

UNIVERSITE DE LIEGE
FACULTE DES SCIENCES APPLIQUEES

**CONTRIBUTION A LA MODELISATION
DU FORMAGE DES METAUX PAR LA
METHODE DES ELEMENTS FINIS**

par
Anne-Marie HABRAKEN

**Thèse présentée en vue de l'obtention du grade scientifique
de Docteur en Sciences Appliquées**

Année académique 1988 - 1989.

à Jean-Luc ...

AVANT-PROPOS

Le travail présenté dans cette thèse a été effectué au service de Mécanique des Matériaux, Stabilité des Constructions et Mécanique des Structures (MSM) de l'Université de Liège, dans le cadre d'une bourse IRSIA de 2 ans et d'un mandat d'aspirant FNRS.

Monsieur Serge CESCOTTO m'a initiée à la recherche et a dirigé mon travail. Je tiens à lui exprimer ma plus sincère reconnaissance pour m'avoir intégrée au sein de son équipe. Son aide constante et nos nombreuses discussions m'ont permis d'améliorer ce travail et de mener à bien la rédaction de cette thèse.

Je tiens à remercier Messieurs les Membres du Jury qui ont accepté de consacrer de leur temps à l'examen de mon travail et à son jugement.

Je voudrais également exprimer ma gratitude au groupe des forgerons belges pour l'intérêt qu'ils ont porté à mes recherches. Les visites de forges et les échanges avec les ingénieurs de production m'ont permis de mieux comprendre les phénomènes à modéliser.

L'étude du refroidissement d'une pièce métallique fut réalisée en collaboration avec H. GROBER et M. BOURDOUXHE d'ARBED-Recherches, S. DENIS et A. SIMON de l'Institut National Polytechnique de Lorraine (Nancy). Je les remercie de leur aide.

Le résultat de mes recherches s'est concrétisé par des développements du programme non linéaire d'éléments finis, LAGAMINE. Développer, gérer et utiliser un tel code est en fait un travail d'équipe, et je remercie R. CHARLIER pour sa disponibilité ; ses nombreuses questions et remarques m'ont permis d'approfondir mon travail. Un grand merci à J.-P. RADU pour sa collaboration précieuse et efficace, à E. LEMAIRE et P. VILLERS pour leurs conseils informatiques judicieux, à G. FRANQUET pour ses dessins précis et soignés. Je ne peux oublier de citer C. BOUFFIOUX, V. de VILLE, G. FONDER, L. GRISARD, F. LABORY pour leur aide et leur soutien amical au cours de mes recherches.

Enfin, je tiens à remercier I. RATY, J. VERBIJST, M.-R. et J.-C. HARDENNE pour leur contribution à la mise en forme de cette thèse.

9.5. Autres données	269
9.6. Renumérotation automatique	269
9.7. Conclusion	270
CHAPITRE 10 : Transfert des informations	271
10.1. Transfert des informations relatives aux éléments de solide	273
10.1.1. Introduction	273
10.1.2. Transfert des variables (bibliographie)	274
10.1.2.1. Approche classique	275
10.1.2.2. Approches simplifiées	281
10.1.2.3. Utilisation des splines	282
10.1.3. Méthode originale de transfert	282
10.1.4. Interpolation du tenseur contrainte	289
10.1.5. Conservation des relations entre les variables interpolées	291
10.2. Transfert des informations relatives aux éléments de contact	293
10.2.1. Introduction	293
10.2.2. Présentation de l'élément de contact	294
10.2.3. Première méthode de transfert des informations	294
10.2.4. Seconde méthode de transfert des informations	296
10.2.5. Développement futur de l'élément de contact	301
10.3. Comparaison des essais de remaillage	302
CHAPITRE 11 : Quelques applications	309
11.1. Analyse thermique métallurgique du refroidissement d'une poutrelle	311
11.1.1. Description de la pièce et des hypothèses de calcul	311
11.1.2. Résultats	313
11.2. Analyse thermique mécanique métallurgique d'un cylindre en acier 60NCD11	317
11.2.1. Description de la modélisation	317
11.2.2. Résultats	318
11.3. Analyse thermique mécanique métallurgique du refroidissement d'une poutrelle	321
11.4. La simulation de l'estampage d'une aube de turbine	324
11.4.1. Description de la pièce et des hypothèses de calcul	324
11.4.2. Description de la simulation	326
11.4.3. Conclusions	332
11.5. Simulation du formage d'un pignon de machine	333
11.5.1. Description de la pièce et des hypothèses de calcul	333
11.5.2. Etape 1 du formage	338
11.5.3. Etape 2 du formage	339
CHAPITRE 12 : Conclusions	351
ANNEXES	
BIBLIOGRAPHIE	

4.5.4.3.	Evaluation de $K_{\tau\alpha}$	97
4.5.5.	Stratégie de calcul et méthode de résolution	98
CHAPITRE 5 : Modèle couplé d'analyse mécanique thermique métallurgique		103
5.1.	Introduction	105
5.2.	Extension de l'équation d'équilibre thermique au cas des grandes déformations	107
5.3.	Modifications de la modélisation des cinétiques de transformations suite au couplage mécanique	109
5.3.1.	Les transformations par diffusion (ferrite, cementite, perlite, bainite)	109
5.3.1.1.	Phénomènes observés	109
5.3.1.2.	Modélisation	112
5.3.2.	La transformation martensitique	116
5.3.2.1.	Phénomènes observés et modèles proposés	116
5.3.2.2.	Modèle adopté dans nos simulations	118
5.4.	Loi constitutive mécanique	120
5.4.1.	Introduction	120
5.4.2.	Loi élastique couplée à l'analyse thermique	121
5.4.3.	Loi élastoplastique couplée à l'analyse thermique	122
5.4.4.	Loi constitutive utilisée pour l'analyse mécanique couplée à l'analyse thermique et métallurgique	125
5.4.4.1.	Introduction	125
5.4.4.2.	La plasticité de transformation	125
5.4.4.3.	Le chargement de volume dû aux transformations de phases D^{α}_{ij} et à la dilatation thermique D^{τ}_{ij}	131
5.4.4.4.	La plasticité classique dans un matériau multiphasique	132
5.4.4.5.	Formule finale de la loi mécanique thermique métallurgique couplée	138
CHAPITRE 6 : L'élément fini thermique métallurgique mécanique couplé		141
6.1.	Introduction	143
6.2.	Vue d'ensemble du LAGAMINE	144
6.3.	Vue d'ensemble de l'élément couplé CPLA	146
6.4.	Schéma d'intégration de base	147
6.5.	Intégration de la loi mécanique	150
6.5.1.	Introduction	150
6.5.2.	Calcul de la contrainte σ_{en+1} dans l'hypothèse d'un comportement élastique	152
6.5.3.	Test de plasticité	152
6.5.4.	Recherche de l'état de contrainte $\sigma(L)$ correspondant à l'entrée en plasticité	153
6.5.5.	Calcul de la contrainte au point C milieu de l'incrément plastique	154
6.5.6.	Calcul de la contrainte en fin de pas	155
6.5.7.	Notion de sous-intervalles	156
6.6.	Calcul de la matrice tangente	156
6.6.1.	Introduction	156
6.6.2.	Matrice tangente mécanique KM (cas axisymétrique)	158
6.6.3.	La matrice couplée mécanique thermique KMT (cas axisymétrique)	161
6.6.4.	La matrice tangente thermique KT (cas axisymétrique)	162
6.6.5.	La matrice tangente thermique mécanique couplée KTM	162

6.6.6.	Matrice tangente utilisée pour une analyse thermique, mécanique, métallurgique axisymétrique	163
6.7.	Stabilité du schéma d'intégration	164
6.8.	L'état plan généralisé	168
6.8.1.	Introduction	168
6.8.2.	L'élément CPLA en état plan généralisé	169
CHAPITRE 7 : Introduction au problème de remaillage		175
7.1.	Nécessité du remaillage	177
7.2.	Présentation de la recherche - Contenu des chapitres	179
7.3.	Les méthodes de remaillage existantes	180
7.3.1.	La méthode de relocalisation des noeuds (r-version)	180
7.3.2.	La subdivision des éléments (h-version)	183
7.3.3.	Augmentation du degré polynomial de la fonction d'interpolation (p-version)	184
7.3.4.	Remaillage avec maillages indépendants	185
7.4.	Justification du choix de la méthode de remaillage avec maillages indépendants	186
CHAPITRE 8 : Décision de remaillage		191
8.1.	Introduction	193
8.2.	Remaillage systématique	195
8.3.	Estimateur d'erreur (bibliographie)	196
8.3.1.	Théorie basée sur les résidus	196
8.3.1.1.	Introduction	196
8.3.1.2.	Estimateur pour les éléments finis hiérarchiques (ER1)	197
8.3.1.3.	Estimateur général - méthode des éléments finis classiques linéaires (ER3 et ER10)	204
8.3.1.4.	Un estimateur borne supérieure de l'erreur - analyse linéaire (ER13, ER14)	208
8.3.1.5.	Conclusions	213
8.3.2.	L'estimateur simplifié de ZIENKIEWCZ	213
8.3.2.1.	Analyse linéaire (ER5)	213
8.3.2.2.	Analyse non linéaire (ER16)	215
8.3.3.	Etude de l'énergie de déformation	217
8.3.4.	Estimateurs basés sur les contraintes	220
8.3.5.	Estimateurs basés sur la déformation	223
8.3.6.	Estimateurs basés sur la loi de comportement et les champs de contraintes statiquement admissibles	224
8.4.	Estimateurs d'erreur introduits dans le LAGAMINE	225
8.5.	Critère de remaillage sans estimation de l'erreur	234
8.5.1.	Mesure de la distorsion des éléments	234
8.5.1.1.	Introduction	234
8.5.1.2.	Critères de distorsions	236
8.5.2.	Etude des valeurs propres	243
8.5.3.	Mesure des recouvrements ou des baillements entre la pièce et la matrice	247
8.6.	Concordance des critères avec ou sans estimateurs d'erreur	247
8.7.	Conclusion	258
CHAPITRE 9 : Création d'un nouveau maillage		261
9.1.	Introduction	263
9.2.	Correction du contour de la pièce	266
9.3.	Maillage à l'intérieur du contour	266
9.4.	Génération des éléments de contact	268

CHAPITRE 1

Introduction



1.1. Le Cadre du travail et son but

1.2. Résumé des chapitres et originalités de la thèse

1.1. LE CADRE DU TRAVAIL ET SON BUT

Les procédés de mise à forme des métaux tels que le forgeage et l'estampage restent actuellement basés en grande partie sur des règles empiriques de bonne pratique (FOR 40).

Lors de la commande d'une nouvelle pièce, un industriel se trouve devant de nombreux choix :

- la forme et les dimensions de la pièce de départ (billettes rondes ou carrées, ...)
- le nombre d'opérations intermédiaires (ébauches, finition).

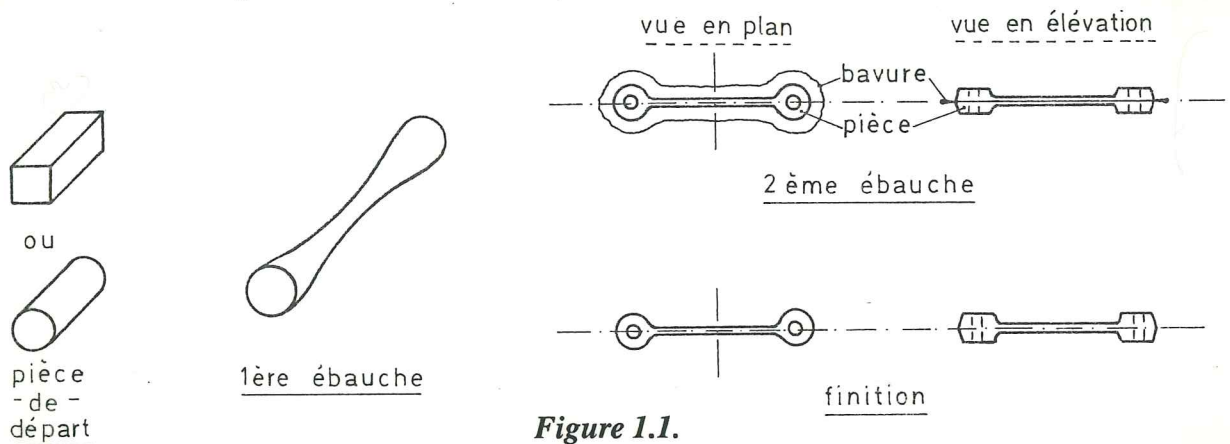


Figure 1.1.

et pour chacune de ces étapes :

- le type d'outil utilisé (marteau pilon, presse hydraulique, ...) et ses paramètres (nombre de coups de marteau pilon ...)
- la géométrie, le matériau et la température de la matrice utilisée
- la température de la pièce
- l'utilisation ou non de traitements thermiques.

Une optimisation de ces choix doit permettre à l'industriel de limiter le nombre de pièces non conformes aux impositions géométriques et microstructurales du client. La durée de vie des matrices est également un facteur important de rentabilité. En effet, le forgeage de matériaux de plus en plus résistants entraîne l'utilisation de matrices très coûteuses à cause des aciers spéciaux mis en oeuvre et des procédés d'usinage particuliers utilisés.

Jusqu'à présent, cette optimisation est encore réalisée de façon approximative et onéreuse par une suite d'essais et erreurs.

Pour chaque essai infructueux, on imagine la perte en temps, matière et main-d'oeuvre réalisée par l'entreprise.

On comprend dès lors l'intérêt des simulations numériques dans le cadre du forgeage et de l'estampage. De nombreux codes éléments finis tentent de résoudre ce problème (ALPID, FORGE 2, C3F-Vulcain, ASTRID, MEF, ...).

Ils diffèrent par le type d'approche utilisé (lagrangienne, eulérienne, mixte, ...), les hypothèses admises au niveau des lois de comportement des matériaux, et la modélisation du processus de contact. On ne peut traiter l'aspect mécanique seul puisque les formages ne sont pas nécessairement isothermes et qu'ils sont souvent précédés ou suivis de traitements thermiques. De plus, les aspects métallurgiques ne peuvent être oubliés. D'une part, les tailles de grains sont conditionnées par la température, l'état et la vitesse de déformation de la pièce formée ; d'autre part, les changements de phases qui apparaissent au cours du refroidissement dans certains matériaux doivent être pris en compte pour prédire les contraintes résiduelles, la géométrie finale de la pièce et le risque de défauts structuraux (fissures, ...).

Résoudre tous ces problèmes constitue évidemment un travail d'équipe. Le département MSM de l'Université de Liège s'est efforcé de développer le code d'éléments finis LAGAMINE pour répondre à l'attente des industriels. Ce programme initialement créé pour la simulation du laminage en cannelures voit périodiquement son champ d'action s'élargir. Par exemple, CHARLIER y a intégré les problèmes de mécanique des sols et d'écoulements de liquides en milieux poreux (EF4). A présent, cette thèse résume les développements que j'ai introduits dans ce programme pour simuler les procédés de forgeage et d'estampage.

Depuis trois ans divers développements du code LAGAMINE ont été entrepris pour en faire un outil de travail dédié aux forgerons :

- a. création d'un préprocesseur adapté aux géométries complexes des matrices d'estampage avec la possibilité d'utiliser des données disponibles dans un système CAD-CAM ;
- b. création d'une loi de comportement intégrant les phénomènes mécaniques, thermiques et métallurgiques ;

- c. modélisation des conditions variables appliquées à la frontière de la pièce estampée tant au niveau mécanique que thermique ;
- d. intégration d'un processus de remaillage automatique.

Ce dernier point résulte du choix de la description lagrangienne utilisée par le code LAGAMINE. Rappelons que cette formulation suppose que chaque élément fini est associé à un même ensemble de particules matérielles tout au long du calcul. Les déformations très fortes rencontrées lors du formage entraînent la détérioration des éléments et un nouveau maillage doit remplacer l'ancien pour conserver la qualité des résultats.

Depuis le 1er janvier 1986, je me suis plus particulièrement attachée à résoudre les points b et d cités ci-dessus. Cet ouvrage résume les progrès importants réalisés dans cette voie.

1.2. RESUME DES CHAPITRES ET ORIGINALITES DE LA THESE

Le *second chapitre* introduit les différents couplages présents dans une analyse mécanique thermique métallurgique. Il rappelle ensuite les notions de métallurgie nécessaires à la compréhension de ce travail.

Le *troisième chapitre* décrit la modélisation adoptée pour l'analyse thermique métallurgique non couplée au problème mécanique. Le modèle choisi est celui de FERNANDES (CP30). Le code développé par ce dernier était limité à l'étude de cylindres infiniment longs, c'est-à-dire à un problème unidimensionnel. L'intégration de ce modèle, dans le code LAGAMINE apporte une grande liberté quant aux formes géométriques traitées. Actuellement, les cas bidimensionnels (état plan ou axisymétrique) peuvent être traités, une extension aux cas tridimensionnels ne pose pas de problème si ce n'est celui des temps de calcul. Du point de vue théorique, nous avons proposé une formulation différentielle de la modélisation des transformations par diffusion. Cette approche, indépendante de celle de SJÖSTRÖM (CP38) a permis de vérifier cette dernière par une voie différente. En outre, la comparaison de cette approche avec celle plus classique de FERNANDES constitue un élément nouveau intéressant. Pour terminer, des tests de validation des développements correspondants dans le code LAGAMINE sont présentés.

Le *chapitre quatre* est consacré aux problèmes numériques à résoudre pour réaliser une simulation de refroidissement d'une pièce métallique.

Une bibliographie des schémas d'intégration temporelle des problèmes thermiques linéaires et non linéaires est présentée. A ce niveau, nous ne pouvons parler de contribution originale puisqu'il s'agit de schémas devenus classiques. Cependant, il est assez rare de trouver un résumé de ces notions souvent dispersées dans de nombreux articles. A ce titre, nous considérons ce point comme un apport intéressant de cette thèse.

La prise en compte des changements de phase a occasionné un grand nombre de recherches. Après avoir fait le point sur les méthodes proposées par la littérature, nous décrivons les développements introduits dans le code LAGAMINE. Le calcul des flux et de la matrice tangente est détaillé. Ce dernier point constitue un apport personnel original, surtout au niveau de la contribution des transformations de phase à la matrice tangente.

Le *chapitre cinq* est consacré aux interactions existant entre les phénomènes mécaniques, thermiques et métallurgiques. Une présentation approfondie de chaque couplage est réalisée et la notion de plasticité de transformation est introduite. Notre contribution personnelle et originale réside dans :

- une loi élasto-plastique thermique couplée pour un matériau monphasique,
- une loi élasto-plastique thermique métallurgique pour un matériau multiphasique.

L'intégration des lois élasto-plastiques thermiques, métallurgiques ou non, dans le code LAGAMINE constitue le *chapitre six*. Les points suivants constituent un apport original de cette thèse :

- schéma d'intégration temporelle de base pour ces lois couplées,
- apport des sous-intervalles d'intégration,
- étude de la matrice tangente couplée d'un élément isoparamétrique à 8 noeuds,
- amélioration du schéma d'intégration temporelle de base pour assurer la stabilité en cas de transformation martensitique,
- développement de la notion d'état plan généralisé pour l'étude du refroidissement d'une poutrelle métallique.

Le *chapitre sept* présente le problème du remaillage. Après une description succincte des solutions proposées par la littérature, nous justifions notre choix d'un remaillage avec maillage indépendant. Ce dernier semble en effet le mieux adapté aux problèmes de forgeage et d'estampage que nous désirons résoudre.

Le *chapitre huit* est consacré à la détermination de l'instant opportun pour réaliser un remaillage. Nous distinguerons deux types de critères :

- a. les critères avec estimation de l'erreur, développés dans le cadre de l'optimisation des maillages d'éléments finis lors d'une analyse linéaire, ou adaptés aux problèmes non linéaires de formage des métaux,
- b. les critères sans estimation de l'erreur, basés sur des mesures de distorsion des éléments, les valeurs propres, les mesures des interpénétrations de la pièce forgée et de la matrice.

Concernant les critères du type a, notre contribution personnelle est la suivante :

- étude bibliographique traduisant dans un vocabulaire d'ingénieur, les développements mathématiques souvent présents lors des études d'estimateurs d'erreur,
- adaptation du critère proposé par ZIENKIEWICZ aux lois élastoviscoplastiques présentes dans LAGAMINE et essai d'une variante basée sur une idée personnelle.

Concernant les critères de type b, nous proposons des mesures de distorsions originales pour un élément isoparamétrique plan à 8 noeuds et nous présentons une analyse des valeurs propres de la matrice tangente.

Pour terminer, nous présentons une comparaison des critères de type a et b programmés dans LAGAMINE. A notre connaissance, une telle comparaison n'avait encore jamais été réalisée. Elle nous permet de vérifier la concordance des deux approches. Les avantages et inconvénients de chacune de ces méthodes sont établis. Ils permettent de réaliser un choix des critères à conserver dans l'optique d'un remaillage automatique.

Le *chapitre neuf* présente succinctement la création du nouveau maillage. Les exigences relatives à un mailleur automatique adapté au problème de remaillage sont précisées. Une première approche fut réalisée par nos soins grâce à un programme interactif REMDATA. Les développements originaux de ce programme sont détaillés en annexe 3.

Le *chapitre dix* traite le transfert des informations de l'ancien maillage au nouveau maillage. A ce niveau, deux types d'informations sont considérés :

- a. les informations relatives aux éléments de solide,
- b. les informations relatives aux éléments modélisant le contact.

Le transfert des informations de type a est une opération souvent traitée par la littérature. Après une revue bibliographique des méthodes proposées, nous présentons une méthode originale et personnelle de transfert. Ses qualités principales sont sa précision, sa facilité de mise en oeuvre et sa souplesse d'utilisation. Une comparaison de cette méthode

avec deux autres méthodes basées respectivement sur les moindres carrés et sur l'extrapolation nodale des valeurs aux points d'intégration est présentée.

Concernant les informations de type b, nous n'avons trouvé aucune référence qui traitait leur transfert d'un maillage à l'autre. Ce point est cependant important, comme le montrent des essais de remaillage réalisés sans interpolation de ces variables. Les deux méthodes de transfert présentées dans cette thèse montrent l'évolution de notre approche de ce problème. Toutes deux constituent des apports personnels et originaux.

Le *chapitre onze* présente cinq exemples d'application des développements réalisés :

1. l'analyse thermique métallurgique d'une poutrelle métallique refroidie par arrosage et refroidissement naturel,
2. l'analyse thermique métallurgique mécanique d'une poutrelle métallique refroidie par arrosage et refroidissement naturel,
3. l'analyse thermique métallurgique mécanique de la trempe d'un cylindre en acier 60NCD11,
4. la simulation de l'estampage d'une aube de turbine (analyse mécanique avec remaillage),
5. la simulation de l'estampage d'un pignon de machine (analyse mécanique avec remaillage).

Hormis l'application 3 qui constitue l'application du code à un cas test déjà traité par DENIS et SJÖSTRÖM (CP31), ces exemples constituent des contributions originales.

Quelques conclusions sont proposées au *chapitre douze*.

Parmi nos contributions originales, certaines nous semblent d'une ampleur et d'un intérêt plus grands :

- la loi élastoplastique thermique métallurgique et son schéma d'intégration prennent en compte les couplages existant entre les différents phénomènes. Le nombre de codes réalisant une telle analyse est assez réduit alors que des calculs réalistes de contraintes résiduelles de trempe, de soudure ne peuvent être obtenus par des analyses découplées. De plus, l'adaptation des modèles développés à d'autres traitements thermiques (revenu ...) constitue de nouvelles perspectives de recherches pour l'équipe de M.S.M.,
- une présentation des estimateurs d'erreur disponibles dans le cadre de la méthode des éléments finis est une information précieuse pour les ingénieurs numériques comme

pour les industriels qui ont recours à ces calculs,

- les différents avantages et inconvénients des critères de remaillage basés respectivement sur les estimateurs d'erreur et les mesures des distorsions des éléments constituent un élément important pour ceux qui doivent faire un choix entre ces deux types de critères,
- l'importance du transfert des informations relatives au contact a été mis en évidence, alors que ce sujet n'est pas abordé dans la littérature.



