

# INFLUENCE DU MILIEU DE TREMPE ET DE LA NUANCE D'ACIER SUR LES DEFORMATIONS DU CROISSANT

# TABLE DES MATIERES

<b>1. PREAMBULE .....</b>	<b>128</b>
<b>2. ANALYSE A ISO-NUANCE .....</b>	<b>128</b>
2.1. Nuance 1 .....	128
2.2. Nuance 2 .....	131
2.3. Nuance 3 .....	133
2.4. Conclusions de l'analyse à iso-nuance .....	135
<b>3. ANALYSE A « ISO-TREMPE » .....</b>	<b>136</b>
3.1. Trempe gaz 3b .....	136
3.2. Trempe gaz 12b .....	137
3.3. Trempe gaz 18b .....	138
3.4. Trempe huile .....	139
3.5. Conclusions de l'analyse à iso-trempe .....	141
<b>4. ANALYSE A ISO-DURETE .....</b>	<b>141</b>
4.1. Mesures des duretés des croissants .....	141
4.2. Comparaison quantitative des croissants à iso-dureté à cœur .....	143
4.3. Conclusions de l'analyse à iso-dureté .....	144
<b>5. CONCLUSIONS .....</b>	<b>145</b>

# INTRODUCTION DU CHAPITRE IV

L'objectif de ce chapitre est d'étudier l'impact des conditions de trempe et du matériau sur les déformations. La méthode développée est ainsi appliquée à un grand nombre de croissants, provenant de deux campagnes expérimentales de trempe (Figure IV - 1). A ce titre, l'analyse quantitative synthétise le comportement des croissants des différentes nuances d'acier face aux quatre trempes définies dans ces travaux de thèse. Les valeurs d'amplitudes des phénomènes de déformations sont données entre les géométries obtenues après trempe et celles obtenues après le recuit de détensionnement, c'est à dire l'état précédant immédiatement la trempe.

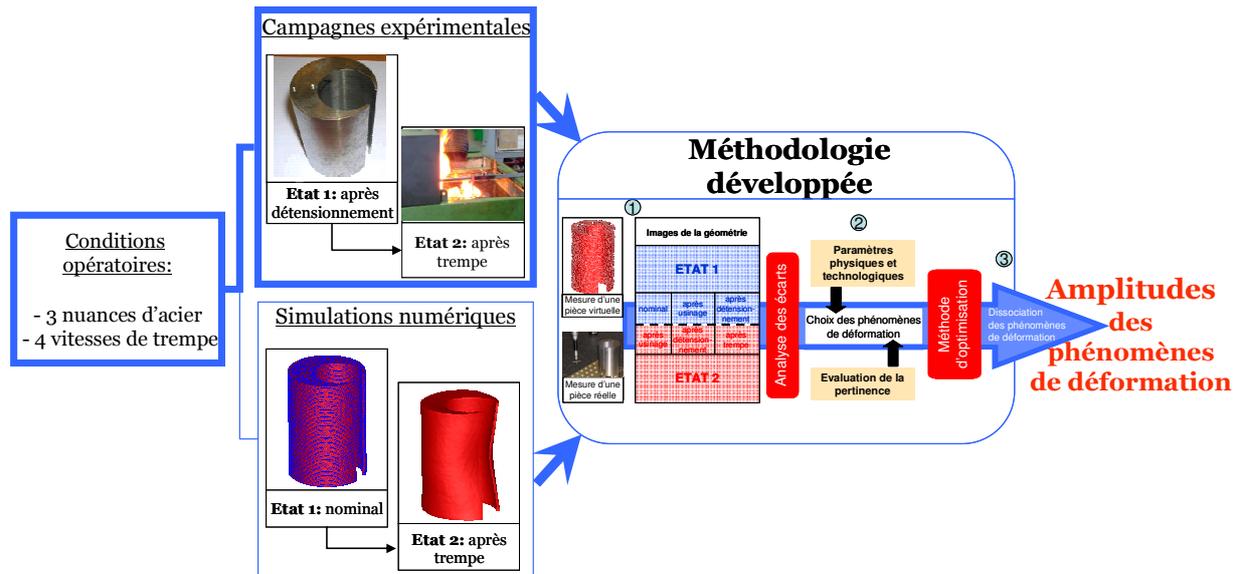


Figure IV - 1 : Etude de l'influence de la drasticité de trempe et du matériau sur les amplitudes des phénomènes de déformations des croissants : essais expérimentaux

La première partie de ce chapitre est tout d'abord la présentation des résultats quantitatifs obtenus à iso-nuance. Le comportement de chaque nuance d'acier face à la drasticité de trempe est ainsi observé.

La deuxième partie est la présentation des résultats à iso-trempe. Cela permet de déterminer la nuance d'acier permettant de minimiser les amplitudes des phénomènes de déformations, pour chacune des quatre trempes effectuées.

Enfin, la troisième partie est l'analyse quantitative réalisée à iso-dureté finale, c'est-à-dire pour les mêmes caractéristiques mécaniques finales. Cela permet de se placer du point de vue du client, qui est demandeur d'une nuance la plus stable possible dimensionnellement face à une trempe donnée, tout en respectant les caractéristiques mécaniques exigées pour la fonctionnalité du produit.

## 1. PREAMBULE

Les résultats quantitatifs des différentes campagnes de trempe huile et gaz menées sur la géométrie du croissant sont présentés dans ce quatrième chapitre. Les amplitudes des phénomènes de déformations sont calculées entre l'état après trempe et l'état précédent immédiatement la trempe, c'est-à-dire le recuit de détensionnement du croissant.

La présentation des résultats reprend la charte graphique exposée dans la partie 5 du chapitre III. Les amplitudes des phénomènes de déformations sont toutes en micromètres. Elles sont associées à un écart-type correspondant à la dispersion des valeurs entre les croissants issus des mêmes campagnes expérimentales.

Il est rappelé que les phénomènes sont exprimés suivant les normales orientées « extérieures matière ». Or, d'un point de vue physique, le sens de la déformation est le même pour les génératrices des deux cylindres. Ainsi, l'effet bombé des génératrices extérieures, observé dans le sens des normales extérieures à la matière, s'accompagne de l'effet bombé des génératrices intérieures, dans le sens des normales intérieures à la matière. Comme les écarts de mesure sont obtenus dans le sens des normales extérieures à la matière, la mise en bombé des génératrices du cylindre intérieur est identifiée par son effet inverse, « l'effet diablo ». Cet effet inverse est reconnaissable dans les résultats quantitatifs par la présence d'un signe négatif. Cette remarque est également valable pour « l'effet lèvres » des génératrices à l'avant des pinces.

En terme de déformations, le comportement des nuances 1, 2 et 3 est ici comparé selon trois regroupements des résultats :

- le premier regroupement permet une analyse à iso-nuance, pour laquelle la sensibilité de chacune des trois nuances face à la drastité de trempe est obtenue ;
- le second est une comparaison à iso-trempe, où cette fois-ci, c'est le choix de la nuance d'acier la mieux adaptée à une drastité de trempe qui est donnée ;
- pour finir, le troisième est réalisé à iso-dureté finale, c'est-à-dire pour les mêmes caractéristiques mécaniques finales, à savoir la même répartition des structures métallurgiques et des duretés au sein du croissant.

La nuance 4 n'apparaît pas dans ces différents regroupements car seule une trempe huile a été réalisée. Cette nuance sera néanmoins utilisée pour l'évaluation des résultats prédictifs

## 2. ANALYSE A ISO-NUANCE

Cette partie correspond au premier regroupement des résultats et permet de caractériser la sensibilité de chacune des trois nuances face au pouvoir refroidissant de la trempe ; la drastité.

### 2.1. Nuance 1

#### 2.1.1. Remarques générales

Les différences d'amplitudes d'une pièce à l'autre sont faibles, pour la plupart des phénomènes de déformations (Figure IV - 2). La variabilité des amplitudes en trempe huile est plus grande qu'en trempe gaz du fait d'une répétabilité moindre due au transfert manuel des croissants du four vers le bac de trempe.

Quelle que soit la trempe, l'amplitude du phénomène de déformation des génératrices est la même, en valeur absolue, non seulement entre le cylindre extérieur et le cylindre

intérieur, mais aussi entre les deux génératrices de part et d'autre de la rainure. Ceci est valable pour le phénomène de mise en bombé/diablo des génératrices de la partie massive et de la rainure et l'effet lèvres des génératrices à l'avant des pinces.

Globalement, l'augmentation de la drasticité de trempe a pour effet l'augmentation des amplitudes de tous les phénomènes. Cependant, pour certains phénomènes, la trempe huile provoque la diminution de l'amplitude par rapport à la trempe gaz 18 bars, de drasticité immédiatement inférieure. C'est le cas des phénomènes d'inclinaison symétrique des plans et de leur ouverture, et de la variation du diamètre des cylindres et de mise en bombé/diablo des génératrices des cylindres et de la rainure.

La diminution d'amplitude des phénomènes globaux que sont l'effet bombé/diablo des génératrices et la variation des diamètres, est accompagnée de l'augmentation des amplitudes des phénomènes locaux, localisés sur les pinces. Il s'agit de l'ouverture des pinces et de leur écartement, de l'effet lèvres et l'ouverture des plans, qui, rappelons-le, est en fait une augmentation de la longueur des génératrices localisées à l'extrémité des pinces. Les phénomènes locaux sont ainsi plus sensibles que les phénomènes globaux à cette forte vitesse de refroidissement, car celle-ci induit des contraintes beaucoup plus grandes dans le faible volume à l'extrémité des pinces.

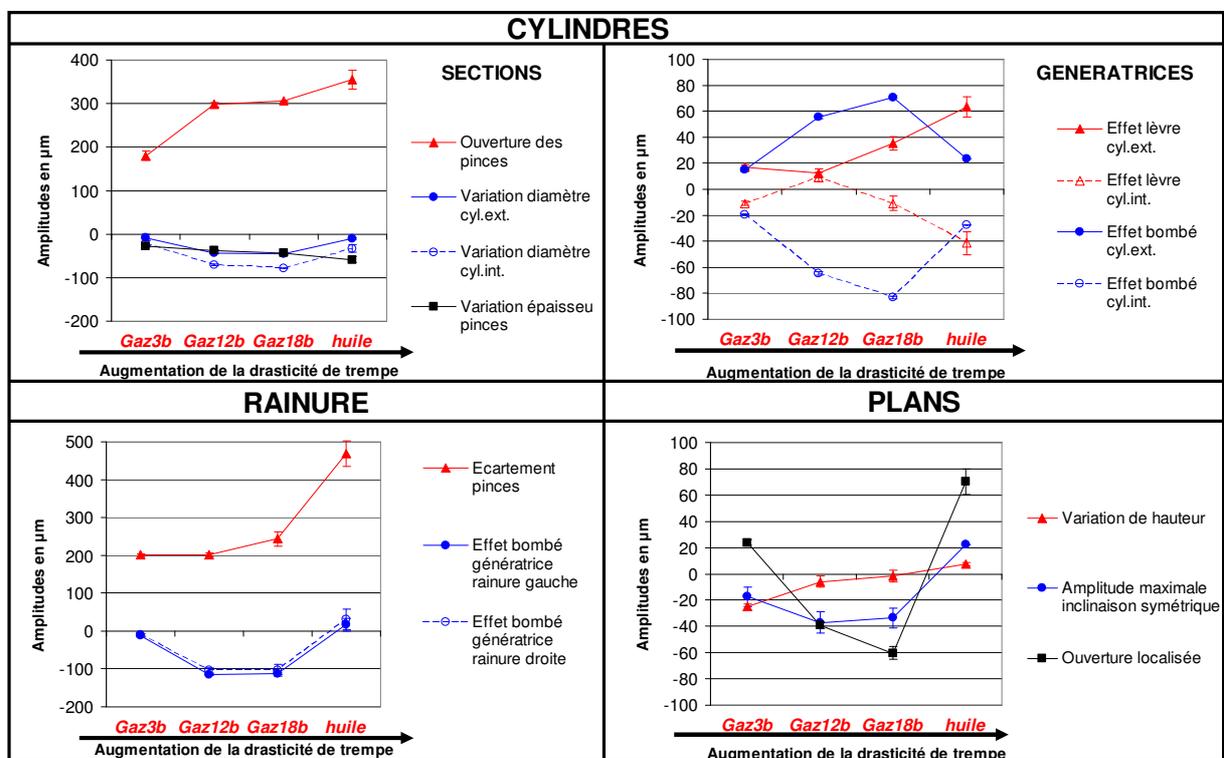


Figure IV - 2 : Influence de la drasticité de trempe sur les amplitudes des phénomènes de déformations des croissants - nuance 1

### 2.1.2. Phénomènes de déformations remarquables

Les phénomènes dont l'amplitude est la plus importante, quelle que soit la drasticité de la trempe, sont l'ouverture des pinces et leur écartement. Leurs amplitudes sont multipliées par un facteur 2 entre la trempe gaz 3 bars et la trempe huile. Les amplitudes maximales, en trempe huile, sont de 355 µm pour le phénomène d'ouverture des pinces et de 468 µm pour l'écartement de la rainure, à l'extrémité des pinces. Les phénomènes d'amplitudes immédiatement inférieures sont ceux de variation des diamètres, d'effet bombé et lèvres des génératrices. Cependant, ils sont loin derrière avec des amplitudes quatre fois plus faibles que celle de l'ouverture des pinces.

La diminution du diamètre du cylindre extérieur est deux fois plus faible que celle du

diamètre intérieur.

La variation d'épaisseur des pinces est négative, ce qui correspond à une diminution de la largeur des sections droites, perpendiculaires à la ligne moyenne d'ouverture des pinces. La diminution maximale est observée en trempe huile, avec  $-59 \mu\text{m}$ .

La variation de la hauteur moyenne du croissant par rapport à l'état détensionné, est négative pour les trempes gaz, avec une diminution maximale de hauteur égale à  $-25 \mu\text{m}$  pour la pression de gaz de 3b, c'est-à-dire la drasticité la plus faible. Après trempe huile, le croissant est légèrement plus grand qu'après détensionnement, avec un gain de hauteur de  $7 \mu\text{m}$ . Concernant les deux autres phénomènes des plans, leur tendance est brusquement changée en trempe huile par rapport aux trempes gaz. Le phénomène d'inclinaison symétrique des plans voit son sens de rotation inversé en trempe huile. Les plans, plutôt fermés en trempes gaz, ce qui correspond à la contraction des génératrices en bout des pinces, s'ouvrent fortement en trempe huile ( $70 \mu\text{m}$ ).

### 2.1.3. Synthèse

Le résumé de la sensibilité des croissants de la nuance 1 face à la drasticité de trempe est le suivant :

- l'ouverture des pinces et l'écartement de la rainure sont les phénomènes dont l'amplitude est la plus **significative**, quelle que soit la drasticité ;
- les phénomènes liés à la **variation volumique** montre globalement une contraction volumique en trempes gaz et l'inverse en trempe huile. En effet, la diminution des diamètres des cylindres et de la hauteur ont un impact plus important que la variation d'écartement de la rainure ;
- les génératrices des cylindres sont toujours déformées en **bombé**, de **même amplitude** (comprise dans la marge d'erreur) ;
- les deux génératrices de la rainure sont en **diabolo**, de même amplitude, d'où une **symétrie** de l'effet ;
- les amplitudes des **phénomènes globaux** augmentent avec la drasticité, sauf en trempe huile : il s'agit de la variation des diamètres, de l'effet bombé des génératrices, de l'ouverture des pinces et de la variation de hauteur ;
- les amplitudes des **phénomènes locaux** augmentent toujours avec la drasticité de trempe : effet lèvres, variation d'épaisseur des pinces, écartement de la rainure, ouverture des plans et leur inclinaison symétrique ;
- les trempes gaz sont un effet plus homogène sur les phénomènes de déformations par rapport à la trempe huile : la **trempe 3 bars** est la plus favorable pour minimiser l'amplitude de l'ensemble des phénomènes de déformations pour cette nuance, la **trempe huile** est la plus défavorable ;
- pour finir, l'analyse des écarts résiduels confirme l'efficacité de l'optimisation, comme c'est le cas pour les deux croissants utilisés pour la trempe 3 bars (Figure IV - 3). Environ **90%** des écarts de mesure ont été expliqués avec les phénomènes de déformations utilisés. Les 10% restants correspondent à la non-prise en compte de la variabilité de l'amplitude des phénomènes locaux, aux points aberrants et aux bruits de mesure.

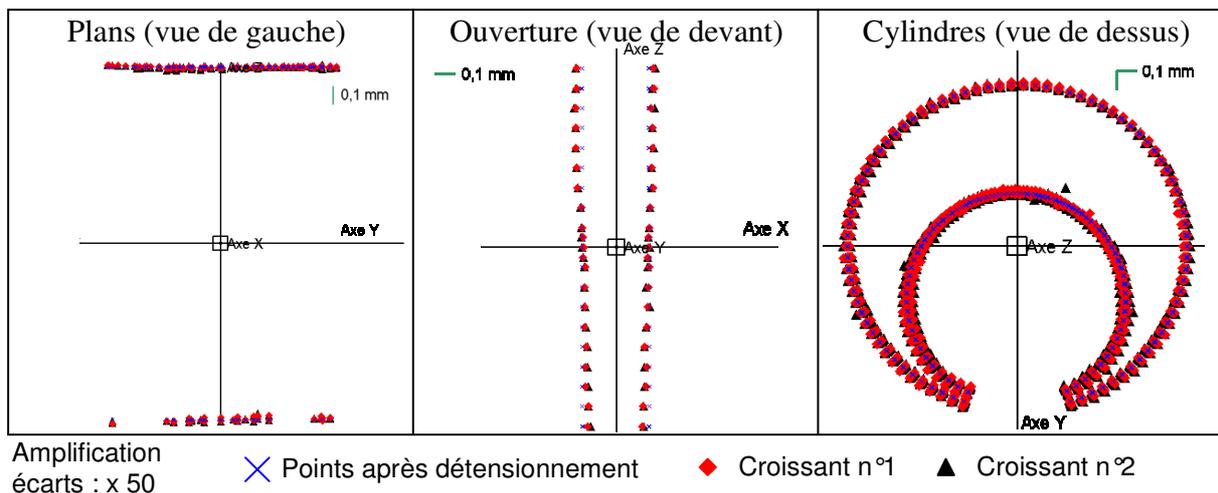


Figure IV - 3 : Ecartés résiduels après optimisation, nuance 1, trempe 3b

## 2.2. Nuance 2

### 2.2.1. Remarques générales

Les remarques générales sont ici les mêmes que celles données pour la nuance 1. Ainsi, l'analyse de la Figure IV - 4 révèle que :

- la variabilité des amplitudes des phénomènes de déformations est faible ;
- les phénomènes de déformations présents sur les cylindres extérieur et intérieur ainsi que sur la rainure sont de mêmes amplitudes ;
- l'augmentation de la drasticité de trempe a principalement pour effet la hausse des amplitudes des phénomènes de déformations à l'exception de certains phénomènes en trempe huile. Ces phénomènes, qui ne sont pas les mêmes que pour la nuance 1, sont la variation d'épaisseur des pinces et l'effet lèvres ;
- les amplitudes des phénomènes sont plus faibles que celles de la nuance 1.

### 2.2.2. Phénomènes de déformations remarquables

L'ouverture des pinces et leur écartement sont, à eux deux, les phénomènes dont l'amplitude est la plus grande, quelle que soit la drasticité de trempe. Les amplitudes maximales, obtenues en trempe huile, sont de 51  $\mu\text{m}$  pour l'ouverture des pinces et 172  $\mu\text{m}$  pour l'écartement de la rainure. Ces amplitudes sont largement inférieures à celles obtenues pour la nuance 1 en trempe huile, de respectivement 86% et 63%. Par ailleurs, le phénomène d'ouverture des pinces est d'évolution quasi constante en fonction de la drasticité, alors que l'écartement de la rainure augmente peu entre la trempe 3 bars et la trempe huile (+67%).

Les phénomènes d'amplitudes immédiatement inférieures sont l'effet lèvres, l'effet bombé et diabolo des génératrices des cylindres et de la rainure, et la variation de hauteur, pour finir. Les amplitudes de ces phénomènes sont proches de celles de l'ouverture et de l'écartement des pinces.

L'amplitude de l'effet lèvres des génératrices à l'extrémité des pinces diminue fortement en trempe huile. Dans le même temps, les génératrices de la partie massive, initialement bombées en trempes gaz, se déforment en diabolo en trempe huile, dont l'amplitude est supérieure à celle de l'effet lèvres. Ce comportement est l'inverse de celui observé avec la nuance 1.

Les diamètres sont quasiment inchangés en trempes gaz, tandis qu'ils augmentent en trempe huile, de 61  $\mu\text{m}$  pour l'extérieur et 24  $\mu\text{m}$  pour l'intérieur.

Une faible diminution d'épaisseur des pinces est observée en trempe gaz, la diminution maximale étant égale à -85  $\mu\text{m}$  en trempe huile.

Les trois phénomènes de déformations des plans sont de faibles amplitudes en trempes gaz, la géométrie des plans est donc proche de l'état détensionné. En trempe huile, ces trois phénomènes voient leur amplitude croître fortement. L'ouverture des plans est conséquente, avec un déplacement vertical maximal des points des plans de 117  $\mu\text{m}$ . L'inclinaison des plans suit celle de l'ouverture : cela aboutit à une augmentation de la hauteur de 25  $\mu\text{m}$ .

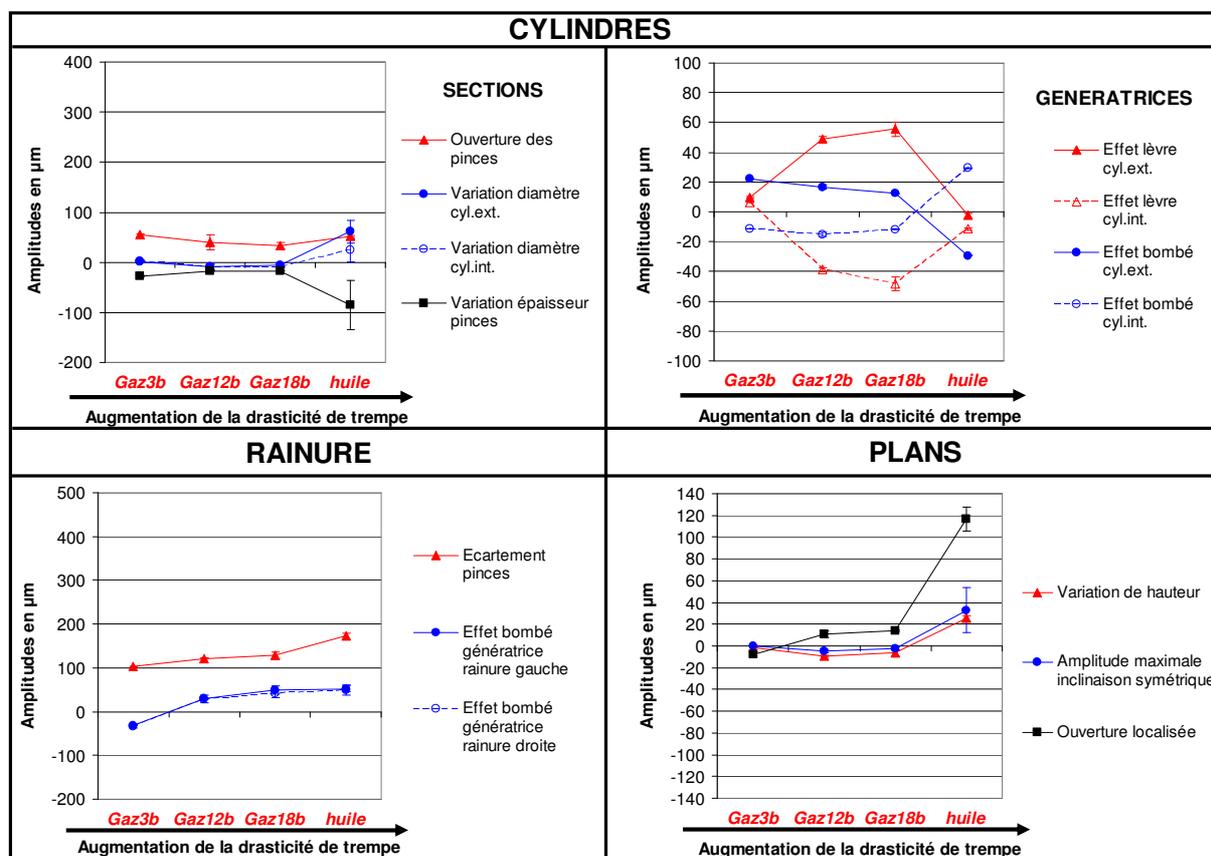


Figure IV - 4 : Influence de la drasticité de trempes sur les amplitudes des phénomènes de déformations des croissants - nuance 2

### 2.2.3. Synthèse

Le résumé de la sensibilité des croissants de la nuance 2 face à la drasticité de trempes est le suivant :

- l'ouverture des pinces et l'écartement de la rainure sont les phénomènes dont l'amplitude est la plus **significative**, quelle que soit la drasticité ;
- le **volume** est globalement inchangé en trempes gaz, tandis qu'il augmente en trempe huile ;
- en trempes gaz, les génératrices des cylindres sont déformées en **bombé** de **même amplitude**. Cet effet s'inverse en trempe huile avec leur mise en diabolo ;
- les deux génératrices de la rainure sont en **bombé** de même amplitude, sauf en trempe gaz 3 bars où elles sont en diabolo ;
- en trempes gaz, les amplitudes des **phénomènes globaux** sont très faibles et d'amplitude constante : pas de variation des diamètres et de la hauteur et faible amplitude (inférieure à 30  $\mu\text{m}$ ) pour la mise en bombé des génératrices. En trempe huile, les amplitudes de ces phénomènes globaux augmentent quelque peu, mais restent inférieures à 60  $\mu\text{m}$  ;
- les amplitudes des **phénomènes locaux** augmentent avec la drasticité de trempes, à l'exception de l'effet lèvres ;

- les trempes gaz ont moins d'impact sur les phénomènes de déformations par rapport à la trempe huile. Par ailleurs, l'augmentation de la pression de gaz n'entraîne pas forcément une augmentation des amplitudes des phénomènes. En effet, l'ouverture des pinces, leur variation d'épaisseur et l'effet bombé des génératrices sont minimales pour la pression de 18 bars ;
- la **trempe gaz 3 bars** est la plus adaptée pour minimiser les déformations de cette nuance, la **trempe huile** est la plus défavorable ;
- pour finir, l'analyse des écarts résiduels confirme l'efficacité de l'optimisation. Environ **92%** des écarts de mesure ont été expliqués avec les phénomènes de déformations utilisés.

En comparaison avec la nuance 1, quelques différences de comportements face à la drasticité sont relevées :

- les amplitudes des phénomènes de déformations sont **moins grandes**, notamment pour les phénomènes d'ouverture des pinces et d'écartement de la rainure ;
- le phénomène de déformation des génératrices de la partie massive est inversé en trempe huile, où elles sont en diabolos pour la nuance 2 ;
- les deux génératrices de la nuance 2 sont principalement en bombé tandis qu'elles sont en diabolos pour la nuance 1 ;
- le volume en trempes gaz est quasiment le même que celui obtenu après détensionnement, alors qu'il diminue pour la nuance 1.

## 2.3. Nuance 3

### 2.3.1. Remarques générales

Les remarques générales rejoignent celles données pour les deux nuances précédentes. Ainsi, l'analyse de la Figure IV - 5 révèle que :

- la variabilité des amplitudes est faible ;
- les phénomènes de déformations présents sur les cylindres extérieur et intérieur ainsi que sur la rainure sont de mêmes amplitudes ;
- même si la tendance est parfois moins nette que pour les deux nuances précédentes, l'augmentation de la drasticité de trempe a globalement pour effet la hausse des amplitudes des phénomènes de déformations. Les exceptions sont les phénomènes d'effet lèvre et de bombé des génératrices de la partie massive, en trempe huile ;
- les amplitudes des phénomènes de déformations de cette nuance se situe à mi-chemin entre celles de la nuance 1 (les plus élevées) et celles de la nuance 2 (les plus faibles).

### 2.3.2. Phénomènes de déformations remarquables

L'évolution des phénomènes de déformations de cette nuance face à la drasticité est majoritairement la même que pour la nuance 1.

Les phénomènes d'ouverture des pinces et leur écartement sont toujours ceux d'amplitude la plus grande, quelle que soit la drasticité de trempe. Les amplitudes maximales, obtenues en trempe huile, sont de 255  $\mu\text{m}$  pour l'ouverture des pinces et 254  $\mu\text{m}$  pour l'écartement de la rainure. Elles sont inférieures à celles obtenues pour la nuance 1 en trempe huile, de respectivement 28% et 46%.

Les phénomènes d'amplitudes immédiatement inférieures sont l'effet lèvre, l'effet bombé et diabolos des génératrices des cylindres et de la rainure, et la variation de hauteur, pour finir. Cependant, comme pour la nuance 1, les amplitudes de ces phénomènes sont en moyenne inférieures à 40  $\mu\text{m}$ , ce qui est près de quatre fois moins que les amplitudes d'ouverture des pinces et leur écartement.

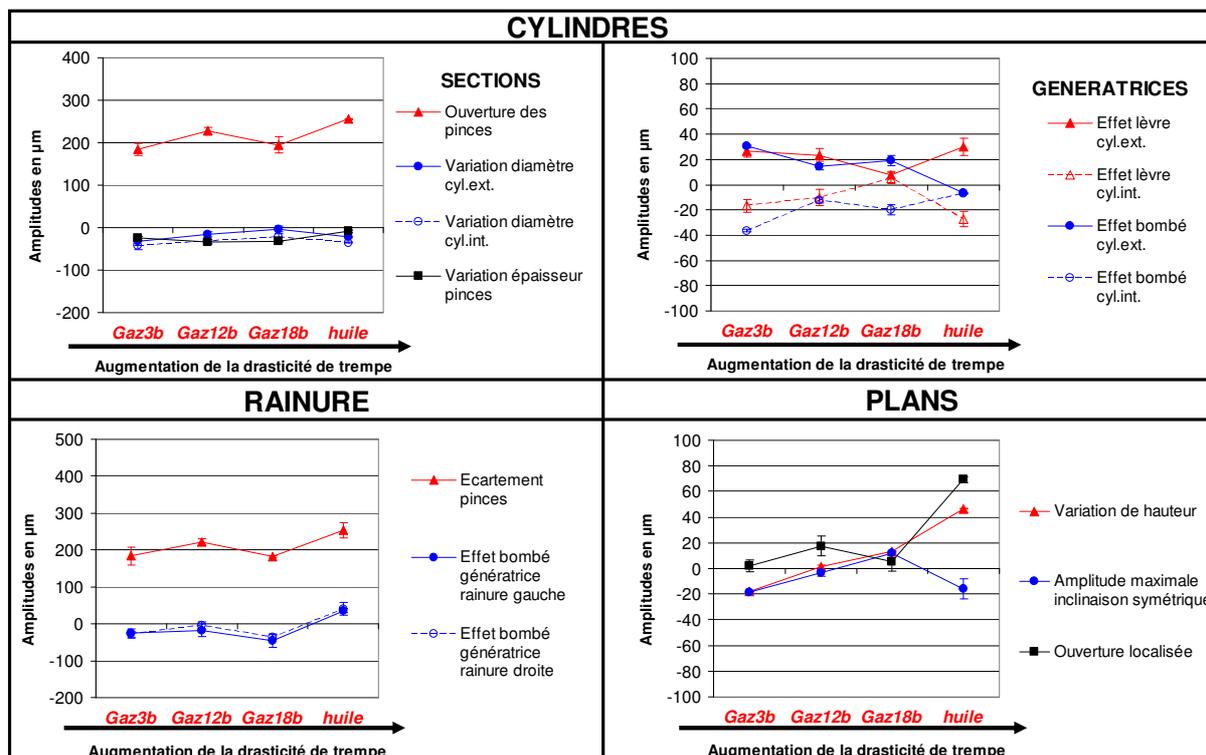


Figure IV - 5 : Influence de la drasticité de trempage sur les amplitudes des phénomènes de déformations des croissants - nuance 3

En trempes gaz, certains phénomènes ont une amplitude qui fluctue avec l'augmentation de la drasticité. La trempage gaz 12 bars est à l'origine d'une amplitude maximale des phénomènes d'ouverture des pinces, d'écartement et de mise en diabolos des deux génératrices de la rainure et de l'ouverture des plans. Cette même trempage provoque une amplitude minimale pour la mise en bombé des génératrices de la partie massive.

Comme pour la nuance 1, l'amplitude de l'effet lèvres des génératrices à l'extrémité des pinces augmente fortement en trempage huile tandis que l'amplitude de l'effet bombé des génératrices de la partie massive diminue dans le même temps. La diminution est ici telle que les génératrices sont quasiment rectilignes en trempage huile.

Les autres points communs avec la nuance 1 sont les suivants. Premièrement, la diminution du diamètre du cylindre extérieur est deux fois plus faible que celle du diamètre intérieur, quelle que soit la drasticité. Deuxièmement, l'épaisseur des pinces diminue avec une baisse maximale de  $-35 \mu\text{m}$  en trempage gaz 12 bars. Troisièmement, les phénomènes d'inclinaison symétrique des plans et l'ouverture localisée changent brusquement de tendance en trempage huile. En effet, l'inclinaison symétrique change de sens de rotation tandis que l'ouverture des plans augmente franchement et vaut  $69 \mu\text{m}$ .

Cependant, une différence de tendance est la variation de la hauteur moyenne du croissant par rapport à l'état détensionné. Dans le cas de la nuance 3, dès la pression de 12 bars, le croissant a une hauteur plus grande par rapport à celle après détensionnement. L'augmentation maximale est obtenue en trempage huile et vaut  $47 \mu\text{m}$ .

### 2.3.3. Synthèse

Le résumé de la sensibilité des croissants de la nuance 3 face à la drasticité de trempage est pratiquement le même que pour la nuance 1 :

- l'ouverture des pinces et l'écartement de la rainure sont les phénomènes dont l'amplitude est la plus **significative**, quelle que soit la drasticité ;
- le **volume** diminue globalement en trempages gaz, tandis qu'il augmente en trempage huile ;

- en trempes gaz, les génératrices des cylindres sont déformées en **bombé**, de **même amplitude**. Cet effet est quasiment nul en trempe huile ;
- les deux génératrices de la rainure sont en **diabolo**, de même amplitude, sauf en trempe huile où elles se déforment en bombé ;
- les amplitudes des **phénomènes globaux** augmentent avec la drasticté, sauf en trempe huile : il s'agit de la variation des diamètres, de l'effet bombé des génératrices, de l'ouverture des pinces et de la variation de hauteur ;
- les amplitudes des **phénomènes locaux**, à l'exception de l'effet lèvre, augmentent avec la drasticté de trempe : variation d'épaisseur des pinces, écartement de la rainure, ouverture des plans et leur inclinaison symétrique ;
- les trempes gaz ont moins d'impact sur les phénomènes de déformations par rapport à la trempe huile. Cependant, la pression de 12 bars entraîne plus de déformations que les pressions de 3 bars et 18 bars ;
- la **trempe gaz 3 bars** est la plus favorable pour minimiser les déformations de cette nuance, la **trempe huile** est la plus défavorable ;
- pour finir, l'analyse des écarts résiduels confirme l'efficacité de l'optimisation. Environ **91%** des écarts de mesure ont été expliqués avec les phénomènes de déformations utilisés.

#### 2.4. Conclusions de l'analyse à iso-nuance

Les remarques suivantes ressortent de cette analyse et sont valables pour les trois nuances étudiées :

- l'ouverture des pinces et l'écartement de la rainure sont les phénomènes les plus **significatifs**, quelle que soit la drasticté ;
- les amplitudes des phénomènes de déformations **augmentent** globalement avec la drasticté de trempe. Cependant, la valeur de drasticté de la trempe huile semble être une limite au-delà de laquelle les tendances peuvent s'inverser. C'est notamment le cas des phénomènes locaux, situés en bout des pinces, là où l'épaisseur du croissant est la plus faible, et qui sont fortement sensibles à l'augmentation de la vitesse de refroidissement ;
- la variation homogène des dimensions des croissants est la plus grande en trempe huile et elle correspond à une augmentation de volume. Une quantification précise est fournie au chapitre V de ce mémoire de thèse ;
- les déformations sont de **mêmes amplitudes** pour les cylindres extérieur et intérieur ;
- les déformations des deux génératrices de l'ouverture sont **symétriques** ;
- la **trempe gaz 3 bars** est la plus favorable pour minimiser les déformations, la **trempe huile** est la plus défavorable ;
- les déformations en trempe gaz sont plus homogènes et d'amplitudes moindres qu'en trempe huile, ce qui confirme les études présentes dans la littérature **[KES06] [ROS06]**.

Pour conclure, les nuances 1 et 3 comportent donc beaucoup de similitudes quant à l'évolution des amplitudes des phénomènes de déformations, face à la drasticté de trempe. Les valeurs sont toutefois quelque peu différentes, surtout pour les deux phénomènes les plus significatifs que sont l'ouverture des pinces et leur écartement. A en juger par les valeurs d'amplitudes de l'ensemble des phénomènes de déformations, les croissants de la nuance 1 sont les plus sensibles aux différentes trempes étudiées. A l'opposé, les croissants de la nuance 2 sont les moins sensibles. Il reste à confirmer ces conclusions avec l'analyse suivante, effectuée à iso-trempe.

### 3. ANALYSE A « ISO-TREMPE »

Ce deuxième regroupement des résultats permet de déterminer la nuance d'acier la moins sensible pour chacune des quatre gammes de refroidissement du croissant. Il s'agit en fait d'un autre point de vue, obtenu à partir de l'analyse à iso-nuance. L'ensemble des remarques émises dans la partie précédente sont donc toujours valables, notamment l'augmentation de l'amplitude des phénomènes de déformations avec l'augmentation de la drasticité.

#### 3.1. Trempe gaz 3b

En observant globalement les amplitudes des phénomènes de déformations (Figure IV - 6), il ressort que la **nuance 2** est la moins sensible à la trempe gaz 3 bars. Les nuances 1 et 3 ont quasiment la même sensibilité, car les amplitudes des phénomènes de déformations sont très proches.

Concernant les phénomènes de déformations des cylindres, il est intéressant de noter les points suivants :

- l'ouverture des pinces est la plus faible pour la nuance 2 avec une amplitude de 55  $\mu\text{m}$ , soit 4 fois moins que pour les deux autres nuances. L'ouverture est plus grande pour la nuance 3 par rapport à la nuance 1 ;
- la variation des diamètres est nulle pour la nuance 2 alors que ceux-ci diminuent en moyenne de 15  $\mu\text{m}$  pour la nuance 1 et 35  $\mu\text{m}$  pour la nuance 3 ;
- la diminution d'épaisseur des pinces est la même pour les trois nuances (-28  $\mu\text{m}$ ) ;
- les déformations des génératrices, que ce soit l'effet lèvre ou l'effet bombé, sont faibles, les amplitudes de ces phénomènes étant inférieures à 40  $\mu\text{m}$ . L'effet lèvre est le plus faible pour la nuance 2 (8  $\mu\text{m}$ ), tandis que l'effet bombé est le plus petit pour la nuance 1 (17  $\mu\text{m}$ ).

Pour les phénomènes de déformations de la rainure et des plans, les remarques sont les suivantes :

- l'écartement des pinces au niveau de la rainure est le plus faible pour la nuance 2 avec une amplitude de 103  $\mu\text{m}$ , soit 2 fois moins que pour les deux autres nuances. L'écartement est plus grand pour la nuance 1 par rapport à la nuance 3 ;
- l'amplitude de la mise en bombé des deux génératrices de la rainure est la plus faible pour la nuance 1 (10  $\mu\text{m}$ ). L'amplitude est trois fois plus grande pour la nuance 3, ce qui la place en dernière position ;
- la variation de hauteur, l'inclinaison symétrique et l'ouverture des plans n'existent quasiment pas pour la nuance 2. A l'opposé, ces trois phénomènes sont d'amplitudes maximales pour la nuance 1 avec respectivement, -25  $\mu\text{m}$ , -17  $\mu\text{m}$  et 24  $\mu\text{m}$ .

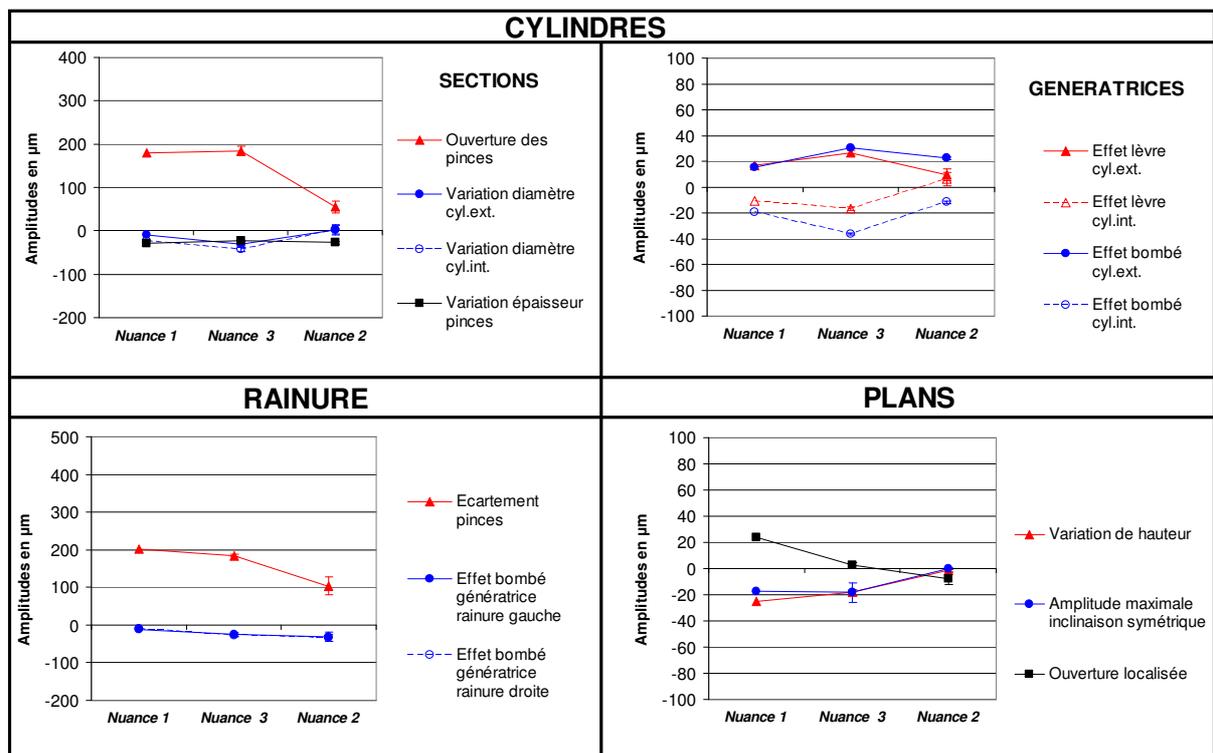


Figure IV - 6 : Influence de la nuance d'acier sur les amplitudes des phénomènes de déformations des croissants en trempé gaz 3 bars

### 3.2. Trempe gaz 12b

L'observation de la nuance la moins sensible est moins directe que pour la trempé gaz à 3 bars. En effet, si les phénomènes d'ouverture et d'écartement des pinces sont de faibles amplitudes pour la nuance 2, ce n'est pas le cas des phénomènes de déformations des génératrices des cylindres. Une comparaison entre nuance est donc effectuée phénomène par phénomène.

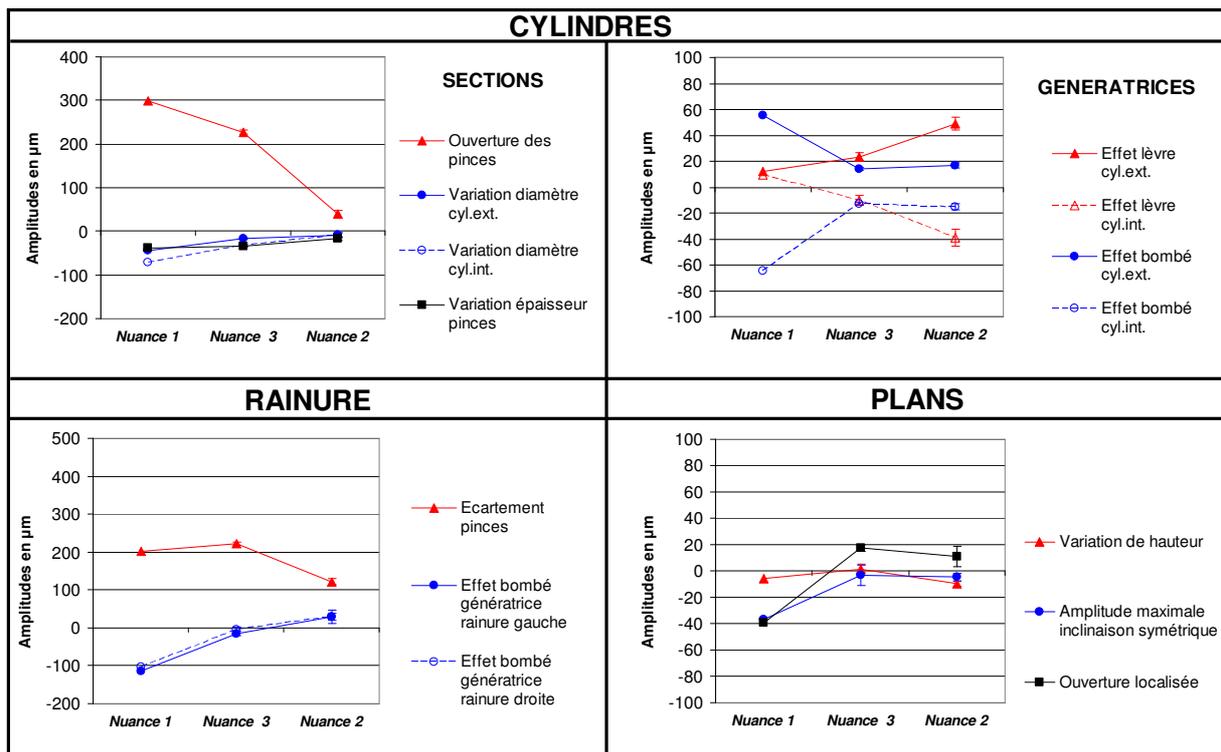
Concernant les phénomènes de déformations des cylindres, les observations sont les suivantes :

- l'ouverture des pinces est la plus faible pour la nuance 2 avec une amplitude de 39  $\mu\text{m}$ , qui est plus faible que celle obtenue avec la pression de 3 bars. L'amplitude de l'ouverture est 6 fois plus élevée pour la nuance 3 avec 227  $\mu\text{m}$  et 8 fois plus pour la nuance 1, avec 298  $\mu\text{m}$ .
- avec -9  $\mu\text{m}$ , la variation des diamètres est quasiment nulle pour la nuance 2. Ceux-ci diminuent en moyenne de 24  $\mu\text{m}$  pour la nuance 3 et 58  $\mu\text{m}$  pour la nuance 1 ;
- la diminution d'épaisseur des pinces est la plus faible pour la nuance 2 (-17  $\mu\text{m}$ ), et vaut -37  $\mu\text{m}$  pour les deux autres nuances ;
- avec une amplitude de 14  $\mu\text{m}$ , la mise en bombé des génératrices est minimale pour la nuance 3 et avec 60  $\mu\text{m}$ , elle est maximale pour la nuance 1 ;
- l'amplitude de l'effet lèvres est la plus petite pour la nuance 1 (10  $\mu\text{m}$ ) et la plus élevée pour la nuance 2 (45  $\mu\text{m}$ ).

Pour les phénomènes de déformations de la rainure et des plans, les remarques sont les suivantes :

- l'écartement des pinces est minimal pour la nuance 2 avec une amplitude de 121  $\mu\text{m}$ , soit à peine plus qu'en trempé gaz 3 bars. L'écartement est environ 2 fois plus élevé pour les deux autres nuances : 202  $\mu\text{m}$  pour nuance 1 et 222  $\mu\text{m}$  pour la 3 ;

- l'amplitude du phénomène de déformation des génératrices de la rainure est la plus faible pour la nuance 3, avec une mise en diabolo de 10  $\mu\text{m}$ . Les génératrices sont en diabolo de forte amplitude (-110  $\mu\text{m}$ ) pour la nuance 1, tandis qu'elles sont faiblement bombées (29  $\mu\text{m}$ ) pour la nuance 2 ;
- la variation de hauteur et l'inclinaison symétrique sont nulles pour la nuance 3. Une faible diminution de hauteur, moins de 10  $\mu\text{m}$ , est observée pour les deux autres nuances. L'inclinaison symétrique des plans est maximale pour la nuance 1, avec un déplacement vertical maximal des points en bout de bras de levier de -37  $\mu\text{m}$  ;
- les plans s'ouvrent pour les nuances 3 et 2, d'une amplitude similaire égale à 12  $\mu\text{m}$  et qui est comprise dans la plage d'erreur. Pour la troisième nuance, les plans se ferment, d'une amplitude de -39  $\mu\text{m}$ .



**Figure IV - 7 : Influence de la nuance d'acier sur les amplitudes des phénomènes de déformations des croissants en trempé gaz 12 bars**

Compte tenu de ces remarques, il apparaît que la nuance 2 permet de minimiser fortement les phénomènes que sont l'ouverture des pinces et leur écartement, la variation des diamètres des cylindres et la mise en bombé de leurs génératrices. Néanmoins, elle se révèle plus sensible à d'autres phénomènes que sont l'effet lèvres, la déformation des deux génératrices de la rainure et la variation de hauteur.

### 3.3. Trempe gaz 18b

Par rapport à la pression de 12 bars, l'utilisation de cette pression supérieure n'entraîne qu'une faible augmentation des amplitudes des phénomènes de déformations (Figure IV - 8). Les remarques et les conclusions données dans le paragraphe précédent s'appliquent également dans ce cas.

La nuance 2 est encore une fois la moins sensible à l'ensemble des phénomènes de déformations, même si certains d'entre eux sont mieux minimisés par la nuance 3. Il s'agit de l'effet lèvres, de l'effet bombé des génératrices de la rainure, de la variation de hauteur des

plans et leur inclinaison symétrique.

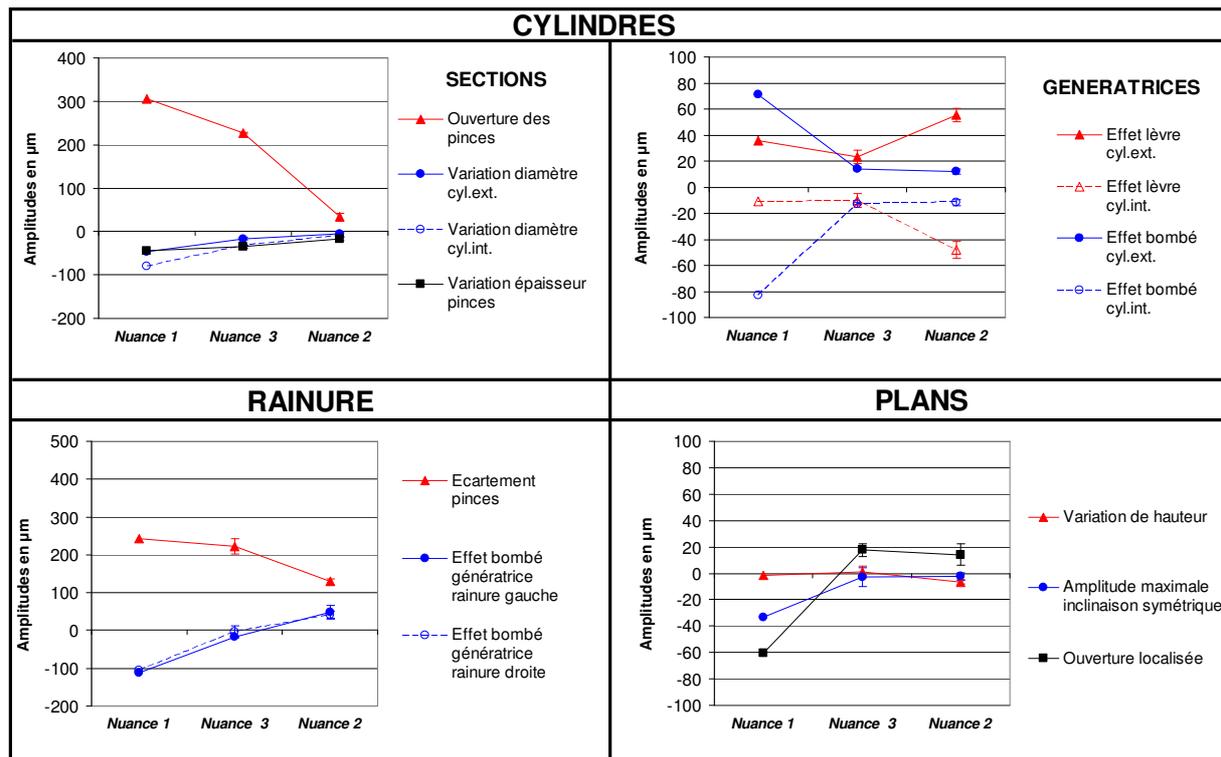


Figure IV - 8 : Influence de la nuance d'acier sur les amplitudes des phénomènes de déformations des croissants en trempé gaz 18 bars

### 3.4. Trempe huile

Tout comme pour les trempes gaz, les amplitudes des phénomènes d'ouverture des pinces et de leur écartement sont, de loin, les plus faibles avec la nuance 2 (Figure IV - 9).

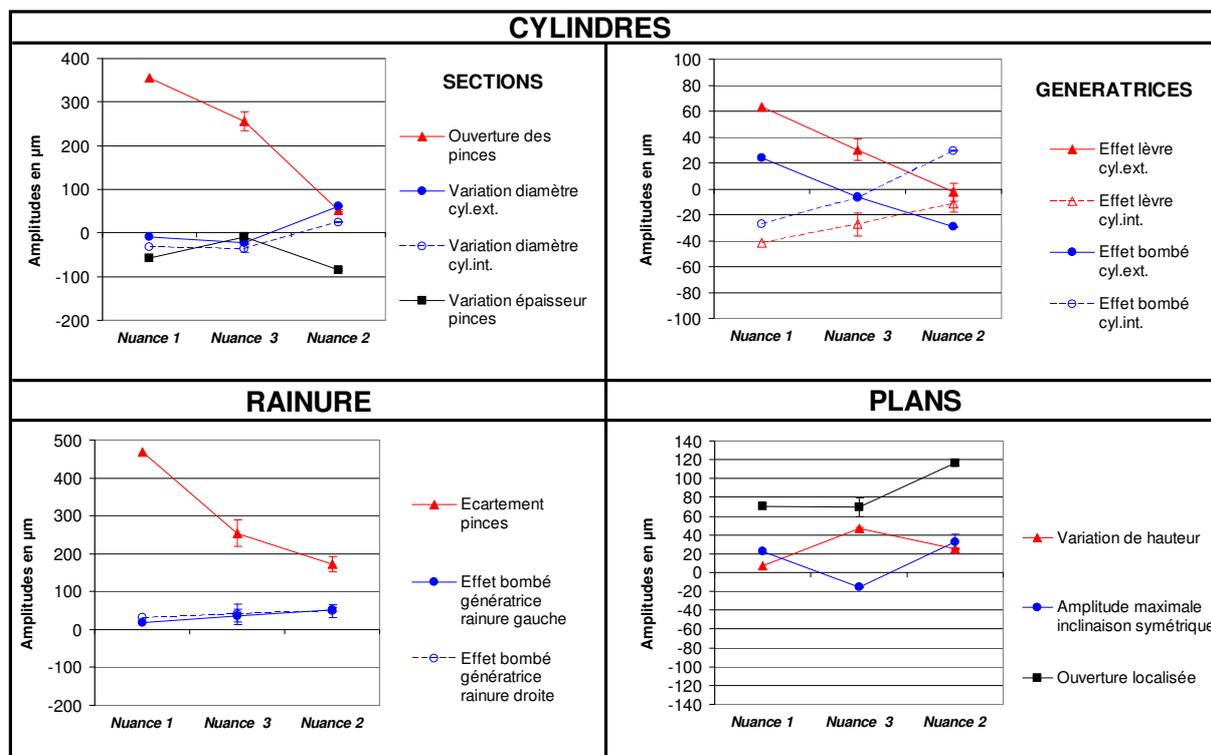
Concernant les autres phénomènes de déformations des croissants, la supériorité de la nuance 2 est sujette à discussion. En effet, une rapide comparaison des amplitudes de ces autres phénomènes, obtenues en trempé huile avec celles de la trempé gaz 18 bars, révèle une inversion de leurs tendances. C'est le cas de la variation d'épaisseur des pinces, de la variation des diamètres, de l'effet lèvres et bombé des génératrices des cylindres et des trois phénomènes des plans. Comme pour les trempes gaz, la comparaison des amplitudes est réalisée phénomène par phénomène.

Concernant les phénomènes de déformations des cylindres, les observations sont les suivantes :

- l'ouverture des pinces est la plus faible pour la nuance 2 avec une amplitude de 51  $\mu\text{m}$ , cette valeur étant constante quelle que soit la drasticité. Ce qui n'est pas le cas des deux autres nuances, dont l'amplitude a augmenté par rapport à la trempé gaz 18 bars. L'amplitude de l'ouverture est 5 fois plus élevée pour la nuance 3 avec 255  $\mu\text{m}$  et 7 fois plus pour la nuance 1, avec 355  $\mu\text{m}$  ;
- par rapport aux trempes gaz, la variation des diamètres n'est plus nulle pour la nuance 2 et ceux-ci augmentent en moyenne de 43  $\mu\text{m}$ . Avec respectivement une amplitude de -21  $\mu\text{m}$  et -29  $\mu\text{m}$  pour les nuances 1 et 3, les diamètres diminuent et les amplitudes, en valeurs absolues, sont plus faibles que pour la nuance 2 ;
- la diminution d'épaisseur des pinces est la plus grande pour la nuance 2 (-85  $\mu\text{m}$ ) et la plus faible pour la nuance 3 (-9  $\mu\text{m}$ ) ;
- les phénomènes de déformations des génératrices extérieures en intérieures de

la partie massive des croissants des trois nuances sont totalement différents. Celles des nuances 1 et 2 se déforment physiquement toutes dans le même sens ; en bombé. Pour la nuance 3, les génératrices extérieures et intérieures se déforment dans un sens physiquement opposé<sup>10</sup>, les premières sont en diabolo et les secondes en bombé. Les valeurs absolues des amplitudes sont les plus faibles pour la nuance 3 (7  $\mu\text{m}$ ), suivie des nuances 1 (25  $\mu\text{m}$ ) et 2 (29  $\mu\text{m}$ ).

- la valeur absolue de l'amplitude de l'effet lèvres est la plus petite pour la nuance 2 (7  $\mu\text{m}$ ) et la plus élevée pour la nuance 1 (52  $\mu\text{m}$ ).



**Figure IV - 9 : Influence de la nuance d'acier sur les amplitudes des phénomènes de déformations des croissants en trempé huile**

Pour les phénomènes de déformations de la rainure et des plans, les remarques sont les suivantes :

- l'écartement des pinces est minimal pour la nuance 2 avec une amplitude de 172  $\mu\text{m}$ . L'écartement est 1,5 fois plus élevé pour la nuance 3 et 3 fois plus grand pour la nuance 1 ;
- l'amplitude du phénomène de déformation des génératrices de la rainure est la plus faible pour la nuance 1, avec une mise en bombé de 23  $\mu\text{m}$ . L'amplitude maximale est obtenue avec la nuance 2 (50  $\mu\text{m}$ ) ;
- la hauteur des croissants des trois nuances augmente par rapport à leur valeur après détensionnement, l'amplitude maximale étant atteinte par la nuance 3 avec 47  $\mu\text{m}$ , la minimale avec la nuance 1 avec 7  $\mu\text{m}$  ;
- la valeur absolue de l'inclinaison symétrique des plans est quasiment la même pour les trois nuances, avec une valeur d'une vingtaine de micromètres ;
- les plans s'ouvrent pour les trois nuances, l'amplitude étant la plus faible pour les nuances 1 et 3 (70  $\mu\text{m}$ ) et la plus élevée pour la dernière (117  $\mu\text{m}$ ).

La nuance 2 est à nouveau la moins sensible à la majorité des phénomènes de

<sup>10</sup> Ce sens n'est pas celui de l'identification. Le lecteur peut se référer au troisième paragraphe de l'introduction de ce chapitre pour de plus amples explications.

déformations. Néanmoins, la nuance 3 est plus adéquate pour minimiser les phénomènes de mise en bombé des génératrices des cylindres et la variation d'épaisseur des pinces. La nuance 1 convient mieux, quant à elle, pour minimiser la variation des diamètres des cylindres, la mise en bombé des deux génératrices de la rainure et les trois phénomènes de déformations des plans.

### 3.5. Conclusions de l'analyse à iso-trempe

Les croissants des nuances 1 et 3 se déforment globalement plus que ceux de la nuance 2, et ce quelle que soit la drasticité de trempe. C'est clairement le cas pour les phénomènes d'ouverture des pinces et de l'écartement de la rainure. Néanmoins, selon les trempes considérées, ces deux nuances s'avèrent plus adaptées :

- en trempe huile, pour minimiser le changement volumique homogène, avec les phénomènes de variation des diamètres des cylindres et la variation de hauteur du croissant ;
- en trempes gaz 12 bars, 18 bars et huile, pour minimiser les déformations bombé ou diabolé des génératrices des cylindres et de la rainure, et les phénomènes locaux aux extrémités des pinces, comme l'effet lèvre et l'ouverture des plans.

La littérature industrielle souligne que l'acier de cémentation de nuance 2 est de moyenne trempabilité et de constance dimensionnelle face au traitement thermique [STR\*\*] [THY\*\*]. C'est ce qui est vérifié, dans cette étude, sur la géométrie du croissant. La nuance 2 est la plus apte à minimiser la déformation globale de la géométrie du croissant, quelle que soit la drasticité de la trempe. Par ailleurs, les amplitudes de la majorité des phénomènes de déformations de la nuance 2 n'augmentent que peu, malgré l'augmentation des vitesses de refroidissement en trempes gaz. Les phénomènes liés à la variation de volume, à savoir principalement la variation des diamètres et de la hauteur, sont quasiment nuls. L'augmentation des amplitudes est beaucoup plus sensible en trempe huile et s'accompagne d'une augmentation du volume.

Cependant, ce classement favorable à la nuance 2 est biaisé par le fait que cette nuance n'est pas au même état structural final que les deux autres nuances. C'est ce que prouve l'analyse à iso-dureté, présentée dans la partie suivante, et dans laquelle il est observé que la trempabilité<sup>11</sup> de la nuance 2 est beaucoup moins bonne que celles des autres nuances étudiées.

## 4. ANALYSE A ISO-DURETE

Dans cette partie, il s'agit de comparer les amplitudes des phénomènes de déformations entre les croissants à mêmes propriétés mécaniques finales. Le critère retenu est celui de la dureté, reflétant la répartition des structures métallurgiques au sein du croissant. Ce critère est couramment utilisé pour les produits mécaniques fonctionnant au sein d'un mécanisme et pour lesquels des valeurs de dureté sont exigées à la fois en surface et à cœur. A partir de cela, les croissants des trois nuances correspondant aux mêmes valeurs de dureté seront comparés afin de comparer les amplitudes des phénomènes de déformations.

### 4.1. Mesures des duretés des croissants

Des mesures de microduretés ont été réalisées sur les croissants. Les pièces ont été tronçonnées à la hauteur  $h=0$  mm, donc à mi-hauteur de croissant. Cela permet d'inclure la zone à cœur, qui est refroidie la moins vite, et où s'effectue, en dernier, les transformations de

---

<sup>11</sup> La trempabilité d'un acier correspond à sa capacité à former de la martensite.

phases. Les essais sont de type Vickers, la charge appliquée sur l'embout pyramidal étant de 4,90 newtons.

L'incertitude de mesure du microduromètre digital utilisé, modèle VMHT30M, du fabricant Leica est faible. En effet, selon les constructeurs de ce type d'appareils, ils permettent une grande répétabilité lors des mesures de dureté Vickers, grâce au contrôle par micro-indentation [ESC\*\*]. Par contre, il existe une erreur sur la valeur de dureté car celle-ci dépend de la structure locale du matériau où est effectuée l'empreinte, notamment la fraction d'atomes de carbone. Aussi, un test de micro dureté donne une empreinte plus petite sous faible charge et la dureté est fortement affectée par l'hétérogénéité de la structure locale. A l'inverse, un test de macro dureté, effectué avec une charge importante, génère une empreinte de plus grande taille, ce qui permet d'obtenir une dureté moyenne sur une zone où la structure semble plus homogène.

La norme ISO EN 6507 [ISO05] indique la méthode d'essai de dureté Vickers pour les matériaux métalliques. Elle spécifie également l'erreur sur la valeur de dureté, suivant la masse appliquée et la valeur de dureté mesurée (Tableau IV - 1). Ainsi, pour une dureté de 600 Hv0,5, la plage d'erreur est de 7%, soit 42 Hv d'erreur maximale. Cette erreur diminue avec l'augmentation de la charge (moyenne des duretés locales).

Charges	Duretés obtenues						
	200	300	400	500	600	700	800
HV 0.05	10						
HV 0.1	8	9	10				
HV 0.5	5	5	6	6	7	7	8
HV 1	4	4	4	5	5	5	6
HV 5	3	3	3	3	3	3	3
HV 10	3	3	3	3	3	3	3
HV 30	3	2	2	2	2	2	2
HV 100	2	2	2	2	2	2	2

Tableau IV - 1 : Erreur maximale en dureté Vickers (en %)

Les empreintes sont effectuées sur 7 zones différentes d'une demi-section de croissant. Les valeurs de dureté de ces zones, ainsi que la dureté moyenne, avec l'erreur associée, sont données dans le Tableau IV - 2.

zones	Nuance 1			Nuance 2				Nuance 3				Nuance 4	
	huile	3 b	12 b	18 b	huile	3 b	12 b	18 b	huile	3 b	12 b	18 b	huile
35/36	550	434	453	456	416	229	279	321					586
31/32	532	453	453	458	338	235	292	273					615
22/27	500	396	459	473	288	251	279	262					643
16/12	475	368	448	511	290	254	280	300					648
1/6	472	398	445	470	264	234	252	250	504	303	351	366	614
5/10	490	336	410	428	285	246	244	252	504	304	360	375	630
3/8	509	374	457	466	283	247	270	269	500	299	359	374	603
Moyenne	504	394	446	466	309	242	271	275	503	302	357	372	620
Erreur max.	30	24	27	28	15	12	14	14	30	15	21	22	43

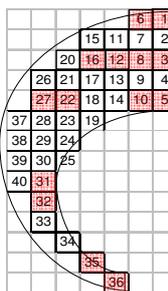


Tableau IV - 2 : Duretés HV0.5 des croissants des trois nuances principales, à h=0mm

La dureté augmente en fonction de la drasticité de la trempe, et ce pour chaque nuance. Les valeurs de duretés sont les plus grandes en trempe huile, puis, en ordre décroissant, en trempe gaz 18, 12 et 3 bars. Les nuances 1 et 3 sont les plus dures, avec une valeur de dureté moyenne 30% plus grande que celle de la nuance 2. Les structures finales ne sont pas les mêmes suivant les nuances, ce qui signifie que les aciers n'ont pas subi les mêmes transformations de phases, à partir de la structure entièrement austénitique obtenue à 930 C. Or, d'après l'étude bibliographique du chapitre I, suivant la phase transformée durant la trempe, les déformations ne sont pas de la même importance. Les nuances 1 et 3 ont plutôt

une structure finale bainitique et martensitique, avec d'autant plus de martensite que la dureté est élevée. Par contre, la nuance 2 correspond à une structure ferrito-bainitique, avec une structure martensitique moins développée.

La nuance 2 n'a donc pas la même sensibilité que les autres aux vitesses de refroidissement, et, n'ayant que peu de martensite, les déformations y sont plus faiblement prononcées. Cette remarque est cohérente avec les analyses quantitatives des phénomènes de déformations, menées à iso-nuance et iso-trempe.

#### **4.2. Comparaison quantitative des croissants à iso-dureté à cœur**

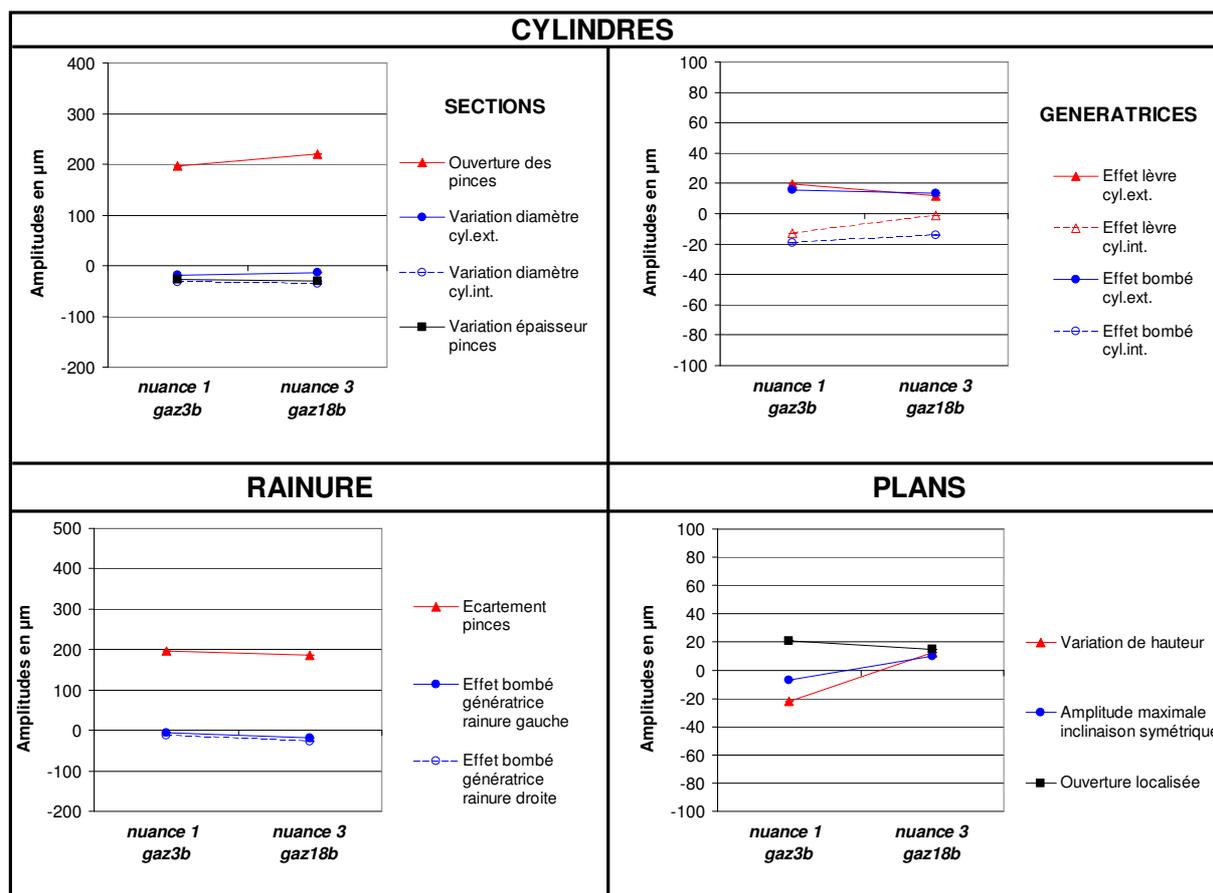
La dureté à cœur (zone 3/8) est ici le critère retenu pour déterminer les croissants comparables en termes de propriétés mécaniques. Cette zone massive étant la plus lentement refroidie, elle est le siège des dernières transformations de phases, et la dureté y est la plus faible. A l'opposé, dans les zones en surface et dans les faibles épaisseurs, comme les pinces (zones 35/36 et 31/32), la martensite peut rapidement se former car le refroidissement y est important.

Partant des remarques précédentes, peu de croissants des trois nuances et des quatre trempes ont des valeurs de dureté à cœur proches. Seules les nuances 1 et 3 présentent deux séries de croissants de même dureté, à 500 Hv<sub>0,5</sub> et 374 Hv<sub>0,5</sub>. Les croissants de la nuance 2 présentent une dureté à cœur bien moindre, avec un maximum de 283 Hv<sub>0,5</sub> en trempe huile. Quant à ceux de la nuance 4, trempés à l'huile, la dureté à cœur est très élevée, avec une valeur de 603 Hv<sub>0,5</sub>.

La comparaison quantitative des phénomènes de déformations porte donc sur le croissant de nuance 1, trempé au gaz à 3 bars, et le croissant de nuance 3, trempé au gaz à 18 bars. Les résultats quantitatifs de ces deux croissants sont présentés dans la Figure IV - 10. La conclusion est assez nette, puisque les amplitudes des phénomènes de déformations sont très semblables entre les deux croissants à iso-dureté.

Concernant les cylindres, les observations sont les suivantes :

- le phénomène d'ouverture des pinces est le plus significatif en termes d'amplitude. Les amplitudes sont proches, à 13% près, avec une moyenne de 209  $\mu\text{m}$  pour les deux croissants ;
- les diamètres des cylindres extérieur et intérieur diminuent d'une même valeur moyenne, égale à 24  $\mu\text{m}$  ;
- les pinces diminuent d'épaisseur, d'une même valeur égale à -30  $\mu\text{m}$  ;
- les génératrices de la partie massive se déforment en bombé, d'une amplitude moyenne de 15  $\mu\text{m}$  pour les deux croissants ;
- les génératrices en bout des pinces se déforment suivant l'effet lèvre, mais l'amplitude entre les deux croissants diffère de 60%. L'amplitude la plus élevée (16  $\mu\text{m}$ ) est celle du croissant de la nuance 1, trempé au gaz à la pression de 3 bars.



**Figure IV - 10 : Comparaison des amplitudes des phénomènes de déformations des croissants de même dureté finale**

Concernant les plans et la rainure, les observations sont les suivantes :

- le phénomène dont l'amplitude est la plus grande est celui d'écartement des pinces, avec une amplitude moyenne de 191  $\mu\text{m}$  et une différence relative de 6% entre les deux croissants ;
- les deux génératrices de la rainure sont déformées en diabolo. L'amplitude est plus importante (-23  $\mu\text{m}$ ) pour le croissant de la nuance 3, trempé au gaz à 18 bars, ce qui représente 2,5 fois plus que pour l'autre croissant ;
- l'ouverture localisée des plans vaut 18  $\mu\text{m}$  en moyenne, avec une différence relative de 29% entre les deux croissants ;
- l'inclinaison symétrique est minimale pour le croissant de la nuance 1 avec une amplitude de -7  $\mu\text{m}$ . Cette inclinaison est inversée pour l'autre croissant et l'amplitude vaut 10  $\mu\text{m}$  ;
- la variation de hauteur est plus faible pour le croissant de la nuance 3, avec une augmentation de 13  $\mu\text{m}$ . Pour l'autre croissant, il s'agit d'une diminution de hauteur, valant -22  $\mu\text{m}$ .

### 4.3. Conclusions de l'analyse à iso-dureté

Les amplitudes des phénomènes de déformations sont pratiquement les mêmes pour les deux croissants, de nuance différente, mais de même état microstructural final. En conséquence, afin de déterminer la nuance d'acier la moins sensible aux déformations pour une trempe donnée, il est important de connaître l'histoire métallurgique de l'acier avant de réaliser la trempe. L'utilisation de vitesses de refroidissement, permettant d'obtenir alors la même réparation des structures finales au sein du croissant, est une condition capitale pour

comparer les déformations entre croissants de nuances différentes, mais de trempabilité différentes.

Les conclusions formulées lors des analyses à iso-nuance et à iso-trempe sont donc changées avec l'analyse à iso-dureté des croissants.

Lors des analyses à iso-trempe, il est apparu que la nuance 1 présentait les amplitudes les plus grandes pour la plupart des phénomènes de déformations. Mais, à iso-dureté, les amplitudes sont comparables à celles de la nuance 3. La nuance 1 fait donc aussi bien en termes de duretés et de déformations, et nécessite de surcroît moins d'énergie car la pression de gaz est plus faible, ce qui diminue le coût de trempe.

Par ailleurs, si la 2 est la nuance la moins sensible aux déformations, ses caractéristiques finales ne sont pas forcément adaptées aux exigences fonctionnelles du produit mécanique. En effet, les duretés sont faibles, même dans le cas de la trempe huile où la drasticité de trempe est maximale : elles plafonnent à une valeur de 300 Hv<sub>0,5</sub> en surface et 270 Hv<sub>0,5</sub> à cœur. De plus, à isodureté, les amplitudes des phénomènes de déformations, obtenues avec la nuance 2, ne sont plus si avantageuses par rapport à celles des deux autres nuances. Avec des duretés moyennes supérieures de 38%, les croissants de la nuance 1, trempés au gaz à 3 bars et ceux de la nuance 3, trempés au gaz à 18 bars présentent des déformations qui sont acceptables par rapport à la nuance 2.

## 5. CONCLUSIONS

La quantification des phénomènes de déformations des éléments simples des croissants, réalisable grâce à la méthode présentée au chapitre II, a permis de réaliser une comparaison immédiate et rapide entre les nuances d'acier, d'une part et les trempes huile et gaz, d'autre part.

Le comportement des trois nuances étudiées dans ce chapitre n'est généralement pas le même d'une nuance à l'autre et d'une trempe à l'autre. Cependant, les points communs suivants émergent :

- l'ouverture des pinces et l'écartement de la rainure sont les phénomènes dont l'amplitude est la plus significative, quelle que soit la drasticité ;
- les phénomènes de déformations locaux (effet lèvres et ouverture des plans en bout des pinces) ne suivent pas la même tendance que les phénomènes globaux, dont l'évolution est cohérente avec l'augmentation de la drasticité de trempe ;
- les amplitudes des phénomènes de déformations augmentent globalement avec la drasticité de trempe ;
- la variation homogène des dimensions des croissants est la plus grande en trempe huile ;
- la variation hétérogène des dimensions est la plus faible pour la trempe 3 bars et est la plus élevée pour la trempe huile.

La différence principale entre les trois nuances est que la nuance 2 est la plus apte pour minimiser les amplitudes des phénomènes de déformations ainsi que les changements de volume, et cela, quelle que soit la trempe utilisée. Cependant, même si les amplitudes demeurent toujours inférieures à celles des deux autres nuances, la nuance 2 est moins dure d'environ 38%. L'analyse des deux croissants de dureté comparable, un de la nuance 1 trempé au gaz à 3 bars, l'autre de la nuance 3, trempé au gaz à 18 bars, montre que les amplitudes sont similaires. La nuance 1 est alors la plus intéressante pour à la fois minimiser l'ensemble des déformations, obtenir une répartition des duretés au sein du produit qui soit satisfaisante en termes de sollicitation mécaniques et minimiser le coût de la trempe.

L'utilisation de la géométrie « croissant » a pour intérêt premier, la validation de

nuances permettant de minimiser les déformations, pour une gamme de vitesses refroidissement adéquate et un état structural final désiré. La présence des trois gradients d'épaisseur au sein du croissant génère la gamme des différentes vitesses de refroidissement, qui, par la suite, sont à l'origine d'une combinaison complexe, dépendante du temps de trempe, entre les gradients thermique, métallurgique et mécanique présents au sein du croissant. De cette façon, le gradient d'épaisseur de la géométrie des produits mécaniques industriels est pris en compte par l'intermédiaire des vitesses de refroidissement.

Le deuxième intérêt de la géométrie du croissant est qu'il permet de valider les outils de simulation numérique, par le test de la sensibilité de la nuance d'acier face à diverses gammes de vitesses de refroidissement. Aussi, le chapitre suivant consiste à confronter les résultats expérimentaux avec ceux obtenus avec l'outil numérique à base d'éléments finis.

# **CHAPITRE V : EXPLOITATION DE LA METHODOLOGIE POUR LA CONFRONTATION DES RESULTATS EXPERIMENTAUX AUX SIMULATIONS NUMERIQUES**

# TABLE DES MATIERES

<b>1. SIMULATION NUMERIQUE DES TRAITEMENTS THERMIQUES.....</b>	<b>150</b>
1.1. Présentation du logiciel Forge® 2008 et de son module de trempe _____	150
1.2. Détermination du pas de température optimal _____	151
1.3. Détermination du maillage optimal utilisé lors des simulations numériques _____	154
1.4. Simulation de la chauffe avec prise en compte de la formation de l'austénite _____	157
<b>2. ANALYSE DES SIMULATIONS DE CHAUFFE DES CROISSANTS .....</b>	<b>157</b>
2.1. Analyse qualitative des phénomènes de déformations _____	157
2.2. Analyse quantitative des phénomènes de déformations _____	158
2.3. Volume en fin de chauffe _____	161
<b>3. ANALYSE DES SIMULATIONS DE TREMPES DES CROISSANTS .....</b>	<b>162</b>
3.1. Influence de la drasticté de trempe pour la nuance 1 _____	162
3.2. Influence de la drasticté de trempe pour la nuance 2 _____	163
<b>4. CONFRONTATION DES RESULTATS EXPERIMENTAUX ET PREDICTIFS DES TREMPES DE LA NUANCE 1 .....</b>	<b>164</b>
4.1. Trempe gaz 3b _____	164
4.2. Trempe gaz 12b _____	166
4.3. Trempe gaz 18b _____	167
4.4. Trempe huile _____	168
4.5. Bilan des comparaisons à iso-trempe _____	170
<b>5. CONFRONTATION DES RESULTATS EXPERIMENTAUX ET PREDICTIFS DES TREMPES DE LA NUANCE 2 .....</b>	<b>171</b>
5.1. Trempe gaz 3b _____	171
5.2. Trempe gaz 12b _____	172
5.3. Trempe huile _____	173
5.4. Bilan des comparaisons à iso-trempe _____	174
<b>6. CONFRONTATION DES RESULTATS EXPERIMENTAUX ET PREDICTIFS DES TREMPES DE LA NUANCE 4 .....</b>	<b>175</b>
6.1. Analyse quantitative des phénomènes de déformations _____	175
6.2. Volume en fin de trempe _____	176
6.3. Bilan de la comparaison en trempe huile _____	176
<b>7. CONCLUSIONS SUR LA PREDICTION DES DEFORMATIONS.....</b>	<b>176</b>