



**HAL**  
open science

# Réduction de modèle basée sur l'apprentissage par variété appliquée à l'optimisation du procédé d'emboutissage

Guénaél Le Quilliec, Balaji Raghavan, Piotr Breitkopf

► **To cite this version:**

Guénaél Le Quilliec, Balaji Raghavan, Piotr Breitkopf. Réduction de modèle basée sur l'apprentissage par variété appliquée à l'optimisation du procédé d'emboutissage. 12e Colloque national en calcul des structures, CSMA, May 2015, Giens, France. hal-01516441

**HAL Id: hal-01516441**

**<https://hal.science/hal-01516441>**

Submitted on 1 May 2017

**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.

Public Domain

# Réduction de modèle basée sur l'apprentissage par variété appliquée à l'optimisation du procédé d'emboutissage

Guénaël Le Quilliec<sup>1</sup>, Balaji Raghavan<sup>2</sup>, Piotr Bretkopf<sup>3</sup>

<sup>1</sup> LMR, École Polytechnique de l'Université de Tours, guenael.lequilliec@univ-tours.fr

<sup>2</sup> LGCGM, INSA de Rennes, balaji.raghavan@insa-rennes.fr

<sup>3</sup> Laboratoire Roberval UMR 7337 CNRS, Université de Technologie de Compiègne, piotr.bretkopf@utc.fr

**Résumé** — Dans cette présentation, nous proposons de représenter les tôles embouties, après retour élastique, par des fonctions distances. Nous déterminons le nombre minimum de paramètres nécessaires afin de caractériser la forme finale quel qu'en soit son degré de complexité, aboutissant à un "espace de formes" d'ordre réduit. Cette approche est ensuite utilisée dans un algorithme d'optimisation permettant de se rapprocher au mieux d'une forme cible donnée. Enfin, l'approche est appliquée sur un cas-test industriel d'emboutissage d'une tourelle d'amortisseur automobile.

**Mots clés** — réduction de modèle, optimisation de forme, fonction distance, décomposition orthogonale aux valeurs propres, emboutissage

## 1 Introduction

La technique de mise en forme par emboutissage est fonction de nombreux paramètres tels que la géométrie des outils, la forme initiale de la tôle, sa loi de comportement et les paramètres du procédé (vitesses, température, efforts de serrage, *etc.*). Le choix de l'ensemble de ces paramètres constitue un problème de grande dimension lors duquel il est essentiel de tenir compte du phénomène de retour élastique qui prend place lorsque les outils sont retirés et des éventuelles opérations de finition (*e.g.* détournage, tombage des bords). L'objectif est d'obtenir une forme finale, appelée *forme optimale*, qui soit aussi proche que possible de la forme recherchée, appelée *forme cible*, tout en respectant les contraintes d'admissibilité comme par exemple la résistance du matériau, habituellement exprimée sous la forme de diagrammes limites de formage. Pour ces différentes raisons, la forme optimale est généralement difficile à obtenir et diffère souvent de la forme cible.

Dans ce travail, nous proposons de représenter la tôle emboutie, après retour élastique, par le niveau zéro d'une fonction distance (ou *level set*). Ainsi, plutôt que d'utiliser un ensemble choisi arbitrairement de longueurs, de rayons ou d'angles dépendants du cas considéré et potentiellement redondants ou insuffisants [1], nous construisons une "variété de formes" (ou *shape manifold*), admissibles ou réalisables, dans un "espace de formes" d'ordre réduit, à l'aide de la *décomposition orthogonale aux valeurs propres* [3], là où évolue la fonction distance, comme introduit dans [2]. De cette manière, nous déterminons le nombre minimum de paramètres nécessaire (soit la dimensionnalité intrinsèque du problème) pour caractériser de manière unique la forme finale indépendamment de son degré de complexité, comme démontré initialement dans [4]. Les fonctions distances nécessaires sont générées à partir d'un ensemble de formes de tôles après retour élastique prédites par autant de simulations numériques en éléments finis. Le concept d'interpolation entre ces formes admissibles a aussi été étudié par [5, 6].

En complément, nous proposons un processus d'optimisation, minimisant l'écart entre la tôle après retour élastique et la forme cible souhaitée jusqu'à atteindre la forme optimale. Ce processus consiste à effectuer successivement des *approximations diffuses* locales, en s'appuyant sur la réduction de modèle précédente, afin de se "déplacer" itérativement sur la variété globale *via* un algorithme de prédiction-correction.

Enfin, la démarche est appliquée sur un cas-test industriel d'optimisation des géométries d'outils pour l'opération d'emboutissage d'une tourelle d'amortisseur automobile.

## 2 Approche générale

### 2.1 Représentation de la tôle emboutie par une fonction distance

La forme  $\Gamma$  de la tôle emboutie peut être représentée par le niveau zéro d'une fonction distance signée  $\varphi$  dépendante des  $p$  paramètres variables  $\underline{P}$  du procédé, soit  $\varphi(\underline{P}) = 0$ .

La fonction distance  $\varphi$  d'une géométrie donnée  $\Gamma$  ne sera définie que sur un nuage de points (distribuée généralement sur une grille cartésienne) englobant la géométrie et sauvee dans un vecteur  $\underline{\varphi}$ . De même, la fonction  $\varphi(\underline{P})$  ne sera pas résolue mais simplement évaluée pour un ensemble de géométries admissibles obtenues par simulations numériques. Toute fonction  $\underline{\varphi}$  de géométrie intermédiaire pourra être obtenue par interpolation entre les géométries admissibles voisines.

### 2.2 Interpolation entre les fonctions distances par une variété de forme

Le domaine d'admissibilité  $\mathcal{F}$  est directement induit par les contraintes d'admissibilité du problème sous-jacent et ses degrés de liberté. L'approche suppose que  $\mathcal{F}$  est une variété lisse telle que toutes les fonctions distances sont connectées entre elles. La forme cible ne respecte pas nécessairement les contraintes d'admissibilité et n'est alors pas réalisable.

Après avoir généré un ensemble de  $s$  géométries admissibles  $\Gamma_i$  par simulations numériques (les géométries des outils étant automatiquement générés par un logiciel de CAO) au voisinage d'un jeu de paramètres initial  $\underline{P}_0$ , les fonctions distances associées  $\underline{\varphi}_i \in \mathcal{F}$  sont calculées. La *décomposition orthogonale aux valeurs propres* par les méthode des *snapshots* (sans troncature) permet d'obtenir les coefficients  $\underline{\alpha}_i$  correspondants, réduisant la dimensionnalité importante des  $\underline{\varphi}_i$ . L'interpolation entre ces points produit une variété- $\alpha$  approchant l'espace de formes admissibles réel. Les géométries physiquement infaisables sont facilement identifiées, tout point n'appartenant pas à la variété- $\alpha$  correspondant à une géométrie non-admissible du procédé.

### 2.3 Interpolation par approximation diffuse

Plutôt que de considérer le nombre  $p$  de paramètres  $\underline{P}$  du problème initial lors de l'interpolation, la dimensionnalité intrinsèque  $d \leq p$  peut être évaluée autour d'un point  $\underline{\alpha}_{ev}$  pour un voisinage local de  $b \leq s$  points à partir d'un calcul standard des plus proches voisins, en utilisant l'algorithme de Fukunaga-Olsen [7].

Dans le cas où  $d < p$ , de nouvelles coordonnées locales doivent être définies. Nous proposons d'utiliser les coordonnées  $t_1, \dots, t_d$  de l'*espace tangent local*. La distance qui le sépare de la variété- $\alpha$  sera notée  $h = \tilde{h}(t_1, \dots, t_d)$  et sera déterminée par interpolation entre les valeurs prises aux  $b$  points du voisinage considéré.

Pour effectuer l'interpolation locale, parmi les nombreuses méthodes existantes, nous proposons d'utiliser l'*approximation diffuse* [8]. Ce choix est principalement dû à la facilité et la flexibilité qu'elle permet pour effectuer un ajustement par les moindres carrés mobiles avec une fonction poids appropriée entre un nombre de points donnés dans le voisinage local. On aboutit alors à l'expression paramétrique de la variété- $\alpha$  dans le voisinage local à l'aide des  $d$  paramètres locaux  $t_1, \dots, t_d$  tel que :

$$\underline{\alpha}_1 = \underline{\alpha}_1(t_1, \dots, t_d), \dots, \underline{\alpha}_b = \underline{\alpha}_b(t_1, \dots, t_d)$$

Cette expression implique que les coefficients  $\underline{\alpha}_i$  sont contrôlés localement par  $d$  paramètres nous autorisant à nous "déplacer" le long de la variété. Un exemple de variété- $\alpha$  obtenu par approximation diffuse à partir d'un ensemble discret de points est donné Figure 1.

### 2.4 Algorithme de déplacement sur la variété

Lorsque la variété globale peut être construite, la projection de la géométrie cible sur la variété- $\alpha$  permet de connaître directement la forme optimale. Cependant cette construction sur l'étendue complète de variation de  $\underline{P}$  peut être onéreuse en temps de calcul, surtout pour des cas complexes où  $p$  est grand. Pour diminuer le nombre total d'appel à la fonction exacte et donc le temps de calcul, la variété- $\alpha$  ne sera construite que pas à pas, uniquement localement, jusqu'à ce que l'optimum soit atteint. Les évaluations des pas précédents peuvent aussi être réutilisées lorsqu'elles se trouvent dans le voisinage du pas courant.

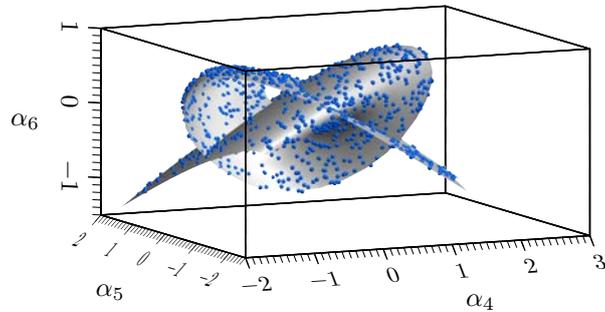


FIGURE 1 – Exemple d’approximation diffuse sur un ensemble de formes dans l’espace- $\alpha$ .

### 3 Exemple d’application industrielle

La démarche proposée à été appliquée sur un cas-test tridimensionnel d’emboutissage d’une tourelle d’amortisseur automobile (Figure 2) en considérant un jeu de paramètres matériaux standards. Seule la moitié du problème a été modélisée de par sa symétrie.

L’ensemble des géométries des outils et de la forme initiale de la tôle ont été générés automatiquement par le logiciel de CAO TopSolid/Design. Les maillages des géométries ont été générés ensuite par GMSH puis transmis au logiciel LS-DYNA pour effectuer les simulations numériques par éléments finis (en dynamique explicite pour la phase de mise en forme et en statique implicite pour la phase de retour élastique).

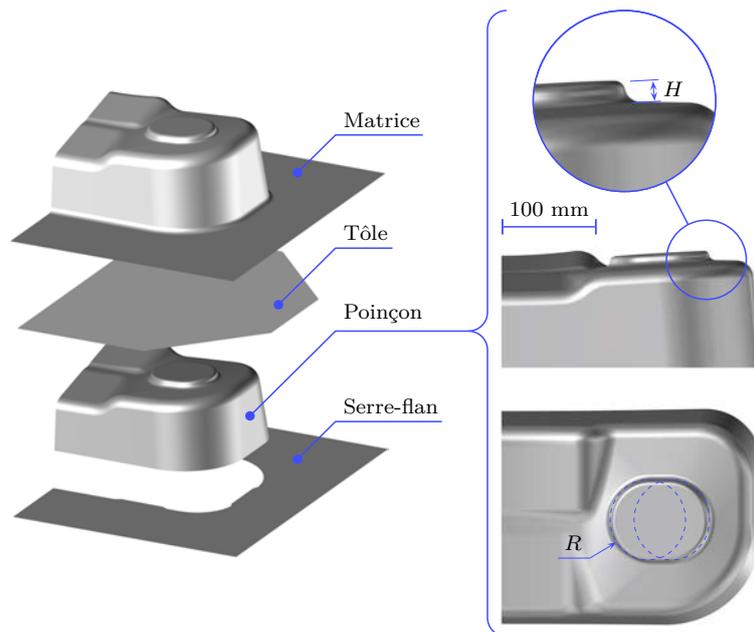


FIGURE 2 – Géométrie CAO entièrement paramétrée et les 2 paramètres autorisés à varier  $H$  et  $R$ .

Ces différentes étapes sont effectuées à chaque appel à la fonction exacte avec le jeu de paramètres souhaité. À la fin d’une simulation, seul le maillage de la tôle après retour élastique est conservé. On en déduit la fonction distance associée à l’aide d’une procédure utilisant la librairie Open CASCADE et permettant de traiter tout aussi bien des maillages que des géométries CAO.

La démarche a été appliquée avec succès en considérant successivement 1 puis 2 paramètres variables, permettant de mettre visuellement en évidence le caractère unidimensionnel puis bidimensionnel du problème dans l’espace- $\alpha$  (Figure 3). Dans chacune des 2 situations, la géométrie optimale des outils a été atteinte automatiquement après convergence du processus d’optimisation.

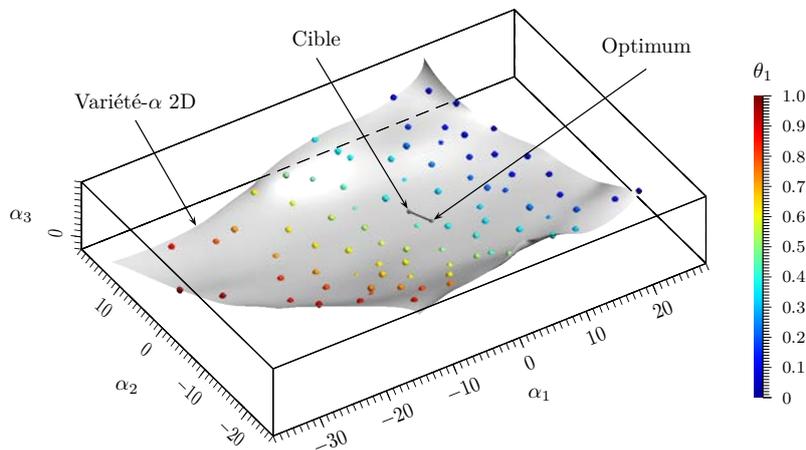


FIGURE 3 – Variété- $\alpha$  2D obtenue dans le cas de 2 paramètres variables.

## 4 Conclusions

Dans cette présentation, nous proposons une approche objective pour caractériser les formes complexes des tôles obtenues par emboutissage, après retour élastique, en utilisant une approche par fonction distance (ou level set) et un méta-modèle d'un espace de forme basé sur l'hypothèse de continuité de la variété. La transition entre les points d'évaluation a été faite par interpolation en appliquant l'approximation diffuse dans l'espace des coefficients de la décomposition orthogonale aux valeurs propres. Cette approche a été démontrée sur un cas industriel d'emboutissage de coupelle d'amortisseur automobile. Elle permet de déterminer automatiquement les géométries d'outils nécessaires pour s'approcher au mieux d'une géométrie de tôle emboutie souhaitée par le fabricant.

## 5 Remerciements

Cette recherche a été conduite dans le cadre du projet OASIS, supporté par OSEO sous le contrat FUI no. F1012003Z. Les auteurs sont reconnaissants du soutien du Labex MS2T, qui a été fondé par le gouvernement français, au travers du programme "Investissements d'avenir" géré par l'Agence Nationale de la Recherche (référence ANR-11-IDEX- 0004-02).

## Références

- [1] J. Lebon, G. Le Quilliec, P. Breitkopf, R. Filomeno Coelho, P. Villon. *A two-pronged approach for springback variability assessment using sparse polynomial chaos expansion and multi-level simulations*, International Journal of Material Forming, 1-13, 2013.
- [2] B. Raghavan, P. Breitkopf, Y. Tourbier, P. Villon. *Towards a space reduction approach for structural shape optimization*, Structural & Multidisciplinary Optimization, 2013.
- [3] G. Berkooz, P. Holmes, J. L. Lumley. *The proper orthogonal decomposition in the analysis of turbulent flows*, Annu Rev Fluid Mech, 25, 539-575, 1993.
- [4] B. Raghavan, G. Le Quilliec, P. Breitkopf, A. Rassineux, J-M. Roelandt, P. Villon. *Numerical assessment of springback for the deep drawing process by level set interpolation using shape manifolds*, International Journal of Material Forming, 487-501, 2014.
- [5] X. Xie, M. Mirmehdi. *Radial basis function based level set interpolation and evolution for deformable modelling*, Image and Vision Computing, 29, 167-177, 2011.
- [6] S. Wang, K. Lim, B. Khoo, M. Wang. *An extended level set method for shape and topology optimization*, Journal of Computational Physics, 221, 395-421, 2007.
- [7] K. Fukunaga, D. Olsen. *An algorithm for finding intrinsic dimensionality of data*, IEEE Transactions on Computers, 20, 176-183, 1971.
- [8] B. Nayroles, G. Touzot, P. Villon. *Generalizing the finite element method : diffuse approximation and diffuse elements*, Computational Mechanics, 10, 307-318, 1992.