



Stratégies numériques pour la modélisation des procédés de fabrication

Katia Mocellin

► To cite this version:

Katia Mocellin. Stratégies numériques pour la modélisation des procédés de fabrication. Matériaux. Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambresis; Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, 2011. tel-00931202

HAL Id: tel-00931202

<https://theses.hal.science/tel-00931202>

Submitted on 15 Jan 2014

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

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

N° d'ordre : 11-XX

Habilitation à diriger les recherches

De l'Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis,
Ecole Doctorale Sciences Pour l'Ingénieur, Lille Nord-de-France

Présentée par

Katia Mocellin

Chargée de Recherche de Mines ParisTech

Stratégies numériques pour la modélisation des procédés de fabrication

Soutenue le 15 Décembre 2011, devant le jury composé de

Rapporteurs

Jean-Claude Boyer,	Professeur, INSA de Lyon, LaMCoS UMR CNRS 5259
Pascal Drazetic	Professeur, Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis, LAMIH
Philippe Lorong	Professeur, Ecole Nationale Supérieure des Arts et Métiers de Paris

Examineurs

Jean-Claude Gelin	Professeur, Université de France Comté, FEMTO-ST UMR CNRS 6174
François Bay	Professeur, Mines ParisTech – CEMEF, UMR CNRS 7635
Laurent Dubar	Professeur, Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis, TEMPO EA 4542, directeur de recherches

Invités

Richard Ducloux	Docteur, Directeur du développement Transvalor
Jean Wendenbaum	Ascometal - Lucchini

I CURRICULUM VITAE	3
1. Identité.....	3
2. Parcours	3
3. Responsabilités au sein du CEMEF	4
4. Parcours scientifique.....	4
5. Enseignement	6
6. Publications	6
7. Activités d'animation et de rayonnement	6
8. Collaborations.....	7
II RAPPEL DU SUJET DE THESE ET PRINCIPAUX RESULTATS	9
III ENCADREMENTS ET CO-ENCADREMENTS	11
1. Thèses de doctorat : 6 soutenues, 4 en cours.....	11
2. Mastères spécialisés en mécanique numérique-35.....	12
IV ACTIVITE DE RECHERCHE CONTRACTUELLE.....	15
1. Projets de recherche nationaux.....	15
2. Projets industriels.....	16
V PUBLICATIONS	17
1. Publications dans des revues à comité de lecture international	17
2. Actes de conférences internationales donnant lieu à publications dans un journal.....	18
3. Communications et actes de conférences internationales	19
4. Communications et actes de conférences françaises.....	21
5. Thèses soutenues	22
VI TRAVAUX SCIENTIFIQUES.....	23
Introduction.....	23
Partie 1 Formulations explicites.....	27
1.1 Formulation accélération pression	29
1.2 Formulation explicite en triangles et tétraèdres linéaires.....	31
1.3 Synthèse.....	37
Partie 2 Résolution de grands systèmes linéaires – méthodes multigrilles.....	39
2.1 Multigrille et raffinement.....	41
2.2 Multigrille et déraffinement.....	42
2.3 Synthèse.....	47
Partie 3 Couplage multidomaine.....	51
3.1 Modélisation thermomécanique couplée.....	53
3.2 Modélisation des problèmes de surface - Dégradation des outillages	57
3.3 Synthèse.....	63
Partie 4 Couplages multiphysiques.....	65
4.1 Modélisation couplée électrique-thermique.....	67
4.2 Couplage comportement endommagement	71
4.3 Couplage et interaction laser matière	76
4.4 Synthèse.....	80
Partie 5 Perspectives – Axes de recherche futurs.....	83
5.1 Réduction du temps calcul.....	83
5.2 Modélisation des problèmes en extrême surface.....	83
5.3 Modélisation de l'usinage	84
5.4 Perspectives à plus long terme- Optimisation des propriétés en service des pièces	85
Partie 6 Références	87
VII Publications significatives	93

I CURRICULUM VITAE

1. IDENTITE

Katia MOCELLIN

Née le : 29 décembre 1971 à Annecy (Haute Savoie)

Nationalité : Française

Situation de famille : Pacsée, 2 enfants

Mines ParisTech

Centre de Mise en Forme des Matériaux (CEMEF)

Unité Mixte de Recherche CNRS n° 7635

(Directeur de l'unité : Yvan Chastel)

Rue Claude Daunesse

BP 207

06904 Sophia Antipolis Cedex

tél : 04 93 95 74 32

fax : 04 92 38 97 52

email : katia.mocellin@mines-paristech.fr

2. PARCOURS

- **Depuis 2002 : Chargée de Recherche de l'Ecole des Mines de Paris**
Mines ParisTech
Centre de Mise en Forme des Matériaux (CEMEF)
- **Séjour post-doctoral à l'Imperial College - Londres**
Aeronautics Department
«Fluid Structure Interaction for hyperelastic domain »
- **1999 - 2001 : Post Doctorat à l'Ecole des Mines de Paris, Sophia Antipolis**
Mines ParisTech
Centre de Mise en Forme des Matériaux (CEMEF)
«Simulation du forgeage – Outils flottants et couplage thermique pièce-outil »
- **1995 – 1999 : Doctorat de l'Ecole des Mines de Paris**
Mines ParisTech
Centre de Mise en Forme des Matériaux (CEMEF)
« Contribution à la simulation numérique tridimensionnelle du forgeage à chaud. Etude du contact et calcul multigrille ».
Directeur de thèse : Dr Lionel Fourment
Jury : M. Raous, J.C. Gelin, H. Guillard, J.L. Chenot, I. Poitroult

3. RESPONSABILITES AU SEIN DU CEMEF

- Chef de Groupe adjoint du Groupe de recherche M3P : Modélisation Mécanique et Multi-Physique
- Responsable adjoint du mastère spécialisé « Computational Mechanics »

4. PARCOURS SCIENTIFIQUE

1999-2001 : Post doctorat, CEMEF, Ecole des Mines de Paris

Mes activités de recherche se sont poursuivies autour du développement de méthodes numériques en s'orientant vers la thématique des interactions entre la pièce et les outillages de forge à chaud et plus généralement du problème du calcul l'équilibre mécanique entre différents domaines (rigides et /ou déformables).

Ces travaux ont conduit à la publication de 2 articles :

- Traore K, Forestier R, Mocellin K, Montmitonnet P., Souchet M., Three dimensional finite element simulation of ring rolling, *Simulation of Materials Processing: Theory, Methods and applications*: 595-600 (2001)
- E. Pichelin, K. Mocellin, L. Fourment and J.L. Chenot, An application of a master-slave algorithm for solving 3D contact problems between deformable bodies in forming processes, *Revue Européenne des Eléments finis*, vol 10 n°8, 857-880 (2001).

Par ailleurs, cela a correspondu avec le **lancement de la formation en mastère spécialisé** « Mécanique Numérique » pour laquelle j'ai contribué, dès le début à l'organisation, à l'enseignement et à l'encadrement d'étudiants.

Enfin, Jean-Loup Chenot m'a sollicité pour **participer à l'encadrement d'un travail de thèse** qui était un peu en souffrance. Mon intervention dans la thèse de Mihaela Teodorescu a permis la publication d'un article et la présentation des travaux à une conférence internationale

- M. Teodorescu, K. Mocellin, J.L. Chenot and Richard Ducloux, A partly explicit finite element formulation for the forging process, *International Journal of Computational Engineering Science*, Vol.2, No 3, 425-452 (2001).

2002- 2004 Chargée de recherche de l'Ecole des Mines de Paris

Pendant les premières années de mon poste de chargée de recherche, j'ai naturellement contribué à l'encadrement de thèses sur des sujets faisant suite à mon travail de thèse ou à mes travaux de post doctorat.

Les thèses de Laurent Terzolo et Sébastien Fayolle sont ainsi basées sur la thématique de gestion de contact multidomaine. Chacune de ces études a également servi à l'établissement de nouvelles thématiques de recherche telles que les sollicitations cycliques vues par un outillage ou le couplage comportement –endommagement intervenant dans les différents composants lors de l'assemblage mécanique par rivetage.

Ces travaux ont amené à la présentation des résultats dans le cadre de nombreuses conférences et à la publication d'un article.

- P-O. Bouchard, L. Bourgeon, S. Fayolle, K. Mocellin, An enhanced Lemaitre model formulation for materials processing damage computation, *International Journal of Material Forming*, 2010, Online First™, 14 August 2010, , DOI 10.1007/s12289-010-0996-5.

Depuis 2004 Chargée de recherche de l'Ecole des Mines de Paris

A partir de 2004, j'ai démarré de nouvelles activités de recherche sur le développement de méthodes numériques

- pour la maîtrise de phénomènes physiques couplées :
 - Ainsi la thèse de Pascal de Micheli a-t-elle eu pour objectif de développer une méthode explicite innovante sur le type d'élément utilisé afin de prendre en compte les aspects liés aux grandes vitesses,
 - la thèse de Larbi Arbaoui a visé à prendre en compte les interactions avec une source laser en vue d'aider à la mise au point d'un nouveau procédé de prototypage.
- pour l'amélioration de la précision pour des procédés complexes :
 - La thèse de Noura Chabane vise à améliorer la précision du contact dans les assemblages vissés,
 - la thèse d'Esteban Vanagas a pour objectif de mettre au point des gammes de laminage à pas de pèlerin pour un matériau innovant
 - la thèse de Matthieu Petitprez porte sur la modélisation du sertissage de câbles électriques et sur l'étude du lien entre cet assemblage et la tenue mécanique.
 - La thèse de Xavier Cerutti vient de commencer et va traiter de la prédiction des contraintes résiduelles obtenues après usinage.

Certains de ces travaux ont fait l'objet de présentation dans des conférences internationales et ont mené à la publication de 5 articles.

- P. O. De Micheli, K. Mocellin, A new efficient explicit formulation for linear tetrahedral elements non-sensitive to volumetric locking for infinitesimal elasticity and inelasticity, *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, Vol 79 Issue 1, 45 – 68 (2009)

- P-O. Bouchard, L. Bourgeon, S. Fayolle, K. Mocellin, An enhanced Lemaitre model formulation for materials processing damage computation, *International Journal of Material Forming*, 2010, Online First™, 14 August 2010, , DOI 10.1007/s12289-010-0996-5.*

- P.O. De Micheli, K. Mocellin, 2D high speed machining simulations using a new explicit formulation with linear triangular elements, *International Journal of Machining and Machinability of Materials*, Vol. 9, Nos. 3/4, 266-281 2011

- L. Arbaoui, J.-E. Masse, L. Barrallier, K. Mocellin, Numerical modelling of laser rapid prototyping by fusion wire deposit, *International Journal of Material Forming*, 2010, Volume 3, Supplement 1, Pages 1095-1098

- E. Vanegas-Márquez, K. Mocellin, L. Toualbi, Y. de Carlan, R.E. Logé, A simple approach for the modeling of an ODS steel mechanical behavior in pilgering conditions, Accepted for publication dans *Journal of Nuclear Materials*.

- E. Vanegas, K. Mocellin, R. Logé, Identification of cyclic and anisotropic behaviour of ODS steels tubes, *Procedia Engineering*, 2011, Volume 10, Pages 1208-1213

5. ENSEIGNEMENT

- Enseignement dans le cadre des mastères spécialisés de l'Ecole des Mines de Paris :
 - Organisation des enseignements du mastère spécialisé « Mécanique numérique ».
 - Travaux pratiques sur le logiciel Forge dans le cadre du mastère spécialisé « Mécanique numérique ».
 - Travaux pratiques sur le logiciel Fluent dans le cadre du mastère spécialisé « Mécanique numérique ».
 - Cours sur les méthodes multigrilles dans le cadre du mastère spécialisé « Mécanique numérique ».
 - Cours de programmation fortran aux étudiants du mastère spécialisé « Matériaux et Mise en forme »
 - Intervention dans la semaine bloquée « VIF University » organisée en 2007.
 - Intervention dans les travaux pratiques dispensés pendant la semaine bloquée « Mise en forme des matériaux » aux étudiants du cycle ingénieur en 2000

6. PUBLICATIONS

Nombre d'articles dans des revues internationales à comité de lecture : 12

Nombre de communications au niveau international avec comité de lecture : 6

Nombre de communications dans des congrès internationaux : 23

Nombre de communications dans des congrès nationaux : 8

7. ACTIVITES D'ANIMATION ET DE RAYONNEMENT

Organisation de mini symposium :

- 2006-2008 : Co-organisatrice du symposium « Heat Transfer » de la Conférence Esaform
- 2009-2011 : Organisatrice du symposium « Heat Transfer » de la Conférence Esaform
- 2008 : Co-organisatrice de la session « Numerical Modelling of High Speed or Innovative Metal Forming Processes » de la Conférence WCCM (World Congress in Computational Mechanics)

Passage du mastère spécialisé « Computational Mechanics » en langue anglaise

Cette migration vers l'anglais apporte un réel plus aux étudiants. Elle permet le recrutement d'étudiants non francophones et la collaboration avec des enseignants chercheurs étrangers.

Participation à la Mission « ParisTech Graduate School Shanghai – Recherche en Transport, automobile et mobilité »

Intégration des représentants académiques et industriels français dans l'ICFG (International Cold Forging Group)

Je participe avec Laurent Dubar, Professeur de **l'Université de Valenciennes**, à la réintégration d'équipes de recherche françaises dans la communauté scientifique et industrielle de l'ICFG (International Cold Forging Group) avec pour objectif d'organiser conjointement la réunion plénière en 2014.

8. COLLABORATIONS

Collaborations académiques

- Université de Valenciennes – équipe TEMPO
- Polytech' Nantes – Laboratoire de Thermocinétique
- Ecole des Mines d'Albi – CROMEP (SUMO)
- ENSAM – Aix en Provence – Equipe Mécasurf

Collaborations industrielles

- **Automobile** : Renault, PSA
- **Aéronautique** : SNECMA, AIRBUS, Eurocopter
- **Équipementier** (Forge) : Forges de Courcelles, Manoir Industries, Vallourec, SNR
- **Centre Technique** : CETIM
- **Energie** : CEA, Areva, Gaz de France –Suez, EDF

II RAPPEL DU SUJET DE THESE ET PRINCIPAUX RESULTATS

Titre de la thèse :

Contribution à la simulation numérique tridimensionnelle du forgeage à chaud. Etude du contact et calcul multigrille

Résumé :

Ce travail de thèse se situait dans le cadre de la modélisation numérique par éléments finis du procédé de forgeage à chaud des métaux. Il avait pour but de progresser sur deux verrous dans le cadre de la modélisation numérique 3-D des procédés de forgeage :

- des problèmes de précision sur la surface de contact entre la pièce et l'outil
- un temps de calcul élevé.

Dans la première partie, le problème du contact unilatéral a été étudié. En partant de la méthode de pénalisation existant, l'algorithme de contact a été amélioré par la mise en place d'un algorithme implicite. Ces développements ont été validés sur plusieurs cas de forgeage où l'on montre l'apport du nouvel algorithme en terme de précision de gestion de la surface entre la pièce et l'outil.

Dans la seconde partie, on a traité du problème de temps de calcul. Malgré la mise en place d'une méthode de calcul parallèle les délais de calcul pour une simulation tridimensionnelle restaient très élevés. Nos travaux ont donc consisté à remplacer le solveur de type résidu minimal implémenté dans Forge 3 par une méthode asymptotiquement optimale basée sur l'utilisation de multigrilles. Nous avons développé une méthode originale utilisant la méthode de résidu minimal comme lisseur et une méthode de raffinement de maillage pour la construction des différents niveaux. Nous avons optimisé cet algorithme en introduisant en particulier un préconditionneur utilisant une factorisation de Crout incomplète pour les résolutions grille grossière. Les résultats obtenus en bgrille sur différents cas de forgeage sont excellents et les quelques résultats sur un calcul avec trois niveaux de maillage sont très encourageants.

Publications :

Actes de conférence :

- Fourment L., Mocellin K., Chenot J-L., *An implicit contact algorithm for the 3D simulation of the forging process*, Computational Plasticity - Fundamental and Applications, Proceedings of the Fifth International Conference, Barcelona, p 873-877, D.R.J. Owen et al. éditeurs, Pineridge Press, Swansea, UK, 17-20 March 1997
- Mocellin K., Fourment L., Chenot J-L., *Algorithme de contact implicite pour la simulation tridimensionnelle du forgeage*, Actes du 13e Congrès Français de Mécanique, Poitiers, vol. 4, p51- 54, 1-5 septembre 1997.
- Fourment L., Mocellin K., Chenot J-L., *An efficient multigrid solver for incompressible fluid problems: application to the 3D hot forging simulation*, Proceedings of the NUMIFORM'98 conference, University of Twente, The Netherlands, J. Huétink & F.P.T. Baaijens (editors), 233-238, 22-25 June 1998

- Coupez T., Mocellin K., Fourment L., Chenot J.-L., *Toward large scale F.E. computation of metal Forming processes using iterative solvers and parallel computation*, ECCM'99, European Conference on Computational Mechanics, München (Germany), August 31 - September 3 1999.

Articles

- Mocellin K, Fourment L, Chenot JL, An efficient multigrid solver for incompressible fluid problems: Application to the 3D hot forging process, *Simulation of Materials Processing: Theory, Methods and applications* 233-238 (1998)
- Fourment L, Chenot J.-L. and Mocellin K., Numerical Formulations algorithms for solving contact problems in metal forming simulation – International Journal for Numerical Methods in Engineering, 46, 1435-1462(1999).
- Mocellin K, Fourment L, Coupez T. and Chenot J. L., Toward large scale F.E. computation of hot forging process using iterative solvers, parallel computation and multigrid algorithms, International Journal for Numerical Methods in Engineering, 52:473-478(2001).
- Chenot J.-L., Fourment L, Mocellin K., Numerical treatment of contact and friction in FE simulation of forming processes, Journal of Material Processing Technology, vol. 125-126, pp 45-52 (2002)

III ENCADREMENTS ET CO-ENCADREMENTS

1. **THESES DE DOCTORAT : 6 SOUTENUES, 4 EN COURS**

6 thèses soutenues (pourcentage du co-encadrement)

Mihaela Teodorescu : **Application d'une formulation explicite en vitesse à la modélisation numérique du forgeage**. Cette thèse a été encadrée par Jean-Loup Chenot. Co-encadrement à hauteur de 10%

Laurent Terzolo : **Vers une prédiction de la durée de vie des outils de forge à chaud par une détermination numérique du régime thermique établi et de l'usure abrasive** (soutenue le 3 septembre 2004 et obtenue avec les félicitations du jury). Cette a été financée dans le cadre du projet SIMULFORGE .

Benoit Rey : **Utilisation de méthodes multigrilles pour la simulation tridimensionnelle du forgeage- Application au calcul multidomaine** (soutenue le 11 avril 2007). Cette thèse a été co-encadrée par Lionel Fourment à hauteur de 50 %. Elle a été financée dans le cadre du projet Eureka ! RINGING.

Sébastien Fayolle : **Modélisation numérique de procédés d'assemblage par déformations plastiques et optimisation de leur tenue mécanique** (soutenue le 26 novembre 2008). Cette thèse a été co-encadrée par Pierre-Olivier Bouchard à hauteur de 50 %. Elle a été financée par le CETIM.

Pascal De Micheli : **Formulation explicite en tétraèdres linéaires pour la modélisation 2D et 3D de l'Usinage Grande Vitesse** (soutenue le 2 juillet 2009). Cette thèse a été menée dans le cadre du projet PGV2 financé par La Fondation CETIM.

Esteban Vanegas : **Etude de la mise en forme de tubes à gradient de propriété**, (soutenue le 13 décembre 2011). Cette thèse a été co-encadrée par Roland Logé à hauteur de 50 %. Elle a été financée par l'ANR dans le cadre du projet STRATOTUBE.

4 thèses en cours

Noura Chabane : **Modélisation des procédés de vissage** (débutée en 2006) Cette thèse est réalisée dans le cadre du projet MONA LISA financé par le CETIM.

Larbi Arbaoui : **Etude du procédé de prototypage rapide par source laser**, débutée en 2007, soutenance prévue en 2011. Cette thèse est financée par une bourse de la Région PACA avec la participation du centre CLAIRE.

Matthieu Petitprez : **Numerical modeling of crimping for aeronautical electrical contacts: Optimizing crimping conditions for mechanical strength performance**, débutée en 2010. Cette thèse s'inscrit dans le projet PSI financé par le FUI.

Xavier Cerutti : **Optimisation des gammes d'usinage – Etude des distorsions après relâchement de contraintes résiduelles**, débutée en 2011. Cette thèse s'inscrit dans le projet OFELIA financé par le FUI.

Devenir des étudiants encadrés en thèse :

Mihaela Teodorescu : **ThyssenKrupp R&D**

Laurent Terzolo : **Développeur, Coframi**

Benoit Rey : **Senior Scientist at CFS Engineering SA**

Sébastien Fayolle : **EDF R&D**

Pascal De Micheli : **Développeur, Transvalor**

2. MASTERES SPECIALISES EN MECANIQUE NUMERIQUE-35

- J. Prost - **PSA** : Simulation procédés de fonderie – 1999
 - S. Patay - **PSA** : Simulation procédés de fonderie – 2000
 - S. Pagnon - **EDF** : Amélioration d'un code de simulation des incendies – 2000
 - M. Moustaud - **3MO** : Etude vibratoire d'un système de découplage – 2000
 - F. Garandet - **PSA** : Introduction de la convection mixte dans la modélisation des échanges convectifs sous capot – 2001

 - Loyer - **Setforge** : Etude de la tenue des outils de forge pour des pièces de transmission automobile – 2001
 - N. Aladern - **Setforge** : Etude numérique de la tenue des outils d'estampage à chaud de composants de systèmes d'injection – 2002
 - Andro - **Renault – groupe acoustique** : Modélisation numérique du phénomène de crissement des freins – 2002
 - W. Geslin - **Satelec** : Etude de la mise en forme d'un outil dentaire – 2002

 - J. Simon **Renault – groupe acoustique** : Evaluation de la méthode multipôle rapide en acoustique automobile – 2003
- 10
- E. Blosseville - **CEA** : Crash d'emballage de transports nucléaires - Modélisation du comportement dynamique du bois – 2004
 - P. Sochala - **Renault – groupe acoustique** : Modélisation de la transparence acoustique du caisson de porte – 2004
 - L. Jarleton - **Barriols et Dallières** : Modélisation numérique du procédé d'electro-refouillage -2004

- A. Vernier - **CEA** : Validation de modèles multi-champs pour les écoulements diphasiques dans le logiciel de calcul OVAP – 2005
- J. Beaudoin - **Arcelor Mittal – IRSID** : Etude du contact entre cylindres de travail et d'appui dans une cage de laminage à froid – 2005
- M. Meshkor - **Gaz de France** : Amélioration du logiciel TAGS de modélisation des fuites et de la diffusion de gaz dans le sol – 2005
- M. Mermet - **Renault – groupe acoustique** : Caractérisation et modélisation de la dynamique des matériaux hyperélastiques de l'automobile – 2005
- L. Arbaoui - **FBFC- Cezus** : Modélisation numérique du procédé de soudage USW - développement du modèle – 2006
- A. Diop - **VIF** : Modélisation numérique du procédé de perçage de tubes par effet Mannesmann – 2006
- G. Puaux - **Gaz de France** : Simulation numérique de la dispersion du gaz dans le sol : TAGS - 2006

20

- F. Barillon - **Renault – groupe acoustique** : Etude du phénomène de crissement de lécheurs de vitres – 2006
- A. Debiais - **Projet SITO (Consortium : CETIM, SNECMA, Vallourec, Forges de Courcelles, Manoir Industries, PSA, Arcelor Mittal-Industeel)** : Etude numérique et expérimentale de l'usure des matrices de forge à chaud - 2007
- M. Ferraro - **Projet SITO (Consortium : CETIM, SNECMA, Vallourec, Forges de Courcelles, Manoir Industries, PSA, Arcelor Mittal-Industeel)** : Etude de la fatigue mécanique des outils de forge à chaud – 2007
- O. Krafft - **Projet SITO (Consortium : CETIM, SNECMA, Vallourec, Forges de Courcelles, Manoir Industries, PSA, Arcelor Mittal-Industeel)** : Méthodologie d'utilisation du logiciel Forge pour le calcul dans les outillages - 2007
- M. Gatti - **Renault – groupe acoustique** : Etude du phénomène de crissement de lécheurs de vitres - 2007
- A. Milhe - **FBFC- Cezus** : Modélisation numérique du procédé de soudage USW – amélioration du modèle et détermination expérimentale des résistances électriques de contact -2007
- K. Huang - **CETIM** : Etude du procédé de laminage transversal -2007

- E. Lecointe - **Renault – Groupe Acoustique** – Méthodologie de calcul pour le rayonnement acoustique externe. - 2008
- G. Gu - **Pôle I-Trans** – Etude du forgeage d'une pièce de freinage ferroviaire en aluminium. - 2008
- D. Chicanne - **Forges de Bologne** – Comportement des machines de forge et intégration d'un pilotage spécifique. -2009

30

- O. Desmaison - **EDF** – Etude du fraisage à grande vitesse. - 2009
- M-A. M'Zoughi - **FBFC- Cezus** : Modélisation numérique du procédé de soudage USW – Mise en place du modèle 3D -2009
- M. Petitprez - **AIRBUS** – Etude du sertissage de contacts électriques-.2009
- J. Veyssset - **STRATOTUBE (CEA – Valinox)** – Modélisation du laminage à pas de pèlerin – 2010
- Taha Benhaddou - **Projet Carnot** – Modélisation numérique de la mise en tension dans les vis – 2010

IV ACTIVITE DE RECHERCHE CONTRACTUELLE

1. PROJETS DE RECHERCHE NATIONAUX

En tant qu'initiatrice

Projet PGV2 (2005-2008) financé par la Fondation CETIM

Partenaires : Université de Valenciennes, Polytech'Nantes, LPMM Metz,

Etude réalisée : Thèse Pascal de Micheli

Projet Mona Lisa (2006 – 2010) financé par le CETIM

Partenaire : CETIM

Etude réalisée : Thèse Noura Chabane

Projet BDE Région PACA SIMUPROFIL (2006-2009)

Partenaires : Centre Régional CLAIRE – ENSAM Aix en Provence

Etude réalisée : Thèse Larbi Arbaoui

Projet SITO: Consortium d'industriels (2007-2008)

Partenaires : CETIM, SNECMA, Vallourec, Forges de Courcelles, Manoir Industries, PSA, Arcelor Mittal-Industeel, Ecole des Mines d'Albi

Etudes réalisées : Projets Mastère spécialisé de Alexis Debiais, Olivier Krafft et Matthieu Ferraro

Projet ANR STRATOTUBE (2008-2012) - Coordinatrice

Partenaires : CEA, Valinox

Etudes réalisées : Thèse de Esteban Vanegas, Mastère spécialisé Jérémy Veysset

En tant que collaboratrice

Projet Simulforge (2000-2005): Consortium industriel et Ministère de l'Industrie

Partenaires : CETIM, Aubert et Duval, Ascometal, Setforge, ...

Etude réalisée : Thèse de Laurent Terzolo

Projet Eureka ! RINGING :

Partenaires : Transvalor, SNR

Etude réalisée : Thèse de Benoit Rey

Projet FUI PSI (2009-2012) :

Partenaires : AIRBUS, Eurocopter, Labinal, Thales Alenia Space, CETIM, Trescal, QMT (MPE), Université de Provence

Etude réalisée : Thèse de Matthieu Petitprez

Projet FUI OFELIA (2011- 2015) :

Partenaires : CONSTELLIUM, Aubert et Duval, LUSINA, Tex Composites, IFMA, SPIN – Mines de Saint Etienne.

Etude réalisée : Thèse de Xavier Cerutti

2. PROJETS INDUSTRIELS

Montage de projets industriels ayant mené à des études de mastères spécialisés :

Automobile : Renault, PSA

Aéronautique : SNECMA, AIRBUS, Thales Alenia Space, Eurocopter

Equipementier (Forge) : Forges de Courcelles, Manoir Industries, Vallourec, SNR

Centre Technique : CETIM

Energie : CEA, Areva, Gaz de France –Suez, EDF

V PUBLICATIONS

1. PUBLICATIONS DANS DES REVUES A COMITE DE LECTURE INTERNATIONAL

- [A 1] Mocellin K, Fourment L, Chenot JL, An efficient multigrid solver for incompressible fluid problems: Application to the 3D hot forging process, *Simulation of Materials Processing: Theory, Methods and applications* 233-238 (1998).
- [A 2] Fourment L., Chenot J.-L. and Mocellin K., Numerical Formulations algorithms for solving contact problems in metal forming simulation – *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 46, 1435-1462(1999).
- [A 3] Mocellin K, Fourment L, Coupez T. and Chenot J. L., Toward large scale F.E. computation of hot forging process using iterative solvers, parallel computation and multigrid algorithms, *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 52:473-478(2001).
- [A 4] Traore K, Forestier R, Mocellin K, Montmitonnet P., Souchet M., Three dimensional finite element simulation of ring rolling, *Simulation of Materials Processing: Theory, Methods and applications*: 595-600 (2001).
- [A 5] Pichelin E., Mocellin K, Fourment L and Chenot J. L., An application of a master-slave algorithm for solving 3D contact problems between deformable bodies in forming processes, *Revue Européenne des Eléments finis*, vol 10 n°8, 857-880 (2001).*
- [A 6] Teodorescu M., Mocellin K, Chenot J. L. and Richard Ducloux, A partly explicit finite element formulation for the forging process, *International Journal of Computational Engineering Science*, Vol.2, No 3, 425-452 (2001).
- [A 7] Chenot J.-L., Fourment L, Mocellin K., Numerical treatment of contact and friction in FE simulation of forming processes, *Journal of Material Processing Technology*, vol. 125-126, pp 45-52 (2002).
- [A 8] Rey B. · Mocellin K ,· Fourment L, A node-nested Galerkin multigrid method for metal forging simulation, *Computing and Visualization in Science*, DOI 10.1007/s00791-006-0054-5 (2006).*
- [A 9] De Micheli P.O., Mocellin K, A new efficient explicit formulation for linear tetrahedral elements non-sensitive to volumetric locking for infinitesimal

elasticity and inelasticity, International Journal for Numerical Methods in Engineering, Vol 79 Issue 1, 45 – 68 (2009).*

- [A 10] Bouchard P-O., Bourgeon L., Fayolle S. and Mocellin K, An enhanced Lemaitre model formulation for materials processing damage computation, International Journal of Material Forming, 2010, Online First™, 14 August 2010, , DOI 10.1007/s12289-010-0996-5.*
- [A 11] De Micheli P.O. , Mocellin K, 2D high speed machining simulations using a new explicit formulation with linear triangular elements, International Journal of Machining and Machinability of Materials, Vol. 9, Nos. 3/4, 266-281 (2011).
- [A 12] Vanegas-Márquez E., Mocellin K. , Toualbi L., de Carlan Y., Logé R.E., A simple approach for the modeling of an ODS steel mechanical behavior in pilgering conditions, Accepté pour publication dans Journal of Nuclear Materials.

* Articles joints en fin de document

2. ACTES DE CONFERENCES INTERNATIONALES DONNANT LIEU A PUBLICATIONS DANS UN JOURNAL

- [B 1] Chastel Y, Diop A., Fanini S., Bouchard P.O., Mocellin K., Finite Element Modeling of Tube Piercing and Creation of a Crack , International Journal of Material Forming, Vol 1, Supplement 1, 355-358, 2008
- [B 2] Mocellin K., Ferraro M., Velay V., Logé R, Rézaï-Aria F. , Numerical life prediction of mechanical fatigue for hot forging, International Journal of Material Forming, vol 2, 129-132, DOI10.1007/s12289-009-0537-2, 2009
- [B 3] Arbaoui L. , Masse J.-E., Barrallier L., Mocellin K., Numerical modelling of laser rapid prototyping by fusion wire deposit, International Journal of Material Forming, Volume 3, Supplement 1, Pages 1095-1098, 2010
- [B 4] Chenot J.L., Bouchard P.O., Massoni E., Mocellin K., Lasne P., Finite Element Modeling and Optimization of Mechanical Joining Technology, Esaform Conference, Belfast 27-29 Avril 2011 , AIP Conference Proceedings **1353**, 1, 1247-1252, 2011
- [B 5] Desmaison O., Mocellin K., Jardin N., Modelling Of Residual Stresses Induced By High Speed Milling Process, Esaform Conference, Belfast 27-29 Avril 2011, AIP Conference Proceedings **1353**, 1, 597-602, 2011
- [B 6] Vanegas E., Mocellin K., Logé R., Identification of cyclic and anisotropic behaviour of ODS steels tubes, ICM11, Procedia Engineering 2011, 10, 1208-1213, Como, Italie

3. COMMUNICATIONS ET ACTES DE CONFERENCES INTERNATIONALES

- [C 1] Fourment L., Mocellin K., Chenot J-L., An implicit contact algorithm for the 3D simulation of the forging process, Computational Plasticity - Fundamental and Applications, Proceedings of the Fifth International Conference, Barcelona, p 873-877, D.R.J. Owen et al. éditeurs, Pineridge Press, Swansea, UK, 17-20 March 1997
- [C 2] Fourment L., Mocellin K., Chenot J-L., An efficient multigrid solver for incompressible fluid problems: application to the 3D hot forging simulation, Proceedings of the NUMIFORM'98 conference, University of Twente, The Netherlands, J. Huétink & F.P.T. Baaijens (editors), 233-238, 22-25 June 1998
- [C 3] Coupez T., Mocellin K., Fourment L., Chenot J-L., Toward large scale F.E. computation of metal Forming processes using iterative solvers and parallel computation, ECCM'99, European Conference on Computational Mechanics, München (Germany), August 31 - September 3 1999.
- [C 4] Traoré K., Forestier R., Mocellin K., Montmitonnet P., Souchet M., Three-Dimensional Finite Element Simulation of Ring Rolling, Proc. Numiform 2001, Toyohashi, Japon. K.-I. Mori et al, eds., Publié par A.A. Balkema, Rotterdam, pp. 595-600, 18-21 Juin 2001
- [C 5] Chenot J.-L., Fourment L., Mocellin K., Numerical treatment of contact and friction in FE simulation of forming processes, Proc. Metal Forming 2002 (Sept. 2002, Birmingham, UK), I. Pillinger et al., eds. Elsevier, Amsterdam, 2002.
- [C 6] Mocellin K., Terzolo L., Chenot J-L., Numerical Simulation of the Thermo Mechanical Coupling between Tool and Workpiece in Forging Processes , Advanced Technology of plasticity 2002, 7th ICTP : International Conference on Technology of Plasticity, , Kiuchi M., Nishimura H., Yanagimoto J. (Eds), pp 139-145, Yokohama, Japan, october 27-november 1, 2002
- [C 7] Teodorescu M., Mocellin K., Ducloux R. and Chenot J. L., An acceleration/pressure finite element formulation for the forging process, 6th ESAFORM Conference, Salerno, Italie, 28-30 Avril 2003
- [C 8] Mocellin K, Terzolo L., Modelling of tool heating in hot forging processes, 8th International Conference on Advanced Computational Methods in Heat Transfer, p. 119-128 Lisbonne, Portugal, 24-28 mars 2004
- [C 9] Mocellin K, Terzolo L, Modelling of tool heating in hot forging processes, 7th ESAFORM Conference, p. 651-654, Trondheim, Norvège, 28-30 avril 2004
- [C 10] Rey B., Mocellin K., Fourment L., A node-nested Galerkin multigrid method for metal forging simulation, Proceedings of the 8th European Multigrid Conference, EMG 2005, Scheveningen The Hague, 27-30 September 2005

- [C 11] Mocellin K, Jarleton L., Dahan Y., Bay F., A numerical model coupling electrical, thermal and mechanical effects for analyzing material deformation, 9th International ESAFORM Conference on Material Forming, Glasgow, United Kingdom, Neal Juster and Andrzej Rosochowski (Eds), Akapit (publishing house), p. 527-531, April 26-28, 2006
- [C 12] Rey B., Mocellin K., Fourment L., Bay F., A node-nested Galerkin multigrid method for metal forging simulation, World Congress on Computational Mechanics WCCM, Los Angeles, 16-22 Juillet 2006
- [C 13] Bouchard, P.O., Fayolle, S., Mocellin, K, 3D Numerical Modelling of Mechanical Joining Processes - From Joining down to Structural Analysis , Proceedings of the 8th International Conference on Computational Structures Technology, pp. 657-658, 12-15 Septembre 2006
- [C 14] Fayolle S., Bouchard P.O., Mocellin K., Joining and Mechanical Strength of self-piercing riveted structure – numerical modelling and experimental validation, 13th International Conference on Experimental Mechanics - Experimental Analysis of Nano and Engineering Materials and Structures, Alexandroupolis, Grèce, 1-6 Juillet 2007
- [C 15] De Micheli P.O., Mocellin K, Explicit F.E. formulation with modified linear tetrahedral elements applied to high speed forming processes, Esaform Conference, Lyon 23-25 Avril 2008
- [C 16] De Micheli P.O., Mocellin K, Thermo-mechanical explicit FE simulations of machining - Innovative formulation with linear tetrahedral elements, 10eme Journées scientifiques et Techniques en Mécanique et Matériaux, Monastir Tunisie, 14-15 Novembre 2008
- [C 17] Chastel Y, Diop A., Fanini S, Bruschi S., Mocellin K., 3D Finite Element Modelling of Mannesmann Tube Piercing, ICTP, Gyeongju, Corée 7-11 Septembre 2008
- [C 18] De Micheli P.O., Mocellin K., 2D and 3D Thermo Mechanical Modeling of High Speed Machining Using a New Explicit Formulation with Linear Tetrahedral Elements, 12th CIRP conference on Modeling of Machining Operations, San Sebastian ESPAGNE, 7-8 Mai 2009.
- [C 19] Mocellin K., Petitprez M., Bouchard P.O, Desjean C., Computational modeling of electrical contact crimping and mechanical strength analysis, 25th ICEC and 56th IEEE Holm Conference, pp. 39-41, Charleston 4-7 Octobre 2010.
- [C 20] Pradille C., Mocellin K., Bay F., An experimental study to determine electrical contact resistance, 25th ICEC and 56th IEEE Holm Conference, pp. 329-333 Charleston 4-7 Octobre 2010.
- [C 21] Chenot J.L., Bouchard P.O., Massoni E., Mocellin K., Finite Element Modeling of Mechanical Joining Technology, International Conference AMPT, Paris 24-27 Octobre 2010.

- [C 22] Bouchard P.O., Roux E., Petitprez M., Mocellin K. , Numerical modeling of mechanical joining technologies: numerical issues and optimization of mechanical strength, Sixth M.I.T. Conference on Computational Fluid and Solid Mechanics, 15-17 juin 2011
- [C 23] Vanegas E., Mocellin K., De Carlan Y., Logé R., Numerical Simulation of the Cold Pilgering Process of ODS Tubes , XI International Conference on Computational Plasticity, Barcelone, Espagne, 7-9 septembre 2011

4. COMMUNICATIONS ET ACTES DE CONFERENCES FRANÇAISES

- [D 1] Mocellin K., Fourment L., Chenot J-L., Algorithme de contact implicite pour la simulation tridimensionnelle du forgeage, Actes du 13e Congrès Français de Mécanique, Poitiers, vol. 4, p51- 54, 1-5 septembre 1997.
- [D 2] Terzolo L., Mocellin K., Simulation numérique du couplage thermomécanique entre la pièce et les outils en forgeage, 6ème Colloque National en Calcul de Structures, Tome 3, p 181, Giens France, 20-23 mai 2003
- [D 3] Terzolo L., Mocellin K ,Simulation du régime thermique stationnaire dans le domaine de la forge à chaud., 16ème Congrès Français de Mécanique (CFM), Nice, France, 1-5 septembre 2003
- [D 4] Bouchard P.O., Fayolle S., Mocellin K, Ravassard P., Simulation des assemblages par déformation - Vers une approche intégrée de l'assemblage dans la phase de dimensionnement, Vers des Ingénieries & des Technologies Communes aux Transports terrestres, maritimes, aériens et spatiaux, Paris, 21-23 novembre 2006
- [D 5] Fayolle S., Mocellin K., Bouchard P.O., Modélisation de l'endommagement pour la simulation d'assemblages par déformation, 8ème Colloque National en Calcul des Structures, Giens, 2007.
- [D 6] Vanegas E., Mocellin K., de Carlan Y., Logé R., Modélisation numérique du laminage à pas de pèlerin et optimisation de la fabrication de tubes ODS, Matériaux 2010, Nantes.
- [D 7] Mocellin K., Vanegas E., Veyssset J., Deloye E., Logé R., Laminage de tubes ODS, 20ème Congrès Français de Mécanique (CFM), Besançon, 28 août -2 septembre 2011.
- [D 8] Petitprez M., Mocellin K., Desjean C., Etude du sertissage et de la tenue mécanique de contacts électriques, 10ème Colloque National en Calcul des Structures, Giens, 20011

5. THESES SOUTENUES

- [E 1] Katia Mocellin - *Contribution à la simulation numérique tridimensionnelle du forgeage à chaud. Etude du contact et calcul multigrille*. Thèse de doctorat, Ecole Nationale supérieure des Mines de Paris, Sophia Antipolis, 1999.
- [E 2] Mihaela Teodorescu - *Application d'une formulation explicite en vitesse à la modélisation numérique du forgeage*. Thèse de doctorat, Ecole Nationale supérieure des Mines de Paris, Sophia Antipolis, 2002.
- [E 3] Laurent Terzolo - *Vers une prédiction de la durée de vie des outils de forge à chaud par une détermination numérique du régime thermique établi et de l'usure abrasive*. Thèse de doctorat, Ecole Nationale supérieure des Mines de Paris, Sophia Antipolis, 2004.
- [E 4] Benoit Rey - *Utilisation de méthodes multigrilles pour la simulation tridimensionnelle du forgeage- Application au calcul multidomaine*. Thèse de doctorat, Ecole Nationale supérieure des Mines de Paris, Sophia Antipolis, 2007.
- [E 5] Sébastien Fayolle - *Modélisation numérique de procédés d'assemblage par déformations plastiques et optimisation de leur tenue mécanique*. Thèse de doctorat, Ecole Nationale supérieure des Mines de Paris, Sophia Antipolis, 2008.
- [E 6] Pascal De Micheli - *Formulation explicite en tétraèdres linéaires pour la modélisation 2D et 3D de l'Usinage Grande Vitesse*. Thèse de doctorat, Ecole Nationale supérieure des Mines de Paris, Sophia Antipolis, 2009.
- [E 7] Esteban Vanegas - *Etude de la mise en forme de tubes à gradient de propriété*. Thèse de doctorat, Ecole Nationale supérieure des Mines de Paris, Sophia Antipolis, 2011.
- [E 8] Larbi Arbaoui - *Etude du procédé de prototypage rapide par source laser*. Thèse de doctorat, Ecole Nationale supérieure des Mines de Paris, Sophia Antipolis, prévue en 2012

VI TRAVAUX SCIENTIFIQUES

INTRODUCTION

La mise en forme des matériaux est depuis de nombreuses années un domaine d'application privilégié de la simulation numérique. En mise en forme des métaux, la méthode des éléments finis est très largement répandue [1]. Les grandes déformations subies par la matière obligent à utiliser des procédures de remaillage automatique [2]. Plusieurs logiciels semblent, à l'heure actuelle pouvoir répondre en terme de prédiction de géométrie de pièces forgées (Deform, Forge, Marc...). Cependant les modèles numériques peuvent être enrichis pour tenir compte des aspects microstructuraux [3] au travers de lois de comportement avancées [4] ou de couplage avec des approches multi-échelles [5]. La prise en compte des caractéristiques liées aux conditions de production des lopins peut permettre d'améliorer la prédiction des pièces. Ainsi l'anisotropie induite par le laminage [6] ou les taux de porosité résiduels provenant des conditions de coulée [7] sont des phénomènes qui peuvent impacter l'écoulement et les conditions de forgeage.

Une autre voie d'amélioration de la simulation consiste à l'heure actuelle à prendre en compte l'environnement de la pièce forgée. Ainsi les déformations élastiques ou plastiques de l'outillage peuvent impacter la forme des pièces [8]. Cela ouvre la voie à une étude couplée de la pièce et des outils et à des collaborations fructueuses entre des laboratoires dont les thématiques sont centrées sur la caractérisation des outillages et d'autres concernés plus par la simulation (dans le cadre de grands projets financés par le Ministère de l'Industrie tel que Simulforge). Plusieurs équipes mènent également à l'heure actuelle ou ont mené des études sur l'impact de la presse elle même sur la géométrie des pièces et leur impact sur l'outillage [9].

L'amélioration de la prédiction des caractéristiques des pièces forgées passe également par une prise en compte plus précise des conditions de contact entre la pièce et les outils. A ce titre, le frottement est un mécanisme important que l'on peut étudier expérimentalement afin de formaliser des lois plus précises et reflétant les phénomènes en présence (glissement collage...) [10]. On passe généralement par l'étude à une échelle plus locale, numériquement ou expérimentalement [11] pour remonter à des mécanismes ayant une représentation à l'échelle de la pièce.

Enfin, l'étude du forgeage a permis le développement de techniques qui peuvent s'appliquer à d'autres procédés proches. L'assemblage se rapproche par exemple du forgeage à froid [12].

Les travaux de recherche réalisés depuis ma soutenance de thèse l'ont été dans le cadre de la modélisation numérique mécanique et multiphysique des procédés de mise en forme.

Dans ce domaine, les problématiques traitées conduisent très souvent à des modèles numériques extrêmement demandeurs en termes de temps calcul, de taille mémoire,...

Par ailleurs, les recherches menées ont pour but de répondre à des défis industriels. Les travaux s'inscrivent le plus souvent dans le cadre de collaborations directes avec des

partenaires industriels ou de consortiums réunissant partenaires industriels et laboratoires académiques financés par les pouvoirs publics (ANR, FP7, FUI,...)

Ceci impose d'assurer à la fois la fiabilité et la précision des modèles, à travers des démarches de validation importantes, mais également la robustesse des méthodes et leur implémentation dans un environnement logiciel complexe.

Ainsi, mes travaux de recherche portent également sur le développement de schémas explicites, de méthodes numériques pour la réduction des temps calculs ou encore de la modélisation de divers couplages multiphysiques. Une attention particulière est apportée à la validation des travaux par rapport à des résultats expérimentaux obtenus sur dispositifs académiques ou industriels.

Ces travaux de recherche sont également réalisés dans un environnement numérique de développement exigeant puisque les travaux sont réalisés dans le cadre des bibliothèques de modules éléments finis dans l'environnement du logiciel commercial Forge® ou de l'environnement CimLib®. Ce choix oblige à travailler sur des éléments à support géométrique triangulaires ou tétraédriques (en 2D ou 3D) pour conserver la compatibilité avec les outils de remaillage et la structure logicielle.

On voit se dégager ici deux grandes thématiques que je développerai dans la présentation de mes travaux de recherche.

Dans un premier temps, je présenterai les travaux que j'ai réalisés dans le cadre de développement des schémas numériques en vue de l'amélioration des performances des méthodes numériques par réduction des temps de calcul.

- Dans la première partie, je présente les activités liées au développement de formulations explicites ou semi explicites.
- La deuxième expose les développements de solveurs multigrilles en commençant par une brève présentation de mes travaux de thèse afin de mettre en perspective les travaux réalisés par la suite et qui s'appuient sur la résolution des principaux problèmes identifiés. Ces deux premières parties ont pour objectif de développer des formulations numériques efficaces en termes de temps de calcul.

Dans la seconde moitié de ce document j'aborderai l'amélioration de la précision par enrichissement des modèles numériques.

- Ainsi, la troisième partie est consacrée au développement de modèles de couplages multidomaines et à leur extension à la problématique d'étude des outillages de forge.
- Enfin, dans la quatrième partie, je présente quelques actions menées pour le développement de méthodes permettant la prise en compte de différents couplages multiphysiques.

Ces travaux ont été réalisés dans le cadre de thèses de doctorat mais ont également été nourris par des études de mastères spécialisés. Ces études courtes permettent d'initier ou de compléter des travaux de recherche en liaison avec des problèmes industriels. Elles sont souvent couvertes par une confidentialité forte et longue, ce qui ne permet pas de réaliser des publications même si les résultats scientifiques obtenus sont significatifs

Amélioration des performances numériques

Partie 1 FORMULATIONS EXPLICITES

Partie 2 RESOLUTION DE GRANDS SYSTEMES LINEAIRES – METHODES
MULTIGRILLES

Partie 1 FORMULATIONS EXPLICITES

Les travaux présentés portent sur l'investigation de méthodes numériques basées sur des formulations explicites. L'objectif est double :

- *l'évaluation de l'intérêt d'une formulation explicitée par rapport à des méthodes implicites pour des procédés proches du forgeage,*
- *le développement de formulations explicites pour des problèmes mettant en jeu des grandes vitesses et donc justifiant de l'importance du terme d'inertie dans le problème traité.*

Les méthodes développées ont été appliquées à la modélisation de l'usinage grande vitesse, en particulier à la simulation de la coupe orthogonale en 2D et en 3D. Les résultats ont été validés par rapport à des résultats de la bibliographie en terme d'effort et de morphologie de copeau.

Publications significatives :

Teodorescu M., Mocellin K, Chenot J. L. and Richard Ducloux, A partly explicit finite element formulation for the forging process, International Journal of Computational Engineering Science, Vol.2, No 3, 425-452 (2001).

De Micheli P.O., Mocellin K, A new efficient explicit formulation for linear tetrahedral elements non-sensitive to volumetric locking for infinitesimal elasticity and inelasticity, International Journal for Numerical Methods in Engineering, Vol 79 Issue 1, 45 – 68 (2009).*

De Micheli P.O. , Mocellin K, 2D high speed machining simulations using a new explicit formulation with linear triangular elements, International Journal of Machining and Machinability of Materials, Vol. 9, Nos. 3/4, 266-281 (2011)

La simulation numérique par éléments finis des procédés de mise en forme est basée sur l'utilisation de deux types de formulations :

- les formulations explicites, basées sur une expression dynamique de l'équation de conservation de l'énergie
- les formulations implicites, classiquement exprimées à partir d'une hypothèse quasi-statique.

Les premières présentent l'avantage de pouvoir traiter facilement toutes les non linéarités du problème en se basant sur la résolution sur l'expression condensée du terme d'inertie. Les termes de comportement ou de contact, qui peuvent être non linéaires sont considérés comme connus et constants sur l'incrément de temps considéré. Ces formulations présentent l'inconvénient de devoir vérifier des conditions de stabilité reliant la taille du maillage au pas de temps aussi appelées conditions CFL.

Les secondes consistent à exprimer la dépendance de tous les termes de l'équation de conservation à une ou plusieurs inconnues (déplacement, vitesse, pression,...). Ces méthodes sont inconditionnellement stables par rapport au pas de temps mais amènent à la résolution de systèmes fortement non linéaires, ce qui implique le développement de méthodes et d'algorithmes spécifiques au traitement de ces non linéarités.

Historiquement les choix stratégiques du laboratoire en termes de développements numériques ont conduit à la mise en œuvre de formulations implicites associées à des éléments finis mixtes en vitesse et pression [13]. Si les premiers modèles 2D utilisaient des éléments $P2/P0$, les contraintes en termes de temps calcul ou de besoin mémoire posées par les calculs 3D ont conduit à utiliser – au moins pour le moment – l'élément de degré le plus bas vérifiant les conditions de compatibilité de Brezzi-Babuska, - à savoir l'élément fini $P1+/P1$ [14]. La progression des machines – tant en termes de capacité mémoire qu'en puissance de calcul conduira sans doute dans la suite de mes recherches à investiguer d'autres types d'éléments pour les formulations implicites.

Néanmoins, si les formulations numériques implicites obtenues sont précises et robustes, elles peuvent s'avérer coûteuses en temps de calcul.

C'est dans ce contexte et pour cette raison que je me suis engagée dans des travaux de recherche pour évaluer les potentialités de formulations explicites ou semi-explicites pour l'étude de certains procédés de mise en forme.

Dans le domaine des grandes déformations, le choix d'une formulation explicite est basé sur :

- les temps de procédés très courts et des vitesses très élevées qui peuvent justifier le traitement de l'équation d'équilibre par le terme d'inertie,
- la capacité de ces formulations de pouvoir traiter plus facilement des équations non linéaires (comportement, contact,...) même si l'hypothèse quasi statique n'est pas respectée.

De nombreux types d'éléments finis sont associés aux formulations explicites. L'originalité de notre approche est d'utiliser des éléments tétraédriques linéaires qui sont réputés « rigides » lorsque associés à ces formulations.

1.1 Formulation accélération pression

La thèse de Mihaela Teodorescu [E 2] a été co-encadrée avec Jean-Loup Chenot. Elle visait à développer un élément fini mixte basé sur des tétraèdres linéaires dans une formulation explicite ou au moins « explicitée ». [A 6][C 7].

Pour aller progressivement vers les formulations explicites, plusieurs approches de résolution implicite du problème dynamique ont été développées. On a ainsi montré que la prise en compte du terme d'inertie (généralement négligée en mise en forme) peut avoir un impact sur la répartition de contrainte en cas de vitesse de forgeage élevée. Sur la Figure 1, on présente les résultats de simulation du forgeage d'une pièce axisymétrique. La comparaison du champ de contrainte équivalente montre que les résultats de la formulation basée sur l'équation quasi statique (en haut) sont différents de ceux obtenus avec les 2 formulations basées sur l'équation dynamique (en bas).

La prise en compte du terme d'inertie modifie la répartition du champ de contrainte, en particulier au centre du lopin. Pour ces 2 types de formulation explicites, la différence provient du traitement du premier incrément de temps pour lequel la non connaissance du champ de vitesse précédent amène à des imprécisions et une perte de précision dans la conservation du volume. Dans un cas, on initialise le champ de vitesse inconnu par une valeur nulle, dans l'autre un calcul implicite permet d'obtenir un champ de vitesse mécaniquement cohérent.

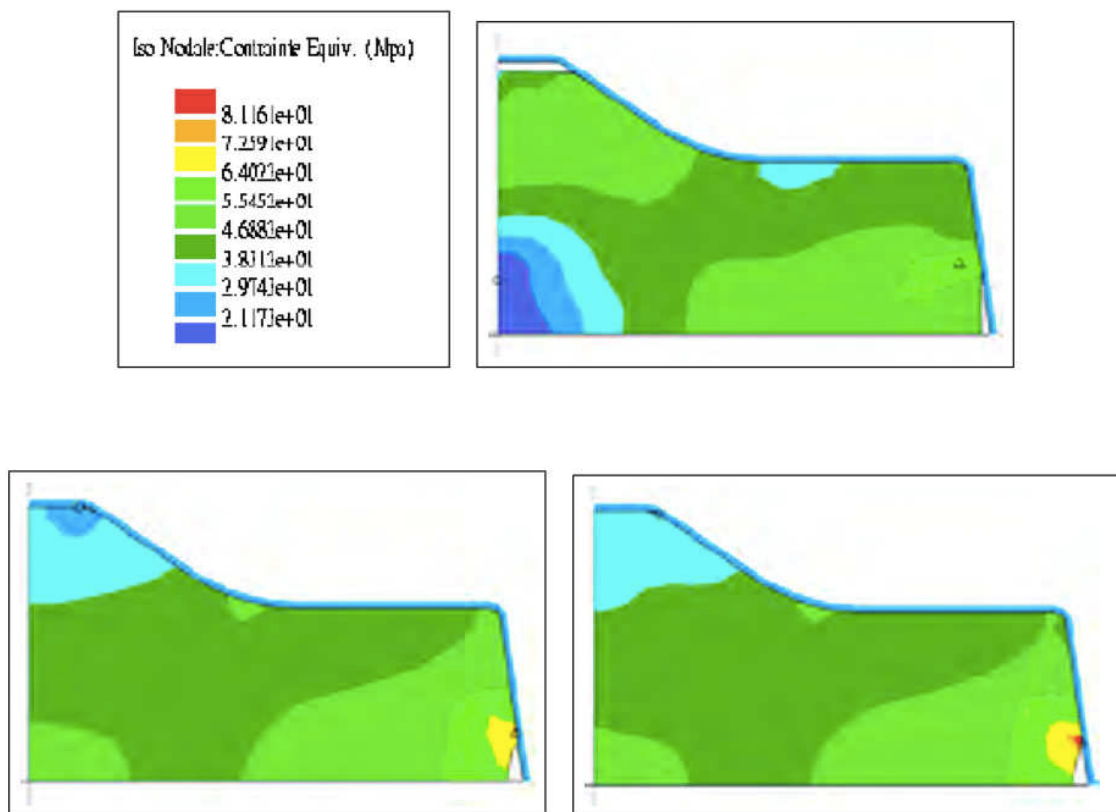


Figure 1 : Contraintes équivalentes obtenues avec une formulations implicite basée sur une équation quasi statique (en haut) ou explicite sur une équation dynamique (en bas) Les 2 formations du bas diffèrent par le traitement du 1^{er} incrément. [E 2]

L'originalité de ce travail réside dans le développement d'une formulation partiellement explicite basée sur une formulation mixte accélération/ pression sans condensation de la matrice de masse obtenue. La gestion de l'incompressibilité est ainsi conservée dans le système mécanique.

L'expression de l'équation de conservation du volume en fonction de la variable accélération est obtenue en considérant la dérivée temporelle de l'équation d'incompressibilité et non plus son expression classique. Cette modification impose

d'avoir une résolution très précise en conservation du volume au premier incrément pour préserver une bonne précision tout au long du calcul.

Sur la Figure 2, on montre le champ de contrainte équivalente pour la compression d'un cylindre à grande vitesse. On note la différence de valeur et de répartition géométrique de la matière sous l'outil entre le cas quasi statique et les cas dynamiques. La répartition est globalement équivalente pour les 2 résolutions de l'équation dynamique.

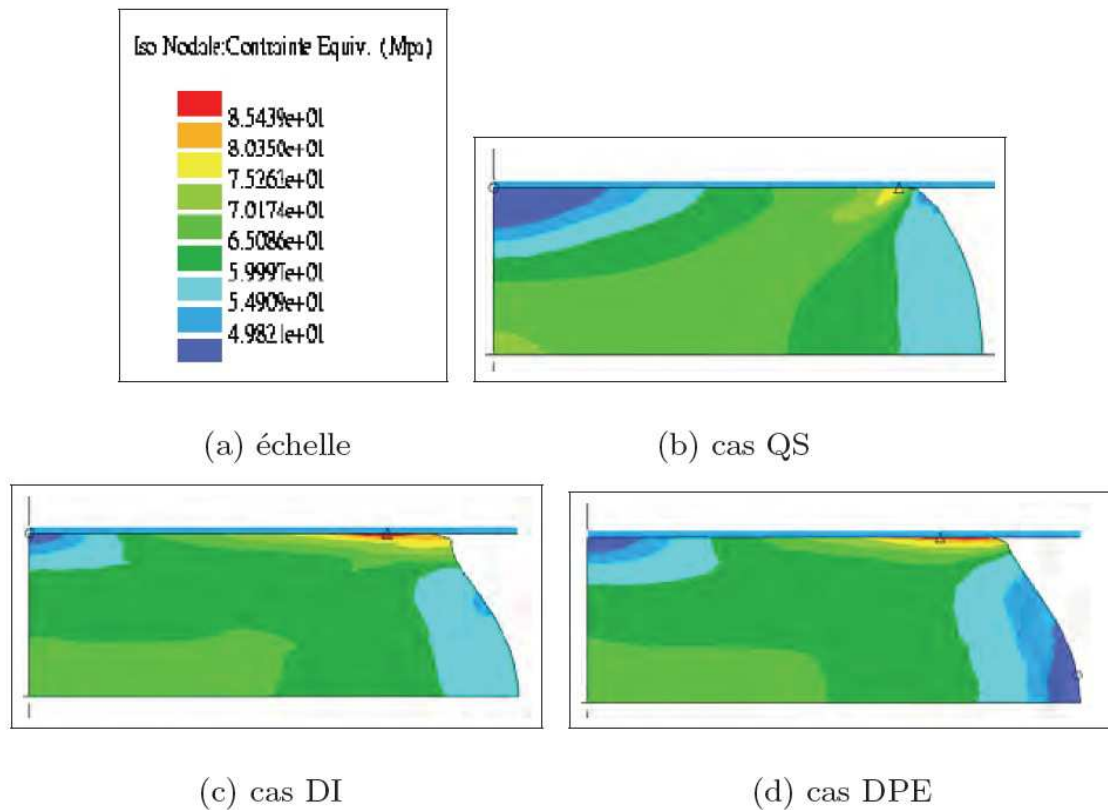


Figure 2 : Champ de contrainte équivalent pour la compression d'un cylindre. (a) échelle, (b) cas quasi statique, (c) cas dynamique -formulation implicite, (d) cas dynamique - formulation explicite - [E 2]

Ces travaux ont permis d'amorcer les réflexions sur la possibilité de traiter des applications « grandes vitesses » et l'intérêt de développer des formulations explicites en complément des formulations implicites classiquement développées au laboratoire, comme peuvent le proposer d'autres équipes ou d'autres logiciels (Abaqus, MARC, ...).

1.2 Formulation explicite en triangles et tétraèdres linéaires

J'ai ensuite encadré une thèse sur le développement de formulations explicites dans le cadre des procédés d'usinage à grande vitesse (thèse de Pascal De Micheli [E 6]) Il s'agit ici de travaux menés en parallèle avec une thèse utilisant des approches implicites (thèse de Fabien Delalandre [15]) plus classiquement utilisées par les équipes de recherche du laboratoire. Ces travaux ont été réalisés dans le cadre d'un projet national

financé par la Fondation CETIM que j'ai coordonné et qui regroupait différents laboratoires français de compétences complémentaires :

- Le laboratoire TEMPO de l'Université de Valenciennes a développé un modèle de frottement entre la pièce et les outillages
- Le laboratoire Thermo Cinétique de l'Université de Nantes a traité les échanges thermiques entre pièce et outil
- Le LPMM de l'Université de Metz a travaillé sur l'identification de lois de comportement sous des conditions de grandes vitesses.

Le choix de développer une formulation explicite est motivé ici par les particularités liées aux procédés d'usinage à grande vitesse, et en particulier:

- les aspects dynamiques liés aux grandes vitesses
- la complexité de la loi de comportement nécessaire pour traiter la gamme des températures et de vitesses de déformation vue par le matériau.

Toutefois, les grandes déformations vues par la matière incitent à vouloir conserver les capacités de remaillage développées au laboratoire. La nouveauté de ces travaux réside donc dans l'obligation de garder la compatibilité de la formulation avec les éléments tétraédriques. Ces éléments sont, en effet, connus pour présenter des propriétés de « locking volumique » pour des formulations explicites. Des méthodes de stabilisation doivent donc être utilisées. Plusieurs méthodes sont décrites dans la bibliographie [16][17][18]. Un modèle numérique dynamique explicite basé sur des éléments triangulaires et tétraédriques linéaires (en 2D et en 3D) stabilisés a été mis au point.

Cette méthode s'inspire des travaux de Bonnet [19] [20], développés pour des problématiques de grandes déformations. Ils ont été étendus à des cas d'usinage grande vitesse et rendus compatibles avec le formalisme incrémental en lagrangien réactualisé où l'hypothèse des petites déformations est postulée à chaque incrément de temps. La partie déviatorique du tenseur des déformations est moyennée pour éviter les effets de locking. On limite en effet ainsi le nombre de contraintes imposées pour imposer la conservation de volume.

On décompose donc ce tenseur en une partie déviatorique et une partie sphérique (Eq. 1) et on remplace cette dernière par un ratio volumique élémentaire moyenné (Eq. 2).

$$\varepsilon^{t+\Delta t} = dev(\varepsilon^{t+\Delta t}) + \frac{1}{3} tr(\varepsilon^{t+\Delta t}) \cdot Id \quad \text{Équation 1}$$

$$\tilde{\varepsilon}^{t+\Delta t} = dev(\varepsilon^{t+\Delta t}) + \frac{1}{3} \left(\overline{J_{elt}^{t+\Delta t}} - 1 \right) \cdot Id \quad \text{Équation 2}$$

Où $\overline{J_{elt}^{t+\Delta t}}$ est une variation de volume locale moyennée.

La formulation ainsi obtenue est validée par comparaison des calculs réalisés sous Abaqus Explicit de cas test documentés dans la littérature comme les essais d'impact de barre élastoplastique (Figure 3) ou d'écrasement simple de cylindre élastique.

Sur la Figure 3, on peut constater que, sans traitement des équations, une formulation en tétraèdres amène à des champs de contraintes très perturbés (essentiellement en surface). Une perte de la symétrie attendue de ce même champ dans la longueur de la

barre est observée et la géométrie est « plus rigide » que celle obtenue avec Abaqus. A contrario, la comparaison de la formulation stabilisée avec les résultats d'Abaqus (B et C) montre une adéquation de la répartition et de la valeur du champ de contrainte et une géométrie identique.

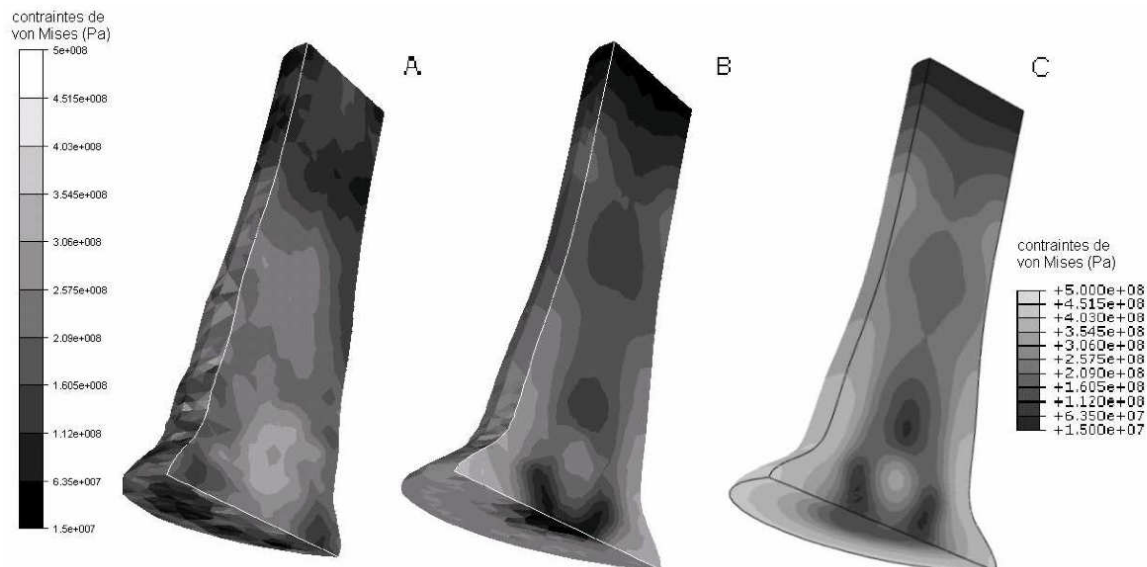


Figure 3 : Contrainte de von Mises 80 μ s après l'impact obtenues avec des tétraèdres linéaires classiques (A), les tétraèdres stabilisés (B) et les éléments hexaédriques à intégration réduite et stabilisation anti-hourglassing d'Abaqus/Explicit (C).

Pour être capable de traiter un problème d'usinage, il faut également prendre en compte les échauffements rapides et localisés de la matière. Un solveur thermique a donc été développé. L'interaction avec l'outillage est également très importante, la gestion du contact a été intégrée en suivant un algorithme de prédiction correction (projection). La prise en compte de très petits pas de temps permet d'assurer une bonne conservation du volume malgré les projections (<1%). Enfin, le frottement est un élément important de la modélisation de l'usinage grande vitesse. Le choix du modèle et la détermination de ses paramètres impactent la géométries et les échauffements locaux. Différents types de frottement ont donc été intégrés dans cette version de la bibliothèque CimLib®. Le traitement explicite des équations conduit à des instabilités numériques qui nécessitent des algorithmes de stabilisation des phénomènes de hautes et basses fréquences; ces algorithmes ont été également introduits dans notre formulation. Pour les applications en usinage, les résultats 2D ont été validés par comparaison avec les travaux de Baker [21].

Comme on peut le constater sur la Figure 4, la formulation développée permet de reproduire les résultats de la bibliographie en terme de prédiction des efforts de coupe. On est capable de reproduire la fréquence et le niveau des efforts.

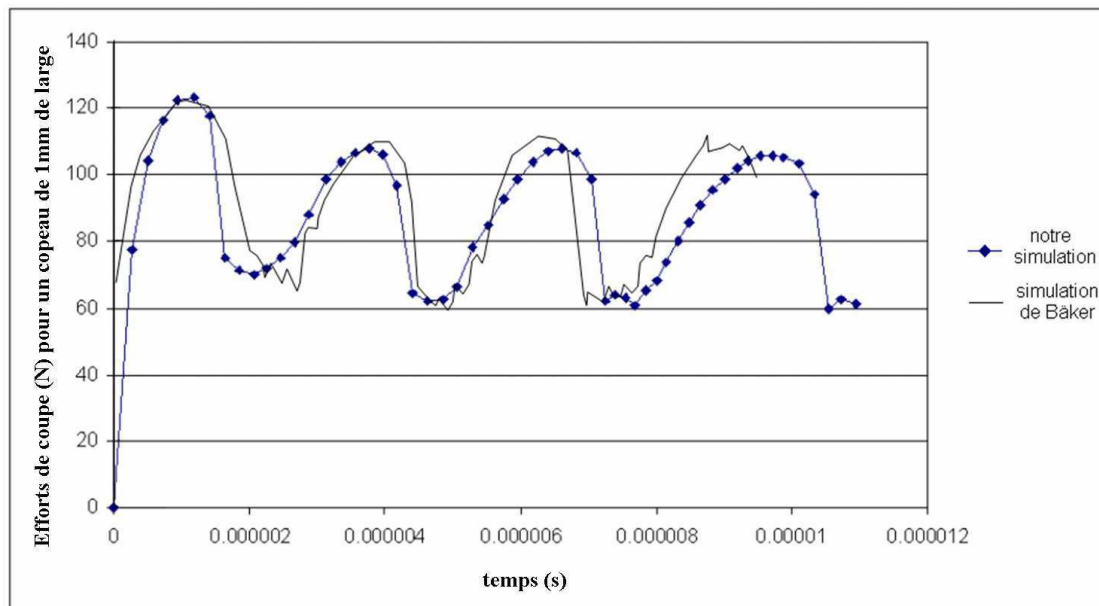


Figure 4 : Modélisation 2D de l'usinage grande vitesse - Comparaison des efforts de coupe avec [21] - [E 6]

La géométrie des copeaux est également très bien reproduite comme on peut le constater sur la Figure 5. Il convient d'insister sur le fait que l'utilisation couplée de cette formulation avec des algorithmes de remaillage local permet d'obtenir un copeau segmenté sans être obligé de prédéfinir et donc d'anticiper la finesse du maillage, ce qui n'est pas le cas de Baker [21]. Les effets liés au changement de vitesse d'usinage sont également très bien reproduits, en particulier l'apparition et la fréquence des bandes de cisaillement adiabatique.

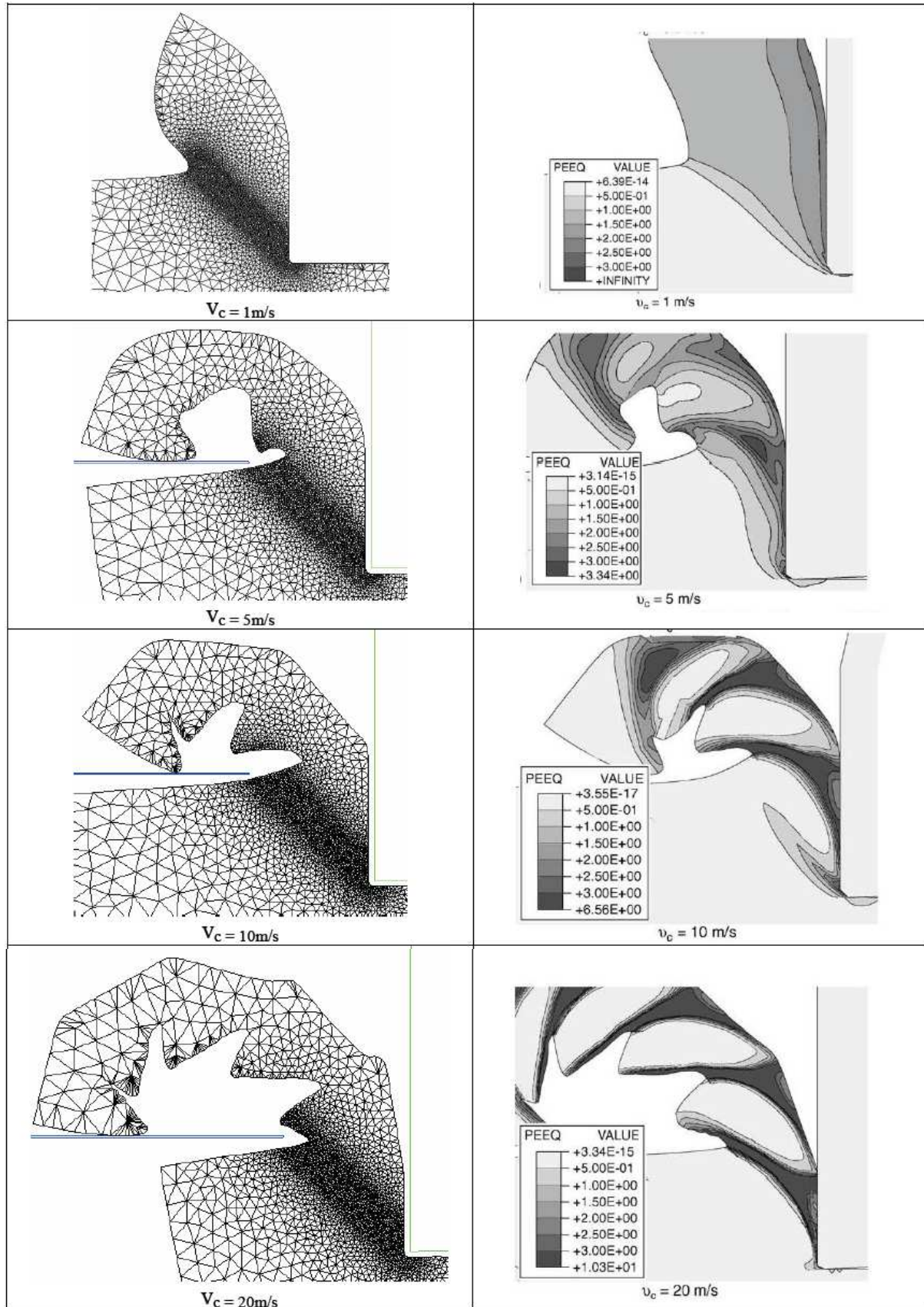


Figure 5 : Modélisation 2D de l'usinage grande vitesse - Comparaison des géométries de copeau avec [21]- [E 6]

Des procédures de lissage des surfaces sont nécessaires et sont couplées avec les outils de remaillage pour les modèles 3D. Ces développements complémentaires ne sont pas propres aux formulations explicites puisque le même type de méthodes a été développé dans [15]. Ces méthodes sont liées à la complexité de l'écoulement de la matière dans le copeau en UGV. On peut reproduire les résultats 2D dans un contexte 3D. Les résultats de la Figure 6 sont en effet issus d'un calcul 3D de coupe orthogonale prenant en compte des plans de symétrie latéraux.

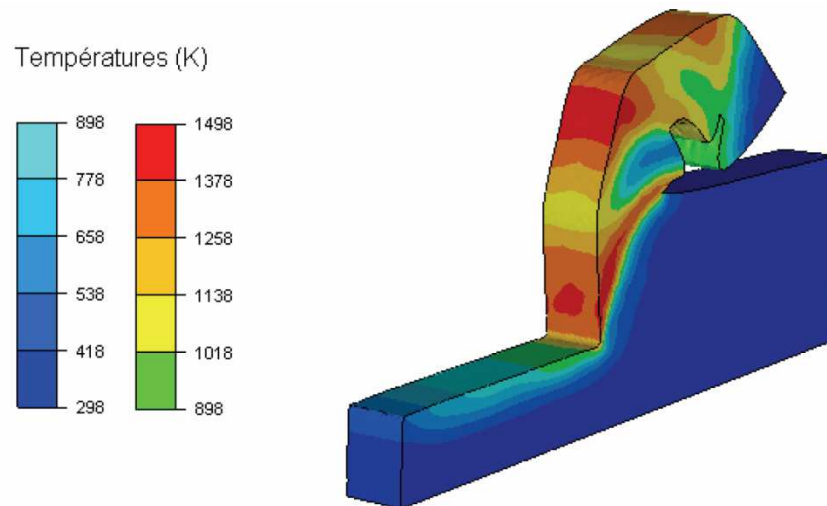


Figure 6: Modélisation 3D de l'usinage grande vitesse - [E 6]

Pour être efficaces, les méthodes explicites nécessitent de condenser les matrices sur la diagonale; ainsi, la résolution des systèmes ne nécessite que l'inversion de matrices diagonales et est donc très facilement parallélisable. Ainsi nos développements sont compatibles avec le calcul parallèle comme le montre la répartition des degrés de liberté sur plusieurs processeurs (Figure 7). La simplicité de la résolution permet d'obtenir des efficacités quasi optimales avec l'augmentation du nombre de processeurs dans la mesure où le nombre de degrés de liberté est suffisant sur chaque processeur comme le montrent les résultats du Tableau 1.

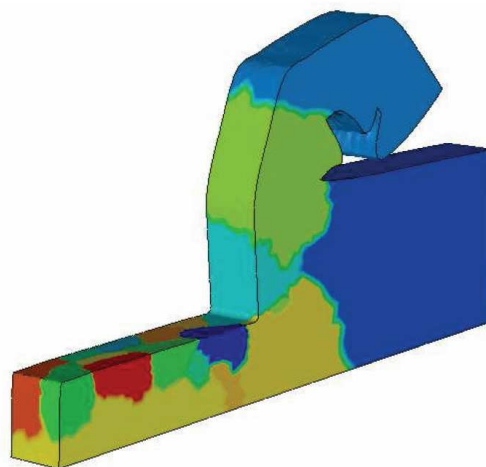


Figure 7 : Répartition des degrés de liberté sur différents processeurs (1 couleur par processeur) - [E 6]

Tableau 1 : Calcul parallèle, efficacité du calcul.

Nombre de processeurs	Nombre de nœuds par processeur	Temps de calcul pour 1000 incréments	Accélération par rapport au calcul séquentiel
1	60000	62 min	1
2	30000	32 min	1,94
4	15000	17 min	3,65
8	7500	9 min	6,89
16	3750	5 min	12,4
32	1875	3 min 15	19,08
64	937	4 min 15	14,59
128	468	5 min	12,4

1.3 Synthèse

Le développement de formulations semi explicites et explicites a été abordé. On a montré la possibilité de reproduire des résultats de la bibliographie en usinage grande vitesse. Les calculs 2D ont été comparés à ceux présentés dans [21]. On montre la capacité de notre modèle à reproduire les phénomènes (thermiques et mécaniques) qui amènent à la formation de copeaux segmentés. Le modèle est capable de prédire les formes de copeau et les efforts. Une extension 3D du modèle n'a pas pu être comparée à d'autres essais ou références.

D'un point de vue numérique la résolution des problèmes de verrouillage numérique a été traitée en s'inspirant de travaux publiés dans le domaine des petites déformations ou de la dynamique rapide. Ces formulations ont été couplées avec les outils numériques développés au laboratoire comme le remaillage ou le calcul parallèle. Elles ont été également complétées par le développement de méthodes de stabilisation propres au traitement explicite des équations et de modules de calcul thermique explicite. Elles ont permis de traiter des applications complexes montrant de grandes déformations.

D'un point de vue validation, l'application aux procédés d'usinage grande vitesse n'a pu être comparée qu'à des résultats de la littérature sur des cas de coupe orthogonale. Cependant on a montré que le modèle était capable de reproduire les principaux phénomènes - bandes de cisaillement, relevés d'effort - avec une grande précision. Un des avantages, par rapport aux approches relevées dans la littérature, réside dans l'utilisation d'un algorithme de remaillage automatique qui permet de ne pas avoir à prédéfinir le maillage en fonction des zones où on attend la formations de bandes de cisaillement.

Les applications d'usinage purement 3D se heurtent encore à des problématiques de distorsion de maillage qui ne sont cependant pas propres aux formulations explicites.

Références : [A 6][A 9][A 11][C 7][C 15][C 16][C 18][E 2][E 6]

Partie 2 RESOLUTION DE GRANDS SYSTEMES LINEAIRES – METHODES MULTIGRILLES

Dans cette partie, on aborde la problématique de réduction des temps de calcul par une résolution plus efficace des systèmes linéaires.

L'approche exposée ici consiste à diminuer le temps de résolution de systèmes linéaires de grandes tailles par utilisation de méthodes multigrille comme préconditionneur du solveur de type résidu minimal. Les travaux ont porté sur le développement de méthodes permettant la génération de maillages de taille différentes sur lesquels on exprime « une projection » du problème mécanique traité. On utilise une méthode de Galerkin qui permet de construire la matrice des problèmes grossiers à partir de la matrice éléments finis et d'opérateurs d'interpolation des maillages grossiers par rapport au maillage de calcul. L'application à des cas industriels montre des accélérations notables.

Publications significatives :

Mocellin K, Fourment L, Chenot JL, An efficient multigrid solver for incompressible fluid problems: Application to the 3D hot forging process, Simulation of Materials Processing: Theory, Methods and applications 233-238 (1998)

Rey B. · Mocellin K, · Fourment L, A node-nested Galerkin multigrid method for metal forging simulation, Computing and Visualization in Science, DOI 10.1007/s00791-006-0054-5 (2006).*

La taille des modèles numériques en mise en forme des matériaux conduit souvent à des besoins importants en termes de temps calcul; la réduction des temps calcul est donc une préoccupation constante de nos recherches. L'évolution rapide des capacités des matériels informatiques est un levier important dans cette recherche du plus rapide. La compatibilité des méthodes numériques avec le calcul parallèle est également un point clé. Toutefois des gains substantiels peuvent également être réalisés en améliorant les performances des solveurs qui sont utilisés pour l'inversion des systèmes linéaires. C'est dans cette optique que des travaux sont menés régulièrement au CEMEF en essayant d'améliorer les préconditionneurs de nos solveurs. Ces recherches sont menées en s'appuyant sur des bibliothèques numériques externes optimisées ou en développant des propres modules. Je présenterai d'abord brièvement une partie de mes résultats de thèse car ils permettent d'introduire et de motiver les choix qui ont été faits par la suite, dans les travaux que j'ai encadré.

2.1 Multigrille et raffinement

Mes travaux de thèse [E 1] ont porté pour partie sur l'accélération des temps de calcul par le développement de préconditionneurs basés sur des méthodes multigrilles.

Le principe général de ces méthodes est de décomposer la résolution d'un système linéaire en utilisant des représentations grossières de ce système. On résout ainsi des problèmes proches mais à moins de degrés de liberté qui permettent de s'approcher à moindre coût d'une solution du problème.

Pour cela, on utilise

- des opérations de restriction, d'interpolation qui permettent de passer d'un problème fin à un problème grossier
- des méthodes de résolution qui peuvent différer sur les différents niveaux

Cette stratégie vise à réduire, de façon découplée, les différentes composantes (en fréquence) de l'erreur sur différentes grilles [22].

Dans la littérature, on trouve deux classes de méthodes permettant de construire les différents niveaux de grilles. Les approches géométriques utilisent des maillages plus grossiers sur lesquels on assemble les matrices de calcul [23][24]. Par opposition, avec les méthodes algébriques, on déduit les matrices grossières à partir de la matrice du problème exprimé sur le maillage de calcul (le maillage fin) par multiplication avec des opérateurs de transferts que l'on détermine à partir du poids relatifs des différentes composantes de la matrice [25][26].

Dans l'approche que j'ai développé, on vise à développer des préconditionneurs permettant d'améliorer la convergence de la méthode de résidu minimal utilisée [27] pour la résolution du système linéaire.

Une originalité de ce travail de thèse a consisté à utiliser des maillages emboîtés générés automatiquement pour obtenir les différents niveaux de grille, le niveau fin provenant d'un raffinement systématique du maillage grossier. Les matrices utilisées sur ces niveaux sont obtenues par assemblage classique sur le niveau fin et par l'utilisation de la formule de Galerkin sur les niveaux grossiers: on obtient une matrice sur le niveau grossier en multipliant la matrice du niveau immédiatement supérieur par des opérateurs de transfert entre grilles comme cela est décrit par l'équation 3.

$$A_H = p_h^H A_h p_H^h$$

Équation 3

Où A_H est la matrice sur le niveau grossier, A_h est la matrice sur le niveau fin et p_h^H et p_H^h sont les opérateurs de transfert entre les 2 niveaux. Cela revient à utiliser des produits de matrices. L'utilisation de maillages emboîtés amène à des opérateurs de transfert, et donc des produits de matrices, simplifiés.

En suivant la terminologie introduite précédemment, cette approche peut être qualifiée de géométrique puisque la construction des différents niveaux de résolution s'appuie sur la génération de maillages, mais également d'algébrique puisque les matrices résolues à ces mêmes niveaux grossiers sont calculées à partir de la matrice de la grille la plus fine et par multiplication avec les opérateurs de communication entre grilles (méthode de Galerkin).

L'utilisation d'une méthode de résidu minimal comme « lisseur » de la méthode multigrille, c'est à dire comme méthode de résolution sur le(s) maillage(s) grossier(s) était une des nouveautés de ces travaux. En effet, les méthodes utilisées très classiquement sont plutôt des méthodes de type Jacobi pour lesquelles les propriétés de lissage de l'erreur sont démontrées. On s'attend ainsi à traiter différentes composantes de l'erreur sur les différents niveaux de maillage. On a prouvé que ces propriétés de lissage des composantes hautes fréquences, que l'on ne retrouve pas dans les méthodes de type gradient conjugué, n'étaient pas nécessaires pour obtenir une accélération du temps de résolution. Cette approche présentait cependant plusieurs écueils :

- Le maillage fin est obtenu par raffinement du maillage grossier. Cette hypothèse est problématique pour des maillages initiaux de forme non parallélépipédique et est incompatible avec le remaillage en cours de calcul.
- La compatibilité de ces développements avec le calcul parallèle n'a pas été assurée.

Toutefois, des accélérations de temps de résolution d'un facteur pouvant aller jusqu'à 13 ont été notées.

Références : [A 1] [A 3][C 2] [C 3]

2.2 Multigrille et déraffinement

Afin de pallier les problèmes soulevés lors de mes travaux de thèse tout en visant des accélérations similaires, les travaux de thèse de Benoit Rey [E 4] ont été initiés.

Les travaux réalisés ont consisté :

- à développer une stratégie de création de maillages emboîtés à l'aide des outils de remaillage utilisé dans le remailleur du CEMEF
- à faire le lien entre une librairie du domaine publique de méthodes optimisées et l'environnement de calcul en générant des formats de matrice compatible
- à obtenir un solveur performant optimisant les calculs matriciels liés à l'utilisation de la méthode de Galerkin.

2.2.1 Génération des maillages

Dans l'utilisation de méthodes multigrilles, le maillage fin est par définition le maillage sur lequel on exprime le problème mécanique à résoudre. Il est donc une donnée d'entrée pour la procédure d'assemblage et de résolution du problème. Cette hypothèse n'était pas respectée dans mes travaux de thèse. Aussi, dans ce nouveau travail, une méthode basée sur la génération de maillages par déraffinement est utilisée.

A partir d'un maillage de forme quelconque, il faut être capable de générer plusieurs maillages de taille décroissante (en terme de nombre de degrés de liberté). Cette approche assure, en particulier la compatibilité avec le remaillage automatique. La notion de maillages emboîtés est également importante comme cela sera exposé plus loin.

Un outil général a été développé et permet d'obtenir un maillage grossier à partir d'un maillage fin en maîtrisant le ratio du nombre de degrés de liberté entre les maillages. Cet algorithme s'inspire des travaux de Adams [28]. L'objectif de cet algorithme est de

- ranger les nœuds du maillage dans une liste en classant en premier les nœuds surfaciques du plus contraint (en terme de courbure et de plan de symétrie) au moins contraints, puis les nœuds internes,
- d'extraire de cette liste, une liste de nœuds, plus réduite, composée de nœuds qui ne sont pas voisins entre eux
- de générer un nouveau maillage (grossier) à partir de cette liste,
- de répéter ces actions à partir du maillage grossier créé pour obtenir d'autres maillages plus grossiers encore.

On obtient ainsi des ensembles indépendants maximaux de nœuds qui servent à construire les niveaux de maillage dans le maillage.

L'outil de remaillage disponible au laboratoire est basé sur une méthode topologique qui permet d'obtenir des maillages par une succession d'améliorations locales du maillage. Des développements et adaptation de ces méthodes ont donc été réalisés pour pouvoir générer les maillages emboîtés.

L'optimum, pour les méthodes multigrilles est d'obtenir un ratio de 8 entre le nombre de nœuds du maillage fin et du maillage grossier pour les applications 3D. Le Tableau 2 met en évidence l'influence de ce ratio sur les performances du solveur développé.

Tableau 2 : Evolution du temps de calcul en fonction du taux de déraffinement entre les maillages fins et grossier pour une méthode à 2 niveaux de grille.

Taux de déraffinement	Nombre de nœuds du maillage grossier	Nombre d'itération du solveur	CPU
3,9	3088	9	23,4
6,0	2007	13	17,345
8,1	1497	14	14,1
13,2	921	19	15,924
17,2	705	24	18,4
26,6	456	41	28,7

On ne conserve environ qu'un nœud sur deux dans chaque direction. On peut voir sur la Figure 8 et la Figure 9, deux applications où ce ratio est globalement respecté entre 2 maillages. Cette procédure peut être généralisée à plusieurs niveaux de grilles.

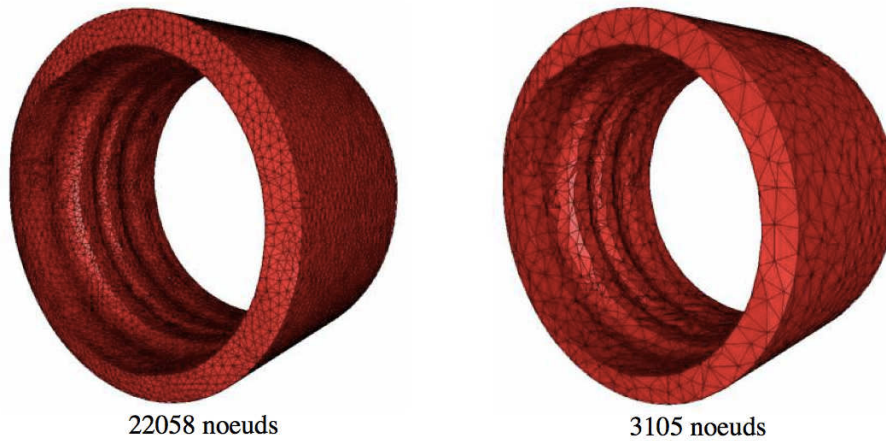


Figure 8 Déraffinement du maillage d'une bague en fin de roulage (taux de déraffinement =7,1) - [E 4]

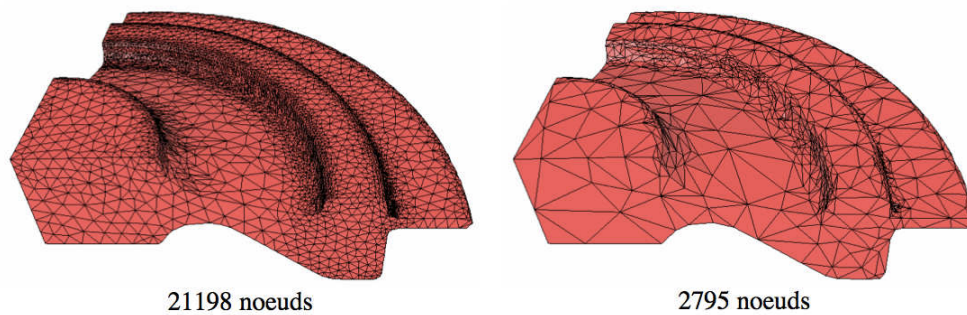


Figure 9 - Déraffinement du maillage d'un quart de pièce forgée (taux de déraffinement =7,6) - [E 4]

La compatibilité avec le remaillage automatique est démontrée sur la Figure 10 où on peut voir sur un calcul de roulage (procédé proche du laminage circulaire) l'évolution du nombre de nœuds sur 3 maillages emboîtés pendant le procédé. Pendant cette simulation 13 remaillages ont été effectués automatiquement sans perturber la génération des maillages et le déroulement des calculs.

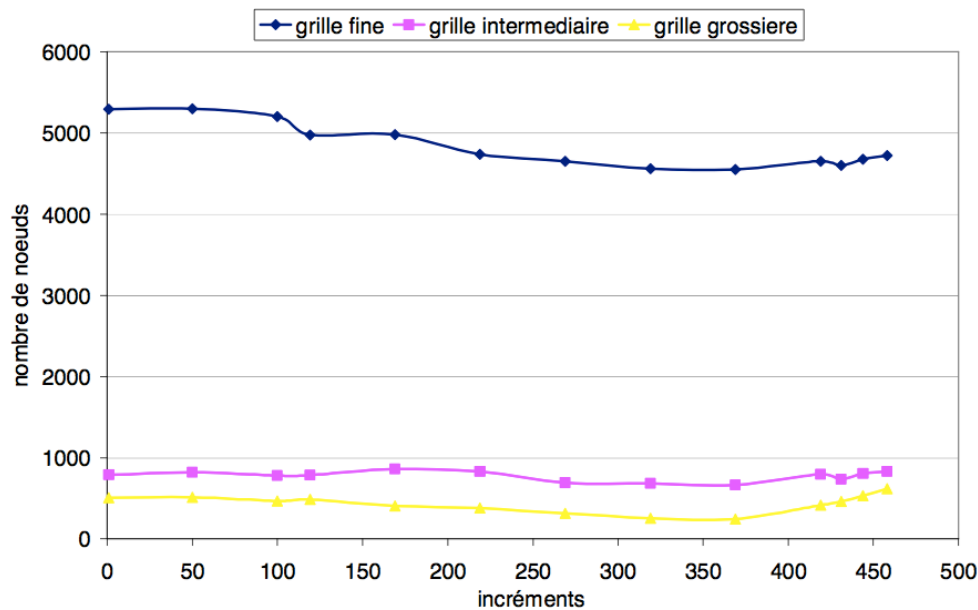


Figure 10 : Evolution du nombre de nœuds dans les maillages fin et grossiers pendant un calcul de roulage [E 4]

2.2.2 Construction des opérateurs

Les opérateurs de transfert entre grilles permettent de transférer l'information d'un niveau à un autre. Ils servent également à exprimer la condition de Galerkin. Ces opérateurs doivent être simples et peu coûteux à déterminer pour minimiser les temps de calcul. Certains auteurs définissent des maillages complètement indépendants [29] et donc à la nécessité d'interpoler les maillages les uns par rapport aux autres. Cela ne pose pas de problème de méthode mais alourdit le temps de calcul.

La notion de maillages emboîtés par nœuds est un élément essentiel pour conserver des opérateurs de transfert simples et peu coûteux à déterminer.

Sur la Figure 11, on illustre la construction de l'opérateur de restriction (passage de la grille fine à la grille grossière). Il peut être déterminé lors de la construction des maillages par interpolation des nœuds du maillage fin dans le maillage grossier.

L'opérateur de prolongement est défini comme la transposée de l'opérateur de restriction.

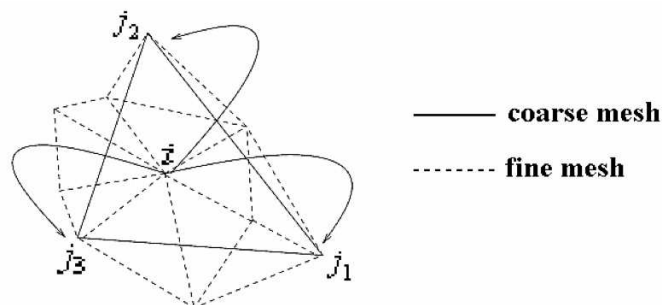


Figure 11 - Construction de l'opérateur de restriction par interpolation - [E 4]

La génération automatique des maillages, des opérateurs et donc des matrices de résolution à tous les niveaux de grilles permet d'obtenir un préconditionneur dont le fonctionnement est totalement transparent pour l'utilisateur et donc compatible avec les remaillages nécessaires pour suivre les grandes déformations de la matière. Pour que ces calculs soient plus rapides que le solveur de départ, il faut également faire en sorte de minimiser les temps de calcul liés aux produits de matrices.

2.2.3 Optimisation des calculs

Pour optimiser les temps de calcul liés aux produits de matrices répétés imposés par la méthode de Galerkin, l'utilisation des solveurs performants disponibles dans la librairie publique PETSc [30] est une des parts importantes de ce travail. Cette partie a nécessité l'étude des formats de communication avec la bibliothèque et la mise en place des méthodes correspondantes. L'étude des différents solveurs proposés par la bibliothèque a amené au choix d'un lisseur de type résidu minimal qui convient au format des matrices traitées.

On montre sur la Figure 12 que le préconditionneur développé et utilisé avec 3 niveaux de maillage amène à des convergences asymptotiques optimales en $O(N)$.

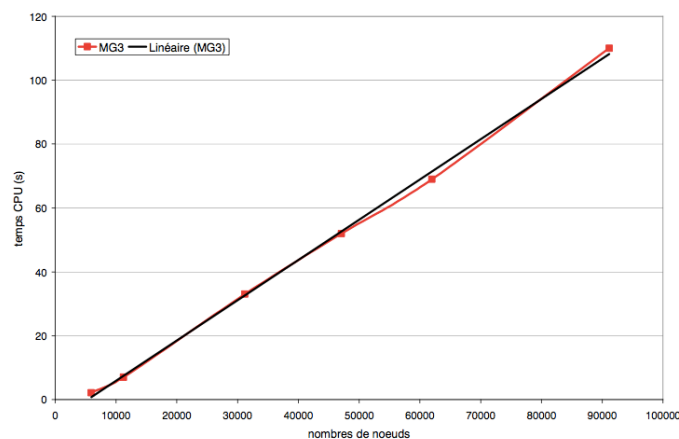
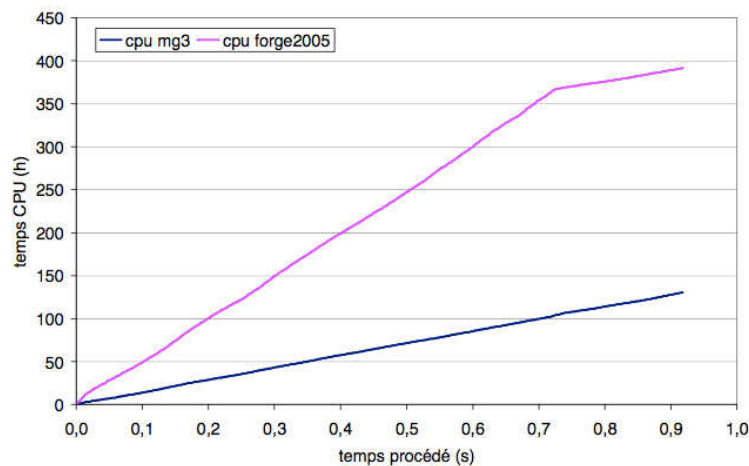


Figure 12 - Temps de calcul nécessaire pour l'inversion de la matrice d'un problème sur un maillage de finesse croissante (MG3) – Convergence asymptotique en $O(N)$ - [E 4]

Sur la Figure 13, on montre les temps de calcul pour la simulation du procédé de roulage. Une accélération du temps de calcul global de la simulation de l'ordre de 3 est observé. Notons que l'accélération obtenue pour l'inversion de chaque système linéaire est supérieure à 3 mais que le temps requis pour la résolution ne représente pas la totalité du temps de calcul.



	Temps CPU
Forge2005®	391h 34min
Forge2005 MG3	130h 27min
Accélération	3

Figure 13 - Temps de calcul en fonction du temps procédé pour la méthode multigrille (MG3) et la version commerciale de Forge® - [E 4]

2.3 Synthèse

Dans un objectif de réduction des temps de calcul, la résolution des systèmes linéaires a été optimisée. Ainsi, en s'appuyant sur les résultats prometteurs obtenus pendant ma thèse, un solveur multigrille a été développé. Une des difficultés de cette approche est que l'appel à ce solveur et son utilisation doivent demeurer transparents.

Le choix s'est porté sur un solveur basé sur la construction automatique de plusieurs niveaux de maillages emboîtés par nœuds. Les opérateurs de transfert entre grilles sont déduits de cette construction.

Enfin pour conserver une accélération notable, il est nécessaire d'avoir des temps de calcul optimaux lors des calculs répétés de produits matrices-matrices. Le choix de l'utilisation de la bibliothèque numérique Petsc® a été fait.

La génération automatique de maillages de tailles différentes a été démontrée sur plusieurs configurations géométriques. Les performances du solveur ainsi développé sont prometteuses. Des accélérations globales pour la simulation du procédé de roulage de l'ordre de 3 ont été obtenues.

Références : [A 8][C 12][E 4]

Amélioration de la précision par enrichissement des modèles

Partie 3 COUPLAGE MULTIDOMAIN

Partie 4 COUPLAGES MULTIPHYSIQUES

Partie 3 COUPLAGE MULTIDOMAIN

Dans cette partie, je vais présenter des algorithmes numériques permettant le calcul (mécanique ou thermique) dans plusieurs domaines en contact et soumis à de grandes déformations. Ces approches sont couplées à des méthodes permettant de prendre en compte les sollicitations cycliques vues par certains domaines (échauffement et fatigue). Ces approches mettent en évidence la nécessité d'enrichir les lois et modèles matériau (usure, fatigue).

Publications significatives :

Pichelin E., Mocellin K, Fourment L and Chenot J. L., An application of a master-slave algorithm for solving 3D contact problems between deformable bodies in forming processes, *Revue Européenne des Eléments finis*, vol 10 n°8, 857-880 (2001).*

Mocellin K, Terzolo L, Modelling of tool heating in hot forging processes, 7th ESAFORM Conference, p. 651-654, Trondheim, Norvège, 28-30 avril 2004

Mocellin K., Ferraro M., Velay V., Logé R, Rézaï-Aria F. , Numerical life prediction of mechanical fatigue for hot forging, *International Journal of Material Forming*, vol 2, 129-132, DOI10.1007/s12289-009-0537-2, 2009

Le calcul multidomaine est une problématique scientifique complexe nécessitant le développement d'algorithme de contact [31]. Elle a été abordée au laboratoire au travers de la problématique industrielle de la tenue et de la dégradation des outillages de forge. Dans le contexte de développement qui est le notre, la nécessité de préserver une compatibilité avec des techniques de remaillage, ainsi que celle de préserver les performances en calcul parallèle apportent des difficultés supplémentaires.

3.1 Modélisation thermomécanique couplée

Afin de traiter numériquement les interactions thermiques ou mécaniques de deux domaines en contact, plusieurs approches sont envisageables. On peut choisir de coupler fortement ou faiblement les problèmes sur les différents domaines en envisageant des résolutions itératives sur chaque domaine ou en exprimant l'équilibre sur l'ensemble des domaines. Ce choix se fait en fonction de l'interaction plus ou moins forte des phénomènes physiques considérés entre les deux interfaces, cette interaction dépendant directement du type de problème traité.

On a fait le choix ici de considérer un couplage fort entre les domaines c'est à dire de résoudre l'équilibre dynamique puis le problème thermique sur l'ensemble des domaines en même temps. On note que l'on ne couple pas fortement les problèmes thermiques et mécaniques qui sont assemblés et résolus consécutivement. Il a été montré que ce couplage n'apportait pas de précision supplémentaire sur des cas de forgeage [15] classique alors qu'il augmente de façon significative le temps de calcul.

Afin de traiter la condition de contact, il convient, en premier lieu, de mettre au point un algorithme. Wriggers débat des avantages et inconvénients des différentes méthodes [31]. La méthode de gestion du contact utilisée dans les versions précédentes du logiciel Forge® a été conservée. Dans ce logiciel la résolution du problème est basée sur une technique de pénalisation de la condition de contact. L'expression de ce terme est adaptée à la formulation en vitesse – pression et à la réactualisation en lagrangien augmenté [E 1].

Ce choix a été fait afin de ne pas introduire de multiplicateurs de Lagrange car cette méthode impliquerait l'ajout de degrés de liberté supplémentaire alors que la prise en compte de différents corps déformables accroît déjà considérablement la taille des systèmes linéaires et des temps de calcul.

Que l'on considère le problème mécanique ou le problème thermique, l'une des difficultés revient à exprimer une condition de contact sur une interface composée d'au moins 2 maillages. L'approche maître esclave était déjà utilisée en 2D [32] [33]. D'autres approches peuvent également être considérées. Dans [34] [35] [36][37], les auteurs considèrent la construction d'une surface intermédiaire (mortar surface) que l'on peut schématiser comme sur la Figure 14. Cette surface est générée assez facilement en 2D mais sa construction en 3D entre des surfaces qui évoluent devient rapidement complexe et coûteuse [35][37].

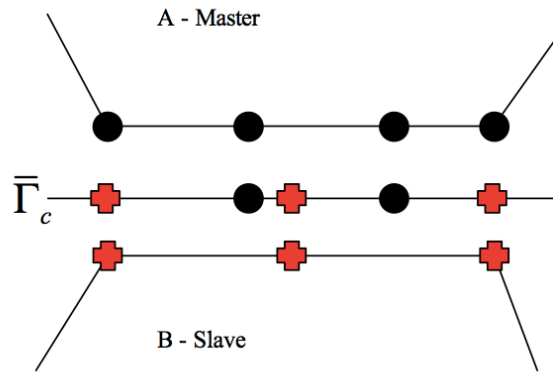


Figure 14 : Représentation de la « mortar surface »

Un algorithme maître esclave a donc été développé [A 5], [D 2], [D 3]. Il consiste à exprimer la condition de contact sur une seule des 2 interfaces en contact, la surface esclave. Ainsi la formulation de la condition de contact est exprimée sur les nœuds du domaine esclave, comme dans une configuration de contact entre un corps déformable et un corps rigide [A 2]. Cette condition dépend de la vitesse relative des deux corps en vis à vis qui sont les inconnues du problème dans notre formulation, de la normale de projection des nœuds esclave sur le maître et de la distance relative des nœuds de l'esclave par rapport à la surface maître. Le corps esclave est généralement celui qui se déforme le plus. Le champ de vitesse du corps maître est exprimé sur la surface du corps esclave en utilisant les coordonnées barycentriques du projeté des nœuds esclaves sur le maître.

Pour exprimer cette condition, on s'appuie sur la création d'éléments finis fictifs tétraédriques dont l'objectif est de lier les degrés de liberté associés aux nœuds des surfaces potentiellement en contact. Un nœud de la surface maître forme avec une facette de la surface du corps esclave un tétraèdre. Ces éléments s'intègrent parfaitement dans l'architecture logicielle du code qui traite des éléments tétraédriques.

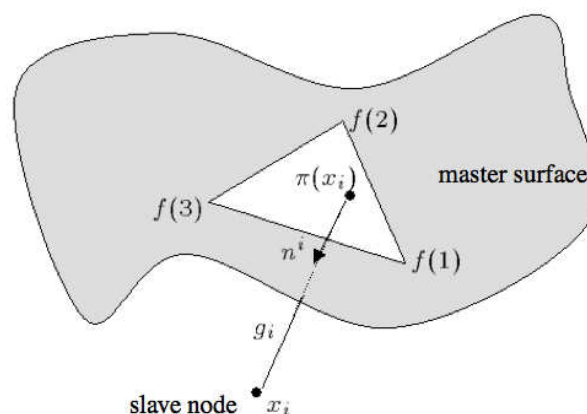


Figure 15 – Approche maître esclave

Une mise à jour des tableaux de connectivité et une extension du nombre d'éléments du problème permettent la prise en compte des relations de contact assez naturellement dans les algorithmes d'assemblage des matrices de raideur.

Afin de ne pas alourdir le calcul de la normale et de la distance de projection, les facettes constituant la surface des corps esclaves sont classées suivant un arbre hiérarchique qui est parcouru à l'aide d'un algorithme de tri adapté.

Cette formulation nodale est déclinée pour la gestion du contact et l'expression du problème thermique [C 8][C 9]. Pour la gestion des termes de frottement qui sont exprimés aux points d'intégration des faces en contact et non aux nœuds, des éléments fictifs enrichis ont été développés [38]. On parle de contact segment/segment. Tous les développements sont compatibles avec le calcul parallèle. Le partitionnement est effectué domaine par domaine à l'aide du partitionneur géométrique. A chaque processeur est donc assignée une partie de chaque domaine de calcul comme cela est illustré sur la Figure 16. Cette première approche a ensuite été généralisée et modifiée pour minimiser l'interaction – et donc les échanges de messages – entre les processeurs et limiter le nombre de cas particuliers – par exemple lorsque un nœud situé sur un processeur est relié avec un nœud ou un élément déclaré sur un autre.

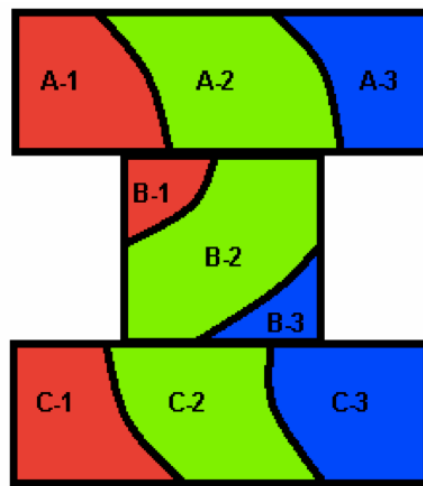


Figure 16 : Schéma de principe de la parallélisation, chaque processeur reçoit une partie de chaque domaine [E 3]

Passons maintenant aux applications. Pour mener à bien ces calculs il a fallu introduire les caractéristiques thermiques et mécaniques des aciers à outil concernés. On s'est basé essentiellement sur les travaux réalisés dans le cadre du projet ACR2 pour les aspects liés à la loi de comportement. Dans ces travaux, les nuances X38CrMoV5 et 55NiCrMoV7, qui sont très classiquement utilisées en forge à chaud, ont été caractérisées entre 20°C et 650°C. Des lois de comportement ont été exprimées sous un formalisme de type Ramberg –Osgood en utilisant un coefficient d'écrouissage thermo dépendant [C 6]. Les données thermiques sont issues de base de données, elles restent proches de celles d'un acier.

Le développement de ce couplage permet donc de prendre en compte les interactions thermique et mécanique entre la pièce forgée et les outillages de forge. Sur la Figure 17 on peut par exemple observer l'influence de la prise en compte de l'échauffement de l'outillage sur la température de surface d'une pièce.

L'écoulement est un peu différent entre le cas monodomaine (Mono) et le cas multidomaine (MD). La température est moins élevée dans la bavure pour le calcul multidomaine et donc la matière s'écoule moins. Le modèle multidomaine est, a priori, plus proche de la physique du problème. Sa précision étant, bien évidemment de la précision sur les données d'entrée. Ceci soulève le problème de l'identification de ces

paramètres. Cette démarche pourra dorénavant sur les outils de modélisation que j'ai contribué à développer.

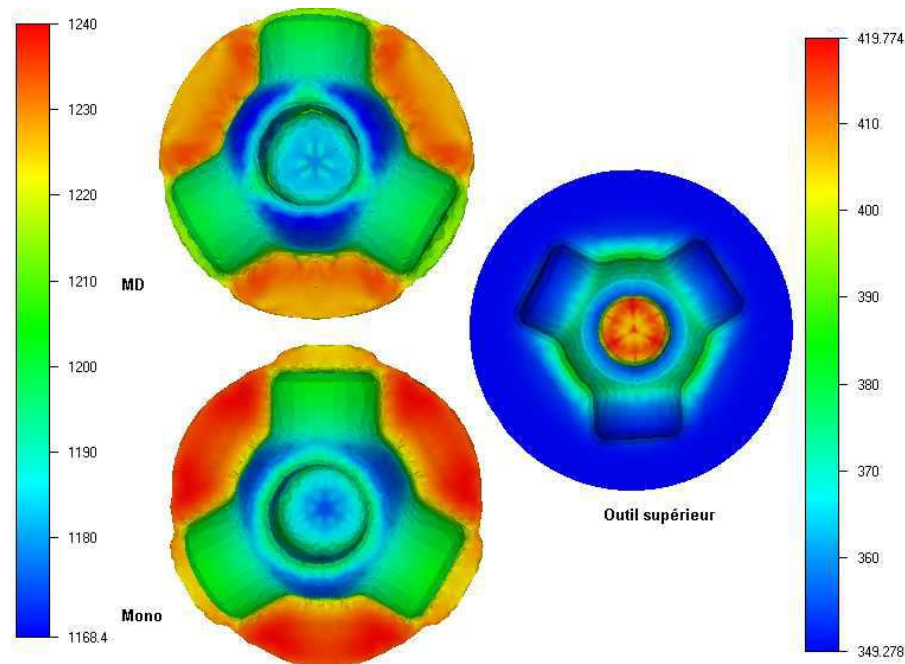


Figure 17 – Influence de la prise en compte du champ thermique de l'outil sur la géométrie d'une pièce forgée. Mono est le résultat obtenu avec des outils isothermes et indéformables, MD avec des outils déformables [E 3]

Ces développements ont été largement réutilisés pour l'application à des problématiques d'assemblage [C 13][C 14][D 4][D 8] [C 19][C 22] comme on peut le voir sur la Figure 18 . Ces travaux ont également été améliorés pour pallier les limites de la formulation maître-esclave en introduisant une formation pseudo-symétrique qui n'oblige plus à satisfaire à l'hypothèse forte d'équivalence des tailles de maille de part et d'autre de l'interface imposée par l'approche maître / esclave [39].

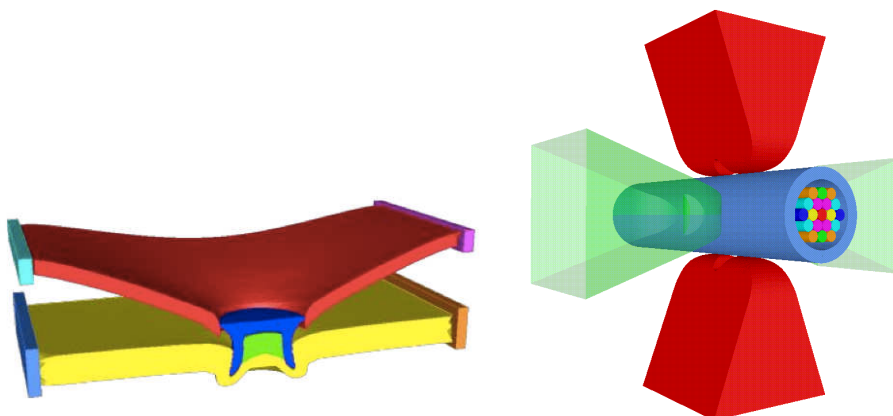


Figure 18 – Exemples d'application des algorithmes de calcul de couplage multidomaine : arrachement d'un point riveté (3 domaines déformables), sertissage électrique (19 domaines déformables)

3.2 Modélisation des problèmes de surface - Dégradation des outillages

Au-delà de leur interaction avec la pièce, pendant le forgeage, les outils de forge sont aussi source de problématiques industrielles et scientifiques.

L'interaction pièce /outil n'influence une pièce forgée qu'une seule fois, alors que la répétition de ces interactions est pour l'outillage la source principale de sa détérioration. Ce contact peut intervenir plusieurs centaines voire plusieurs milliers de fois dans la vie d'un outillage. Comme il n'est pas envisageable de calculer tous les événements survenant lors de la vie de l'outil, pour des raisons de temps de calcul, des algorithmes spécifiques ont été développés pour atteindre un état thermomécanique stabilisé.

3.2.1 Etat thermique stabilisé

On peut, en effet noter qu'un outillage de forge à chaud est soumis à une variation thermique dans les premières frappes et que cet état thermique se stabilise. Sur la Figure 19 on peut observer l'évolution de température sur un capteur thermique positionné dans un outil de forge, à proximité de la surface pendant la production.

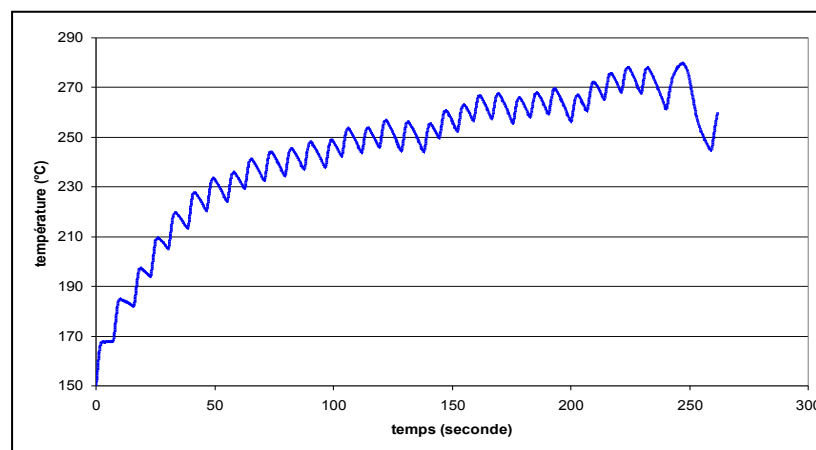


Figure 19 : Relevé de température sur un capteur situé dans un outillage de forge à chaud – travaux de maîtrise spécialisée de Nicolas Aladern

En s'appuyant sur des travaux déjà réalisés en 2D [40][41], plusieurs méthodes numériques pour déterminer cet état stabilisé ont été développées dans le cadre de la thèse de Laurent Terzolo [E 3]. La première étant la simulation de toutes les frappes de forgeage qui aboutit à des temps de calcul inenvisageables dans un contexte industriel. La méthode la plus rapide permet de calculer le régime établi dans les outils à partir de la **simulation couplée d'une seule passe de forgeage**. Pendant cette passe, les échanges thermiques aux interfaces sont stockés. Cette passe est suivie de calculs thermiques dans les outillages utilisant les échanges précédemment stockés comme conditions limites. Ces calculs sont conduits jusqu'à obtenir une stabilisation de la température entre 2 frappes successives.

Afin d'obtenir un état mécanique satisfaisant, un dernier calcul thermomécanique peut être effectué. Les champs de contraintes et de déformations calculés dans la pièce et les outils sont alors cohérents avec l'état thermique de ces domaines. La Figure 20 synthétise et résume les 3 approches.

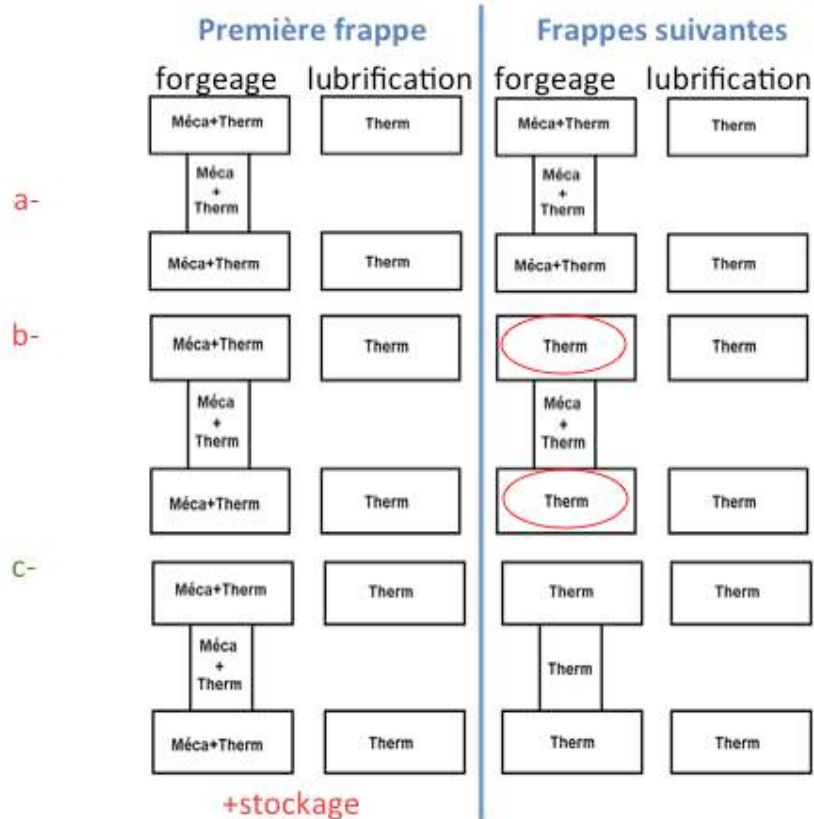


Figure 20 : Schéma de fonctionnement des différentes méthodes de calcul du régime thermique établi, a- calcul de tous les événements, b- solution intermédiaire prenant en compte les aspects mécaniques, c- méthode basée sur 1 seul calcul mécanique.

L'application de cette méthodologie - au travers des études en mastère spécialisé - a permis l'analyse d'outillages réels de forge. Toutefois les contraintes de confidentialité industrielle ne permettaient pas leur publication. On peut noter l'adéquation obtenue entre le modèle simplifié et les relevés expérimentaux sur la Figure 21. La divergence entre les 2 courbes après 150 secondes provient d'aléas de production liés à des problèmes de lubrification.

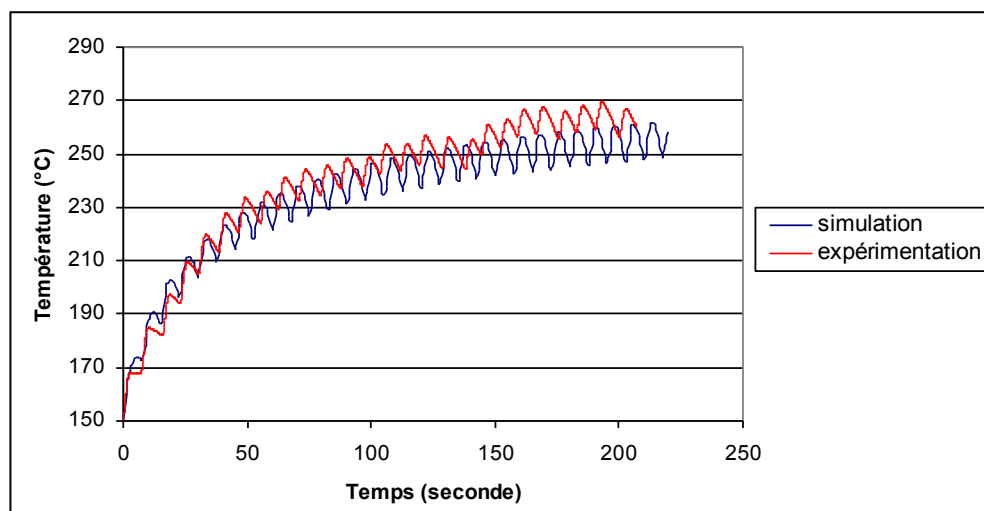


Figure 21 : Comparaison des relevés de température expérimentaux et calculés dans un outillage de forge

Il est important de noter que pour obtenir ces résultats, une phase d'identification des paramètres, en particulier du coefficient d'échanges thermiques pendant les phases de déformation et surtout de lubrification, est importante.

De manière générale, on constatera dans la suite de ce manuscrit que nos développements numériques sont conduits de pair avec la volonté d'intégrer des phénomènes physiques dans nos modèles. Cette volonté d'intégrer la physique nécessite de déterminer des lois ou des paramètres supplémentaires.

3.2.2 Usure abrasive

La mise en place des modèles de couplage et de calcul de régime thermique établi rend également possible la détermination de phénomènes de dégradation des outils. On peut désormais intégrer dans les lois d'usure la dépendance des paramètres au champ thermique local dans l'outillage [C 8][C 9]. Si on considère le forgeage d'un entraîneur schématisé sur la Figure 22, on observe une localisation de l'usure sur le nez de l'outillage.

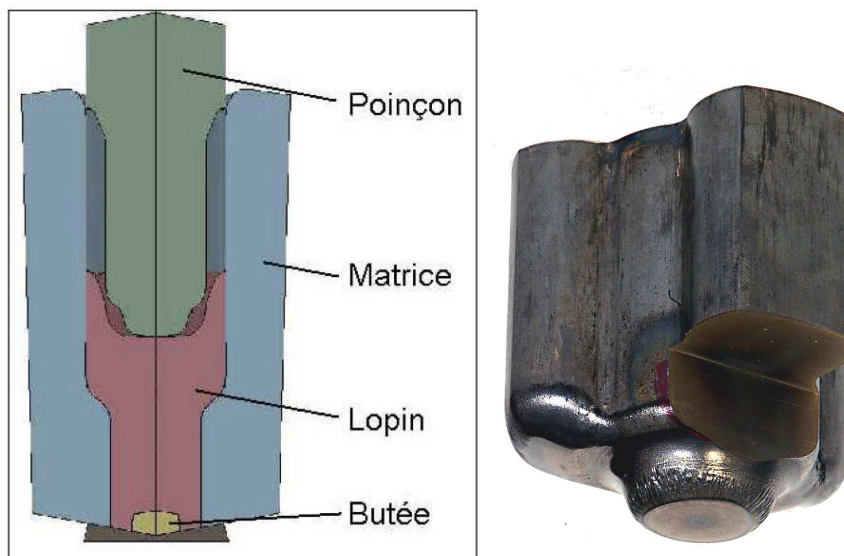


Figure 22 : Description du forgeage d'un entraîneur (à gauche) et localisation de l'usure (à droite)

On voit sur la Figure 23, que le modèle d'usure basé sur les valeurs d'interface relevées sur une simulation avec outils rigides (à gauche) ne permet pas de localiser l'usure de l'outil. Un calcul couplé avec prise en compte de la thermique et un modèle d'Archard (au milieu) ne permet pas non plus de prédire la localisation de l'usure. Il faut considérer un modèle prenant en compte l'échauffement de l'outil et l'évolution de la dureté du matériau avec cet échauffement pour obtenir une localisation correcte (à droite). Le modèle est détaillé dans [41].

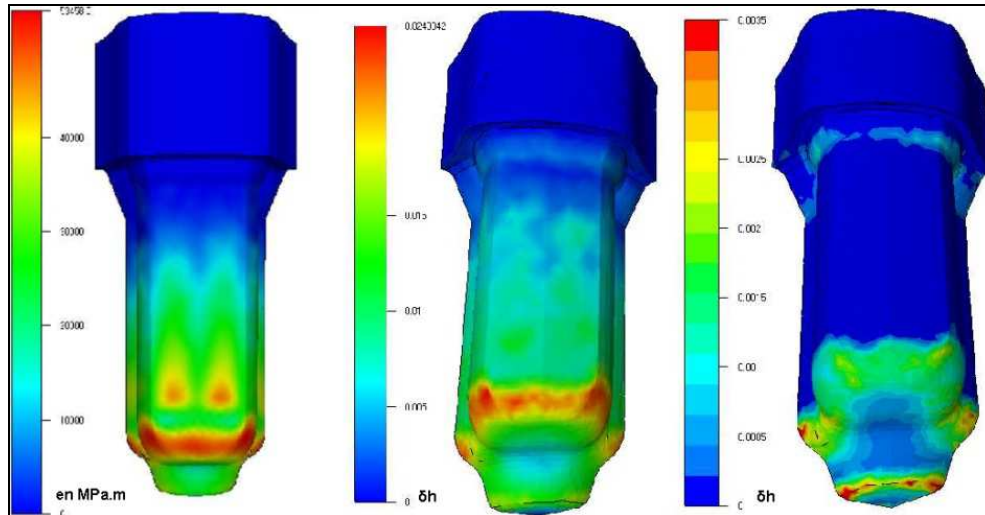


Figure 23 : Prédiction de l'usure sur le poinçon du cas de forgeage d'un entraîneur. A gauche avec le modèle sans calcul dans l'outillage, au centre avec calcul dans l'outillage et en utilisant le modèle d'Archard, à droite avec le modèle d'Archard modifié.

La prédiction qualitative des phénomènes d'usure est une problématique importante. La prédiction quantitative en est le prolongement direct. Il faudra pour cela une base expérimentale et une approche numérique fiable. On peut imaginer utiliser des modèles de type Archard comme décrit ici ou s'orienter vers le développement de critères de risques pour l'outillage établis sur la mise en place de bases de données, par exemple.

3.2.3 Fatigue mécanique

Enfin, le comportement sous chargement cyclique de l'outillage peut aussi être pris en compte par des lois de comportement cyclique. Ainsi, en fatigue mécanique, des lois de comportement et leurs paramètres sont identifiés sur des essais de laboratoire. On effectue des essais de traction compression en condition isotherme en relevant l'évolution des contraintes et des déformations, comme schématisé sur la Figure 24. On trace ainsi des courbes de Wöhler (ou courbes S-N) reliant la durée de vie à l'amplitude de déformation ou de contrainte vue par le matériau.

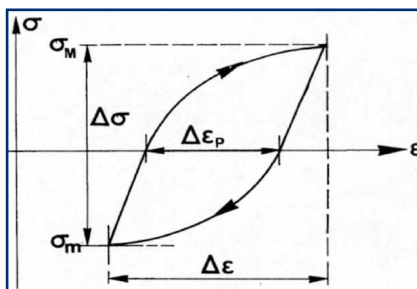


Figure 24 : représentation de la courbe contrainte déformation sur un cycle de fatigue

$$\frac{\Delta\sigma}{2} = \sigma'_f (N_R)^b \quad \text{Équation 4}$$

$$\Delta\epsilon_p = \epsilon'_f (N_R)^c \quad \text{Équation 5}$$

On peut ainsi exprimer des relations de type Basquin (Eq. 4) ou Manson Coffin (Eq. 5) où b , σ'_f , c et ϵ'_f sont déterminés par régression linéaire.

Du point de vue expérimental, les paramètres de ces modèles sont identifiés en relevant les amplitudes de contrainte ou de déformation à mi-durée de vie [42][45]. Dans les approches numériques développées, un seul calcul mécanique est effectué, l'amplitude de contrainte ou de déformation calculée correspond donc à un cycle de chargement, a priori le premier d'un point de vue mécanique. Pour rester cohérent avec cette approche, les courbes de Wöhler ont été déterminées à partir du premier cycle de chargement expérimental [B 2].

La base de données exploitée pour identifier les lois de fatigue est issue de travaux réalisés au CROMeP dans le cadre de différentes études. Deux nuances d'acier ont été traitées : X38CrMoV5.1 [42][43][44] et 55NiCrMoV7 [45]. Ces essais ayant été réalisés à des températures variant de 200 à 600 °C, la loi de Basquin donne une dispersion trop grande pour être exploitée (Figure 25). On prendra en compte la formule en contrainte réduite décrite dans l'équation 6.

$$\frac{\Delta s}{2} = \sigma'_f (N_R)^b \quad \text{Équation 6}$$

où $\Delta s = \frac{\Delta \sigma}{\sigma_u}$, σ_u représentant la contrainte à rupture du matériau. Cette variable dépend de la température.

Cette nouvelle loi permet de considérer une variable « indépendante de la température et permet d'obtenir un meilleur regroupement des points traités (Figure 26).

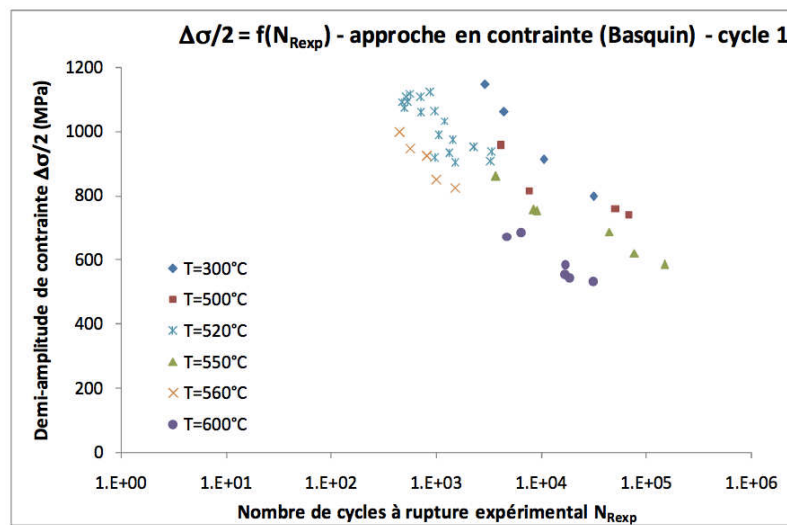


Figure 25 : Comparaison des points d'échantillonnage pour la nuance X38CrMoV5.1 avec une approche de Basquin en contrainte

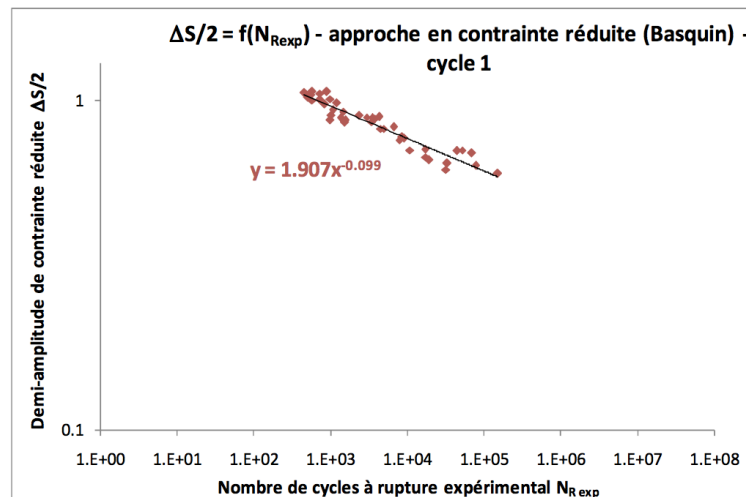


Figure 26 : Comparaison des points d'échantillonnage pour la nuance X38CrMoV5.1 avec une approche de Basquin en contrainte réduite

On montre sur la Figure 27 que, pour une des nuances d'acier à outil étudiées, cette approche donne des résultats prometteurs puisque les durée de vie calculées se trouvent dans un intervalle d'un facteur 2 par rapport aux valeurs expérimentales. Cet intervalle de validité est estimé comme correct pour les études de fatigue. On voit également sur cette figure que la dispersion obtenue avec l'analyse classique à mi-durée de vie donne de moins bons résultats.

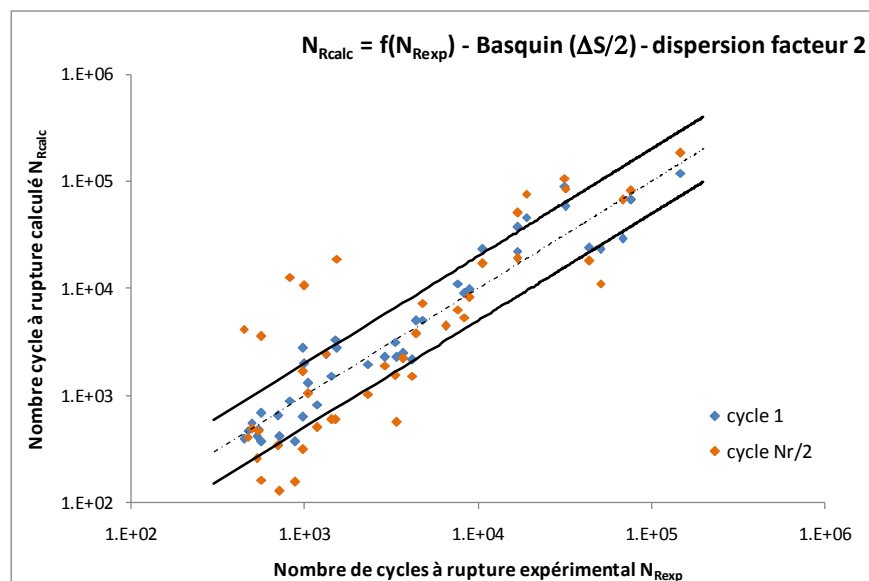


Figure 27 : Comparaison des durées de vie mesurées et calculées avec la loi de Basquin identifiée sur le premier cycle de sollicitation et à mi-durée de vie.

Ces résultats sont prometteurs mais il faut bien préciser que cette approche ne peut pas se généraliser à toutes les nuances. Les aciers à outil sont très rigides et ne s'accommodent pas beaucoup pendant l'essai de fatigue, ce qui explique que notre approche est légitime dans le cadre choisi.

Ces travaux ont été appliqués à l'étude de cas industriels. On peut voir sur la Figure 28 que la localisation des fissures par fatigue mécanique est bien prédite par nos modèles. On compare en effet la localisation d'une fissure avec la prédiction de la durée de vie. On

observe bien le minimum de cette isovaleur à l'endroit où on observe la fissure. On a donc une prédiction qualitativement correcte de la dégradation.

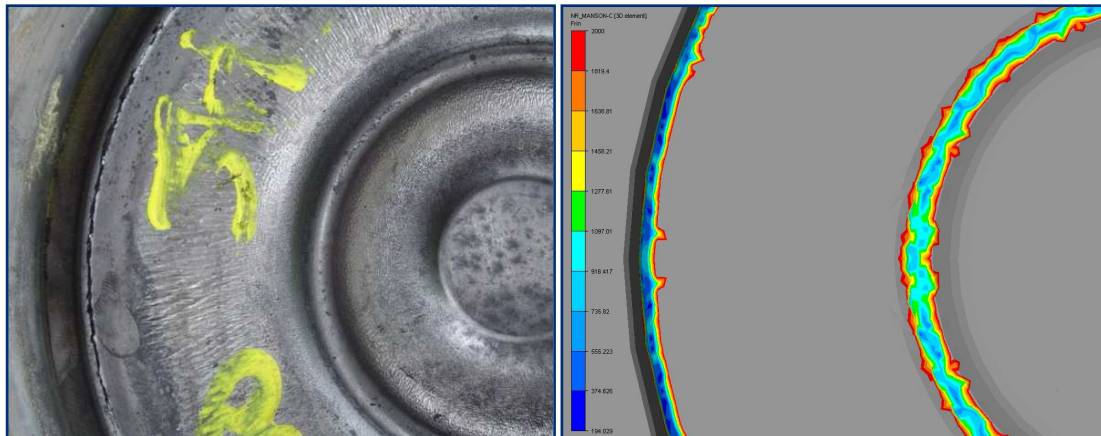


Figure 28 : Comparaison de localisation de fissuration d'outils avec la prédiction de durée de vie numérique

La détermination quantitative de la durée de vie a également été étudiée. Pour cela on a simulé différentes gammes de forgeage industrielles pour lesquelles la durée de vie de l'outillage a été relevée (en nombre de pièces produites, ce qui est équivalent à un nombre de sollicitations). Une gamme de grandes séries typiquement destinée au marché automobile ou de moyenne série pour le secteur aéronautique ont été étudiées. Les résultats sont synthétisés dans le Tableau 3.

Tableau 3 : Comparaison des durées de vie relevées expérimentalement et prédites par les modèles de fatigue

Cas industriel	Durée de vie	Basquin	Manson Coffin
Aero 1 – Acier 55NiCrMov7	36 à 108 pièces	2219	89
Aero 2 Acier 55NiCrMoV7	150 à 200 pièces	2378	194
Auto Acier X38CrMoV5.1	10000 pièces environ	3719	491

On peut noter que le modèle de Manson Coffin est bien adapté à la prédiction de durée de vie pour des outillages utilisés dans les gammes aéronautiques. Pour ces gammes, le modèle de Basquin surestime beaucoup trop le nombre de pièces réalisables. A contrario, le modèle de Basquin semble plus adapté pour les gammes automobiles. Cependant ce résultat reste à être conforté par une base expérimentale plus large.

3.3 Synthèse

L'étude de la durée de vie des outillages de forge a permis de développer des modèles numériques de différentes natures.

Le développement d'un algorithme de contact multidomaine a permis d'étudier les interactions entre les différents corps en présence (pièce et outils principalement). Ces développements sont basés sur une approche maître esclave. En fonction des phénomènes, les conditions d'interface sont exprimées aux nœuds (interpénétration, thermique) ou aux points d'intégration (frottement) des faces. On peut utiliser notre approche pour dimensionner l'épaisseur des matrices, positionner les éjecteurs en

fonction des contraintes subies par l'outil pendant la frappe ou étudier l'impact de la déformation de l'outil sur la pièce forgée.

Cependant, un simple couplage n'est pas suffisant pour comprendre et appréhender les phénomènes de dégradation de l'outillage pour lesquels, l'aspect cyclique revêt une grande importance. Ainsi l'étude de l'usure abrasive a conduit à devoir estimer le champ thermique stabilisé dans l'outillage et donc a développer des méthodes de cyclage pour obtenir des résultats fiables en un temps de calcul réduit. Pour étudier la fatigue mécanique, la simulation de plusieurs passes n'est pas plus envisageable. De la même façon, on a choisi d'étudier l'influence d'une loi de fatigue déterminée sur un seul cycle. Cette approche est validée par comparaison avec des cas industriels pour lesquels les durées de vie prédites sont proches de celles relevées en production.

Cependant, ce modèle de fatigue se doit d'être dépouillé avec précaution car il n'est valable que dans les zones de l'outil où le gradient thermique au cours de la frappe est faible.

Références : [A 5][C 8][C 9][D 2][D 3][E 3]

Partie 4 COUPLAGES MULTIPHYSIQUES

On s'intéresse, dans cette partie, à la prise en compte de phénomènes multiphysiques qui peuvent intervenir dans certains procédés de mise en forme. Ainsi, une modélisation du passage de courant électrique a été développée et couplée avec les phénomènes thermiques. Pour permettre une modélisation fiable de procédés de mise en forme à froid ou d'assemblage, il a également été montré que la prise en compte de l'endommagement et du couplage avec le comportement mécanique est nécessaire. Enfin, de plus en plus de procédés utilisent une source laser pour faciliter les écoulements ou modifier l'état de la matière. Un modèle numérique permettant de prendre en compte l'impact d'un laser a été développé et appliqué à la mise au point d'un procédé de prototypage.

Publications significatives :

Mocellin K, Jarleton L., Dahan Y., Bay F., A numerical model coupling electrical, thermal and mechanical effects for analyzing material deformation, 9th International ESAFORM Conference on Material Forming, Glasgow, United Kingdom, Neal Juster and Andrzej Rosochowski (Eds), Akapit (publishing house), p. 527-531, April 26-28,2006

Bouchard P-O., Bourgeon L., Fayolle S. and Mocellin K, An enhanced Lemaitre model formulation for materials processing damage computation, International Journal of Material Forming, 2010, Online First™, 14 August 2010, , DOI 10.1007/s12289-010-0996-5.*

Arbaoui L. , Masse J.-E., Barrallier L., Mocellin K., Numerical modelling of laser rapid prototyping by fusion wire deposit, International Journal of Material Forming, Volume 3, Supplement 1, Pages 1095-1098

En modélisation de la mise en forme des métaux, on prend prioritairement en compte des phénomènes thermiques et mécaniques. En forge à froid, la thermique est moins importante mais négliger les échauffement locaux peut amener à commettre des erreurs sur l'écoulement du matériau et donc sur sa géométrie finale. En forge à chaud, la prise en compte du couplage thermomécanique est incontournable. On est cependant amené à considérer des problèmes physiques complémentaires lorsqu'on veut traiter certains procédés industriels complexes ou si l'on s'intéresse à la description fine de phénomènes comme l'endommagement. Dans ce chapitre, je présenterai quelques travaux ayant porté sur l'analyse de couplages multiphysiques : thermique-électrique (effet Joule), mécanique (endommagement), thermique-mécanique (impact laser).

4.1 Modélisation couplée électrique-thermique

L'application de courants électriques – induits ou directs - pour le chauffage local ou global de pièces métalliques est importante dans l'industrie. Ainsi le chauffage par induction peut être utilisé pour chauffer des lopins avant forgeage ou pour appliquer localement des gradients thermiques afin de modifier par traitement thermique la microstructure des certaines pièces (les vilebrequins par exemple). Des modèles numériques ont été développés pour modéliser le courant électrique et le couplage thermo – électrique [46], [47].

On s'est penché ici plus particulièrement sur la modélisation du chauffage par Effet Joule où le passage direct du courant dans la matière qui provoque l'échauffement [48].

On considère que le champ électrique peut être décrit par la forme stationnaire des équations de Maxwell. En utilisant la loi d'Ohm pour lier la densité de courant au champ électrique, le modèle électrique peut se résumer à la résolution d'une équation de type Poisson où l'inconnue est le potentiel électrique [C 11]. On calcule donc le potentiel électrique dans tout le domaine de calcul à chaque incrément de temps.

Le problème est ensuite fermé par des conditions aux limites de type

- densité de courant imposée à l'interface avec l'électrode d'entrée, ce qui se traduit par une condition de Neumann sur le potentiel,
- densité de courant nulle sur les surface libre, ce qui se traduit par une condition de Neumann homogène sur le potentiel,
- mise à la masse sur l'électrode de sortie, avec une condition de Dirichlet homogène.

Le couplage avec le problème thermique apparaît au travers de la thermodépendance des caractéristiques électriques du matériau (conductivité électrique) et par l'ajout de termes sources volumiques et surfaciques dans l'équation de la chaleur. Le terme source volumique traduit l'échauffement dû au passage du courant et les termes surfaciques apparaissent aux interfaces entre les différents corps. Ils sont générés par le saut de potentiel aux interfaces du aux résistances électriques de contact. L'approche numérique utilisée est analogue à celle décrite dans le paragraphe 3.1 pour le modèle thermique.

Ce modèle a d'abord été développé en 2D et utilisé dans le cadre de la modélisation de procédé de forgeage assisté par Effet Joule (travaux de mastère de Luc Jarleton). Ce procédé est schématisé sur la Figure 29, il sert à réaliser des pièces élancées où seule une des extrémités est déformée par forgeage.

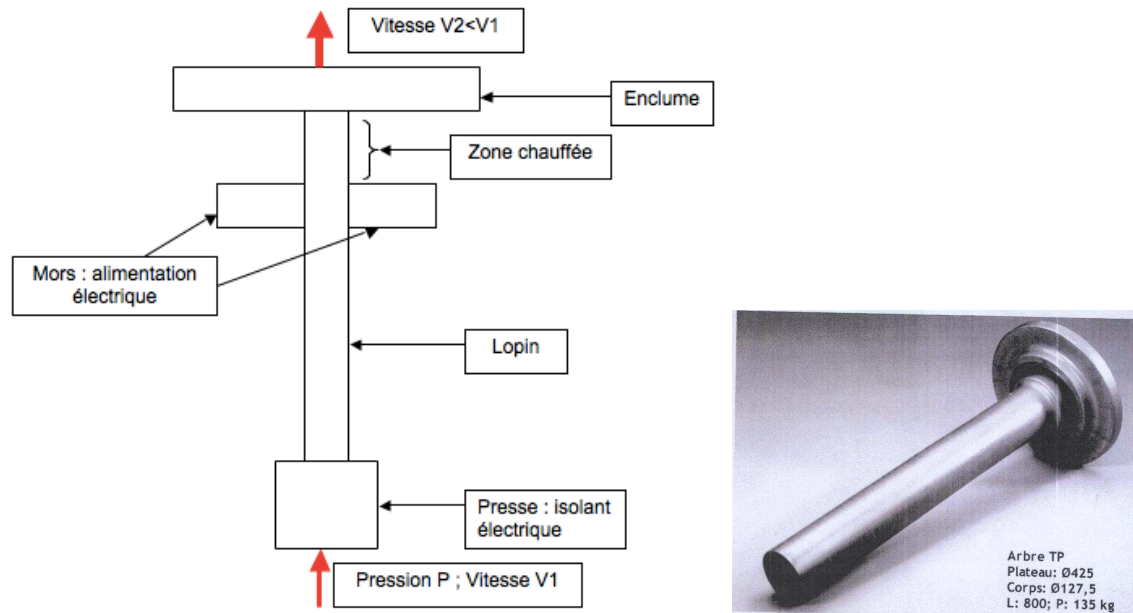


Figure 29 : Schéma de principe du procédé d'électrorefouillage et exemple de pièce concernée

On a pu montrer que le modèle électrique est fiable en comparant les relevés de tension expérimentaux et calculés, Figure 30. Pour des raisons de confidentialité, l'échelle de tension ne peut pas être montrée. On a également pu montrer la fiabilité du couplage entre les phénomènes thermiques et électriques en comparant les températures mesurée et calculée pendant le chauffage d'un lopin sans déformation, Figure 31.

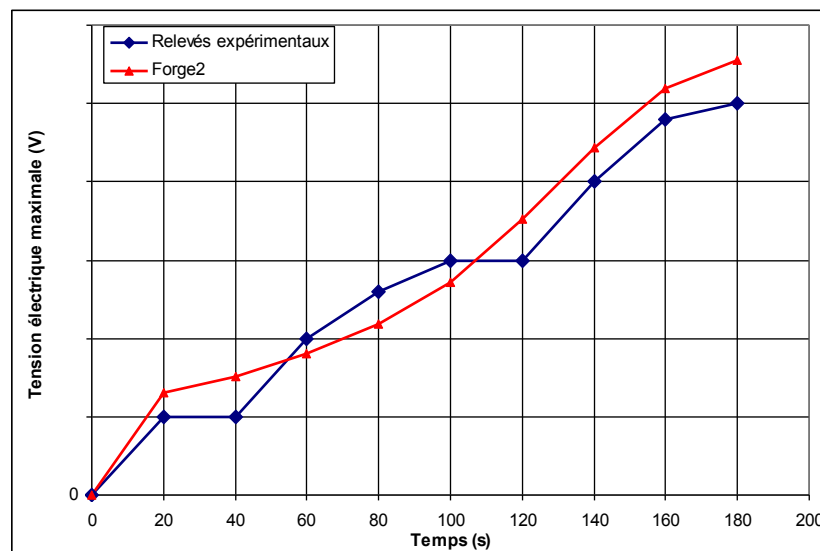


Figure 30 : Comparaison de la tension mesurée et calculée pendant le procédé d'électrorefouillage

Une des difficultés de ce type de problème est l'amplitude de température vue par le matériau – de l'ambiante à plus de 1200°C – et la détermination d'une loi de comportement permettant de couvrir l'ensemble de l'histoire du procédé.

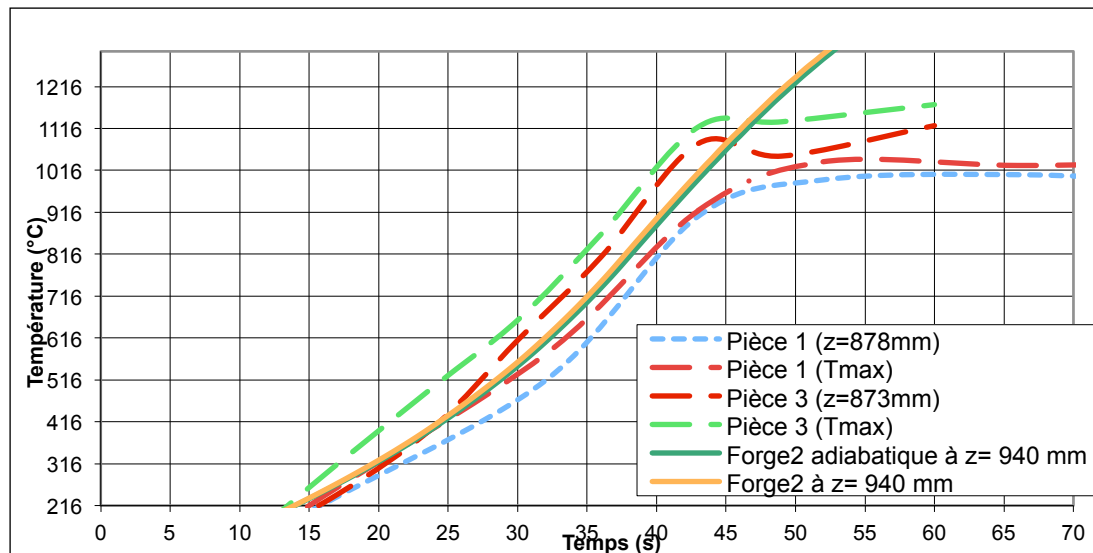


Figure 31 : Comparaison de température mesurée (par caméra thermographique) et calculée à l'aide du modèle couplé thermique électrique

L'influence de la conductivité électrique du matériau sur le procédé a été étudiée. On présente sur la Figure 32 différentes évolutions de la conductivité électrique en fonction de la température. On peut constater sur la Figure 33 que l'échauffement et l'écoulement du matériau sont grandement influencés par cette variable.

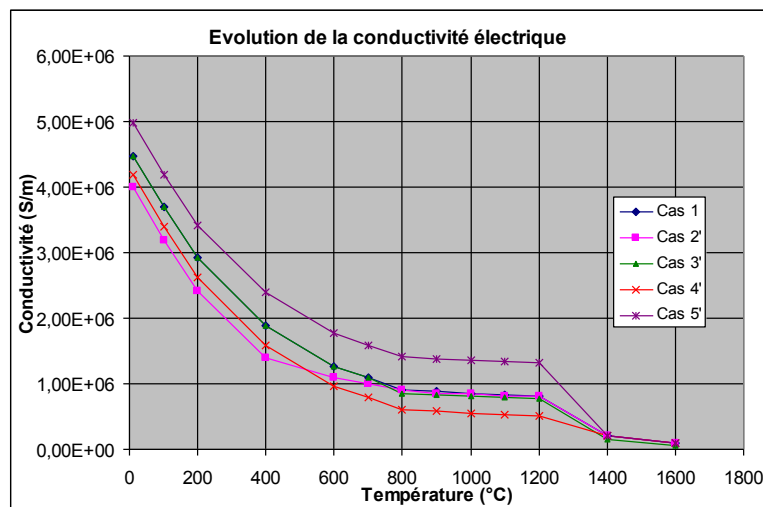
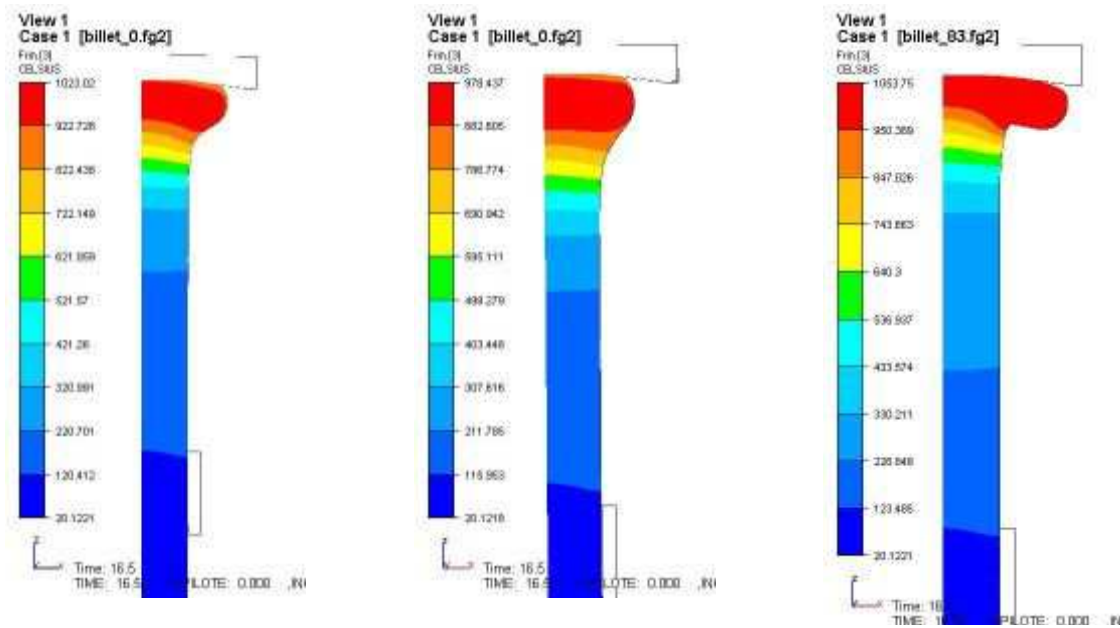


Figure 32 : Différentes évolutions de la conductivité électrique en fonction de la température

Ces analyses montrent la nécessité d'identifier précisément la thermodépendance des paramètres électriques sur toute la plage de températures du procédé. Cette identification peut s'avérer complexe lorsque la température devient relativement élevée.



Cas 1

Cas 5'

Cas 4'

Figure 33 : Influence de l'évolution de la conductivité électrique sur l'échauffement et l'écoulement de la matière La désignation des différentes configuration est relative à la Figure 32.

Ce modèle a été appliqué au chauffage d'éprouvettes utilisées dans un dispositif expérimental mis au point au CEMEF pour l'identification du comportement thermomécanique des matériaux dans des conditions proches de celles rencontrées dans certains procédés de traitement thermiques [C 11]. La maîtrise du calcul du champ électrique permet d'optimiser la forme des éprouvettes afin de minimiser les gradients thermiques dans la partie utile des éprouvettes.

Le modèle multidomaine a été ensuite amélioré pour la modélisation d'un procédé de soudage développé au travers de plusieurs études mastère. Ces études restant à l'heure actuelle couvertes par la confidentialité, il n'est pas possible de les décrire plus avant. On a toutefois pu montrer la grande influence des données thermo dépendantes sur les résultats numériques. En particulier, des campagnes de mesure de résistances électriques de contact ont été menées [C 20] pour étudier la dépendance de ce paramètre à la température et à la pression de contact. Les résistances électriques de contact sont en effet primordiales dans ce modèle car elles interviennent dans l'expression du terme de saut de potentiel à l'interface qui pilote l'échauffement des pièces à assembler. On montre par exemple sur la Figure 34 un exemple académique de soudage bout à bout pour lequel, le champ de température à l'interface peut varier de plus de 300°C avec la valeur de résistance électrique de contact.

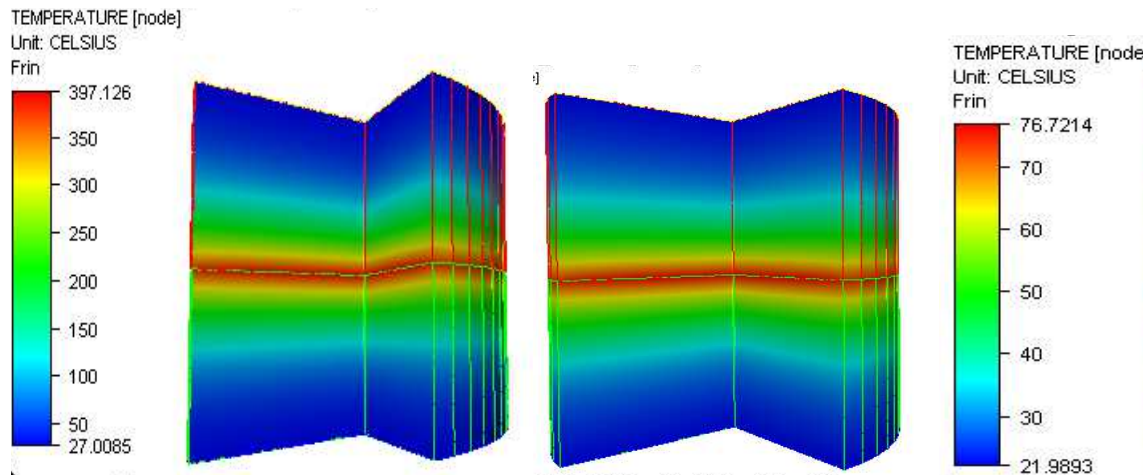


Figure 34 : Influence de la résistance électrique de contact sur le champ de température, à gauche cette résistance vaut $7 \times 10^{-7} \Omega.m^2$, à droite $= 1 \times 10^{-7} \Omega.m^2$ [C 20]

L'extension vers un modèle 3D a été amorcée (mastère de Mohamed Ali M'Zoughi). On a montré la capacité du modèle à prédire les échauffements dans les cas simples. Toutefois la taille des modèles (finesse de maillage aux interfaces) et la complexité des écoulements n'ont pas permis d'atteindre une précision suffisante dans la simulation du procédé de soudage.

En conclusion le développement du modèle électrique a permis d'aborder des applications variées. Le modèle multidomaine s'appuie sur les travaux décrits au paragraphe précédent. On note une difficulté à identifier des lois de comportement valables sur des plages de température allant de l'ambiante à la fusion (pour le soudage par exemple) et la sensibilité du modèle numérique à des variables telles que la conductivité électrique ou la résistance électrique de contact.

4.2 Couplage comportement endommagement

Les assemblages par déformation plastique, s'apparentent à des procédés de mise en forme à froid. Ils font apparaître des problématiques de grandes déformations, de contact multidomaine et pour certains d'entre eux d'endommagement de la matière pendant le procédé. La prédiction de l'endommagement est également centrale dès que l'on s'intéresse à la tenue de ces assemblages.

Les travaux de Sébastien Fayolle [D 5] étaient consacrés aux couplages mis en jeu entre l'endommagement et le comportement des matériaux mis en jeu lors du rivetage auto-poinçonneur.

Il existe quantité de modèles d'endommagement dans la littérature [49][50][51][52][53]. Certains, appelés phénoménologiques tentent de reproduire les effets de l'endommagement comme le modèle de Lemaître [50] alors que d'autres s'appuient sur une description des effets microstructuraux qui sont à l'origine de cet endommagement. Le modèle de Gurson-Tvergaard-Needleman [51] est basé sur le calcul de la fraction volumique de porosités à partir de lois de germination, croissance et coalescence.

Dans cette étude, l'objectif n'est pas d'utiliser des modèles dits découplés, de type Latham et Cockcroft [52] ou Oyane [53], basés sur l'évolution d'une variable d'endommagement par intégration d'une fonction dépendant de la triaxialité ou encore des contraintes principales, sur le chemin de déformation plastique. Ces modèles sont

simples d'utilisation mais ne peuvent pas être couplés avec la loi de comportement du matériau.

On a choisi dans cette étude de se focaliser sur le modèle de Lemaître. Différents types de couplages entre le comportement du matériau et l'endommagement ont été testés : le couplage faible et le couplage fort. Dans [A 10], les équations à traiter pour la résolution du problème couplé sont présentées. Le couplage fort revient à résoudre simultanément les équations non linéaires sur l'incrément de déformation et l'équation d'évolution de l'endommagement à chaque itération de Newton Raphson. Lorsqu'on utilise un couplage faible on fait l'hypothèse que l'endommagement n'évolue pas pendant l'incrément de déformation : on ne résout que l'équation non linéaire liée au comportement élasto plastique. La valeur de l'endommagement est mise à jour à la fin du processus itératif de Newton Raphson. Les deux méthodes ont été comparées sur un cas de traction d'éprouvette [A 10].

On compare les valeurs de déformation plastique équivalente et d'endommagement de Lemaître prédites par les 2 couplages. Les valeurs sont relevées au centre de l'éprouvette à l'aide de capteurs numériques et sont tracées sur la Figure 35. On observe moins de 4% d'écart pour les valeurs d'endommagement inférieures à 0,4 et moins de 10% pour les valeurs comprises entre 0,4 et 0,7. Les temps de calcul correspondant montrent que le couplage fort est de 15 à 30 % plus coûteux (en fonction de la taille de maille). Dans la pratique on n'observe que rarement des endommagement supérieur à 0,5. On en conclut donc que pour la modélisation des procédés de mise en forme, l'utilisation d'un algorithme de couplage faible est suffisante.

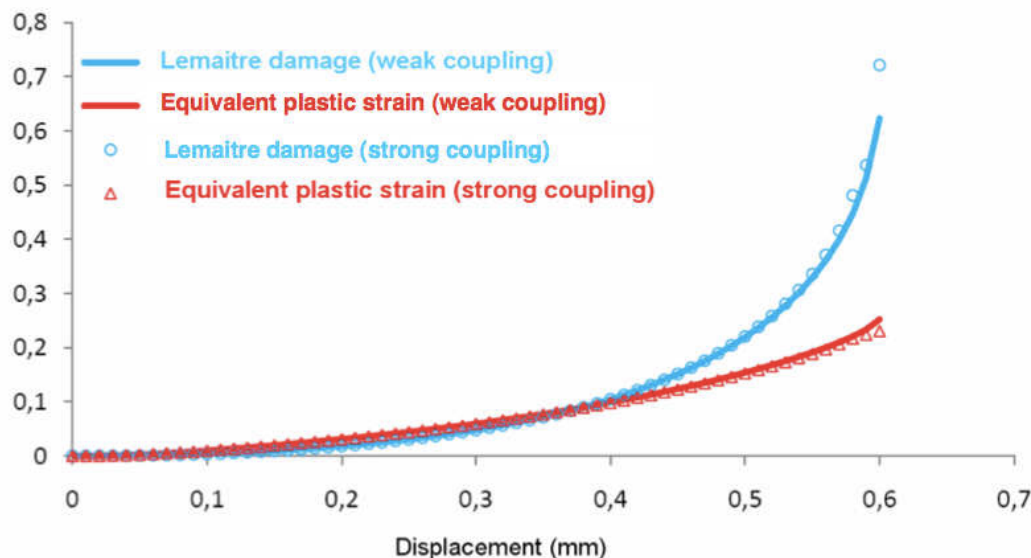


Figure 35 : Comparaison du couplage fort et faible entre l'endommagement et le comportement pendant un essai de traction [A 10]

Le couplage entre l'endommagement et le comportement amène à un problème numérique bien connu : la localisation de l'endommagement. Le résultat de la simulation va dépendre de la taille du maillage. Plus le maillage est fin et plus l'évolution de l'endommagement sera rapide. Il a donc fallu développer des méthodes non locales (approche intégrale [54] et à gradient implicite [55]). Il faut pour cela introduire la notion de taille caractéristique du matériau. Elle définit le volume sur lequel on va régulariser la variable, dans notre cas l'endommagement. Cette notion a un sens pour des matériaux granulaires comme le béton mais pas réellement pour un métal. On peut considérer qu'elle représente la distance moyenne entre les inclusions. La taille

moyenne des éléments du maillage doit être inférieure à cette taille caractéristique si l'on veut régulariser notre endommagement. Cela va donc imposer des contraintes sur la taille des éléments dans les zones endommagées.

Lorsque l'endommagement atteint une valeur critique, on considère qu'il y a rupture. Une technique de kill element est alors utilisée pour modéliser ce phénomène. Cette méthode est simple à appliquer contrairement aux méthodes de propagation de fissure [56]. Elle est critiquable à cause de la perte de volume engendrée par la suppression d'élément. Toutefois les éléments supprimés se trouvent dans des zones où le maillage est raffiné et on peut donc considérer la variation de volume comme acceptable puisque la taille de maille est localement inférieure à 0.05 mm (par comparaison, le diamètre du rivet est de 5mm).

Le développement des modèles numériques permet des simulations de la pose et de la tenue des assemblages rivetés. Dans cette étude une attention particulière doit être portée à la réalisation d'essais permettant de valider les modèles numériques. Ainsi les essais de pose ont été réalisés chez un partenaire industriel disposant d'instrumentations permettant l'enregistrement des efforts et un dispositif de type ARCAN permettant l'arrachement des assemblages sous différents angles a été développé au laboratoire [C 14].

L'étape de rivetage ne sera pas discutée ici. En ce qui concerne l'étude de la tenue, une excellente corrélation entre les observations et relevés expérimentaux et les résultats de la simulation est obtenue. On compare sur la Figure 36 les résultats expérimentaux et numériques pour une sollicitation en traction pure, sur la Figure 37 pour une sollicitation à 45° et sur la Figure 38 pour un cisaillement pur.

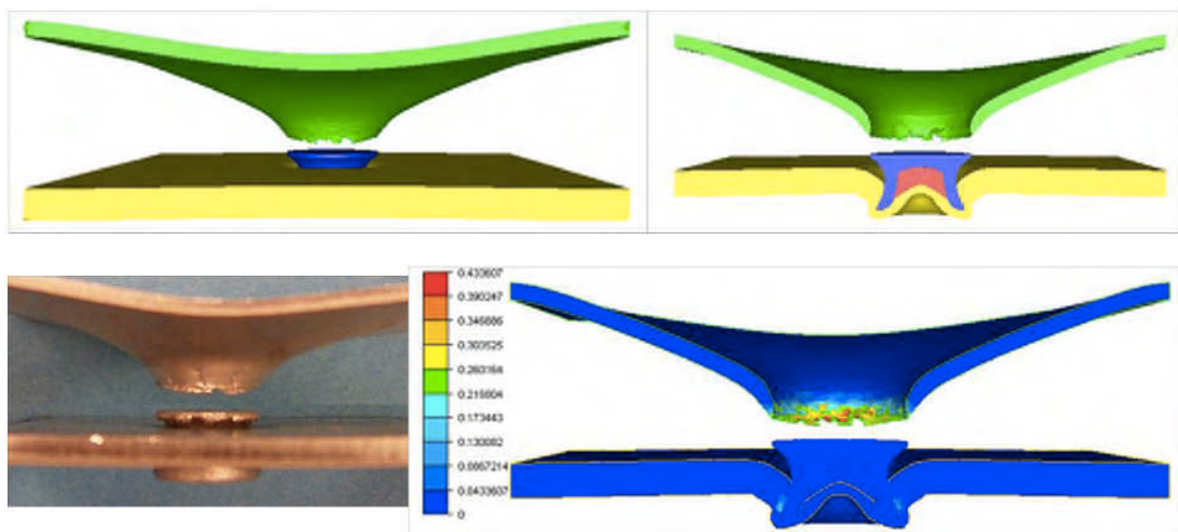


Figure 36 : Comparaison de la simulation et du profil pendant un arrachement en traction pure.

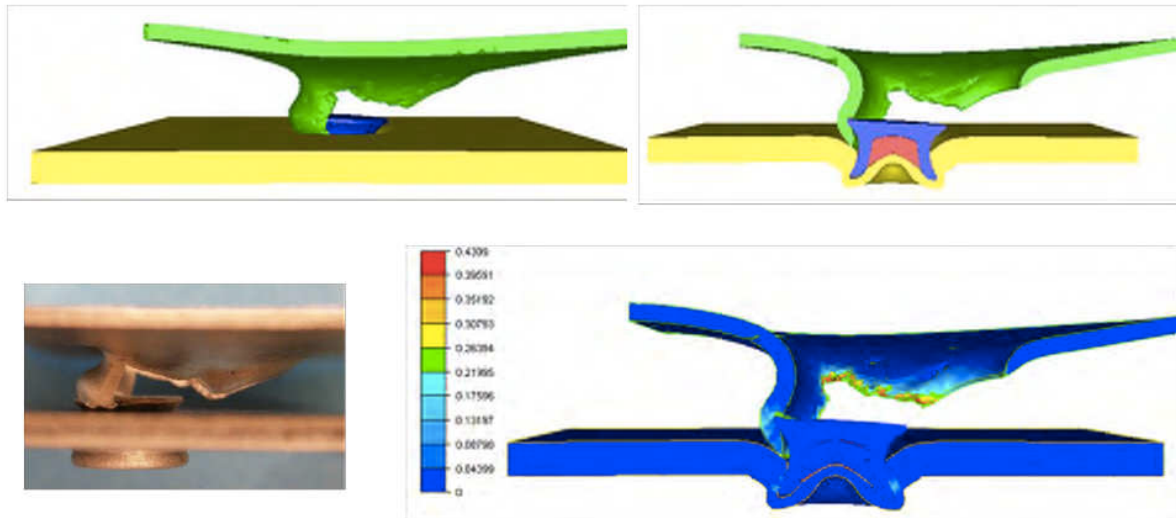


Figure 37 : Comparaison de la simulation et du profil pendant un arrachement à 45 °.

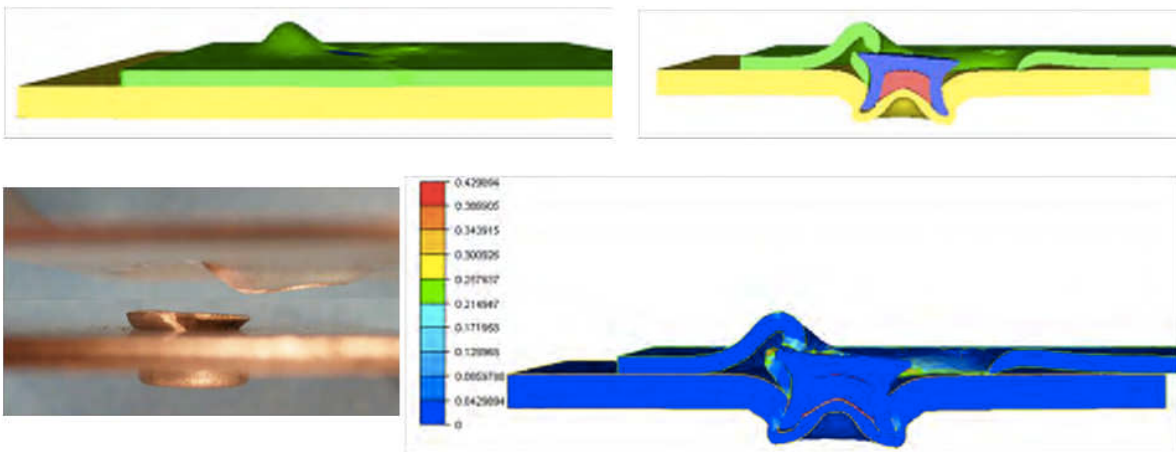


Figure 38 : Comparaison de la simulation et du profil pendant un arrachement en cisaillement pur.

La comparaison des courbes d'effort est également excellente comme le montrent les Figure 39, Figure 40 et Figure 41.

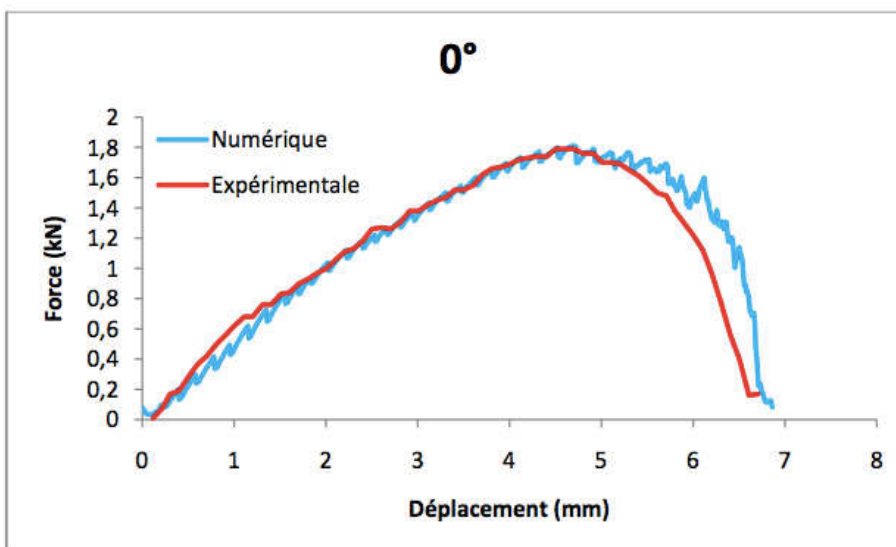


Figure 39 : Comparaison des efforts mesurés et calculés pendant un arrachement en traction pure

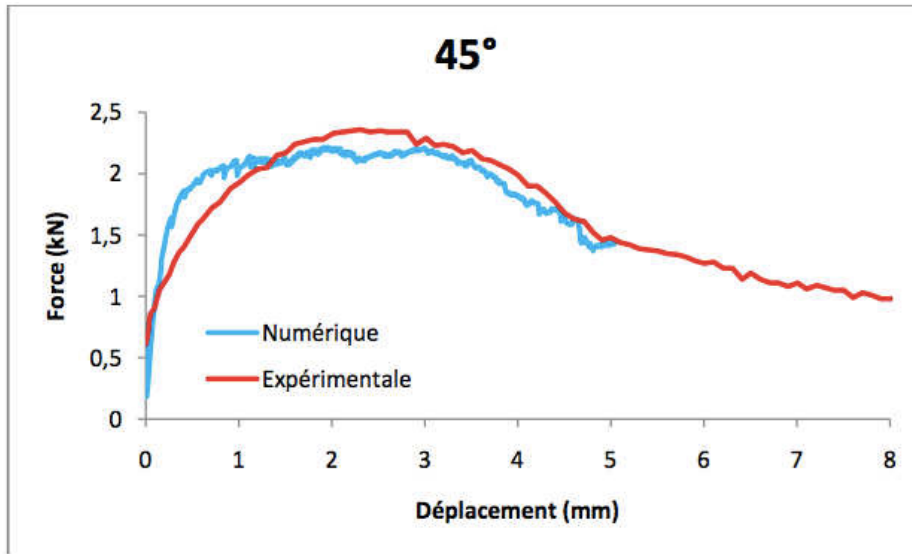


Figure 40 : Comparaison des efforts mesurés et calculés pendant un arrachement à 45°

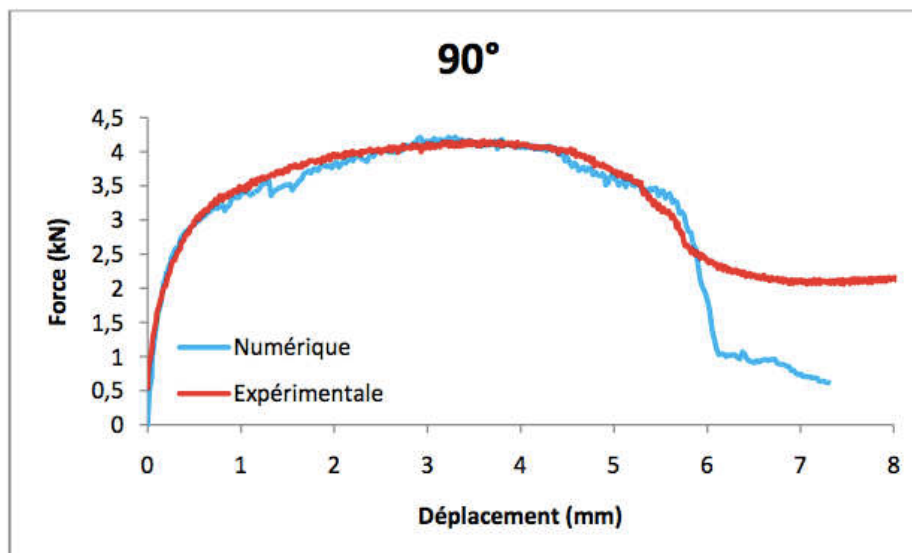


Figure 41 : Comparaison des efforts mesurés et calculés pendant un arrachement en cisaillement pur

Pour obtenir une telle précision à l'aide d'un modèle numérique, il faut porter un effort tout particulier sur la détermination des paramètres matériau (comportement et endommagement) de tous les éléments du système. Il est également très important de prendre en compte précisément l'étape de rivetage et de conserver l'histoire du matériau pendant cette étape pour bien modéliser la tenue du point d'assemblage. Comme on le montre sur la Figure 42, négliger l'histoire amène à sous estimer la réponse de l'assemblage.

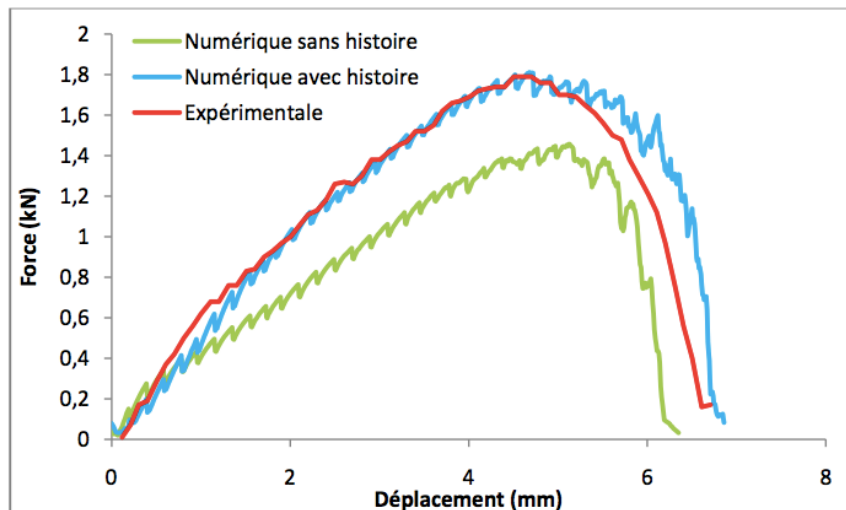


Figure 42 : Influence de l'histoire mécanique héritée de la phase de rivetage sur la réponse de l'assemblage pour une sollicitation en traction.

On peut également montrer l'apport indéniable de la mise en place d'un modèle couplé entre le comportement et l'endommagement sur la Figure 43.

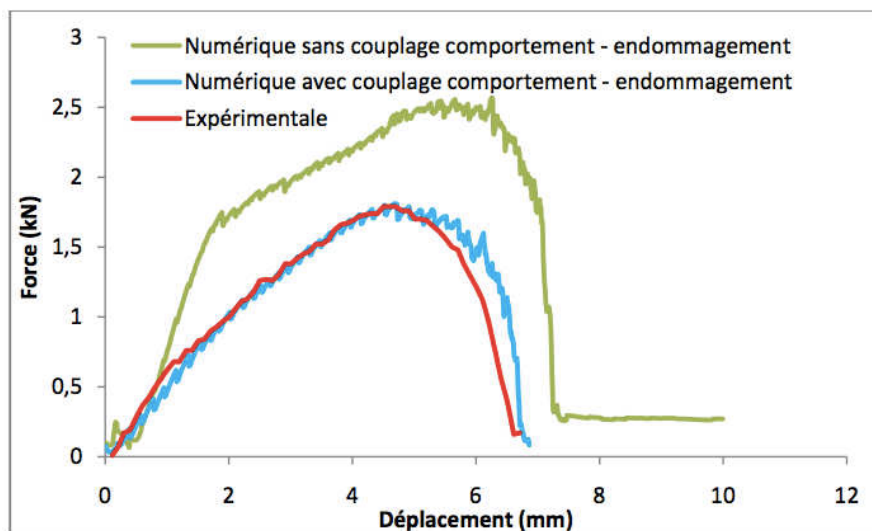


Figure 43 : Influence du couplage comportement - endommagement sur la réponse numérique du modèle pour une sollicitation en traction pure.

4.3 Couplage et interaction laser matière

L'application d'impacts laser pour le traitement des surfaces, l'assistance à certains procédés d'usinage, ou encore le soudage se répand de plus en plus, apparaissant à quasiment toutes les étapes de fabrications de pièces métalliques.

Dans le cadre d'un financement régional, une collaboration a été entamée avec l'équipe Méca surf de l'ENSAM d'Aix en Provence. La région PACA a financé d'une part l'achat à l'ENSAM d'une source laser pour l'étude d'un procédé de prototypage innovant, et d'autre part la thèse de Larbi Arbaoui [D 7] qui était centrée sur la modélisation

numérique de ce procédé de prototypage rapide de pièces métalliques. La retombée attendue de cette thèse est la mise au point d'un modèle numérique fiable facilitant la mise au point du procédé.

La nouveauté de ce procédé réside dans l'apport de la matière ajoutée par fil plutôt que par poudre. On attend ainsi une déperdition moindre de la matière d'apport, une facilité à recharger les pièces à l'aide d'automates et une porosité réduite dans le cordon de matière apportée.

Lorsque l'on traite d'impact laser, le principal couplage qu'il faut prendre en compte est l'interaction avec la thermique. Cependant le large intervalle de température qui est traversé par la matière oblige à prendre en compte des états très différents de la matière. Ainsi une première étape pour ce travail a-t-elle consisté en l'introduction d'un formalisme évolutif de la loi de comportement. Le matériau peut être considéré élastoplastique à température ambiante puis passer par une phase où un modèle viscoplastique est plus approprié avant d'être assimilé à un fluide newtonien. La cohabitation de ces différentes lois de comportement à l'intérieur du système conduit lors de la discrétisation éléments finis à des termes matriciels d'ordre de grandeur différent et donc nuisibles pour le conditionnement du système. Le préconditionneur utilisé est basé sur une factorisation incomplète de Cholesky et permet d'inverser le système obtenu [57]. Le passage de la phase solide à la phase pâteuse impose également la prise en compte de la tension de surface pour prédire la forme du dépôt. Les travaux de [58] et [59] ont été repris pour la formalisation du terme de tension de surface dans les équations. Le modèle numérique 3D ainsi développé permet de prendre en compte l'angle de mouillage et la tension de surface, Figure 44. L'aspect multidomaine est également pris en compte comme on peut le voir sur la Figure 45 .

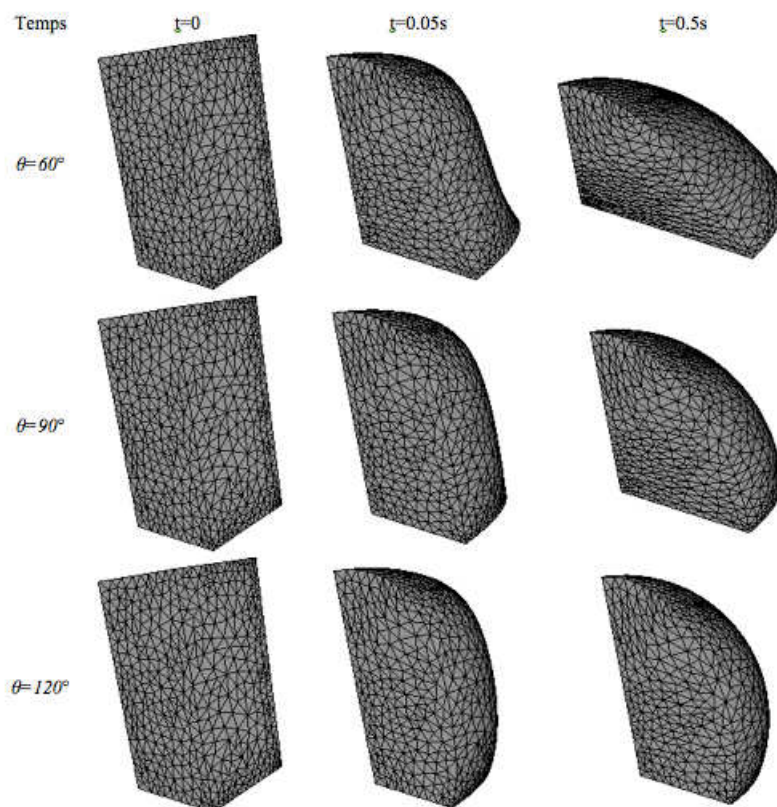


Figure 44 : Prise en compte de la tension de surface et des angles de mouillage

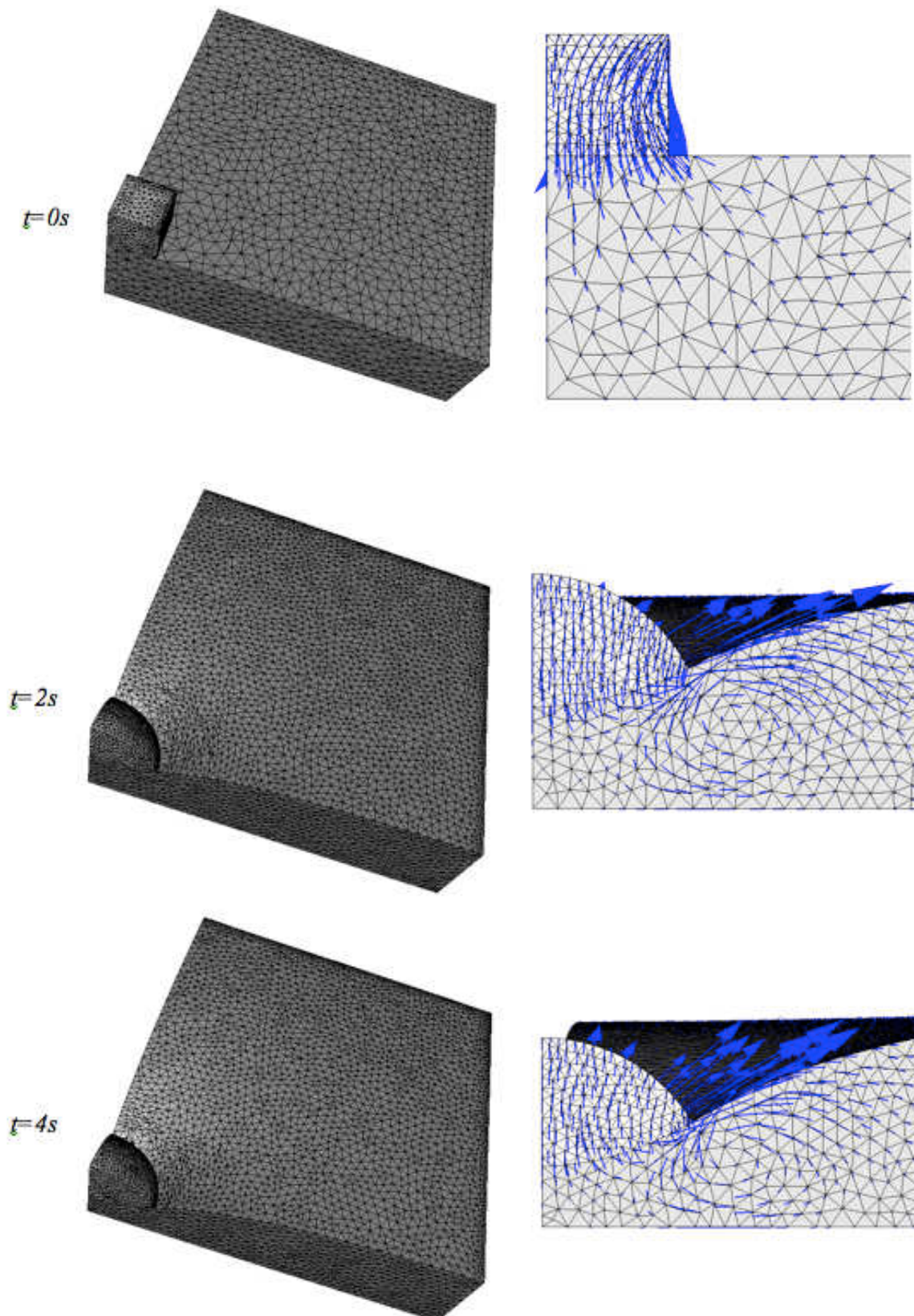


Figure 45 : Prise en compte de la tension de surface pour 2 domaines

On est donc capable de prendre en compte le changement de comportement de la matière sous l'échauffement du faisceau laser. Il est alors important de bien modéliser les conditions thermiques représentatives de l'impact laser. L'impact direct du faisceau

est modélisé par un flux thermique surfacique dépendant de la puissance du faisceau. Il est également primordial de prendre en compte le phénomène de plasma qui apparaît lors du procédé. Des températures très élevées de l'air ambiant sont considérées dans les termes de convection et de rayonnement. Les zones dans lesquelles ces conditions doivent être prise en compte sont déterminées par modélisation numérique couplée à des essais de fusion de fil. A l'heure actuelle, les essais de films par camera thermique ont été réalisés mais n'ont pas permis d'obtenir de données exploitables.

Après le travail de développement numérique, une attention particulière a été portée sur l'identification de paramètres (matériau et procédé). Pour cela plusieurs types de tests ont été réalisés à l'ENSAM avec le dispositif PROFIL développé. Un analyseur de faisceau a permis de calibrer la source thermique. Une première évaluation du rayon d'impact du laser et son intensité a ainsi été possible. Des impacts sur plaque instrumentée de thermocouples ont été réalisés pour permettre de calibrer plus finement les conditions thermiques. Enfin des tests de chauffage du fil à différentes intensités et dans différentes configurations ont permis de valider ces approches.

Les relevés de température ont permis d'identifier les paramètres thermiques du matériau (absorptivité) sur une large plage de température. Pour cela on s'est appuyé sur une plateforme d'identification inverse développée au laboratoire [60], couplée au modèle direct.

Le modèle ainsi mis au point permet de reproduire des conditions de prototypage pour lesquelles un dépôt continu de matière est possible et des conditions de chauffage excessif où la matière se rétracte sous forme de gouttes avant de se déposer sur le substrat. Sur la Figure 46 on peut observer le dépôt expérimental et sur la Figure 47 la modélisation du phénomène pour le cas où le positionnement du fil par rapport au faisceau ne permet pas un dépôt continu.



Figure 46 : Dépôt discontinu du fil dû au positionnement du fil par rapport au faisceau

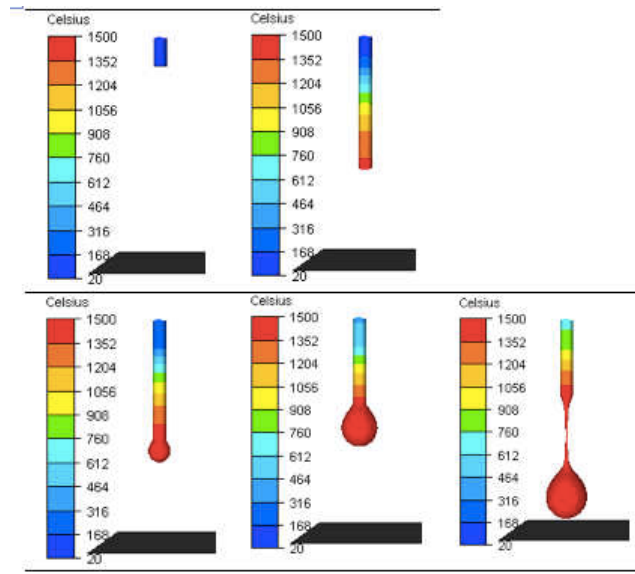


Figure 47 : Modélisation numérique du prototypage dans des conditions menant à un dépôt discontinu – Champ de température

Le phénomène de remontée de goutte modélisé et décrit par cette figure peut être observé dans la réalité, pour un dépôt non continu. Si on introduit de nouvelles conditions expérimentales d'arrivée du fil (décalage par rapport au faisceau par exemple), le dépôt obtenu expérimentalement est alors continu. Le modèle numérique est capable de prédire la géométrie de ce dépôt.

Références : [A 10][B 3][C 11][C 13][C 14][C 20][D 4][D 5][E 5][E 8]

4.4 Synthèse

L'enrichissement des modèles thermomécaniques « classiques » a été abordé par la prise en considération de phénomènes physiques tels que l'endommagement, l'interaction avec un faisceau laser et le chauffage électrique par effet Joule. Des approches différentes ont été développées en fonction de la problématique traitée.

- Pour les couplages électriques, la formulation complète du problème électrique à partir de l'équation stationnaire a été nécessaire. Le couplage avec le calcul thermique est imposé par des termes sources volumiques et aux interfaces entre les domaines. La validation de ces développements a été faite au travers de relevés thermiques et de mesures de tension.
- Pour prendre en compte le couplage entre l'apparition d'endommagement dans un matériau et son comportement, plusieurs stratégies de couplage ont été testées. La loi d'évolution de l'endommagement du critère de Lemaître est intégrée dans la résolution du système d'équations non linéaires de Prantl Reuss. Les résultats de simulation montrent une excellente adéquation avec des relevés d'effort et de géométrie tant pour la pose des rivets que pour l'étude de leur tenue. Le couplage entre l'endommagement et le comportement est nécessaire pour obtenir la précision remarquable relevée dans ces travaux.
- Enfin, les interactions entre la matière et le faisceau laser du procédé PROFIL portent d'avantage sur une détermination et une maîtrise des conditions aux limites thermiques couplées à la prise en compte de l'évolution du comportement

du matériau. La validation des ces travaux est faite en montrant la capacité du modèle à prédire les situations favorables ou non à un dépôt continu de matière.

Partie 5 PERSPECTIVES – AXES DE RECHERCHE FUTURS

Mes activités de recherche menées depuis plusieurs années m'ont donc permis de proposer et développer des méthodes numériques pour faire face à différents défis posés par la modélisation des procédés de fabrication. Je compte à l'avenir poursuivre mes recherches dans ce cadre.

J'ai identifié plusieurs axes de recherche privilégiés pour la poursuite de mes travaux. Ces axes se structurent autour de trois thématiques qui prolongent et approfondissent les recherches présentées dans ce document :

- la réduction de temps de calcul par le développement de méthodes de résolution adaptées aux problèmes rencontrés
- la prise en compte des problématiques d'extrême surface
- la modélisation de l'usinage

5.1 Réduction du temps calcul

Les modèles numériques abordés dans le cadre des procédés de mise en forme où des couplages multiphysiques apparaissent sont de plus en plus complexes et volumineux. Les temps de calcul qui en découlent deviennent donc prohibitifs malgré les possibilités de calcul parallèle et l'augmentation du potentiel des machines.

Un des leviers pour la diminution de ces temps de calcul est l'accélération de la résolution des systèmes linéaires, comme cela l'a été décrit dans le paragraphe Partie 2. Pour cela, on vise à développer des solveurs basés sur des méthodes multigrilles algébriques qui ne nécessitent en donnée d'entrée que les valeurs de la matrice à résoudre. Cette approche permet de traiter l'inversion de systèmes matriciels issus de problématiques très différentes (calcul thermomécanique mono ou multidomaine, approche harmonique amenant à des complexes symétriques non hermitiennes,...).

On s'affranchit ainsi de la construction de maillages de tailles différentes que l'on maîtrise lorsque l'on considère un domaine déformable mais qui devient difficile pour des problèmes multidomaines, que les maillages soient coïncidents (calcul électromagnétique pour le chauffage par induction) ou non (stratégie maître esclave).

5.2 Modélisation des problèmes en extrême surface

Les problèmes d'extrême surface peuvent apparaître dans différents domaines. Voici quelques exemples qui montrent l'intérêt de cette thématique pour prendre en compte les effets d'échelles présents dans les problèmes :

- En électromagnétisme, le traitement de pièces par induction haute fréquence conduit à la concentration - par effet de peau des lignes de champ magnétiques - en extrême surface,

- lorsqu'on considère la dégradation des outillages de forge, la prise en compte de la couche nitrurée est très importante car elle instaure au matériau des caractéristiques mécaniques. Il est primordial de connaître son comportement et les zones de fissuration,
- les pièces forgées sont souvent traitées par grenaillage pour améliorer leurs propriétés de surface.

Les phénomènes d'extrême surface peuvent également être des conséquences du problème ainsi :

- la génération de calamine au cours de certains procédés peut impacter les conditions d'échanges thermique et mécaniques,
- les mécanismes d'usure diffusive en usinage peuvent amener à des modifications de surface importante ...

De nouveaux modes de représentation de ces phénomènes basés sur des approches autres que de l'adaptation ou du raffinement de maillage permettraient d'éviter des calculs trop volumineux.

Pour cela, il faut être capable de rendre compte finement des couplages thermomécaniques en extrême surface et de leurs conséquences. On envisage donc mettre en place des couplages numériques multi-échelles afin de comprendre ce qui se passe à l'échelle microscopique d'une couche nitrurée par exemple et d'en rendre compte dans un modèle macroscopique par des modèles ne nécessitant pas la description « explicite » de ces phénomènes.

Cette thématique demande donc le développement de modèles numériques précis à l'échelle micro et la formulation de modèle mécanique avec des données expérimentales précises. Il serait intéressant de s'affranchir des formalismes analytiques visant à identifier tels ou tels mécanismes pour aller vers une exploitation de base de données de conditions endommageantes.

5.3 Modélisation de l'usinage

Afin de prédire correctement les formes finales, il est nécessaire d'envisager les étapes de détensionnement et d'être capable d'optimiser les chemins d'usinage afin de comprendre et limiter les évolutions géométriques. Une prédiction fine de l'action du relâchement des contraintes résiduelles est primordiale.

Pour cela 2 types d'actions sont envisagés, elles mèneront à un couplage des phénomènes à deux échelles différentes.

- L'étude de l'interaction entre la pièce et l'outil d'usinage est importante pour prédire les contraintes thermomécaniques induites par ce procédé et la carte de contraintes résiduelles induites. Il faut donc poursuivre les travaux menés pour l'étude des phénomènes à l'échelle du copeau.

- A l'heure actuelle le modèle numérique élément fini ne permet pas de calculer finement les déformations liées au relâchement des contraintes. Une étude doit être menée sur la formulation afin d'introduire des éléments d'ordre plus élevé à support géométrique constant et permettant un calcul précis du relâchement élastique.

5.4 Perspectives à plus long terme- Optimisation des propriétés en service des pièces

La chaîne virtuelle permettant de suivre un matériau de son élaboration à sa tenue en service se développe mais certaines étapes importantes restent manquantes.

Après forgeage, les pièces sont ébavurées et traitées thermiquement. A l'heure actuelle on néglige les conséquences des étapes de finition (usinage). Cette hypothèse peut parfois se révéler légitime, mais dans la plupart des cas, les contraintes thermomécaniques induites par les outils ou plus simplement la redistribution des contraintes résiduelles après enlèvement de la matière peut induire des déflexions importantes sur la pièce finale.

Je souhaite travailler sur l'optimisation des propriétés en service des pièces en m'appuyant sur la mise en place d'une chaîne numérique permettant de suivre un matériau depuis son élaboration en passant par la mise en forme et en étudiant la couplage de cette chaîne avec des algorithmes d'optimisation adaptés. Ces études me permettront de travailler davantage sur l'optimisation, une thématique à laquelle je souhaite plus particulièrement m'intéresser dans les années qui viennent.

Partie 6 REFERENCES

- [1] R.H Wagoner, J.L. Chenot, « Metal forming analysis », Cambridge University Press, 2001
- [2] T. Coupez, « Génération de maillage et adaptation de maillage par optimisation locale », Revue européenne des éléments finis, vol.9, pp.403-423, 2000
- [3] Y.S. Na, J.T. Yeom, N.K. Park, J.Y. Lee, « Simulation of microstructures for Alloy 718 blade forging using 3D FEM simulator », Journal of Materials Processing Technology, vol. 141-3, pp. 337-342, 2003
- [4] F. Montheillet, O. Lurdos, G. Damamme, « Approche simplifiée du mécanisme de recristallisation dynamique « discontinue » en régime stationnaire », Conférence Matériaux 2006, Novembre 2006, Dijon France, 2006
- [5] M. Bernacki, Y. Chastel, H. Dignonnet, H. Resk, T. Coupez, R.E. Logé, « Development of numerical tools for the multiscale modelling of recrystallization in metals, based on a digital material framework », Computer Methods in Materials Science, vol7-1, pp.142-149, 2007
- [6] T. Massé, « Etude et optimisation d'une gamme de mise en forme à froid en acier haut carbone », Thèse de Doctorat de l'Ecole des Mines de Paris, 2010
- [7] O. Jaouen, F. Costes, P. Lasne, « Finite element thermomechanical simulation of steel making from solidification to the first forming operations» , Proceeding 4th International Conference on Modelling and Simulation of Metallurgical Processes in Steelmaking, pp10-20, 2011
- [8] J. G Kang, J. Kim, S.B. Kang, « Numerical and experimental evaluation for elastic deformation of a cold forging tool and workpiece for a sleeve cam of an automobile start motor », Proceedings of the I MECH E Part B Journal of Engineering Manufacture, vol. 222-2. pp. 217-224, 2008
- [9] V. Krusic , S. Masera, T. Pepelnjak , K. Kuzman, T. Rodic , A. Pristovsek, « The impact of the forming system parameters on tool service life and product

- accuracy in cold forming », *International Journal of Microstructure and Materials Properties*, vol 4, 5-6, pp. 547-561, 2009
- [10] J. Brocail, M. Watremez, L. Dubar, « Identification of a friction model for modelling of orthogonal cutting », *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, vol. 50, pp. 807-814, ISSN 0890-6955, 2010
- [11] E. Vidal-Salle, S. Boutabba, Y. Cui, J.C. Boyer, « An improved "plastic wave" friction model for rough contact in axisymmetric modeling of bulk forming processes » *International Journal of Material Forming*, vol 1-1, pp 1263-1266 2008
- [12] B. Langrand, E. Deletombe, E. Markiewicz, P. Drazétic , « Riveted joint modeling for numerical analysis of airframe crashworthiness » *Finite Elements in Analysis and Design*, vol 38-1, pp 21-44, 2001
- [13] G. Surdon, J.L. Chenot, "Finite element calculation of three-dimensional hot forging", *Numerical Methods in Industrial Forming Processes*, vol. 2, pp. 287-292, 1986
- [14] D.N. Arnold, F. Brezzi, M. Fortin. « A stable finite element for the Stokes equations». *Calcolo*, vol. 21, pp. 337-344, 1984.
- [15] F. Delalondre, « Modélisation et étude 3D des phénomènes de cisaillement adiabatiques dans les procédés de mise en forme à grande vitesse », Thèse de Doctorat de l'Ecole des Mines de Paris, 2008
- [16] Rojek J., Zienkiewicz O.C., Onate E. et Postek E., « «Advances in FE Explicit Formulation for Simulation of Metalforming Processes », *Journal of Materials Processing Technology*, 2001, vol. 119(1-3):41-47, 2001
- [17] Rojek J., Onate E. et Taylor R.L., « CBS-based stabilization in explicit solid dynamic », *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, vol. 66 pp. 1547-1568, 2006
- [18] De Souza Neto E.A., Andrade Pires F.M. et Owen D.R.J., « F-bar-based linear triangles and tetrahedra for finite strain analysis of nearly incompressible solids. Part I: formulation and benchmarking », *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, vol. 62, pp. 353-383, 2005
- [19] Bonet J. and Burton A.J., « A simple averaged nodal pressure tetrahedral element incompressible and nearly incompressible dynamic explicit applications », *Communications in Numerical Methods in Engineering*, vol. 14, pp. 437-449, 1998.
- [20] Detournay C. et Dzik E., Nodal Mixed « Discretization for tetrahedral elements ». *Proceedings of the 4th International FLAC Symposium on Numerical Modeling in Geomechanics*, Madrid, 2006, Hart and Varona editions : paper 07-02.

- [21] M. Bäker, « Finite element simulation of high-speed cutting forces », *Journal of Materials Processing Technology*, vol.176 pp. 117-126, 2006
- [22] W. Hackbusch, « On the multi-grid method applied to difference equations ». *Computing*, vol.20, pp.291–306, 1978
- [23] P. Wesseling and P. Sonneveld, « Numerical experiments with a multiple grid and a preconditioned Lanczos type method ». *Approximation Methods for Navier–Stokes Problems, Lecture Notes in Mathematics*, vol.771, pp.543–562, 1980
- [24] M. F. Adams, «Multigrid Equation Solvers for Large Scale Nonlinear Finite Element Simulations », Ph.D. thesis, EECS Department, University of California, Berkeley, 1998
- [25] J. E. Dendy Jr., « Black box multigrid ». *Journal of Computational Physics*, vol.48, pp.366-386, 1982
- [26] M. H. Lallemand, « Algebraic multigrid », *Multigrid method for computational Fluid Dynamics*, ERCIM.-INRIA, Sophia Antipolis, France, 1992
- [27] S. Marie, « Un modèle de parallélisation S.P.M.D. pour la simulation numérique de procédés de mise en forme de matériaux ». Thèse de doctorat de l'École Nationale Supérieure des Mines de Paris, Sophia Antipolis, 1997
- [28] M. F. Adams et R. L. Taylor, « Parallel multigrid solvers for 3D unstructured finite element problems in large deformation elasticity and plasticity », *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, vol.48, pp.1241-1262, 2000
- [29] D. J. Mavriplis, «Three dimensional multigrid Reynolds averaged Navier Stokes solver for unstructured meshes », *American Institute of Aeronautics and Astronautics journal*, vol.33-3, pp. 445-453, 1995
- [30] <http://www.mcs.anl.gov/petsc/petsc-as/>
- [31] P. Wriggers, « Computational Contact Mechanics », Series: CISM International Centre for Mechanical Sciences, Number 498, Wriggers, Peter; Laursen, Tod A. (Eds.), Springer, 2007
- [32] J. Hallquist, G. Goudreau, D. Benson, « Sliding interfaces with contact- impact in large-scale Lagrangian computations », *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, vol. 51, pp. 107–137, 1985.
- [33] K. Bathe, A. Chaudhary, « A solution method for planar axisymmetric contact problem », *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, vol. 21, pp. 65–88, 1985.

- [34] N. El-Abbasi, K. J. Bathe, « Stability and patch test performance of contact discretizations and a new solution algorithm », *Computers and Structures*. 79 , pp.1473-1486, 2001.
- [35] M. A. Puso, T. A. Laursen, « A mortar segment-to-segment frictional contact method for large deformations », *Comput. Methods Appl. Mech. Eng.* 193 n° 45-47, pp. 4891- 4913, 2004.
- [36] N. El-Abbasi, K. J. Bathe. , « On a New Segment-to-Segment Contact Algorithm, » *Computational Fluid and Solid Mechanics*, K.J. Bathe. Eds. 2001
- [37] M. A. Puso, T. A. Laursen, « A mortar segment-to-segment contact method for large deformation solid mechanics », *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, vol. 193 n° 6-8, pp. 601-629, 2004.
- [38] J. Barboza, « Traitement de contact entre corps déformables et calcul parallèle pour la simulation 3D du forgeage multicorps », Thèse de Doctorat de l'Ecole des Mines de Paris, 2004
- [39] S. Popa, « Quasi-symmetrical contact algorithm and recurrent boundary conditions : application to 3d metal forging simulations », Thèse de Doctorat de l'Ecole des Mines de Paris, 2005
- [40] M. Miles, « Calcul thermomécanique des outillages pour le forgeage à chaud » Thèse de Doctorat de l'Ecole des Mines de Paris, 1995
- [41] K. Majhoub, « Usure des matrices de forgeage à chaud des acier-Phénomènes physiques et modélisations », Thèse de Doctorat de l'Ecole des Mines de Paris, 1999
- [42] A. Oudin, P. Lamesle, L. Penazzi, S. LeRoux. ,F. Rézaï- Aria , « Thermomechanical fatigue behaviour and life assessment of hot work tool steels », *European Structural Integrity Society*, vol. 29, pp.195-201, 2002
- [43] C. Daffos, P. Lamesle, F. Rézaï-Aria, « Fatigue- oxidation interaction models for life prediction of hot forming tools steels under transient thermomechanical loadings », *International Journal of Microstructure and Materials Properties*, vol. 3, n° 2-3, pp.350-362, 2008
- [44] A. Oudin, F. Rézaï-Aria, « Temperature dependence of thermo-mechanical fatigue behaviour of martensitic 5 % chromium steel » , *Proc Euromat 2000: Advances in mechanical behaviour, plasticity and damage ELSEVIER*, vol. 2, pp. 1053-1058, 2000.
- [45] G. Bernhardt, G. Moulinier, O. Brucelle, D. Delagnes, « High temperature low cycle fatigue behaviour of martensitic forging tool steel », *International Journal of Fatigue*, 21, 1999.

- [46] V. Labbé : « Modélisation numérique du chauffage par induction Approche éléments finis et calcul parallèle », Thèse de Doctorat de l'Ecole des Mines de Paris, 2002
- [47] D. Cardinaux : « Étude et modélisation numérique 3D par éléments finis d'un procédé de traitement thermique de tôles embouties après chauffage par induction : Application à un renfort de pied central automobile », Thèse de Doctorat de l'Ecole des Mines de Paris, 2008
- [48] C. Elliott and S. Larsson, A finite element model for the time-dependent Joule heating problem, *Mathematics of. Computation*, vol 64, pp. 1433-1453, 1995
- [49] L. Xue, T. Wierzbicki, « Ductile fracture initiation and propagation modelling using damage plasticity theory », *Engineering Fracture Mechanics*, vol. 75, pp. 3276-3293, 2008
- [50] J. Lemaitre, J. L. Chaboche, « Mécanique des matériaux solides ». 2e édition. s.l. : Dunod, 1996
- [51] V. Tvergaard, A. Needleman, « Analysis of the cup-cone fracture in a round tensile bar ». *Acta Metallurgica et Materialia* , vol. 32, pp. 157-169, 1984
- [52] M.G. Cockcroft, D.J. Latham, « Ductility and the workability of metals », *Journal of the Institute of Metals*, vo. 96, pp. 33-39, 1968
- [53] M. Oyane, T. Sato, K. Okimoto, S. Shima, « Criteria for ductile fracture and their applications » *Journal of Mechanical Working and Technology*, vol. 4, pp. 65-81, 1980
- [54] Z. P. Bažant, M. Jirásek. « Nonlocal integral formulations of plasticity and damage: Survey of progress ». *Journal of Engineering Mechanics*, vol. 128, pp. 1119-1149, 2002
- [55] R. H. Peerlings, R. de Borst, W.A.M. Brekelmans, J.H.P. de Vree, « Gradient enhanced damage for quasi-brittle materials », *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, vol. 17, pp. 3391-3403, 1996.
- [56] P.O. Bouchard, F. Bay, Y. Chastel, I. Tovenar, « Crack propagation modelling using an advanced remeshing technique », *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, vol. 189, pp. 723-742, 2000
- [57] E. Perchat, « Mini-élément et factorisations incomplètes pour la parallélisation d'un solveur de Stokes 2D. Application au forgeage », Thèse de Doctorat de l'Ecole des Mines de Paris, 2000
- [58] E. Bänsch , « Finite element discretization of the Navier-Stokes equations with a free capillary surface », *Numerical mathematics*, vol. 88, pp. 203-235, 2001.

- [59]** Hysing S., «A new implicit surface tension implementation for interfacial flows», Numerical methods engineering, vol. 51, pp. 659-672, 2006
- [60]** P.O. Bouchard, J.M. Gachet, E. Roux. « Ductile damage parameters identification for cold metal forming applications », AIP Conference Proceedings 1353, 1, pp. 47-52, 2011

VII Publications significatives

Dans cette dernière partie, j'ai sélectionné 4 articles représentatifs des travaux réalisés et présentés dans ce document.

Pichelin E., Mocellin K, Fourment L and Chenot J. L., An application of a master-slave algorithm for solving 3D contact problems between deformable bodies in forming processes, *Revue Européenne des Eléments finis*, vol 10 n°8, 857-880 (2001).

Cet article présente les premiers travaux réalisés dans le cadre de la modélisation de problématique mulddomains 3D. Il présente les hypothèses qui resteront utilisées dans les travaux postérieurs.

Rey B. · Mocellin K , · Fourment L, A node-nested Galerkin multigrid method for metal forging simulation, *Computing and Visualization in Science*, DOI 10.1007/s00791-006-0054-5 (2006)

Dans cet article, le modèle multigrille développé par Benoit Rey est détaillé. La construction des niveaux de maillage grossier est décrite et quelques applications sont présentées pour montrer les accélérations obtenues sur la résolution des systèmes linéaires .

De Micheli P.O., Mocellin K, A new efficient explicit formulation for linear tetrahedral elements non-sensitive to volumetric locking for infinitesimal elasticity and inelasticity, *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, Vol 79 Issue 1, 45 – 68 (2009)

Dans cette publication la formulation explicite stabilisée pour des tétraèdres linéaires est présentée en détail. Elle est validée sur des exemples issus de la bibliographie. Ce modèle sera utilisé pour simuler les procédés d'usinage à grande vitesse.

Bouchard P-O., Bourgeon L., Fayolle S. and Mocellin K, An enhanced Lemaitre model formulation for materials processing damage computation, *International Journal of Material Forming*, 2010, Online First™, 14 August 2010, , DOI 10.1007/s12289-010-0996-5.

Cette publication présente les développements réalisés dans le logiciel Forge à l'échelle macroscopique pour traiter des problèmes industriels. Le modèle phénoménologique de Lemaitre y est enrichi pour mieux prédire l'endommagement ductile en mise en forme à froid.