

ANALYSE DES ECARTS ET CHOIX DES PHENOMENES

Après avoir présenté l'étape 1 de la méthode, c'est-à-dire l'obtention des images géométriques, l'étape 2 est à présent mise en œuvre sur le croissant. Cette partie s'articule autour des points suivants :

- la présentation de la maquette informatique développée pour rassembler les trois étapes de la méthode ;
- l'identification des phénomènes de déformations à trois états du croissant : après usinage, après détensionnement et après trempe ;
- le choix des phénomènes significatifs et leur modélisation en prenant en compte leur réalité physique et leur pertinence.

4.1. Maquette informatique développée

4.1.1. Présentation

Elle regroupe les trois étapes de la méthode de qualification progressive des phénomènes de déformations (Figure III - 28), à savoir :

Etape 1 : la sélection de deux images géométriques obtenues par mesure d'un croissant réel ou virtuel, à des instants quelconques du processus de fabrication ;

Etape 2 : l'analyse des écarts entre les géométries permet l'identification de phénomènes de déformations physiques. S'ils sont nouveaux, l'utilisateur définit des signatures qui soient pertinentes (indépendantes et significatives) grâce à la propagation de l'incertitude de mesure considérée (réelle ou virtuelle). Ensuite, ces nouvelles signatures sont ajoutées dans la base d'analyse M_{ph} intégrée à la maquette informatique. Lors d'analyses ultérieures, l'utilisateur activera alors celles qui sont associées aux écarts entre deux images géométriques ;

Etape 3 : une fois leurs signatures activées, les phénomènes associés aux écarts des deux images géométriques sont dissociés par la méthode d'optimisation, ce qui permet la quantification de leur amplitude. Une vérification du respect de l'hypothèse de linéarité est effectuée en comparant les amplitudes par rapport à l'hypothèse des petits déplacements. Le cas échéant, l'optimisation est réitérée en effectuant une linéarisation locale du phénomène non-linéaire jusqu'à ce que son amplitude soit stable. Cela ne s'est jamais produit pour les phénomènes du croissant. Pour finir, l'analyse des écarts résiduels, c'est-à-dire des écarts initiaux ôtés de l'influence de chaque phénomène activé, permet de vérifier qu'il ne subsiste pas de phénomènes significatifs non identifiés jusqu'alors.

Si cette maquette informatique est actuellement appliquée à l'analyse du croissant, elle est néanmoins applicable à tout type de géométrie. En effet, seul les phénomènes de déformations sont spécifiques à la géométrie étudiée et l'étape 2 de la méthode doit être répétée pour toute nouvelle géométrie. Les phénomènes de petits déplacements d'un corps rigide (best-fit) sont, quant à eux, commun à toutes les géométries.

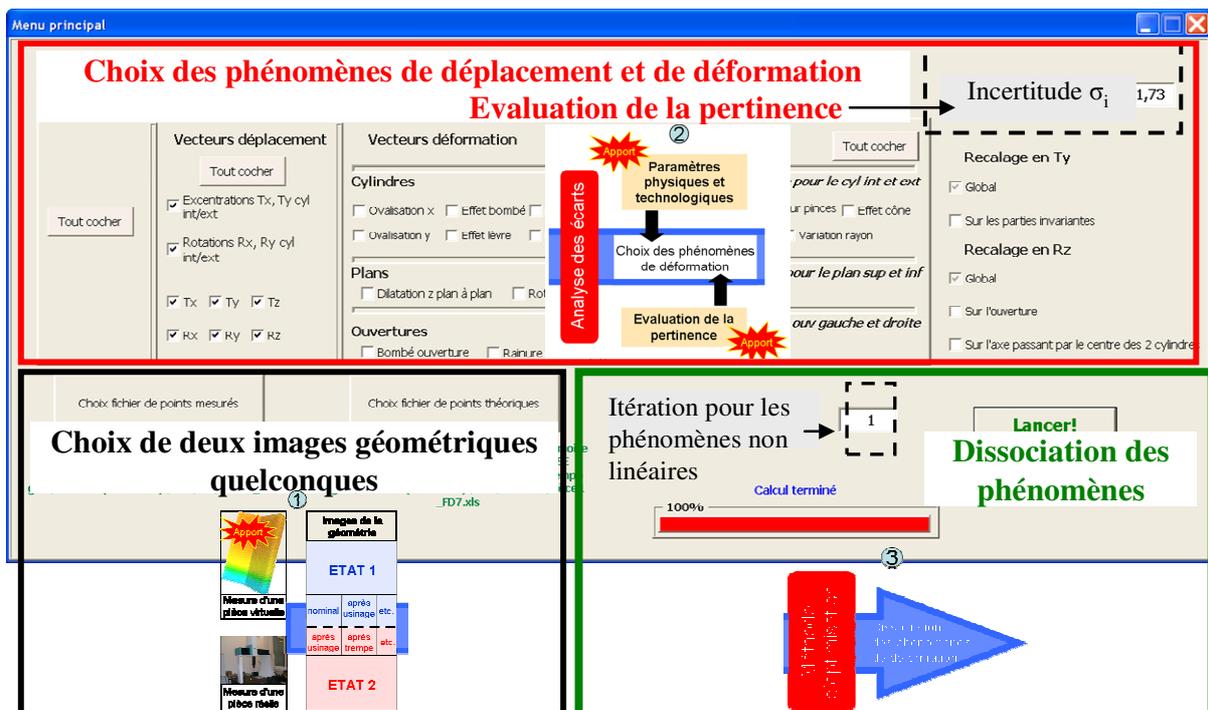


Figure III - 28 : Maquette informatique regroupant les trois étapes de la méthode appliquée au croissant

4.1.2. Interface graphique

Cette interface (Figure III - 29) est utilisable pour tout type de géométrie et a pour objectif de faciliter l'analyse des écarts entre les deux images géométriques, avant et après optimisation. La visualisation se fait en trois dimensions, avec la possibilité d'effectuer des translations et rotations des points du croissant et de zoomer sur les endroits considérés comme stratégiques. L'amplification des écarts suivant les normales théoriques est possible via un facteur d'échelle. La reconnaissance des phénomènes de déformations est ainsi facilitée.

L'interface a été cependant adaptée au croissant pour isoler chaque élément élémentaire (plans, cylindres et droite) et chaque section des cylindres, afin de mieux identifier les déformations locales. Ainsi, dans la Figure III - 29, seuls sont présents les points des cylindres extérieur et intérieur d'un croissant, mesurés après trempe huile. L'analyse des écarts entre l'image de la géométrie après trempe (avant optimisation) et la géométrie théorique révèle les phénomènes suivants :

- une excentration du cylindre intérieur par rapport au cylindre extérieur ;
- la non-rectitude des génératrices, due à leur mise en bombé, visible sur une vue isométrique ;
- la dilatation du diamètre des cylindres.

Une première estimation quantitative de ces phénomènes est donnée par le biais d'une échelle de grandeur, dont les dimensions sont proportionnelles au facteur d'échelle choisi. Ces phénomènes étant significatifs, il conviendra de réfléchir à leur origine physique et d'intégrer leurs signatures à la base d'analyse pour une quantification plus précise. Si l'excentration est due à un défaut d'alignement des axes lors du perçage du cylindre intérieur, l'effet bombé et la dilatation des diamètres des cylindres proviennent probablement de la trempe.

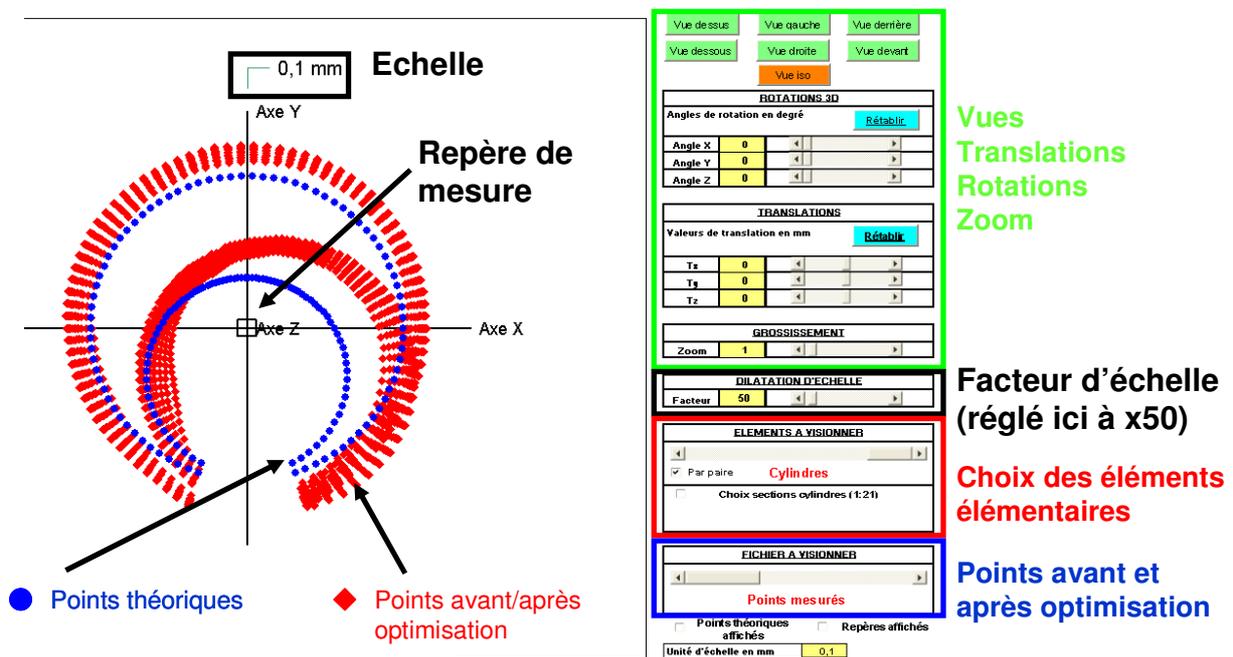


Figure III - 29 : Interface graphique de la maquette informatique présentant les cylindres du croissant vus du dessus

4.2. Identification des phénomènes à trois stades de la fabrication du croissant

Six croissants de la campagne de mesure expérimentale n°1 servent ici d'exemple pour illustrer la reconnaissance des phénomènes de déformations, menée sur tous les croissants des deux campagnes.

Dans cette partie, les trois stades du processus de fabrication des croissants sont pris en compte, à savoir l'usinage, le recuit de détensionnement et la trempe huile. Afin d'obtenir différents phénomènes de déformations, deux nuances sont présentes dans l'analyse :

- la nuance 1 pour trois croissants ;
- la nuance 2 pour les trois autres.

Une image géométrique du croissant à l'état 1 est repositionnée en déplacement (best-fit) par rapport à l'autre image à l'état 2, considérée comme référence. Cela permet d'isoler les déformations causées par chacune des trois étapes du processus de fabrication :

- pour visualiser les défauts dus à l'usinage, l'état 1 est l'image géométrique après usinage et l'état 2 est la géométrie nominale ;
- pour les déformations dues au détensionnement, l'état 1 est l'image géométrique après détensionnement et l'état 2 est l'image géométrique après usinage ;
- pour les déformations dues à la trempe, l'état 1 est l'image géométrique après trempe et l'état 2 est l'image géométrique après détensionnement.

Les écarts entre les images géométriques sont amplifiés par un facteur d'échelle égal à 50. Les trois images des croissants de chaque nuance sont superposées, afin de juger de la répétabilité du processus de fabrication. Les phénomènes de déformations sont observés individuellement pour chacun des éléments simples des croissants. Les plans sont vus de gauche, les génératrices de la rainure de devant et les cylindres de dessus.

4.2.1. Défauts après usinage

Les résultats sont présentés dans la Figure III - 30. Tout d'abord, quelques points aberrants sont présents sur les éléments élémentaires, ceux-ci provenant d'un état de surface localement dégradé. Leur nombre et leur effet étant de faible importance en regard du grand nombre de points en présence, ceux-ci n'influent pas sur les résultats du best-fit et sont donc gardés pour les analyses ultérieures.

Ensuite, la superposition des géométries de tous les croissants permet d'affirmer la bonne stabilité dimensionnelle des sections des cylindres, des plans et des deux génératrices de la rainure. La répétabilité du procédé d'usinage des croissants est donc bonne.

Enfin, les défauts des éléments élémentaires des croissants sont les suivants :

- un défaut de parallélisme des plans suivant l'axe x et une différence de hauteur par rapport au croissant nominal. Ces deux défauts ne sont présents que pour les croissants de la nuance 1 ;
- une excentration suivant l'axe x positif du cylindre intérieur par rapport au cylindre extérieur, ce qui a pour effet une diminution de l'épaisseur des pinces par rapport à celle nominale et ;
- ...le décalage des points des génératrices de la rainure, également vers la droite (x positif).

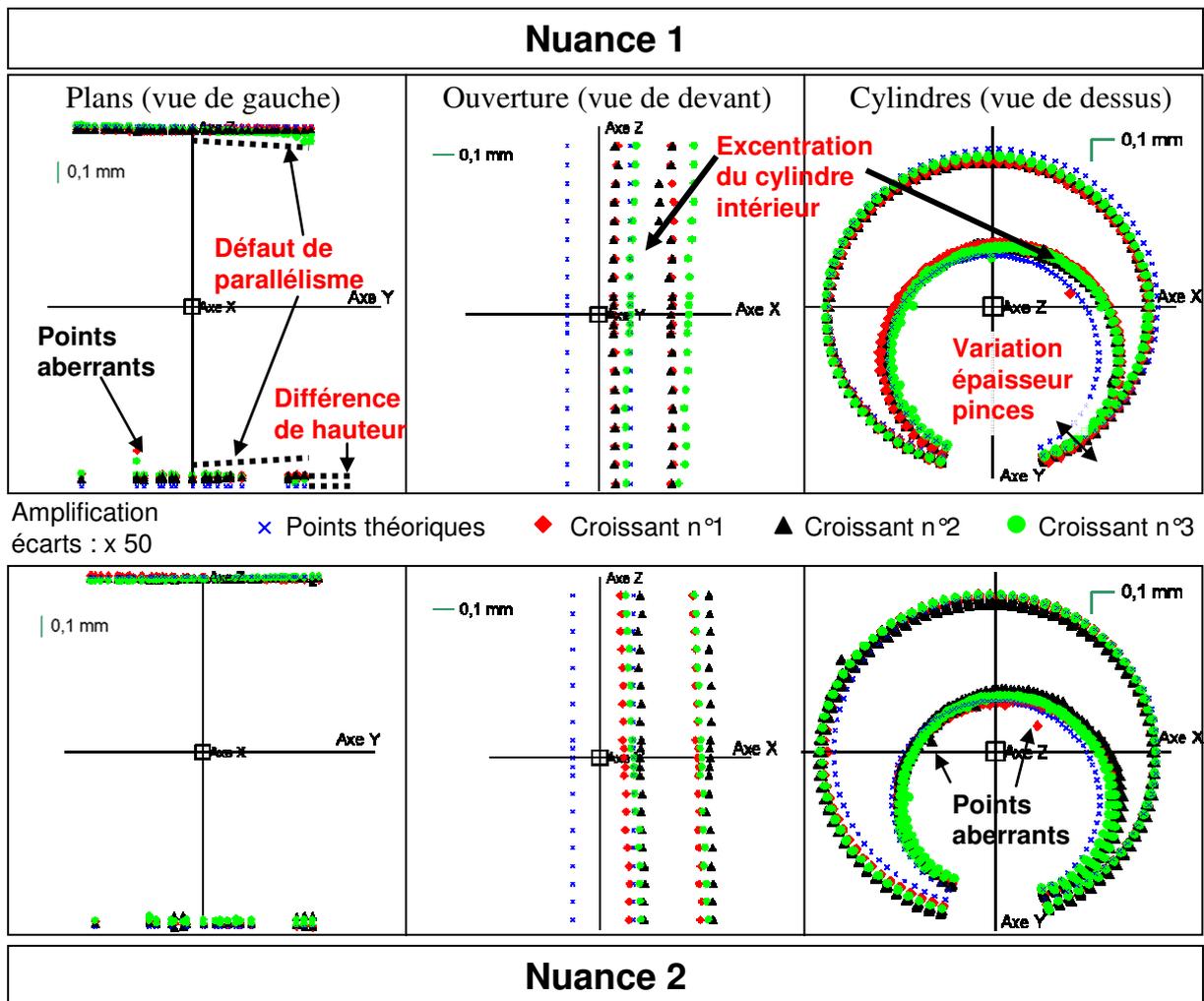


Figure III - 30 : Ecart entre les images des géométries usinées et nominales, après best-fit, pour 6 croissants de la campagne n°1

Par ailleurs, la superposition des cylindres des trois croissants de chaque nuance est bonne dans le sens où il n'y a pas de dispersions entre les points des 21 sections. Cela signifie que les génératrices verticales des cylindres et celles de la rainure sont rectilignes et donc, non déformées.

Au final, malgré les défauts, la géométrie usinée est proche de la nominale, et en tout état de cause, les tolérances dimensionnelles (+/-0.1 mm) spécifiées pour l'usinage sont respectées.

4.2.2. Déformations après recuit de détensionnement

Rappelons que les images géométriques des croissants usinés servent de référence afin de ne visualiser que les déformations dues au recuit de détensionnement.

La littérature indiquait que le recuit détensionnement [BOI98] [BAUC03] [DES04] générait peu de déformations sur les éléments circulaires. Les écarts entre les géométries après détensionnement et après usinage sont effectivement nuls (Figure III - 31), ce qui signifie qu'il n'y a eu aucune modification géométrique entre ces deux états. Le recuit actuellement utilisé (200°C pendant 2h) ne modifie donc en rien la géométrie après usinage des deux nuances en présence.

Un recuit de détensionnement plus sévère a été étudié sur d'autres croissants de cette même campagne de mesure. Le recuit était effectué à 400°C pendant 4h. Là encore, il n'y a pas eu de modification dimensionnelle par rapport à l'état usiné, y compris sur les nuances 3 et 4.

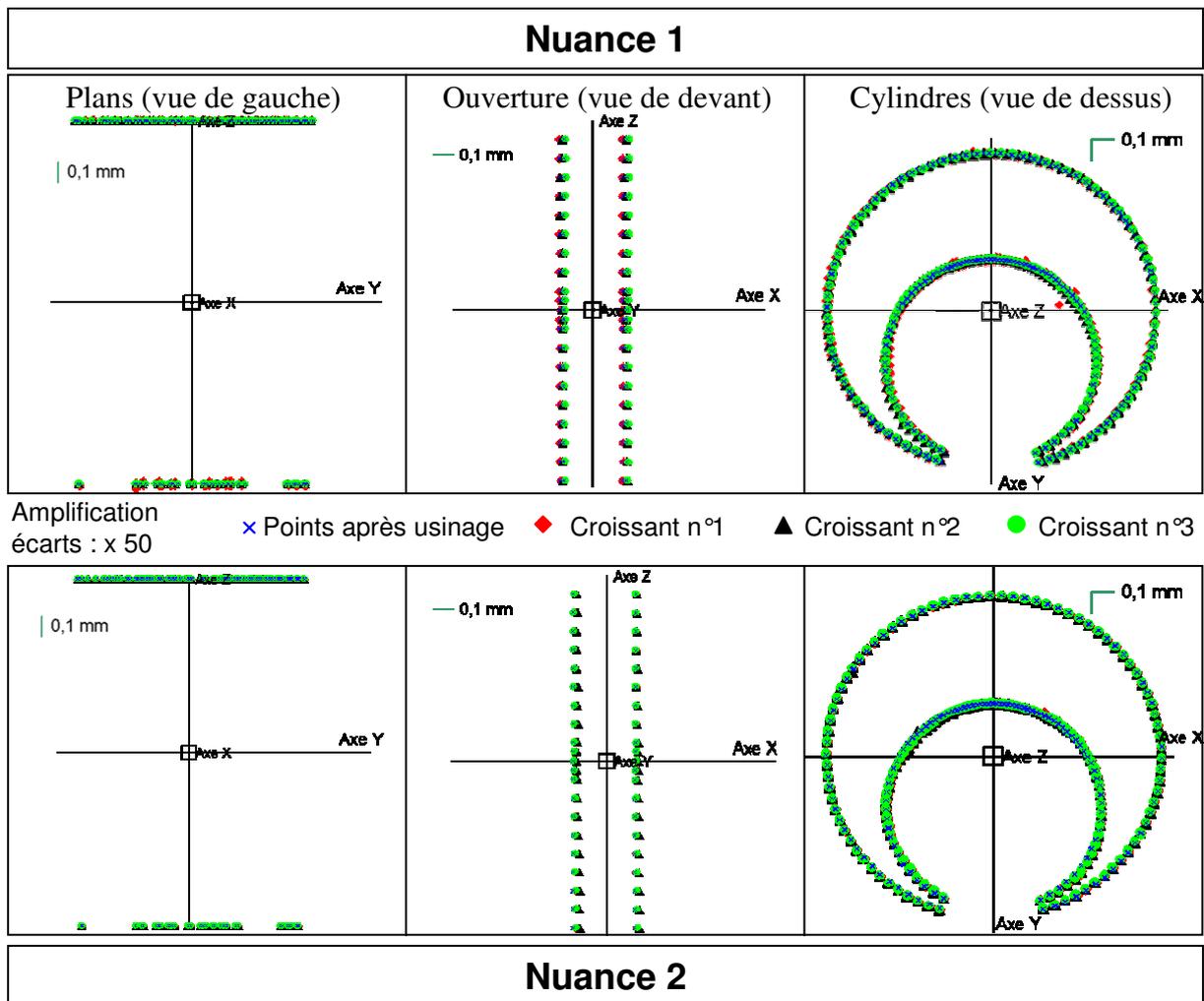


Figure III - 31 : Ecart entre les images des géométries détensionnées et usinées, après best-fit, pour 6 croissants de la campagne n°1

4.2.3. Déformations après trempe huile

Au vu des précédents résultats, la géométrie détensionnée de chaque croissant sert de géométrie de référence pour visualiser les déformations en trempe huile (Figure III - 32).

Les phénomènes de déformations des éléments élémentaires sont communs aux deux nuances mais leurs effets, suivant les normales, sont inversés. C'est le cas des phénomènes suivants :

- « fermeture des plans » pour la nuance 1, « ouverture » pour la nuance 2 ;
- un phénomène dont l'effet ressemble au défaut de parallélisme des plans rencontré en usinage, mais qui est ici du à la trempe. Le terme d' « inclinaison symétrique » a donc été retenu pour qu'il n'y ait pas d'ambiguïté ;
- diminution de la hauteur du croissant (distance plan à plan) pour la nuance 1, augmentation pour l'autre nuance ;
- mise en diabolo des deux génératrices de la rainure pour la nuance 1 et mise en bombé pour la nuance 2 ;
- ouverture des pinces et ainsi augmentation de la valeur d'écartement des pinces pour les deux nuances ;
- mise en bombé des génératrices du cylindre extérieur, mise en diabolo de celles du cylindre intérieur pour la nuance 1 et inversement pour la nuance 2 ;
- effet lèvres des génératrices en bout des pinces appartenant au cylindre extérieur et effet lèvres inverse pour celles à l'intérieur. Cet effet est rencontré pour les

deux nuances.

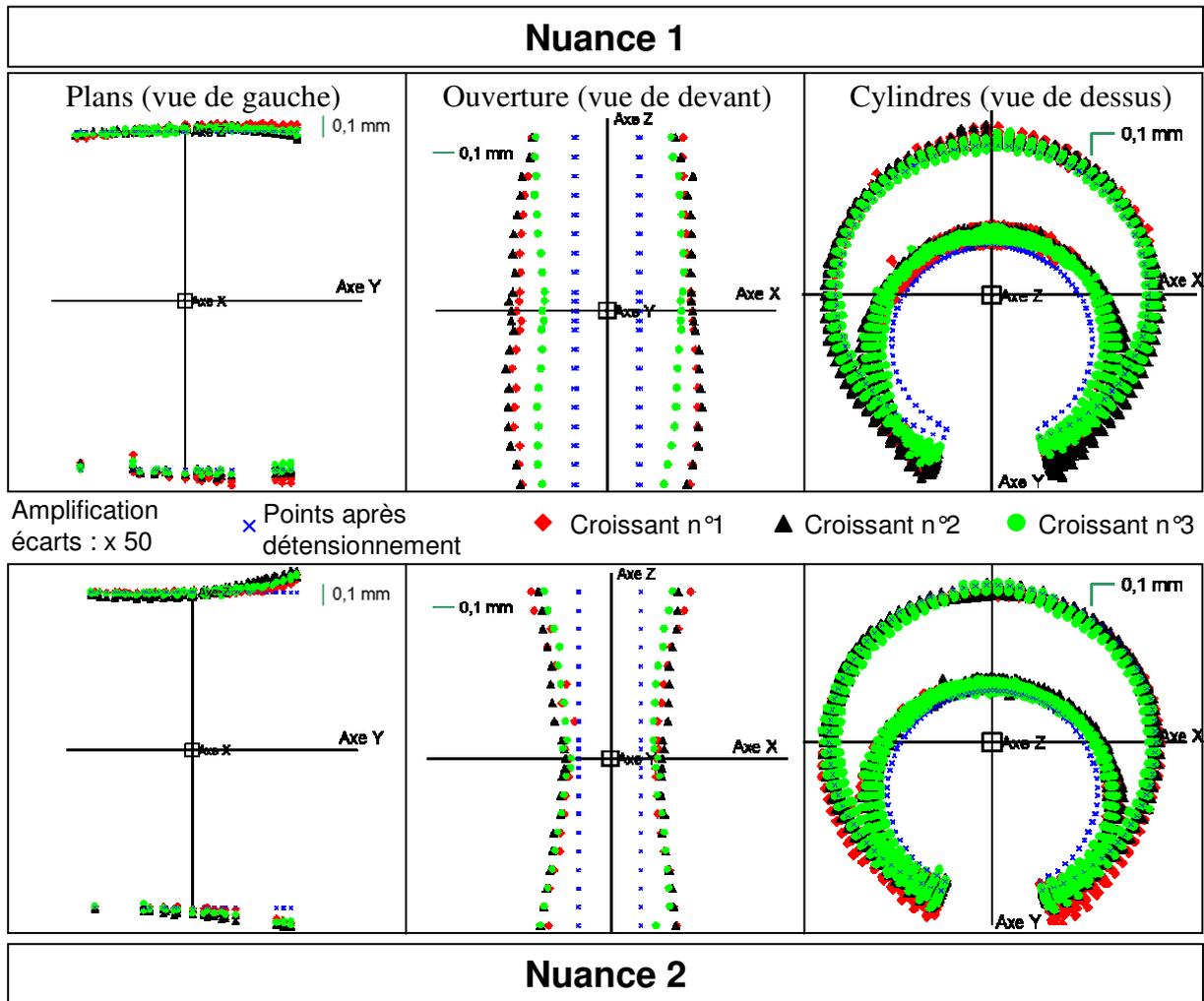


Figure III - 32 : Ecarts entre les images des géométries trempées huile et détensionnées, après best-fit, pour 6 croissants de la campagne n°1

Ces phénomènes de déformations significatifs et communs aux deux nuances sont schématisés dans la Figure III - 33.

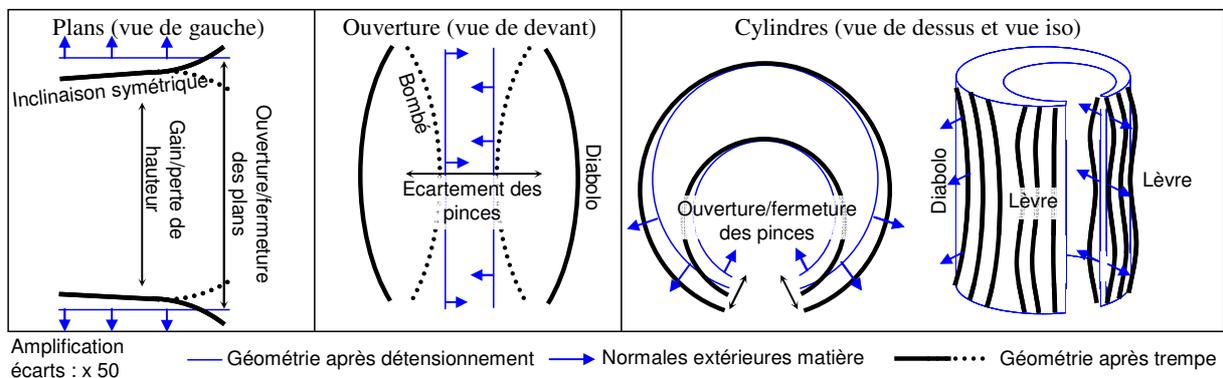


Figure III - 33 : Phénomènes de déformations en trempé huile, nuances 1 et 2

La Figure III - 34 permet de présenter, à travers une vue isométrique des éléments d'un croissant de la nuance 2, les trois phénomènes de déformations non visibles sur les vues planes de la Figure III - 32. Ces phénomènes sont l'ouverture des plans, l'effet diabolo et

l'effet lèvres des génératrices des cylindres.

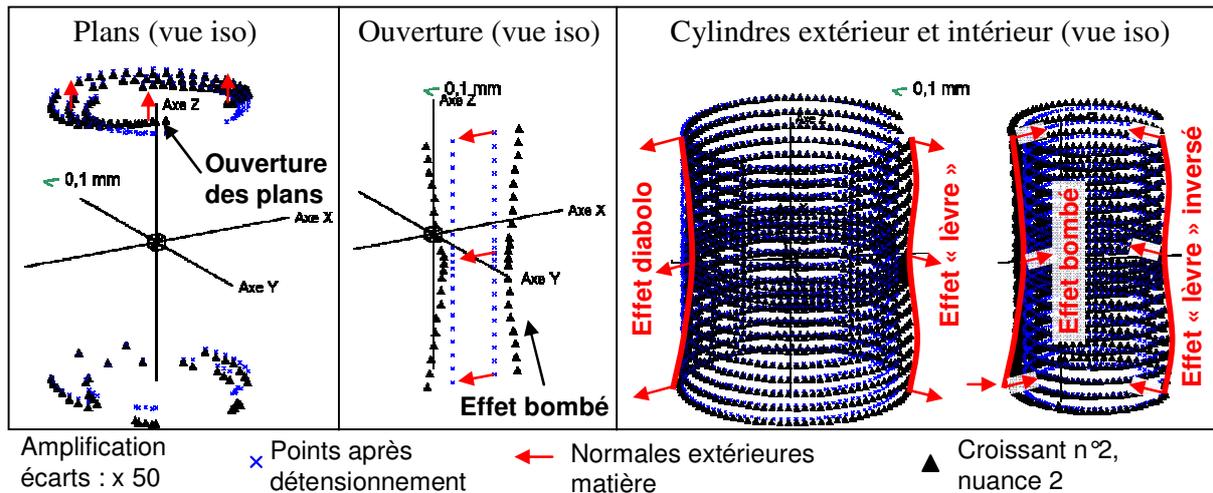


Figure III - 34 : Ecarts entre les images de la géométrie trempée huile et détensionnée, après best-fit, pour un croissant nuance 2 de la campagne n°1

4.2.4. Conclusions

La stabilité dimensionnelle des géométries après usinage, détensionnement et trempé est tout à fait satisfaisante pour chacune des deux nuances, ce qui souligne la bonne répétabilité du processus de fabrication des croissants.

La comparaison des géométries élémentaires des croissants après usinage avec la géométrie nominale montre que celles-ci ne sont pas affectées par des défauts de forme. En revanche, elles comportent trois défauts géométriques d'orientation et de position, appartenant cependant aux zones de tolérance spécifiées. Le défaut de parallélisme des plans est vraisemblablement dû à un défaut de positionnement de la billette lors de son tronçonnage. L'excentration du cylindre intérieur vient probablement d'une opération de reprise d'usinage, afin de percer le cylindre intérieur, avec bridage sur le cylindre extérieur.

Le recuit de détensionnement actuel ne provoque aucun changement géométrique des croissants usinés.

Compte tenu des deux remarques précédentes, la comparaison des images géométriques après trempé sera effectuée avec celles obtenues après détensionnement. Cette comparaison relative des géométries permet de ne prendre en compte que les phénomènes de déformations survenant en trempé

4.3. Origine physique des phénomènes de déformations en trempé et choix de leurs signatures

Les phénomènes observés dans le paragraphe précédent sont présents de façon significative sur tous les croissants des deux campagnes de mesure et ceux issus de la simulation numérique.

Le choix des vecteurs « signatures » des phénomènes se fait en adéquation avec leur origine physique et leur efficacité à minimiser le résidu. Les descriptions mathématiques présentes dans la base d'analyse respectent les points suivants :

- elles sont tridimensionnelles, symétriques et exprimées dans le repère de mesure du croissant ;
- elles sont d'évolution linéaire et indépendantes deux à deux ;
- leurs effets sur les écarts projetés sur les normales théoriques est d'amplitude unitaire. L'unité de description est le millimètre ;
- l'effet des signatures est illustré dans le sens des normales théoriques. La

signature est cependant valable pour les deux sens. Par exemple, la signature de la mise en bombé des génératrices permet aussi la qualification de la mise en diabolo. Cela se traduit par une amplitude affectée d'un signe positif dans le cas du bombé et d'un signe négatif en cas de diabolo ;

- les signatures des phénomènes de déformations n'étant pas forcément isodéplacement, il faudra donc toujours inclure dans l'optimisation les signatures des phénomènes de déplacements.

Les illustrations des phénomènes correspondent à leur effet unitaire sur les écarts projetés sur les normales théoriques. Ces écarts sont amplifiés par un facteur égal à 5 pour les translations et 500 pour les rotations. Leur description mathématique précise les composantes vectorielles $e_{(Ph)_i}$ indiquées dans la matrice M_{ph} de la base d'analyse.

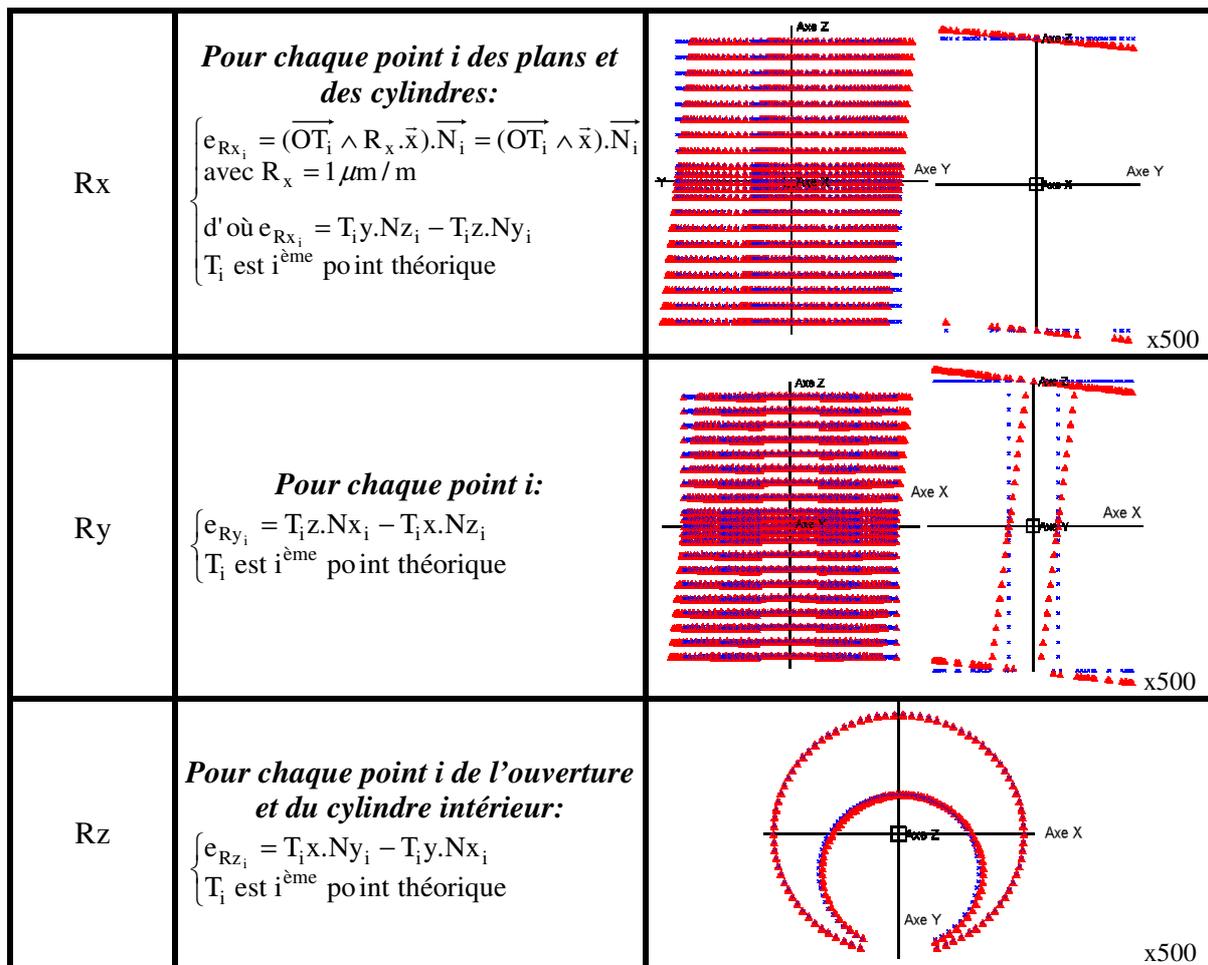
4.3.1. Phénomènes de déplacements du croissant en tant que corps rigide

Ces six phénomènes (Figure III - 35) permettent de réaliser un best fit pour minimiser les défauts de positionnement dus aux erreurs d'alignement entre le repère de l'espace de travail de la MMT et le repère du croissant.

On souligne que le cylindre extérieur et les plans ne sont pas sensibles à la rotation autour de z.

Les translations sont intrinsèquement linéaires tandis que les rotations sont linéarisées en utilisant l'hypothèse des petits déplacements.

Phénomène	Expression mathématique	Effets sur les écarts projetés sur les normales théoriques
Tx	<p><i>Pour chaque point i des cylindres et de l'ouverture:</i></p> $e_{Tx_i} = \vec{T}_x \cdot \vec{N}_i \cdot \vec{x} = Nx_i$ <p>avec $\ \vec{T}_x\ = 1$</p>	
Ty	<p><i>Pour chaque point i des cylindres:</i></p> $e_{Ty_i} = \vec{T}_y \cdot \vec{N}_i \cdot \vec{y} = Ny_i$ <p>avec $\ \vec{T}_y\ = 1$</p>	
Tz	<p><i>Pour chaque point i des plans:</i></p> $e_{Tz_i} = \vec{T}_z \cdot \vec{N}_i \cdot \vec{z} = Nz_i$ <p>avec $\ \vec{T}_z\ = 1$</p>	



× Points théoriques ▲ Points d'une signature élémentaire d'un phénomène

Figure III - 35 : Signatures élémentaires de déplacements du croissant, en tant que corps rigide

4.3.2. Phénomènes de déformations du croissant en tant que corps déformable

Les signatures des phénomènes de déformations en trempe huile sont données pour chaque élément simple du croissant. Certaines des signatures des différents éléments sont liées, comme l'ouverture des pinces sur les cylindres et leur écartement obtenu par la distance entre les deux génératrices de la rainure.

Les signatures de variation de hauteur, de variation des diamètres des cylindres et de l'écartement des pinces sont toutes liées par le phénomène de variation volumique du croissant. Celui-ci est typique du traitement thermique et intervient lors de la chauffe et du refroidissement d'un acier. La chauffe a pour effet une augmentation des distances inter atomiques de la matière, le refroidissement a pour effet une diminution. La variation des dimensions est globalement invariante, si la dilatation en chauffe et la contraction en refroidissement sont homogènes. Pour cela, les conditions suivantes doivent être vérifiées [MUR00] :

- la chauffe et le refroidissement ne doivent s'accompagner d'aucune transformation de phase. Les transformations austénitique et martensitique, créent respectivement une contraction et une augmentation volumique [MUR00], se produisant à des instants différents au sein d'une pièce non-symétrique. Cet asynchronisme engendre au final une variation hétérogène des dimensions ;
- l'évolution de la température au sein de la pièce doit être synchrone pour ne pas créer de gradient de température. Une géométrie symétrique est favorable

au synchronisme des températures, une géométrie gauche ne l'est pas.

Dans le cas du croissant, la variation des dimensions sera hétérogène car la chauffe est austénitique et les trempes se font avec des transformations de phases. De plus, la géométrie gauche du croissant entraîne l'asynchronisme de l'évolution des températures. Afin de dissocier les effets, la variation hétérogène des dimensions sera divisée en une partie homogène et hétérogène :

- la partie homogène sera identifiée grâce aux signatures de variation de la hauteur, de diamètres des cylindres et de l'écartement des pinces ;
- la partie hétérogène sera prise en compte par les autres phénomènes de déformations, comme l'ouverture des plans, l'ouverture des pinces, la mise en bombé des génératrices, etc.

L'origine de chacun des phénomènes de déformations est liée à l'existence du gradient d'épaisseur du croissant provoquant un asynchronisme complexe de l'évolution des températures, des transformations de phases et des contraintes au sein du croissant (Figure III - 3). Cette combinaison complexe des effets thermiques, métallurgiques et mécaniques sera étudiée au chapitre VI grâce à la simulation numérique du croissant.

Les plans

Trois phénomènes de déformations sont considérés : la variation de hauteur du croissant, l'inclinaison symétrique des plans et l'ouverture des plans (Figure III - 36).

La variation de hauteur traduit l'évolution homogène des distances entre les points des plans supérieur et inférieur. Cette distance correspond à la longueur totale des génératrices verticales du croissant, dont les plans en sont les extrémités. Lors de la chauffe, il y a une augmentation de la longueur des génératrices, ce qui a pour effet la dilatation axiale des plans. En refroidissement, il y a contraction axiale des plans. La signature utilisée identifie la dilatation par un signe positif de l'amplitude et la contraction par un signe négatif.

L'ouverture des plans et leur inclinaison symétrique correspondent à une variation hétérogène de la longueur des génératrices. C'est ce que témoigne le phénomène localisé d'ouverture des plans : les génératrices appartenant aux pinces se dilatent, tandis que les génératrices de la partie massive, situées à l'opposée des pinces, sont invariantes. Ce phénomène est lié physiquement aux composantes radiale et longitudinale du gradient d'épaisseur du croissant. Ceux-ci impactent les déformations générées par les transformations de phase en chauffe et en trempes :

- elles ont plus d'effets sur les pinces du croissant car le volume est faible, autrement dit l'inertie à la déformation est faible et la sensibilité grande. Cet effet est d'autant plus grand que le volume décroît, ce qui est le cas avec la diminution croissante de l'épaisseur radiale des pinces ;
- elles ont un impact modéré sur la partie massive, car le volume est grand et l'inertie à la déformation est donc plus grande.

La signature de l'ouverture des plans est sans effet sur les points des plans appartenant à la partie massive. Elle correspond à une fonction carré pour les points des pinces. Cette fonction permet de traduire l'évolution parabolique de l'amplitude de la dilatation des génératrices au fur et à mesure que celles-ci sont proches de l'extrémité des pinces.

Enfin, le troisième phénomène de déformation des plans est l'inclinaison symétrique. Celui-ci supplée parfois le phénomène d'ouverture des plans. En effet, cette inclinaison symétrique révèle une autre empreinte géométrique laissée par les transformations de phases : la dilatation des génératrices des pinces et la contraction de celles de la partie massive, rencontrées pour certaines nuances et drasticités de trempes. Cette inclinaison symétrique résulte de l'asynchronisme des transformations de phases et des températures entre les zones des pinces et celles de la partie massive, donnant lieu à une déformation hétérogène. La signature de ce phénomène est une rotation des deux plans, de sens inverse, suivant l'axe x. Cela permet ainsi de retracer l'évolution linéaire de la distance entre les deux plans, depuis la

partie massive jusqu'aux pinces.

Phénomène	Expression mathématique	Effets sur les écarts projetés sur les normales théoriques
Variation de hauteur	<p><i>Pour chaque point i des plans:</i></p> $\begin{cases} e_{\text{dila_plans}_i} = \vec{N}_i \cdot \vec{z} = Nz_i, \\ \left\ \frac{\vec{N}_i}{Nz_i} \right\ = 1 \Rightarrow e_{\text{dila_plans}_i} = 1 \end{cases}$	
Inclinaison symétrique	<p><i>Pour chaque point i des plans:</i></p> $\begin{cases} e_{\text{parallélisme}_i} = T_i z \cdot Ny_i - T_i y \cdot Nz_i \\ T_i \text{ est } i^{\text{ème}} \text{ point théorique} \end{cases}$	
Ouverture des plans	<p><i>Pour chaque point i des plans:</i></p> $e_{\text{ouv_plan}_i} = \begin{cases} \frac{T_i y^2}{\max(\{T_1 y, \dots, T_n y\})^2} & \text{si } T_i y < 0 \\ 0 & \text{si } T_i y \geq 0 \end{cases}$ <p>T_i est $i^{\text{ème}}$ point théorique parmi les n</p>	

× Points théoriques ▲ Points d'une signature élémentaire d'un phénomène

Figure III - 36 : Signatures élémentaires des phénomènes de déformations des plans

La rainure

Deux phénomènes de déformations ont été identifiés pour les deux génératrices de la rainure (Figure III - 37). Le premier est l'écartement des pinces, consécutif au phénomène d'ouverture des pinces, et qui confirme les études antérieures menées sur le croissant [WAL02] [HAR05] [BRO07]. La valeur d'ouverture des pinces est égale à la demi-amplitude de l'écartement des pinces, à condition que les génératrices en bout des pinces soient rectilignes. En effet, la demi-amplitude est la valeur de déplacement suivant l'axe x des points d'une des génératrices de la rainure, tandis que l'amplitude d'ouverture des pinces est la valeur de déplacement radial de ces mêmes points. L'écartement des pinces traduit la partie homogène des variations des dimensions lors de la chauffe et du refroidissement. La signature de ce phénomène est une dilatation axiale suivant x des deux génératrices. En cas d'amplitude négative, une contraction sera identifiée.

Le deuxième phénomène est la mise en bombé des deux génératrices de la rainure,

correspondant à la partie hétérogène des modifications de la géométrie. L'origine physique est à relier avec les effets de bords, provoquant une hétérogénéité de refroidissement et donc de déformation entre les extrémités et le milieu du croissant. Ce bombé est modélisé par une fonction carré permettant d'exprimer la variation d'amplitude en fonction de la hauteur. L'amplitude est ainsi maximale à une hauteur $h = 0$ mm et vaut 1 mm ; elle est nulle pour $h = 45$ mm et $h = -45$ mm. Les effets sur les écarts sont opposés pour un diabolos, phénomène qui sera identifié par la présence d'un signe négatif dans l'amplitude.

Phénomène	Expression mathématique	Effets sur les écarts projetés sur les normales théoriques
Ecartement des pinces	<p>Pour chaque point i des génératrices:</p> $\begin{cases} \vec{e}_{\text{dila}_i} = -\vec{N}_i \cdot \vec{x} = -N_{x_i} \\ \ \vec{N}_{x_i}\ = 1 \Rightarrow e_{\text{dila}_i} = -1 \end{cases}$	<p style="text-align: right;">x5</p>
Effet bombé	<p>Pour chaque point i des génératrices:</p> $\begin{cases} e_{\text{bombé}_i} = 1 - z_i^2 \\ z_i = -1 + 0.1 \times k, k \in [0,20] \end{cases}$	<p style="text-align: right;">x5</p>

× Points théoriques ▲ Points d'une signature élémentaire d'un phénomène

Figure III - 37 : Signatures élémentaires des phénomènes de déformations des génératrices de la rainure

Les cylindres

Un total de cinq phénomènes de déformations a été retenu (Figure III - 38).

Seul le phénomène de variation des diamètres traduit la partie homogène des modifications géométriques des cylindres en chauffe et refroidissement. Sa signature est celle d'une dilatation radiale des cylindres.

Trois des phénomènes hétérogènes sont liés à l'asynchronisme de l'évolution des températures et de la formation des phases dans le sens circonférentiel et radial du croissant. Ces trois phénomènes, l'ouverture des pinces, leur variation d'épaisseur et l'effet lèvre sont localisés au niveau des pinces car cette zone de faible épaisseur est plus affectée que la zone massive par les contraintes mécaniques résultantes des effets thermiques et métallurgiques.

Le phénomène d'ouverture des pinces peut physiquement correspondre à l'ouverture de la ligne moyenne située dans l'épaisseur des pinces. Mathématiquement, cette ligne moyenne est celle formée par les centres des cercles bitangents aux cercles extérieur et intérieur du croissant. Le phénomène d'ouverture est modélisé par une fonction périodique, dont l'évolution est linéaire. Chaque point de la ligne moyenne se déplace suivant la normale au point, ce qui implique que la ligne moyenne s'allonge quelque peu lors de l'ouverture du

croissant⁹. L'ouverture de la ligne moyenne est ensuite transposée sur les normales théoriques des points des cylindres. Le point de la ligne moyenne situé sur le plan de symétrie du croissant est fixe ; il sert de référence. Le détail de la résolution est donné dans l'annexe 3 ;

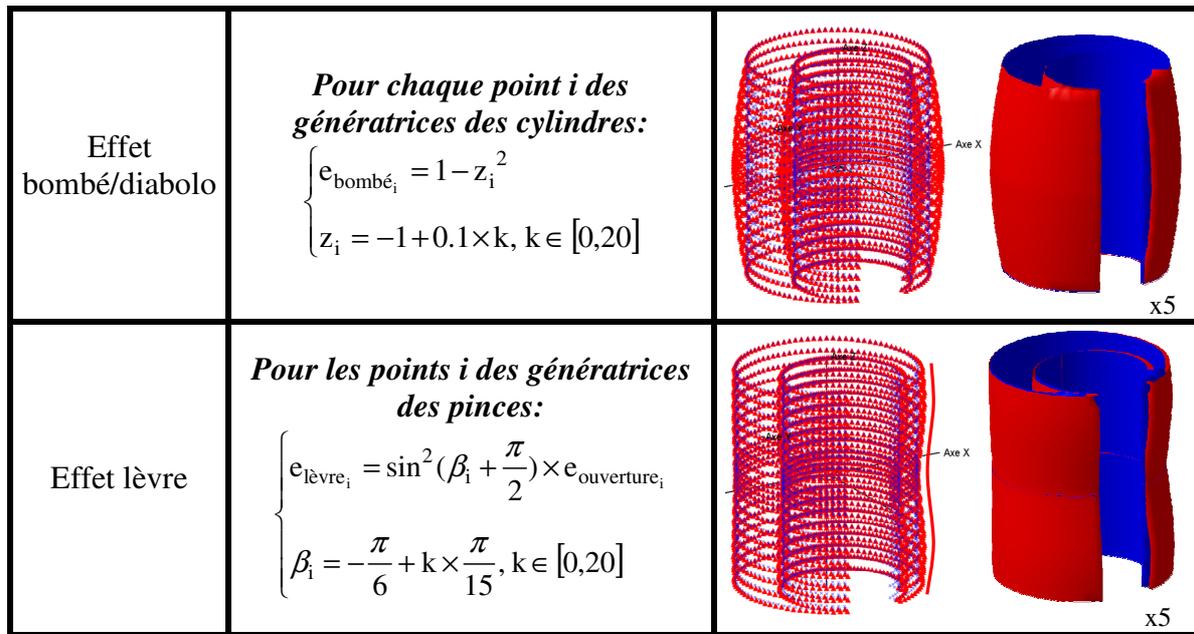
La variation d'épaisseur radiale des pinces, c'est-à-dire des sections planes perpendiculaires à la ligne moyenne, est prise en compte. Cette variation d'épaisseur est liée aux contraintes importantes générées par les effets thermiques et métallurgiques. Les composantes du vecteur signature sont constituées des valeurs absolues des scalaires du vecteur « ouverture des pinces ». Cette expression mathématique est acceptable car la signature d'ouverture des pinces ne provoque quasiment pas de variation d'épaisseur des pinces (1%).

L'effet lèvre des génératrices situées en bout des pinces correspond à une combinaison complexe des effets thermo-mécaniques et métallurgiques sur cette faible zone. Sa signature est obtenue en couplant la signature d'ouverture des pinces, exprimée dans le sens circonférentiel, avec une fonction sinusoidale, dans le sens longitudinal. L'effet lèvre des génératrices est quantifié séparément pour le cylindre extérieur et le cylindre intérieur.

Le quatrième phénomène hétérogène, l'effet bombé/diabolo, est lié à la composante longitudinale du gradient des effets thermo-métallurgiques, à l'origine de l'asynchronisme des températures et des phases formées. Sa signature est la même que pour les deux génératrices de la rainure, à la différence près que, si les génératrices du cylindre extérieur sont bombées, celles du cylindre intérieur sont en diabolo. L'effet bombé/diabolo des génératrices est quantifié séparément pour les deux cylindres.

Phénomène	Expression mathématique	Effets sur les écarts projetés sur les normales théoriques
Ouverture des pinces	<p><i>Pour chaque point i des cylindres:</i></p> $\begin{cases} e_{\text{ouverture}_i} = 1 - \cos \frac{\alpha_i}{2} \\ \alpha_i = \text{Atan2}(\overrightarrow{OT_i} \cdot \vec{x}; \overrightarrow{OT_i} \cdot \vec{y}) \end{cases}$	
Variation d'épaisseur radiale	<p><i>Pour chaque point i des cylindres:</i></p> $e_{\text{épaisseur}_i} = e_{\text{ouverture}_i} $	
Variation homogène de diamètre	<p><i>Pour chaque point i des cylindres:</i></p> $\begin{cases} e_{\text{dila}_i} = \vec{N}_i \cdot \vec{x} + \vec{N}_i \cdot \vec{y} = \ \vec{N}_i\ \\ \Rightarrow e_{\text{dila}_i} = 1 \end{cases}$	

⁹ L'allongement est cependant majoritairement tangentiel et son influence sur la normale de mesure est supposée négligeable.



× Points théoriques ▲ Points d'une signature élémentaire d'un phénomène

Figure III - 38 : Signatures élémentaires des phénomènes de déformations des cylindres

4.3.3. Augmentation du niveau de détail des signatures des génératrices des cylindres

La signature actuelle de la mise en bombé/diabolo est la même pour toutes les génératrices d'un cylindre. De ce fait, elle aboutit à l'identification d'une amplitude moyenne de cet effet sur toutes les génératrices.

L'utilisation de deux instances de cette signature de bombé/diabolo a permis d'augmenter le niveau de détail de l'analyse du phénomène de déformation des génératrices entre celles situées à l'intérieur et celles à l'extérieur. L'apport de la signature d'effet lèvres des génératrices proches de l'extrémité des pinces permet d'améliorer encore la finesse de l'analyse.

Le choix des signatures tridimensionnelles de ces deux phénomènes de déformations aboutit à une quantification de la valeur moyenne de ces effets. Pour augmenter le niveau de détail à son maximum, une analyse plane est réalisée pour chacune des 82 génératrices du cylindre extérieur d'un croissant de la nuance 1 de la trempe huile. La Figure III - 39 illustre les écarts entre les génératrices théoriques et celles déformées, après un best fit. Le cylindre extérieur a été « déroulé » et chaque génératrice est vue dans le plan radial la contenant. Par souci de clarté, seule une génératrice sur trois est présentée.

Les phénomènes de déformations des génératrices sont retrouvés : mise en bombé pour les génératrices de la partie massive et effet lèvres pour les génératrices en bout des pinces. Par ailleurs, l'amplitude de ces deux phénomènes de déformations évolue suivant les génératrices considérées.

L'optimisation des écarts sur chaque génératrice est alors répétée, avec ces deux phénomènes. La Figure III - 40 indique l'amplitude de chacun des deux phénomènes sur chaque génératrice. L'évolution des amplitudes est symétrique des deux côtés des pinces, avec une légère différence pour l'effet lèvres. Les constats sont les suivants :

- l'amplitude de l'effet lèvres est maximale sur les deux génératrices (n°1 et n°82) situées au bout des pinces, côté gauche et côté droit. Cette amplitude décroît au fur et à mesure que l'épaisseur radiale des pinces augmente, jusqu'à la zone située à mi-pinces, correspondant à la génératrice 13 pour la pince droite et 70 pour la pince gauche. La décroissance suit une loi exponentielle.
- la mise en bombé des génératrices intervient sur les zones à mi-pinces, là où

l'effet lèvre est d'amplitude quasi nulle. L'amplitude de l'effet bombé croît alors jusqu'à atteindre une valeur maximale aux alentours des génératrices n°41 et n°42, c'est-à-dire celles opposées à la rainure du croissant. La croissance suit une fonction carré.

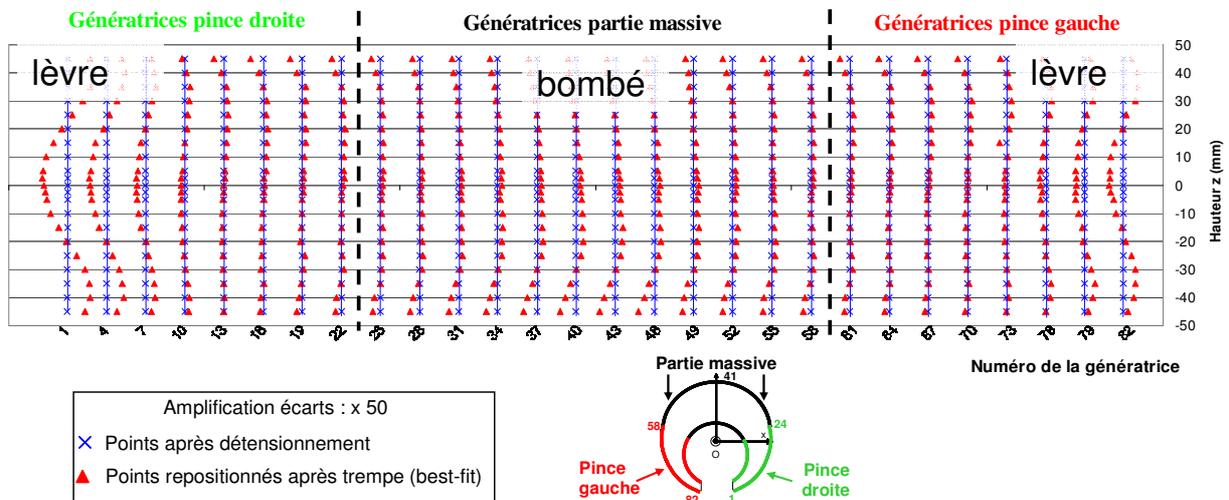


Figure III - 39 : Ecarts d'1 génératrice sur 3 du cylindre extérieur de la pièce 1, nuance 1, trempe huile

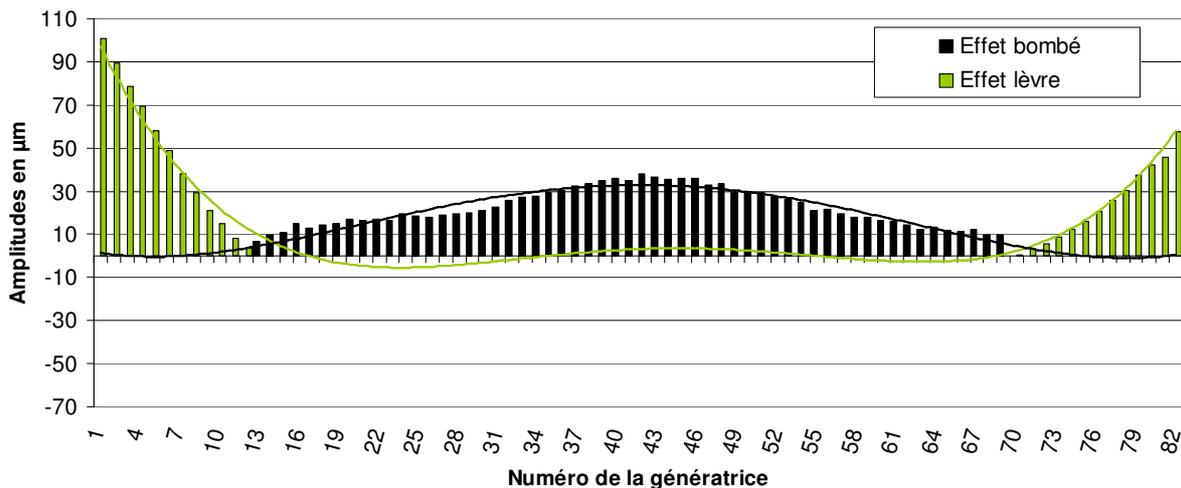


Figure III - 40 : Evolution de l'amplitude des phénomènes de déformations des génératrices du cylindre extérieur, pièce 1 - nuance 1 - trempe huile

L'analyse plane des génératrices a permis de suivre l'évolution de l'amplitude des effets bombé/diabolo et lèvre d'un croissant réel en trempe huile. La Figure III - 41 montre l'évolution de l'amplitude obtenue pour la simulation numérique du croissant de cette même nuance et en trempe huile. L'effet lèvre est ici parfaitement symétrique et son évolution est la même que celle constatée en expérience, y compris les valeurs d'amplitudes. Par contre, en simulation, il y a deux phénomènes de déformations pour les génératrices de la partie massive. En effet, si elles se déforment globalement en bombé, les génératrices de la partie massive opposées à l'ouverture (n°32 à 52) se déforment en sens inverse, c'est-à-dire en diabolo. L'évolution de l'amplitude dans le cas du bombé et du diabolo suit une fonction carré.

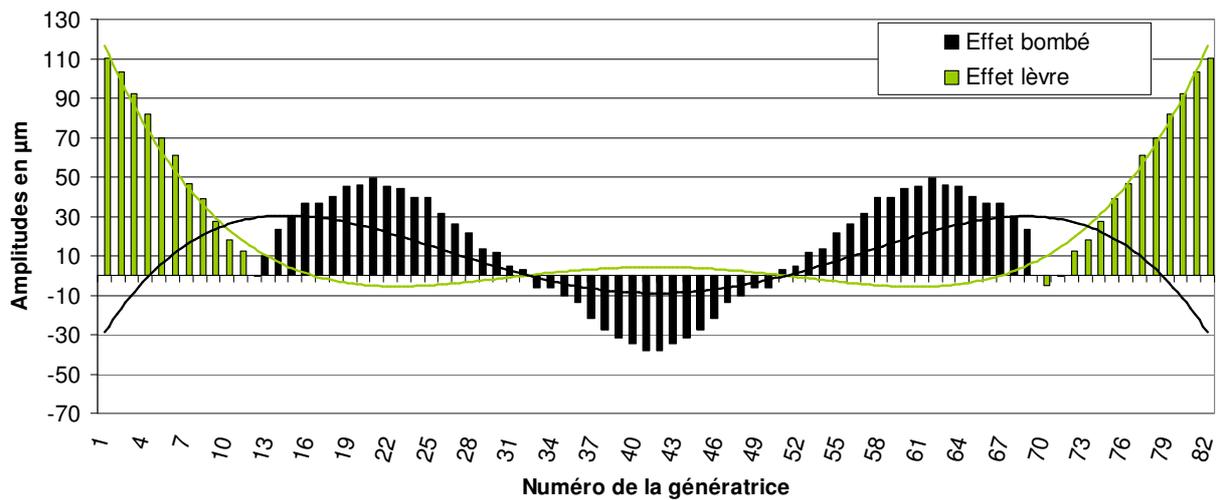


Figure III - 41 : Evolution de l'amplitude des phénomènes de déformations des génératrices du cylindre extérieur, croissant simulé - nuance 1 - trempe huile

Le choix d'une signature globale pour ces deux phénomènes implique la perte d'information donnée par l'évolution de leur amplitude. Néanmoins, pour suivre finement l'évolution des amplitudes, il faut définir une signature locale, ce qui augmente considérablement le nombre de paramètres à analyser. Par ailleurs, cela augmente la profondeur d'analyse nécessaire pour comprendre l'origine des phénomènes physiques créant l'évolution hétérogène des amplitudes de ces deux phénomènes de déformations. Ceux-ci sont liés à l'effet combiné des gradients thermo-métallurgico-mécaniques à la fois dans le sens radial, circonférentiel et longitudinal du croissant. Les contraintes mécaniques résultantes ont un impact fort et rapide sur le faible volume de matière au bout des pinces, ce qui peut expliquer le phénomène de plastification locale qu'est l'effet lèvres. L'amplitude de cet effet est ainsi maximale là où le volume est minimal, puis elle décroît progressivement avec l'augmentation du volume, jusqu'à la zone située à mi-pinces. Pour l'effet bombé, son amplitude maximale est atteinte lorsque le volume local est à son maximum, c'est-à-dire lorsque l'épaisseur radiale est maximale. Contrairement à l'effet lèvres, le phénomène de bombé est la conséquence de la lente évolution des contraintes mécaniques hétérogènement réparties au sein d'un volume plus important.

En conclusion, le choix du niveau de détail de l'analyse des phénomènes de déformations des génératrices a été motivé par la volonté de se placer à un niveau intermédiaire entre une analyse très synthétique et une analyse plus fine, comme celle menée dans ce paragraphe. Ainsi, la prise en compte de deux phénomènes de déformations, détaillés à la fois pour le cylindre extérieur et pour le cylindre intérieur, donne une tendance globale de la déformation des génératrices.

4.4. Evaluation de la pertinence des signatures

4.4.1. Linéarité des signatures des phénomènes

Toutes les signatures ont été choisies comme étant d'évolution linéaire. Par ailleurs, l'amplitude de chaque phénomène converge vers une valeur stable dès la première itération de l'optimisation. Cela signifie que toutes les amplitudes des phénomènes sont inférieures à la valeur limite nécessaire pour être dans l'hypothèse de linéarisation de leur effet. Pour une rotation linéarisée d'un solide, l'erreur absolue sur la valeur de déplacement du point le plus éloigné de l'axe de rotation, situé à la distance d , vaut $d \cdot \alpha^2$, où α est l'angle de rotation. Appliqué au croissant, la valeur limite de l'angle de rotation de la plus grande distance, qui est la demi-hauteur du croissant, est de 4 milliradians. L'erreur sur la valeur de déplacement en

bout du bras de levier est alors égale à 0,8 μm , ce qui est une limite acceptable afin de rester dans l'hypothèse de linéarisation.

Les translations ne posent aucun problème puisque, par définition, elles sont d'évolution linéaire. Les phénomènes de variation homogène de la géométrie, à savoir la variation de hauteur du croissant, des diamètres et de l'écartement des pinces sont également linéaires du fait que leur signature s'apparente à une translation. Le phénomène d'inclinaison symétrique des plans est une rotation, de ce fait linéarisée.

4.4.2. Indépendance des signatures des phénomènes

Elle est évaluée grâce à la propagation de l'incertitude de mesure d'un croissant réel ($\sigma_i=1,7 \mu\text{m}$) dans la base des phénomènes. Les valeurs d'incertitudes associées à chacun d'entre eux sont données dans le Tableau III - 5.

Les valeurs d'incertitudes de tous les phénomènes sont acceptables, car elles sont inférieures à l'incertitude de mesure σ_i . Par ailleurs, elles sont largement inférieures à l'ordre de grandeur maximal (quelque centaine de micromètres) des amplitudes des phénomènes de déformations. Les incertitudes sur les rotations semblent élevées, car elles sont exprimées en $\mu\text{m}/\text{m}$. Cependant, ce n'est pas le cas. La plus forte valeur d'incertitude d'une rotation est celle correspondant au phénomène d'inclinaison symétrique des plans. Elle correspond à une incertitude sur le déplacement en bout de bras de levier (35 mm) de 0,31 μm .

Il est possible que certaines signatures parmi les seize présentes dans la base d'analyse soient faiblement dépendantes. Pour les identifier, un plan d'expérience avec ces 16 variables est nécessaire. Néanmoins, comme les valeurs d'incertitudes des phénomènes de déformations sont toutes inférieures à l'incertitude de mesure, la base d'analyse est physiquement interprétable. S'il y a quelques faibles dépendances, elles ne nuisent pas à la qualité de l'identification quantitative des phénomènes.

Incertitudes sur les phénomènes de déplacements du croissant							
T_x		T_y		T_z	R_x		R_z
0,05 μm		0,36 μm		0,16 μm	1,6 $\mu\text{m}/\text{m}$		7,1 $\mu\text{m}/\text{m}$
Incertitudes sur les phénomènes de déformations des cylindres							
Variation homogène des diamètres.		Bombé génératrices		Ouverture pinces	Variation épaisseur pinces	Effet lèvre	
cyl.ext.	cyl.int.	cyl.ext.	cyl.int.			cyl.ext.	cyl.int.
0,34 μm	0,40 μm	0,15 μm	0,15 μm	0,92 μm	0,19 μm	0,36 μm	0,36 μm
Incertitudes sur les phénomènes de déformations des plans et de la rainure							
Variation de hauteur	Inclinaison symétrique	Ouverture des plans	Ecartement des pinces	Bombé génératrices rainure			
				gauche	droite		
0,2 μm	8,8 $\mu\text{m}/\text{m}$	0,49 μm	0,58 μm	0,93 μm	0,93 μm		

Tableau III - 5 : Incertitudes sur les amplitudes des phénomènes lors de la mesure d'un croissant réel

Concernant les incertitudes lors de la mesure d'un croissant virtuel, elles seront considérées comme proches de celles obtenues dans le Tableau III - 5. En effet, l'incertitude de mesure d'un croissant virtuel est proche de celle de la mesure métrologique d'un croissant.

4.4.3. Conclusions

La base d'analyse est maintenant riche des signatures des phénomènes de déformations significatifs qui ont été identifiés sur les croissants issus des différentes campagnes de trempe. Comme les signatures sont d'évolution linéaire et sont indépendantes (ou du moins faiblement dépendantes), il est à présent possible de séparer de la déformation globale, les effets des phénomènes de déformations et en donner les amplitudes.

5. DISSOCIATION DES PHENOMENES

Cette opération, dernière étape de la méthode, est réalisée avec la méthode d'optimisation dite de la base orthonormale. Les phénomènes significatifs, identifiés et modélisés précédemment, sont d'évolution linéaire et ne sont pas fortement dépendants, ce qui permet leur dissociation et l'obtention de leur amplitude associée.

Cette partie consiste à examiner les amplitudes des phénomènes de déformations des six croissants de deux nuances, pris en exemple dans la partie 4.2. Les amplitudes sont exprimées par rapport à la géométrie détensionnée des croissants. L'analyse sera menée rapidement car il s'agit plutôt de présenter la charte graphique de présentation complète des résultats, qui sera utilisée dans les chapitres suivants. Enfin, l'analyse des écarts résiduels, qui correspondent aux écarts initiaux ôtés des effets des phénomènes, permet de s'assurer qu'il n'y a pas d'autre phénomène significatif non identifié.

5.1. Amplitudes des phénomènes de déformations

La Figure III - 42 et la Figure III - 43 comportent les amplitudes des phénomènes de déformations, données en micromètres, pour les éléments simples de chacun des six croissants. Afin d'être homogène dans les unités, l'angle de rotation du phénomène d'inclinaison des plans a été ramené à une amplitude maximale de déplacement, exprimée en micromètre. Ce déplacement, suivant l'axe z, est celui du point du plan le plus éloigné de l'axe de rotation x.

5.1.1. Croissants de la nuance 1

Le premier constat révélé par la Figure III - 42 est la relative constance des amplitudes des phénomènes de déformations d'un croissant à l'autre, ce qui confirme la stabilité dimensionnelle après trempe, soulignée lors de l'analyse des écarts. C'est assez net pour les phénomènes d'ouverture des pinces et de variation d'épaisseur et les phénomènes de mise en bombé des génératrices des cylindres. Néanmoins, l'amplitude de certains phénomènes fluctue beaucoup d'un croissant à l'autre : c'est le cas du phénomène de variation de diamètre des cylindres, de l'amplitude maximale de l'inclinaison symétrique des plans et de l'ouverture des plans. Pour ces trois phénomènes, le sens de l'effet s'inverse sur certaines pièces :

- si les diamètres des cylindres extérieur et intérieur des croissants 1 et 2 sont plus petits que ceux nominaux ($-67 \mu\text{m}$ en moyenne), le croissant 3 a un diamètre intérieur légèrement plus grand que celui-nominal ($+24 \mu\text{m}$) ;
- l'amplitude de l'inclinaison symétrique des deux plans est de signe positif pour le croissant n°1, ce qui signifie que la rotation suivant l'axe x est dans le sens trigonométrique. C'est l'inverse pour les deux autres croissants ;
- l'amplitude du phénomène d'ouverture des plans est négative pour les croissants 2 et 3, ce qui signifie une fermeture localisée des plans au niveau de la rainure. C'est l'inverse pour le premier croissant.

Puis, le deuxième constat concerne la symétrie des déformations des éléments simples pour lesquels un même phénomène a été quantifié séparément. Il s'agit des cylindres extérieur et intérieur et des génératrices gauche et droite de la rainure. Il a été montré au paragraphe 4.2.3 que les génératrices de la partie massive des cylindres des croissants de la nuance 1, sont en diabolisme à l'extérieur (amplitude négative) et en bombé à l'intérieur (signe positif). Après quantification, les valeurs absolues des amplitudes de ces phénomènes sont les mêmes, ce qui signifie qu'ils sont d'effet symétrique entre l'intérieur et l'extérieur. Le constat est le même non seulement pour l'effet lèvres des génératrices situées en bout des pinces, mais aussi pour l'amplitude de la mise en bombé des deux génératrices situées de part et d'autre de l'axe de symétrie de la rainure.

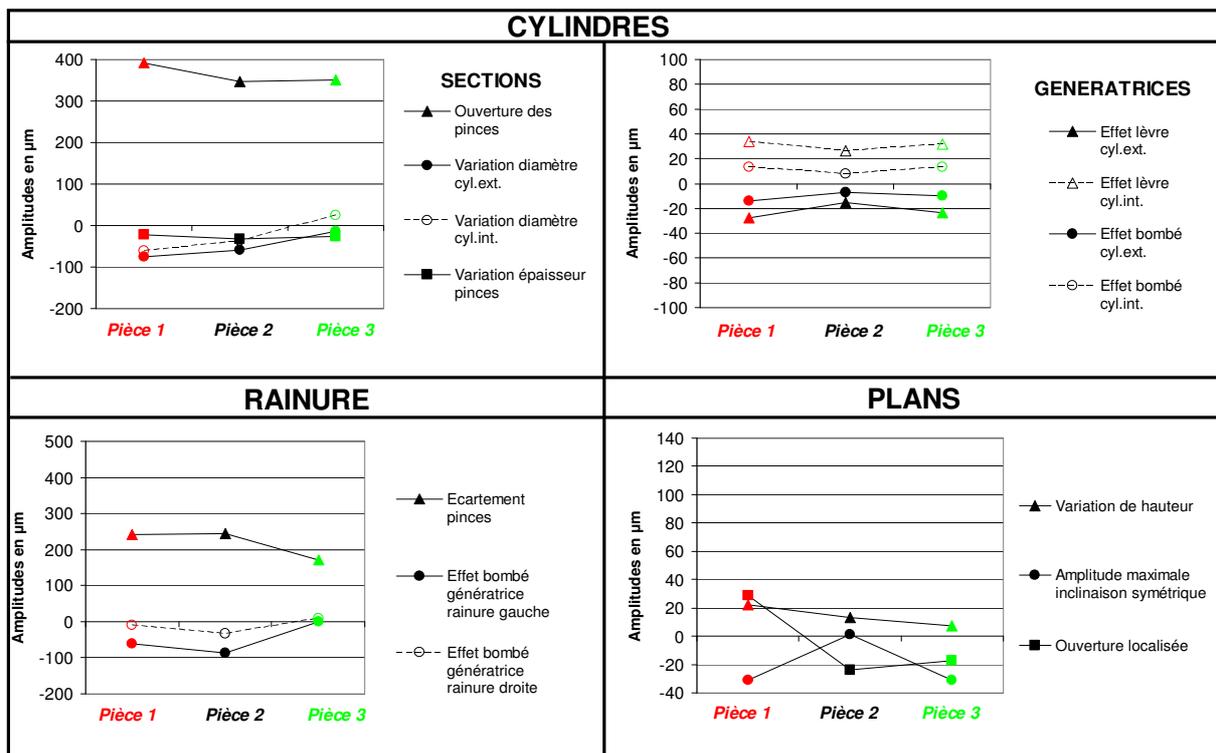


Figure III - 42 : Evolution des amplitudes des phénomènes de déformations des trois croissants - nuance 1 - trempé huile

Ensuite, le troisième constat est plutôt une vérification de la cohérence des amplitudes pour s'assurer que les éventuelles dépendances entre phénomènes n'ont pas perturbé la quantification de leur effet. En comparant les amplitudes avec la visualisation graphique des phénomènes effectuée sur la Figure III - 32, la cohérence est bonne puisque :

- les pinces s'ouvrent bel et bien pour les trois croissants et l'amplitude est plus faible pour le troisième croissant. L'écartement des pinces mesuré sur la rainure suit la même tendance car son effet est corrélé à celui du phénomène d'ouverture des pinces ;
- les deux génératrices de la rainure sont effectivement en diabolos, et l'amplitude est plus faible pour le troisième croissant ;
- les plans des croissants 2 et 3 se ferment car l'amplitude est négative, tandis que ceux du premier croissant s'ouvrent.

La corrélation qui existe entre l'ouverture des pinces et l'écartement de la rainure est vérifiée pour le croissant n°3, dont les génératrices en bout des pinces ne sont pas fortement déformées ni par l'effet lèvres ni par l'effet bombé/diabolos. L'ouverture de ses pinces vaut 89 µm, ce qui correspond à la demi-amplitude de l'écartement de la rainure, égale à 85 µm.

Le dernier constat est que les amplitudes de tous les phénomènes de déformations sont largement supérieures à leurs incertitudes associées et sont donc interprétables. Avec une amplitude moyenne égale à 363 µm pour un écart type de 25 µm, l'ouverture des pinces est le phénomène de déformation le plus significatif, pour cette nuance 1 trempée à l'huile. Comme son effet est corrélé avec l'ouverture des pinces, le phénomène d'écartement des pinces est placé juste après, avec une amplitude moyenne de 219 µm pour un écart type de 41 µm.

Cela signifie que le déplacement radial maximal des points à l'extrémité des pinces est de 363 micromètres et que la largeur de la rainure vaut 219 mm de plus qu'après détensionnement. Quant aux autres phénomènes, leur amplitude moyenne est plus petite et inférieure, en valeur absolue, à 50 µm.

5.1.2. Croissants de la nuance 2

Les constats effectués sur les croissants de la nuance 1 sont également valables pour ceux de la nuance 2 (Figure III - 43). Ainsi, la majorité des phénomènes ont une amplitude constante d'un croissant à l'autre, seuls les phénomènes de déformations des génératrices (bombé et lèvres) du deuxième croissant ont leur effet inversé. Par ailleurs, les phénomènes quantifiés sur les cylindres intérieur et extérieur sont ici aussi symétriques.

Les phénomènes les plus significatifs de cette nuance trempée à l'huile sont plus nombreux et ne sont pas les mêmes que pour la nuance vue précédemment. Dans l'ordre respectif de leur amplitude moyenne, il s'agit des phénomènes suivants pour lesquels la valeur absolue de l'amplitude est supérieure à 100 micromètres :

- l'écartement des pinces entraîne une augmentation de la largeur de la rainure de 197 μm par rapport à la largeur après détensionnement ;
- la mise en bombé des deux génératrices de la rainure, avec une amplitude égale à 137 μm pour celle de gauche et 102 μm pour celle de droite ;
- l'ouverture localisée des plans, avec un déplacement maximum de 105 μm des points des plans les plus proches de l'extrémité des pinces ;
- pour finir, l'ouverture des pinces, avec un déplacement radial maximal des points des cylindres situés à l'extrémité des pinces égal à 101 μm .

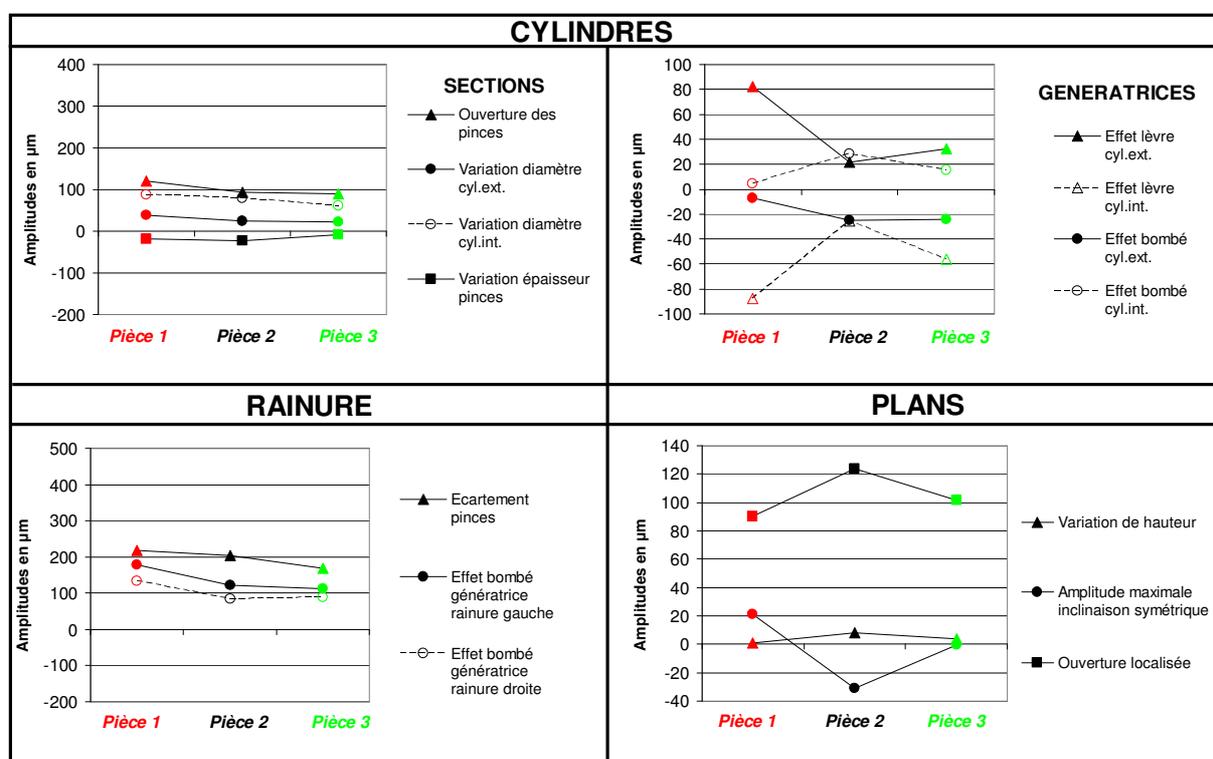


Figure III - 43 : Evolution des amplitudes des phénomènes de déformations des trois croissants - nuance 2 - trempe huile

5.2. Analyse des écarts résiduels après dissociation des phénomènes

Les écarts résiduels sont donnés dans la Figure III - 44. Les écarts résiduels (amplifiés 50 fois) sur les croissants des deux nuances sont faibles, ce que confirme l'analyse de la norme du vecteur résidu (Figure III - 45). Cette norme est diminuée en moyenne de 82%.

L'optimisation avec les phénomènes de déformations actuels n'est cependant pas parfaite sur les cylindres. En effet, les signatures des effets bombé/diabolo et lèvres des génératrices ne prend pas en compte l'évolution des amplitudes, qui est variable d'une génératrice à l'autre, comme cela a été présenté dans la partie 4.3.3. Les écarts résiduels révèlent cette imperfection, surtout présente au niveau de l'extrémité des pinces, c'est-à-dire là

où l'effet lèvre a été quantifié par sa valeur moyenne sur les quinze premières génératrices.

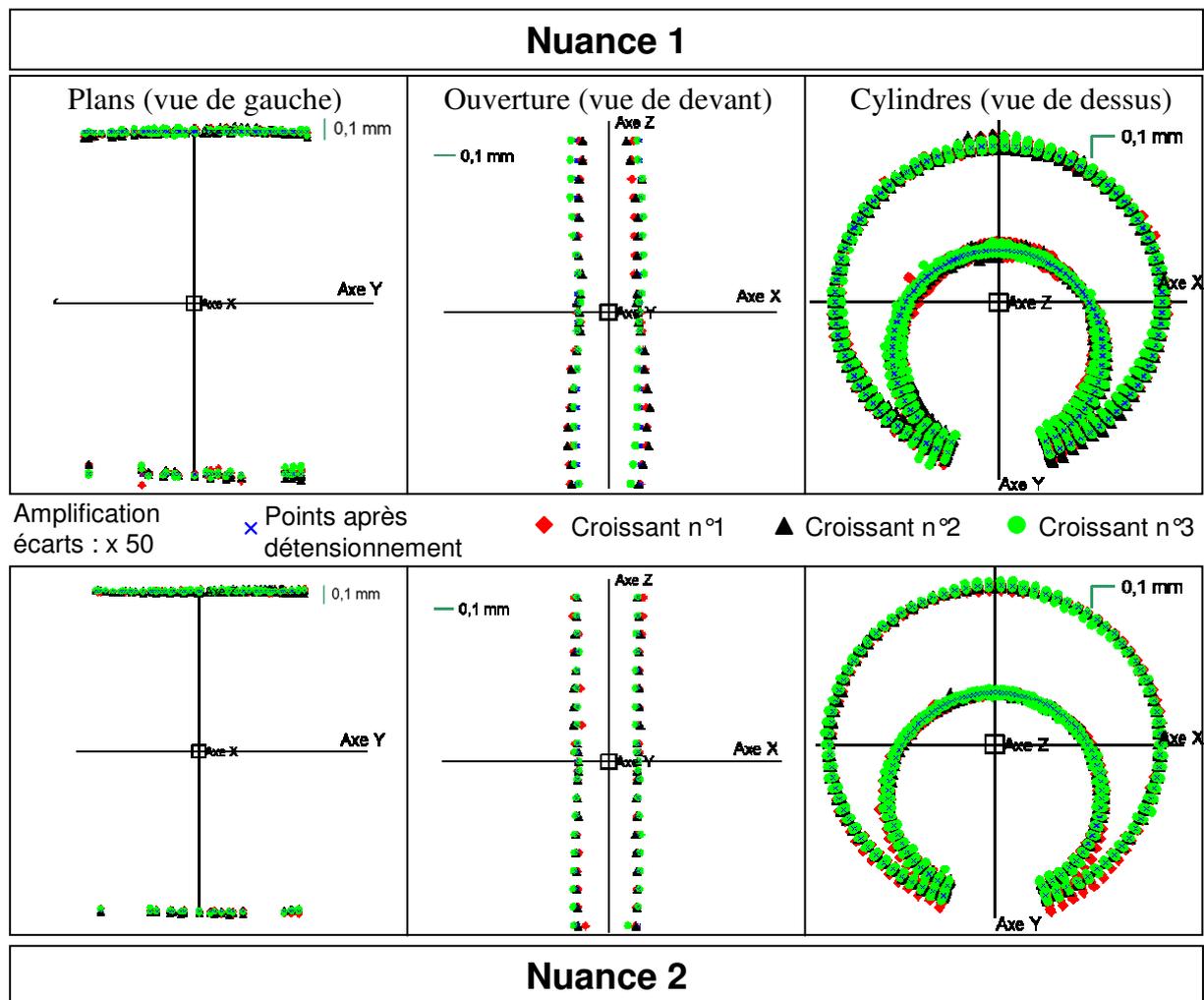


Figure III - 44 : Ecarts résiduels entre les images des géométries trempées huile et détensionnées, après dissociation des phénomènes de déformations, des 6 croissants considérés

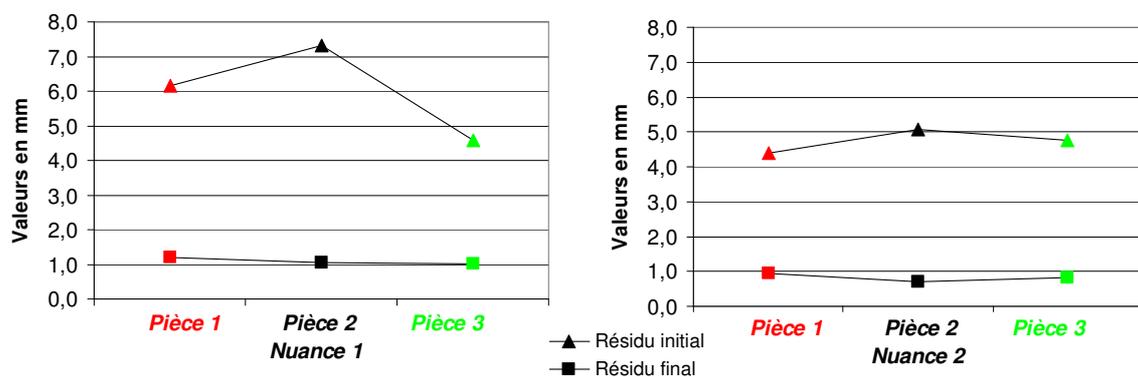


Figure III - 45 : Norme du vecteur résidu, avant et après dissociation des phénomènes de déformations

Excepté la non-prise en compte de la variabilité de l'amplitude de l'effet lèvre et de l'effet bombé/diabolo, il n'y a pas d'autre phénomène de déformation significatif identifiable. La base d'analyse actuelle est donc suffisante pour expliquer la majorité des déformations ayant une origine physique.

6. CONCLUSIONS

La méthode complète de quantification des phénomènes de déformations a été mise en œuvre sur la pièce test qu'est le croissant. Les analyses conduites ont permis de valider la stratégie de mesure du croissant et d'identifier finement les déformations tridimensionnelles de la géométrie.

Les croissants étudiés ne présentent pas de déformations antérieures aux traitements thermiques et la stabilité des formes après usinage et détensionnement souligne la bonne répétabilité de leur fabrication. La géométrie du croissant après détensionnement sert ainsi de géométrie de référence afin d'analyser les défauts de formes et de dimensions produits par les différents trempes.

Les déformations survenant en trempes huile et gaz affectent principalement la zone des pinces. En effet, le volume en présence est faible, ce qui le rend très sensible aux contraintes générées par les phénomènes thermiques, métallurgiques et mécaniques. Lors des trempes gaz et huile, l'ouverture des pinces et, en conséquence, leur écartement, ont été observés, ce qui corrobore les articles de la littérature traitant du croissant, où ces deux phénomènes sont souvent les seuls pris en compte [LI05] [TEO06] [BRO07]. L'analyse plus riche du croissant menée dans ces travaux de thèse a permis d'identifier deux phénomènes de déformations locaux [NIC07]. Il s'agit à la fois de l'effet lèvres des génératrices situées à l'extrémité des pinces et de leur forte dilatation ou contraction, qui se traduit visuellement par le phénomène d'ouverture ou de fermeture des plans. La détermination précise de leur origine physique fait l'objet du chapitre VI de ce mémoire.

La quantification des phénomènes de déformations a permis de constater que les phénomènes dont l'amplitude est la plus significative ne sont pas les mêmes pour les deux nuances 1 et 2, soumises à la même trempe huile. Il n'est donc pas évident d'affirmer laquelle des deux nuances est la plus favorable face aux déformations en trempe huile. Pour cela, il faut connaître les limites de forme et de dimensions tolérées sur les surfaces fonctionnelles du produit mécanique et qui sont nécessaires à son bon fonctionnement au sein d'un mécanisme. Pour la pièce test qu'est le croissant, il n'y a pas de surfaces définies en tant que fonctionnelle. L'objectif est autre : il s'agit de trouver la nuance conférant une bonne trempabilité pour un minimum de déformation. Pour cela, l'influence de la drasticité de trempe sur les amplitudes des phénomènes de déformations est étudiée pour chacune des nuances d'étude. De cette façon, l'utilisation de ces nuances dans des produits mécaniques industriels subissant une trempe est validée pour des gammes de vitesses de refroidissement permettant de minimiser l'impact des déformations. La géométrie des produits mécaniques est prise en compte par l'intermédiaire des vitesses de refroidissement, liées au gradient d'épaisseur présent au sein du produit.

La méthode développée dans ces travaux de thèse est donc opérationnelle pour les croissants « réels » et « virtuels » :

- le niveau de confiance des résultats quantitatifs est satisfaisant comme le prouve les incertitudes associées à chaque phénomène de déformation ;
- les écarts résiduels après dissociation des phénomènes de déformations sont faibles, les phénomènes retenus expliquent donc la majorité de la déformation globale du croissant.

Dans le chapitre suivant, l'influence des différentes drasticités est étudiée sur les croissants provenant des essais expérimentaux. Afin de synthétiser les résultats, la moyenne et l'écart-type des amplitudes des croissants d'une même nuance et d'une même trempe sera donnée. Cette synthèse est possible car la majorité des phénomènes ont une amplitude relativement constante d'un croissant à l'autre.