

## **COMPARAISON DES STRUCTURES ET DES DURETES EN FIN DE TREMPE**

Trois zones importantes du croissant sont prises en compte : elles sont le reflet de l'évolution de la formation de la martensite, avec la composante circonférentielle du gradient d'épaisseur du croissant. Il s'agit des zones suivantes :

- le bout des pinces ;
- la zone située à mi-pinces ;
- le cœur du croissant.

Les croissants sont tronçonnés à mi-hauteur pour une observation des microstructures

et réalisation d'essais de dureté. Les structures métallurgiques sont révélées par une attaque chimique au NITAL (solution d'acide NITrique et d'ALcool éthylique, ici du méthanol). L'observation au microscope optique est effectuée avec un zoom de 800 fois (925x pour la nuance 4).

Comme le NITAL attaque la perlite et les joints de grain, ceux-ci apparaissent en foncé au microscope. La ferrite et la cémentite ne sont pas attaquées et apparaissent en clair (Figure VI - 22). La martensite apparaît sous forme d'aiguilles ou de lattes et elle est obtenue par cisaillement complexe du réseau cristallin de l'austénite [BAR00]. La martensite stoppant la diffusion des atomes de carbone, elle est caractérisée par une dureté élevée : avec 0,4% de carbone, la dureté en essai Vickers est de l'ordre de 700Hv [BAR00]. Les températures de trempes étant largement en dessous de la température de germination de la martensite, toute l'austénite a donc été transformée en martensite : de ce fait, il n'y a pas d'austénite résiduelle.

La teneur de chacune des phases est estimée qualitativement, par analyse visuelle de la structure de la zone ciblée et de celles avoisinantes. Ce recensement des phases dépend ici fortement de l'expérience de la personne l'ayant réalisé.

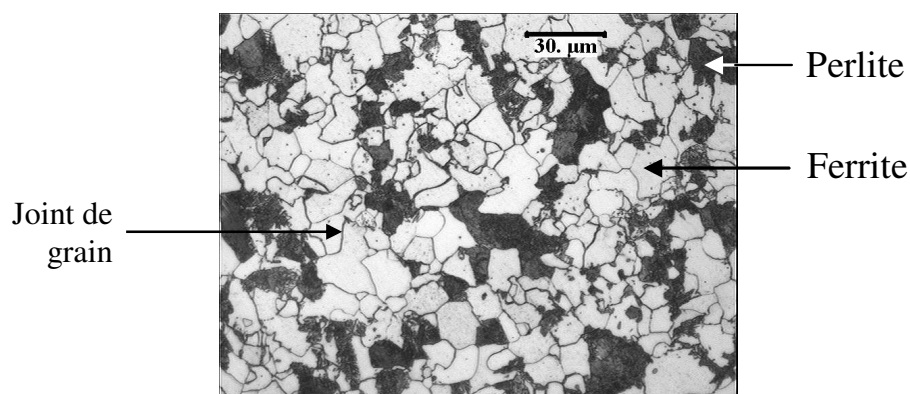


Figure VI - 22 : Structure initialement ferrito-perlitique des nuances 1 et 2 (x600)

#### 4.1. Nuance 1

##### 4.1.1. Trempes gaz

La Figure VI - 23 présente les résultats en fin de trempe gaz 3 bars. L'analyse des trois zones étudiées révèle que :

- le bout des pinces est 100% martensitique à la fois en simulation numérique et en expérience ;
- la zone à mi-pince est encore majoritairement martensitique malgré la présence plus importante de bainite. La prédiction est en bonne concordance avec l'expérience ;
- le cœur du croissant est majoritairement bainitique en expérience et plutôt martensitique en simulation.

Les résultats des deux autres pressions de gaz sont proches de ceux présentés dans la Figure VI - 23, seul le pourcentage global de martensite présente dans le croissant augmente légèrement avec la drasticité. Ainsi, en simulation numérique, le cœur du croissant trempé à 18 bars présente 75% de martensite, 15% de bainite et 10% de ferrite, ces teneurs étant proches de celles obtenues avec la pression de 3 bars.

La Figure VI - 24 montre que les valeurs de duretés en tous points des croissants mesurés sont plus faibles que celles du croissant simulé, et ce quelle que soit la pression de gaz : la différence moyenne est de -38% à 3 bars, -22% à 12 bars et -21% à 18 bars. Cela s'explique par le fait que la teneur en martensite est plus importante dans le croissant issu de la simulation numérique. Par ailleurs, les valeurs de duretés sont d'autant plus grandes que la teneur en martensite est importante : c'est le cas au niveau des pinces (31/32 et 35/36).

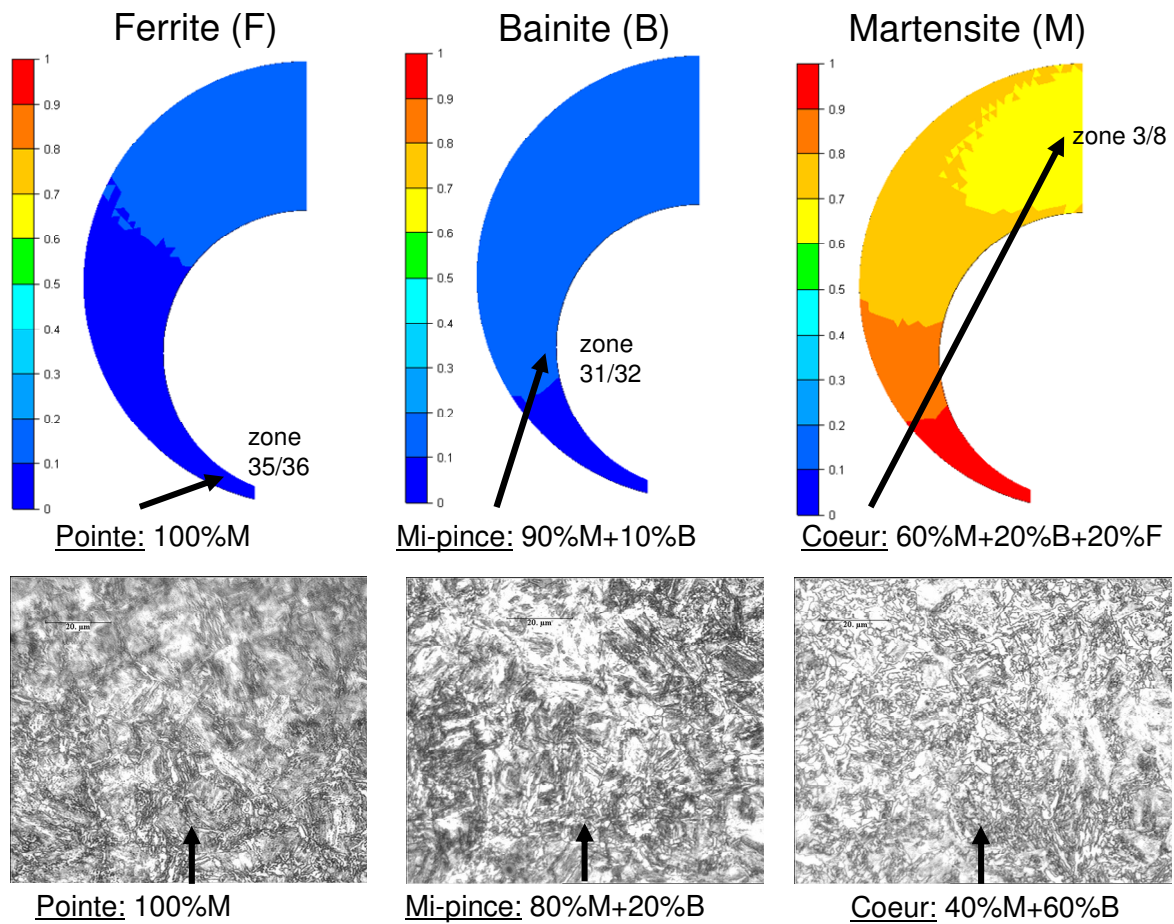


Figure VI - 23 : Comparaison des structures (expérience et simulation) des croissants de la nuance 1, en trempe gaz 3b

Une stagnation des valeurs de duretés, pour les trois pressions de gaz, est également observée. En simulation, les duretés sont très proches dans chacune des zones de mesure et en expériences, elles sont proches en bout de pinces (zone 35/36) et à mi-pinces (zone 31/32). Cela provient du fait que ces zones sont saturées en martensite, dès la pression de 3 bars.

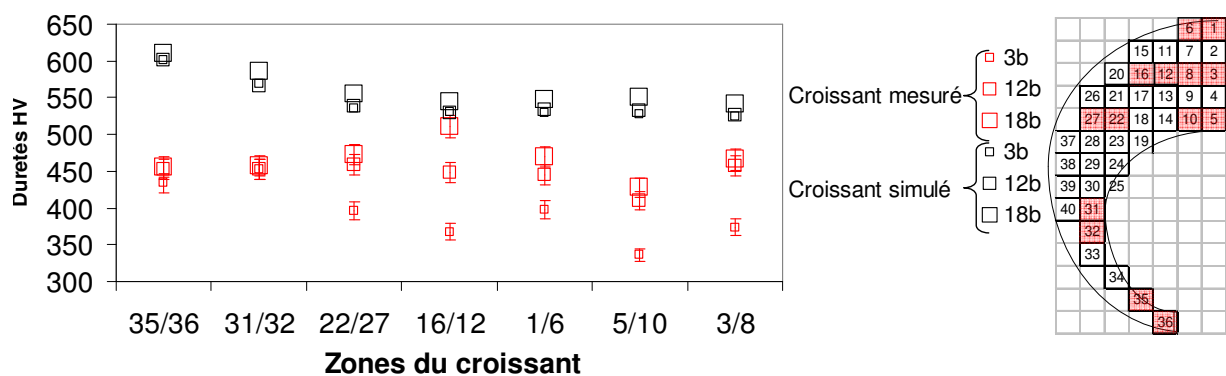
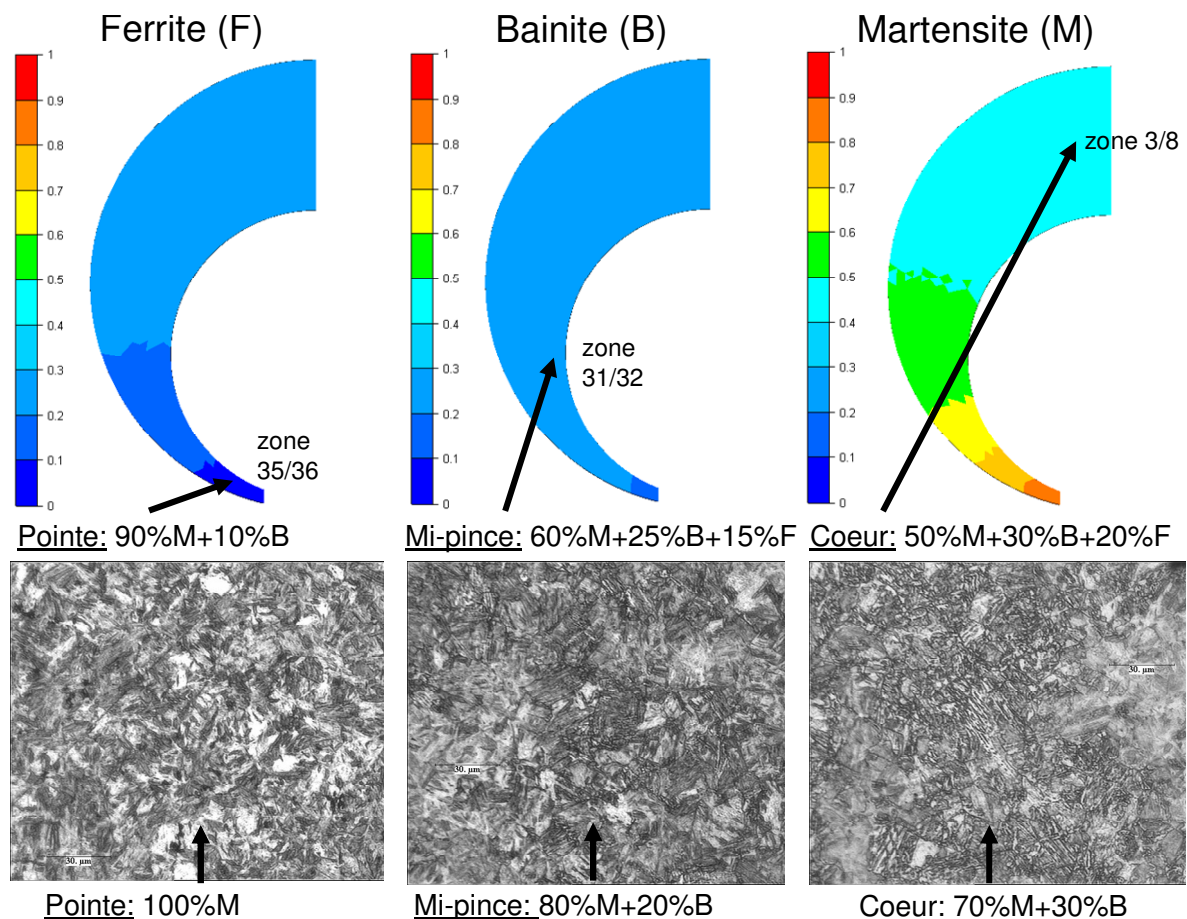


Figure VI - 24 : Comparaison des duretés des croissants de la nuance 1, en trempes gaz

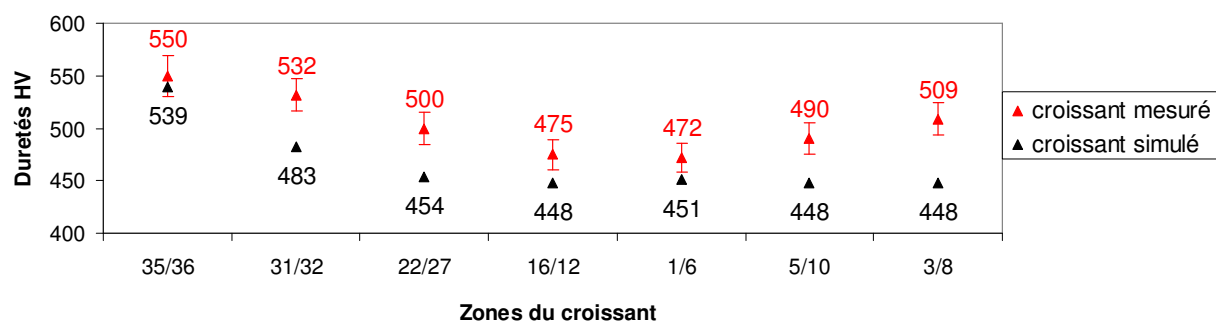
#### 4.1.2. Trempe huile

Le constat est le même que pour les trempes gaz : si la structure en bout de pince est la même pour les croissants mesuré et simulé, partout ailleurs, les différences sont plus sensibles (Figure VI - 25).



**Figure VI - 25 : Comparaison des structures (expérience et simulation) des croissants de la nuance 1, en trempe huile**

Ici, contrairement aux simulations de trempes gaz, les croissants « réels » possèdent plus de martensite que le croissant simulé. Cela se traduit par des valeurs de dureté un peu plus élevées (de 7%) pour le croissant mesuré (Figure VI - 26). La même valeur de dureté en bout des pinces est observée pour les deux croissants puisque la structure est très fortement martensitique. Par ailleurs, les pinces sont plus « dures » que le reste du croissant.



**Figure VI - 26 : Comparaison des duretés des croissants de la nuance 1, en trempe huile**

Au vu de ces résultats, les différences de déformations entre les croissants réels et virtuels peuvent s'expliquer par les différences en termes de structures finales, notamment le champ de martensite. En effet, les effets métallurgiques et mécaniques, spécialement la formation de la martensite, sont à l'origine des déformations. Aussi, le front de martensite, se formant en bout de pinces et se propageant radialement et circulairement, conditionne les amplitudes des déformations du croissant en fin de trempe. Or, en fin de trempe, la répartition de la martensite dans les croissants mesuré et simulé n'est pas la même en tout point, ce qui

implique une différence en termes d'amplitudes de déformations.

#### 4.2. Nuance 4, trempe huile

Une bonne concordance est observée entre les structures prédites par la simulation numérique et celles obtenues par les expériences (Figure VI - 27). Si la structure est totalement martensitique pour les croissants « réels », il subsiste 5% d'austénite résiduelle en simulation numérique.

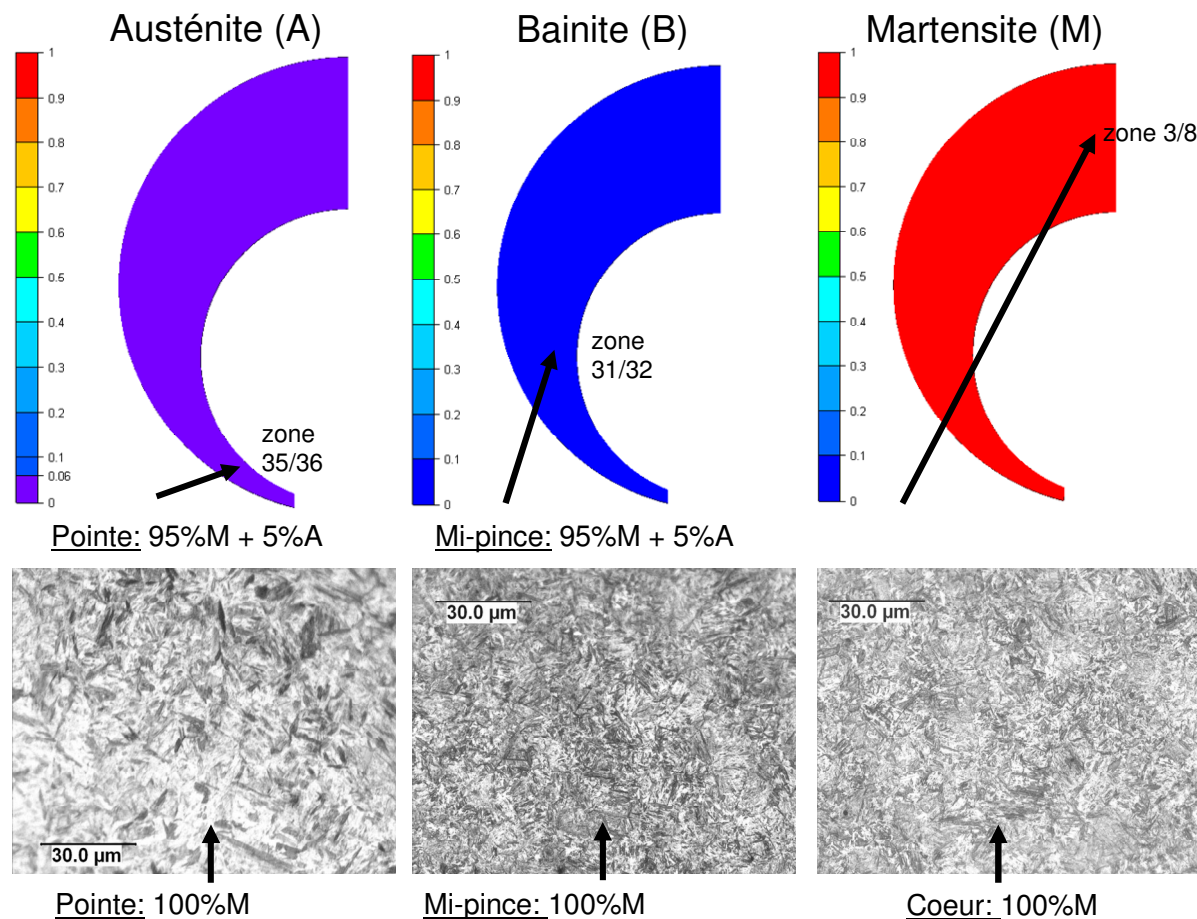


Figure VI - 27 : Comparaison des structures (expérience et simulation) des croissants de la nuance 4, en trempe huile

Cette concordance de structure se traduit par une prédiction quasi-parfaite des valeurs de dureté (Figure VI - 28).

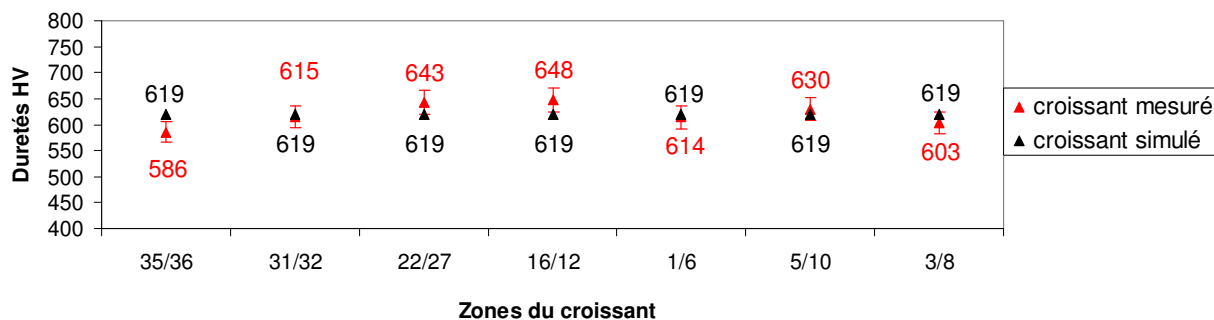


Figure VI - 28 : Comparaison des duretés des croissants de la nuance 4, en trempe huile

Par ailleurs, la dureté est presque constante à tout endroit des croissants simulés et

expérimentaux. Cela signifie que la répartition de la martensite est homogène au sein du croissant. La dureté du croissant de cette nuance trempée à l'huile est logiquement plus importante que pour les deux nuances précédentes, car la martensite s'y est formée complètement et le taux de carbone est plus important (0,35%).

### 4.3. Conclusions

Par l'utilisation de quatre vitesses de refroidissement, il est possible d'ajuster, pour une même nuance, le début de germination des phases et leur vitesse de propagation au sein du croissant. L'analyse présente des structures et des duretés finales a permis d'étudier ce décalage temporel de la formation des phases. La comparaison des résultats de simulation avec l'expérience a montré que les écarts d'amplitudes des phénomènes de déformations constatés au chapitre V sont corrélés à la répartition des structures et des duretés au sein du croissant. Ainsi, pour les nuances 1 et 4, les tendances des amplitudes des phénomènes étaient correctes, ce que corrobore la répartition finale des phases et les valeurs de duretés dans le croissant.

L'hétérogénéité du refroidissement influe donc sur les moments de début des transformations de phases et sur la combinaison des déformations thermiques et métallurgiques, qui sont différents d'une nuance à l'autre. Dans l'optique de minimiser les amplitudes de déformations, une trempe étagée permettrait de limiter le gradient de température [POU81] et de diminuer ainsi le décalage temporel des débuts de transformation des phases au sein de croissant.

## 5. INFLUENCE DES DONNEES DU MATERIAU

Les modèles prédictifs en traitement thermique, autant en chauffage qu'en refroidissement, reposent sur des couplages multi-physiques des phénomènes thermiques, métallurgiques et mécaniques. La détermination des interactions entre ceux-ci est compliquée car ces phénomènes physiques ne se produisent pas indépendamment les uns des autres [CARD08]. La loi de déformation en traitement thermique [COL92b] [ALI00], implémentée dans le logiciel Forge® 2008, est présentée dans le premier paragraphe.

L'obtention des données mécaniques expérimentales, pour chaque phase d'un acier donné, est une opération coûteuse. En effet, les campagnes d'essais demandent au moins 30 à 40 tests. Par ailleurs, leur mise au point est complexe, à cause des cycles thermo-mécaniques avec de faibles déformations (de l'ordre de 0,01 à 0,02) et de faibles vitesses de déformations (de l'ordre de  $10^{-3} \text{ s}^{-1}$  à  $10^{-5} \text{ s}^{-1}$ ). Il est donc intéressant de connaître l'influence de la variation des données mécaniques sur les déformations. Cela fait l'objet du deuxième paragraphe. L'analyse est menée sur les simulations de chauffe et de trempe gaz 18 bars du croissant de la nuance 1.

### 5.1. Présentation de la loi de déformation en traitement thermique

Le tenseur des vitesses de déformation totale  $\dot{\epsilon}^{\text{tot}}$ , appelé également le tenseur du taux de déformation, est défini par l'équation [VI - 1]. Cette loi de déformation est intégrée à chaque pas de température par le solveur du logiciel Forge® 2008, pour obtenir la déformation. Cette loi fait appel à l'**hypothèse des petites déformations** où l'on considère l'additivité des déformations dues aux phénomènes thermiques, mécaniques et métallurgiques.

Cette formulation est présente dans de nombreux travaux de modélisation numérique du traitement thermique [ALI00] [DEN02] [YAO04] [CARD08] [OKI08] [TEO08]. Les termes constitutifs réalisent le couplage entre les déformations thermo-élasto-viscoplastiques et les déformations dues à l'évolution structurale.

Les informations principales de ses couplages sont à présent données. Elles proviennent majoritairement des mémoires de thèse de David Cardinaux [CARD08] et Charles Aliaga [ALI00].

$$\dot{\varepsilon}^{\text{tot}} = \underbrace{\dot{\varepsilon}^{\text{el}} + \dot{\varepsilon}^{\text{th}} + \dot{\varepsilon}^{\text{vp}}}_{\text{thermo-élasto-viscoplasticité}} + \underbrace{\dot{\varepsilon}^{\text{tr}} + \dot{\varepsilon}^{\text{pt}}}_{\text{couplage évolution structurale}} \quad [\text{VI} - 1]$$

### 5.1.1. Couplage avec les déformations thermo-élasto-viscoplastiques (THEVP)

#### Déformations thermo-élastiques : $\varepsilon^{\text{el}}$ et $\varepsilon^{\text{th}}$

Les déformations thermiques comme les déformations élastiques répondent à un comportement linéaire. Le tenseur des vitesses de déformation thermique, noté  $\dot{\varepsilon}^{\text{th}}$ , est relié au tenseur des coefficients de dilatations thermiques  $\alpha$  et à la vitesse de refroidissement  $\dot{T}$  par l'équation [VI - 2]. Les valeurs des coefficients  $\alpha$  sont dépendantes des phases et de la température.

$$\dot{\varepsilon}^{\text{th}} = \alpha \dot{T} \quad [\text{VI} - 2]$$

Le tenseur de la déformation élastique, noté  $\varepsilon^{\text{el}}$  est reliée au tenseur des contraintes de Cauchy, noté  $\sigma$ , par la loi de Hooke (équation [VI - 3]). Le tenseur d'élasticité, noté  $D$ , est fonction de deux variables : le module d'Young et le coefficient de Poisson. Ces variables sont dépendantes de la direction de sollicitation, de la température  $T$  et de la fraction volumique des phases formées.

$$\sigma = D(T) : \varepsilon^{\text{el}} \quad [\text{VI} - 3]$$

Après dérivation temporelle du tenseur des contraintes, on obtient le comportement thermo-élastique couplé (équation [VI - 4]).

$$\dot{\sigma} = D(T) : \dot{\varepsilon}^{\text{el}} + \underbrace{\dot{T} D(T)^{-1} \times \frac{\partial D(T)}{\partial T}}_{\text{couplage thermique}} : \sigma \quad [\text{VI} - 4]$$

#### Déformations viscoplastiques : $\varepsilon^{\text{vp}}$

La déformation plastique correspond à un réarrangement des atomes dû à la propagation des mouvements de défauts linéaires appelés « dislocations » [BER04]. La difficulté de modélisation du traitement thermique est liée au choix d'une loi de comportement, valide sur la gamme des températures balayées par le procédé. C'est ce qu'on appelle la « rhéologie » du matériau, et cela implique l'étude de la déformation et de l'écoulement de la matière. Le terme de « viscoplasticité » permet ici de réunir à la fois :

- le comportement plastique de la matière correspondant à l'écroutissage par la déformation ;
- le comportement visqueux survenant pour la plupart des métaux dès que la température dépasse 4/10 de leur température de fusion. C'est le cas d'une trempe à partir de la température d'austénitisation.

La loi rhéologique en petites déformations est donnée par l'équation [VI - 5]. Elle est additive, c'est-à-dire qu'elle somme la contrainte limite d'élasticité  $\sigma_{00}$  et les contraintes inélastiques dues à l'écoulement plastique ( $\sigma_p$ ) et à l'écoulement viscoplastique ( $\sigma_{vp}$ ).

Cette approche est dite unifiée : elle permet de considérer la rhéologie du matériau depuis son comportement visqueux à chaud jusqu'au comportement élastoplastique à froid, voire le retour élastique en fin de traitement thermique. La Figure VI - 29 présente une schématisation dans un cas uniaxial de la partition des contraintes par l'approche d'un modèle additif.

$$\sigma_0 = \sigma_{00}(T) + \sigma_p(\bar{\varepsilon}, T) + \sigma_{vp}(\dot{\bar{\varepsilon}}, T) \quad [\text{VI} - 5]$$

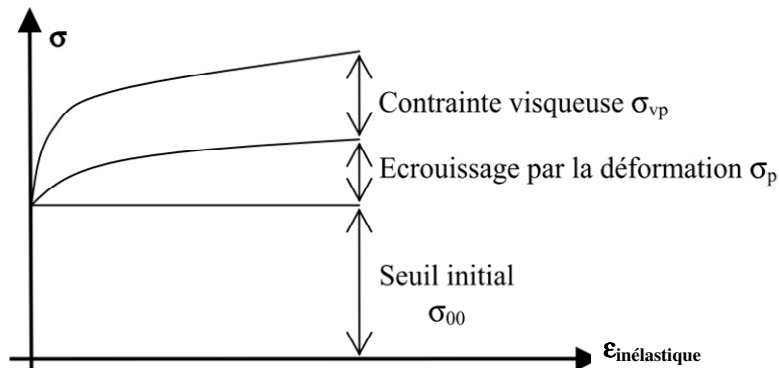


Figure VI - 29 : Schématisation uniaxiale de la partition des contraintes avec le modèle additif [CARD08]

Après la résolution thermodynamique du problème appliqué à la modélisation du traitement thermique, l'équation [VI - 5] devient l'équation [VI - 6]. Le lecteur peut se référer aux travaux de [ALI00] et [CARD08] pour obtenir les détails du calcul.

$$\sigma_{eq} = \sigma_{00} + H(T)\bar{\varepsilon}^{n(T)} + K(T)\dot{\bar{\varepsilon}}^{m(T)} \quad [\text{VI} - 6]$$

La contrainte équivalente  $\sigma_{eq}$  est ainsi dépendante du seuil d'élasticité du matériau  $\sigma_{00}$  (en MPa), du module d'écrouissage  $H$  (MPa), du coefficient d'écrouissage  $n$ , de la consistance visqueuse  $K$  (MPa.s<sup>m</sup>) et du coefficient de sensibilité à la vitesse de déformation  $m$ . Ces paramètres rhéologiques sont eux-mêmes dépendants de la température et sont déterminés à partir des résultats d'essais expérimentaux. Ils sont renseignés dans le fichier « .loi » du matériau dans le logiciel Forge® 2008.

### 5.1.2. Couplage avec les déformations dues à l'évolution structurale

Ce couplage est réalisé par les aspects suivants dans le logiciel® Forge 2008. La prédiction de germination des phases utilise le principe d'additivité établi par Scheil [SCHE35]. Celui-ci consiste à déterminer le temps d'incubation auquel la somme de Scheil atteint l'unité. Ensuite, l'évolution des proportions des phases créées est décrite par deux modèles, couplés à l'équation de Scheil :

- pour les transformations diffusives, la prédiction des cinétiques de transformations de phases en conditions isothermes se fait à l'aide du formalisme de Johnson-Mehl-Avrami [JOH39] [AVR39] [AVR40] [AVR41]. Les aspects anisothermes sont pris en compte par la méthode des temps fictifs [ALI00] ;
- pour les transformations sans diffusion ou martensitiques, un modèle de base est utilisé : il s'agit de celui développé par D.P. Koistinen et R.E. Marburger [KOI59].

Le couplage entre les phénomènes métallurgiques et mécaniques est réalisé par les deux termes suivants.

#### Plasticité de transformation de phase : $\varepsilon^{pt}$

Appelée en anglais « TRIP » (Transformation Induced Plasticity), la plasticité de transformation de phase est provoquée par l'application d'un faible chargement (même très inférieur au seuil de plasticité) sur un acier lorsqu'il change de phase. Cette déformation plastique s'additionne à celle générée par les changements de volume. Elle est aussi bien observée pour les transformations diffusives comme la transformation perlitique [GAUT87] que pour la transformation displacive (sans diffusion de carbone) qu'est la transformation



martensitique [GAUT95].

Les germes de la nouvelle phase créée ont tendance à s'orienter dans la direction de sollicitation, ce qui induit une déformation plastique orientée. Cela est dû à l'accommodation plastique : pour la transformation diffusives (Figure VI - 30 a)), la charge oriente l'écoulement plastique local dû à la différence de compacité entre les phases, et, pour la transformation martensitique (Figure VI - 30 b)), la charge oriente l'orientation de formation des aiguilles de martensite [CARD08].

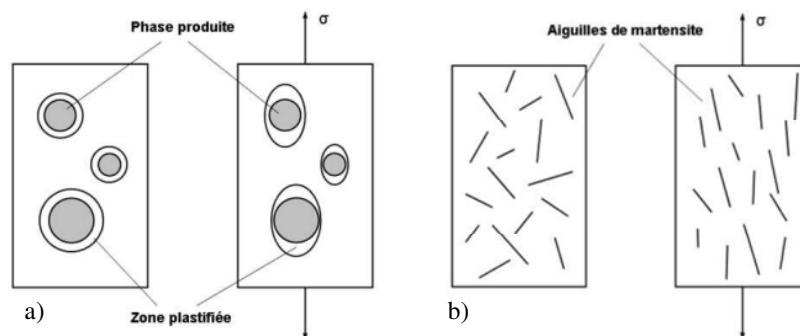


Figure VI - 30 : Représentation schématique du mécanisme de plasticité de transformation : a) diffusives et martensitique [CARD08]

Le modèle de Leblond [LEB89], issu d'une approche micromécanique, est couramment utilisé pour simuler le phénomène de plasticité de transformation. Le logiciel Forge® 2008 utilise une approche macroscopique, moins rigoureuse car ne faisant pas référence aux phénomènes locaux responsables de la déformation, mais plus réaliste en terme de faisabilité [CARD08]. La première modélisation de la plasticité de transformation de phase date de 1965, par Greenwood et Johnson [GRE65]. Le modèle établit une relation entre plasticité de transformation  $\epsilon^{pt}$  et contrainte, dans le cas d'essai de traction uniaxiale (équation [V - 1]). Le ratio  $\Delta V/V$  traduit la variation volumique lors du changement de phase et  $\sigma_\gamma$  la limite d'écoulement plastique de l'austénite.

$$\epsilon^{pt} = \frac{5}{6} \frac{\Delta V}{V} \frac{\sigma}{\sigma_\gamma} \quad [VI - 7]$$

A partir de cette relation, d'autres relations ont été développées par de nombreux auteurs [CARD08]. Nous retenons la relation donnée par l'équation [VI - 8], qui est celle utilisée dans le logiciel. Le paramètre matériau  $k$  est de l'ordre de  $10^{-4} \text{ MPa}^{-1}$  [LEB89],  $f(y)$  est une fonction croissante avec la proportion  $y$  de la phase croissante,  $\dot{y}$  est la vitesse de formation de la phase et  $s$  le déviateur du tenseur des contraintes macroscopiques. La proportionnalité de la plasticité de déformation avec le déviateur des contraintes permet de retrouver son caractère directionnel dû à l'écoulement plastique.

$$\dot{\epsilon}^{pt} = \left( \frac{3}{2} k f(y) \dot{y} \right) s \quad [VI - 8]$$

### Variation volumique aux changements de phases : $\epsilon^{tr}$

Ce changement de volume est la conséquence de la différence de densité propre entre chaque phase solide présente au sein d'un acier. Il a pour effet une déformation sphérique, dont le terme est défini par Denis et al. [DEN87] dans l'équation [VI - 9].  $I$  représente le tenseur Identité d'ordre 2.

$$\dot{\epsilon}^{tr} = (\epsilon_0^tr \dot{y}) I \quad [VI - 9]$$

La constante  $\varepsilon_0^r$  est définie pour chaque phase du matériau et représente le changement de volume par rapport à une température de référence. A la température de référence de 0°C, la déformation résultante de la variation volumique des transformations diffusives vaut environ  $8.10^{-3}$  [DEN87]. Cette valeur est en général légèrement supérieure pour les transformations martensitiques [YAO04] [CARD08].

## 5.2. Influence des données mécaniques

L'objectif présent est d'étudier la sensibilité des déformations face à une forte perturbation des données mécaniques, simulant de fortes incertitudes expérimentales ou des variations de ces paramètres d'un matériau à l'autre. L'influence individuelle des paramètres mécaniques des lois de comportement des matériaux est évaluée. On étudie ainsi l'influence d'une variation de la rhéologie par phase ( $\pm 20\%$ ), de la plasticité de transformation par phase ( $\pm 30\%$ ), des coefficients de dilatation par phase ( $\pm 10\%$ ) et la dilatation volumique par phase ( $\pm 10\%$ ). L'impact est quantifié sur les déformations du croissant de la nuance 1 en trempé gaz 18 bars, grâce à la méthode développée dans ces travaux de thèse.

### 5.2.1. Déformations en écoulement élasto-viscoplastique : $\varepsilon^{el}$ et $\varepsilon^{vp}$

Les paramètres rhéologiques actuels, par phase et par température de la nuance 1, à savoir  $\sigma_{00}$ , K, m, H et n, sont donnés dans le Tableau VI - 1. Les coefficients de la perlite ne sont pas donnés car les vitesses de refroidissement utilisées lors des trempes n'en permettent pas la formation. Pour les valeurs aux températures intermédiaires, le code de calcul effectue une interpolation linéaire entre deux points donnés, ce qui peut entraîner une approximation non négligeable [CARD08].

	Temperature en °C	Seuil d'élasticité $\sigma_{00}$ (Mpa)	Consistance K (Mpa.s <sup>m</sup> )	Coefficient de sensibilité à la vitesse de déformation m	Module d'écroutissage H (Mpa)	Coefficient d'écroutissage n
Austenite	20.0	139.0	0.0	0.2	792.0	0.4
	300.0	97.4	0.0	0.2	565.0	0.4
	750.0	30.5	45.0	0.2	200.0	0.4
	900.0	8.2	73.0	0.2	78.3	0.4
	1200.0	8.2	73.0	0.2	78.3	0.4
Ferrite	20.0	209.0	0.0	0.2	354.0	0.4
	300.0	107.0	0.0	0.2	188.0	0.4
	750.0	14.4	21.2	0.2	29.5	0.4
	900.0	2.1	18.9	0.2	6.8	0.4
	1200.0	2.1	18.9	0.2	6.8	0.4
Bainite	20.0	850.0	0.0	0.2	4300.0	0.4
	100.0	820.0	0.0	0.2	4270.0	0.4
	150.0	800.0	0.0	0.2	4245.0	0.4
	250.0	730.0	0.0	0.2	4170.0	0.4
	320.0	650.0	0.0	0.2	4110.0	0.4
	450.0	500.0	0.0	0.2	4000.0	0.4
	1200.0	500.0	0.0	0.2	4000.0	0.4
Martensite	20.0	900.0	0.0	0.2	7700.0	0.5
	100.0	890.0	0.0	0.2	7700.0	0.5
	200.0	860.0	0.0	0.2	7700.0	0.5
	300.0	820.0	0.0	0.2	7700.0	0.5
	1200.0	820.0	0.0	0.2	7700.0	0.5

Tableau VI - 1 : Paramètres rhéologiques actuels de la loi viscoplastique de la nuance 1

Afin de vérifier si une évolution de  $\pm 20\%$  des paramètres rhéologiques ( $\sigma_{00}$ , K, m, H) reste physiquement interprétable, la plage de variation de la contrainte équivalente par phase est calculée en utilisant l'équation [VI - 6]. La déformation moyenne  $\bar{\varepsilon}$  et la vitesse de

déformation moyenne  $\bar{\epsilon}$  ont été déterminées pour chaque phase et plage de températures lors de la trempe gaz 18 bars du croissant de la nuance 1. Les valeurs sont données dans le Tableau VI - 2. La déformation moyenne est de l'ordre de 0,011 et la vitesse de déformation moyenne vaut  $6.10^{-5} \text{ s}^{-1}$ .

Température en °C	Déformation moyenne $\bar{\epsilon}$	Vitesse de déformation moyenne $\dot{\epsilon}$ en $\text{s}^{-1}$
20	0	0
150	0,0113	0
380	0,0113	0
423	0,0113	5,8E-05
529	0,0113	1,1E-05
735	0,0113	2,9E-05
805	0,0106	3,8E-04
930	0,0108	2,9E-05

Tableau VI - 2 : Déformation moyenne et vitesse de déformation moyenne

La contrainte équivalente par phase est alors comparée à la contrainte équivalente obtenue avec les paramètres rhéologiques initiaux (Figure VI - 31).

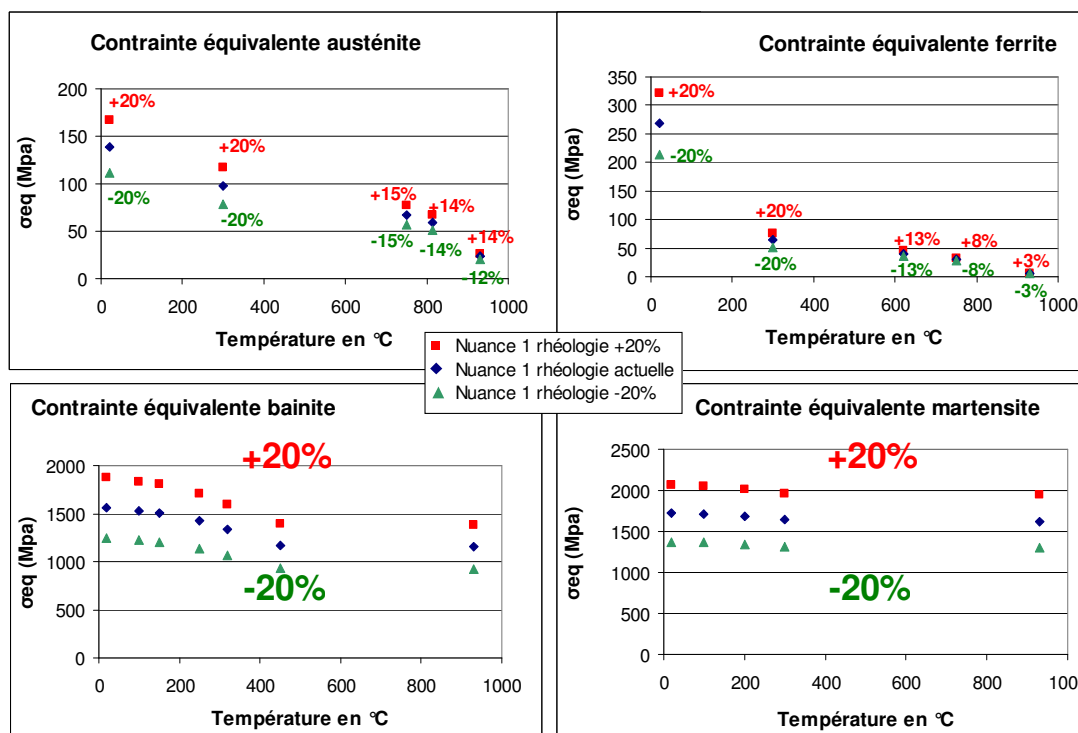


Figure VI - 31 : Variation de la contrainte équivalente par phase avec  $\sigma_{00}$ , K, m, H variant de  $\pm 20\%$  (nuance 1)

Pour les phases bainitique et martensitique, la variation de  $\pm 20\%$  de  $\sigma_{00}$ , K, m et H a pour conséquence une variation de  $\sigma_{eq}$  de  $\pm 20\%$ , quelle que soit la température de transformation de ces phases. Cela est dû au fait que le terme de consistance K est nul.

Pour l'austénite et la ferrite-perlite, la perturbation de  $\pm 20\%$  de  $\sigma_{00}$ , K, m et H entraîne une variation plus faible de la contrainte équivalente aux températures de transformation de ces deux phases. Ainsi, pour l'austénite, la plage de variation de la contrainte équivalente est de  $\pm 15\%$  à la température  $AC_1$  (735°C) et  $\pm 14\%$  à la température  $AC_3$  (805°C).

Cette plage de variation de  $\pm 20\%$  de la contrainte équivalente par phase est en deçà de la plage de variation qui existe d'une nuance à l'autre et reste donc interprétable. En effet, avec les mêmes déformations et vitesses de déformations moyennes par phase que pour la nuance 1, la contrainte équivalente de la nuance 4 est 17% plus faible et celle d'une nuance à bas taux de carbone (0,05%) est 60% plus faible. En réalité, selon Forestier [FOR04], la stabilité de l'identification des paramètres rhéologiques en présence de bruits de mesure Gaussiens est plutôt bonne.

La Figure VI - 32 illustre les variations d'amplitudes des phénomènes de déformations du croissant. Par rapport aux amplitudes obtenues avec les paramètres rhéologiques, l'augmentation de 20% de ceux-ci a globalement peu de conséquences sur les amplitudes. Seule la variation de hauteur est réellement affectée : son amplitude diminue de 21%.

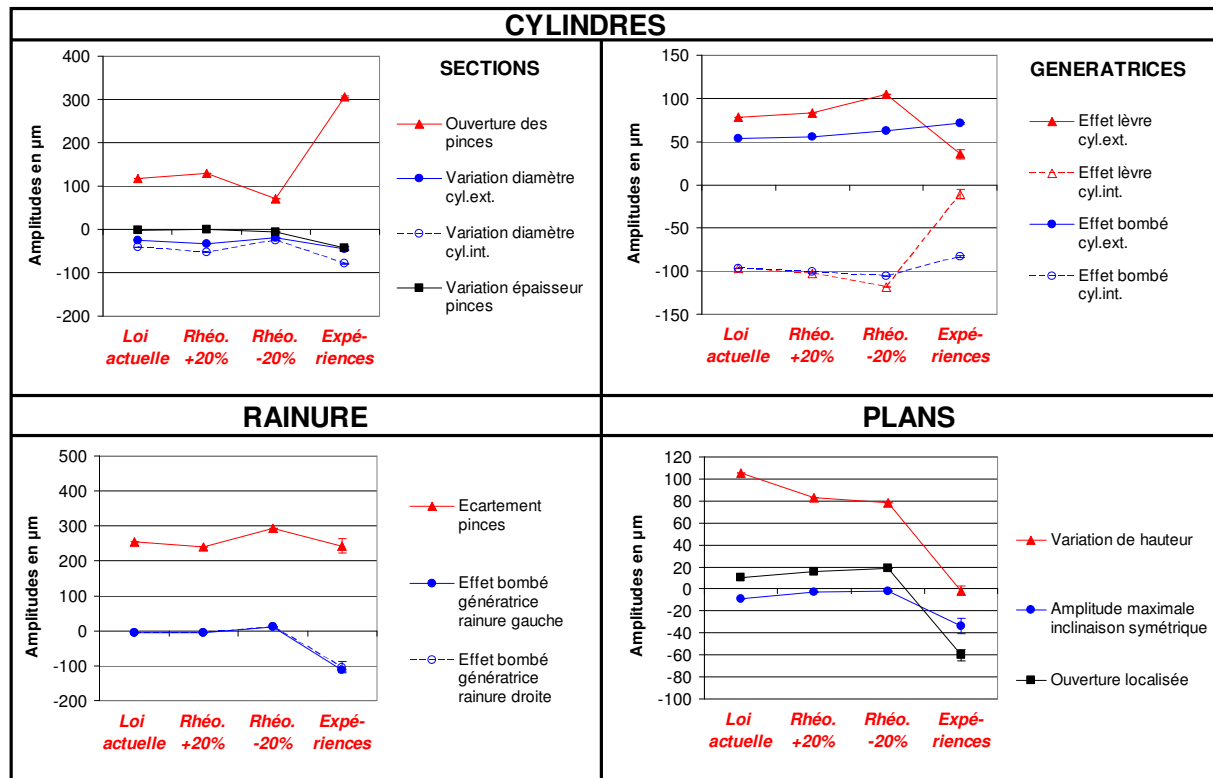


Figure VI - 32 : Amplitudes des phénomènes de déformation, après perturbation de la rhéologie par phase

A l'opposé, la diminution de 20% des données rhéologiques expérimentales affecte plus de phénomènes de déformations :

- l'ouverture des pinces est plus faible de 40% tandis que l'écartement des pinces augmentent de 16% ;
- l'effet lèvre des génératrices des pinces augmente de 30% ;
- les deux génératrices de la rainure sont à présent déformées en bombé ;
- la variation de hauteur diminue de 26%.

Enfin, la perturbation de  $\pm 20\%$  de la rhéologie actuelle ne permet pas une meilleure prédiction des amplitudes expérimentales.

### 5.2.2. Déformations thermiques : $\epsilon^{th}$

Les coefficients actuels (Tableau VI - 3) des dilatations thermiques linéaires, déterminés par des essais de dilatométrie, sont perturbés de  $\pm 10\%$ . Concernant l'incertitude de mesure, cette hypothèse est forte car, selon [PET00], l'incertitude sur les coefficients de dilatation  $\alpha$  est au alentour de 2,2%. En revanche, la variation de  $\pm 10\%$  reste cohérente avec la variation des coefficients de dilatation entre 2 matériaux différents.

	Austenite		Bainite	
	Température en °C	Coefficient $\alpha$ de dilatation linéaire (m/m/°C)	Température en °C	Coefficient $\alpha$ de dilatation linéaire (m/m/°C)
	0.0	1.55E-05	0.0	1.19E-05
	20.0	1.59E-05	20.0	1.22E-05
	100.0	1.71E-05	100.0	1.31E-05
	200.0	1.83E-05	200.0	1.40E-05
	300.0	1.92E-05	300.0	1.47E-05
	400.0	2.00E-05	400.0	1.53E-05
	500.0	2.06E-05	500.0	1.58E-05
	600.0	2.12E-05	600.0	1.63E-05
	700.0	2.17E-05	700.0	1.67E-05
	800.0	2.21E-05	800.0	1.70E-05
	900.0	2.23E-05	900.0	1.72E-05
	1000.0	2.24E-05	1000.0	1.72E-05
	1200.0	2.24E-05	1200.0	1.72E-05
	Ferrite		Martensite	
	Température en °C	Coefficient $\alpha$ de dilatation linéaire (m/m/°C)	Température en °C	Coefficient $\alpha$ de dilatation linéaire (m/m/°C)
	0.0	1.19E-05	0.0	1.19E-05
	20.0	1.22E-05	20.0	1.22E-05
	100.0	1.31E-05	100.0	1.31E-05
	200.0	1.40E-05	200.0	1.40E-05
	300.0	1.47E-05	300.0	1.47E-05
	400.0	1.53E-05	400.0	1.53E-05
	500.0	1.58E-05	500.0	1.58E-05
	600.0	1.63E-05	600.0	1.63E-05
	700.0	1.67E-05	700.0	1.67E-05
	800.0	1.70E-05	800.0	1.70E-05
	900.0	1.72E-05	900.0	1.72E-05
	1000.0	1.72E-05	1000.0	1.72E-05
	1200.0	1.72E-05	1200.0	1.72E-05

Tableau VI - 3 : Valeurs actuelles des dilatations linéaires par phase de la nuance 1

Une erreur de +10% sur les valeurs des coefficients de dilatation thermique par phase a globalement peu de conséquences sur les amplitudes de phénomènes de déformations (Figure VI - 33). Néanmoins, les deux phénomènes suivants y sont plus sensibles :

- l'effet lèvres augmente de 10% ;
- la variation de hauteur diminue de 30%.

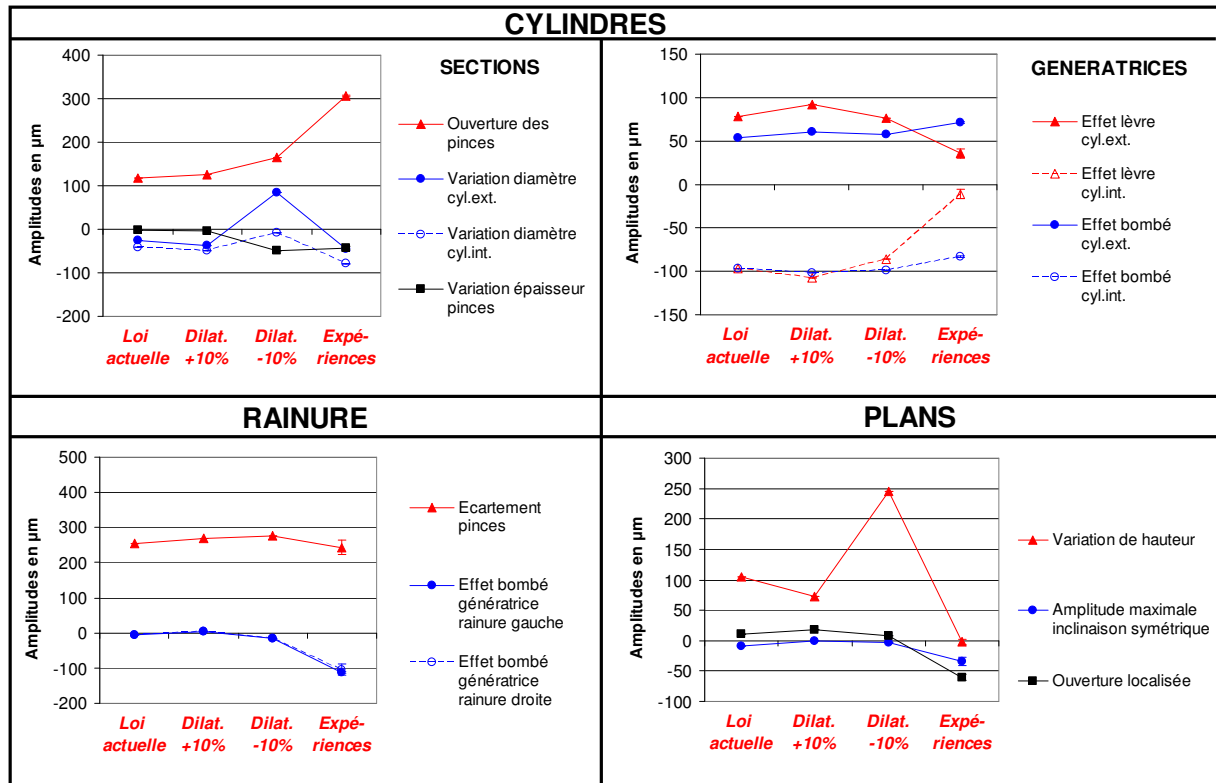


Figure VI - 33 : Amplitudes des phénomènes de déformation, après perturbation des coefficients de dilatations par phase

Par contre, une erreur de -10% agit fortement sur les phénomènes suivants :

- la variation de diamètres des cylindres correspond à une dilatation (+254%), ce qui n'est pas cohérent avec les résultats expérimentaux ;
- l'ouverture des pinces augmente de 41%, l'écartement de la rainure de +9% ;
- la diminution d'épaisseur des pinces augmente fortement (+1940%) ;
- la variation de hauteur augmente de 134%.

Cela est concordant avec une étude antérieure menée en interne au centre de recherche du partenaire industriel de ces travaux de thèse. Le coefficient de dilatation, notamment celui de l'austénite, semble prépondérant sur les déformations des pinces du croissant.

Enfin, la perturbation de  $\pm 10\%$  des coefficients de dilatation par phase ne permet pas une meilleure prédiction des amplitudes expérimentales.

### 5.2.3. Déformations dues à la variation volumique aux changements de phases : $\epsilon^r$

Les valeurs actuelles sont données dans le Tableau VI - 4.

	Température en °C	Variation volumique		Température en °C	Variation volumique		Température en °C	Variation volumique
	Ferrite	0.0		6.34E-03	Bainite		0.0	7.83E-03
	20.0	6.27E-03		20.0	7.76E-03		20.0	7.76E-03
	100.0	5.96E-03		100.0	7.45E-03		100.0	7.45E-03
	200.0	5.55E-03		200.0	7.04E-03		200.0	7.04E-03
	300.0	5.12E-03		300.0	6.61E-03		300.0	6.61E-03
	400.0	4.67E-03		400.0	6.16E-03		400.0	6.16E-03
	500.0	4.20E-03		500.0	5.69E-03		500.0	5.69E-03
	600.0	3.72E-03		600.0	5.21E-03		600.0	5.21E-03
	700.0	3.22E-03		700.0	4.71E-03		700.0	4.71E-03
	800.0	2.72E-03		800.0	4.20E-03		800.0	4.20E-03
	900.0	2.20E-03		900.0	3.69E-03		900.0	3.69E-03
	1000.0	1.69E-03		1000.0	3.17E-03		1000.0	3.17E-03
	1200.0	1.69E-03		1200.0	3.17E-03		1200.0	3.17E-03

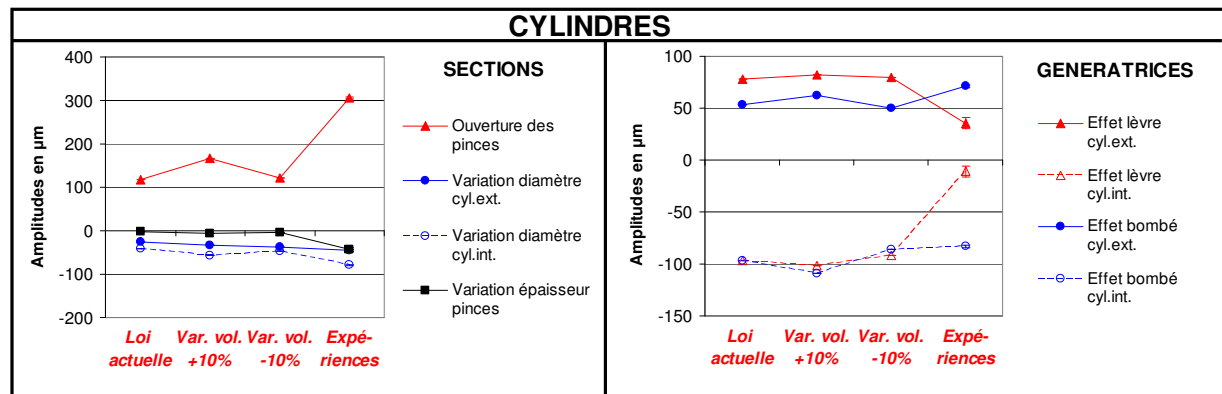
Tableau VI - 4 : Valeurs actuelles de la variation volumique par phase de la nuance 1

D'après la Figure VI - 34, une augmentation de 10% des valeurs de variations volumiques par phase a un impact sur les deux phénomènes suivants :

- l'ouverture des pinces augmente de 42% et l'écartement de seulement 10% ;
- l'effet bombé des génératrices de la partie massive augmente de 14%.

Une diminution de 10% affecte essentiellement l'amplitude de la variation de hauteur qui chute de 39%.

Enfin, la perturbation de  $\pm 10\%$  des valeurs de variations volumiques ne permet pas une meilleure prédiction des amplitudes expérimentales.



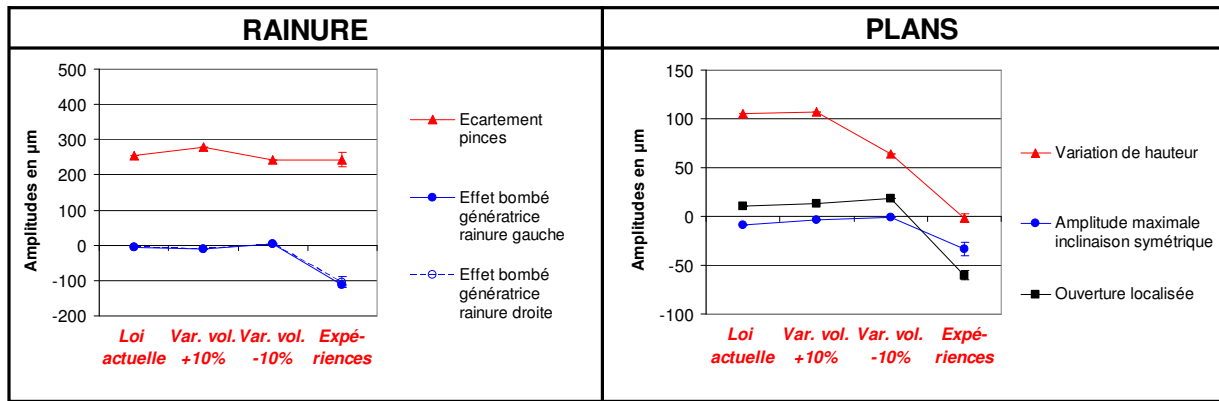


Figure VI - 34 : Amplitudes des phénomènes de déformation, après perturbation des valeurs de variations volumiques par phase

#### 5.2.4. Déformations dues à la plasticité de transformation de phase : $\epsilon^{pt}$

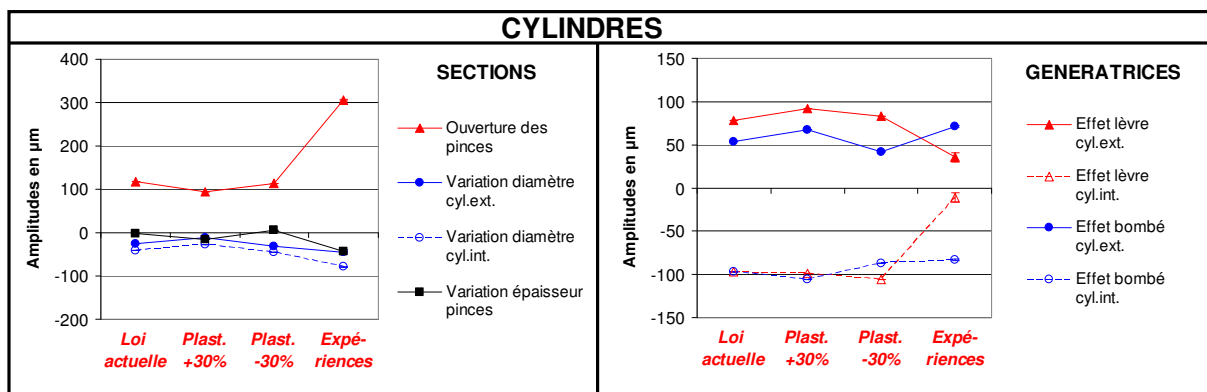
Les valeurs de plasticité de transformation de la nuance 1, à la température de référence de 0°, sont fournies dans le Tableau VI - 5. Ces valeurs correspondent au paramètre k de l'équation VI - 8.

	Temperature en °C	Plasticité de transformation
Ferrite	0.0	3.20E-04
Bainite	0.0	1.30E-04
Martensite	0.0	5.00E-05

Tableau VI - 5 : Valeurs actuelles de la plasticité de transformation de la nuance 1

L'augmentation de 30% de la plasticité de transformation de phase touche un grand nombre de phénomènes, qui sont les suivants (Figure VI - 35) :

- l'ouverture des pinces chute de 20% ;
- l'épaisseur radiale des pinces diminue de 521% ;
- l'écartement des pinces augmente de 9% du fait de l'augmentation de l'effet diabolique des génératrices de la rainure (-264%) ;
- la variation de hauteur diminue de 25%.



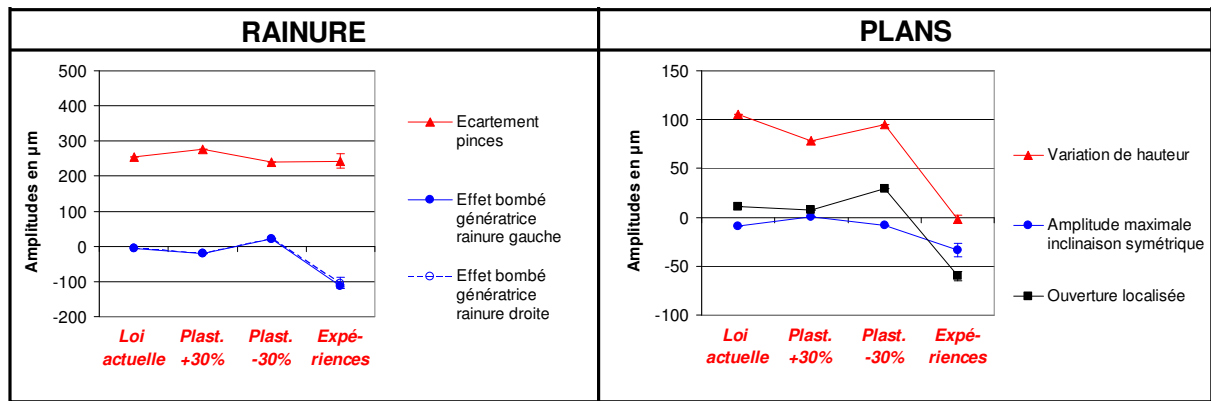


Figure VI - 35 : Amplitudes des phénomènes de déformation, après perturbation des valeurs de plasticité de transformation par phase

La diminution de 30% de la plasticité de transformation de phase affecte beaucoup moins de phénomènes :

- les deux génératrices de la rainure sont à présent en bombé (+454%) ;
- l'ouverture des plans augmente de 176%.

Enfin, la perturbation de  $\pm 10\%$  des valeurs de plasticité de transformation ne permet pas une meilleure prédiction des amplitudes expérimentales.

### 5.3. Conclusions

En résumé, cette étude de la robustesse des données thermo-mécaniques a montré que certains phénomènes de déformations du croissant sont plus sensibles que d'autres. Le Tableau VI - 6 répertorie les phénomènes les plus sensibles, en donnant pour chacun, la variation relative (%) et la variation absolue ( $\mu\text{m}$ ).

		CYLINDRES					RAINURE		PLANS	
Paramètres	Plage variation	Ouverture pinces	Variation épaisseur pinces	Variation diamètres	Déformation génératrices	Effet lèvres	Ecartement	Déformation génératrices	Variation de hauteur	Ouverture des plans
Rhéologie	+ 20%	+10% 12	-87% -2	-30% -10	+4% 3	+6% 5	-6% -15	-16% -1	-21% -22	+52% 5
	- 20%	-40% -47	-115% -3	-32% -11	+13% 9	+30% 24	+16% 40	+297% 17	-26% -27	+78% 8
Coefficients dilatation	+ 10%	+7% 8	-44% -1	-33% -10	+9% 5	+15% 12	+6% 16	152% 9	-30% -32	+68% 7
	- 10%	+41% 47	1940% 47	+254% 72	+5% 3	-6% -6	+9% 24	-175% -10	+134% 141	-23% -2
Variation volumique	+ 10%	+42% 49	-146% -4	-32% -11	+14% 10	+5% 5	+10% 25	-90% -5	+2% 2	+25% 3
	- 10%	+5% 5	-41% -1	-29% -9	-9% -7	+2% 3	-4% -11	+177% 10	-39% -41	+75% 8
Plasticité transformation	+ 30%	-20% -23	-521% -13	+42% 13	+18% 2	+9% 8	+9% 24	-264% -15	-25% -26	-31% -3
	- 30%	-2% -3	+324% 8	-15% -5	-16% -1	+8% 7	-6% -15	+454% 27	-10% -10	+176% 19

Tableau VI - 6 : Synthèse des phénomènes de déformation sensibles à la perturbation des données thermo-mécaniques (nuance 1) : variation relative (en %) / variation absolue (en  $\mu\text{m}$ )



*On observe que le phénomène de variation de hauteur est le plus sensible à toutes les perturbations des paramètres de la loi de comportement de la nuance 1.* En outre, ce sont globalement les déformations des pinces qui sont les plus perturbées, en particulier l'ouverture des pinces, la variation de leur épaisseur et l'effet lèvres. Cela est en accord avec le fait que la zone des pinces est la plus sensible aux effets thermomécaniques, métallurgiques et mécaniques, comme cela a été montré dans les parties 2 et 3 de ce chapitre.

Même avec une perturbation des paramètres très au-delà des marges d'incertitudes expérimentales, la prédiction des amplitudes expérimentales n'est pas satisfaisante pour les phénomènes suivants : l'ouverture des pinces, l'effet lèvres, l'effet bombé des deux génératrices de la rainure, la variation de hauteur et l'ouverture localisée des plans.

## 6. INFLUENCE DES DONNEES THERMIQUES

L'étude de la sensibilité des amplitudes des phénomènes de déformations aux paramètres thermiques de la loi de modélisation du procédé de trempe fait l'objet de cette dernière partie de ce chapitre. Dans la première partie, les coefficients d'échanges thermiques sont perturbés, ce qui affecte le transfert thermique par convection. Dans la seconde partie, c'est le transfert thermique par rayonnement qui est étudié, par son paramètre : l'émissivité.

### 6.1. Coefficients d'échanges thermiques

#### 6.1.1. Présentation de la loi de modélisation des échanges thermiques par convection

Le transfert thermique par convection est le mode d'échange le plus important en trempe martensitique. Il est caractérisé par un coefficient d'échange thermique, noté  $h$ , dont l'évolution a été donnée dans le paragraphe 1.3 du chapitre III.

$$\Phi_{\text{sortant}} = h(T_s - T_{\text{ext}}) \quad [\text{VI} - 10]$$

Ce coefficient  $h$  est exprimé en  $\text{W}/\text{m}^2/^\circ\text{C}$ . Il est calculé à partir de la relation (équation [VI - 10]) reliant :

- le flux  $\Phi$  de chaleur ( $\text{W}/\text{m}^2$ ) cédé par le croissant au milieu extérieur ;
- la température en surface du croissant  $T_s$  ;
- la température du milieu refroidissant  $T_{\text{ext}}$ .

Ces températures ont été mesurées expérimentalement lors des trempes huile et gaz, à l'aide des thermocouples de type K (classe 1) placés sur le croissant. La norme IEC 584-2 [IEC82] spécifie une incertitude de mesure de la température de :

- $\pm 1,5^\circ\text{C}$  pour une plage de températures allant de  $20^\circ\text{C}$  à  $375^\circ\text{C}$  ;
- $\pm 0,004.T$  avec  $T$  la valeur absolue de la température mesurée, pour des températures de  $375$  à  $1000^\circ\text{C}$ .

#### 6.1.2. Détermination des coefficients d'échange thermique

La détermination des coefficients est complexe car elle dépend des phénomènes à l'interface pièce/fluide : caléfaction en trempe huile, changements de phase perturbant les propriétés thermophysiques, etc. [ALI00]. La détermination se fait par méthode inverse, en résolvant les équations thermiques jusqu'à obtenir une bonne correspondance entre la simulation et l'expérience.

**La sensibilité des phénomènes de déformations du croissant sera évaluée face à une variation sévère des coefficients d'échanges de  $\pm 30\%$ , ce qui est supérieure aux incertitudes de mesures.** En effet, pour le gaz R-113 (Bromotrifluoroéthylène), l'incertitude sur la détermination des coefficients de transfert thermique varie de  $\pm 5.22\%$  à  $\pm 18.1\%$  suivant les températures et les pressions appliquées [LEE01]. Selon Jiang et al. [JIA04], l'incertitude s'élève à  $\pm 11.2\%$  dans le cas de l'eau et de l'air.

Le coefficient d'échange thermique dépend donc du couple matériau/fluide (huile, gaz) mais aussi de la vitesse du fluide refroidissant aux interfaces du croissant [LEFE04]. Au cours des trempes effectuées, l'analyse des températures données par les thermocouples a révélé que le champ des vitesses de refroidissement n'est pas homogène : les vitesses sont plus petites sur la surface intérieure du croissant (confinement du fluide) que sur la surface extérieure. On a ainsi défini deux évolutions des coefficients d'échanges : une pour l'extérieur et une pour l'intérieur.

**L'application des valeurs de coefficients d'échanges de la surface extérieure à la surface intérieure permettra de vérifier si cette hypothèse n'est pas trop forte.**

### 6.1.3. Application à la trempe gaz 18b du croissant de la nuance 1

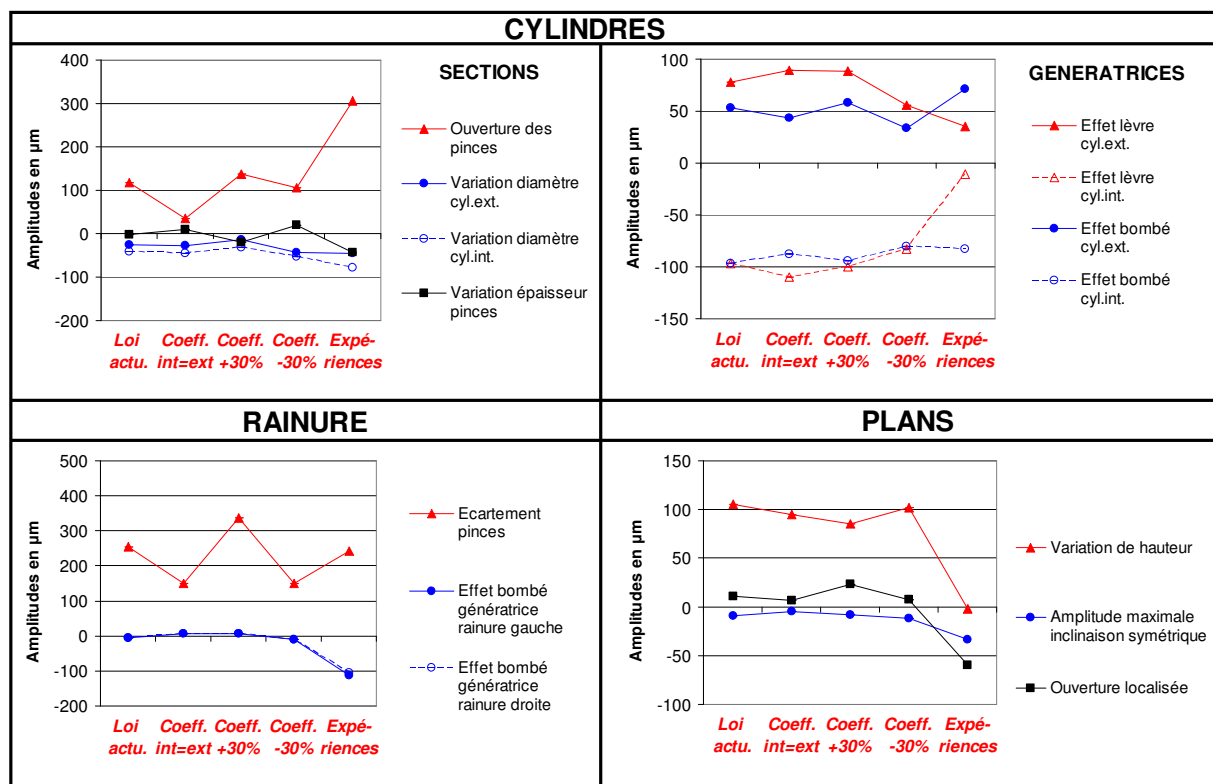
Les cas suivants sont donc pris en compte :

- une variation de  $\pm 30\%$  des coefficients d'échanges en trempe gaz 18 bars ;
- $h_{int}=h_{ext}$ , c'est-à-dire l'échange thermique sur la surface intérieure du croissant est le même que sur celle extérieure.

La Figure VI - 36 présente les amplitudes des phénomènes de déformations du croissant pour ces trois cas. Les amplitudes sont comparées par rapport au cas référence, correspondant aux coefficients d'échanges thermiques initiaux. Face à cette perturbation des échanges thermiques, la sensibilité des phénomènes de déformations n'est pas la même.

Le cas où les coefficients intérieurs sont égaux à ceux extérieurs affecte principalement les phénomènes suivants :

- l'ouverture des pinces diminue de 70% ;
- les pinces se dilatent car leur épaisseur augmente de 490% ;
- l'écartement des pinces diminue de 41% ;
- l'effet bombé des génératrices de la partie massive diminue de 14% ;
- l'effet lèvres augmente de 14% ;
- la variation de hauteur diminue de 10%.



**Figure VI - 36 : Amplitudes des phénomènes de déformation, après perturbation des coefficients d'échanges thermiques**

L'augmentation de 30% des échanges thermiques sur les surfaces extérieure et intérieure entraîne les effets suivants :

- les pinces se contractent car leur épaisseur diminuent de 730% ;
- l'ouverture des pinces augmente de 18% ;
- l'écartement des pinces augmente de 33% ;
- la variation de hauteur diminue de 20% et l'ouverture localisée des plans augmente de 115%.

La diminution de 30% des échanges thermiques sur les surfaces extérieure et intérieure entraîne les effets suivants :

- les pinces se dilatent car leur épaisseur augmente de 905% ;
- l'ouverture des pinces diminue de 9% ;
- l'écartement des pinces diminue de 41% ;
- l'effet lèvres des génératrices des pinces diminue de 22%.

#### 6.1.4. Synthèse

Le Tableau VI - 7 récapitule les phénomènes de déformations les plus sensibles à ces perturbations de l'échange thermique par convection, en précisant la variation relative (en %) et la variation absolue (en  $\mu\text{m}$ ). Ces phénomènes sont les mêmes que ceux identifiés comme étant sensibles à l'influence des paramètres de la caractérisation du matériau. **Les phénomènes de déformations les plus sensibles aux perturbations des échanges thermiques par convection sont majoritairement ceux des pinces.** Cela est cohérent car ces coefficients agissent directement sur les temps de début des transformations de phase et sur les déformations métallurgiques et mécaniques, dont l'importance a été soulignée au cours de ce chapitre.

La considération de deux échanges thermiques, un pour la surface extérieure, l'autre pour celle intérieure n'est pas une hypothèse forte. En effet, le cas où les coefficients d'échanges à l'intérieur du croissant sont les mêmes que ceux à l'extérieur a pour conséquence principale une mauvaise prédiction de l'ouverture des pinces.

Paramètres	Plage variation	CYLINDRES					RAINURE	PLANS	
		Ouverture pinces	Variation épaisseur pinces	Variation diamètres	Déformation génératrices	Effet lèvre	Ecartement	Variation de hauteur	Ouverture des plans
Coefficients d'échange thermique	Int.=Ext.	-70%	+490%	-9%	-14%	+14%	-41%	-10%	-37%
		-82	12	-3	-10	12	-104	-10	-4
	+ 30%	+18%	-730%	+37%	+3%	+8%	+33%	-20%	+115%
		21	-18	12	3	7	84	-20	12
	- 30%	-9%	+905%	-45%	-28%	-22%	-41%	-3%	-27%
		-10	22	-14	-2	-18	-104	-3	-3

Tableau VI - 7 : Phénomènes de déformations sensibles à la perturbation des coefficients d'échange thermique (nuance 1)

Concernant les structures finales du croissant, les répartitions de la bainite et de la martensite sont les plus affectées (Figure VI - 37). Une intensification de 30% de l'échange par convection a pour effet de créer plus de martensite dans le croissant pour une même durée de trempe. Le taux de bainite est alors moindre. Cette conséquence est logique, puisqu'une augmentation de 30% de l'échange thermique accroît la vitesse de refroidissement. Les moments de début de transformations des phases sont ainsi avancés, ce qui augmente le temps disponible pour transformer les phases.

A l'opposé, dans le cas d'une diminution de 30% de l'échange thermique, il y a plus

de bainite et moins de martensite. En effet, dans ce cas, les vitesses de refroidissement sont moindres, ce qui retarde les instants de début de transformations et diminue le temps disponible pour transformer les phases.

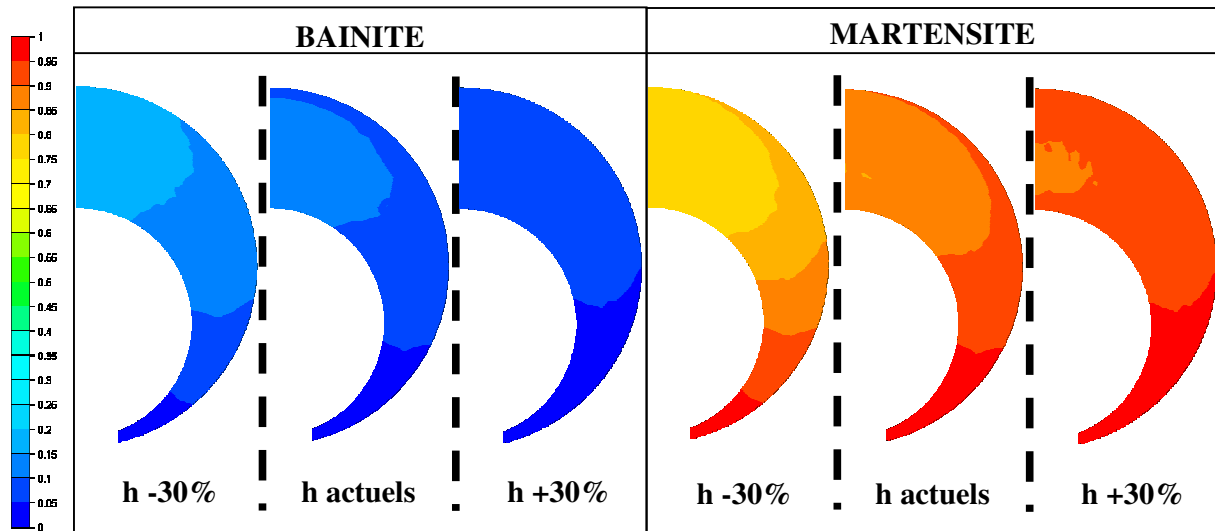


Figure VI - 37 : Influence des coefficients  $h$  d'échanges thermiques sur la répartition finale des phases, 1, trempe gaz 18b

## 6.2. Emissivité

### 6.2.1. Présentation de loi de modélisation des échanges thermiques par rayonnement

L'émissivité, notée  $\epsilon$ , traduit la capacité d'un matériau à absorber et à rayonner, c'est-à-dire à réémettre une partie de l'énergie électromagnétique reçue. Plus précisément, l'émissivité est le rapport entre l'énergie rayonnée par un matériau et celle qu'un corps noir rayonnerait à la même température. Le transfert de chaleur par radiation ou rayonnement s'effectue par excitation électromagnétique des atomes, le spectre de l'infrarouge étant prédominant. Le flux de chaleur sortant d'un corps à travers sa surface suit la loi de Stefan-Boltzmann (équation [V - 1]).  $T_s$  et  $T_{ext}$  sont respectivement la température en surface du corps et la température du milieu refroidissant,  $\sigma_{SB}$  est la constante de Stefan-Boltzmann.

$$\Phi_{\text{sortant}} = \epsilon \sigma_{SB} (T_s^4 - T_{ext}^4) \quad [\text{VI} - 11]$$

Dans le cas du corps noir, qui absorbe toute l'énergie électromagnétique, l'émissivité vaut 1. Pour un corps quelconque, l'émissivité est inférieure à 1.

Pour les aciers, on considère généralement une émissivité constante égale à 0,88 [CARD08]. Lu et al. [LU06] utilisent une valeur d'émissivité de 0,9 pour l'acier inoxydable d'une pale de turbine de compresseur à gaz.

Par commodité de calcul, l'émissivité est souvent considérée comme constante et indépendante de la température, alors qu'en réalité, sa valeur dépend de la température, de la direction du rayonnement et de sa longueur d'onde. Par ailleurs, l'émissivité dépend fortement de l'état de surface du matériau. Ainsi, plus la rugosité est importante, plus les directions de réflexions du rayonnement sont multiples, et plus l'émissivité augmente [HER05]. En effet, la présence d'aspérités permet à une partie du rayonnement de s'auto-réfléchir sur la surface (Figure VI - 38 a)). A l'opposé, une surface parfaitement polie réfléchira le rayonnement suivant un angle de réflexion privilégié. Rouh [ROU85] indique les émissivités de matériaux usuels (Figure VI - 38 b)) et l'on constate qu'un acier poli a une émissivité de 0.08, c'est-à-dire une valeur environ dix fois plus faible qu'un acier oxydé (0.75).

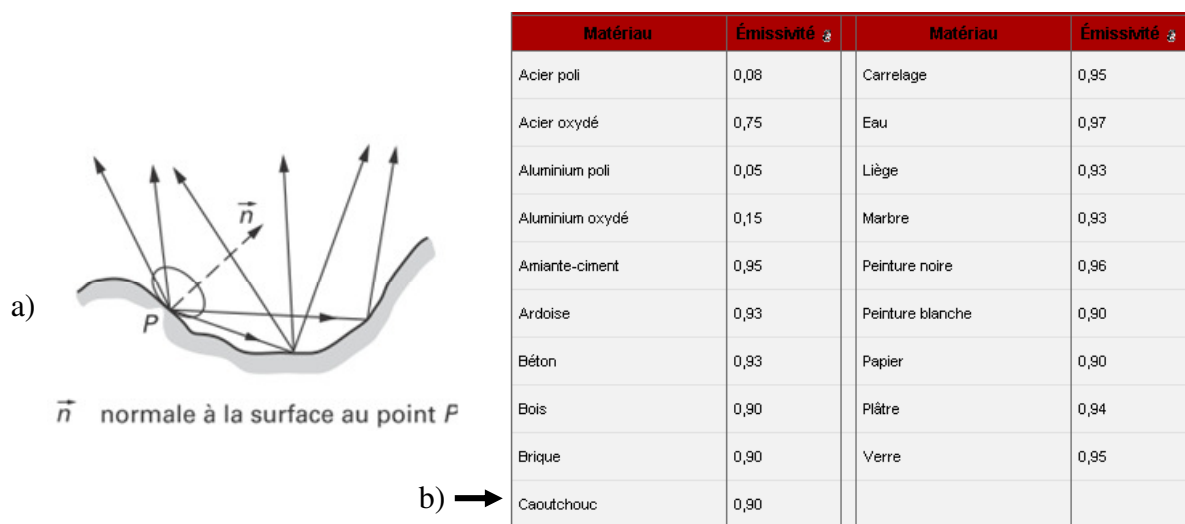


Figure VI - 38 : a) Influence de la rugosité sur l'émissivité [HER05] et b) Emissivité de matériaux courants, à 20°C [ROU85]

### 6.2.2. Détermination de l'influence de l'émissivité

Il n'existe que peu de travaux de recherche sur la modélisation du transfert thermique par rayonnement entre un métal chaud et le milieu de trempe. Les simulations de trempe huile réalisées dans ces travaux de thèse ont été effectuées sans prendre en compte le rayonnement réciproque entre le croissant chaud, l'huile et les parois du bac de trempe. En trempes gaz, la proximité des croissants sur un même montage n'a pas été modélisée, alors que cela favorise le transfert par radiation.

La documentation du logiciel Forge® 2008 préconise une émissivité nulle lors de la trempe d'un acier à l'eau. Le transfert thermique par radiation n'est donc pas simulé, ce qui paraît cohérent car l'eau a une émissivité de 0,93 pour [EUR\*\*] et 0,97 [ROU85], ce qui la rapproche de celle d'un corps noir. Cela signifie donc que l'eau absorbe la quasi-totalité du rayonnement et n'en réémet qu'une faible partie qui atteindra la pièce. La réciprocity des échanges par rayonnement en trempe eau est donc faible et peut donc être négligée.

Partant de ce constat et sachant que l'huile a une émissivité de 0,94, c'est-à-dire proche de celle de l'eau, on peut raisonnablement penser que le transfert thermique par radiation en trempe huile n'a pas d'influence significative. Cette hypothèse fait l'objet d'une vérification dans le paragraphe suivant.

### 6.2.3. Application à la trempe huile du croissant de la nuance 1

L'influence de l'émissivité sur les amplitudes des phénomènes de déformations et sur la répartition finale des phases est étudiée. Deux cas sont envisagés :

- le premier est celui où l'émissivité nulle. C'est le cas des simulations effectuées dans ces travaux de thèse ;
- le deuxième est celui où l'émissivité égale à 0.88. Cette valeur correspond à un acier oxydé, ce qui est le cas des trempes huiles réalisées.

Comme le prouve la Figure VI - 39, **l'émissivité de 0,88 n'a quasiment pas d'influence sur les amplitudes des phénomènes de déformations**. En effet, la variation moyenne des amplitudes par rapport à celles obtenues avec l'émissivité nulle est de seulement 5%. Seul l'effet lèvres est réellement affecté avec une diminution d'amplitude de 15%

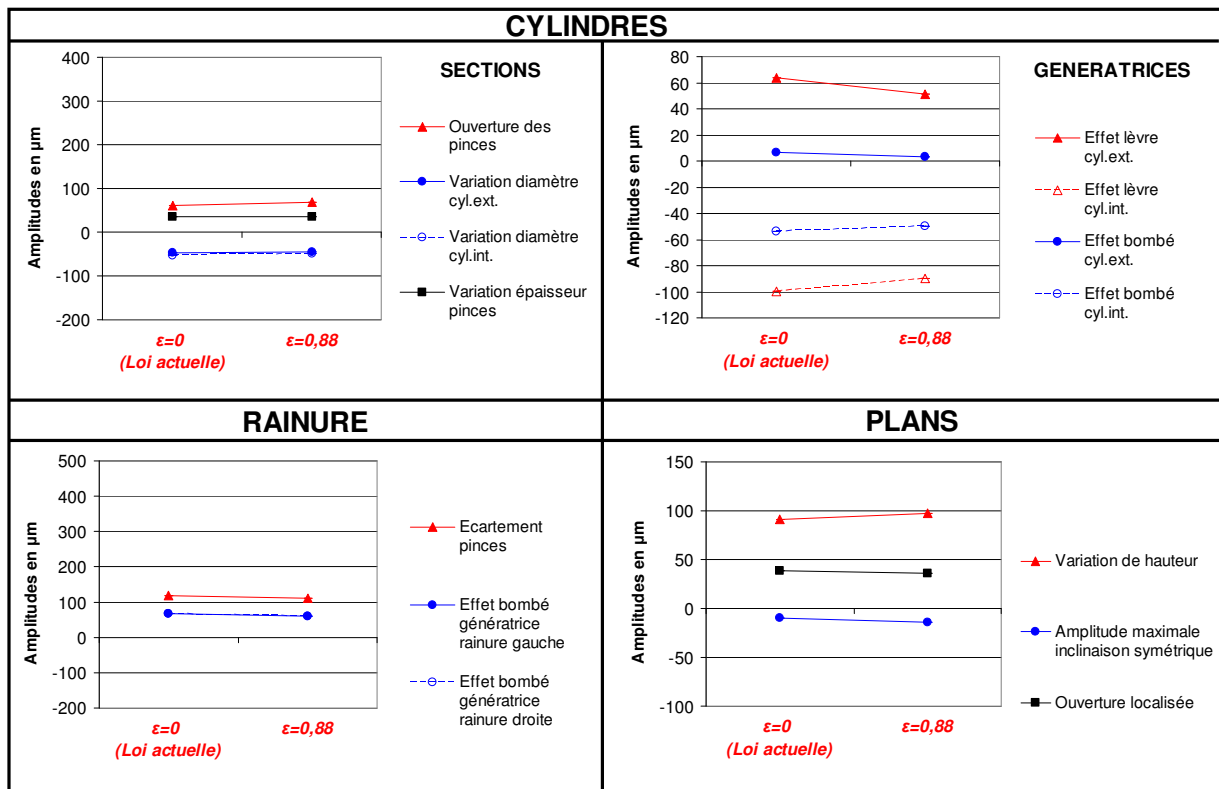


Figure VI - 39 : Influence de l'émissivité sur les amplitudes des phénomènes de déformation du croissant de la nuance 1, en trempe huile

On retrouve cette faible influence de l'émissivité de 0,88 par rapport à l'émissivité nulle en ce qui concerne les structures finales (Figure VI - 40). Toutefois, il est intéressant de constater que la prise en compte des échanges thermiques par rayonnement a pour conséquence l'augmentation des fractions de phases créées au sein du croissant. En effet, l'émissivité accélère le refroidissement du croissant puisqu'en plus de la chaleur cédée par convection au fluide, une autre partie de la chaleur est cédée par radiation. Les moments de débuts de transformations sont donc avancés.

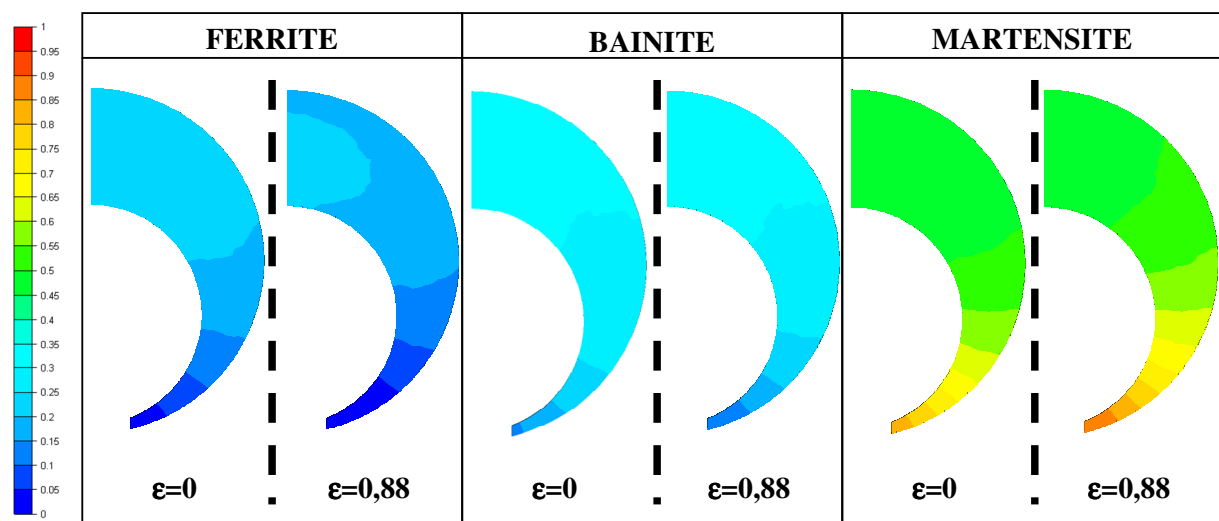


Figure VI - 40 : Influence de l'émissivité sur la répartition finale des phases, 1, trempe huile

### 6.3. Conclusions

La perturbation des échanges thermiques par convection affecte principalement les

déformations des pinces. Ces phénomènes sont d'ailleurs plus sensibles aux échanges thermiques qu'aux paramètres du matériau. En effet, cette perturbation a des répercussions directes sur les effets thermo-mécaniques et métallurgiques de cette zone. La prise en compte du transfert thermique par rayonnement est négligeable devant le transfert par convection et n'a quasiment pas d'influence sur les amplitudes des phénomènes de déformations et sur les fractions de phases formées dans le croissant.

## 7. CONCLUSIONS

### 7.1. Objectif n°1 : Appréhender l'apparition des déformations

L'investigation numérique menée dans ce chapitre a permis d'appréhender les mécanismes de formation des phénomènes de déformations du croissant. Les processus de chauffe et de trempe ont été suivis dans leur totalité, par la prise en compte des interactions réciproques entre les phénomènes thermiques, mécaniques et métallurgiques.

A ce titre, l'utilisation de la méthode développée dans ces travaux de thèse a permis de quantifier l'évolution des phénomènes de déformations aux instants clés de la trempe huile. Les phénomènes de déformations dépendants des effets thermomécaniques et ceux liés aux effets métallurgiques et mécaniques sont ainsi identifiés.

#### 7.1.1. Déformations en chauffe

Les dilatations volumiques sont dues aux conséquences dimensionnelles des effets couplés thermiques et mécaniques. En effet, pendant tout le chauffage, il existe un gradient de température entre la peau (siège de la température maximale) et le cœur de la pièce (siège de la température minimale), gradient d'autant plus important sur les zones de plus forte section, comme la partie massive du croissant. Ce gradient crée donc des déformations élastiques, et donc une dilatation homogène des dimensions des cylindres, des plans et de la rainure. ***Cela aboutit à une augmentation volumique de l'ordre de 3% par rapport au volume initial du croissant, pour les nuances étudiées.***

Les déformations plastiques sont créées par le biais des effets couplés métallurgiques et mécaniques. ***Ainsi, la transformation de la phase ferrito-perlitique en austénite engendre, au moment où elle se produit, une contraction volumique importante, égale à 0,5%. Pour le passage de la martensite à l'austénite (nuance 4), la contraction volumique constatée est de 0,8%.*** Ces amplitudes de contraction sont cohérentes avec celle de 1% annoncée par Murry [MUR00].

Les déformations constatées en fin de chauffe sont familières puisque ce sont celles identifiées expérimentalement lors des trempes. ***La chauffe est donc primordiale car elle conditionne les déformations initiales.*** On aura donc tout intérêt à minimiser les déformations lors de la chauffe. Murry [MUR00] préconise par exemple de réaliser un chauffage d'autant plus lent que la section de la pièce est plus forte et de procéder éventuellement à des interruptions du chauffage pendant lesquelles le gradient de température se résorbera partiellement. En cas d'absence de gradient de température, les transformations de phase sont effectuées simultanément en tout point de la pièce. Il n'y a donc pas de modifications de forme, mais uniquement une augmentation isotrope du volume.

#### 7.1.2. Déformations en trempe

La diminution du volume du croissant lors du refroidissement permet de se rapprocher du volume initial. ***Ainsi, pour la nuance 1, la différence volumique par rapport au croissant théorique est égale à 0,13% en trempe huile, 0,18% en trempes gaz 3b et 12b et 0,19% pour la pression de 18b.*** Par ailleurs, la ***transformation de l'austénite en martensite*** s'accompagne d'une ***dilatation volumique de 0,15% en trempe huile, 0,24% en trempes gaz 3b et 12b et 0,25% en trempe gaz 18b.***

L'évolution des amplitudes des phénomènes de déformations relevées lors de la trempe se fait de la façon suivante :

- de 0s à 10s de trempe, les déformations thermomécaniques n'entraînent globalement qu'une **contraction volumique isotrope** du croissant ;
- dès 10s jusqu'à 200s, les déformations métallurgiques et mécaniques dues aux transformations de phase successives agissent fortement sur la géométrie du croissant. Les fronts de formation de ces phases se propagent circulairement et radialement et modifient l'état des contraintes. Ainsi, la ferrite et la bainite provoquent une frange de compression et la martensite, une frange de traction. La combinaison de ces franges est complexe car la propagation est décalée à la fois temporellement et spatialement : aussi, le gradient thermique et de contraintes entre les pinces et la partie massive est élevé. **La zone des pinces est donc la plus affectée** car avec le faible volume en présence, les transformations de phases y sont les plus rapides et les valeurs de contraintes les plus importantes ;
- de 200s à la fin de la trempe, les effets des déformations thermo-mécaniques sont à nouveau prépondérants. La **contraction volumique**, initiée depuis le début de la trempe, s'achève progressivement.

## 7.2. Objectif n°2 : Evaluer l'influence des données expérimentales

La perturbation des données expérimentales modélisant le comportement mécanique du matériau et les échanges thermiques par convection a permis de mettre en évidence la sensibilité des phénomènes suivants :

- la variation de hauteur ;
- les déformations des pinces, surtout l'ouverture des pinces, la variation de leur épaisseur et l'effet lèvres.

La perturbation de l'échange thermique par convection affecte directement les vitesses de refroidissement et donc les temps de début des transformations de phase. La proportion des phases créées lors de la trempe est donc modifiée : une intensification de 30% de l'échange thermique par convection favorise la formation de martensite, alors qu'une réduction de 30% favorise la bainite. Comme les phases majoritaires sont distinctes d'un cas à l'autre, les déformations dues à ces changements de phase sont différentes.

La perturbation des données mécaniques influence directement les déformations métallurgiques et mécaniques. A ce titre, la plasticité de transformation et les coefficients de dilatation par phase sont les deux paramètres du matériau affectent le plus de phénomènes de déformations du croissant. A l'opposé, la variation volumique lors de la création d'une phase est le paramètre qui affecte le moins de phénomènes de déformation.

Or, la zone des pinces est la plus sensible aux effets thermo-mécaniques et métallurgiques et mécaniques, comme cela a été souligné au cours de ce chapitre. Les phénomènes de déformations en relation avec les pinces sont donc les plus affectés par la perturbation des paramètres mécaniques du matériau et de l'échange thermique par convection. Néanmoins, même avec une perturbation des paramètres au-delà des marges d'incertitudes expérimentales, la prédiction des amplitudes expérimentales n'est pas satisfaisante pour les phénomènes des pinces et la variation de hauteur.

Le logiciel Forge® 2008 utilise un modèle macroscopique pour prédire la déformation globale. Les lois décrivant les matériaux répondent à des aspects phénoménologiques au niveau macroscopique du comportement des matériaux, et basés sur l'observation expérimentale de phénomènes physiques, comme par exemple la plasticité de transformation de phase [PEU03]. Une approche plus locale, micromécanique serait peut être plus adaptée pour prédire les faibles déformations en traitement thermique rencontrées lors de cette étude.



