

CONFRONTATION DES RESULTATS EXPERIMENTAUX ET PREDICTIFS DES TREMPES DE LA NUANCE 1

4.1. Trempe gaz 3b

4.1.1. Analyse quantitative des phénomènes de déformations

La comparaison des amplitudes des phénomènes de déformations identifiées à partir des essais expérimentaux et des simulations numériques est donnée dans la Figure V - 17.

Pour cette trempe, l'outil prédictif permet de prédire correctement les tendances et les amplitudes des phénomènes de déformations. Pour donner un ordre de grandeur, la moyenne des différences, en valeur absolue, entre les amplitudes « réelles » et « simulées » est de 39 μm , pour une amplitude moyenne, en valeur absolue, de 50 μm .

La meilleure concordance d'amplitude entre les expériences et la simulation numérique est obtenue pour les trois phénomènes suivants :

- l'effet bombé des deux génératrices de la rainure, avec seulement 1 μm de différence (3%) ;
- l'écartement des pinces, avec 17 μm (9%) ;
- l'ouverture des pinces, avec 63 μm (54%).

Pour les autres phénomènes, les écarts varient entre 60% pour la variation des diamètres et 319% pour la variation d'épaisseur des pinces. Cependant, ce fort pourcentage vient du fait qu'il y a diminution de l'épaisseur des pinces en expériences et prédiction d'une augmentation en simulation. Cette remarque vaut aussi pour le phénomène de variation de hauteur. Enfin, les effets lèvre et bombé des génératrices sont surestimés en simulation.

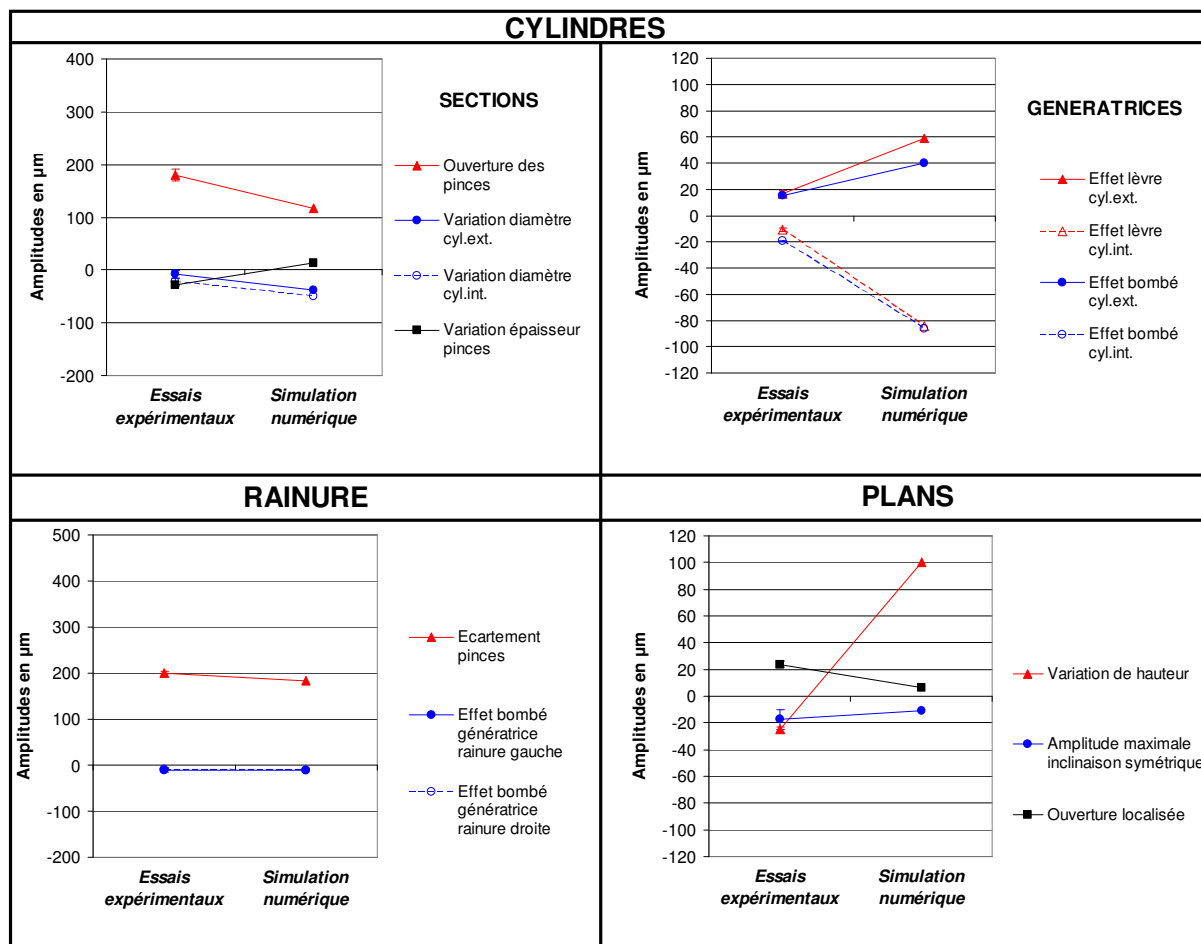


Figure V - 17 : Comparaison des amplitudes de déformations des croissants issus des campagnes expérimentales et de simulation, nuance 1, après trempe gaz 3b

4.1.2. Volume en fin de trempe

Contrairement aux croissants mesurés qui perdent en moyenne 0,03% de leur volume lors de la trempe gaz 3 bars, le croissant simulé en gagne 0,17% (Figure V - 18). Cette perte est due à la diminution de hauteur du croissant, ce qui est surprenant car la chauffe est réalisée sous atmosphère contrôlée, ce qui limite la décarburation de l'acier.

Le volume des croissants réels après détensionnement n'est pas le même que celui théorique : il est plus petit de 1477 mm³. Or, il a été prouvé au paragraphe 4.2.2 du chapitre III, que le recuit de détensionnement actuel ne provoque pas de modifications géométriques. Cela signifie donc que cette différence volumique est liée à l'usinage du croissant.

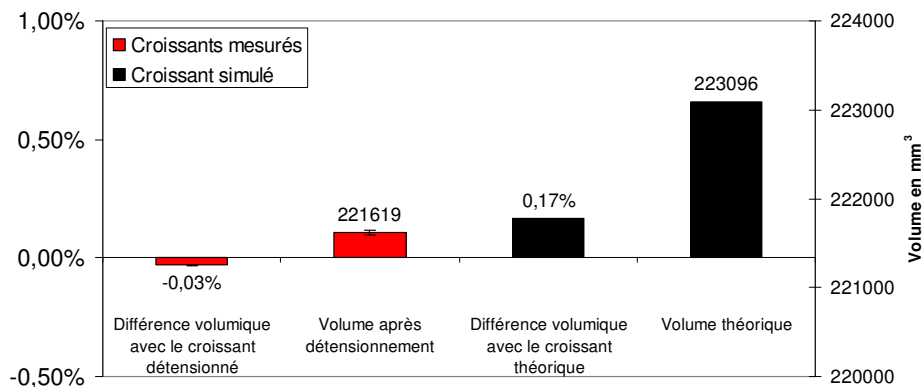


Figure V - 18 : Comparaison des variations volumiques entre les géométries avant et après trempe gaz 3b, nuance 1

4.2. Trempe gaz 12b

4.2.1. Analyse quantitative des phénomènes de déformations

La prédiction des amplitudes des phénomènes de déformations est moins précise que pour la trempe gaz 3 bars (Figure V - 19). En effet, les amplitudes de l'ouverture des pinces, de l'effet lèvres et de la variation de hauteur sont les plus mal évaluées par la simulation numérique.

La moyenne des différences, en valeur absolue, entre les amplitudes « réelles » et « simulées » est plus élevée que pour la trempe 3 bars, avec une valeur de 59 μm , pour une amplitude moyenne de 69 μm . Les meilleures prédictions des amplitudes sont celles des phénomènes de variation du diamètre extérieur et d'écartement des pinces.

L'analyse des déformations des génératrices du croissant simulé révèle l'importance de l'effet lèvres par rapport à l'ouverture des pinces. C'est l'inverse pour les croissants mesurés où l'ouverture des pinces est beaucoup plus grande que l'effet lèvres.

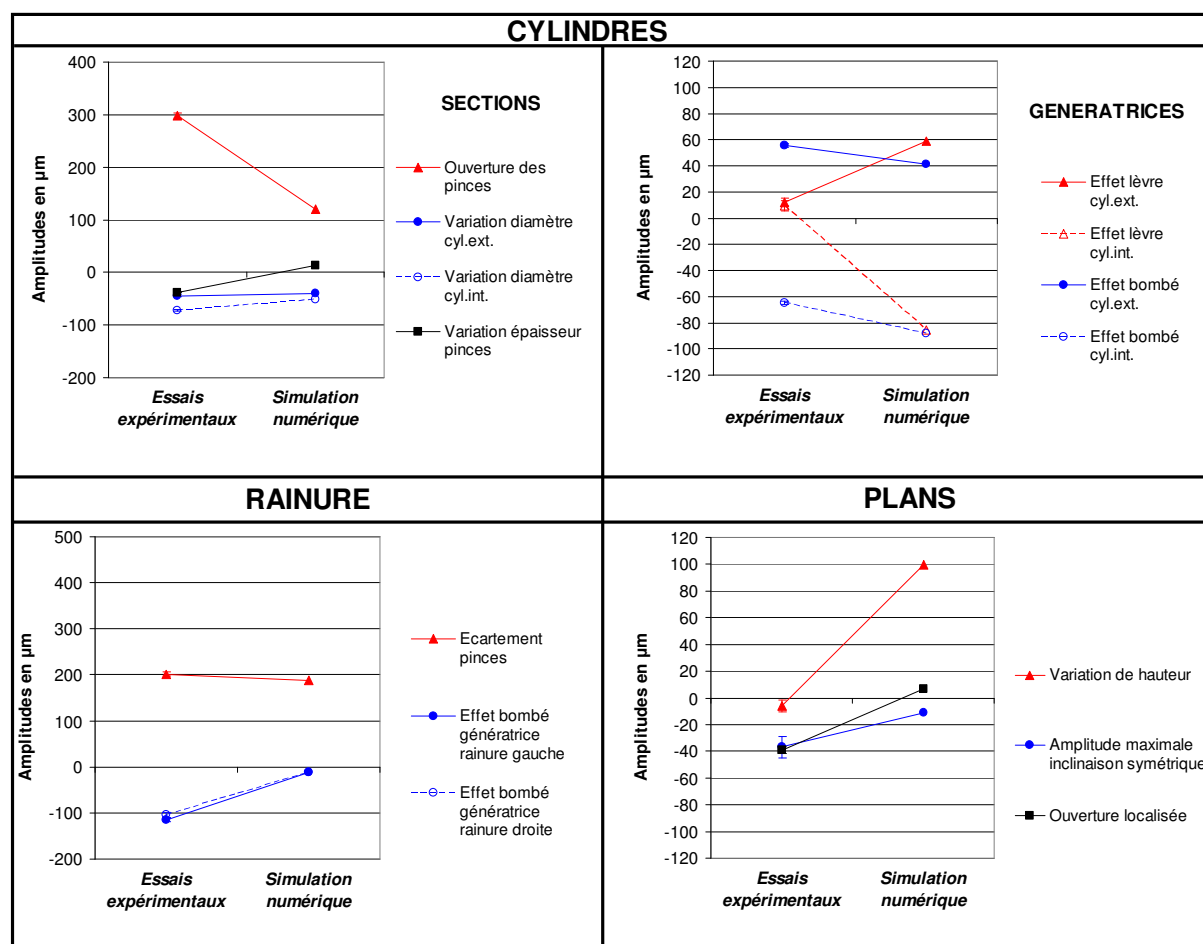


Figure V - 19 : Comparaison des amplitudes de déformations des croissants issus des campagnes expérimentales et de simulation, nuance 1, après trempe gaz 12b

4.2.2. Volume en fin de trempe

Le croissant simulé a gagné en moyenne, 0,17% de volume (Figure V - 20), tout comme la trempe à 3 bars. C'est aussi le cas des croissants réels, avec une hausse du volume de 0,06%. Par rapport à la trempe gaz 3 bars, le volume après détensionnement, et donc après usinage, se rapproche de celui théorique (environ 1061 mm^3 de différence).

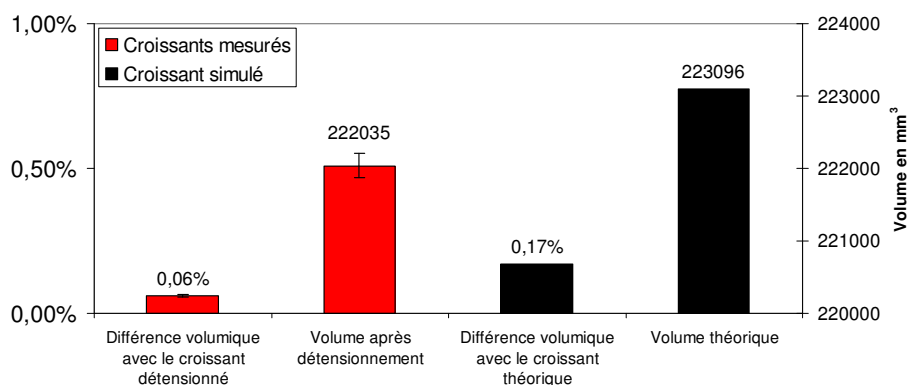


Figure V - 20 : Comparaison des variations volumiques entre les géométries avant et après trempe gaz 12b, nuance 1

4.3. Trempe gaz 18b

4.3.1. Analyse quantitative des phénomènes de déformations

La précision de la prédiction des amplitudes des phénomènes de déformations est similaire à celle obtenue avec la simulation de trempe 12b (Figure V - 21). En effet, la moyenne des différences, en valeur absolue, entre les amplitudes « réelles » et « simulées » est de 62 μm , la valeur étant de 59 μm pour la trempe 3 bars. L'amplitude moyenne des phénomènes est ici plus élevée, et vaut 76 μm . L'influence de la pression 18 bars par rapport celle de 12 bars est donc faible, ce constat ayant été effectué lors des résultats expérimentaux.

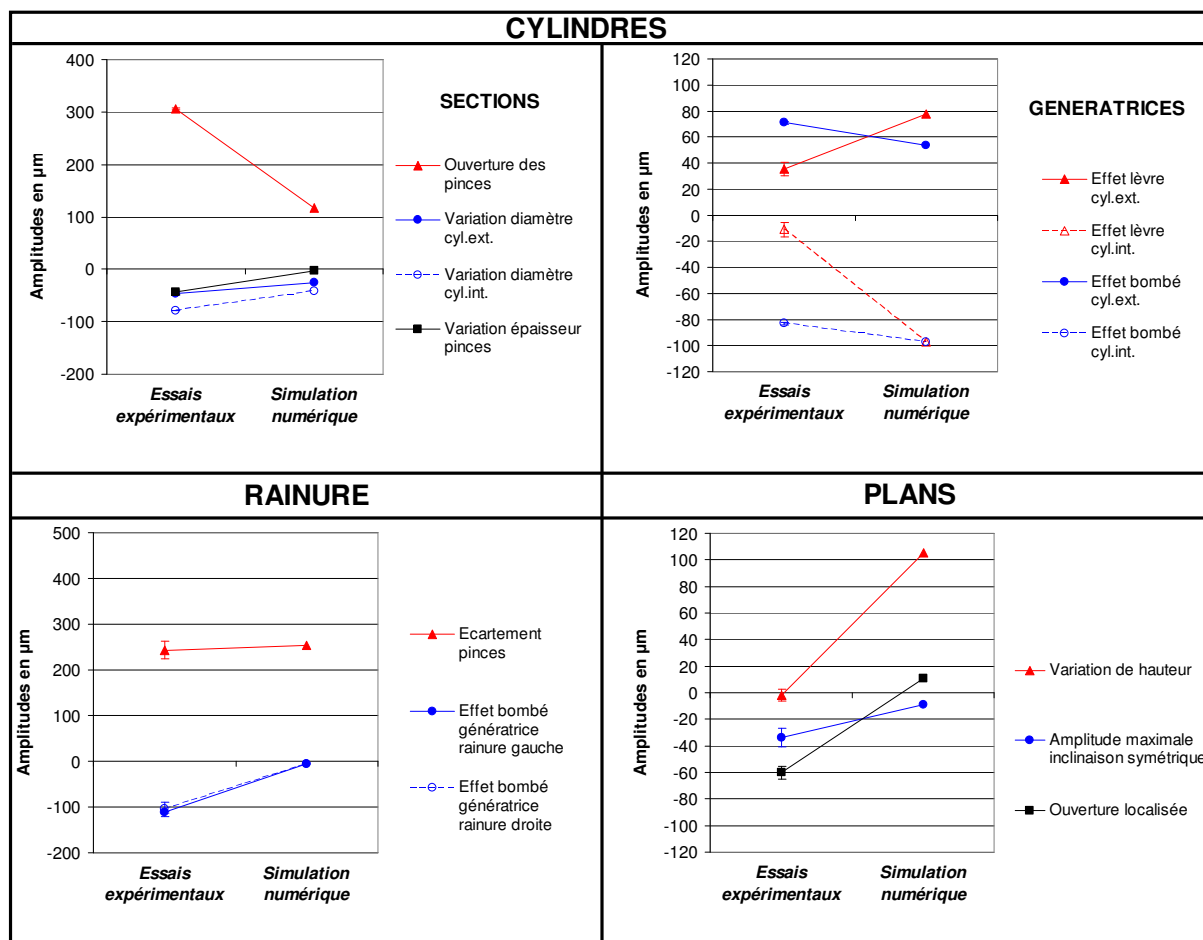


Figure V - 21 : Comparaison des amplitudes de déformations des croissants issus des campagnes expérimentales et de simulation, nuance 1, après trempe gaz 18b

Une fois encore, les meilleures prédictions des amplitudes sont celles des phénomènes de variation du diamètre extérieur et d'écartement des pinces. Les moins bonnes concernent l'ouverture des pinces, l'effet lèvre et de la variation de hauteur.

4.3.2. Volume en fin de trempe

La variation de volume du croissant simulé est la même que pour les trempes 12 bars et 3 bars (Figure V - 22). Pour les croissants mesurés, le volume gagné est le même qu'en trempe 12b. Avec une différence de seulement 320 mm³, le volume moyen après détensionnement est quasiment le même que celui théorique, à la marge d'erreur près.

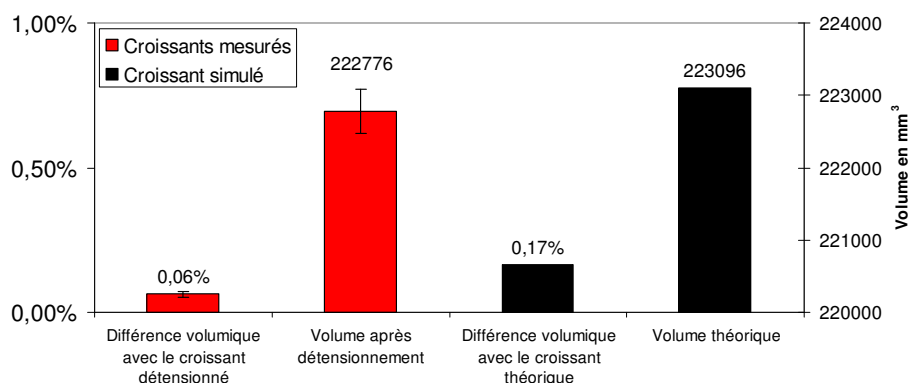


Figure V - 22 : Comparaison des variations volumiques entre les géométries avant et après trempe gaz 18b, nuance 1

4.4. Trempe huile

4.4.1. Analyse quantitative des phénomènes de déformations

La précision de la prédiction des amplitudes des phénomènes de déformations est la moins bonne des quatre trempes de la nuance 1 (Figure V - 23). En effet, la moyenne des différences, en valeur absolue, entre les amplitudes « réelles » et « simulées » est de 81 µm, pour une amplitude moyenne des phénomènes de 73 µm.

Dans le même temps, le phénomène d'écartement des pinces, dont l'amplitude était la mieux prédite en trempes gaz, est très sous-estimé en trempe huile. La différence entre les résultats expérimentaux et la simulation est de 350%, alors que pour les trempes gaz, la différence était en moyenne de 6%.

Les phénomènes dont l'amplitude est la mieux prédite sont l'effet lèvre des génératrices du cylindre extérieur et la variation du diamètre extérieur. Les moins bonnes prédictions concernent l'ouverture des pinces, leur écartement et la variation de hauteur.

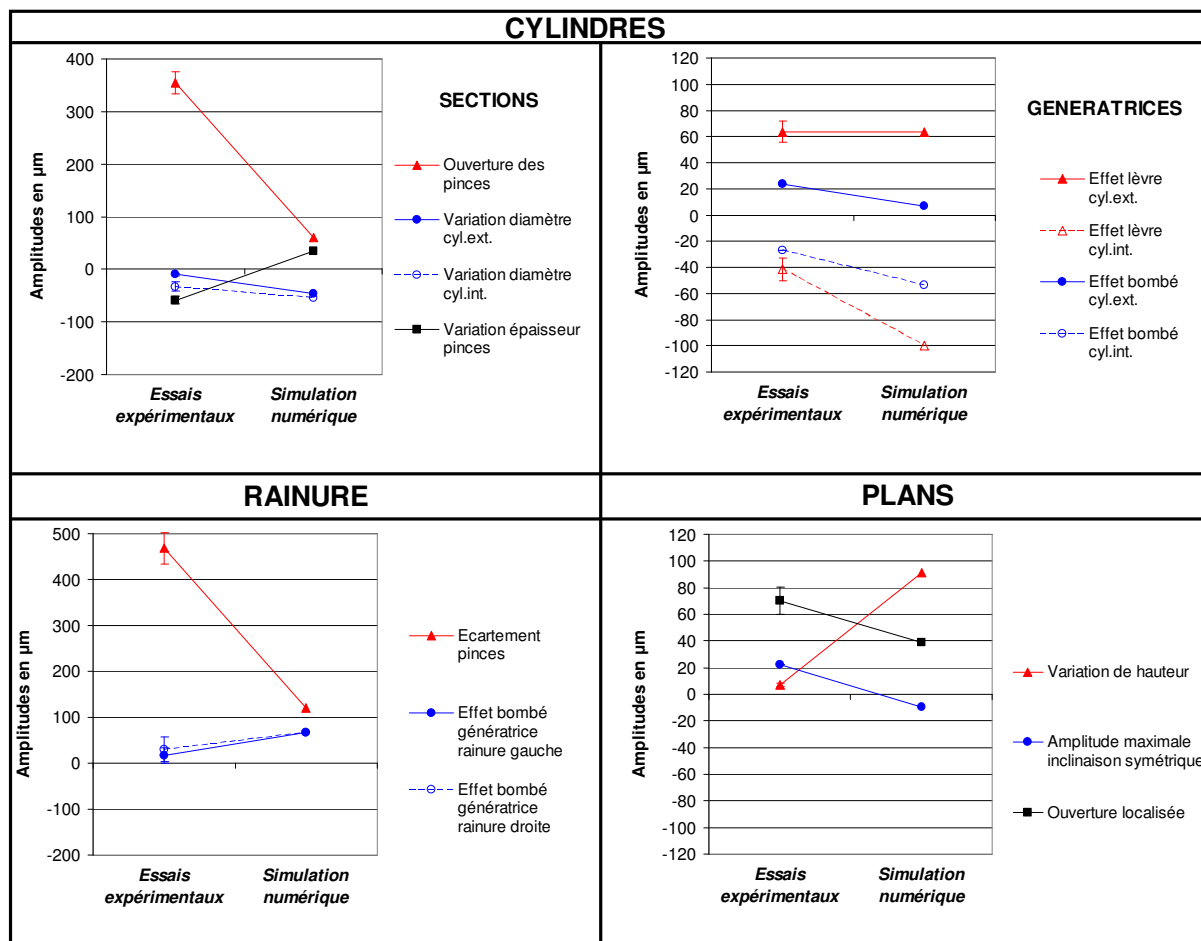


Figure V - 23 : Comparaison des amplitudes de déformations des croissants issus des campagnes expérimentales et de simulation, nuance 1, après trempe huile

4.4.2. Volume en fin de trempe

L'augmentation volumique moyenne des croissants mesurés est près de deux fois plus faible que celle des croissants théorique. Il ne faut cependant pas oublier que les croissants mesurés ont perdu du volume à cause de l'enlèvement de la couche de calamine formée lors de la chauffe. Par ailleurs, le volume après détensionnement des croissants réels n'est pas le même que celui théorique (961 mm^3 de différence), ce qui fausse la comparaison.

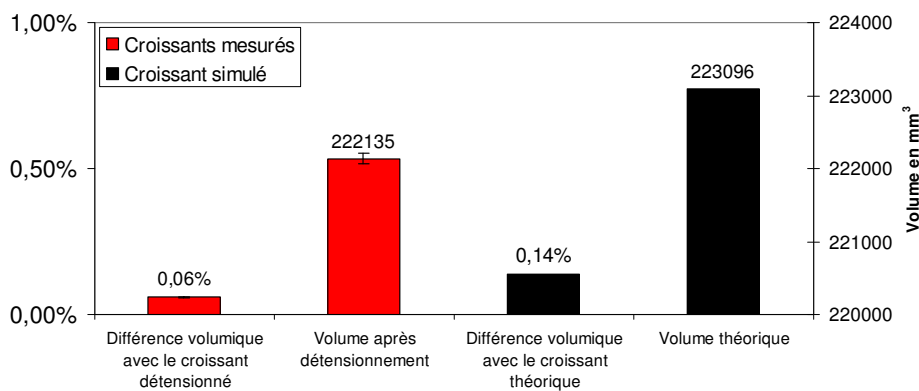


Figure V - 24 : Comparaison des variations volumiques entre les géométries avant et après trempe huile, nuance 1

4.5. Bilan des comparaisons à iso-trempe

Les modes de déformations des croissants simulés sont les mêmes que ceux des croissants réels. L'analyse des écarts résiduels et de la norme du vecteur résidu, après optimisation, montrent que les phénomènes de déformations utilisés décrivent bien la déformation totale des croissants chauffés (Figure V - 25).

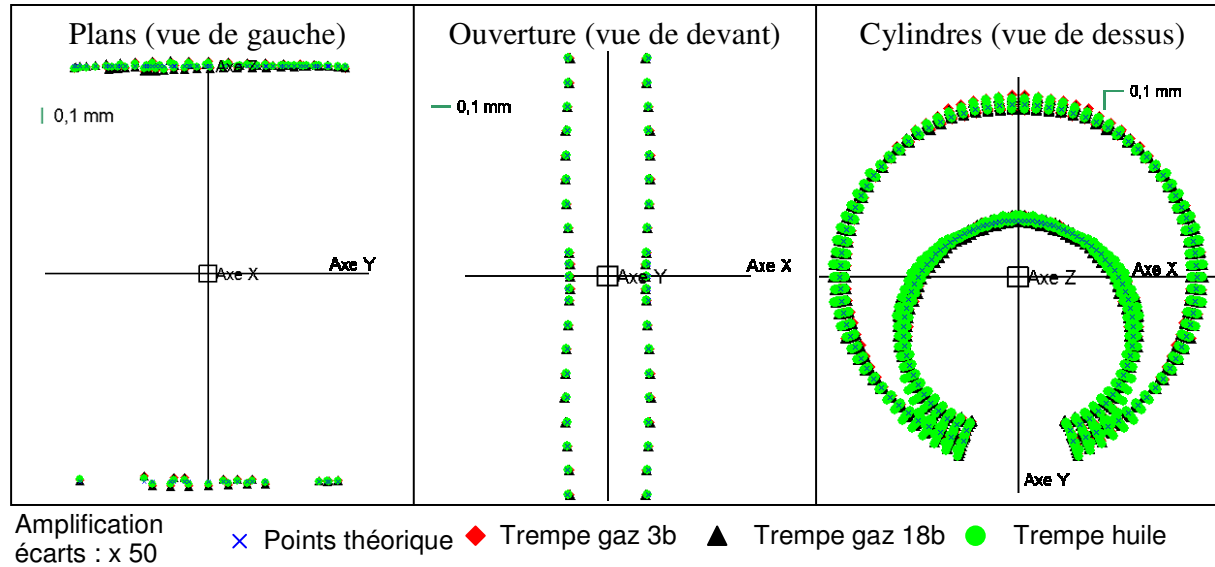


Figure V - 25 : Ecartés résiduels entre les images des maillages après chauffe et la géométrie théorique, après dissociation des phénomènes de déformations, pour trois des simulations de trempe

78% des écarts de mesure ont été expliqués avec les phénomènes de déformations utilisés. Les 22% restants correspondent à la non-prise en compte de la variabilité de l'amplitude des phénomènes de mise en bombé et d'effet lèvre et aux erreurs d'approximation des courbures lors du palpé virtuel.

Les points principaux suivants émergent de cette confrontation entre les résultats expérimentaux et prédictifs :

- la **prédiction des tendances** et du sens des phénomènes de déformations (mise en bombé ou diabolé) est **globalement bonne** ;
- les valeurs d'**écartement des pinces** et de **variation du diamètre extérieur** sont bien prédites en trempes **gaz** ;
- les amplitudes de l'**effet lèvre** des génératrices du cylindre extérieur et de la **variation du diamètre extérieur** sont bien prédites en trempe **huile** ;
- l'ouverture des pinces est toujours **sous-estimée** en simulation numérique ;
- l'augmentation volumique du croissant est **surestimée** en simulation ;
- les amplitudes des phénomènes de déformations locaux, en particulier la variation d'épaisseur des pinces, l'effet lèvre et l'ouverture des plans sont souvent **surestimés**.