



Science Arts & Métiers (SAM)

is an open access repository that collects the work of Arts et Métiers Institute of Technology researchers and makes it freely available over the web where possible.

This is an author-deposited version published in: <https://sam.ensam.eu>
Handle ID: <http://hdl.handle.net/10985/6355>

To cite this version :

Cyril NICOLAS, Stéphane LELEU, Mihaela TEODORESCU, Cyrille BAUDOUIN, Regis BIGOT -
Stratégie de contrôle dimensionnel et identification de la déformation d'un produit. Application à
une pièce test traitée thermiquement. - 2007

Any correspondence concerning this service should be sent to the repository

Administrator : scienceouverte@ensam.eu



STRATEGIE DE CONTROLE DIMENSIONNEL ET IDENTIFICATION DE LA DEFORMATION D'UN PRODUIT

Application à une pièce test traitée thermiquement

Nicolas Cyril* — Baudouin Cyrille* — Leleu Stéphane* —
Teodorescu Mihaela** — Bigot Régis***

** Laboratoire de Génie Industriel et Production Mécanique (LGIPM – IFAB)
Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers – C.E.R de Metz
4, rue Augustin Fresnel – 57078 Metz Cedex3
{cyril.nicolas, cyrille.baudouin, regis.bigot}@metz.ensam.fr*

*** ASCOMETAL CREAS BP 70045 – 57301 – Hagondange Cedex
m.teodorescu@ascometal.lucchini.com*

**** Laboratoire de Métrologie et Mathématiques Appliquées (L2MA)
Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers – C.E.R de Lille
8, boulevard Louis XIV – 59046 Lille Cedex
stephane.leleu@lille.ensam.fr*

RÉSUMÉ. Certains traitements thermiques génèrent sur les pièces mécaniques des déformations, locales ou globales, plus ou moins importantes selon le traitement et la nuance d'acier utilisés. Des opérations de finition, souvent coûteuses, sont alors nécessaires pour respecter les tolérances fonctionnelles spécifiées. Afin d'optimiser la nuance et le traitement, et d'ajuster les modèles de simulation, les variations géométriques de pièces « test » traitées thermiquement sont qualifiées et quantifiées par une analyse dimensionnelle. Les travaux présentés se centrent sur les stratégies de mesure et de dépouillement. Nous évoquons aussi l'identification de déformations issues de trempe d'essais sur deux nuances d'aciers étudiées.

ABSTRACT. Some heat treatment generates on workpieces, local or global distortions which are more or less significant according to the treatment and the steel grade. Finishing operations are then necessary to respect the required functional tolerances. This may increase the cost of the product. In the objective to optimize both the steel grade and the heat treatment and to adjust the numerical simulation models, the geometrical variations of heat treated “test” parts are qualified and quantified by a dimensional analysis. In this article, we focus on part measurement and data processing strategies. We also evoke the identification of the distortions resulting from testing quenching on two studied steel grades.

MOTS-CLÉS: traitements thermiques, métrologie, analyse dimensionnelle, déformations

KEYWORDS: heat treatments, metrology, dimensional analysis, distortions

1. Introduction

Chaque étape du processus de fabrication d'un produit influence les dimensions et la forme de celui-ci. A cause de la complexité du processus, aucune fonction analytique n'a été développée jusqu'à présent pour calculer les déformations géométriques le long de la chaîne de fabrication (Klein *et al.*, 2006). La simulation des procédés de fabrication est limitée à la prise en compte de chaque étape individuelle du processus global. Nous nous focaliserons, dans ce papier, sur les méthodes d'identification des déformations dues aux traitements thermiques.

En effet, ceux-ci sont fréquemment utilisés dans nombre de procédés de fabrication afin d'améliorer les caractéristiques d'un produit mécanique (résistance mécanique, dureté de surface) requises pour son fonctionnement. Cependant, des modifications dimensionnelles non souhaitées surviennent parfois et nécessitent alors des opérations de finition, généralement coûteuses, pour respecter les tolérances fonctionnelles de la géométrie nominale.

La maîtrise des déformations de la géométrie des pièces subissant un traitement thermique est un des grands enjeux économiques de notre système de production actuel. La prédiction des déformations est cependant très difficile et a généralement été basée sur l'expérience. Notre stratégie de contrôle repose sur une analyse métrologique fine du produit et l'optimisation des écarts de mesure.

La première partie de cet article présente les méthodes rencontrées fréquemment dans la littérature pour procéder à l'identification des déformations dimensionnelles. La deuxième partie introduit la stratégie que nous utilisons pour le dépouillement des points issus de la mesure métrologique. La troisième partie apporte une approche d'identification des déformations sur des pièces test.

2. Identification des distorsions

2.1. Définition des déformations aux traitements thermiques

Dans la littérature, le sens que l'on donne au terme « déformation » ou « distorsion » est rarement précisé. Selon la norme NF EN 10052 (AFNOR, 1994), la déformation est constituée par « toute altération de la forme et des cotes initiales d'un produit ferreux, au cours des traitements thermiques ». Ce terme englobe les modifications de volume (donc de dimensions) et celles de forme d'une pièce. Les modifications de volume proviennent essentiellement des transformations structurales du métal lors du chauffage et du refroidissement. Quant aux modifications de forme, elles sont dues aux déformations plastiques causées à la fois par les contraintes mécaniques résiduelles (lors de l'usinage par exemple) mais aussi par les contraintes thermiques et structurales liées au gradient thermique, lors de la chauffe et du refroidissement.

2.2. Méthodes d'identification des distorsions

Afin de comprendre les phénomènes en jeu et de prédire les distorsions, deux conceptions principales complémentaires sont rencontrées dans la littérature. La première est l'approche déductive, qui a pour but la vérification d'un modèle prédictif des déformations, par l'expérience et la simulation numérique. La deuxième est l'approche inductive qui, à partir d'expériences, permet la mise en place d'une modélisation des déformations. Nous présentons maintenant certains des travaux illustrant ces deux approches dans le cadre des traitements thermiques.

2.2.1. Approche déductive

Les modèles prédictifs peuvent être à base de connaissances, ou d'éléments finis. Lamesle *et al.* (2005) proposent ainsi un système expert dont la base de connaissances est renseignée à partir du savoir-faire d'experts en traitements thermiques. Son principe est le suivant : à chaque famille géométrique (pignons, arbres, bagues, etc.) sont associées des déformations potentielles (de type tonneau, banane, diablo, etc.). Combinées à six facteurs d'influence, ces déformations « types » permettent l'évaluation qualitative des distorsions finales. Ces facteurs d'influence sont affectés d'un coefficient de pondération reflétant leur rôle dans la génération des déformations. On retrouve ainsi la géométrie de la pièce (15%), ses propriétés métallurgiques (15%), l'histoire de l'acier (10%), sa position dans le four (20%), son cycle thermique (5%) et les caractéristiques du fluide de refroidissement (35%). D'autres modèles prédictifs prennent en compte individuellement certains des facteurs d'influences des déformations, par exemple, l'hétérogénéité de la composition chimique et de la microstructure (Hippenstiel, 2005) et la variation de la vitesse de refroidissement (Bauckhage *et al.*, 2003). Enfin, dans l'étude de l'influence de la géométrie sur les déformations, Andersch *et al.* (2006) utilisent une formule de corrélation croisée pour estimer le degré avec lequel deux fonctions mathématiques sont corrélées.

Cependant, les modèles à base d'éléments finis sont majoritairement présents dans la littérature. Ils permettent d'estimer qualitativement et quantitativement les déformations. Ils rendent également possible l'observation de l'évolution des phénomènes à la fois métallurgiques (transformations de phase) et thermomécaniques (variation de volume, contraintes internes). Cependant, comme tous les modèles numériques, la précision des résultats fournis dépend fortement de l'exhaustivité et de la qualité des données d'entrées. Toutes ces dernières ne peuvent être prises en compte et certaines sont négligées, par exemple, les transformations de phases (Frerichs *et al.*, 2006) ou la relaxation des contraintes résiduelles (Cho *et al.*, 2004). Il faut donc associer l'approche numérique avec une approche expérimentale permettant de valider les résultats obtenus. Ainsi, Mukai *et al.* (2004) se sont intéressés au processus de cémentation-refroidissement d'un pignon en acier. Ils ont combiné approche de simulation en utilisant le logiciel COSMAP® et approche expérimentale. Il en ressort que la précision des déformations du processus a été améliorée grâce à la bonne identification des propriétés thermiques et des

changements de phase du matériau utilisé et la prise en compte de la répartition initiale et de la diffusion du carbone. Şimşir *et al.* (2005) ont, quant à eux, implémenté un modèle prédictif dans le logiciel Msc.Marc 2003® qui tient compte du refroidissement des aciers et qu'ils ont vérifié expérimentalement. Leur pièce d'étude est un cylindre de 30 mm de diamètre, percé d'un trou positionné radialement, son diamètre et sa localisation étant variables. Ils étudient de cette façon, l'influence de la géométrie : celle-ci provoque en effet une asymétrie du flux de transfert de chaleur et donc une asymétrie des déformations.

Concernant notre pièce d'étude, une première approche de simulation numérique avec Forge 3TTT® a été réalisée par notre partenaire industriel, ASCOMETAL, sur les refroidissements par eau et par huile. Il constate un phénomène de fermeture et d'ouverture des « pinces » d'une pièce test en forme de croissant, avec une déformation finale de l'ordre de quelques centaines de μm (Teodorescu *et al.*, 2005). Ces résultats ont été confirmés expérimentalement.

2.2.2. Approche inductive

Elle consiste en l'analyse et la synthèse des données issues de mesures métrologiques, afin de proposer une évaluation qualitative et quantitative des déformations. La géométrie mesurée révèle l'état des déformations finales.

2.2.2.1 Importance de la stratégie d'échantillonnage

Le but de la stratégie d'échantillonnage est d'optimiser le nombre et la distribution des points de telle façon que les portions de surfaces significatives pour le critère d'optimisation soient mesurées avec la plus petite perte d'informations possible. Dans les cas défavorables, les différences dans les résultats, causées par une mauvaise stratégie de mesure, peuvent être plus importantes que les valeurs de déviations géométriques de la pièce à échantillonner (Weckenmann *et al.*, 1998).

La sélection du nombre de points est assujettie, en général, à des facteurs tels la taille de la pièce, les spécifications de tolérance, la capacité du processus de fabrication et l'incertitude de mesure (Badar *et al.*, 2003). Si la déviation de forme est inconnue (ce qui est notre cas), alors une stratégie d'échantillonnage avec peu de points ne peut pas conduire à des résultats acceptables (Killmaier *et al.*, 2003). L'augmentation du nombre de points est nécessaire pour que la valeur estimée par la mesure converge vers la « vraie » valeur de l'erreur de forme (Lee *et al.*, 1997). A l'opposé, le nombre minimum de points théoriquement nécessaires peut être utilisé pour des pièces géométriquement idéales.

Quant à la répartition des points de mesure, on trouve l'utilisation de méthodes statistiques avec des lois de répartition uniforme, aléatoire, groupée ou stratifiée. En pratique, il est souhaitable de les disposer de façon régulière sur toute la surface (Bourdet, 1987), une répartition non uniforme créant une pondération sur la zone où cette densité de points est localement plus importante. Trois points uniformément répartis est un minimum géométrique pour reconstituer un cercle en cherchant son centre mais ne garantit pas un niveau d'incertitude satisfaisant (Yau, 1998).

2.2.2.2. Critères d'optimisation

La synthèse des nombreux points de mesure requiert l'utilisation d'une méthode d'optimisation, afin de résoudre ce système surabondant en informations. Le choix du critère d'optimisation apparaît alors. C'est pourquoi Nassef *et al.* (1999) proposent une procédure pour déterminer le meilleur, en fonction des cas d'utilisation. S'il s'agit d'identifier des éléments géométriques simples (plan, cercle, etc.) par association à un élément géométrique parfait, certains critères sont couramment évoqués dans la littérature. Ainsi nous rencontrons principalement le critère de Gauss ou des moindres carrés, celui de Chebyshev ou du minimax, le critère de tangence, ceux du minimum circonscrit et du maximum inscrit. Cependant, d'autres critères sont plus adaptés, par exemple pour certaines géométries données. Ainsi, pour l'identification de la circularité d'un cercle, les diagrammes de Voronoï donnent des résultats similaires à ceux que l'on obtient avec un algorithme des moindres carrés (Novaski *et al.*, 1997). Les algorithmes génétiques permettent de détecter les déviations linéaires ou circulaires d'un profil, en trouvant la meilleure combinaison de paramètres de déviations de forme parmi ceux prédéfinis (Killmaier *et al.*, 2003). Enfin, un modèle d'analyse modal pour le tolérancement des défauts de forme est proposé par Samper *et al.* (2007). Il permet une décomposition des modes naturels de déformations. La méthode a été appliquée pour des problèmes d'écartements et d'affleurement de surfaces (Adragna *et al.*, 2006).

Dans notre cas (l'identification de surfaces gauches), une comparaison point par point entre les points mesurés et les points théoriques est nécessaire. Le critère d'optimisation largement utilisé est alors celui des moindres carrés car il procure une grande stabilité du résultat et donne une solution unique pour des solutions initiales proches du résultat.

3. Mesure des déformations

3.1. Présentation de la démarche d'identification des déformations

La démarche que nous envisageons s'appuie à la fois sur une approche expérimentale et sur une approche à base d'éléments finis (Figure 1). L'approche expérimentale consiste en une analyse métrologique fine de la géométrie de la pièce, à trois stades du processus de fabrication (① et ②, Figure 1): après l'usinage, après un recuit de détensionnement et après une trempe. Puis, l'identification des déformations et l'explication de leur apparition, nécessitent la compréhension des phénomènes métallurgiques et mécaniques (③). Enfin, les modèles de calcul d'éléments finis pourraient intégrer des paramètres supplémentaires leur permettant ainsi de mieux anticiper les déformations des produits mécaniques (④). Dans ce papier, nous ne présentons que l'analyse métrologique et l'approche d'identification des déformations (③).

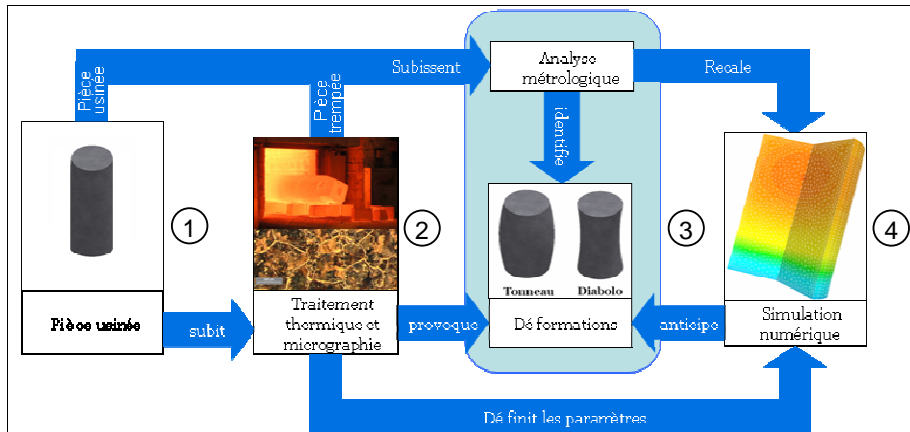


Figure 1 : Démarche d'identification et de maîtrise des déformations

3.2. Pièce test et nuances d'acier utilisés

Avant de nous intéresser à des pièces industrielles, nous considérons une pièce « test » : l'éprouvette *croissant* (C-ring en anglais). La géométrie de la pièce consiste en deux cylindres excentrés et fendus par ce que l'on nommera ouverture (espace entre les deux pointes) (Figure 2).



Figure 2 : Montage expérimental de contrôle

Cette géométrie de pièce a été retenue car elle permet d'amplifier les déformations et facilite ainsi les mesures dimensionnelles (Teodorescu *et al.*, 2005). Le croissant a une longueur de 100 mm, les cylindres extérieur et intérieur ont un diamètre de respectivement 70 mm et 45mm et sont excentrés de 11 mm, formant une rainure de 16 mm. Ces dimensions ont été choisies pour prendre en compte l'emplacement des thermocouples, sans perturber le flux thermique et éliminer les

effets de bord. Enfin, par l'existence de plusieurs épaisseurs, cette géométrie génère des gradients différents de températures et donc de microstructures.

Deux nuances d'acier sont utilisées, les compositions chimiques étant à la discrétion de notre partenaire industriel. Chaque croissant est détensionné après usinage puis il est trempé à l'huile froide, dans un bain agité.

3.3. Stratégie de mesure

La stratégie de mesure matérielle constitue la partie technique de la mesure et traduit les choix technologiques retenus. Elle assure la mesure de tous les éléments géométriques du croissant et ce, en un seul posage afin d'éviter les erreurs de retournement et de repositionnement. Contraints par l'accessibilité et la précision de mesure, nous avons défini le montage et le matériel de palpage, le nombre de points et leur répartition géométrique sur le croissant. La machine à mesurer tridimensionnelle (MMT) que nous utilisons est de marque Wenzel. Son erreur d'indication est donnée par $E = \pm 3.5\mu\text{m} \pm L / 350$, où L est la longueur mesurée (en mm) suivant les axes, résultant soit d'un déplacement uni axial, soit d'un déplacement combinées des axes.

Notre montage permet une mise en position répétable et rapide de la pièce. Nous avons retenu un montage vertical car l'encombrement est réduit et il permet un accès à toutes les surfaces à mesurer. Nous utilisons un palpeur dynamique muni d'une étoile (cinq billes de diamètre 2 mm) et d'une allonge en fibre de carbone afin de minimiser les problèmes de flexion (Figure 2). En effectuant des rotations de la tête de palpage, nous parvenons à atteindre toutes les surfaces du croissant. Afin de caractériser au mieux les déformations, nous décidons d'utiliser un « maillage » fin (Figure 3).

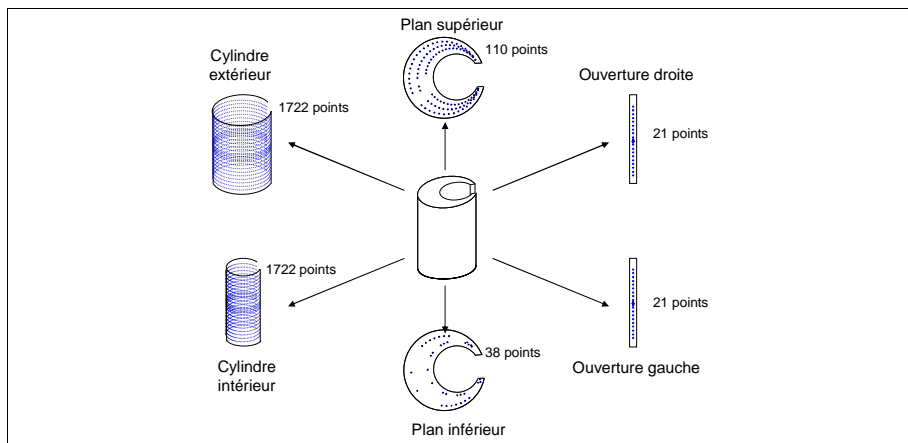


Figure 3: Visualisation des points palpés

A l'exception du plan de posage de la pièce, les points sont uniformément répartis sur les différentes surfaces discrétisées. Pour les plans supérieur et inférieur, la trajectoire suit trois cercles tangents mais de centres décalés. Les cylindres extérieur et intérieur sont discrétisés en 21 sections circulaires de 82 points chacune. Quant à l'ouverture du croissant, elle est palpée en 21 points sur les côtés droit et gauche.

3.4. Stratégie de dépouillement

3.4.1. Principe

Dans le cas de mesure d'éléments géométriques simples (cylindre, plan, etc.), on utilise une phase d'association des surfaces et de reconstruction des éléments géométriques, en vue de comparer leurs caractéristiques à la cotation de manière intrinsèque (Ballu, 1993). Dans le cas de mesure de surfaces gauches ou de recherche de modes de déformations (ce qui est notre cas), on effectue une comparaison entre les points mesurés et théoriques (Baudouin, 2006) (Baudouin *et al.*, in press).

La figure 4 présente notre stratégie de dépouillement. La première étape consiste en la mesure de l'image de la géométrie du croissant avant et après traitement thermique. L'information alors exploitable à chaque point de mesure est l'écart suivant la normale au point palpé, caractérisant un surplus ou un manque de matière par rapport au point du modèle théorique. On compare ensuite les images des géométries obtenues avec la géométrie nominale de la pièce. Le but final de notre stratégie est la décomposition de la variation globale en déformations élémentaires à l'échelle macroscopique (dilatation, tonneau, diabolos, etc.). Ces déformations sont dues aux phénomènes physiques (changement de phase, contraintes résiduelles, etc.) et technologiques (nuance d'acier utilisée, gradients thermiques du four, procédé d'usinage, etc.) mis en jeu lors du processus de traitement thermique.

Cependant, l'identification des phénomènes physiques est basée sur un grand nombre d'informations (les écarts). Le calcul de l'amplitude des phénomènes repose donc sur la résolution d'un système très surdimensionné par une méthode d'optimisation. Pour réaliser le découplage des phénomènes, l'hypothèse indispensable pour les méthodes d'optimisation réside dans la linéarité des phénomènes à identifier, c'est-à-dire que les phénomènes doivent être indépendants et linéairement superposables. En métrologie, les ordres de grandeurs des défauts étant souvent faibles devant les dimensions nominales des pièces, et en particulier pour les déplacements, nous utiliserons l'hypothèse des petits déplacements. Dans le cas de phénomènes qui présentent des variations non linéaires, la non linéarité individuelle peut être contournée par une application itérative de l'optimisation avec une linéarisation locale des phénomènes. L'itération nécessite alors de déplacer le nuage des points théoriques et des normales théoriques avec un déplacement non linéarisé, pour ne pas le déformer puis de réécrire les vecteurs signatures aux nouveaux points de linéarisation.

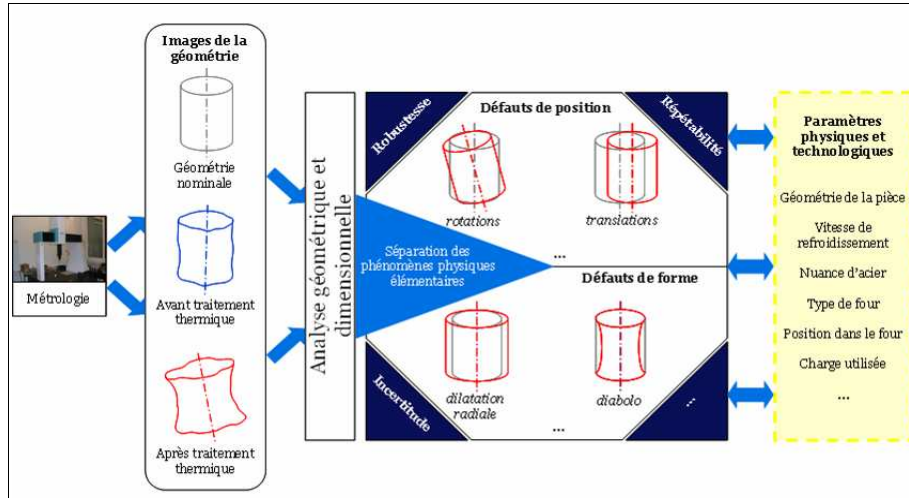


Figure 4 : Méthode d'identification des déformations

Quant au critère d'optimisation retenu, nous optons pour celui des moindres carrés, qui présente, entre autres avantages, une grande stabilité de l'identification et donne un résultat unique pour de faibles déformations. L'écart entre les valeurs mesurées et les valeurs théoriques est nommé le « résidu » et la méthode vise à minimiser sa norme euclidienne. En jugeant de l'amplitude des phénomènes identifiés par rapport à l'hypothèse acceptable de linéarité, la condition d'arrêt la plus intéressante est la stabilité des phénomènes identifiés.

3.4.2. Best fit - Balançage

Les écarts mesurés bruts sur la pièce comprennent un ensemble de phénomènes élémentaires que l'on cherche à identifier. Un certain nombre de ces phénomènes ne correspondent pas à des déformations de la pièce mais à un décalage en déplacements (suivant les 3 translations et 3 rotations) entre le nuage des points mesurés et celui des points théoriques. Il est donc nécessaire de réaliser le meilleur balançage des points (Best fit) pour supprimer l'influence de ces déplacements. Les écarts dits « repositionnés » ne comportent alors plus que l'influence des modes de déformations de la pièce. L'analyse graphique de ces écarts permet dans un premier temps de déterminer de manière qualitative les principaux modes de déformations. La réflexion sur la physique des phénomènes amène ensuite une écriture mathématique de ces phénomènes et donc la possibilité de les quantifier.

3.4.3. Repère de recalage des points

Pour réaliser le best fit, un recalage global est habituellement utilisé en métrologie car il permet d'effectuer une comparaison de la géométrie mesurée avec le dessin de définition en minimisant l'amplitude des défauts. Cela signifie qu'il y a

répartition des défauts pour minimiser la somme des écarts au carré extérieur et intérieur matière sur tous les points du croissant, d'où un équilibrage global des écarts (Figure 5).

Cependant, pour identifier visuellement les modes de déformation, il n'est pas forcément judicieux de répartir l'influence des défauts sur toute la pièce, par exemple pour des défauts localisés importants. Dans le cas du croissant, on peut effectuer un recalage en privilégiant la partie massive, qui est relativement invariante avant et après trempe d'après les simulations numériques. Cela nous permet ainsi de constater distinctement l'ouverture des « pinces » du croissant (Figure 5). Quel que soit le repère de recalage choisi, la forme de la pièce reste la même : les valeurs de déplacement dépendent de ce repère, alors que les déformations sont indépendantes du déplacement.

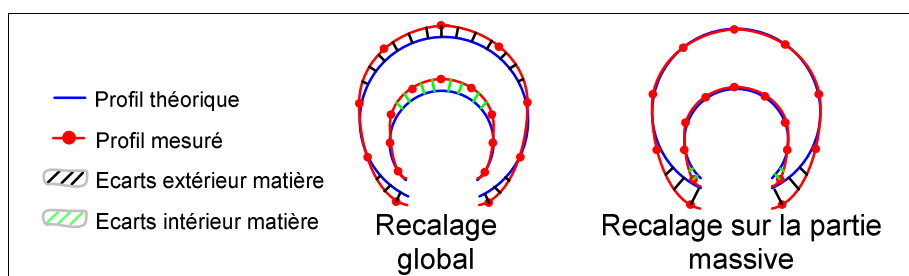


Figure 5 : Influence du recalage choisi sur l'identification des déformations

4. Approche d'identification de déformations

Une maquette informatique a été développée. Elle permet l'optimisation du résidu et la quantification et qualification des phénomènes élémentaires identifiés. La visualisation graphique facilite l'analyse qualitative, notamment grâce au facteur de dilatation d'échelle qui amplifie les écarts suivant la normale théorique (Figure 6). Ainsi, on constate une ouverture prononcée des pinces, après trempe, surtout pour la nuance 1. Partant de cette approche visuelle des déformations à l'échelle macroscopique, nous présentons une analyse plus fine afin d'observer les phénomènes locaux. La formulation mathématique se fera en analyse 2D, en nous focalisant sur trois sections palpées après trempe : médiane, haute et basse.

Dans un souci de clarté de présentation des résultats, nous analysons uniquement le cylindre extérieur, le principe étant similaire pour le cylindre intérieur.

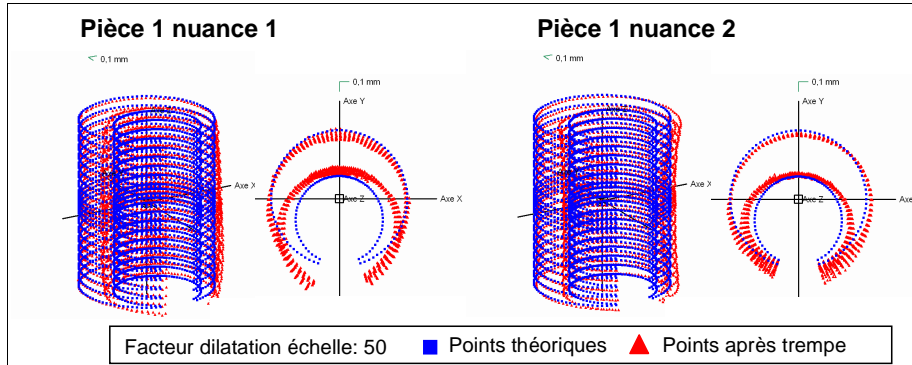


Figure 6 : Géométries après trempe des deux nuances d'acier

4.3.1. Phénomène d'ouverture des pinces du croissant

Nous avons retenu la fonction $1-\cos\alpha$ dont la signature traduit bien l'ouverture importante des pinces au niveau de la rainure et l'absence de déformations au niveau des génératrices arrière. Nous lui associons les translations T_x et T_y , les autres paramètres de repositionnement laissant la géométrie invariante. Ces phénomènes sont linéairement indépendants et satisfont donc l'hypothèse de linéarité requis par la méthode d'optimisation. La représentation graphique de ces signatures élémentaires est présentée dans la figure 7.

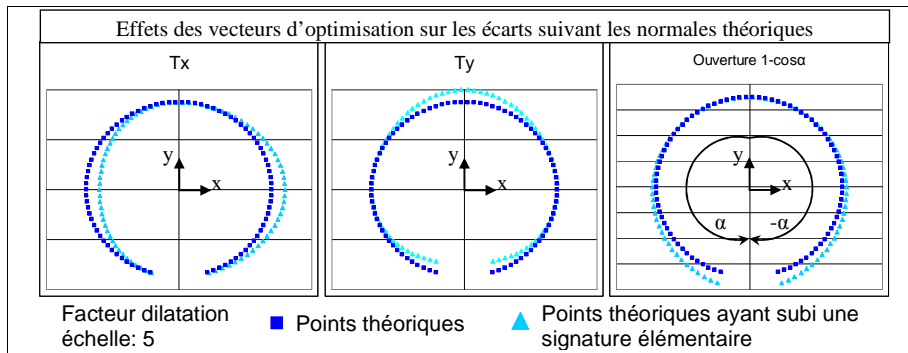


Figure 7 : Signatures élémentaires des phénomènes de repositionnement et de déformation

Dans le repère orthonormale de mesure $(0, \vec{i}, \vec{j})$, chaque point théorique T est repéré par le vecteur \overrightarrow{OT}_i et sa normale associée \overrightarrow{N}_i de norme euclidienne égale à 1 tandis que chaque point mesuré M est repéré par le vecteur \overrightarrow{OM}_i . On calcule

l'écart, en chaque point palpé, suivant la normale théorique : pour cela, on projette la distance entre le point théorique et le point mesuré sur cette normale [1].

$$[1] \quad \vec{\varepsilon} = \begin{pmatrix} \varepsilon_1 \\ \vdots \\ \varepsilon_i \\ \vdots \\ \varepsilon_n \end{pmatrix} \quad \text{avec } \varepsilon_i = (\overrightarrow{OT_i} - \overrightarrow{OM_i}) \cdot \overrightarrow{N_i}$$

Nous écrivons à présent la « matrice des phénomènes d'optimisation » notée M_{ph} , dont chaque scalaire correspond à l'effet d'amplitude élémentaire des signatures de chaque phénomène, sur les points théoriques écrits en colonne [2]. L'unité de description de ces phénomènes sera proche de l'ordre de grandeur estimée de la déformée, dans notre cas, le millimètre pour les translations et le phénomène $1-\cos\alpha$.

$$[2] \quad M_{ph} = \begin{array}{c|ccc} & Tx & Ty & Ph_{ouv} \\ \hline OT_1 & e_{Tx1} & e_{Ty1} & e_{ouv1} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ OT_j & e_{Txj} & e_{Tyj} & e_{ouvj} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ OT_n & e_{Txn} & e_{Tyn} & e_{ouvn} \end{array} \quad \begin{array}{l} e_{Txn} = \overrightarrow{T_x} \cdot \overrightarrow{N_i} = \overrightarrow{N_i} \cdot \overrightarrow{x} \quad \text{avec } \|\overrightarrow{T_x}\| = 1\text{mm} \\ e_{Tyn} = \overrightarrow{T_y} \cdot \overrightarrow{N_i} = \overrightarrow{N_i} \cdot \overrightarrow{y} \quad \text{avec } \|\overrightarrow{T_y}\| = 1\text{mm} \\ e_{ouvn} = 1 - \cos\left(\frac{\alpha}{2}\right) \\ \text{avec } \alpha = -\text{Atan2}(\overrightarrow{OT_j} \cdot \overrightarrow{y}, \overrightarrow{OT_j} \cdot \overrightarrow{x}) \end{array} \quad \text{où}$$

↑
influence de la translation élémentaire suivant x sur les écarts projetés en chacun des points

On minimise le résidu r donné par la formule [3] grâce à une optimisation au sens des moindres carrés, effectuée par un solveur ou par la méthode dit de « la base orthonormale » (Baudouin, 2006).

$$[3] \quad r = \left\| \vec{\varepsilon} - a \cdot \overrightarrow{Tx} - b \cdot \overrightarrow{Ty} - c \cdot \overrightarrow{Ph_{ouv}} \right\|$$

Nous obtenons ainsi les valeurs des quantités de mouvements a , b et de la quantité de déformation c , à appliquer aux points théoriques pour qu'ils s'approchent des points mesurés au sens des moindres carrés. Les mouvements et la déformation s'expriment des points théoriques vers les points mesurés car nous avons caractérisé les signatures de ces phénomènes élémentaires sur les points théoriques.

Pour les trois sections de la pièce 1 de nuance 1, l'optimisation en repositionnement et en déformation permet de bien se rapprocher de la forme théorique. La quantité de déformation c est de l'ordre de 0.07mm pour les sections haute et médiane mais est plus importante (0.111 mm) pour la section basse. Par ailleurs, cette optimisation révèle graphiquement un phénomène local que nous

qualifierons d'« effet de bec » (Figure 8). Il est présent du côté gauche pour les sections haute et médiane et des deux côtés, de façon quasi-symétrique, pour la section basse. Cet effet pourrait s'expliquer par une plastification locale en regard de la faible épaisseur de matière présente en cet endroit (les pinces du croissant). Cela est à confirmer par l'optimisation des sections avec les profils intérieur et extérieur. Cet effet de bec n'a pas été nettement constaté pour la pièce 1 de la nuance 2. L'optimisation en repositionnement et en déformation ($1-\cos\alpha$) rapproche suffisamment le profil mesuré du profil théorique, ce que traduit une valeur de résidu assez faible.

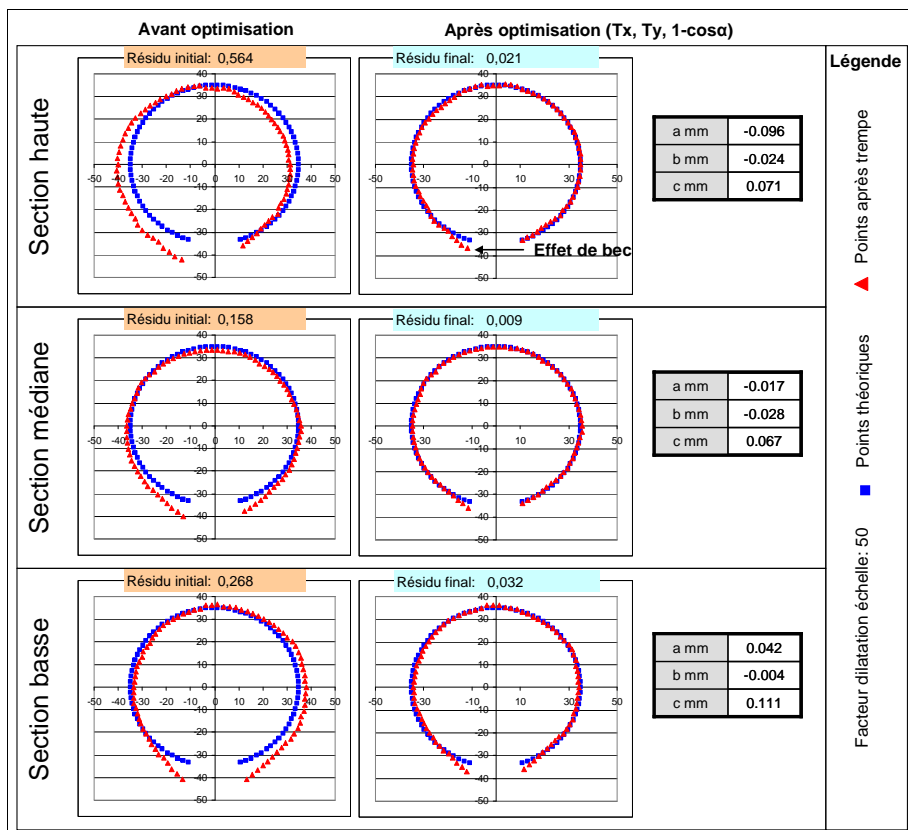


Figure 8 : Optimisation en déplacements et déformation des trois sections de la pièce 1, nuance 1

4.3.1. Phénomène d'effet de « bec »

Nous écrivons sa signature élémentaire [4] : elle suit une loi proportionnelle quand on est proche de la rainure, nulle sinon (Figure 9).

$$[4] \quad e_{\text{bec droit}} = \frac{\alpha_i - \alpha_7}{-\pi - \alpha_7} \text{ avec } i \in [1,6] \quad \text{et} \quad e_{\text{bec gauche}} = \frac{\alpha_j - \alpha_{76}}{\pi - \alpha_{76}} \text{ avec } j \in [77,82]$$

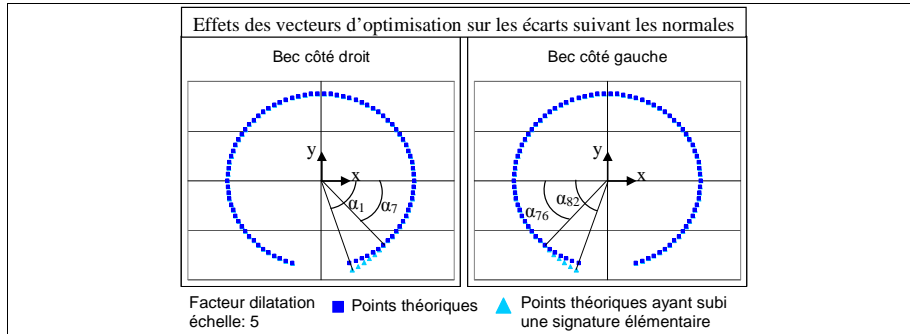


Figure 9 : Signatures élémentaires du phénomène de bec

On minimise alors la fonction résidu donnée par la relation [5]. Cette dernière optimisation est efficace car le résidu est très faible (Figure 10). Les quantités d et e des effets de bec élémentaires gauche et droit sont importantes.

$$[5] \quad r = \left\| \vec{\varepsilon} - a.\vec{T}x - b.\vec{T}y - c.\vec{Ph}_{ouv} - d.\vec{Ph}_{becdroit} - e.\vec{Ph}_{becgauche} \right\|$$

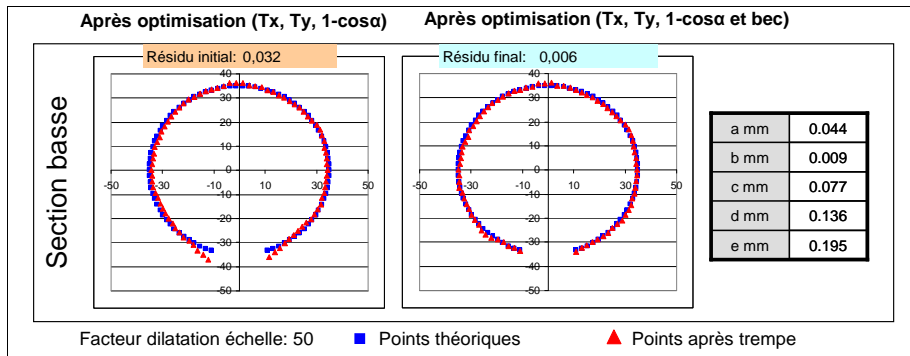


Figure 10 : Optimisation de l'effet bec de la section basse de la pièce 1, nuance 1

5. Conclusion

Ces travaux constituent une première étape visant à valider le choix des stratégies de mesure et de traitements des points. Nous avons proposé une approche de

modélisation mathématique pour le phénomène d'ouverture des génératrices des cylindres et pour l'effet de bec. Nous présenterons ultérieurement l'analyse section par section de ces phénomènes. Par la suite, cette identification 2D de la déformée des sections circulaires est à associer avec celle des génératrices, afin d'obtenir une identification 3D. On expliquera également plus en profondeur la signification physique de ces phénomènes.

Enfin, on s'attachera à corrélérer la discrétisation de la pièce (issue de la mesure métrologique) avec le maillage éléments finis pour les comparaisons simulations – mesures dimensionnelles. Ainsi, nous définirons les méthodes pour comparer le champ de déformation de la simulation numérique et le champ de déformation de la mesure.

6. Références bibliographiques

- Adragna P.-A., Samper S., Formosa F., Pillet M., "Modal Tolerancing — Application to Gap and Flush Analyses", *In the Proceedings of: 6th International Conference on Integrated Design and Manufacturing in Mechanical Engineering (IDMME 2006)*, 2006.
- Andersch C., Ehlers M., Hoffmann F. and Zoch H.W., "Systematic analysis of the relation between part geometry and distortion due to heat treatment", *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik*, vol. 37, p. 23-28, 2006.
- Badar M.A., Raman S. and Pulat P.S., "Intelligent Search-Based Selection of Sample Points for Straightness and Flatness Estimation", *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, vol.125, p. 263-271, 2003.
- Ballu A., « Identification de modèles géométriques composés pour la spécification et la mesure par coordonnées des caractéristiques fonctionnelles des pièces mécaniques », Thèse de doctorat, Université de Nancy I, 1993.
- Bauckhage K., Mayr P., Cui C.S., Fritsching U. and Schulz A., "Spray Forming of Steel Preforms Insensitive to Distortion", *Distortion Engineering*, <http://www.sfb570.uni-bremen.de/english,2003>.
- Baudouin C., « Contribution à la qualification d'un processus de fabrication par une approche dimensionnelle : application au pignon conique forgé dit « net shape » », Thèse de doctorat, ENSAM, 2006.
- Baudouin C., Bigot R., Leleu S. and Martin P., "Gear geometric control software: Approach by entities", *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, in press.
- Bourdet P., « Contribution à la mesure tridimensionnelle », Thèse de doctorat, Université de Nancy I, 1987.
- Cho J.R., Kang W.J., Kim M.G., Lee J.H., Lee Y.S., and Bae W.B., "Distortions induced by heat treatment of automotive bevel gears", *Journal of Materials Processing Technology*, vol.153-153, p. 476-481, 2004.

- Frerichs F., Landek D., Lübben Th., Hoffmann F. and Zoch H.-W., "Prediction of Distortion of Cylinders without Phase Transformations", *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik*, vol. 37, p. 63-68, 2006.
- Hippenstiel F., "Metallurgical and production-related measures to reduce distortion in heat-treated components for gear manufacture", *In the Proceedings of: First International Conference on Distortion Engineering*, 2005.
- Killmaier T. and Babu A.R., "Genetic approach for automatic detection of form deviations of geometrical features for effective measurement strategy", *Precision Engineering*, vol.27, p. 370-381, 2003.
- Klein D., Thoben K.D. and Nowag L., "Using Indicators to Describe Distortion Along a Process Chain", *In the Proceedings of: First International Conference on Distortion Engineering*, <http://www.distortion-engineering.de/>, Bremen, 2005.
- Lamesle P., Vareilles E. and Aldanondo M., "Towards a Knowledge Based System (KBS) for a qualitative distortion prediction for heat treatments", *In the Proceedings of: First International Conference on Distortion Engineering*, 2005.
- Lee G., Mou J. and Shen Y., "Sampling strategy design for dimensional measurement of geometric features using coordinate measuring machine", *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol.37, p. 917-934, 1997.
- Mukai R. and Ju D.-Y., "Simulation of carburizing-quenching of a gear. Effect of carbon content on residual stresses and distortion", *Journal de Physique IV*, vol. 120, p. 489-497, 2004.
- Nassef A.O. and ElMaraghy H.A., "Determination of Best Objective Function for Evaluating Geometric Deviations", *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 15, p. 90-95, 1999.
- NORME NF EN 10052, *Vocabulaire du traitement thermique des produits ferreux*, AFNOR (Association Française de Normalisation), 1994.
- Novaski O. and Barczak A.L.C., "Utilization of Voronoi diagrams for circularity algorithms", *Precision Engineering*, vol. 20, p. 188-195, 1997.
- Samper S., Formosa F., "Form Defects Tolerancing by Natural Modes Analysis", *Journal of Computing and Information Science in Engineering*, vol. 7, p. 44-51, 2007.
- Şimşir C. and Gür C.H., "FE Simulation of steel quenching to investigate residual stresses and distortion", *In the Proceedings of: First International Conference on Distortion Engineering*, 2005.
- Teodorescu M., Demurger J. and Wendenbaum J., "Deformation forecasting during the cooling of a test part", *In the Proceedings of the 23rd ASM Heat Treating Society Conference*, p. 203-210, 2005.
- Weckenmann A. and Knauer M., "The influence of measurement strategy on the uncertainty of CMM-measurements", *Annals of the CIRP*, vol. 47, p. 451-454, 1998.
- Yau H.T., "Uncertainty analysis in geometric best fit", *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 38, p. 1323-1342, 1998.