notamment pour l'optimisation de la durée de vie en fatigue qui est influencée par la température.

### 5.2.2 Étude du processus d'usure pendant l'extrusion

La loi d'usure d'Archard est utilisée dans cette application [Lep02, Lep03] pour l'étude de l'usure de la matrice pendant le procédé d'extrusion. Une analyse en post-traitement permet de calculer la durée de vie de l'outil et d'étudier l'influence des principaux paramètres de l'opération sur la qualité géométrique et mécanique des produits formés. Durant cette analyse, on utilise la Méthodologie des Surfaces de Réponse (MSR) [Cor90, Gou99, Mon01] présentée au deuxième chapitre, pour vérifier l'effet quadratique de la réponse. Cette démarche qui s'avère indispensable s'appuie sur l'utilisation des Plans Composites Centraux [Ben94b, Mon01] qui ont montré la forte dépendance entre les paramètres étudiés (rayon, frottement, coefficient de réduction, etc.), et d'établir que l'équation de la surface de réponse est un polynôme de deuxième degré. Les résultats obtenus nous permettent aussi de déterminer les périodes de maintenance et de changement de l'outil endommagé.

Le phénomène d'usure qui survient pendant cette opération pour la matrice est un phénomène complexe peu contrôlable [Ari03, GD03, Ham00a, Nam02, Yeo01] qui dépend de plusieurs paramètres (rayon, frottement, coefficient de réduction, angle, etc.). Le Diagramme d'Ishikawa (Figure 5.9) fait une synthèse sur ces facteurs et leurs interactions.

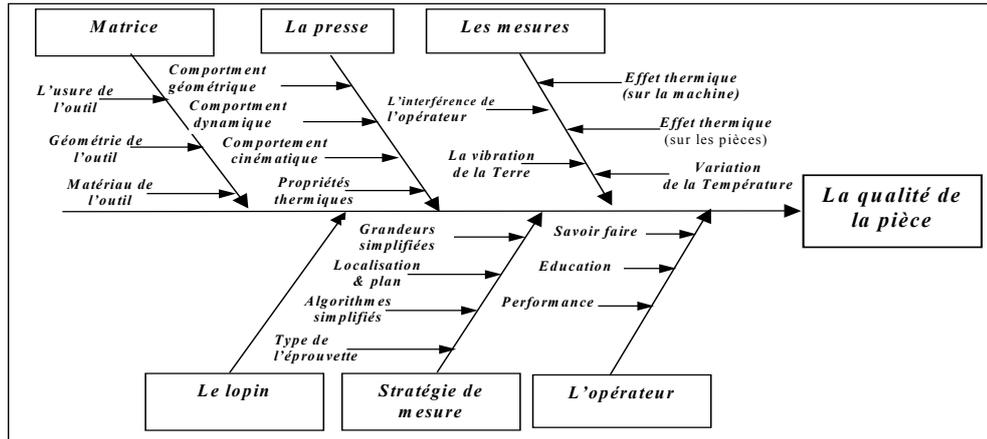


FIG. 5.9 – Le diagramme d'Ishikawa.

### 5.2.2.1 Simulation numérique du procédé d'extrusion

La modélisation Éléments Finis (EF) nous a permis de créer un modèle plan [Lep02, Lep03] qui a été adapté à notre problématique. Ce modèle a été remplacé par la suite par un modèle plus complexe [Lep05d], pour mieux répondre à nos besoins (étudier l'influence de la température). Dans notre exemple, il s'agit d'une opération d'extrusion axisymétrique d'un acier à 0.6% de Carbone, dont les caractéristiques sont données dans le tableau 5.11.

Caractéristiques	$\gamma_w$	$\sigma_{el}(MPa)$	$K(MPa)$	$\nu$	$\mu$
Acier	1.0E-04	250	1094	0.2	0.1

TAB. 5.11 – Caractéristiques du matériau

Les caractéristiques géométriques de la matrice étudiée sont présentées dans la figure 5.10.

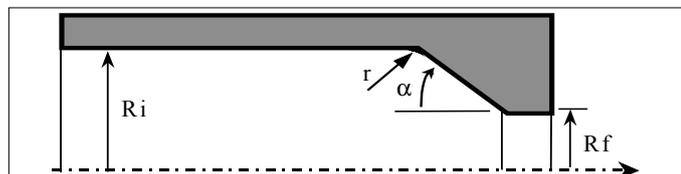


FIG. 5.10 – Modèle axisymétrique pour le processus d'extrusion.

Le maillage éléments finis est réalisé par 300 éléments axisymétriques rectangulaires à 4 noeuds (Figure 5.11). Dans cet exemple la matrice a été modélisée dans l'hypothèse de corps rigide.

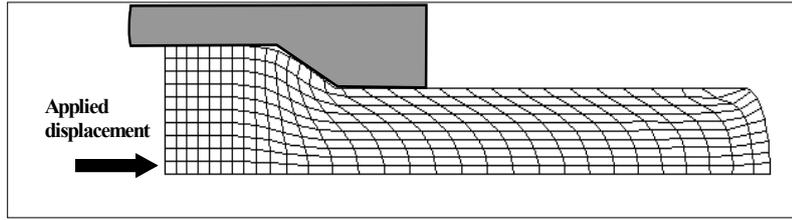


FIG. 5.11 – Déformation du lopin après l’extrusion.

### 5.2.2.2 La Méthodologie de Surface de Réponse

La Méthodologie de Surface de Réponse (MSR) est utilisée ici pour tester l’effet quadratique de l’usure ainsi que l’influence des paramètres opératoires sur le procédé d’extrusion. Ces paramètres sont (Figure 5.10) :

- Coefficient d’extrusion ( $K$ ) :  $X_1$  donné par :  $100 \cdot \frac{R_f}{R_i}$
- Angle d’inclinaison de la matrice ( $\alpha$ ) :  $X_2$  ( $^\circ$ ) qui correspond à l’angle  $\alpha$  (Figure 5.10)
- Coefficient de frottement ( $\mu$ ) :  $X_3$  qui décrit les conditions de frottement entre le matériau et la matrice
- Rayon interne ( $r$ ) :  $X_4$  (mm) qui correspond à  $r$  (Figure 5.10).

Nous avons utilisé pour cette étude un plan composite centré qui est le plus adapté pour des phénomènes non linéaires. Les facteurs interrogés ainsi que leurs niveaux sont donnés dans le Tableau 5.12. Dans le même tableau le paramètre  $\delta$  (le point en étoile) est supérieur à 1 et est calculé grâce à la formule :

$$\delta = \sqrt[4]{N} \tag{5.6}$$

où  $N$ - nombre d’essais du Plan Orthogonal. Pour notre cas  $\delta = 2$

Niveau		Facteurs			
Normal	Codé	$K - X_1$	Angle - $X_2$	Frottement - $X_3$	Rayon - $X_4$
1	$-\delta$	0,6	20	0,05	2
2	-1	0,65	23,75	0,0675	3
3	0	0,7	27,5	0,085	4
4	1	0,75	31,25	0,1025	5
5	$+\delta$	0,8	35	0,12	6

TAB. 5.12 – Les niveaux des facteurs étudiés.

Durant ce travail, la planification des essais a été réalisée par des simulations numériques pour différentes configurations de la matrice d’expérience. Celles ci nous ont facilité la compréhension de la non linéarité d’un phénomène complexe comme l’usure.

### 5.2.2.3 Résultats et discussions

Afin d'obtenir les réponses données par la configuration du plan composite centré, nous avons utilisé la simulation numérique par éléments finis. La matrice d'expériences (Tableau 5.13) obtenue pour une configuration complète du plan composite centré comporte 25 essais. Par cette approche nous avons cherché tout d'abord à vérifier le caractère non linéaire du phénomène d'usure. Le modèle d'usure d'Archard (Voir chap. 2) a été utilisé pour la modélisation de ce phénomène. Dans ce contexte on a choisi d'analyser plus en détail la **partie active** de la matrice (partie la plus responsable des défauts et de la géométrie finale des pièces extrudées). Dans la plupart des cas, les zones critiques qui engendrent les défauts des pièces obtenues par ce procédé sont situées aux points *A* et *B* (Figure 5.12).

No ess.	Valeurs codées				Valeurs réelles				Réponses	
	$\varsigma_1$	$\varsigma_2$	$\varsigma_3$	$\varsigma_4$	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	$Y_A$	$Y_B$
1	-1	-1	-1	-1	0.65	23.75	0.0675	3	0.0337	0.0383
2	-1	-1	-1	1	0.65	23.75	0.0675	5	0.0337	0.0287
3	-1	-1	1	-1	0.65	23.75	0.1025	3	0.0337	0.0312
4	-1	-1	1	1	0.65	23.75	0.1025	5	0.0324	0.0312
5	-1	1	-1	-1	0.65	31.25	0.0675	3	0.0327	0.0323
6	-1	1	-1	1	0.65	31.25	0.0675	5	0.0315	0.031
7	-1	1	1	-1	0.65	31.25	0.1025	3	0.0275	0.0328
8	-1	1	1	1	0.65	31.25	0.1025	5	0.0275	0.0328
9	1	-1	-1	-1	0.75	23.75	0.0675	3	0.0285	0.0269
10	1	-1	-1	1	0.75	23.75	0.0675	5	0.0285	0.0269
11	1	-1	1	-1	0.75	23.75	0.1025	3	0.0272	0.0282
12	1	-1	1	1	0.75	23.75	0.1025	5	0.0259	0.0269
13	1	1	-1	-1	0.75	31.25	0.0675	3	0.0242	0.0273
14	1	1	-1	1	0.75	31.25	0.0675	5	0.0218	0.0277
15	1	1	1	-1	0.75	31.25	0.1025	3	0.0191	0.0286
16	1	1	1	1	0.75	31.25	0.1025	5	0.0191	0.0286
17	$+\delta$	0	0	0	0.6	27.5	0.085	4	0.0352	0.0336
18	$-\delta$	0	0	0	0.8	27.5	0.085	4	0.0211	0.0273
19	0	$+\delta$	0	0	0.7	20	0.085	4	0.0305	0.0261
20	0	$-\delta$	0	0	0.7	35	0.085	4	0.0218	0.0296
21	0	0	$+\delta$	0	0.7	27.5	0.05	4	0.0302	0.0276
22	0	0	$-\delta$	0	0.7	27.5	0.12	4	0.0261	0.0304
23	0	0	0	$+\delta$	0.7	27.5	0.085	2	0.0302	0.0308
24	0	0	0	$-\delta$	0.7	27.5	0.085	6	0.0277	0.0294
25	0	0	0	0	0.7	27.5	0.085	4	0.0302	0.0294

TAB. 5.13 – La matrice d'expérience pour le plan composite centré.

Dans le tableau 5.13, se trouvent les résultats des points critiques pour la matrice ( $Y_A$  et  $Y_B$ ). Pour le premier point critique *A* (Figure 5.12), l'analyse statistique (Tableau 5.14) nous a confirmé que l'équation de la surface de réponse est linéaire. Cette conclusion est en accord avec une autre étude [Lep02]. L'analyse de la variance (Tableau 5.14) nous donne aussi les facteurs ou les interactions significatifs (les valeurs en gras dans la colonne *p* - tableau ANOVA) : coefficient d'extrusion, angle, coefficient du frottement et l'interaction entre coefficient d'extrusion et l'angle.

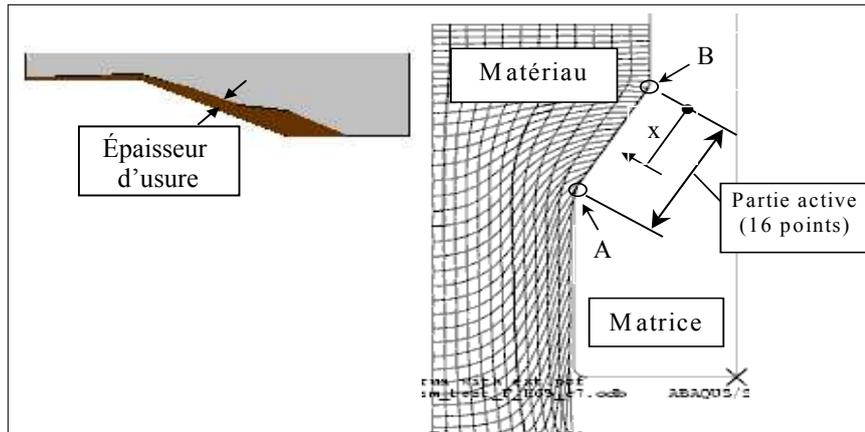


FIG. 5.12 – La partie active de la matrice et l'épaisseur d'usure.

Variable	Tableau ANOVA			
	Somme des carrées	Degré de liberté	F-value	p
$X_1$ - Coeff. d'extrusion	0,001073	1	92,89928	<b>0,000002</b>
$X_1^2$ - Coeff. d'extrusion	0	1	0,00929	0,925133
$X_2$ - Angle	0,000461	1	39,88276	<b>0,000087</b>
$X_2^2$ - Angle	0,000001	1	0,05194	0,824319
$X_3$ - Coeff. de Frottement	0,00028	1	24,234	<b>0,000602</b>
$X_3^2$ - Coeff. de Frottement	0,000002	1	0,15069	0,70601
$X_4$ - Rayon	0,000047	1	4,08261	0,070916
$X_4^2$ - Rayon	0,000007	1	0,57054	0,467462
$X_1 * X_2$	0,000077	1	6,64506	<b>0,02752</b>
$X_1 * X_3$	0,000015	1	1,26246	0,287435
$X_1 * X_4$	0,000002	1	0,187	0,674603
$X_2 * X_3$	0,000007	1	0,64743	0,439745
$X_2 * X_2$	0	1	0,01675	0,899592
$X_3 * X_4$	0,000003	1	0,26788	0,616011
<b>Erreur</b>	0,000115	10		
<b>Total</b>	0,002101	24		

TAB. 5.14 – Les effets des facteurs pour le point A.

Pour le deuxième point critique  $B$ , (Figure 5.12), l'analyse statistique (Tableau 5.15 - la valeur de  $X_2^2$  - Angle sur la colonne  $p$ ) nous confirme l'effet quadratique de la réponse (Figure 5.13).

Variable	Tableau ANOVA			
	Somme des carrées	Degré de liberté	F-value	p
$X_1$ - Coeff. d'extrusion	0,000311	1	586,589	<b>0</b>
$X_1^2$ - Coeff. d'extrusion	0,000003	1	5,1453	0,046703
$X_2$ - Angle	0,000136	1	256,3999	<b>0</b>
$X_2^2$ - Angle	0,000011	1	21,1521	<b>0,000981</b>
$X_3$ - Coeff. de Frottement	0,000039	1	72,9836	<b>0,000007</b>
$X_3^2$ - Coeff. de Frottement	0,000003	1	5,3185	0,043791
$X_4$ - Rayon	0,000005	1	9,9404	0,010283
$X_4^2$ - Rayon	0,000001	1	1,8839	0,199894
$X_1 * X_2$	0,000008	1	15,9267	<b>0,002556</b>
$X_1 * X_3$	0	1	0,1548	0,702236
$X_1 * X_4$	0	1	0,1728	0,6864
$X_2 * X_3$	0,000009	1	16,6032	<b>0,002233</b>
$X_2 * X_2$	0	1	0,1296	0,726314
$X_3 * X_4$	0	1	0,1296	0,726314
Erreur	0,000005	10		
Total	0,000528	24		

TAB. 5.15 – Les effets des facteurs pour le point B.

La figure 5.13 représente les surfaces de réponse pour les effets significatifs des interactions des facteurs sur l'usure :

- a) Effet de coefficient de réduction  $X_1$  et de l'angle  $X_2$  sur la réponse.
- b) Effet de l'angle  $X_2$  et du frottement  $X_3$  sur la réponse.

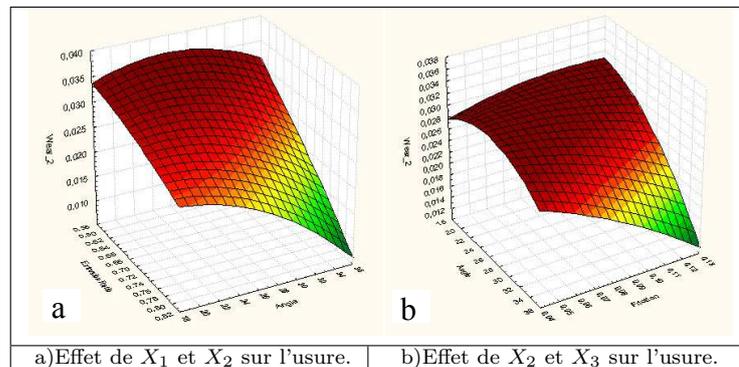


FIG. 5.13 – Surfaces de réponse pour l'usure.

Le diagramme de Pareto (Figure 5.14) montre les effets significatifs des facteurs utilisés dans cette étude. Les résultats montrent que les principaux facteurs qui affectent l'usure de la matrice sont, par ordre d'importance, le coefficient de réduction, l'angle et le coefficient du frottement.

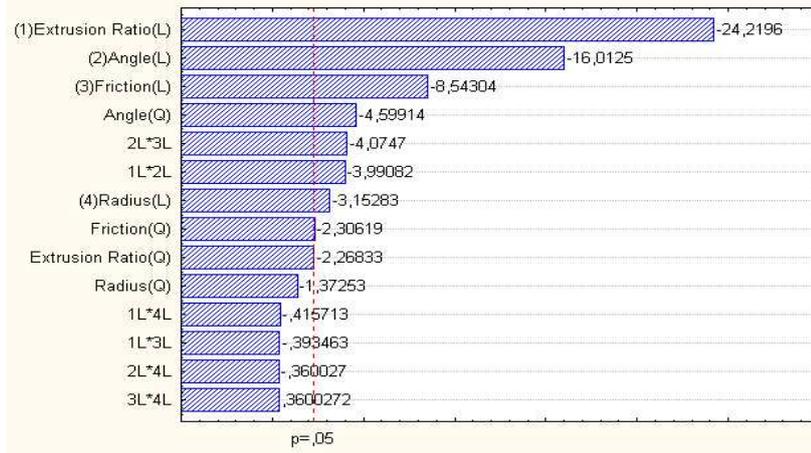


FIG. 5.14 – Diagramme de Pareto.

Afin d'établir un modèle pour expliquer la réponse il faut tout d'abord vérifier la qualité de celui-ci. Le test statistique qui mesure la qualité de la modélisation est le Coefficient de corrélation multiple ( $R^2$ ), qui exprime le rapport entre la variance expliquée par le modèle et la variance totale. Pour déterminer le meilleur sous-modèle, parmi les sous-modèles candidats nous avons calculé  $R^2$ . La classification selon le degré d'ajustement nous a permis de choisir comme modèle l'équation :

$$Y = -0.1713 + 0.3230 \cdot X_1 + 0.0070 \cdot X_2 - 0.0001 \cdot X_2^2 + 0.5584 \cdot X_3 - 0.0039 \cdot X_1 \cdot X_2 - 0.0113 \cdot X_2 \cdot X_3 \quad (5.7)$$

La valeur du  $R^2 = 0.9862$ , signifie que la réponse est très bien expliquée par le modèle proposé. L'équation du modèle choisi permet aussi de déduire les facteurs principaux et les interactions correspondantes, ayant le moins d'influence (les facteurs manquants) sur la perte de qualité du modèle original (modèle complet,  $R^2 = 0.99899$ ).

### 5.2.3 Analyse statistique

Pour pouvoir prédire le profil d'usure de la matrice nous avons procédé à une analyse statistique [Lep04b] des données, notamment sur les deux composantes influençant le processus de dégradation par l'usure :

- la pression du contact (Figure 5.15 a)
- la distance de glissement (Figure 5.15 b)

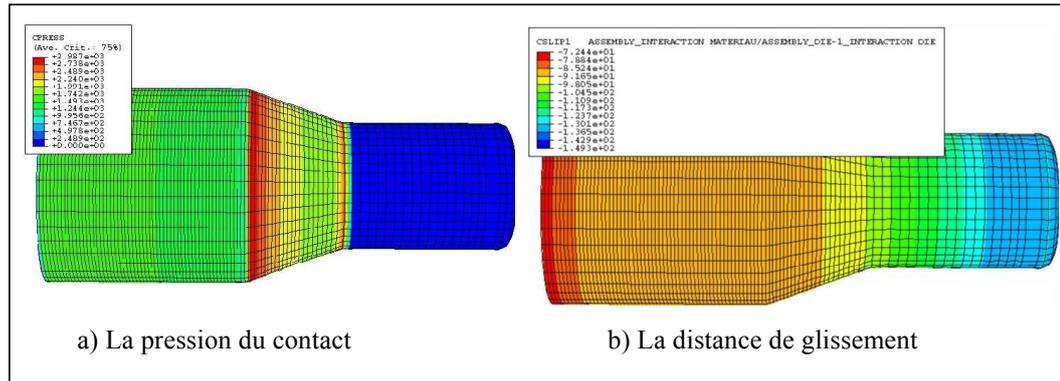


FIG. 5.15 – La pression du contact et la distance de glissement pour le procédé d'extrusion.

On peut constater sur les deux images (Figure 5.15) que la zone dangereuse pour la matrice est la zone active, notamment au début et à la fin de cette zone. La figure 5.16 montre bien cette tendance pour chaque composante de la loi d'usure.

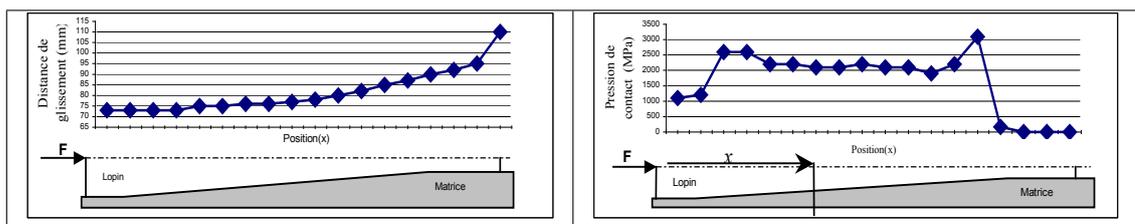


FIG. 5.16 – La distance de glissement, respectivement la pression normale fonction des points interrogés.

La figure 5.17 montre aussi le profil d'usure dans la zone active avec des valeurs maximales vers les deux extrémités de la zone active.

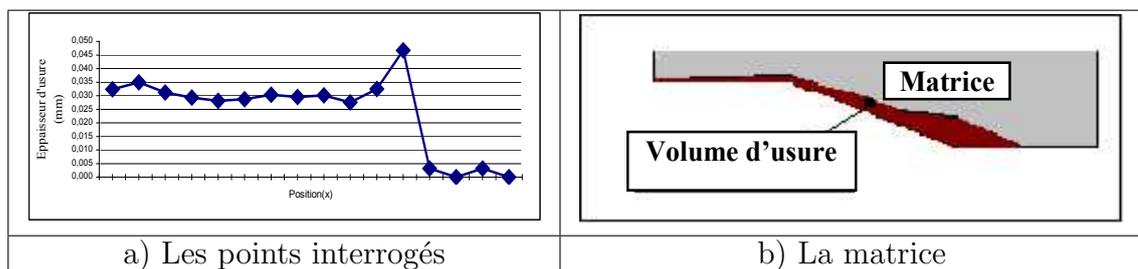


FIG. 5.17 – Le profil d'usure

Sur la figure 5.17 on peut distinguer le volume d'usure qui est développé sur la partie active de la matrice, pouvant entraîner des dégâts majeurs, allant jusqu'à la fracture avec une conséquence importante sur la géométrie finale des pièces extrudées. Plus de détails sur cette analyse pourront être trouvés en [Lep04b].

## 5.2.4 Optimisation multicritères pour le procédé d'extrusion

### 5.2.4.1 Introduction

Par la suite dans ce paragraphe, sera présentée une application de la technique d'optimisation à réponses multiples proposée par Ch'ng (Chapitre 2) pour le procédé d'extrusion. L'objectif principal de l'optimisation multicritères [Cas96] est d'améliorer la qualité d'un produit ou d'un procédé en réduisant au minimum les effets de la variation sans éliminer les causes (puisque c'est trop difficile et ça revient très cher). En utilisant cette méthode, un ingénieur peut indiquer différents degrés d'importance ou de priorité pour les réponses, par le choix des points de discontinuité sur des valeurs cibles à différents niveaux pour chaque réponse. En plus pour résoudre le problème de la discontinuité de la fonction objectif, la technique de Ch'ng [Ch'05] est employée dans cette démarche, pour trouver les niveaux optimaux des paramètres.

### 5.2.4.2 L'optimisation multicritères

Pour les procédés de fabrication, l'amélioration de la qualité et de la productivité est plus efficace quand elle est intégrée dans le produit et le cycle de processus. Typiquement, dans l'analyse des données industrielles il y a beaucoup de réponses (variables) qui devront être étudiées en même temps. Les rapports entre ces réponses sont connues, mais l'analyste doit décider quelles réponses sont les plus importantes, habituellement au détriment des autres. En plus, pour optimiser ces réponses individuellement on peut rencontrer des contradictions pour les différents niveaux de facteurs acceptables pour une réponse et non pour les autres. Le but de l'optimisation multicritères est d'optimiser au mieux les différents objectifs [Yan02]. En effet, la solution que l'on obtient est une solution de compromis. Elle optimise un certain nombre d'objectifs tout en dégradant les performances sur d'autres objectifs. Mais finalement la solution acceptée va assurer une satisfaction globale sur le processus parce qu'elle répond à plusieurs objectifs en même temps.

Dans ce but, nous proposons l'approche largement répandue et appelée la fonction de désirabilité (Desirability Function en anglais) [Har65]. L'idée de base est que la qualité d'un produit ou d'un procédé qui ont des caractéristiques multiples de qualité, est complètement acceptable même si l'une de ces caractéristiques se trouve en dehors de certaines limites *désirées*. En effet, on transforme un problème à plusieurs réponses en un problème avec une seule réponse par transformation mathématique. La méthode trouve les conditions de fonctionnement (variables optimales du processus) qui fournissent les valeurs *les plus souhaitables* de réponses. Par cette approche

on vise à optimiser la durée de vie (Figure 5.18) de la matrice et d'autres réponses (la contrainte de von Mises, force de fabrication, etc...) pour le procédé d'extrusion.

Le procédé d'extrusion est habituellement la manière la plus économique de fabriquer des pièces qui ont une coupe constante, parce que le concepteur peut mettre le métal *là où il le veut*. Souvent, l'extrusion est la seule méthode qui peut être utilisée pour obtenir certains produits. Dans le procédé d'extrusion du métal [Ahn97, GD03], le cycle de vie de la matrice (Figure 5.18) est principalement limité par l'usure, qui affecte les tolérances des pièces formées, et par la fatigue [Dra99, Fal01, Yah04] qui induit la rupture soudaine inattendue. Ces dernières années plusieurs chercheurs ont proposé de nouvelles techniques [Ahn97, Lee00] pour augmenter la durée de vie de la matrice.

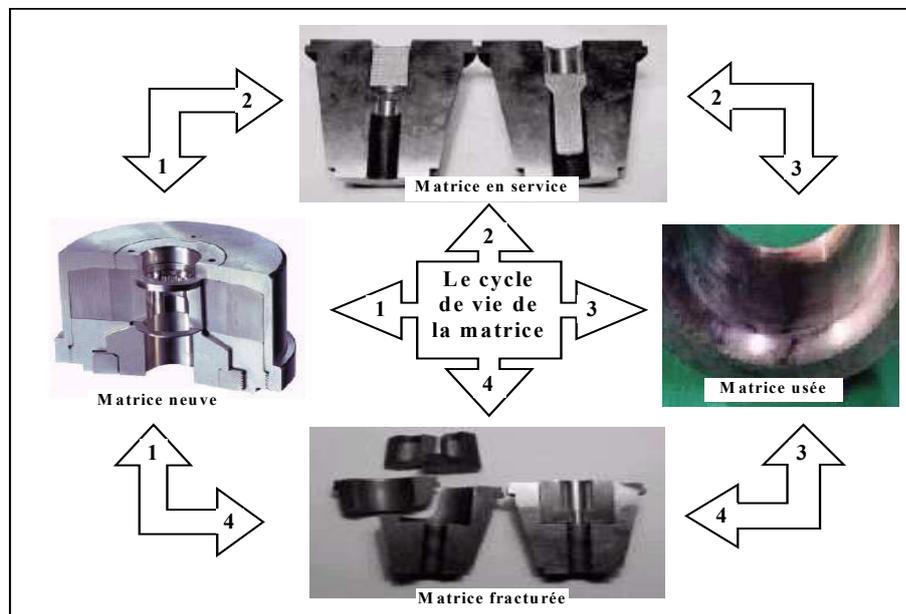


FIG. 5.18 – Le cycle de vie d'une matrice.

### 5.2.4.3 Modélisation par Éléments Finis de la durée de vie par fatigue

Pour envisager une évaluation plus précise de la durée de vie par fatigue nous avons utilisé une modélisation par Éléments Finis (*EF*) en 3D. Les modèles en trois dimensions élastiques (Figure 5.19) sont utilisés le plus souvent [Cri91, Car94, Ham00a] pour calculer les efforts et les contraintes des composants, en supposant que le matériel est infiniment élastique [Kur85, Kal91, Mar84]. Les raisons pour lesquelles on utilise des modèles élastiques sont :

- Il est impossible de modéliser une séquence complexe de chargement en utilisant facilement le modèle éléments finis, parce que les effets de mémoire du

- matériau doivent être inclus pour chaque cycle de fatigue.
- Pour modéliser le chargement multiaxial il peut être nécessaire de superposer les résultats de plusieurs analyses éléments finis, et les modèles élastiques facilitent cette tâche.

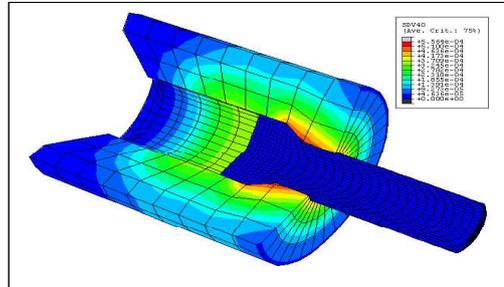


FIG. 5.19 – Le procédé d’extrusion

Par la suite, seront définis les principes de base pour l’évaluation de la durée de vie en fatigue à partir des modèles éléments finis. Pour une charge appliquée sur le modèle, l’analyse élastique par *EF* nous donne l’effort ou la contrainte pour chaque noeud de chaque élément. La contrainte nodale peut être multipliée par une succession des charges ou des forces qui peut être une évolution mesurée en temps des charges, pour donner ensuite une évolution en temps de la contrainte au noeud. Pour tenir compte du fait que le matériel peut céder, les règles de Neuber ou de Glinka [Dra99] peuvent être utilisées pour calculer les contraintes et les efforts élasto-plastique de la contrainte élastique du modèle. Si le processus de conversion élasto-plastique est intégré avec une routine d’analyse du dommage et de la fatigue, la durée de vie par fatigue au noeud peut être calculée. Ce processus peut être répété pour chaque noeud de chaque élément, et pour chaque élément du modèle.

#### 5.2.4.4 Résultats et discussions

Un facteur très important contribuant aux performances économiques (efficacité et qualité) de la mise en forme des matériaux métalliques est la durée de vie de l’outil. D’une façon générale, l’optimisation d’un produit ou d’un procédé est plus efficace si on peut tenir compte de plusieurs fonctions objectif simultanément. L’optimisation de plusieurs réponses [Oth98] est en même temps de grand intérêt, pour des raisons évidentes de réduction des coûts. La technique d’optimisation multireponses [Ham01b, Che02] est utilisée dans ce travail pour identifier la configuration optimale des paramètres d’un processus ou d’un système tout en respectant des caractéristiques multiples de qualité. La difficulté surgit dans le fait que plusieurs réponses sont étudiées simultanément. La signification de l’optimum devient peu réaliste puisque

les conditions optimales pour une réponse peuvent ne pas être appropriées ou pratiques pour d'autres réponses. Par conséquent, les conditions optimales obtenues par cette analyse s'appellent parfois *près* d'optimal pour toutes les réponses. Cette technique ne peut pas être utilisée pour un processus ayant un nombre très grand de caractéristiques de qualité à optimiser en même temps.

Le phénomène de fatigue (voir paragraphe 1.3.5) est un processus complexe. Le nombre de facteurs d'influence est très important, et pourront être groupés en trois catégories [Lu43]. :

1. les facteurs relatifs à la sollicitation et à l'environnement
  - le type de la sollicitation (uniaxiale, multiaxiale avec ou sans déphasage), les contraintes moyennes, le spectre de chargement et de surcharge, la fréquence du chargement, la température, le coefficient de frottement etc.
2. les facteurs relatifs à la géométrie
  - l'état de surface, l'effet d'entaille et l'effet d'échelle, etc.
3. les facteurs relatifs aux matériaux
  - les caractéristiques du matériau, la microstructure du matériau, les contraintes résiduelles, les traitements de surface, etc..

Pour cette application les variables qui affectent les réponses, particulièrement la durée de vie de la matrice sont : l'angle d'inclinaison de la matrice, le coefficient de frottement et la température induite par la pièce extrudée. L' algorithme de GRG (*Generalised Reduced Gradient*) couplé à la technique de Ch'ng [Ch'05] (Voir paragraphe 2.3) est utilisé ici pour trouver la meilleure combinaison des paramètres de procédé qui assure une durée de vie acceptable de l'outil et pour permettre l'optimisation des autres réponses simultanément. Pour illustrer cette approche, nous présentons un problème d'optimisation du procédé d'extrusion. Les caractéristiques géométriques de la matrice ( $R_i$ ,  $R_f$  sont les rayons d'entrée et respectivement de sortie de la matrice, et  $\alpha^\circ$  qui est l'angle de la matrice) sont montrées sur la figure 5.10. Le tableau 5.16 montre les niveaux et le codage des paramètres étudiés. Les variables qui affectent la prévision de la durée de vie de la matrice sont : le coefficient  $X_1$  - coefficient de frottement, qui décrit les conditions de frottement entre la pièce et la matrice, l'angle de la matrice  $X_2$ , qui correspond à l'angle  $\alpha^\circ$  (Figure 5.10), et la température de travail  $X_3$  . Les réponses pour cette étude sont  $Y_1$  - contrainte de Von Mises,  $Y_2$  - déformation maximale,  $Y_3$  - force de fabrication et  $Y_4$  = la durée de vie de la matrice.

Paramètres	Symbole	Niveaux				
		$-\delta$	<b>-1</b>	<b>0</b>	<b>1</b>	$+\delta$
Coef. de frottement	$X_1$	0.05	0.07	0.1	0.13	0.15
Angle de la matrice	$X_2$ (°)	20	23	27.5	31.96	35
Température	$X_3$ (°C)	500	581.08	700	818.92	900

TAB. 5.16 – Le codage des paramètres.

Pour l’investigation des trois facteurs et pour la modélisation des réponses, dans ce travail la MSR par un plan composite centré [Mon01] a été utilisée afin d’obtenir les 15 essais (Tableau 5.17).

Essais	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$Y_1$	<b>Y2</b>	<b>Y3</b>	<b>Y4</b>
1	0.07	23	581.079	1.85E+03	1.26E+00	1.44E+05	6.42E+03
2	0.07	23	818.921	4.70E+02	1.349	3.67E+04	3.37E+04
3	0.07	31.96	581.079	1.83E+03	1.532	1.56E+05	9.43E+03
4	0.07	31.96	818.921	5.23E+02	1.614	3.99E+04	3.66E+04
5	0.13	23	581.079	2.03E+03	1.801	1.81E+05	1.21E+04
6	0.13	23	818.921	5.81E+02	1.824	4.69E+04	3.20E+04
7	0.13	31.96	581.079	2.23E+03	1.939	2.03E+05	1.32E+04
8	0.13	31.96	818.921	6.32E+02	1.928	5.23E+04	3.21E+04
9	0.05	27.5	700	8.89E+02	1.275	7.86E+04	1.99E+04
10	0.15	27.5	700	1.41E+03	1.921	1.25E+05	1.50E+04
11	0.1	20	700	1.06E+03	1.692	9.21E+04	2.09E+04
12	0.1	35	700	1.39E+03	1.888	1.11E+05	2.12E+04
13	0.1	27.5	500	2.43E+03	1.666	2.13E+05	9.17E+03
14	0.1	27.5	900	2.43E+02	1.685	1.95E+04	7.48E+04
15	0.1	27.5	700	1.13E+03	1.651	9.69E+04	1.99E+04

TAB. 5.17 – La matrice d’expériences pour le plan composite centré

La méthode des moindres carrés (Ordinary Least Square - OLS) a été utilisée pour les données du tableau 5.17 pour obtenir les équations de surfaces des réponse pour chaque caractéristique de qualité étudiée (les réponses). Les équations qui génèrent les modèles sont données dans le tableau 5.18.

Le Modèle	$Y_1$	$Y_2$	$Y_3$	$Y_4$
<b>C</b>	1122.532	1.65756	96761	20890.26
$X1$	123.573	0.206741	13502.6	-366.02
$X1X1$	14.775	-0.027817	1916.9	-2264.27
$X2$	60.575	0.081178	5402.3	548.51
$X2X2$	40.832	0.040066	1782.5	-986.39
$X3$	-689.533	0.01574	-61050.6	14912.8
$X3X3$	80.854	-0.000416	6916.1	6405.12
$X1X2$	27.525	-0.036875	1468.7	-588.68
$X1X3$	-45.5	-0.019875	-7618.8	-1955.57
$X2X3$	-8.625	-0.005125	-3086.3	-152.52

TAB. 5.18 – Les coefficients de régression pour les modèles générés

Le tableau 5.19. montre les valeurs  $LSL$ ,  $T$  et  $USL$  pour les réponses  $Y_i$ , avec  $i = 1, \dots, 4$ , avec les valeurs de la fonction de désirabilité associée à chaque réponse.

Réponse	LSL	T	USL	d*(LSL)	d*(Y)	d*(USL)
Y1	180.23	200.4	223.4	0	0.93	2
Y2	1.2285	1.26	1.29	0	1.02	2
Y3	18144.3	19510	21070.8	0	0.93	2
Y4	72000	74773	74773	0	2	2

TAB. 5.19 –  $LSL$ ,  $USL$ ,  $T$  et leurs désirabilités associées.

Pour notre exemple on a considéré que les quatre réponses ne peuvent pas avoir le même degré d'importance. Les degrés d'importance pour les quatre réponses sont :  $e_1 = 0.15$ ,  $e_2 = 0.30$ ,  $e_3 = 0.05$ ,  $e_4 = 0.50$ .

Pour optimiser les quatre réponses, nous avons utilisé un algorithme d'optimisation de type gradient généralisé, et les désirabilités suivantes pour les fonctions ont été obtenues (Tableau 5.20).

Variables	Réponses				Désirabilité Totale	
	$X_i$	$Y_1$	$Y_2$	$Y_3$		$Y_4$
-1.55						
-1.82						
2						
Désirabilités Individuelles D(Y)		0.25	1.02	2	0.11	0.27461795

TAB. 5.20 – Les solutions optimales trouvées à l'aide de la technique de Ch'ng.

Dans le tableau 5.20 est montrée la fonction de désirabilité totale pour l'optimisation multiréponse dans le procédé d'extrusion des métaux. Par cette technique on peut combiner les réponses  $Y_1$ ,  $Y_2$ ,  $Y_3$  et  $Y_4$  et les traiter comme une seule réponse. La technique de Ch'ng nous a permis de trouver les valeurs optimales pour les réponses étudiées  $Y = (185.56; 1.26; 21070.80; 72159.38)$ . Ces valeurs ont été obtenues pour les valeurs suivantes des facteurs interrogés  $X = (-1.55, -1.82, 2.00)$ .

#### 5.2.4.5 Bilan

L'optimisation multiréponses a été utilisée dans ce travail pour identifier les paramètres opératoires qui minimisent la variation des contraintes de von Mises ou la force de fabrication et spécialement pour augmenter la durée de vie de la matrice dans le procédé d'extrusion des pièces métalliques. Le nouveau modèle élément fini a été implémenté dans le code de calcul Abaqus et intégré à OPTIFORM, afin d'optimiser la durée de vie de la matrice qui est affectée directement par la température. La  $MSR$  utilisée dans nos démarches nous a permis de développer des méthodes d'optimisation de fatigue dans le but de diminuer le coût de fabrication afin d'obtenir des produits sans défauts.

### 5.2.5 Conclusions

Dans ce paragraphe nous avons présenté une étude sur le procédé d'extrusion. L'usure étant la principale cause de défaillance pour ce procédé, nous avons proposé des solutions qui ont eu comme but la réduction de ce phénomène. Un modèle par éléments finis a été utilisé ici afin de prendre en compte l'influence de la température sur la dégradation de la matrice par fatigue. Ce modèle a été utilisé également pour une optimisation de plusieurs réponses à la fois. L'optimisation multiréponses a pris aujourd'hui une véritable ascension dans le processus d'optimisation car le système ne peut plus être jugé individuellement pour chaque réponse parce qu'une approche globale est plus adaptée.

## 5.3 Optimisation du procédé d'emboutissage

### 5.3.1 Introduction

L'optimisation des opérations d'emboutissage consiste à rechercher, par voie de modélisation et simulation numérique, les formes géométriques, propriétés matérielles, d'interface et paramètres de procédés, afin d'aboutir, après emboutissage, à des pièces de qualité déterminée, tant au niveau géométrie, qu'au niveau propriétés matérielles. Dans ce paragraphe, on présente l'optimisation de l'emboutissage, (procédé présenté au premier chapitre) qui est un procédé assez complexe par rapport aux autres procédés de mise en forme des tôles. La méthode hybride (Voir Chapitre 2) est proposée ici afin de réduire le retour élastique responsable des défauts de forme et de géométrie pendant l'emboutissage. La puissance de cette méthode est donnée par l'addition des approches suivantes : surface de réponse, calcul par intervalle et tolérancement mécanique. Cette nouvelle méthode apportera une solution robuste au processus d'optimisation.

### 5.3.2 Simulation numérique de l'emboutissage 3D

Pour cette application nous avons considéré l'emboutissage classique [Cor04, Ham00b, Inc04] d'une boîte carrée (Figure 5.20) qui est formée à partir d'une tôle de côté 200 mm et d'une épaisseur de 0.825 mm. La matrice a un côté de 102.5 mm et le poinçon de 100 mm. Les rayons de raccordement pour le poinçon et la matrice sont de 3 mm. Un serre-flan permet de contrôler le glissement de la tôle. La pression exercée par ce serre-flan sur la tôle ainsi que le comportement à l'interface entre la tôle et les outils jouent un rôle prépondérant pour bien contrôler l'écoulement du matériau afin d'éviter la formation de plis et l'amorçage de micro-fissures. La représentation géométrique du problème est donnée par la figure 5.20. Les coefficients de frottement entre la tôle et le poinçon et entre la tôle et la matrice sont respectivement de 0.125 et 0.25. Aucun frottement n'est considéré entre la tôle et le serre-flan. En raison des symétries on ne discrétise qu'un quart du système. Les maillages du poinçon, de la matrice et du serre-flan sont effectués avec des éléments rigides tridimensionnels à 4 noeuds (éléments R3D4 code Abaqus), et pour la tôle, on utilise des éléments coques à 4 noeuds avec intégration réduite (éléments S4R d'Abaqus).

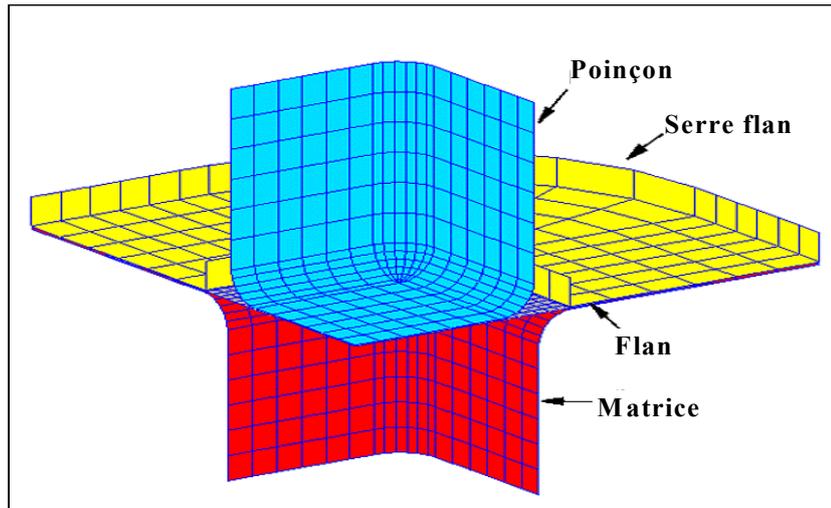


FIG. 5.20 – Simulation numérique du procédé d'emboutissage

Afin d'illustrer l'approche proposée nous présentons un problème d'optimisation du procédé d'emboutissage. Le procédé d'emboutissage (Figure 5.20) est un des procédés de fabrication les plus utilisés dans la fabrication moderne. Dans le but de satisfaire les demandes toujours croissantes de qualité des produits, les chercheurs ont proposé beaucoup d'approches pour simuler le procédé d'emboutissage [Cor04, Inc04]. Dans ce travail, un modèle éléments finis (Figure 5.21) a été développé dans le code de calcul Abaqus, pour obtenir les simulations numériques du procédé d'emboutissage.

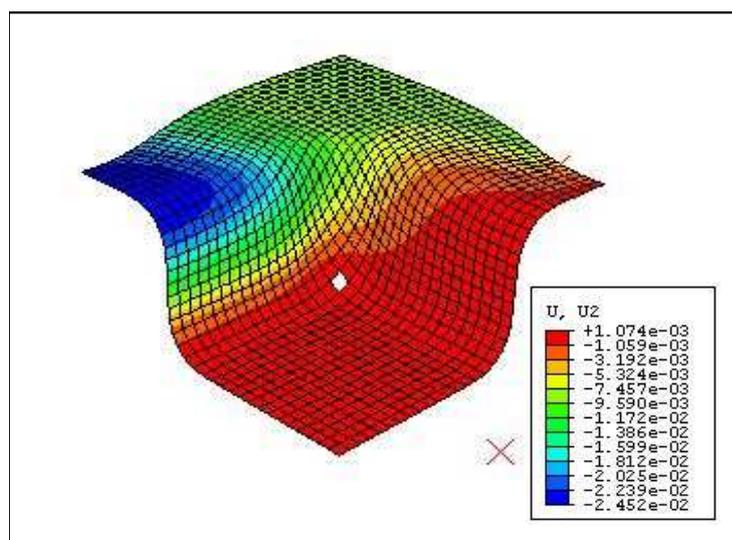


FIG. 5.21 – Modèle éléments finis pour l'emboutissage.

### 5.3.3 Optimisation de l'emboutissage à l'aide de la Surface de Réponse par Intervalles

Le procédé d'emboutissage est un procédé compliqué affecté par plusieurs paramètres de matériel et de procédé comme le coefficient d'érouissage, les déformations élastiques et plastiques des métaux, l'épaisseur de la tôle, le frottement et la lubrification, la vitesse du poinçon, la force du serre-flan, etc. [Jai00]. La déviation géométrique inconnue due au retour élastique [Roh01] est un problème sérieux dans le procédé d'emboutissage, particulièrement dans l'industrie automobile. La méthode hybride présentée au chapitre 2 (Paragraphe 2.4) sera appliquée ici afin de réduire la variation de la géométrie finale du procédé d'emboutissage influencé spécialement par le retour élastique. Dans cette application on utilise un plan composite centré pour 3 variables (L'épaisseur de la tôle  $X_1$ , coefficient du frottement  $X_2$ , la force de serre flan  $X_3$  - Table 5.21). Chaque niveau pour chaque paramètre est écrit sous la forme d'un intervalle à valeurs réelles. Pour chaque paramètre les deux limites de chaque intervalle sont représentées par des tolérances mécaniques bilatérales ( $\pm\Delta_i$ ). La réponse pour cette étude est  $Y_1 =$  retour élastique (Table 5.22). Pour le code Abaqus, le retour élastique a été mesuré par le déplacement d'un noeud selon la direction perpendiculaire à la direction d'avancement du poinçon.

Paramètres	Symbole	Niveaux				
		$-\delta \pm \Delta_i$	$-1 \pm \Delta_i$	$0 \pm \Delta_i$	$1 \pm \Delta_i$	$+\delta \pm \Delta_i$
L'épaisseur de la tôle Coeff. de frottement La force de serre flan	$X_1$ (mm)	[0.00073; 0.00080]	[0.00086; 0.00095]	[0.00105; 0.00116]	[0.0012; 0.0014]	[0.00136; 0.00151]
	$X_2$ ( )	[0.057; 0.063]	[0.086; 0.095]	[0.0124; 0.0137]	[0.162; 0.179]	[0.19; 0.21]
	$X_3$ (N)	[16906; 18685]	[18525; 20475]	[20900; 23100]	[23275; 25725]	[24894; 27515]

TAB. 5.21 – Le codage des paramètres.

Essais	X1	X2	X3	Y1
1	[0.00086 ; 0.00095]	[0.086 ; 0.095]	[18525 ; 20475]	[0.000106 ; 0.000118]
2	[0.00086 ; 0.00095]	[0.086 ; 0.095]	[23275 ; 25725]	[0.000101 ; 0.000112]
3	[0.00086 ; 0.00095]	[0.162 ; 0.179]	[18525 ; 20475]	[0.000102 ; 0.000113]
4	[0.00086 ; 0.00095]	[0.162 ; 0.179]	[23275 ; 25725]	[0.000096 ; 0.000106]
5	[0.0012 ; 0.0014]	[0.086 ; 0.095]	[18525 ; 20475]	[0.000056 ; 0.000062]
6	[0.0012 ; 0.0014]	[0.086 ; 0.095]	[23275 ; 25725]	[0.000050 ; 0.000056]
7	[0.0012 ; 0.0014]	[0.162 ; 0.179]	[18525 ; 20475]	[0.000053 ; 0.000058]
8	[0.0012 ; 0.0014]	[0.162 ; 0.179]	[23275 ; 25725]	[0.000047 ; 0.000052]
9	[0.00073 ; 0.00080]	[0.0124 ; 0.0137]	[20900 ; 23100]	[0.000124 ; 0.000137]
10	[0.00136 ; 0.00151]	[0.0124 ; 0.0137]	[20900 ; 23100]	[0.000040 ; 0.000045]
11	[0.00105 ; 0.00116]	[0.057 ; 0.063]	[20900 ; 23100]	[0.000080 ; 0.000088]
12	[0.00105 ; 0.00116]	[0.19 ; 0.21]	[20900 ; 23100]	[0.000072 ; 0.000080]
13	[0.00105 ; 0.00116]	[0.0124 ; 0.0137]	[16906 ; 18685]	[0.000078 ; 0.000086]
14	[0.00105 ; 0.00116]	[0.0124 ; 0.0137]	[24894 ; 27515]	[0.000068 ; 0.000075]
15	[0.00105 ; 0.00116]	[0.0124 ; 0.0137]	[20900 ; 23100]	[0.000074 ; 0.000081]

TAB. 5.22 – La matrice d'expériences pour le plan composite centré

La méthode des moindres carrées a été appliquée aux données initiales pour développer la surface de réponse habituelle (Ordinary Response Surface Model - *ORSM*) pour le retour élastique  $Y_1$ . L'équation de la surface de réponse (en termes codées) est donnée dans le tableau 5.23. Si on utilise l'algorithme (paragraphe 2.4.3.5 - Chapitre 2) proposé pour les données du tableau, on obtient une surface de réponse par intervalles (Interval Response Surface Model - *IRSM*) pour modéliser la réponse  $Y_1$ . Cette équation peut être représentée à l'aide des coefficients trouvés dans le tableau 5.23.

Le Modèle	$Y_1$	$Y_1$
	ORSM	IRSM
$C$	0.00007755	[0.00007655 ; 0.00008071]
$X_1$	-0.00002619	[-0.000029809 ; -0.000023571]
$X_1X_1$	0.00000301	[0.000002509 ; 0.000003311]
$X_2$	-0.00000228	[-0.000002708 ; -0.000002052]
$X_2X_2$	0.00000064	[0.000000556 ; 0.000000704]
$X_3$	-0.00000302	[-0.000003522 ; -0.000002718]
$X_3X_3$	-0.00000038	[-0.000000438 ; -0.000000342]
$X_1X_2$	0.00000031	[0.000000259 ; 0.000000341]
$X_1X_3$	-0.00000009	[-0.000000109 ; -0.000000081]
$X_2X_3$	-0.00000004	[-0.000000047 ; -0.000000036]

TAB. 5.23 – Équations pour ORSM et IRSM

Par exemple l'équation de la Surface de Réponse par Intervalle du retour élastique est donnée par :

$$\begin{aligned}
 Y_1 = & [0.00007655; 0.00008071] + [-0.000029809; -0.000023571] \cdot X_1 \\
 & + [0.000002509; 0.000003311] \cdot X_1^2 + [-0.000002708; -0.000002.052] \cdot X_2 \\
 & + [0.000000556; 0.000000704] \cdot X_2^2 + [-0.000003522; -0.000002718] \cdot X_3 \\
 & + [-0.000000438; -0.000000342] \cdot X_3^2 + [0.000000259; 0.000000341] \cdot X_1X_2 \\
 & + [-0.000000109; -0.000000081] \cdot X_1X_3 + [-0.000000047; -0.000000036] \cdot X_2X_3
 \end{aligned}
 \tag{5.8}$$

Cette équation obtenue par l'approche proposée, est modélisée par une surface de réponse tolérancée appelée Surface de Réponse par Intervalles. Cette méthode représente une nouvelle manière pour faire accepter plus de produits dans l'optimisation des procédés de fabrication.

### 5.3.4 Bilan

Cette application a été utilisée pour la validation de la nouvelle méthode hybride d'optimisation des procédés de fabrication qui a été proposée dans ce rapport (Chapitre 2). Cette approche combine la méthodologie de surface de réponse, le calcul

par intervalles et le tolérencement mécanique, afin de proposer une nouvelle surface de réponse appelée **Surface de Réponse par Intervalle**. L'utilisation de cette approche dans le processus d'optimisation donnera à celui-ci la robustesse nécessaire pour obtenir des produits à **zéro défaut** dans une économie de marché de plus en plus concurrentielle.

## 5.4 Conclusions

Afin de rendre le processus d'optimisation plus accessible pour le monde industriel nous avons présenté dans ce chapitre la validation des méthodes d'optimisation proposées dans ce mémoire (Chapitre 2), avec des approches originales sur la détermination du caractère non linéaire de la réponse d'un système obtenue par des simulations numériques ou par la proposition d'une méthode hybride qui combine trois approches : la méthodologie de surface de réponse, les tolérances mécaniques et le calcul sur intervalle appelée surface de réponse par intervalle.

Ces nouvelles méthodes ont prouvé leur efficacité lors de l'optimisation par plans d'expériences numériques telle que :

- prédiction de l'usure des outils de fabrication et l'optimisation multiréponse,
- prédiction du retour élastique en vue de réduire ces effets pour les procédés comme le pliage ou l'emboutissage par des méthodes spécifiques aux simulations numériques,
- utilisation des modèles éléments finis pour prédire la fatigue et prendre en compte l'effet de la température pour le procédé d'extrusion afin de proposer une optimisation multicritères par le méthode de Ch'ng,
- optimisation du retour élastique après l'emboutissage par une modélisation éléments finis en 3D qui se rapproche mieux de la réalité, afin d'implémenter la méthode hybride citée ci-dessus.



# Conclusions et perspectives

Les études proposées dans le cadre de cette thèse ont porté sur l'optimisation des procédés par approche plans d'expériences numériques. L'approche retenue a été basée sur le développement d'un outil informatique capable de mettre en oeuvre le processus d'optimisation des procédés de mise en forme. Le couplage entre la **méthodologie des plans d'expériences**, la **méthode des éléments finis**, et la **méthodologie des surfaces de réponses** nous a permis une réduction des coûts très importante parce qu'elle propose un nombre réduit d'expériences.

La modélisation numérique par **éléments finis** d'un procédé de mise en forme est un processus complexe durant lequel un grand nombre de phénomènes physiques intervient. Pour simuler une opération de formage d'une façon réaliste, il est important de prendre en compte le comportement du métal, les conditions de frottement et de contact, l'usure de l'outillage, etc.. Parallèlement tous les facteurs qui interviennent (caractéristiques des métaux, usure, fatigue, etc.) possèdent une variation centrée autour d'une valeur nominale. Pour réduire cette variation et mieux contrôler le processus, il est important de modéliser les opérations selon des approches statistiques.

L'étude bibliographique sur les méthodes d'optimisation nous a permis de constater les différentes lacunes existants lors de l'optimisation des procédés de mise en forme telles que :

- le manque de modèles structurés pour la construction de la *fonction objectif*
- le manque de méthodes pour l'identification des paramètres opératoires susceptibles d'influencer d'une manière significative le procédé de fabrication
- il n'existe pas une méthode paramétrée pour le processus d'optimisation
- il n'existe pas une solution mathématique applicable à tous les problèmes
- il existe une forte demande industrielle

Pour répondre à ces besoins et aussi à l'aspect mathématique de la méthode, nous avons privilégié l'utilisation de la méthodologie des **plans d'expériences**, qui est une méthode plus adaptée à l'optimisation des procédés de fabrication. L'utilisation de cette méthode nous a permis entre autres de répondre à un certain nombre de

questions telles que :

- Quel est le paramètre opératoire le plus influent ?
- Dans quel sens le modifier ?
- Comment les paramètres réagissent entre eux ?

Cette approche permet aussi le calage et le contrôle des paramètres des procédés et des paramètres opératoires de formage. Les plans d'expériences permettent de détecter, parmi un ensemble de combinaisons des paramètres de fabrication (jeu de données), la combinaison optimale pour un objectif donnée.

Afin de couvrir les lacunes citées ci-dessous, dans ce travail nous avons mis en oeuvre une méthode nouvelle capable de prédire l'effet quadratique pour une modélisation par surface de réponse. Cette méthode est en effet un outil nécessaire pour l'optimisation des procédés de fabrication qui ont un caractère fortement non linéaire. Mais l'originalité de cette méthode réside dans le fait qu'elle est adaptée aux essais obtenus par des simulations numériques.

Pour réduire les coûts liés à l'optimisation individuelle des différentes fonctions objectifs, dans une démarche d'optimisation globale nous avons proposé l'utilisation de la méthode de Ch'ng [Ch'05]. Cette méthode propose une optimisation multicritères des réponses d'un système qui ont des caractéristiques fortement non linéaires afin d'éviter les points de discontinuités de la *fonction objectif*.

Nous avons proposé également une approche originale de type hybride qui combine la puissance des trois approches : la méthodologie de surface de réponse, le tolérancement mécanique et le calcul par intervalles. Par cette méthode on donne aux industriels la possibilité d'avoir des procédés robustes pour obtenir des produits d'une qualité supérieure. Les jeux de paramètres proposés par les solutions sur intervalles assurent une meilleure maîtrise sur les produits acceptés pour un procédé de fabrication, grâce à la surface de réponse sur intervalle obtenue par cette méthode.

Dans le même contexte, pour la discipline **Mécanique** nous avons utilisé des modèles de simulation numérique mettant en oeuvre la méthode des éléments finis. Ces derniers permettant de tenir compte des effets du couplage entre les grandes déformations et l'endommagement ainsi que les conditions de contact et de l'usure entre l'outillage et les pièces fabriquées. Ces modèles permettent de prédire d'une façon générale l'évolution des différents types de modes de défaillances rappelés dans cette thèse tels que : le retour élastique, l'endommagement, l'usure ou la fatigue des outils. A partir de ce travail on dispose désormais des connaissances approfondies sur le comportement mécanique des matériaux ainsi que d'une compréhension des mécanismes d'endommagement. Il reste que le transfert vers l'industrie devra être fait pour mieux vérifier nos approches.

La création de l'**OPTIFORM** nous a permis de répondre à la discipline **Informatique** afin de pouvoir mettre en oeuvre plus facilement les nouvelles méthodes proposées. Cet outil d'optimisation est un moyen simple qui facilite la communication avec l'utilisateur par une interface graphique facile à utiliser. Les nombreuses fonctionnalités sont dédiées à servir dans le processus d'optimisation des procédés de mise en forme mais elles peuvent être adaptées à tout processus à une seule condition : de pouvoir lui associer un modèle élément finis.

Dans la dernière partie de ce mémoire nous avons présenté différents types d'applications aux méthodes d'optimisation proposées afin de permettre la réduction de la variation des caractéristiques des pièces fabriquées, engendrée notamment par les défaillances telles que : le retour élastique, usure ou fatigue des outils. Dans ce contexte nous avons proposé l'utilisation de la méthode qui permet la détection du caractère non linéaire de la réponse d'un système obtenue par simulation numérique pour réduire le retour élastique lors du pliage.

L'usure des outils étant un phénomène très complexe, il préoccupe beaucoup les industriels à cause des coûts engendrés par le changement prématuré des outils de fabrication. Afin de répondre à leur besoin nous avons proposé une modélisation de l'usure par la loi d'Archard. La méthode de Ch'ng a été appliquée dans le but d'optimiser plusieurs réponses simultanément telles que : la durée de vie, contraintes de Von Mises, déformations maximales et la pression d'extrusion.

La validation de la méthode hybride proposée dans ce rapport a été faite dans le but de réduire le retour élastique lors de l'opération de l'emboutissage. Cette validation nous a permis de constater que les résultats obtenus sont fiables et que l'application de cette approche donne de bons résultats. Il reste encore du travail à faire au niveau de l'algorithme de calcul par intervalle afin de réduire encore plus les bornes de la surface de réponse mais les résultats obtenus jusqu'à présent sont encourageants.

Les travaux présentés dans ce mémoire ouvrent maintenant plusieurs perspectives. Tout d'abord il faut améliorer le fonctionnement de l'**OPTIFORM** tant au niveau présentation qu'au niveau utilisation pour lui conférer une dynamique adaptée aux nouveaux modules intégrés. Notre souhait est de pouvoir offrir à l'utilisateur un outil interactif et convivial lui permettant de traiter efficacement l'optimisation des procédés à des coûts raisonnables.

Par ailleurs, la modélisation numérique pourrait être sensiblement améliorée en envisageant des modèles spatiaux (3D) qui seront capables de prendre en compte des facteurs comme la température et de permettre la visualisation de la propagation du dommage dans le corps de l'outillage. Dans la même optique, on peut envisager

d'aborder la modélisation des nouveaux procédés tel que l'hydroformage ou formage incrémental. Ces procédés posent à leur tour de nouveaux problèmes qui devront être modélisés par de nouveaux modèles éléments finis capables de se rapprocher le mieux possible de la réalité. L'intégration de nouveaux algorithmes d'optimisation sous contraintes appropriées à la forte non linéarité du problème est une démarche logique qui va permettre une évolution rapide de cet outil d'optimisation et une reconnaissance de l'utilité de ce travail. Le couplage réseaux de neurones, plans d'expériences donnera un algorithme d'optimisation à la fois puissant et robuste parce qu'il va combiner la souplesse d'apprentissage donnée par la première avec l'efficacité assurée par la deuxième. Faute de temps, il ne nous a pas été possible de mettre en place l'idée d'utiliser la méthode de Taguchi afin de réduire la variabilité des procédés obtenue par simulations numériques. Ceci ne nous a donc pas permis de réaliser et tester l'influence de ce qu'on peut appeler *bruits numériques*.

Les besoins industriels de plus en plus forts d'utilisation des techniques ou des outils d'optimisation permettant d'améliorer les procédés de fabrication, nous donnent des raisons de poursuivre la recherche commencée dans ce domaine que nous estimons très prometteuse, d'autant que les procédés de mise en forme resteront dans les années à venir, les procédés les plus utilisés pour la fabrication des pièces métalliques ou non.

Pour montrer l'intérêt économique de notre travail on peut rappeler que les services industriels du travail des métaux regroupent les activités de forge (estampage, matriçage, découpage, emboutissage), métallurgie des poudres, traitement et revêtement des métaux, décolletage et mécanique générale (usinage par enlèvement de matière) ont généré en 1999 un chiffre d'affaires hors taxe d'environ 13.5 milliards d'Euros et en 2001 un chiffre d'affaires hors taxe d'un peu plus de 16 milliards d'Euros<sup>1</sup>.

Les défis des entreprises de ce secteur sont nombreux et la compétitivité est une tâche difficile à assurer vue la forte concurrence existant dans ce domaine. La recherche étant un facteur important dans ce processus, des investissements importants seront nécessaires dans ce domaine pour assurer la qualité des pièces fabriquées et le gain de productivité.

---

<sup>1</sup>Chiffres issus de l'Enquête Annuelle d'Entreprise du Sessi, service des études et des statistiques industrielles du Ministère de l'Économie des Finances et l'Industrie.

# Publications nationales et internationales

## – Revues internationales

1. **D. Lepadatu**, X. Baguenard, A. Kobi, R. Hambli, Luc Jaulin, Spring-back of Stamping Process Optimization Using Response Surface Methodology and Interval Computation, Quality Technology and Quantitative Management, soumise en septembre 2006.
2. **D. Lepadatu**, R. Hambli, A. Kobi, A. Barreau, Optimization of Spring-back in Bending Process using FEM and Response Surface Method, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Received : 6 October 2003 Accepted : 12 February 2004 Published online : 13 April 2005
3. Hambli R., **Lepadatu D.**, Kobi A. and Barreau A., Ductile damage variation analysis during Metal Extrusion Process using Design of experiment technique, International Journal of Vehicle Design, Vol. 39, Nos. 1/2, pp. 51-61, 2005.
4. **D. Lepadatu**, R. Hambli, A. Kobi, A. Barreau, Statistical Investigation of Die Wear in Metal Extrusion Process, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Received : 24 April 2004 / Accepted : 29 July 2004 / Published online : 6 April 2005
5. **D. Lepadatu**, R. Hambli, A. Kobi, A. Barreau, A New Computational Design of Experiments for Metal Bending Process Optimization, Computer Industrial Engineering, - soumise 2004.

## – Conférences nationales et internationales

1. **Daniel LEPADATU**, Ridha HAMBLLI, Abdessamad KOBİ and Alain BARREAU, Multiple response optimisation of fatigue life of die using computer design of experiments, The 2nd International Symposium of

- Theoretical and Applied Mechanics - *Dimitrie I. Mangeron*, Iasi, Romania, 28-30 October 05
2. **D. Lepadatu**, X. Baguenard, A. Kobi, R. Hambli, Luc Jaulin, A new response surface method for manufacturing process optimisation using interval computation. 16th IFAC World Congress, 4-8 Julie 2005, Prague - République Tchèque.
  3. **D. Lepadatu**, X. Baguenard, A. Kobi, R. Hambli, Luc Jaulin, Process optimization using interval computation. QUALITA 2005, 16-18 mars 2005, Bordeaux - France. Actes du congres. Vol 2. pp 505-512.
  4. Lantieri Pascal, Guerin Fabrice, Dumon Bernard, **Daniel Lepadatu**, Ridha Hambli, Reliability estimation from accelerated life testing based on Finite Element Method. QUALITA 2005, 16-18 mars 2005, Bordeaux - France. Actes du congres. Vol 1. pp 379-386.
  5. **D. Lepadatu**, A. Kobi, R. Hambli, A Barreau, Lifetime Multiple Optimisation of Metal Extrusion Die, The 51st Annual Reliability and Maintainability Symposium (RAMS), janvier 2005, Alexandria - Virginia.
  6. Ridha HAMBLLI, **Daniel LEPADATU**, Abdessamad KOBİ and Alain BARREAU, Finite element modeling and optimisation of disc brake wear, I3M International Mediterranean Modeling Multiconference, Genoa, Italy, October 28-30 2004
  7. F. Babus, **D. Lepadatu**, A. Kobi, R. Hambli, Computer Aided Tool for Process Optimization. Application : Metal Bending Process, Proceedings of The 9th International Conference on Quality and Dependability - CCSF'2004, Sinaia - Romania, 29 septembre - 1 octobre., pp. 34-42
  8. **D. Lepadatu**, A. Kobi, R. Hambli, A Barreau, 'Tool life prediction in metal forming processes using numerical analysis' 11th IFAC Symposium on Automation in Mining, Mineral and Metal processing - MMM 2004, Nancy, France, September 8-10, 2004
  9. **D. Lepadatu**, A. Kobi, R. Hambli, A. Barreau, Statistical process control of wear phenomenon during metal extrusion process, The 50th Annual Reliability and Maintainability Symposium (RAMS), 26 - 29 janvier 2004, Los Angeles - Californie.
  10. **D. Lepadatu**, A. Kobi, R. Hambli, A. Barreau, Réduction de l'usure des outils d'extrusion par la méthode de surface de réponse, 3ème Conférence Internationale - Conception et Production Intégrées - CPI'2003, 22, 23, 24 octobre 2003 Meknès, Maroc.

11. **D. Lepadatu**, A. Kobi, R. Hambli, A. Barreau, Application des Plans d'expériences numériques pour la réduction de l'usure des outils d'extrusion, Conférence Internationale d'Utilisateurs Francophones d'ABAQUS - Paris 2002



# Références

- [ABA] ABAQUS. *HKS, Theory manual*, tome Version 6.1.
- [ABA93] ABAQUS. *User's conference. "Writing a (V) Umat". Aachen , Germany, June, 1993.*
- [AH91] AMEZIANE-HASSANI H. et NEALE K. *On the analysis of sheet metal wrinkling. International Journal of Mechanical Science*, tome 33, n° 1 :pages 13 – 21, **1991**.
- [Ahn97] AHN S., KIM T. ET AL. *A study on the prediction of fatigue life in an axi-symmetric extrusion die. JMPT*, tome 71 :pages 343 – 349, **1997**.
- [Ale83] ALEFELD G. et HERZBERGER J. *Introduction to interval computations. Academic Press, 1983.*
- [Ale95] ALEXIS J. *Pratique industrielle de la méthode Taguchi. Les plans d'expériences. 1995.*
- [All00] ALLEN T. et AL. *Low-cost response surface methods applied to the design of plastic fasteners,. Quality Engineering, Volume 12,, tome 12, No. 4, :pages 583–591, 2000.*
- [And05] ANDERSON J. *The influence of grain size variation on metal fatigue. International Journal of Fatigue*, tome 27 :pages 847 – 852, **2005**.
- [Ant04] ANTONIO C.C., F. C. ET AL. *Optimization of metal forming processes, computers and structures. tome 82 :pages 1425 – 1433, 2004.*
- [AO99] ATTOH-OKINE N. *Analysis of learning rate and momentum term in backpropagation neural networks algorithm trained to predict pavement performance. Advanced Engineering Software*, tome 30 :pages 291–392, **1999**.
- [Ara86] ARAVAS N. *The analysis of void growth that leads to central bursts during extrusion. Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, tome 34, n° 1 :pages 55 – 79, **1986**.
- [Arc53] ARCHARD J. *Contact and rubbing of flat surfaces. J. Appl. Phys.*, tome 24 :pages 981 – 988, **1953**.

- [Ari03] ARIF A.F.M., SHEIKH A.K. ET AL. *A study of die failure mechanisms in aluminum extrusion. Journal of Materials Processing Technology*, tome 134, p :, n° Issue 3 :pages 318 – 328, **2003**.
- [Atk97] ATKINS A. *Fracture mechanics and metalforming : damage mechanics and the local approach of yesterday and today*. **1997**.
- [Aub04] AUBERVILLE. *Maintenance industrielle. De l'entretien de base à l'optimisation de la sûreté. Editions Ellipses*. **2004**.
- [Avi86] AVITZUR B. et CHOI J. *Analysis of central bursting defects in plane strain drawing and extrusion. Transactions of the ASME Journal of Engineering for Industry*, tome 108, n° 4 :pages 317 – 321, **1986**.
- [Bab04] BABUS F., LEPADATU D. KOBI A. ET AL. *Computer aided tool for process optimization. application : Metal bending process. Proceedings of The 9th International Conference on Quality and Dependability - CCSF'2004, Sinaia - Romania, 29 septembre - 1 octobre*, pages 34 – 42, **2004**.
- [Bag04] BAGUENARD X., DAO M. ET AL. *Solver intervalpeeler. available at <http://www.istia.univ-angers/baguenar>*, **2004**.
- [Bag05] BAGUENARD X. *Propagation de contraintes sur les intervalles. Application ? l'étalonnage des robots. Thèse de doctorat, Université d'Angers*, **2005**.
- [Bah05] BAHLOUL R., BEN-ELECHI S. ET AL. *Optimisation of springback predicted by experimental and numerical approach by using response surface methodology. Journal of Materials Processing Technology - In press*, **2005**.
- [Bal93] BALUN T., LING P. ET AL. *Detection and elimination of wrinkles on auto-body panel by the binder set analysis,. SAE Tec. pap. series 930515*, **1993**.
- [Bal96] BALAN T. *Optimisation de forme des outils de forgeage par la méthode inverse. Thèse de doctorat, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris - CEMEF - France*, **1996**.
- [Bat95] BATOZ J.L. et GOURI D. *Modélisation des structures par éléments finis*. **1995**.
- [Ben01] BENDING I. *Disponible à l'adresse :. , 01*.  
URL [http://nsmwww.eng.ohio-state.edu/BendingOverview/html/bending\\_system.html](http://nsmwww.eng.ohio-state.edu/BendingOverview/html/bending_system.html)
- [Ben94a] BENHAMOU F., MCALLESTER D. ET AL. *Clp intervals revisited. Proceedings of the International Logic Programming Symposium, Ithaca,NY.*, pages 124 – 138, **1994**.

- [Ben94b] BENOIST D., TOURBIER Y. ET AL. *Plans d'expériences : construction et analyse*. **1994**.
- [Ber74] BERTRANDIE J.J. *Profilage. Technique de l'ingénieur*, **BM7574**.
- [Bes03] BESSE P. *Pratique de la modélisation Statistique - cours*. **2003**.
- [Bha87] BHATT D. *Processing modeling for superplastic forming of metal sheets. U.S. Paten Document*, tome 4658362, **1987**.
- [Bjo89] BJORKE O. *Computer Aided Tolerancing*. Tapir Publishers, Trondheim, Norway., **1989**.
- [Bor90] BORNE P. et AL. *Commande et optimisation des processus*. **1990**.
- [Bos85] BOSTBARGE G., FAURE H. ET AL. *Forgeage à froid de l'acier. choix de l'acier et procédés. Techniques de l'Ingénieur. Traité Matériaux métalliques*, **M 3085**.
- [Bou30] BOUHELIER C. *Travail des métaux en feuilles - formage des tôles fortes. Techniques de l'Ingénieur. Traité Génie mécanique.*, **B7630**.
- [Bou66] BOUHELIER C. *Chaudronnerie lourde, techniques de l'ingénieur, traité génie mécanique*. **A866**.
- [Box51] BOX G.E.P. et WILSON K.B. *On the experimental design for attainment of optimum conditions. Journal of the Royal Statistical Society*, tome Series B 13, :pages 1–45, **1951**.
- [Box87] BOX G. et DRAPER N.R. *Empirical model building and response surfaces*. **1987**.
- [Bra01] BRAEMS, JAULIN L. ET AL. *Set computation, computation of volumes and data safety. Proceedings of SCAN*, **2001**.
- [Bro72] BROZZO P., DELUCA B. ET AL. *A new method for the prediction of formability limits in metal sheets, sheet metal forming and formability. Proceedings of the Seventh Biennial Conf. of the International Deep Drawing Research Group, Amsterdam, Netherlands*, **1972**.
- [Bro95] BROBERG K. *Critical review of some methods in nonlinear fracture mechanics. Engng. Fract. Mech.*, tome 50 :pages 815 – 833, **1995**.
- [Bro03] BROWNE M. et HILLERY M. *Optimising the variables when deep-drawing c.r.1 cups,. Journal of Materials Processing Technology*, tome 136 :pages 64 – 71, **2003**.
- [Bug98] BUGMANN G. *Normalized radial basis function networks. neurocomputing. Radial Basis Function Networks*, tome 20 :pages 97–110, **1998**. Special issue.

- [Bur04] BURSZTYNA D. et M S.D. *Comparison of designs for computer experiments. Journal of Statistical Planning and Inference, In press., 2004.*
- [Bye03] BYENG D. et YOUN K.A.K. *A new response surface methodology for reliability-based design optimization. Computers and Structures, 2003.*
- [Cal01] CALDORA C.M. *Optimisation de dispositifs électromagnétiques dans un contexte d'analyse par la méthode des éléments finis.* Thèse de doctorat, **2001.**
- [Cao97] CAO J. et BOYCE M. *Wrinkling behaviour of rectangular plates under lateral constraint. International Journal Structure, tome 34, n° 2 :pages 153 – 76, 1997.*
- [Car94] CARTER W. *A model for friction in metal forming, journal of engineering material technology. tome 113 :pages 8 – 13, 1994.*
- [Car66] CARTIER M. et KAPSA P. *Usure des contacts mécaniques. Techniques de l'Ingénieur, traité Génie mécanique, BM 5066.*
- [Cas96] CASTILLO E.D. et AL. *Modified desirability function for multiple response optimization. JQT, tome 28., 1996.*
- [Ch'05] CH'NG C. *A new approach for multiple response optimization. Quality Engineering, 2005.*
- [Cha81] CHABOCHE J. *Continuous damage mechanics-a tool to describe phenomena before crack initiation. Nucl. Engrg. Des., tome 64 :pages 233 – 247, 1981.*
- [Cha88] CHABOCHE J. *Phenomenological aspects of continuum damage mechanics. 1th UTAM Int. Congress on Theo. and Applied Mech., Grenoble, France, pages 41–56, 1988.*
- [Cha96] CHARON I., A. G. ET AL. *Méthodes d'optimisation combinatoire. 1996.*
- [Che02] CHENG C.B., CHENG C.J. ET AL. *Neuro-fuzzy and genetic algorithm in multiple response optimization. IJMCA, tome 44 :pages 1503 – 1514, 2002.*
- [Che03] CHEROUAT A., SAANOUNI K. ET AL. *Numerical improvement of thin tubes hydroforming with respect to ductile damage. International Journal of Mechanical Sciences, 2003.*
- [Che04] CHEBOU et AL. *Base de données sur les procédés de fabrication des pièces mécaniques. Rapport de projet de stage., ISTIA - Université d'Angers, 2004. Encadré par R. Hambli.*

- [Cho96] CHOY C. et BALENDRA R. *Experimental analysis of parameters influencing sheared-edge profiles. The 5th Inter. Conference on Sheet Metal, University of Twente, Netherland, 1-3 April, , n° 101 - 110, 1996.*
- [Cho99] CHOU I.N. et CHINGHUA H. *Finite element analysis and optimization on springback reduction. International Journal of Machine Tools & Manufacture, tome 39 :pages 517 – 536, 1999.*
- [Cho03] CHOUDHURY S. et BARTARYA G. *Role of temperature and surface finish in predicting tool wear using neural network and design of experiments. International Journal of Machine Tools and Manufacture, tome 43 :pages 747 – 753, 2003.*
- [Chr97] CHRISTIANSEN S. et DE CHIFFRE L. *'topographic characterization of progressive wear on deep drawing dies,'. STLE Tribol. Trans., tome 40, n° 346 - 352, 1997.*
- [Chu97] CHUNG J. et S.M. H. *Application of a genetic algorithm to the optimal design of the die shape in extrusion. J. Mater. Process. Technol, tome 72 :pages 69 – 77, 1997.*
- [Cia94] CIARLET P.G. *Introduction à l'analyse numérique matricielle et à l'optimisation, . Barcelone : Masson, pages 167– 201., 1994.*
- [Cla50] CLAVIER J. *Qualité et qualitique. Techniques de l'ingénieur, A 8 750.*
- [Cle87] CLEARY J.G. *Logical arithmetic. Future Computing Systems,, tome 2, n° 2 :pages 125–149, 1987.*
- [Cli90] CLIFT S., HARTLEY P. ET AL. *Fracture prediction in plastic deformation process. Int. J. Mech. Sci., tome 32 n°1, p : , :pages 1 – 17, 1990.*
- [Coc66] COCKROFT M. et LATHAM D. *A simple criterion for fracture for ductile-fracture of metals. National Engineering Laboratory, Report 240, 1966.*
- [Coc68] COCKROFT M. et LATHAM D. *Ductility and the workability of metals. J. Inst. Metals, pages 33 – 46, 1968.*
- [Col10] COL A. *Emboutissage des tôles. importance des modes de déformation. Techniques de l'Ingénieur, BM 7 510.*
- [Col72] COLLINET. *Le filage. 2e partie : L'écoulement pendant le filage. (billette expérimentale feuilletée : influence de la lubrification vitreuse sur l'écoulement du métal). Cefilac-Persan, 1972.*
- [Col11] COL A. *Emboutissage des tôles. aspect mécanique. Techniques de l'Ingénieur, BM 7511.*

- [Cor90] CORNELL J. *How to Apply Response Surface Methodology*, tome vol. 8. **1990**.
- [Cor04] CORREIA D.M.J. et FERRON G. *Wrinkling of anisotropic metal sheets under deep-drawing : analytical and numerical study. Journal of Materials Processing Technology*, tome 155 - 156 :pages 1604 – 1610, **2004**.
- [Cou99] COUPEZ T. et NOUATIN A.I. *Optimisation of forming by using the simplex method and preliminary results on an explicit 3d viscoelastic solution. J. A. Covas (éditeur), 2nd ESAFORM Conference, Guimarães, pages 477 – 480, 1999*.
- [Cra99] CRARY S., COUSSEAU P. ET AL. *Optimal design of computer experiments for the generation of microsystem macromodels using imset and non-parametric fitting. International Conference on Modeling and Simulation of Microsystems - Puerto Rico, USA, 1999*.
- [Cra01] CRARY S.B. et AL. *Designing efficient computer experiments for meta-model generation. Proceedings of the International Conference on Modeling and Simulation of Microsystems Nanotech, 2001*.
- [Cri91] CRIESFELD M. *Nonlineaire finite element analysis of solids and structure*, tome 1. **1991**.
- [Cun42] CUNAT P.J. *Aciers inoxydables. mise en oeuvre. Techniques de l'Ingénieur, M4542*.
- [Dan03] DANTAN et AL. *Spécification géométrique fonctionnelle des engrenages par frontière virtuelle. CPI'2003 - Mekhnès Maroc, 2003*.
- [Dao01] DAO M., BAGUENARD X. ET AL. *Solver proj2d. available at - <http://www.istia.univ-angers/dao/Proj2DV2.zip/>, 2001*.
- [Dav87] DAVIS E. *Constraint propagation with interval labels. Artificial Intelligence*, tome 32, n° 3 :pages 281–331, **1987**.
- [Daw97] DAWSON P., BAMMANN D. ET AL. *Modeling the influence of gradients in strength on the evolution of damage in metals. In : M. Predeleanu and P. Gilormini, Editors, Advanced Methods in Materials Processing DefectsStudies in Applied Mechanics*, tome 45 :pages 99 – 110, **1997**.
- [Dea00] DEAN A. et ALL. *Design and Analysis of Experiments*,. **2000**.
- [DeL00] DELOACH R. *Improved quality in aerospace testing trough the modern design of experiments. 38th, Aerospace Science Meeting - January Reno, Nevada, 2000*.

- [Del02] DELANNOY C. *Programmer en Fortran 90 - Guide complet*. Eyrolles, **2002**.
- [Der80] DERRINGER G. et AL. *Simultaneous optimization of several response variables*. *JQT*, tome 12, **1980**.
- [Di97] DI S. et THOMSON P. *Neural network approach for prediction of wrinkling limit in square metal sheet under diagonal tension*. *J Test Eval, JTEVA*, tome 25, n° 1 :pages 74 – 81, **1997**.
- [DMC01] DE MAGALHAES CORREIA J.P. et FERRON G. *Étude analytique et numérique de l'apparition du plissement en emboutissage*. *XV - ème Congres Français de Mécanique, Nancy, 3-7 Septembre*, **2001**.
- [Dra99] DRAPER J. *Modern metal fatigue analysis*. **1999**.
- [Dro97] DROESBEKE J.J., FINE J. ET AL. *Plans d'expériences. Applications à l'entreprise*. **1997**.
- [Duc80] DUCROCO J.C. et SAUMON D. *Optimisation des processus énergétiques : concepts*. *Techniques de l'ingénieur*, **B 1 280**.
- [Duf80] DUFALLY J. *Modélisation mécanique et identification de l'endommagement plastique des métaux*. Thèse de doctorat, Univ. Pierre et Marie Curie - Paris 6, **1980**.
- [EK01] EL-KASSAS E.M.A., MACKIE R.I. ET AL. *Using neural networks in cold-formed steel design*. *Computers & Structures*, tome 79, n° 18 :pages 1687 – 1696, **2001**.
- [Emb02] EMBOUTISSAGE I. *Disponible à l'adresse :. <http://www.amysa.com/Html/FR/b1.htm>*, **02**.
- [Eng60] ENGERAND J.L. *Techniques de l'ingénieur, mécanique de la rupture*. *Traité Génie mécanique*, **B 5060**.
- [Ext01] EXTRUSION P.M. *Disponible à l'adresse internet*. , **01**.
- [Fal01] FALK B., ENGEL U. ET AL. *Fundamental aspects for the evaluation of the fatigue behaviour of cold forging tools*. *Journal of Materials Processing Technology*, tome 119, :pages 158 – 164, **2001**.
- [Fan05] FAN J., TANG C. ET AL. *3d finite element simulation of deep drawing with damage development*. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, tome 1 - 10, **2005**.
- [Fau04] FAUCHER J. *Pratique de l'AMDEC*. **2004**.
- [Fel00] FELDER E. *Procédes de mise en forme. introduction*. *Technique de l'ingénieurs*, **M 3000**.

- [Fis01] FISSURE I. *Disponible à l'adresse. <http://www.efunda.com>*, **01**.
- [Fis95] FISCHER F., KOLEDNIK O. ET AL. *A note on calibration of ductile failure damage indicators. Int. J. Fracture*, tome 73 :pages 345 – 357, **1995**.
- [Fis97] FISHMAN G.S. *Monte-Carlo Concepts, Algorithms and Applications*. **1997**.
- [Flo94] FLOQUET P. *Optimisation et génie des procédés. De l'algorithme à la logique floue*. **1994**.
- [Fol91] FOLLOWELL D.A. et AL. *Computer aided reliability finite element method. Proceedings Annual Reliability and Maintainability Symposium. RAMS*, **1991**.
- [For98] FORCELESE A., FRATINI L. ET AL. *The evaluation of springback in 3d stamping and coining processes. Journal of Materials Processing Technology*, tome 80 - 81 :pages 108 – 112, **1998**.
- [For04] FORESTIER R. *Développement d'une méthode d'identification des paramètres par analyse inverse couplée avec un modèle éléments finis 3D*. Thèse de doctorat, École Nationale Supérieure des Mines de Paris., **2004**.
- [Fou96a] FOURMENT L. et CHENOT J. *Optimal design for non-steady-state metal forming processes. i. shape optimal design method. Int. J. Numer. Meth. Eng.*, tome 39 :pages 33–50, **1996**.
- [Fou96b] FOURMENT L. et CHENOT J. *Optimal design for non-steady-state metal forming processes. ii. application of shape optimization in forging. Int. J. Numer. Meth. Eng.*, tome 39 :pages 51– 65, **1996**.
- [Fow98] FOWLKES W.Y. et CREVELING C.M. *L'ingénierie robuste*. **1998**.
- [Fra26] FRANÇOIS D. *Essais de rupture. Techniques de l'Ingénieur*, **M 126**.
- [GA99] GEUN-AN L. et AL. *Finite element investigation of the wear and elastic deformation of dies in metal forming. Journal of Materials Processing Technology*, tome 89 - 90 :pages 123 – 127, **1999**.
- [Gan02] GANAPATHYSUBRAMANIAN S. et ZABARAS N. *A continuum sensitivity method for finite thermo-inelastic deformations with applications to the design of hot forming processes. Int. J. Numer. Methods Engrg.*, tome 55 :pages 1391 – 1437, **2002**.
- [Gan05] GANTAR G. et KUZMAN K. *Optimization of stamping processes aiming at maximal process stability. Journal of Materials Processing Technology*, tome 167 :pages 237 – 243, **2005**.

- [Gau01] GAU J.T. et KINZEL G.L. *An experimental investigation of the influence of the bauschinger effect on springback predictions. Journal of Materials Processing Technology*, tome 108 :pages 369 – 375, **2001**.
- [GD03] GIERZYNSKA-DOLNA M. et LACKI P. *Some aspect of modeling of metal forming process. Computer and Structures*, tome 81 :pages 605 – 613, **2003**.
- [Gel98] GELIN J.C. *Modelling of damage in metal forming processes. Journal of Materials Processing Technology*, tome Volumes 80 - 81 :pages 24 – 32, **1998**.
- [Ger97] GERTH R. *Tolerance Analysis : A Tutorial of Current Practice.*, chapitre Chpt. 4. *Advanced Tolerancing Techniques*, **1997**.
- [Gou83] GOURDIN A. et BOUMAH RAT M. *Méthodes numériques Appliquées (avec nombreux problèmes résolus en Fortran IV)*. Paris : Lavoisier Technique et Documentation, **1983**.
- [Gou99] GOUPY J. *Plans d'expériences pour surface de réponse*. **1999**.
- [Gou00] GOUVEIA B., RODRIGUES J. ET AL. *Ductile fracture in metalworking : an experimental and theoretical research. J. Mater. Process Tech.*, tome 101 :pages 52 – 62, **2000**.
- [Gra02a] GRANVILLIERS et JAULIN L. *Introduction aux contraintes d'intervalles. application à l'estimation à erreurs bornées. Disponible à l'adresse : <http://www.istia.univ-angers.fr/jaulin/publications.html>*, **2002**.
- [Gra02b] GRANVILLIERS L. *Realpaver. Disponible à l'adresse - <http://www.sciences.univnantes.fr>*, **2002**.
- [Gua01] GUAN X. et MELCHERS R. *Effect of response surface parameter variation on structural reliability estimates. Structural Safety*, tome 23 :pages 429 – 444, **2001**.
- [Guo02] GUO Y.Q., GATI W. ET AL. *An efficient dkt rotation free shell element for springback simulation in sheet metal forming. Computers & Structures*, tome Volume 80, n° Issues 27-30 :pages 2299 – 2312., **2002**.
- [Gur77] GURSON A.L. *Continuum theory of ductile rupture by void nucleation and growth. J. Eng. Materials and Technology , Trans. of the ASME.*, tome 99 :pages 2 – 15, **1977**.
- [Ham95] HAMMER R., HOCKS M. ET AL. *C++ Toolbox for Verified Computing*. **1995**.

- [Ham96] HAMBLI R. *Étude expérimentale, numérique et théorique du découpage des tôles en vue de l'optimisation du procédé*. Thèse de doctorat, ENSAM ANGERS, **1996**.
- [Ham00a] HAMBLI R. et ALL. *Damage en fracture simulation during the extrusion process. Comput. Methods Appl. Mech. Engrg.*, **2000**.
- [Ham00b] HAMMI Y. *Simulation numérique de l'endommagement dans les procédés de mise en forme*. Thèse de doctorat, Université de Technologie Compiègne, **2000**.
- [Ham01a] HAMBLI R. *Blanking tool wear modelling using the finite element method, international. Journal of Machine Tools and Manufacture*, tome 41 :pages 1815 – 1829, **2001**.
- [Ham01b] HAMED E. et ADER S. *Application of multiple response optimization technique to extend release formulation design. JCR*, tome 73, **2001**.
- [Ham05a] HAMBLI R. *Statistical damage analysis of extrusion process using finite element and neural network simulation. International Journal of Plasticity*, **2005**.
- [Ham05b] HAMBLI R., LEPADATU D. ET AL. *Ductile damage variation analysis during metal extrusion process using design of experiment technique. Int. J. Vehicle Design*, tome 39, n° 1/2 :pages 51 – 61, **2005**.
- [Han92] HANSEN E. *Global Optimization Using Interval Analysis*. **1992**.
- [Hao99] HAO J.K., GALINIE P. ET AL. *Méthodes heuristiques pour optimisation combinatoire et l'affectation sous contraintes. Revue d'intelligence artificielle*, **1999**.
- [Har65] HARRINGTON E.C. *The desirability function*,. *IQC 21*, **1965**.
- [Has02] HASSAN M., TAKAKURA N. ET AL. *Friction aided deep drawing of sheet metals using polyurethane ring and auxiliary metal punch. part 1 : experimental observations on the deep drawing of aluminium thin sheets and foils. International Journal of Machine Tools & Manufacture*, tome 42 :pages 625 – 631, **2002**.
- [Hay94] HAYKIN S. *Neural networks - a comprehensive foundation. New York : Macmillan*, **1994**.
- [Hei97] HEINZEL C. et AL. *Model based optimisation of grinding process using genetic algorithm and target tree method. Fift European Congress on Intelligent Techniques and Soft Computing, Aachen, Germany - EUFIT '97*, **1997**.

- [Hor99] HORTING D. et SCHMOECKEL D. *Analysis of local loads on the draw die profile with regard to wear using the fem and experimental investigations. The 7th International Conference on Sheet Metal, Erlangen, Germany, 25-28 Sept.*, pages 193 – 202, **1999**.
- [Imb95] IMBERT J.F. *Analyse des structures par éléments finis*. **1995**.
- [Ina02] INAMDAR M., DATE P. ET AL. *On the effect of geometric parameters on springback in sheets of five materials subjected to air vee bending. Journal of Materials Processing Technology*, tome 123, :pages 459 – 463, **2002**.
- [Inc04] INCANDELA O. et AL. *Modelling and analysis of a deep-drawing operation : key factors for successful comparisons between experimental and simulated results. Journal of Materials Processing Technology*, tome 155 - 156 :pages 1105 – 1110, **2004**.
- [Jai00] JAISINGH A. et AL. *Sensitivity analysis of deep drawing process. 9th International Conference on Sheet Metal, Leuven 2 - 4 April*, **200**.
- [Jau01] JAULIN L. et AL. *Applied Interval Analysis, with Examples in Parameter and State Estimation, Robust Control and Robotics*. **2001**.
- [Jen97] JENKINS W.M. *An introduction to neural computing for the structural engineer. The Struct Engng*, tome 75, n° 3 :pages 38 – 41, **1997**.
- [Jen98] JENSEN M., DAMBORG F. ET AL. *Applying the finite element method for determination of tool wear in conventional deep-drawing. Journal of Materials Processing Technology*, tome 83 :pages 98 – 105, **1998**.
- [Jeo01] JEONG D.J., KIM D.J. ET AL. *Effects of surface treatments and lubricants for warm forging die life. Journal of Materials Processing Technology*, tome 113, n° Issues 1-3 :pages 544 – 550, **2001**.
- [Ju01] JU Y., SAKA M. ET AL. *N d e of closed fatigue crack on the metal surface by microwaves. 10th Asia-Pacific Conference on Non-Destructive Testing, 17 - 21 September - Brisbane, Australia.*, **2001**.
- [Kac58] KACHANOV L. *Time of the rupture process under creep conditions. Izv. Akad. Nauk. SSR Otd., Teekh. Nauk*, tome 8 :pages 26 – 31, **1958**.
- [Kal91] KALPAKJIAN S. *Manufacturing processes for engineering materials*,. Addison Wesley Publishing Company - 2nd edition, **1991**.
- [Kaz03] KAZUTAKE K. *Effect of ductile fracture criteria on chevron crack formation and evolution in drawing, international journal of mechanical sciences*. tome 45 :pages 141 – 160, **2003**.

- [Kea97] KEARFOTT R.B. *Rigorous global search : Continuous problems.* Kluwer Academic Publishers, Dordchet, **1997**.
- [Kha04] KHALFALLAH A. *Identification de lois de comportement elastoplastique par essais inhomogènes et simulations numériques.* Thèse de doctorat, **2004**.
- [Khu87] KHURI A.I. et CORNELL J. *Response Surface Design, and Analysis,* Marcel Dekker, New York, NY, **1987**.
- [Kle99] KLEINERMANN J.P. et PONTHOT J.P. *Optimization methods for inverse problems in large strain plasticity.* E.M. Croitoro (Ed.), *Proceedings of the First Canadian Conference on Nonlinear Solid Mechanics, CANCNSM' 99, Canada, June*, tome 1 :pages 244 – 253, **1999**.
- [Kle03] KLEINERMANN J.P. et PONTHOT J.P. *Parameter identification and shape/process optimization in metal forming simulation.* *Journal of Materials Processing Technology*, tome 139 :pages 521 – 526, **2003**.
- [Ko96] KO D.C., KIM B.M. ET AL. *Prediction of surface-fracture initiation in the axisymmetric extrusion and simple upsetting of an aluminium alloy.* *J. Mater. Process Technology*, tome 62 :pages 166 – 178., **1996**.
- [Ko00] KO D.C. et KIM B.M. *Development of an analytical scheme to predict the need for tool regrinding in shear process.* *Int. J. Mach. Tools Manuf*, tome 40 :pages 1329 –1349., **2000**.
- [Koe96] KOEHLER J.R. et OWEN A.B. *Computer Experiments, Handbook of Statistics*, tome 13. **1996**.
- [Kom99] KOMORI K. *Simulation of chevron crack formation and evolution in drawing, international journal of mechanical sciences.* tome 41 :pages 1499 – 1513, **1999**.
- [Kri75] KRIN J.B. *Initiation à la programmation en Fortran.* Paris : Centre d'édition et de documentation de l'ENSTA, **1975**.
- [Kur85] KURT L. *Handbook of metal forming.* McGraw- Hill Book Company, **1985**.
- [Kyu00] KYUNG K.C. et NAM H.K. *Design optimization of deep drawing process,* Published by the American Institute of Aeronautics and Astronautics, **2000**.
- [Lap98] LAPEYRE B., PARDOUX E. ET AL. *Méthodes de Monte-Carlo pour les équations de transport et de diffusion.* **1998**.

- [Lar03] LAROUSSE M. *Analyse de sensibilité 3D par la méthode de l'état adjoint - Application au forgeage*. Thèse de doctorat, **2003**.
- [Lau97] LAURO F., BARRIRE T. ET AL. *Damage framework for the prediction of material defects : identification of the damage material parameters by inverse technique*,. M. Predeleanu, P. Gilormini (Eds.), *Advanced Methods in Materials Processing Defects, Studies in Applied Mechanics*, tome 45 :pages 165 – 174, **1997**.
- [Lee99] LEE G.A. et ALL. *Finite element investigation of the wear and elastic deformation of dies in metal forming*. *Journal of Materials Processing Technology*, **1999**.
- [Lee00] LEE Y.C. et ALL. *Failure analysis of a cold-extrusion punch to enhance its quality and prolong its life*. *JMPT*, tome 105, **2000**.
- [Lem85] LEMAITRE J. *A continuous damage mechanics model for ductile fracture*. *Journal of Engineering Materials and Technology*, tome 107 :pages 83–89, **1985**.
- [Lem92] LEMAITRE J. *A Course in Damage Mechanics*. **1992**.
- [Lem00] LEMAITRE J., DESMORAT R. ET AL. *Anisotropic damage laws of evolution*. *Eur. J. Mec A/Solids*, tome 19 :pages 187 – 208, **2000**.
- [Lep02] LEPADATU D., HAMBLI R. ET AL. *Application des plans d'expériences numériques pour la réduction de l'usure des outils d'extrusion*. *Conférence Internationale d'Utilisateurs Francophones d'ABAQUS - Paris*, **2002**.
- [Lep03] LEPADATU D., KOBİ A. ET AL. *Réduction de l'usure des outils d'extrusion par la méthode de surface de réponse*,. 3ème Conférence Internationale - Conception et Production Intégrées - CPI'2003, 22, 23 & 24 octobre, Meknès, Maroc., **2003**.
- [Lep04a] LEPADATU D., HAMBLI R. ET AL. *A new computational design of experiments for metal bending process optimization*. *Computer Industrial Engineering - In press*, **2004**.
- [Lep04b] LEPADATU D., KOBİ A. ET AL. *Statistical process control of wear phenomenon during metal extrusion process*. *The 50th Annual Reliability & Maintainability Symposium (RAMS), 26 - 29 January, Los Angeles - Californie*, **2004**.
- [Lep05a] LEPADATU D., BAGUENARD X. ET AL. *A new response surface method for manufacturing process optimisation using interval computation*. *16th IFAC World Congress, 4-8 Julie 2005, Prague - République de Tchèque*, **2005**.

- [Lep05b] LEPADATU D., HAMBLI R. ET AL. *Optimization of springback in bending process using fem and response surface method. International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, tome 27 :pages 40 – 47, **2005**.
- [Lep05c] LEPADATU D., HAMBLI R. ET AL. *Statistical investigation of die wear in metal extrusion process. International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, **2005**.
- [Lep05d] LEPADATU D., KOBI A. ET AL. *Lifetime multiple optimisation of metal extrusion die. The 51st Annual Reliability & Maintainability Symposium (RAMS) 27-30 janvier - Alexandria - Virginia.*, **2005**.
- [Lia02] LIA K., CARDENB W. ET AL. *Simulation of springback. International Journal of Mechanical Sciences.*, tome 44 :pages 103 –122., **2002**.
- [Lih04] LIHUI L., JOACHIM D. ET AL. *Investigation into hydrodynamic deep drawing assisted by radial pressure part i. experimental observations of the forming process of aluminum alloy,. Journal of Materials Processing Technology*, tome 148 :pages 119 – 131, **2004**.
- [Lin03] LIN Z., XIA J. ET AL. *Optimization of die profile for improving die life in the hot extrusion process. Journal of Materials Processing Technology*, tome 142 :pages 659–664, **2003**.
- [Lin05] LINGBEEK R., HUETINK J. ET AL. *The development of a finite elements based springback compensation tool for sheet metal products. Journal of Materials Processing Technology*, tome 169 :pages 115 – 125, **2005**.
- [Liu02] LIU G. et AL. *Variable blankholder force in u-shaped part forming for eliminating springback error, journal of materials processing technology.* tome 120 :pages 259 – 264, **2002**.
- [Liu05] LIU Y. et SANKARAN M. *Multiaxial high-cycle fatigue criterion and life prediction for metals. International Journal of Fatigue*, tome 27 :pages 790 – 80, **2005**.
- [Liv02] LIVATYALIA H., WUB H. ET AL. *Prediction and elimination of springback in straight flanging using computer-aided design methods part 2 : Fem predictions and tool design. Journal of Materials Processing Technology*, tome 120 :pages 348–354, **2002**.
- [LP01] LI-PING L., SANG-MOON H. ET AL. *Finite element analysis and design in stainless steel sheet forming and its experimental comparison. Journal of Materials Processing Technology*, tome 110 :pages 70 – 77, **2001**.
- [Lu43] LU J. *Fatigue des alliages ferreux - facteurs d'influence. Techniques de l'Ingénieur, Traité Génie mécanique, BM 5043*.

- [Mad69] MADAYAG A. *Metal Fatigue : Theory and Design*. **1969**.
- [Man98] MANGNIN V. *Contribution à l'étude et à l'optimisation de composants optoélectroniques*,. Thèse de doctorat, **1998**.
- [Man02] MANGNIN V. *Optimisation et algorithmes génétiques. Notes de cours*,. **2002**.  
URL <http://www.eudil.fr/~vmagnin/coursag/index.html>
- [Mar84] MARQUES J.M.M. *Stress computation in elastoplasticity. C.Eng. Comp*, tome 1, **1984**.
- [Mar99] MARTY C. et LINARES J.M. *Industrialisation des produits mécaniques - Procédés de fabrication*. **1999**.
- [Mat40] MATHIEU D. et PHAN-THAN-LUU. *Planification d'expériences en formulation : criblage. Techniques de l'ingénieur*, **J 2 240**.
- [Mat02] MATHA M. et GRIZEL B. *Finite element approach in the plate bending process. Journal of Materials Processing Technology*, tome 125 - 126 :pages 778 – 784, **2002**.
- [Maz87] MAZILU P. *Prediction of the wrinkling instabilities by long wavelength perturbation in thin sheet metal form. In : Predeleanu M, editor. Computational methods for predicting material processing defects. Amsterdam : Elsevier ;, pages 263 – 274, 1987*.
- [McC68] McCLINTOCK F. *A criterion for ductile fracture by the growth of holes. Journal of Applied Mechanics*, pages 363 – 371, **1968**.
- [McV05] McVEIGH et AL. *Prediction of central bursting during axisymmetric cold extrusion of a metal alloy containing particles. International Journal of Solids and Structures - In press, 2005*.
- [Mil02] MILBERG C., IRIS D.T. ET AL. *Improving design fitness through tolerance analysis and tolerance allocation. 3rd International Conference on Concurrent Engineering in Construction 1-2 July - University of California, Berkeley., 2002*.
- [Min45] MINER M.A. *Cumulative damage in fatigue. J Appl Mech, Trans Am Soc Mech Engrs*, tome 67, n° A149, **1945**.
- [Mka02] MKADDEM A., HAMBLI R. ET AL. *Comparison between gurson and lemaître models in wiping die bending. International Journal of Advanced Manufacturing, 2002*.
- [Mka03] MKADDEM A. *Expérimentation et simulation du pliage des tôles H.L.E. Prévission du comportement en service des pièces pliées*. Thèse de doctorat, ENSAM Angers, **2003**.

- [Mon00] MONTHEILLET F. *Métallurgie en mise en forme. Techniques de l'Ingénieur*, **M 600**.
- [Mon01] MONTGOMERY D.C. *Design and analysis of experiments*. **2001**.
- [Moo66] MOORE R.E. *Interval Analysis*. **1966**.
- [Moo79] MOORE R. *Methods and applications of interval analysis. SIAM Studies in Applied Mathematics, Philadelphia*, **1979**.
- [Mor78] MORRIS D.M., REAUGH J.E. ET AL. *A plastic-strain, mean stress criterion for ductile fracture. Journal of engineering materials and technology*, tome 100, **1978**.
- [Nad05] NADER A., ZAMPALONI M.A. ET AL. *Wrinkling control in aluminum sheet hydroforming. International Journal of Mechanical Sciences*, tome 47 :pages 333 – 358, **2005**.
- [Nam02] NAM H.K., KI YOUNG Y. ET AL. *Mesh free analysis and die shape design of extrusion process. American Institute of Aeronautics and Astronautics*, **2002**.
- [Nar95] NARAYANASAMY R. et SOWERBY R. *Wrinkling behaviour of cold rolled sheet metals when drawing through a tractrix die. Journal of Material Processing Technology*, tome 49 :pages 199 – 211, **1995**.
- [Nar05] NARAYANASAMY R. et LOGANATHAN C. *The influence of friction on the prediction of wrinkling of prestrained blanks when drawing through a conical die. Materials and Design - In press*, **2005**.
- [Nee72] NEEDLEMAN A. *Void growth in an elastic-plastic medium. Journal of Applied Mechanics*, tome 39 :pages 964 – 970, **1972**.
- [Nel65] NELDER J. et MEAD R. *A simplex method for function minimization. Computer Journal*, tome 7 :pages 308 – 313, **1965**.
- [Neu90] NEUMAIER A. *Interval methods for systems of equations. Cambridge University Press*, **1990**.
- [Ngo98] NGOI B.A. et ONG C.T. *Product and process dimensioning and tolerancing techniques : A state-of-the-art review. International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, tome 14 :pages 910 – 917, **1998**.
- [Noo03] NOORDIN M., VENKATESH V. ET AL. *Application of response surface methodology in describing the performance of coated carbide tools when turning aisi 1045 steel. Journal of Materials Processing Technology*, **2003**.
- [Nou87] NOUGIER J. *Méthodes de calcul numérique*. **1987**.

- [Oha98] OHATA T., NAKAMURA Y. ET AL. *Improvement of optimum process design system by numerical simulation. J. Mater. Process. Technol.*, tome 80 - 81 :pages 635 – 641, **1998**.
- [Onu03] ONUR K. et NECIP D. *Joint optimization of mean and standard deviation using response surface methods. Journal of Quality Technology*, tome 35, n° 3, **2003**.
- [Oth98] OTHMANI I. *Optimisation multicritère : fondements et concepts*. Thèse de doctorat, **1998**.  
URL <http://publications.imag.fr/publications/theses/1998/Othmani.Imed/notice-francais.html>
- [Oua01] OUABIBA et AL. *Couplage entre des methods d'optimisation iteratives et des methodes de simulation à eveniments discrets. 3eme Conférence Francophone de MOdélisation et SIMulation "Conception, Analyse et Gestion des Systèmes Industriels" MOSIM'01 - du 25 au 27 avril - Troyes (France).*, **2001**.
- [Oya80] OYANE M., SATO T. ET AL. *Criteria for ductile fracture and their application'. Journal of Mechanical Working Technology*, tome 4 :pages 65 – 81, **1980**.
- [Pai96] PAITER B., SHIVPURI R. ET AL. *Prediction of die wear during hot-extrusion of engine valves. Journal of Materials Processing Technology*, tome 59 :pages 132 – 143, **1996**.
- [Pap96] PAPADRAKAKIS V.P. et LAGAROS N. *Structural reliability analysis of elastic-plastic structures using neural networks and monte carlo simulation. Comput. Methods Appl. Mech. Engrg.*, tome 136 :pages 145 – 163, **1996**.
- [Par83] PARK J. J. ANDREBELO N. et KOBAYASHI S. *A new approach to pre-form design in metal forming with the finite element method. Int. J. Tool Des. Res.*, tome 23, n° 1 :pages 71 – 79, **1983**.
- [Par01] PARKER P., MORTON M. ET AL. *A single-vector force calibration method featuring the modern design of experiments. 39 th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, Reno Nevada*, **2001**.
- [Par05] PARK Y. et COLTON J.S. *Failure analysis of rapid prototyped tooling in sheet metal forming- cylindrical cup drawing. Journal of Manufacturing Science and Engineering*, tome 127 :pages 127 – 137., **2005**.

- [Pay04] PAYAN J. *Etude du comportement de composites stratifiés sous chargement statique et de fatigue*. Thèse de doctorat, Université Aix-Marseille II, **2004**.
- [Pel71] PELLETIER J.P. *Techniques numériques appliquées au calcul scientifique*. **1971**.
- [Per40] PERNOT M. *Filage de l'acier et des métaux difficiles à déformer. Techniques de l'Ingénieur, Traité Matériaux métalliques*, M **640**.
- [Pha00] PHAM D.T.E.A. *Intelligent optimisation Techniques. Genetic Algorithms, Tabu Search, Simulated Annealing and Neural Networks..*, Springer-Verlag New York, **2000**.
- [Pic92] PICART P., OUDIN J. ET AL. *Finite element simulation of void nucleation growth and coalescence in isotropic standard elasto-plasticity : application to cold forging. Journal of Materials Processing Technology*, tome 32, n° Issues 1- 2 :pages 179 – 188, **1992**.
- [Pil97] PILLET M. *Les plans d'expériences par la méthode Taguchi*. **1997**.
- [Pil02] PILLET M. *Avant les plans d'expériences. l'entonnoir à x! 6eme Colloque Expérimentique Orleans 13 juin.*, **2002**.
- [Pit01] PITOSET X. *Méthodes spectrales pour une analyse en fatigue des structures métalliques sous chargements aléatoires multiaxiaux*. Thèse de doctorat, **2001**.
- [Pom95] POMEY G. et PARNIERE P. *Travail des métaux en feuilles. aptitude à l'emboutissage des tôles minces. Techniques de l'Ingénieur*, M **695**.
- [Por29] PORTE C. *Méthodes directes d'optimisation. méthodes dérivées de la méthode simplex. Techniques de l'ingénieur*, page 229 pages, P **229**.
- [Pre92] PRESS W.H. *Numerical Recipes in C : The Art of Scientific Computing*. Cambridge University Press, ISBN 0-521-43108-5, **1992**.
- [Pre97] PREDELEANU P.G. *Advanced Methods in Materials*, tome 45. **1997**.
- [Pro96] PROCACCIA et AL. *Fiabilité des structures des installations industrielles, Éditions Eyrolles*. **1996**.
- [Que04] QUESADA M., DEL-CASTILLO E. ET AL. *A bayesian approach for multiple response surface optimisation in the presence of noise variables.. Journal of applied statistics*, tome 31, n° 3 :pages 251–270, **2004**.
- [Raf01] RAFIQ M.Y., BUGMANN G. ET AL. *Neural network design for engineering applications. Computers & Structures*, tome 79, n° 17 :pages 1541 – 1552, **2001**.

- [Ram20] RAMBAUD J.B. *Forgeage libre de l'acier. Technique de l'ingénieur*, **M 620**.
- [Rat98] RATSCHKEK H. et ROKNE J. *New computer methods for global optimization*,. *Ellis Horwood Ltd.*, **1998**.
- [Rat00] RATSCHAN S. *Approximate quantified constraint solving. AQCS*, pages 861–880, **2000**.
- [Red96] REDDY N., DIXIT P. ET AL. *Central bursting and optimal die profile for axisymmetric extrusion. Transactions of the ASME Journal of Manufacturing Science and Engineering*, tome 118, n° 3 :pages 579 – 584, **1996**.
- [Ren95] RENDERS J.M. *Algorithmes génétiques et réseaux de neurones, applications à la commande de processus*,. **1995**.
- [Ren10] RENE M. *Formage à la presse. Techniques de l'Ingénieur. Traité Génie mécanique*, **B 7510**.
- [Rev01] REVOL N. *Introduction à l'arithmétique par intervalles. Projet INRIA*, **2001**.
- [Ric69] RICE J.R. et TRACEY D.M. *On the ductile enlargement of voids on triaxial stress fields. J. Mech. Phy. Solids*,, tome 17 :pages 201–217, **1969**.
- [RO40] RONDÉ OUSTEAU F. *Conception et mise au point de gamme d'emboutissage*,. *Technique de l'ingénieur. Traité Génie mécanique*,. **B 7 540**.
- [Roh01] ROHLER M. et AL. *Springback prediction on a ring taken from a deep drawn cup. 9th International Conference on Sheet Metal, Leuven 2 - 4 April*, **2001**.
- [Saa01] SAANOUNI K., CHEROUAT A. ET AL. *Numerical aspects of finite elastoplasticity with isotropic ductile damage for metal forming. Revue européenne des éléments finis*, tome 10, n° 2 - 4 :pages 327 – 351, **2001**.
- [Sac89a] SACKS J.E.A. *Design and analysis of computer experiments. Statistical Science*, tome 4, No. 4 :pages 409–435, **1989**.
- [Sac89b] SACKS J.E.A. *Design of computer experiments. American Statistical Association and American Society for Quality Control, Technometrics*, tome 31 No. 1., **1989**.
- [Sak84] SAKAROVITCH M. *Optimisation combinatoire : méthodes mathématiques et algorithmiques : graphes et programmation linéaire*,. **1984**.

- [Sam00] SAMUEL M. *Experimental and numerical prediction of springback and side wall curl in u-bendings of anisotropic sheet metals. Journal of Materials Processing Technology*, tome 105 :pages 382 – 393, **2000**.
- [Sch98] SCHIMMERLING P., SISSON J.C. ET AL. *Pratique des plans d'expériences. 1998*.
- [Seo03] SEONG J.K., KWANG SEOK K. ET AL. *Optimization of manufacturing parameters for a brake lining using taguchi method. Journal of Materials Processing Technology*, tome 136 :pages 202 – 208, **2003**.
- [Ser03] SERGENT A., DURET D. ET AL. *La tolérance type. CPI'2003 - Mekhnès Maroc, 2003*.
- [Shi90] SHINA S. et NOSE Y. *Development of upper bound technique for analysis of fracture in metal forming. Ingenieur - Archiv*, tome 60, n° 5 :pages 311 – 322., **1990**.
- [Shi04] SHI X., CHENB J. ET AL. *A new approach of die shape optimization for sheet metal forming processes. Journal of Materials Processing Technology*, tome 152 :pages 35 – 42, **2004**.
- [Sob92a] SOBIS T., ENGEL U. ET AL. *An experimental analysis of the onset of buckling in metal forming. International Journal of Material Processing Technology*, tome 7, n° 3 :pages 273 – 281., **1992**.
- [Sob92b] SOBIS T., ENGEL U. ET AL. *A theoretical study on wear simulation in metal forming processes. J. Mater. Proc. Technol.*, tome 34 :pages 233 – 240, **1992**.
- [Sou06] SOUSA L., CASTRO C. ET AL. *Optimal design of v and u bending processes using genetic algorithms,. Journal of Materials Processing Technology*, tome 172 :pages 35 – 41, **2006**.
- [Sri00] SRIKANTH A. et ZABARAS N. *Shape optimization and preform design in metal forming processes. Comput. Methods Appl. Mech. Engrg.*, tome 190, n° 1859 - 1901, **2000**.
- [Sta02] STANDER N., BURGER M. ET AL. *Springback compensation in sheet metal forming using a successive response surface method. American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2002*.
- [Str86] STROHMEIER A. *FORTRAN 77 - Approche systématique illustrée d'exemples*. Eyrolles, Paris, (4th édition), **1986**.
- [SW04] SANG-WOOK L. *A study on the bi-directional springback of sheet metal stamping. Journal of Materials Processing Technology, 2004*.

- [Sza91] SZACINZKI A. et THOMSON P. *Investigation of the existence of a wrinkling-limit curve in plastically-deforming metal sheet. J Mater Proc Tech*, tome 25 :pages 125 – 37., **1991**.
- [Tra00] TRABELSI A. et DELCHAMBRE A.. *Assessment on tolerance representation and tolerance analysis in assemblies. concurrent engineering : Research and applications. Technomic Publishing Co., Lancaster, PA, Dec.*, tome 8, n° 4 :pages .244–262, **2000**.
- [Tro92] TRONEL Y. et CHENOT J. *Prediction of tool wear using finite element software for the three-dimensional simulation of the hot-forging process. J. Mater. Proc. Tech.*, tome 31 :pages 255 – 263, **1992**.
- [Tro03] TROSSET M., ALEXANDROV N. ET AL. *New methods for robust design using computer simulation. Proceedings of the Section on Physical and Engineering Sciences, American Statistical Association*, **2003**.
- [Tve90] TVERGAARD V. *Material failure by void growth to coalescence. Advances in Applied Mechanics*, tome 27 :pages 83 – 151, **1990**.
- [Uly02] ULYSSE P. *Extrusion die design for flow balance using fe and optimization methods. International Journal of Mechanical Sciences*, tome 44 :pages 319 – 341, **2002**.
- [Vie99] VIELLEDENT D. *Optimisation des outils en forgeage à chaud par simulation éléments finis et méthode inverse application à des problèmes industriels. Thèse de doctorat, L'Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris*, **1999**.
- [Vil88] VILLEMEUR et AL. *Sûreté de fonctionnement des systèmes industriels : fiabilité, facteurs humains, informatisation*. **1988**.
- [Voe98] VOELCKER H. *The current state of affairs in dimensional tolerancing. Integrated Manufacturing Systems*, tome 9 :pages 205 – 217, **1998**.
- [Wan94] WANG C., KINZEL G. ET AL. *Wrinkling criterion for an anisotropic shell with compound curvatures in sheet forming. Int J Mater Proc Tech Sci*, tome 36, n° 10 :pages 945 – 960, **1994**.
- [Was01] WASZCZYSZYN Z. et ZIEMIASKI L. *Neural networks in mechanics of structures and materials - new results and prospects of applications. , Comp. & Structures*, tome 79, n° 22 - 25 :pages 2261 – 2276, **2001**.
- [Wer97] WERNER T. *Estimation of bending angle during free bending. The scientific journal Facta Universitas, University of Nis, Mechanical Engineering*, tome 1, n° 4 :pages 439 – 445, **1997**.

- [Xu04] XU W., MA C. ET AL. *Sensitive factors in springback simulation for sheet metal forming. Journal of Materials Processing Technology.*, tome 151 :pages 217–222, **2004**.
- [Yah04] YAHONG S. et AL. *Fatigue behavior and fractography of laser-processed hot work tool steel. Vacuum*, tome 73 :pages 655 – 660, **2004**.
- [Yan95] YANRAN Z. et AL. *Numerical simulations for extrusion and ironing and die-angle optimisation. Journal of Materials Processing Technology*, tome 55 :pages 48–52, **1995**.
- [Yan02] YANN C. et SIARRY P. *Optimisation multiobjectif*. Editions Eyrolles Paris, **2002**.
- [Yeo01] YEO H., Y. C. ET AL. *Analysis and design of the prestressed cold extrusion die. International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, tome 18 :pages 54 – 61, **2001**.
- [Yos04] YOSHIHARA S., MACDONALDA B. ET AL. *Optimisation of magnesium alloy stamping with local heating and cooling using the finite element method. Journal of Materials Processing Technology*, tome 153 - 154 :pages 319 – 322, **2004**.
- [Zab00] ZABARAS N., SRIKANTH A. ET AL. *A continuum lagrangian sensitivity analysis for metal forming processes with application to die design problems. Int. J. Numer. Methods Engrg*, tome 48 :pages 679 – 720, **2000**.
- [Zaf04] ZAFER T. *An experimental study on the examination of springback of sheet metals with several thicknesses and properties in bending dies. Journal of Materials Processing Technology*, tome 145 :pages 109 – 117, **2004**.
- [Zha96] ZHANG G. *Simultaneous tolerancing for design and manufacturing.*, *International Journal Of Production Research.*, tome 34 :pages 3361–3382., **1996**.
- [Zhu95] ZHU Y., CESCOTTO S. ET AL. *Modelling of fracture initiation in metalforming processes. Ghosh, S.K. and Predeleanu, M., Editors Materials processing defects*, Elsevier, Amsterdam, **1995**.

**Résumé :** Dans ce travail nous proposons des stratégies d'optimisation par plans d'expériences numériques pour palier les difficultés rencontrées dans le processus d'optimisation de procédés de mise en forme. Parmi ces difficultés on peut rappeler : le retour élastique durant le pliage, l'usure de la matrice pendant l'extrusion ou la fatigue des outils, la recherche d'une solution globale ou l'échange des données entre l'outil de simulation et l'outil d'optimisation. Compte tenu de la forte non linéarité des phénomènes étudiés, nous avons développé une approche basée sur l'utilisation conjointe de la méthode des plans d'expériences, de la méthodologie de surface de réponse et la méthode des éléments finis, pour optimiser les performances du produit ou du procédé de fabrication. Le caractère numérique des expériences justifie la création et la mise au point d'un outil d'optimisation, afin d'automatiser et de faciliter l'application de la méthodologie de plans d'expériences et celle des stratégies d'optimisation par plans d'expériences à partir de simulations numériques. Il s'agit d'un outil informatique qui permet de déterminer de manière automatique et rapide, l'optimum d'un certain processus, permettant d'obtenir des produits respectant un certain nombre des critères de qualité. Afin de trouver les caractéristiques des processus de fabrication en accord avec la meilleure qualité possible des produits une des stratégies d'optimisation proposée dans ce rapport est basée sur une approche hybride qui utilise la puissance des trois méthodes : surface de réponse, calcul par intervalle et tolérencement mécanique. La validation de cette nouvelle méthode apportera une solution robuste à l'optimisation du procédé d'emboutissage.

**Mots clés :** optimisation, plans d'expériences numériques, méthodologie de surface de réponse, méthode des éléments finis.

---

## METAL FORMING PROCESS OPTIMISATION BY COUPLED APPROACH DESIGNS OF EXPERIMENTS, FINITES ELEMENTS AND RESPONSE SUR- FACE METHODOLOGY

---

**Abstract :** In this work we propose the optimization strategies using numerical designs of experiments to minimize the difficulties in the metal forming process optimization. Among these difficulties it can recall : springback from bending process, die wear during extrusion process or tools fatigue, the research of global solution for data exchange between numerical simulation and optimization tool. Taking into account of the strong non-linearity of the studied phenomena, we developed an approach using the following methods, design of experiments, finite elements methods and response surface methodology to optimize the performances of the product or manufacturing process. The virtual character of the experiments (numerical simulation) justifies creation and the development of an optimization tool, in order to automate and to facilitate the application of the designs of experiments method and that of the strategies of optimization by designs of experiments from numerical simulations. This is a data-processing tool which determines in an automatic and fast way, the optimum of a certain process and allows obtaining products that respect a certain number of quality standards. In order to find the characteristics of the manufacturing processes in agreement with the best possible quality of the products one of the optimization strategies proposed in this work is based on a hybrid approach which uses the power of the three methods : mechanical tolerancing, response surface methodology, and interval computation method. The validation of this new method will bring a robust solution of the stamping process optimization.

**Keywords :** optimization, numerical design of experiments, response surface methodology, finite elements method.

---

**Spécialité : Sciences de l'Ingénieur**