

Impact de l'opération de perçage sur l'intégrité de surface du trou percé

SOMMAIRE

4.1 Objectifs.....	118
4.2 Paramétrage de la coupe latérale en goujure mise en jeu au cours du perçage.....	118
4.3 Analyse de l'impact potentiel des paramètres de l'opération de perçage, dans le cadre de cette étude	119
4.3.1 Analyse des paramètres de coupe	119
4.3.2 Analyse des paramètres géométriques	120
4.4 Etude numérique de l'impact de l'opération de perçage sur l'intégrité de surface	122
4.4.1 Objectifs et stratégie de simulation.....	122
4.4.2 Modèle éléments finis.....	123
4.4.3 Validation du modèle.....	129
4.4.4 Modèle de référence	130
4.4.5 Exploitation du modèle pour l'étude des paramètres de perçage identifiés comme ayant un impact potentiel sur l'intégrité de surface dans cette étude	132
4.4.6 Exploitation du modèle pour l'étude de l'impact des autres paramètres de perçage sur l'intégrité de surface	136
4.5 Corrélation entre les paramètres de l'opération de perçage et l'intégrité de surface	143
4.6 Synthèse	144

4.1 Objectifs

Ce chapitre vise à étudier l'influence des paramètres de l'opération de perçage (paramètres géométriques de l'outil et paramètres de coupe) sur les aspects de l'intégrité de surface ayant été identifiés comme ayant un impact significatif sur la tenue en fatigue au cours du Chapitre 3 (i.e. déformations plastiques et contraintes résiduelles). Cela doit permettre d'expliquer les différences d'intégrité de surface des trous percés constatées au Chapitre 3 et d'être capable d'optimiser la tenue en fatigue des pièces percées à travers une optimisation de l'opération de perçage. La coupe en perçage, spécialement au niveau de la surface générée, est très complexe. Pour simplifier l'étude, il est considéré dans ces travaux que l'intégrité de surface obtenue est uniquement liée à la coupe latérale (coupe en goujure), que ce soit en perçage axial ou orbital. A partir de cette considération, les corrélations potentielles entre les paramètres de l'opération de perçage et les résultats d'intégrité de surface présentés au Chapitre 3 sont investiguées. Par ailleurs, afin d'étudier l'impact des paramètres d'une opération de perçage sur l'intégrité de surface de façon plus approfondie, un modèle éléments finis simulant la coupe latérale en goujure mise en jeu au cours du perçage est développé. Celui-ci permet d'étudier de larges plages de valeurs pour les paramètres de l'opération de perçage et d'analyser de façon précise l'impact de ceux-ci sur l'état d'écrouissage et de contraintes résiduelles du matériau en sous-surface du trou, qui est complexe à évaluer expérimentalement.

Les paramètres décrivant l'opération de coupe latérale mise en jeu au niveau des goujures de l'outil au cours d'une opération de perçage sont définis dans une première partie de ce chapitre. Les liens potentiels entre ces paramètres et l'intégrité de surface du trou percé, dans le cas de cette étude, sont ensuite étudiés dans une deuxième partie. Afin de compléter les résultats de cette analyse, une troisième partie présente l'étude numérique menée afin d'étudier l'impact de l'opération de perçage sur l'intégrité de surface de façon plus approfondie. Enfin, les corrélations entre les paramètres de l'opération de perçage et l'intégrité de surface du trou percé, retenues à l'issue de ces études, sont synthétisées dans une quatrième partie.

4.2 Paramétrage de la coupe latérale en goujure mise en jeu au cours du perçage

En perçage axial comme en perçage orbital, la partie latérale de l'outil est supposée, dans ces travaux, avoir une influence prépondérante sur l'intégrité de surface du trou percé devant celle du bout de l'outil car c'est elle qui finit l'opération d'enlèvement de matière à ce niveau-là. Cette partie, qui comprend les listels et les goujures, génère un enlèvement de matière sur une petite hauteur des listels, suivant l'axe de l'outil, au-dessus des becs, correspondant à l'avance axiale par tour et par dent. Cet enlèvement de matière peut être assimilé à une opération de coupe orthogonale avec un angle de dépouille nul du fait du contact listel/paroi du trou (Figure 4-1). Cette opération de coupe met en jeu trois zones de cisaillement de la matière : la zone de cisaillement primaire (ZCP), la zone de cisaillement secondaire (ZCS) et la zone de cisaillement tertiaire (ZCT) (Figure 4-1).

La géométrie de l'outil associée à cet enlèvement de matière peut ainsi être décrite à l'aide des paramètres suivants : l'angle de coupe en goujure (γ), le rayon d'acuité latéral (r) et la largeur de listel (l_{listel}) (Figure 4-1). Concernant les paramètres de coupe, toujours en faisant l'approximation d'une coupe orthogonale, l'enlèvement de matière latéral mis en jeu au cours du perçage peut être caractérisé à l'aide des paramètres suivants : la vitesse de coupe (V_c), l'avance radiale à la dent (f_r) (Figure 4-1) et l'avance axiale par tour et par dent du perçage ($f_{a,z}$) qui représente la profondeur de passe de l'enlèvement de matière latéral.

Ainsi, l'étude de l'impact de l'opération de perçage présentée dans ce chapitre se focalise sur la caractérisation de la coupe latérale mise en jeu au niveau des goujures de l'outil et sur l'étude de l'influence des paramètres géométriques et opératoires définis dans cette partie.

4.3 Analyse de l'impact potentiel des paramètres de l'opération de perçage, dans le cadre de cette étude

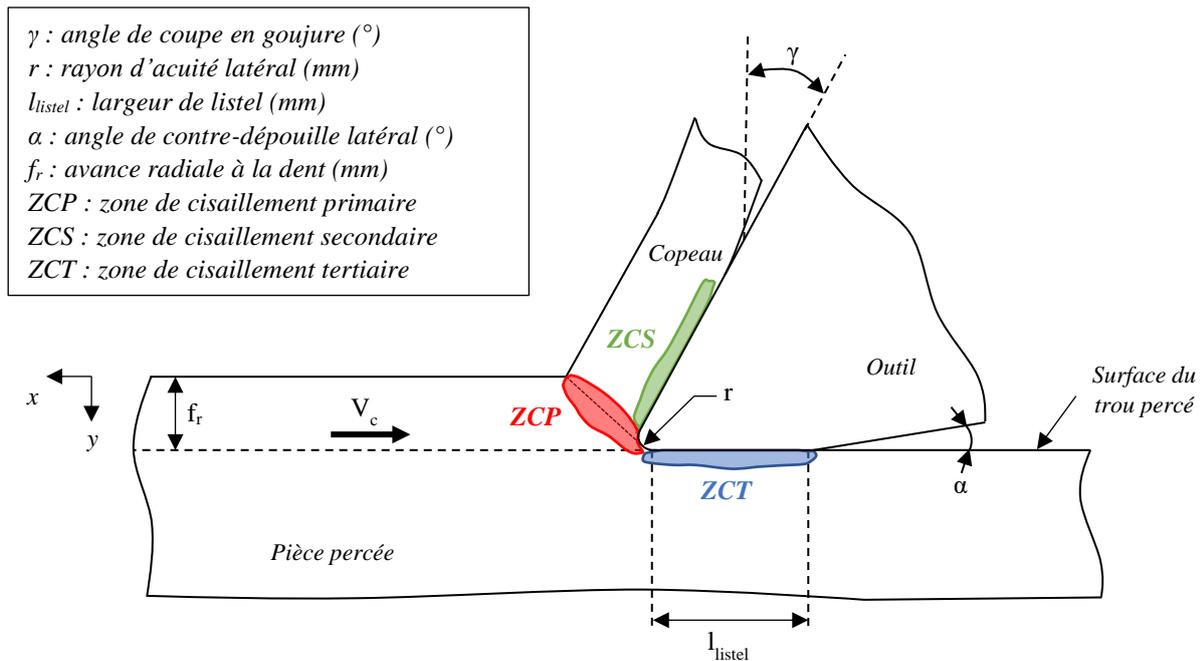


Figure 4-1 : Représentation de l'enlèvement de matière mis en jeu au niveau des goujures en perçage, pouvant être assimilé à une opération de coupe orthogonale

4.3 Analyse de l'impact potentiel des paramètres de l'opération de perçage, dans le cadre de cette étude

Les paramètres associés à la coupe latérale des opérations de perçage considérées dans cette étude ont été analysés de manière approfondie afin d'identifier d'éventuels éléments d'explication des différences de l'intégrité de surface des trous percés observées au Chapitre 3.

4.3.1 Analyse des paramètres de coupe

Les valeurs des avances axiales par tour et par dent du perçage (représentant la profondeur de passe de l'enlèvement de matière latéral, assimilé à une opération de coupe orthogonale) employées dans le cadre de cette étude sont les mêmes pour les deux diamètres de perçage pour un même procédé de perçage ($f_{a,z} = 50 \mu\text{m}$ pour le perçage axial et $f_{a,z} = 0,4 \mu\text{m}$ pour le perçage orbital). Ainsi, des écarts identiques d'avance axiale par tour et par dent sont considérés entre les procédés de perçage axial et orbital pour les deux diamètres. Ce paramètre ne peut donc pas expliquer les différences d'impact du procédé de perçage sur l'intégrité de surface des trous percés observées en fonction du diamètre de perçage.

De la même manière, pour l'avance radiale à la dent, il semble que des écarts similaires de valeurs soient considérés entre les procédés de perçage axial et orbital pour les deux diamètres de perçage étudiés. En effet, même si les valeurs de ce paramètre employées semblent complexes à quantifier, notamment pour le cas du perçage axial, elles sont très faibles en perçage orbital par rapport au perçage axial et peuvent être considérées comme similaires entre les deux diamètres pour un même procédé de perçage. Ainsi, ce paramètre n'explique pas, non plus, les différences d'influence du procédé de perçage sur l'intégrité de surface en fonction du diamètre de perçage.

Concernant l'impact de la vitesse de coupe, un écart plus important de valeur est considéré entre les procédés de perçage axial et orbital pour le diamètre 9,53 mm que pour le diamètre 6,35 mm (diamètre 6,35 mm : $V_c = 180 \text{ m/min}$ pour le perçage axial et $V_c = 610 \text{ m/min}$ pour le perçage orbital ; diamètre 9,53 mm : $V_c = 120 \text{ m/min}$ pour le perçage axial et $V_c = 1005 \text{ m/min}$ pour le perçage orbital). Ainsi, ce paramètre opératoire pourrait avoir une influence potentielle sur l'intégrité de surface du trou percé et

pourrait expliquer les différences d'intégrité de surface observées pour le diamètre de perçage 9,53 mm et non observées pour le diamètre 6,35 mm.

4.3.2 Analyse des paramètres géométriques

L'ensemble des paramètres géométriques de l'outil associés à l'enlèvement de matière latéral ont été évalués à l'aide du système de mesure 3D optique ALICONA Infinite Focus (Figure 4-2-a). Pour cela, l'ensemble des dents des outils ont été reconstruites en 3D. Puis, des valeurs moyennes des paramètres géométriques (angle de coupe en goujure, rayon d'acuité latéral et largeur des listels) ont été déterminées à partir de séries de mesures effectuées sur chacune des dents de l'outil, au niveau de la portion de listel responsable de l'enlèvement de matière latéral (ou au plus proche pour le cas du perçage orbital). Pour mener à bien ces mesures, la reconstruction 3D des dents de l'outil a été coupée par des plans perpendiculaires à l'axe de l'outil (Figure 4-2-b) afin d'obtenir des profils de dent correspondant à celui représenté en Figure 4-1.

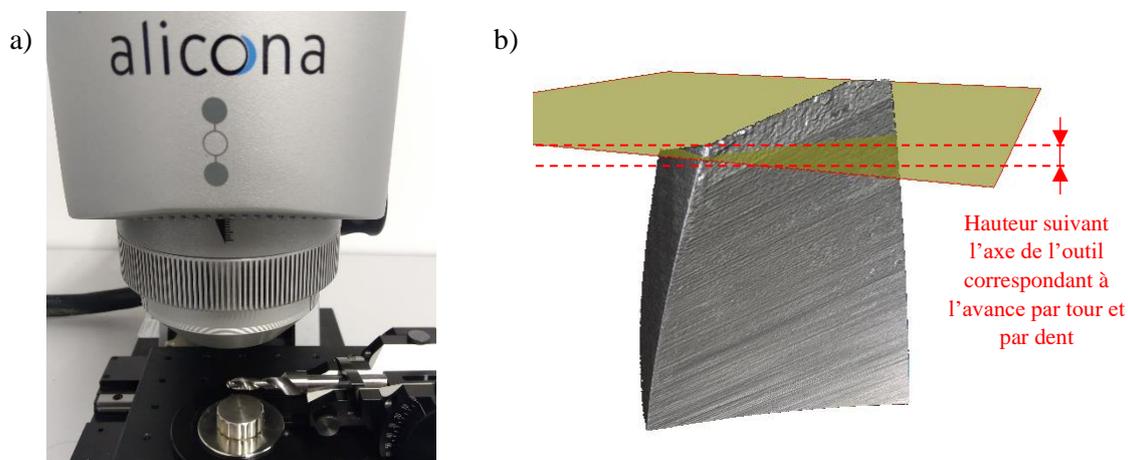


Figure 4-2 : Mesure des caractéristiques géométriques de la partie latérale des outils à l'Alicona (a) et exemple de reconstruction 3D d'une dent d'un outil (perçage axial au diamètre 6,35 mm) et d'un plan de coupe pour l'évaluation du profil de la dent (b)

Les valeurs moyennes mesurées des paramètres géométriques de l'outil associés à la coupe latérale sont présentées en Figure 4-3. Les résultats de rayon d'acuité et d'angle de coupe présentent une incertitude importante. Celle-ci peut être expliquée par l'usure de l'outil au niveau des profils de dents mesurés, ceux-ci étant situés au niveau de la portion de listel responsable de l'enlèvement de matière latéral (ou au plus proche).

Les mesures du rayon d'acuité et de la largeur de listel ne montrent pas de corrélation avec les résultats d'intégrité de surface des trous percés. En effet, des écarts similaires de valeurs sont observés entre les deux procédés de perçage pour les deux diamètres étudiés (rayon d'acuité) ou un écart plus faible de valeur est constaté pour le diamètre 9,53 mm que pour le diamètre 6,35 mm (largeur de listel), alors que les résultats d'intégrité de surface étaient similaires pour le diamètre 6,35 mm et présentaient des différences significatives pour le diamètre 9,53 mm.

Les mesures de l'angle de coupe en goujure pourraient révéler, en revanche, une corrélation entre ce paramètre géométrique et l'intégrité de surface du trou percé. En effet, l'écart significatif d'angle de coupe en goujure entre les deux procédés de perçage constaté pour le diamètre de perçage 9,53 mm, et non observé pour le diamètre 6,35 mm, pourrait expliquer les différences d'intégrité de surface observées pour le premier diamètre de perçage (Figure 3-19, Figure 3-27, Figure 3-34). L'emploi d'un angle de coupe en goujure négatif, certainement lié à une usure de l'outil, pourrait expliquer la génération d'un état de déformation plastique et de contraintes résiduelles important du matériau en sous-surface du trou.

4.3 Analyse de l'impact potentiel des paramètres de l'opération de perçage, dans le cadre de cette étude

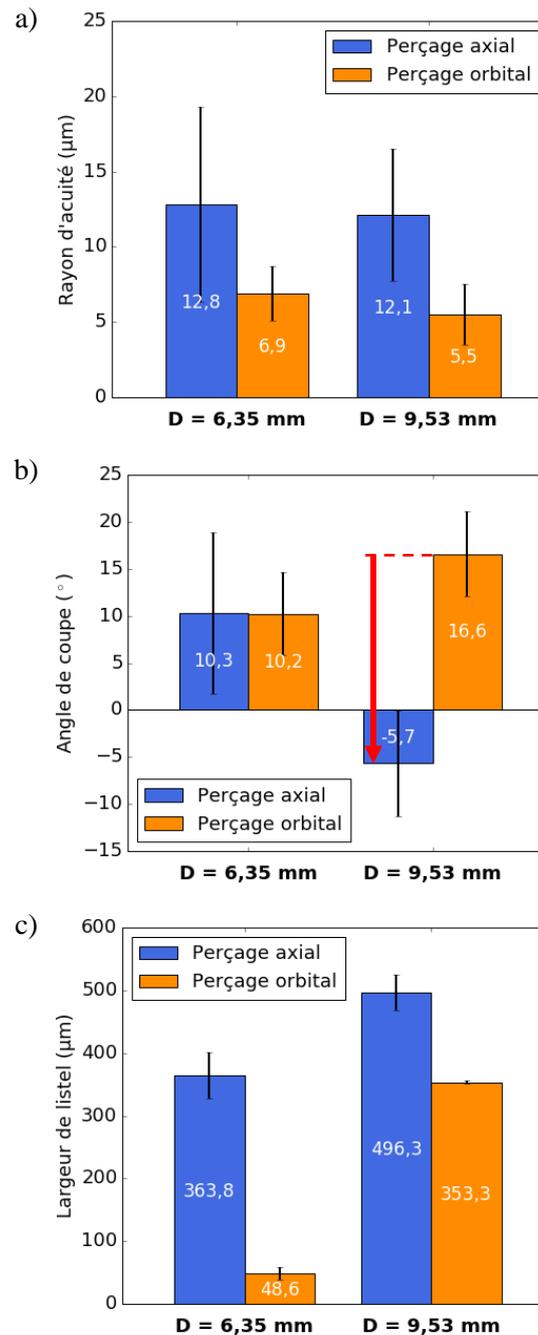


Figure 4-3 : Mesures des caractéristiques géométriques de la partie latérale des dents des outils utilisés : rayon d'acuité (a), angle de coupe (b) et largeur de listel (c)

Ainsi, d'après l'analyse des paramètres associés à la coupe latérale, des opérations de perçage considérées dans cette étude, les paramètres potentiels pouvant expliquer les différences d'intégrité de surface constatées au Chapitre 3 sont la vitesse de coupe et l'angle de coupe en goujure. Cependant, il n'est pas possible de juger de l'influence de ces deux paramètres de façon indépendante, à partir des configurations de perçage considérées dans cette étude.

L'enlèvement de matière latéral mis en jeu au cours du perçage est défini par un ensemble de paramètres géométriques et opératoires. Il semble difficile de pouvoir mener une campagne d'essais de perçage afin d'étudier l'impact de chacun des paramètres géométriques de l'outil de façon indépendante. En effet, cela impliquerait la fabrication d'outils très spécifiques. En revanche, une campagne d'essais de coupe orthogonale pourrait être mise en place plus aisément afin d'étudier l'impact de certains

paramètres de l'opération d'enlèvement de matière sur l'intégrité de surface. En effet, l'usinage d'outils de coupe orthogonale est bien plus accessible. Une telle campagne est ainsi envisagée en perspectives de ce travail.

Toutefois, en parallèle d'une étude expérimentale, la réalisation d'une étude numérique serait aussi très intéressante afin d'appréhender les liens entre les paramètres de l'opération de perçage et l'intégrité de surface. Un modèle numérique de coupe permettrait d'étudier relativement aisément l'influence de chacun des paramètres définissant l'enlèvement de matière latéral sur l'intégrité de surface du trou percé. De plus, un tel modèle permettrait une étude approfondie puisque l'état de contraintes résiduelles du matériau en sous-surface, complexe à évaluer expérimentalement, pourrait être extrait des résultats. Une étude complémentaire de l'analyse menée dans cette partie a ainsi été menée à l'aide d'un modèle numérique simulant l'enlèvement de matière. Celle-ci est présentée dans la partie suivante.

4.4 Etude numérique de l'impact de l'opération de perçage sur l'intégrité de surface

4.4.1 Objectifs et stratégie de simulation

Le modèle numérique présenté dans cette partie vise à simuler la coupe latérale mise en jeu niveau des goujures, au cours du perçage, qui est susceptible d'avoir une influence prépondérante sur l'intégrité de surface du trou percé. Il doit permettre l'étude de l'impact des paramètres de l'opération de perçage associés à la coupe latérale (présentés en partie 4.2) sur les aspects de l'intégrité de surface identifiés comme ayant un impact significatif sur la tenue en fatigue, soient les déformations plastiques et les contraintes résiduelles. De plus, il doit permettre d'étudier l'influence de chacun de ces paramètres de façon indépendante et de considérer de larges plages de valeur pour chacun des paramètres.

Afin de pouvoir analyser l'impact des paramètres géométriques de l'outil sur l'intégrité de surface, la stratégie de simulation consistant à modéliser l'enlèvement de matière paraît très judicieuse. Cependant, la modélisation 3D de l'enlèvement de matière global mis en jeu au cours du perçage ne paraît pas nécessaire ici puisque l'étude se focalise sur l'impact de la coupe latérale en goujure qui peut être assimilée à une opération de coupe orthogonale (Figure 4-1). Ainsi, le modèle numérique se limite à la simulation de cette opération de coupe et un modèle 2D est développé.

Comme vu au Chapitre 1, la littérature est riche de modèles 2D de coupe orthogonale. Atlati (Atlati, 2012) a développé un tel modèle pour le cas de l'usinage de l'AA2024-T351 avec un outil en carbure de tungstène dans le cadre de sa thèse portant sur les échanges thermiques à l'interface outil/copeau. Ainsi, ce modèle est repris et adapté dans cette étude afin de disposer d'un modèle permettant d'étudier l'impact de la configuration de coupe sur l'intégrité de surface.

Avec la stratégie de simulation adoptée par Atlati (Atlati, 2012), la formation du copeau est basée sur la suppression d'une bande d'éléments dans la zone de passage de la pointe de l'outil. Pour cela, la pièce est partitionnée en plusieurs zones associées à des comportements matériau différents (Figure 4-4). Cette stratégie de simulation est reprise dans le modèle développé.

Atlati (Atlati, 2012) s'intéressant aux échanges thermiques à l'interface outil/copeau, il développe un modèle thermomécanique. Cependant, en première approche, l'hypothèse de l'impact négligeable des effets thermiques sur l'intégrité de surface est faite dans cette étude et un modèle uniquement mécanique est développé afin de limiter le temps de calcul. Cette première hypothèse de travail est confortée par le fait que les champs de température vus par la pièce au cours du perçage sont relativement modestes (Partie 2.3.3).

Enfin, l'objectif du modèle étant l'étude de l'impact de la configuration de coupe sur l'intégrité de surface, les phénomènes mécaniques mis en jeu au niveau de la zone de cisaillement tertiaire (ZCT) doivent être intégrés au mieux dans le modèle. Dans le modèle développé par Atlati (Atlati, 2012), la pointe de l'outil semble être centrée sur la bande d'éléments supprimée permettant la modélisation de la

4.4 Etude numérique de l'impact de l'opération de perçage sur l'intégrité de surface

séparation de la matière et ne semble donc pas entrer en contact avec les éléments modélisant la surface usinée finale. De plus, ces éléments appartiennent à une « Part » associée à un comportement matériau sans endommagement. L'impact du frottement de la pointe de l'outil sur la surface usinée au niveau de la ZCT ne semble donc pas être pris en compte dans ce modèle. C'est pourquoi, celui-ci sera adapté afin d'intégrer au mieux ce phénomène dans notre modèle.

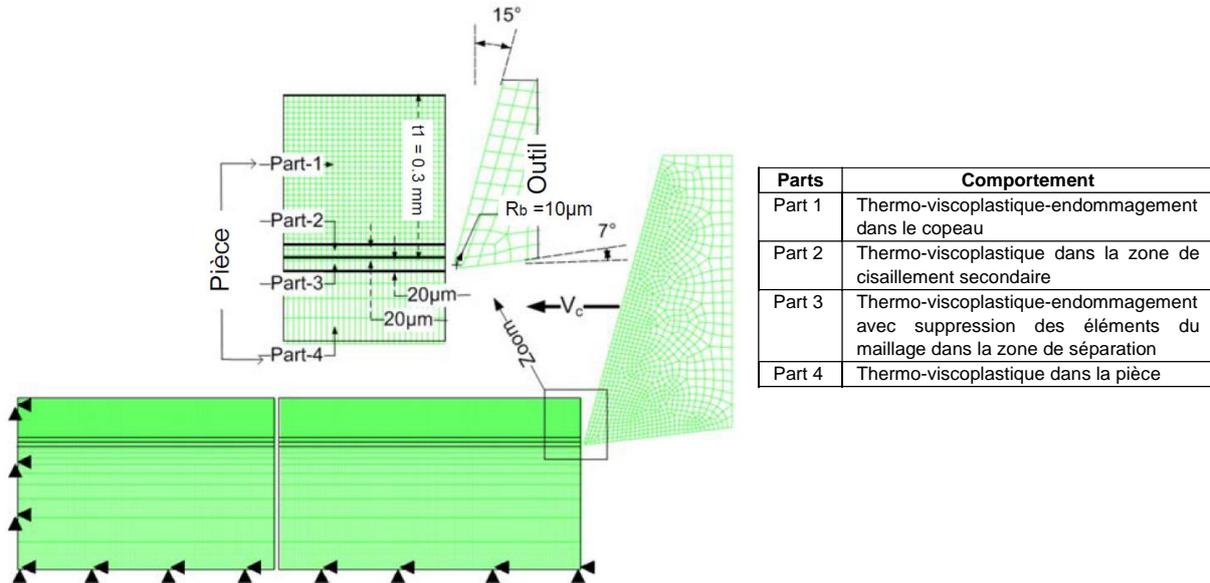


Figure 4-4 : Stratégie de simulation utilisée par Atlati (Atlati, 2012) dans ses travaux sur les échanges thermiques à l'interface outil-copeau appliqués à l'usinage de l'AA2024-T351

4.4.2 Modèle éléments finis

De la même manière que Atlati (Atlati, 2012), le modèle est développé sous Abaqus/Explicit qui utilise un solveur basé sur une intégration temporelle explicite. Cela est justifié par le fait que le temps d'usinage simulé est relativement court puisqu'une seule passe de l'outil est modélisée et cela permet d'étudier l'influence de la vitesse de coupe.

- Comportement du matériau

Le matériau de l'outil modélisé est le carbure tungstène qui est le matériau utilisé pour l'ensemble des outils employés dans le cadre de cette étude. Le module d'Young de l'AA2024-T351 étant faible devant celui du carbure de tungstène (73 100 MPa contre 534 000 MPa) et les champs de température vus par l'outil n'étant pas l'objet de l'étude, l'outil est modélisé comme un corps rigide dans le modèle développé. Cela permet de diminuer significativement le temps de calcul.

Concernant le comportement du matériau de la pièce usinée, soit l'AA2024-T351, celui-ci est défini en fonction des partitions de la pièce, définissant différentes parties désignées « Part » (Figure 4-5 et Tableau 4-1).

Part	Comportement
Part 1 + Part 2	Visco-plastique avec endommagement correspondant au mode II
Part 3 + Part 4	Visco-plastique avec endommagement correspondant au mode I et avec suppression des éléments
Part 5	Visco-plastique

Tableau 4-1 : Comportement du matériau associé à chaque « Part » de la pièce usinée

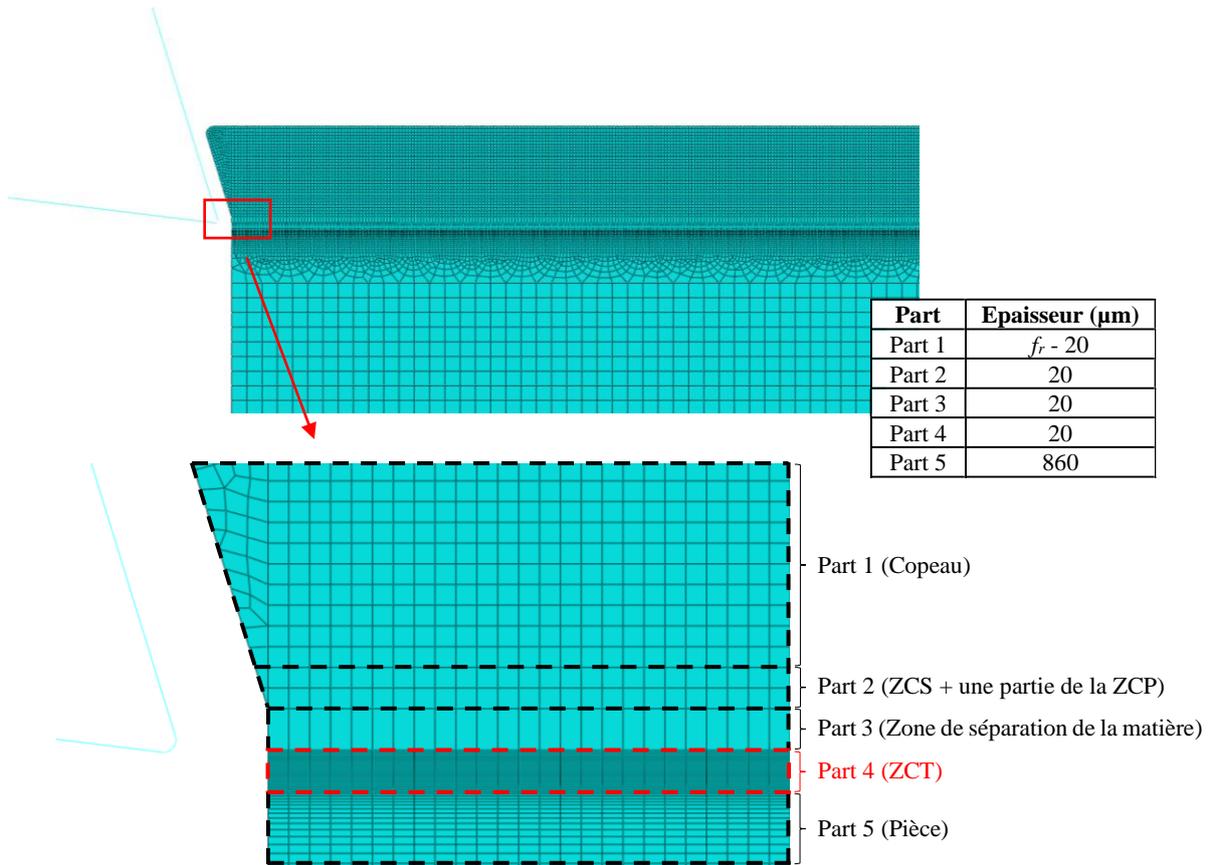


Figure 4-5 : Découpage de la pièce en plusieurs « Parts » pour la définition de comportements du matériau et/ou de propriétés des éléments de maillage différents.

Au cours de l'usinage de l'AA2024-T351, les phénomènes de séparation du copeau de la pièce usinée et d'apparition des bandes de cisaillement dans le copeau sont régis par l'endommagement du matériau au-delà d'un certain niveau de déformation plastique ainsi que par le mode de rupture mis en jeu. La séparation du copeau est associée au mode I (ouverture) alors que l'apparition des bandes de cisaillement est associée au mode II (cisaillement) (Atlati, 2012) (Figure 4-6). Ainsi, ces deux modes de rupture distincts sont introduits dans le modèle grâce aux partitions de la pièce permettant la définition d'une loi d'évolution de l'endommagement différente en fonction des parties de la pièce. Le mode I est introduit dans le copeau (Part 1 et Part 2). Le mode II est introduit dans les zones de passage de la pointe de l'outil et de cisaillement tertiaire (Part 3 et Part 4) et il est associé à la technique de suppression des éléments de maillage au-delà d'une valeur critique d'endommagement.

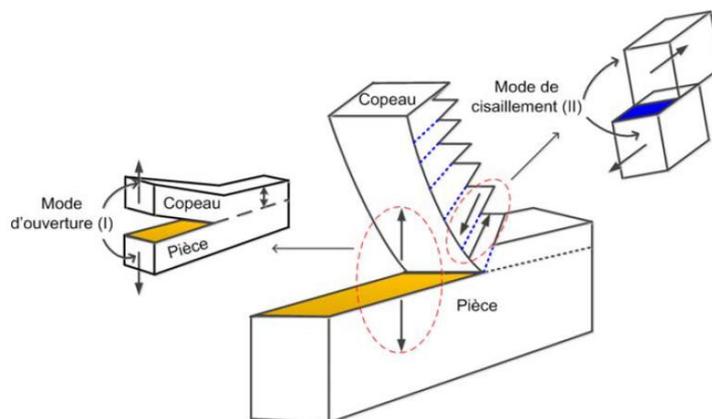


Figure 4-6 : Modes de rupture en configuration de coupe orthogonale (Atlati, 2012)

4.4 Etude numérique de l'impact de l'opération de perçage sur l'intégrité de surface

De la même manière que dans le modèle d'Atlati (Atlati, 2012), le comportement viscoplastique du matériau de la pièce est décrit par une loi de Johnson-Cook (Equation (3-4)) et le couplage avec l'endommagement est défini par un critère d'initiation de Johnson-Cook (Equation (3-1)) et un critère d'évolution basé sur le taux de restitution d'énergie (Equation (4-2)). Une loi d'évolution de l'endommagement linéaire est utilisée pour modéliser le comportement du matériau dans la zone de séparation de la matière (Part 3 et Part 4) et une loi d'évolution exponentielle est utilisée pour modéliser le comportement du matériau dans le copeau (Part 1 et Part 2).

$$\omega_d = \int \frac{d\bar{\varepsilon}^{pl}}{\bar{\varepsilon}_0^{pl}} \quad \text{avec} \quad 0 \leq \omega_d \leq 1 \quad (4-1)$$

$$\bar{\varepsilon}_0^{pl} = [d_1 + d_2 \times e^{-d_3 \eta}] \left[1 + d_4 \times \ln \left(\frac{\dot{\varepsilon}^{pl}}{\dot{\varepsilon}_0} \right) \right] \left[1 - d_5 \times \frac{T - T_0}{T_f - T_0} \right]$$

ω_d : paramètre d'initiation d'endommagement (sans unité)

$\bar{\varepsilon}_0^{pl}$: déformation plastique équivalente à l'initiation de l'endommagement (sans unité)

d_1, d_2, d_3, d_4 et d_5 : paramètres d'initiation de l'endommagement (sans unité)

η : triaxialité des contraintes (sans unité)

$$d = \begin{cases} \frac{\bar{u}^{pl}}{u_f^{pl}} = \frac{L \times \bar{\varepsilon}^{pl}}{u_f^{pl}} = \frac{2 \times G_f \times L \times \bar{\varepsilon}^{pl}}{\bar{\sigma}_{y0}} & \text{(évolution linéaire)} \\ 1 - \exp \left(- \int_0^{\bar{u}^{pl}} \frac{\bar{\sigma}}{G_f} \times d \times \bar{u}^{pl} \right) & \text{(évolution exponentielle)} \end{cases} \quad (4-2)$$

$$(G_f)_{I,II} = \left[\frac{1 - \nu^2}{E} \right] [(K)_{I,II} \times \sqrt{1000}]^2$$

d : variable scalaire décrivant l'évolution de l'endommagement (sans unité)

\bar{u}^{pl} : déplacement plastique équivalent (mm)

u_f^{pl} : déplacement plastique équivalent à la rupture (mm)

L : longueur caractéristique du plus petit élément du maillage (mm)

$\bar{\sigma}_{y0}$: contrainte d'écoulement à l'initiation de l'endommagement (MPa)

G_f : taux de restitution d'énergie (MPa/mm)

K : ténacité (MPa. \sqrt{m})

Les valeurs des paramètres de ces lois sont les mêmes que celles utilisées par Atlati (Atlati, 2012) dans ses travaux sur les échanges thermiques à l'interface outil/copeau pour le cas de l'usinage de l'AA2024-T351 (Tableau 4-2 et Tableau 4-3). Cependant, dans le modèle mécanique développé, les termes traduisant la sensibilité à la température sont négligés. De plus, afin de calibrer le modèle mécanique développé de sorte à obtenir des résultats de morphologie du copeau équivalents à ceux obtenus par Atlati, la valeur du taux de restitution d'énergie correspondant au mode II a été ajustée (Tableau 4-3). Concernant la valeur critique de l'endommagement considérée pour le critère de suppression des éléments, une valeur de 0,1, identique à celle retenue par Atlati, est utilisée dans la zone de passage de la pointe de l'outil (Part 3). Dans la ZCT (Part 4), une valeur critique de l'endommagement a dû être déterminée, Atlati ne définissant pas d'endommagement à ce niveau-là. Après plusieurs itérations, une valeur de 0,08, légèrement inférieure à celle utilisée dans la Part 3, a été choisie afin de permettre la bonne séparation de la matière.

A (MPa)	B (MPa)	n	C	m	$\dot{\epsilon}_0$ (s ⁻¹)
352	440	0,42	0,0083	1	1

Tableau 4-2 : Paramètres de la loi de Johnson-Cook utilisés pour décrire le comportement de la pièce dans le modèle 2D de coupe orthogonale (Atlati, 2012)

Initiation					Evolution	
d_1	d_2	d_3	d_4	d_5	(K) _I (MPa. \sqrt{m})	(K) _{II} (MPa. \sqrt{m})
0,13	0,13	1,5	0,011	0	37	29

Tableau 4-3 : Paramètres des lois d'initiation et d'évolution de l'endommagement utilisés pour décrire le comportement de la pièce dans le modèle 2D de coupe orthogonale, déterminés d'après ceux utilisés par Atlati (Atlati, 2012)

• Comportement de l'interface outil/pièce

Une loi de frottement de Coulomb-Orowan est utilisée pour décrire le comportement de l'interface de contact outil/pièce (Equation (4-3)). Les pressions de contact pouvant se révéler très importantes au cours de l'usinage, cette loi est couramment utilisée pour définir le comportement du contact outil/pièce en usinage car elle permet de limiter la contrainte de frottement à une valeur seuil égale à la résistance au cisaillement du matériau usinée. Cette loi introduit ainsi deux types de comportement du contact :

- un contact de type glissant, correspondant à une contrainte de frottement proportionnelle à la pression de contact, lorsque la contrainte de frottement est inférieure à la résistance au cisaillement du matériau usiné
- un contact de type collant, correspondant à une contrainte de frottement égale à une valeur seuil, lorsque la contrainte de frottement atteint la résistance au cisaillement du matériau usiné

$$\tau_f = \begin{cases} \mu \times p & \text{si } \mu \times p < \tau_{max} & \text{(contact collant)} \\ \tau_{max} & \text{si } \mu \times p \geq \tau_{max} & \text{(contact glissant)} \end{cases} \quad (4-3)$$

$$\tau_{max} = \frac{A}{\sqrt{3}}$$

τ_f : contrainte de frottement (MPa)

μ : coefficient de frottement

p : pression de contact (MPa)

τ_{max} : résistance au cisaillement du matériau usiné (MPa)

Les paramètres définissant la loi de Coulomb-Orowan utilisés dans le modèle développé sont les mêmes que ceux utilisés par Atlati (Atlati, 2012) dans ses travaux portant sur la simulation de l'usinage de l'AA2024-T351 avec un outil en carbure de tungstène (Tableau 4-4).

μ	τ_{max} (MPa)
0,2	203

Tableau 4-4 : Paramètres de la loi de Coulomb-Orowan utilisés pour décrire le comportement de l'interface de contact outil/pièce (Atlati, 2012)

Afin de représenter correctement l'état mécanique des éléments modélisant la surface usinée, le frottement de la pointe de l'outil sur cette surface au niveau de la ZCT, qui n'est pas pris en compte dans le modèle développé par Atlati (Atlati, 2012), est introduit dans notre modèle. Pour cela, une bande d'éléments de faible épaisseur devant la valeur du rayon d'acuité (1 μm pour un rayon d'acuité supérieur ou égal à 6 μm) et présentant un comportement avec endommagement et suppression de l'élément au-

4.4 Etude numérique de l'impact de l'opération de perçage sur l'intégrité de surface

delà d'une valeur seuil d'endommagement est introduite dans la pièce au niveau de la ZCT (Part 4). De plus, la position initiale de la pointe de l'outil est définie de sorte à assurer le frottement de celle-ci avec cette bande d'éléments au cours de la simulation de la coupe. La comparaison des résultats d'intégrité de surface obtenus avec cette nouvelle stratégie de simulation et de ceux obtenus avec la stratégie de simulation considérée par Atlati (Atlati, 2012) montre des résultats significativement différents (Figure 4-7).

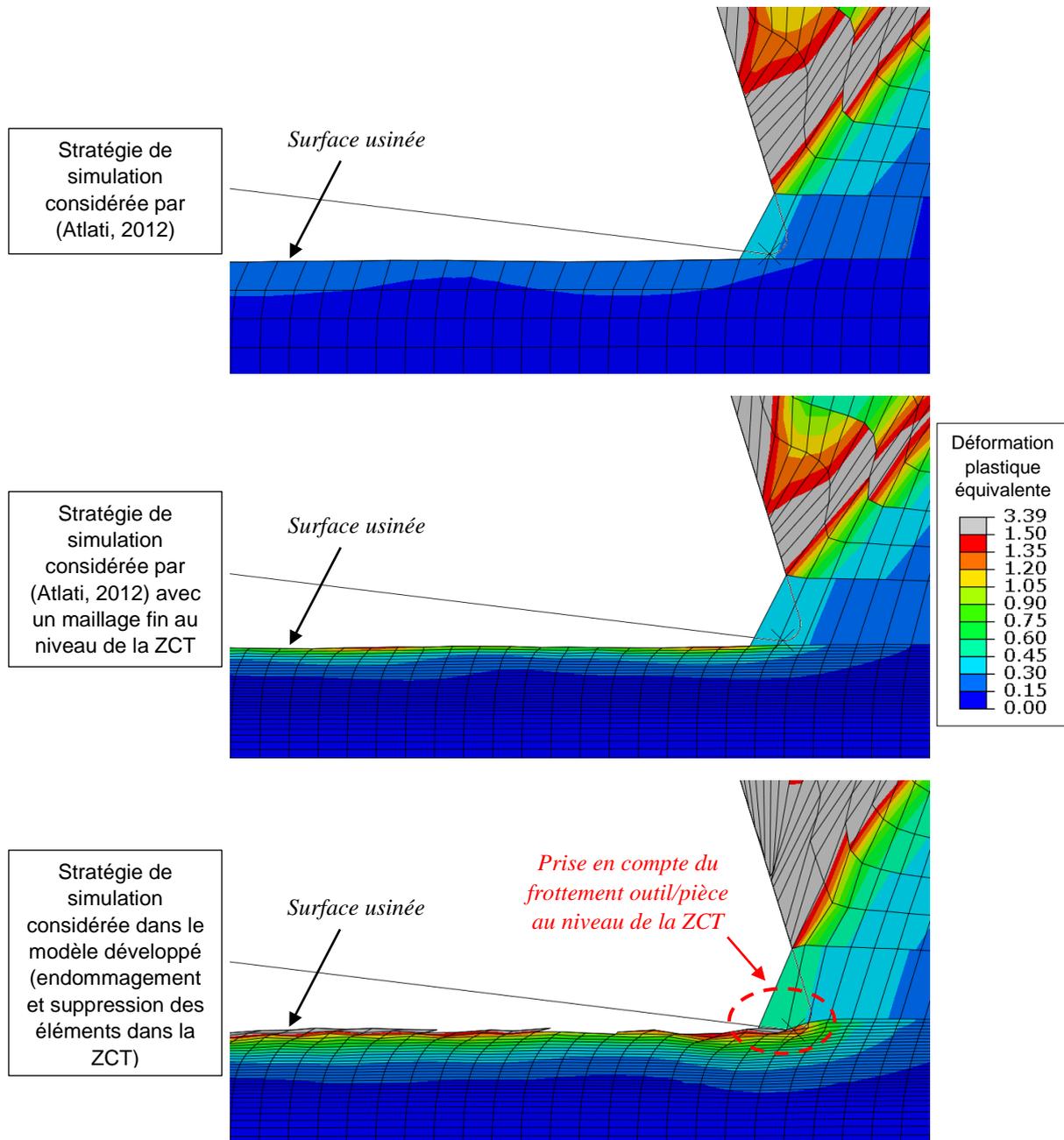


Figure 4-7 : Résultats d'intégrité de surface obtenus avec différentes stratégies de simulation

- Géométrie, maillage et conditions limites

Les dimensions de la portion de pièce modélisée considérées sont très grandes devant la profondeur de matériau affectée par des modifications des aspects internes de l'intégrité de surface à l'issue de l'usinage (Figure 4-8-a). Cela permet de s'affranchir des effets de bord au niveau de la zone d'intérêt (surface usinée à mi-longueur de la pièce suivant x). La phase critique de la simulation pour la modélisation correcte de la coupe est la phase d'entrée de l'outil dans la matière durant laquelle des distorsions importantes d'éléments peuvent être mises en jeu. Afin d'éviter ces problèmes de distorsion et de permettre la bonne initiation du copeau, un chanfrein est réalisé dans la pièce au niveau de l'entrée de l'outil (Figure 4-8-b) à l'instar de Mabrouki (Mabrouki et al., 2008). La géométrie de ce chanfrein est adaptée en fonction de l'angle de coupe considéré.

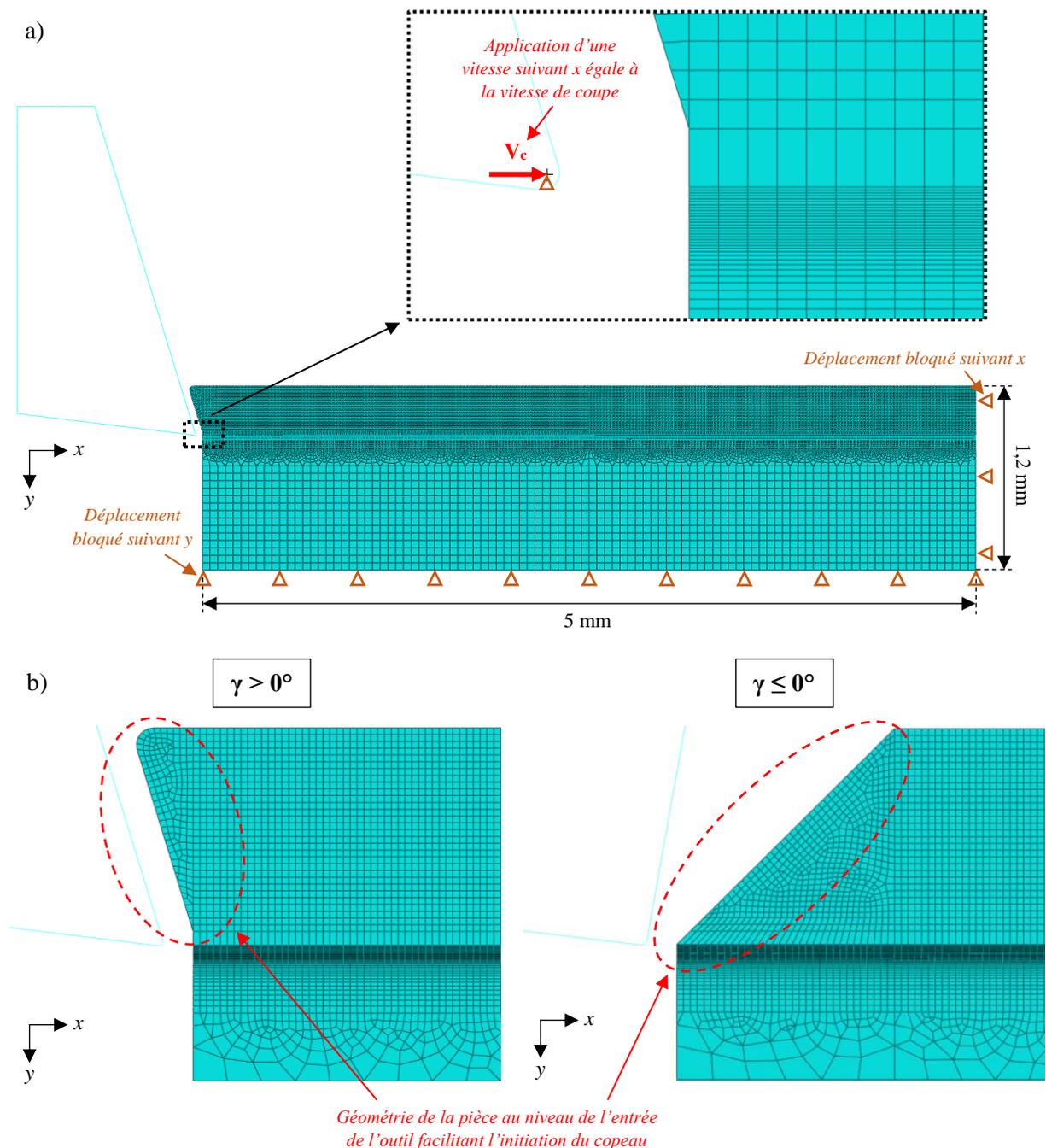


Figure 4-8 : Dimensions de la portion de pièce modélisée, maillage et conditions limites (a) ; géométrie de la pièce au niveau de l'entrée de l'outil en fonction de l'angle de coupe (b)

4.4 Etude numérique de l'impact de l'opération de perçage sur l'intégrité de surface

Des éléments de type CPE4R (quadrilatères à 4 nœuds, à intégration réduite, basés sur l'hypothèse des déformations planes) sont utilisés pour le maillage de la pièce au niveau des zones d'intérêts (Part 1 à 4). De la même manière que pour le modèle macroscopique présenté en Partie , ces éléments de premier ordre paraissent adaptés à la simulation de la coupe du fait des grandes distorsions d'éléments susceptibles d'être générées et l'utilisation d'une intégration réduite permet d'optimiser le temps de calcul. Afin de limiter le phénomène d'Hourglass pouvant se produire avec ces éléments, la méthode de contrôle de l'Hourglass de type « Stiffness » (contrôle de l'Hourglass strictement élastique) est utilisée pour les éléments au niveau de la zone de cisaillement secondaire (ZCS) (Part 2) et la méthode de contrôle de l'Hourglass proposée par défaut dans Abaqus/Explicit est utilisée dans le reste de la pièce. Une épaisseur d'élément suivant y de 1 μm est considérée dans la ZCT (Part 4) afin de pouvoir modéliser le frottement outil/surface usinée au niveau de celle-ci, comme vu précédemment, et une taille d'élément similaire à celle utilisée par Atlati (Atlati, 2012), soit 10 μm , est retenue pour le maillage des éléments représentant le copeau (Part 1 et 2). Des éléments de taille plus importante sont utilisés pour le maillage de la base de la portion de pièce représentée grâce à une zone de transition du maillage où quelques éléments triangulaires sont employés.

Concernant les conditions limites, les translations de la pièce suivant x et y sont bloquées, la translation de l'outil suivant y est bloquée et une vitesse de translation suivant x , égale à la vitesse de coupe, est imposée à l'outil (Figure 4-8-a).

4.4.3 Validation du modèle

Afin de valider le modèle développé, les configurations de coupe étudiées par Atlati (Atlati, 2012), dans ses travaux de simulation de l'opération de coupe orthogonale appliqués au cas de l'usinage de l'AA2024-T351, sont reproduites avec le modèle développé et les résultats sont analysés. Ces configurations de coupe sont présentées en Tableau 4-5.

V_c (m/min)	60
f_r (mm)	0,3
r (μm)	10
γ ($^\circ$)	[0 ; 15 ; 30]
l_{stet} (mm)	0
Angle de dépouille ($^\circ$)	7 $^\circ$

Tableau 4-5 : Configurations de coupe étudiées par Atlati (Atlati, 2012)

Les résultats de morphologie et d'état de déformation plastique équivalente du copeau obtenus par Atlati (Atlati, 2012) et avec le modèle mécanique développé sont comparés en Figure 4-9. Ceux-ci sont similaires pour les trois angles de coupe modélisés. Ainsi, le modèle mécanique développé peut être considéré comme valide.

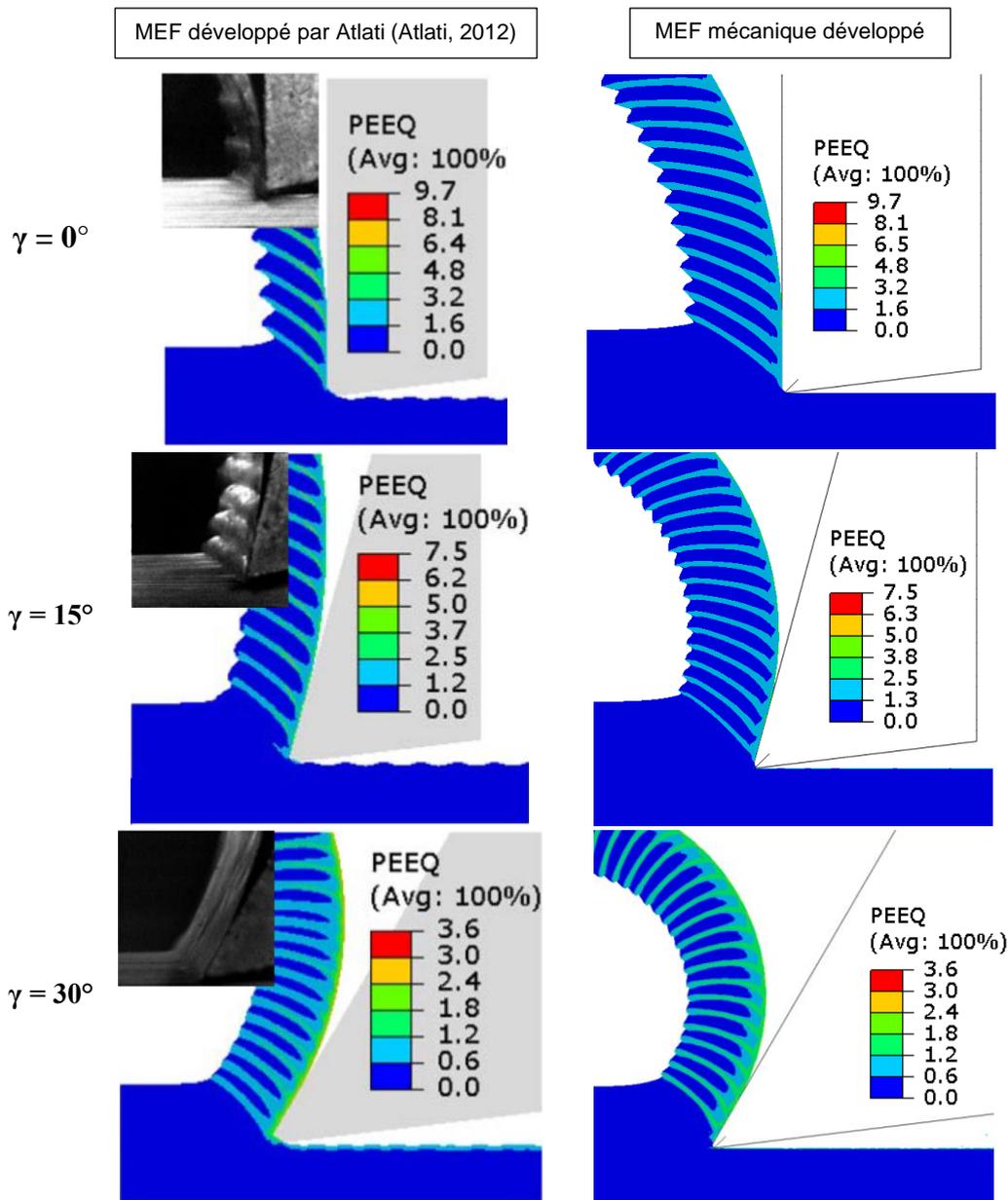


Figure 4-9 : Comparaison de la morphologie et de l'état de déformation plastique équivalente des copeaux obtenus avec le Modèle Eléments Finis (MEF) développé par Atlati (Atlati, 2012) et avec le MEF mécanique développé dans cette étude

4.4.4 Modèle de référence

Cette partie présente les résultats d'intégrité de surface prédits avec un modèle désigné comme « modèle de référence ». Les paramètres de l'opération de coupe considérés dans ce modèle sont présentés en Tableau 4-6. Ils correspondent aux paramètres utilisés pour le perçage orbital au diamètre 9,53 mm excepté la largeur du listel. En effet, dans un premier temps, le listel de l'outil n'est pas considéré et un outil avec un angle de dépouille positif est modélisé. La modélisation du listel sera introduite dans une partie suivante. Dans la suite de ce Chapitre, ces paramètres de référence seront modifiés un par un pour mener à bien l'étude de leur influence sur l'intégrité de surface.

Une première analyse des résultats d'intégrité de surface obtenus avec ce modèle est menée ici. Les résultats sont observés sur un ensemble d'éléments appartenant aux Part 3 et Part 4, de taille $400 \mu\text{m} \times 80 \mu\text{m}$, qui est situé à mi-longueur suivant x de la portion de pièce modélisée (Figure 4-10).

4.4 Etude numérique de l'impact de l'opération de perçage sur l'intégrité de surface

V_c (m/min)	1005
f_r (mm)	0,3
r (μm)	6
γ ($^\circ$)	17
l_{listel} (mm)	0
Angle de dépouille ($^\circ$)	7°

Tableau 4-6 : Paramètres considérés pour le modèle de référence

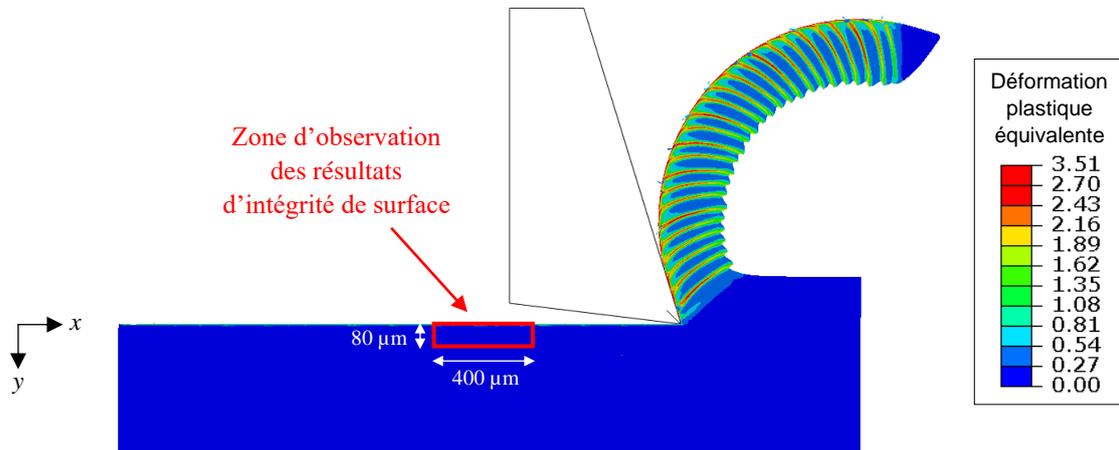


Figure 4-10 : Zone d'observation des résultats d'intégrité de surface

L'état de déformation plastique équivalente du matériau en sous-surface prédit avec le modèle de référence est présenté en Figure 4-11-a. Un critère considérant un seuil de déformation plastique de 10 % est utilisé afin de déterminer la profondeur du matériau en sous-surface affectée par les déformations plastiques à l'issue de la coupe et de pouvoir mener une étude comparative par la suite (Figure 4-11-b). Cette valeur seuil de 10 % de déformation plastique a été déterminée de manière à obtenir une profondeur affectée de l'ordre de celle identifiée expérimentalement. Une profondeur affectée moyenne de 20 μm est ainsi obtenue pour cette configuration de coupe.

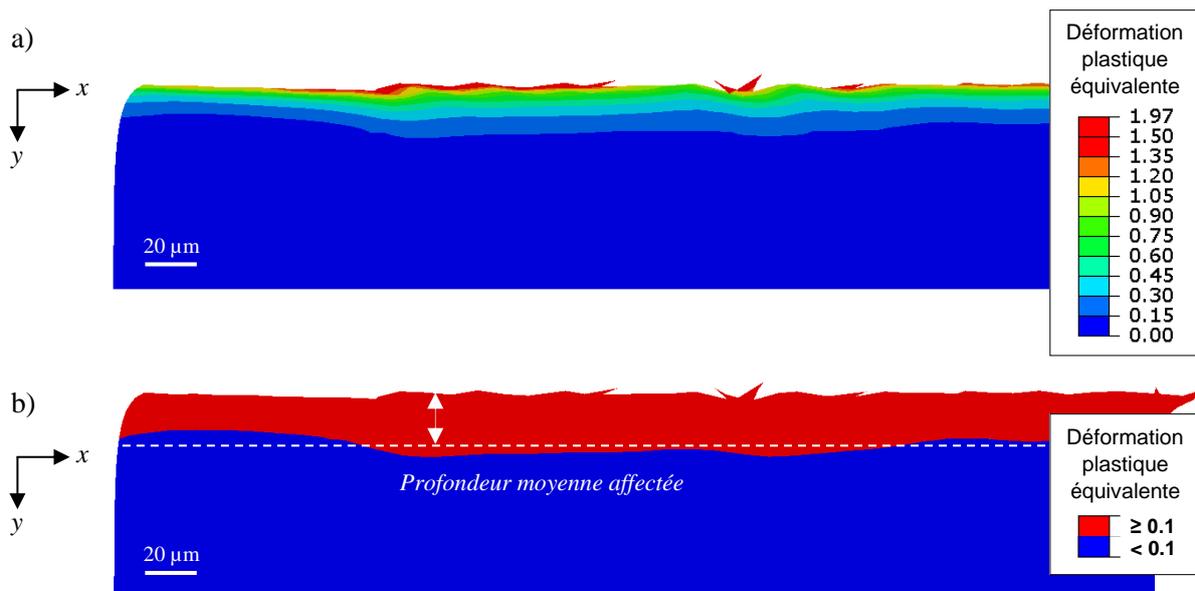


Figure 4-11 : Etat de déformation plastique équivalente du matériau en sous-surface (a) et profondeur du matériau affectée par les déformations plastiques (b) prédits avec le modèle de référence

L'état de contraintes résiduelles du matériau en sous-surface évalué avec le modèle de référence est présenté en Figure 4-12. Le niveau des contraintes dans la direction y du modèle, modélisant la direction radiale du perçage, est négligeable devant celui des contraintes dans la direction x du modèle, modélisant la direction circonférentielle du perçage. Ainsi, ces résultats sont en accord avec ceux obtenus avec le modèle macroscopique présenté en Partie 3.3.2. Cet état de contraintes résiduelles combine des contraintes résiduelles de traction et de compression et la profondeur moyenne du matériau affectée par celles-ci est similaire à la profondeur de matériau affectée par les déformations plastiques (environ $20\ \mu\text{m}$).

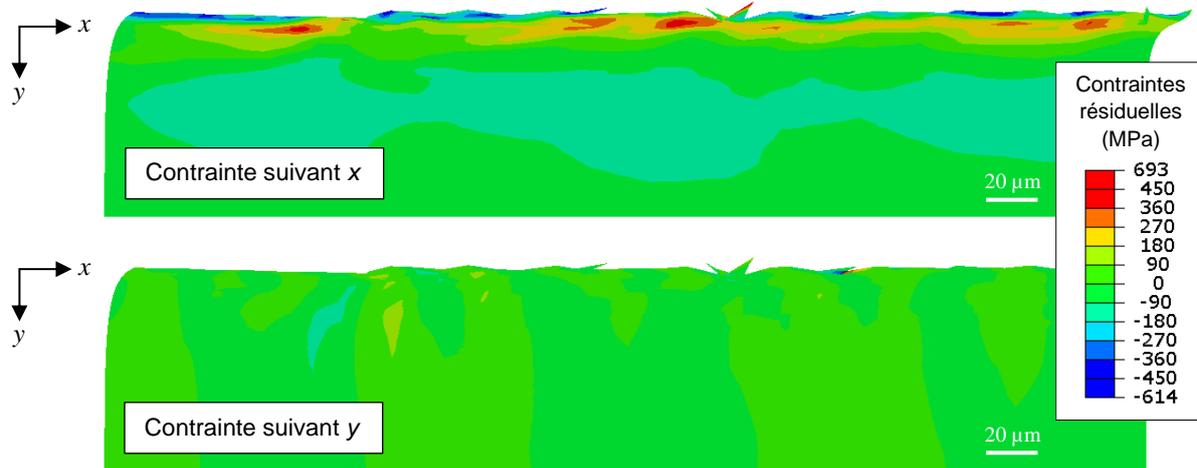


Figure 4-12 : Etat de contraintes résiduelles du matériau en sous-surface prédit avec le modèle de référence

Dans la suite de cette étude, les résultats d'intégrité de surface seront observés sur le même ensemble d'éléments que celui considéré dans cette partie. Ils seront caractérisés à travers les cartographies d'état de contraintes résiduelles circonférentielles et d'état de déformation plastique du matériau en sous-surface ainsi qu'à travers la profondeur moyenne du matériau affectée par les déformations plastiques déterminée en considérant une valeur seuil de 10 %.

4.4.5 Exploitation du modèle pour l'étude des paramètres de perçage identifiés comme ayant un impact potentiel sur l'intégrité de surface dans cette étude

Le modèle développé est exploité afin d'étudier l'impact des paramètres de l'opération de perçage identifiés comme ayant une influence potentielle sur les aspects internes de l'intégrité de surface dans cette étude, à savoir l'angle de coupe en goujure et la vitesse de coupe.

4.4.5.1 Influence de l'angle de coupe

Afin d'étudier l'influence de l'angle de coupe en goujure sur l'intégrité de surface, les résultats obtenus avec une large plage de valeurs d'angle de coupe (-10° ; -6° ; 0° ; 5° ; 10° ; 17° ; 25° ; 30°), comprenant celles mesurées sur les outils utilisés dans cette étude, sont analysés. L'évolution de la profondeur moyenne du matériau en sous-surface affectée par les déformations plastiques en fonction de l'angle de coupe est présentée en Figure 4-13. Les états de déformation plastique équivalente et de contraintes résiduelles circonférentielles du matériau en sous-surface obtenus avec les angles minimum et maximum considérés sont présentés en Figure 4-14 et Figure 4-15.

Les résultats obtenus montrent un impact significatif de l'angle de coupe sur les aspects internes de l'intégrité de surface. La diminution de l'angle de coupe induit une augmentation de la profondeur de matériau affectée par les déformations plastiques avec une évolution quasi-linéaire (Figure 4-13). En revanche, le niveau maximal des déformations plastiques générées semble faiblement impacté par

4.4 Etude numérique de l'impact de l'opération de perçage sur l'intégrité de surface

l'angle de coupe (Figure 4-14). Concernant les contraintes résiduelles, l'évolution d'un angle de coupe positif vers un angle de coupe négatif semble induire l'évolution d'un état de contraintes résiduelles dominé par des contraintes de traction vers un état de contraintes résiduelles dominé par des contraintes compressives (Figure 4-15).

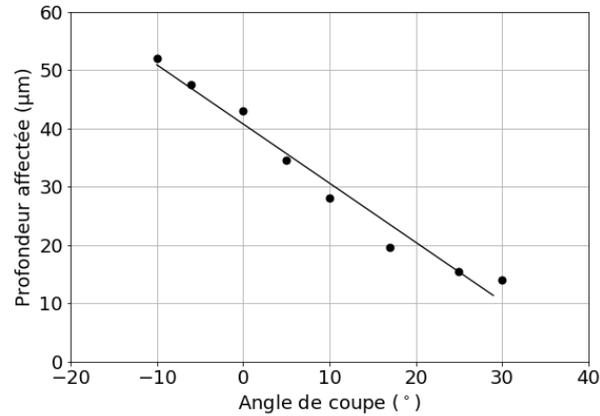


Figure 4-13 : Profondeur du matériau en sous-surface affectée par les déformations plastiques en fonction de l'angle de coupe

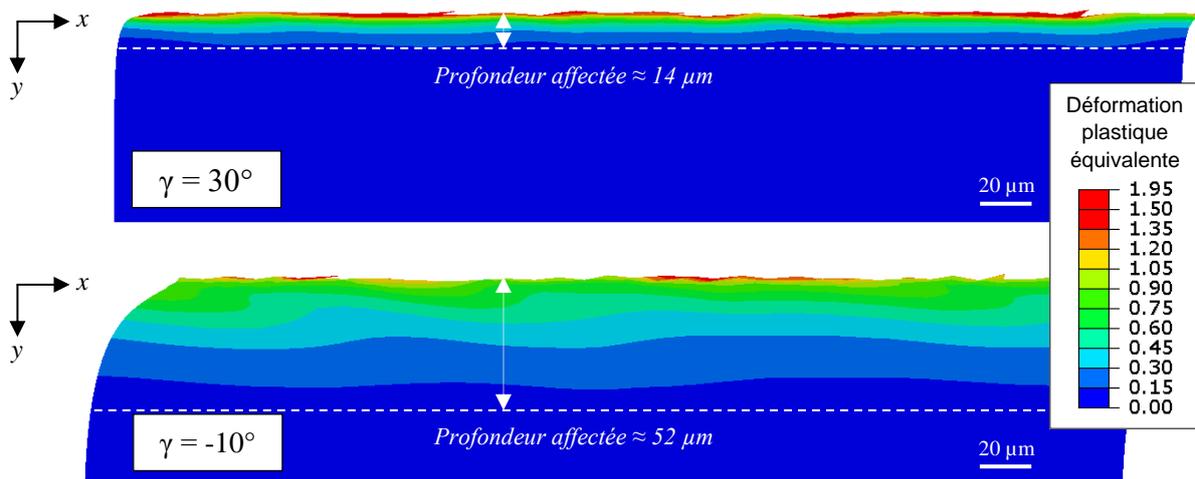


Figure 4-14 : Influence de l'angle de coupe sur l'état de déformation plastique équivalente du matériau en sous-surface

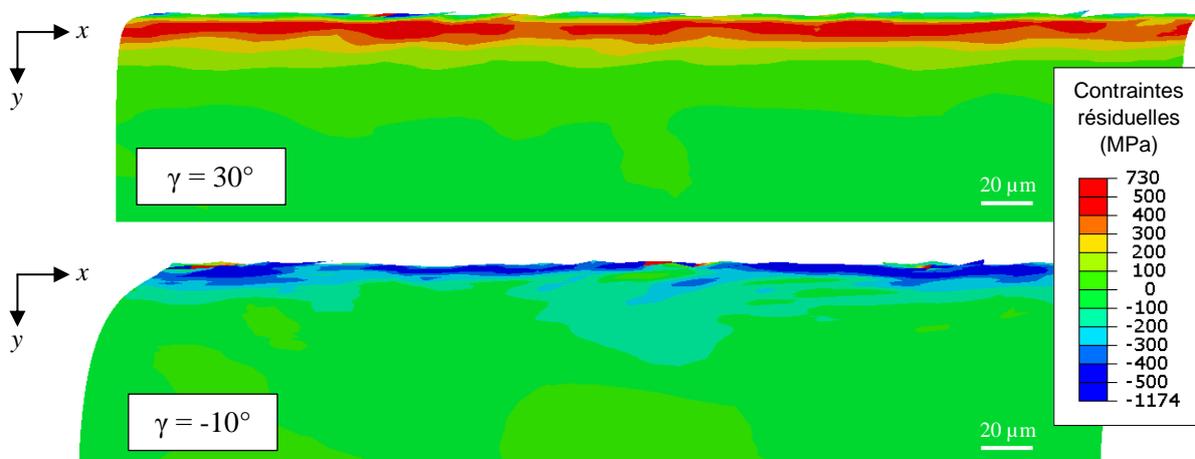


Figure 4-15 : Influence de l'angle de coupe sur l'état de contraintes résiduelles circonférentielles du matériau en sous-surface

Afin d'expliquer ces phénomènes, les efforts de coupe (F_c suivant x) et d'avance (F_f suivant $-y$) moyens mis en jeu au cours de la coupe avec les différents angles de coupe étudiés sont analysés (Figure 4-16). Ces efforts représentent l'action de l'outil sur la matière. Ils augmentent significativement, et de manière quasi-linéaire, avec la diminution de l'angle de coupe. De plus, l'effort d'avance subit un changement de signe au cours de la diminution de l'angle de coupe de 30° à -10° . Pour les plus grands angles de coupe, la formation du copeau tend à tirer la matière située devant l'outil vers l'extérieur, le copeau s'écoulant aisément sur la face de coupe de l'outil. En revanche, pour les angles de coupe plus faibles, la formation du copeau tend à comprimer la matière située devant l'outil, le copeau subissant une compression importante au niveau de la face de coupe associée à un festonnement important (Figure 4-17).

Ainsi, l'augmentation de la profondeur de matériau affectée par les déformations plastiques observée avec la diminution de l'angle de coupe peut être expliquée par l'augmentation des efforts de coupe et d'avance. L'évolution de l'état de contraintes résiduelles de traction vers un état de contraintes résiduelles de compression observée avec la diminution de l'angle de coupe peut, elle, être expliquée par un changement de comportement dans la formation du copeau associé à un changement de signe de l'effort d'avance.

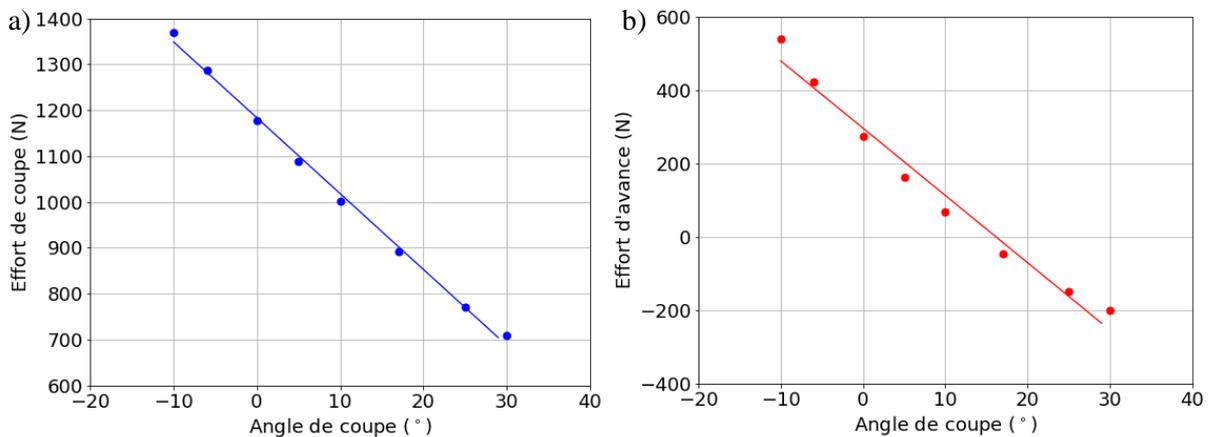


Figure 4-16 : Influence de l'angle de coupe sur les efforts de coupe (a) et d'avance (b)

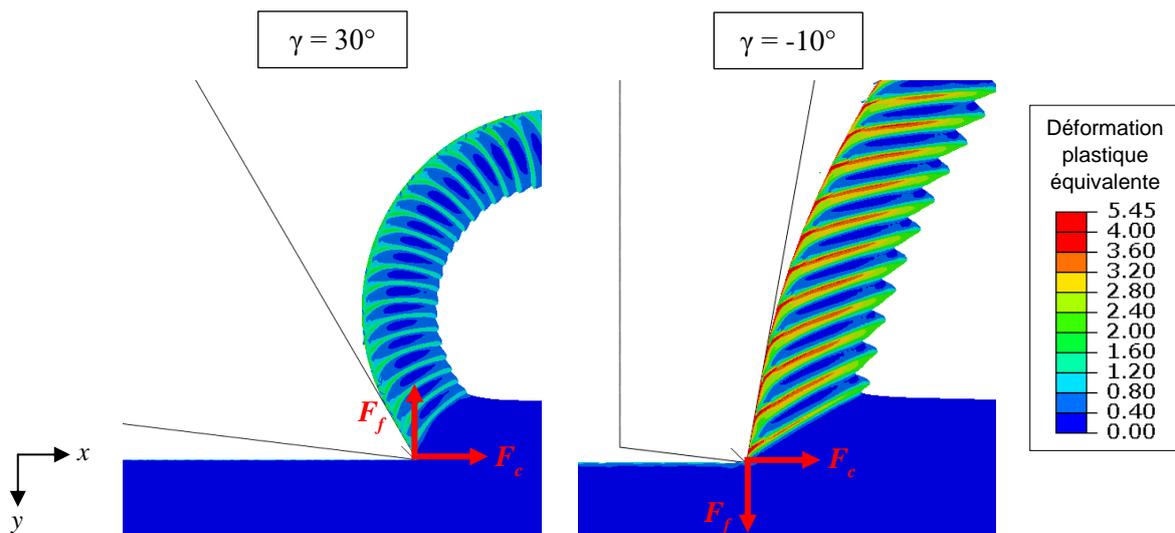


Figure 4-17 : Influence de l'angle de coupe sur la morphologie du copeau

4.4.5.2 Influence de la vitesse de coupe

Afin d'étudier l'influence de la vitesse de coupe sur l'intégrité de surface, les résultats obtenus avec des vitesses de coupe de 120 m/min et 1005 m/min, soient les vitesses de coupe minimales et maximales considérées avec les configurations de perçage étudiées, sont comparés. Les résultats d'intégrité de surface obtenus pour un angle de coupe positif de 17° sont présentés en Figure 4-18 et Figure 4-19. Ils montrent des états de déformation plastique équivalente et de contraintes résiduelles du matériau en sous-surface similaires pour les deux vitesses de coupe. Par ailleurs, l'influence de la vitesse de coupe a également été étudiée pour le cas d'un angle de coupe négatif (-30°) et les résultats ont également montré des intégrités de surface similaires avec les deux vitesses de coupe. La vitesse de coupe semble donc avoir une influence mineure sur les aspects internes de l'intégrité de surface, pour ce cas d'étude.

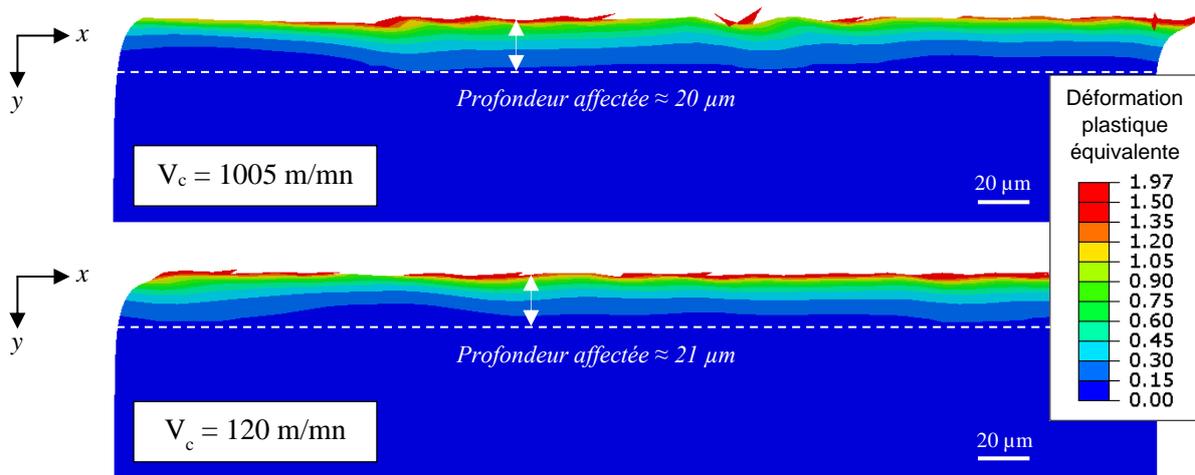


Figure 4-18 : Influence de la vitesse de coupe sur l'état de déformation plastique équivalente du matériau en sous-surface

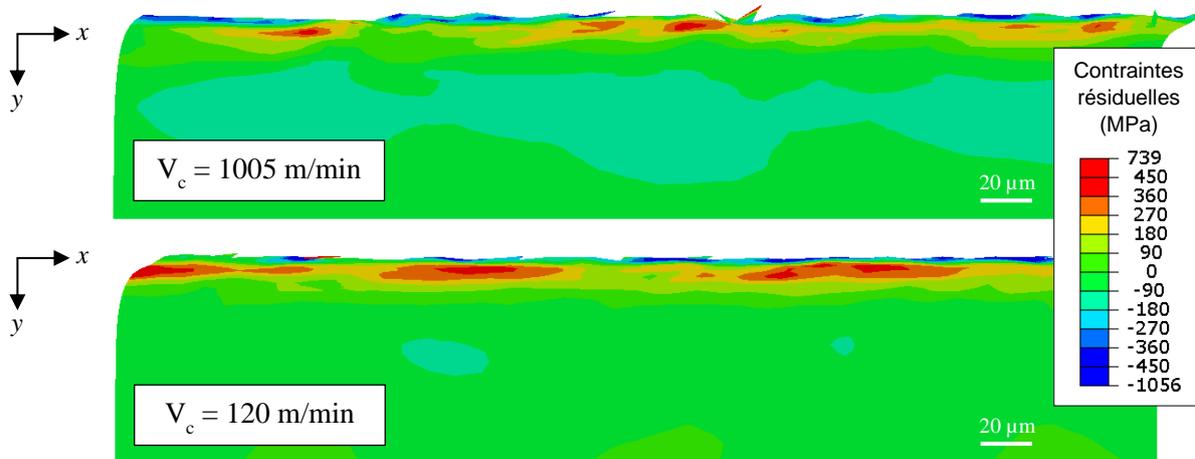


Figure 4-19 : Influence de la vitesse de coupe sur l'état de contraintes résiduelles circonférentielles du matériau en sous-surface

Ainsi, d'après les résultats obtenus dans cette partie, c'est l'angle de coupe en goujure des outils utilisés qui semble expliquer les différences d'intégrité de surface des trous percés observées au Chapitre 3. Cependant, si les configurations de perçage considérées dans cette étude ne permettent pas de juger de l'influence des autres paramètres de l'opération de perçage associés à la coupe latérale, il est possible que certains de ces paramètres aient également un impact sur les aspects internes de l'intégrité de surface. C'est pourquoi, l'influence de ceux-ci est étudiée dans la partie suivante.

4.4.6 Exploitation du modèle pour l'étude de l'impact des autres paramètres de perçage sur l'intégrité de surface

4.4.6.1 Influence de la géométrie de l'outil en dépouille

L'impact de la géométrie de l'outil en dépouille sur l'intégrité de surface est étudié dans cette partie. La modélisation du listel est introduite afin d'analyser l'influence de la nature de l'angle de dépouille (nul ou positif). Les résultats d'intégrité de surface obtenus en considérant un outil sans chanfrein avec un angle de dépouille de 7° et un outil avec chanfrein, de longueur l_{listel} de $353 \mu\text{m}$, avec un angle de contre-dépouille de 7° sont ainsi comparés (Figure 4-20 et Figure 4-21).

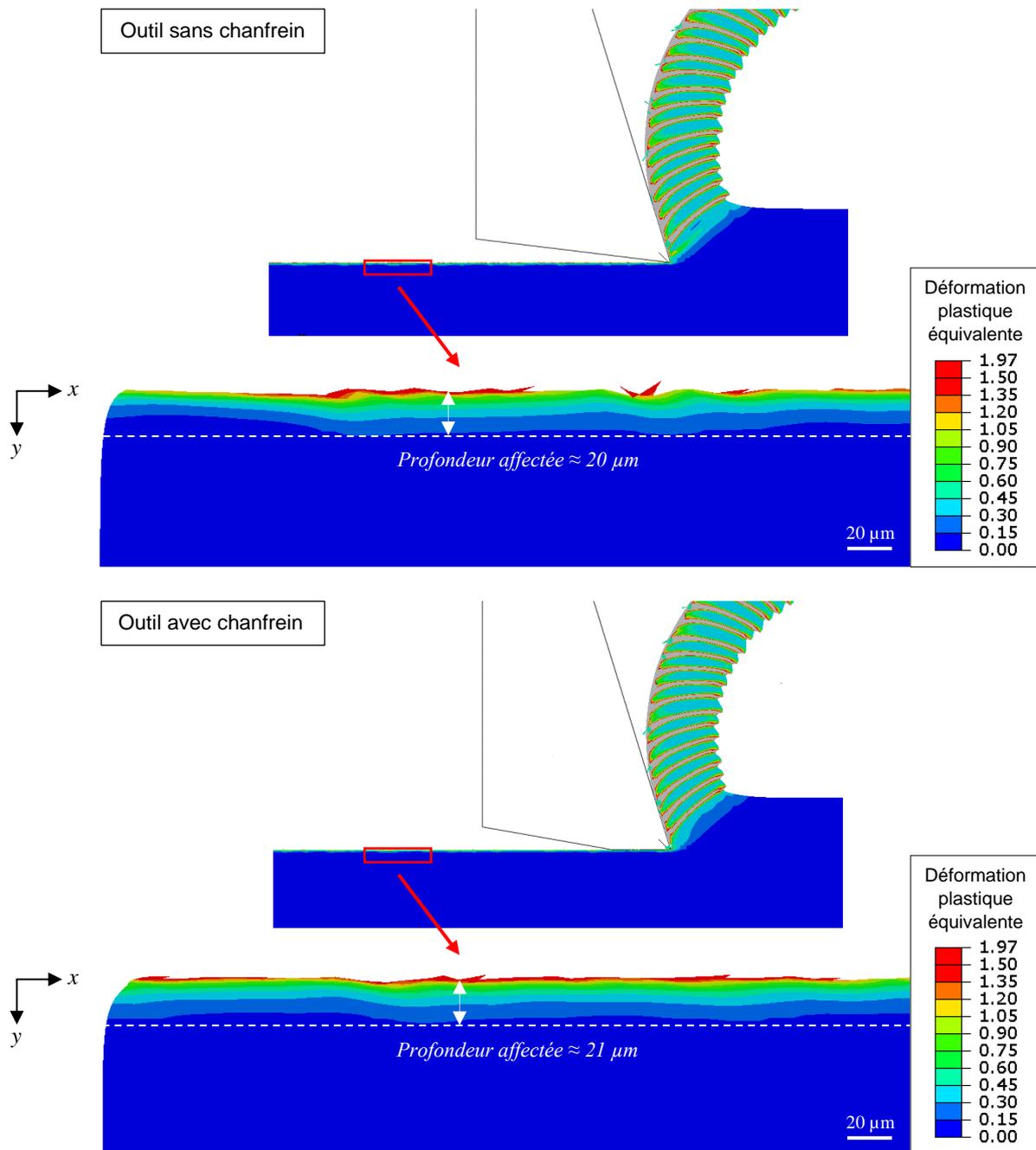


Figure 4-20 : Influence de la géométrie de l'outil en dépouille sur l'état de déformation plastique équivalente du matériau en sous-surface

4.4 Etude numérique de l'impact de l'opération de perçage sur l'intégrité de surface

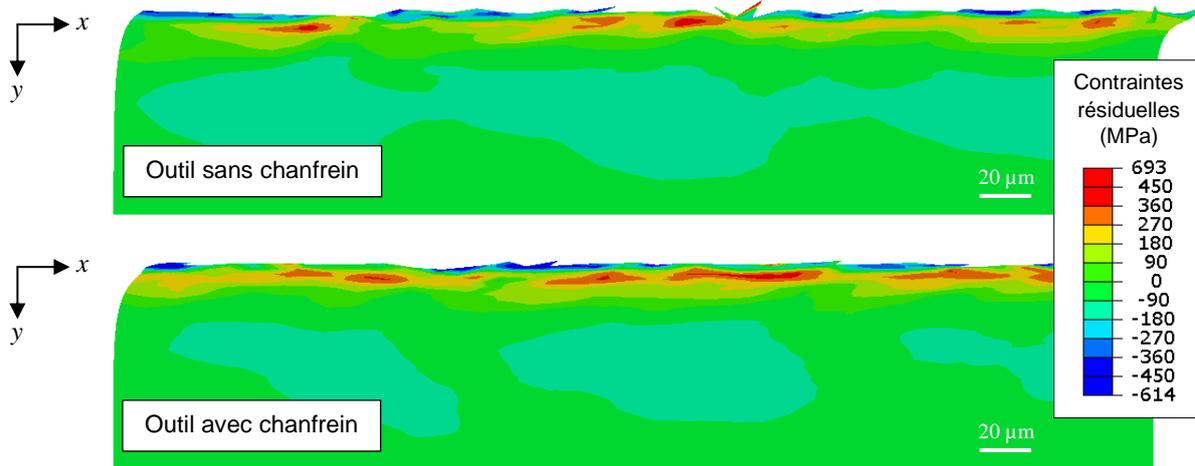


Figure 4-21 : Influence de la géométrie de l'outil en dépouille sur l'état de contraintes résiduelles circonférentielles du matériau en sous-surface

Les états de déformation plastique équivalente et de contraintes résiduelles du matériau en sous-surface obtenus avec les angles de dépouille nul et positif sont très similaires. Ainsi, le frottement des listels sur les parois du trou percé mis en jeu au cours de l'opération de perçage semble avoir une influence négligeable sur les aspects internes de l'intégrité de surface du trou percé, avec la largeur de listel considérée et les paramètres de modélisation choisis (notamment en termes de frottement). Une interaction avec la valeur du rayon d'acuité d'arête est également possible.

4.4.6.2 Influence du rayon d'acuité

L'influence du rayon d'acuité en goujure sur l'intégrité de surface est étudiée avec le modèle développé. Cependant, celui-ci présente certaines limites. En effet, du fait de la taille des éléments utilisés pour le maillage de la zone de passage de la pointe (Parts 3) et de la ZCT (Part 4), une plage limitée de valeurs de rayon d'acuité peut être étudiée. L'épaisseur des éléments utilisés pour le maillage de la ZCT (1 μm dans cette étude) conditionne le rayon d'acuité minimal pouvant être étudié : un rayon d'acuité supérieur à celle-ci doit être considéré afin d'assurer la modélisation du frottement outil/pièce au niveau de la ZCT. Par ailleurs, la taille des éléments utilisés pour le maillage de la Part 3 (20 μm dans cette étude), permettant la modélisation de la séparation de la matière, conditionne le rayon d'acuité maximal pouvant être étudié. Au-delà d'une certaine valeur de rayon d'acuité (24 μm dans cette étude), des éléments de la Part 2, qui ne possèdent pas de propriétés de suppression à partir d'une valeur critique de l'endommagement, sont comprimés devant la pointe de l'outil au lieu de s'écouler sur la face de coupe, modifiant ainsi l'écoulement du copeau. La valeur de rayon d'acuité considérée dans le modèle ne doit donc pas excéder cette valeur critique.

Une plage limitée de rayon d'acuité est donc étudiée ici (6 μm ; 12 μm ; 18 μm ; 24 μm). Pour un angle de coupe positif de 17°, l'évolution de la profondeur moyenne du matériau en sous-surface affectée par les déformations plastiques en fonction du rayon d'acuité est présentée en Figure 4-22 et les états de déformation plastique équivalente et de contraintes résiduelles du matériau en sous-surface obtenus avec les rayons d'acuité minimum et maximum considérés sont présentés en Figure 4-23 et Figure 4-24.

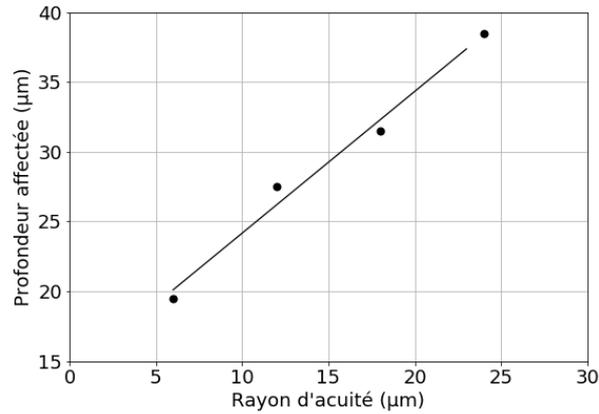


Figure 4-22 : Profondeur du matériau en sous-surface affectée par les déformations plastiques en fonction du rayon d'acuité, pour un angle de coupe positif

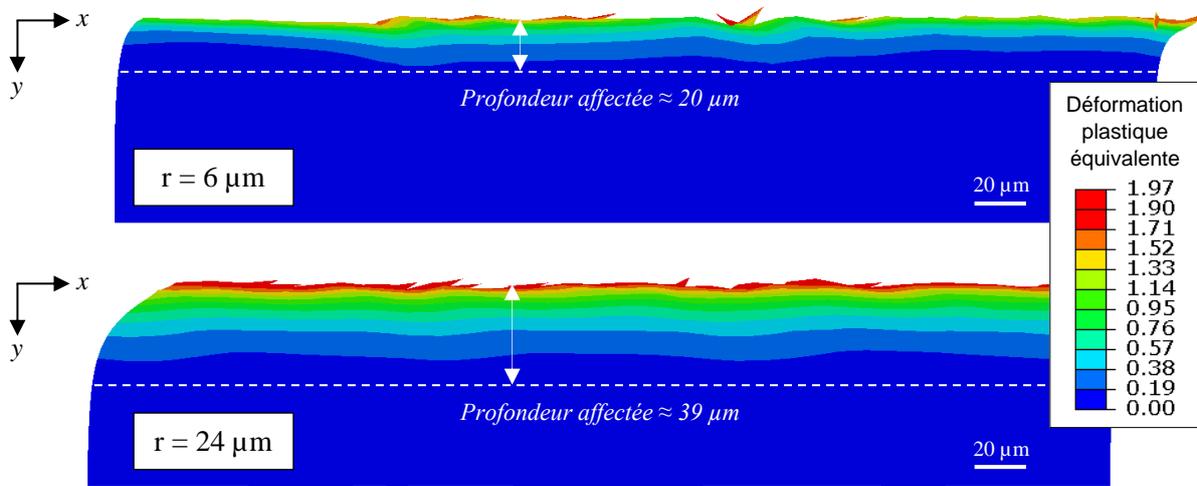


Figure 4-23 : Influence du rayon d'acuité sur l'état de déformation plastique équivalente du matériau en sous-surface, pour un angle de coupe positif

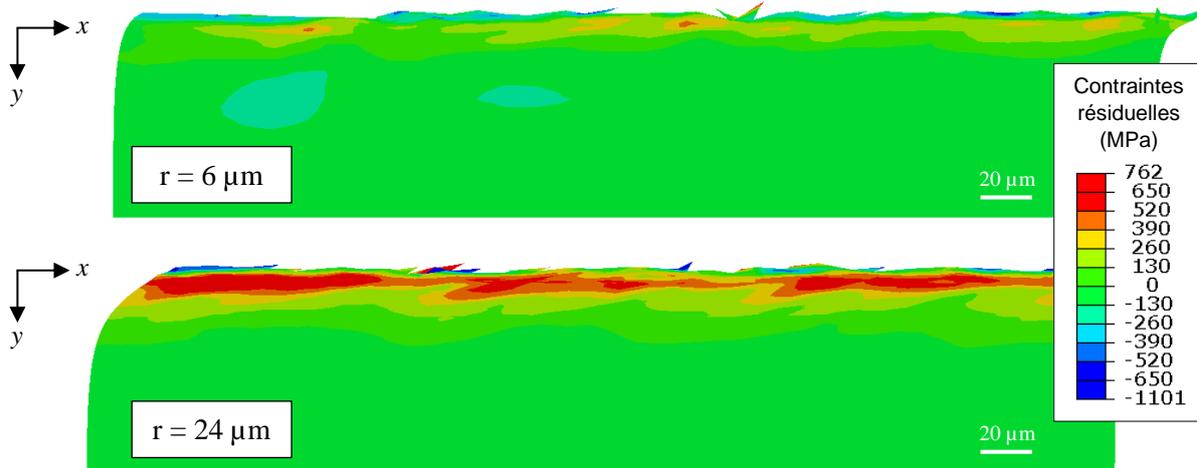


Figure 4-24 : Influence du rayon d'acuité sur l'état de contraintes résiduelles circonférentielles du matériau en sous-surface, pour un angle de coupe positif

Les résultats obtenus montrent une influence importante du rayon d'acuité sur les aspects internes de l'intégrité de surface. Une augmentation de la profondeur de matériau affectée par les déformations plastiques est observée avec l'augmentation du rayon d'acuité (Figure 4-22). De plus, le niveau maximal

4.4 Etude numérique de l'impact de l'opération de perçage sur l'intégrité de surface

de déformation plastique générée en sous-surface augmente, lui aussi, avec l'augmentation du rayon d'acuité (Figure 4-23). Concernant les contraintes résiduelles, leur niveau augmente également, significativement, avec l'augmentation du rayon d'acuité (Figure 4-24). En revanche, la nature des contraintes résiduelles (traction ou compression) n'est pas impactée.

Les efforts de coupe et d'avance moyens mis en jeu au cours de la coupe avec les différents rayons d'acuité étudiés, ainsi que les morphologies de copeau générées avec les rayons d'acuité minimum et maximal considérés, sont analysés (Figure 4-25 et Figure 4-26). La variation du rayon d'acuité entraîne une variation faible des efforts de coupe et d'avance (Figure 4-25). Une légère augmentation de ces efforts et une évolution d'un effort d'avance négatif vers un effort d'avance positif sont observées avec l'augmentation du rayon d'acuité. Concernant les morphologies de copeau, celles-ci sont similaires pour des rayons d'acuité de 6 et 24 μm (Figure 4-26). Ainsi, les différences d'intégrité de surface constatées ne semblent pas être liées au comportement de la matière située devant l'outil, lié à l'écoulement du copeau. En revanche, elles semblent s'expliquer par le comportement de la matière sous la pointe de l'outil, au niveau de l'interface de contact outil/pièce. L'augmentation du rayon de l'outil semble générer une augmentation du phénomène de compression de la matière au niveau de la ZCT. Cela explique ainsi l'augmentation des niveaux de déformation plastique et de contraintes résiduelles observée avec l'augmentation du rayon d'acuité.

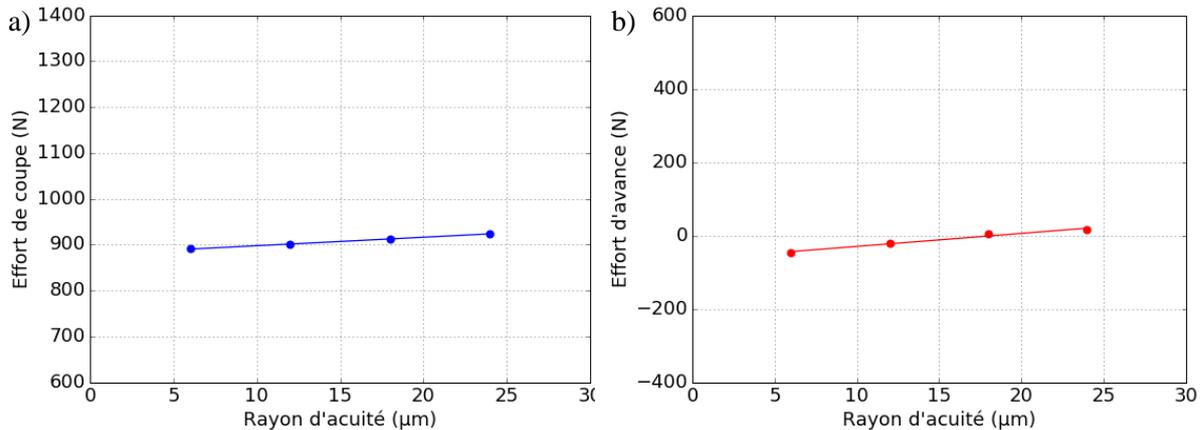


Figure 4-25 : Influence du rayon d'acuité sur les efforts de coupe (a) et d'avance (b)

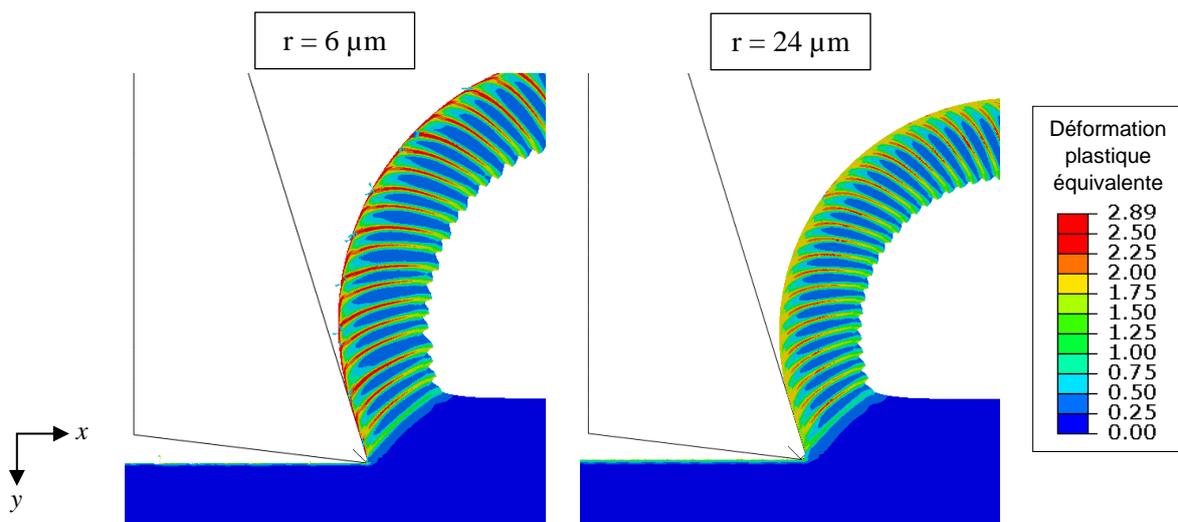


Figure 4-26 : Influence du rayon d'acuité sur la morphologie du copeau

Comme il a été observé précédemment, l'angle de coupe a une influence importante sur l'intégrité de surface (Partie 4.4.5.1). L'angle de coupe considéré jusqu'à présent dans cette partie étant un angle

de coupe positif de 17° , il apparaît intéressant d'étudier à présent l'influence du rayon d'acuité sur l'intégrité de surface dans le cas d'un angle de coupe négatif. Les intégrités de surface obtenues avec un rayon d'acuité de l'outil de $6\ \mu\text{m}$ et $24\ \mu\text{m}$, pour un angle de coupe de -10° , sont ainsi comparés ici (Figure 4-27 et Figure 4-28).

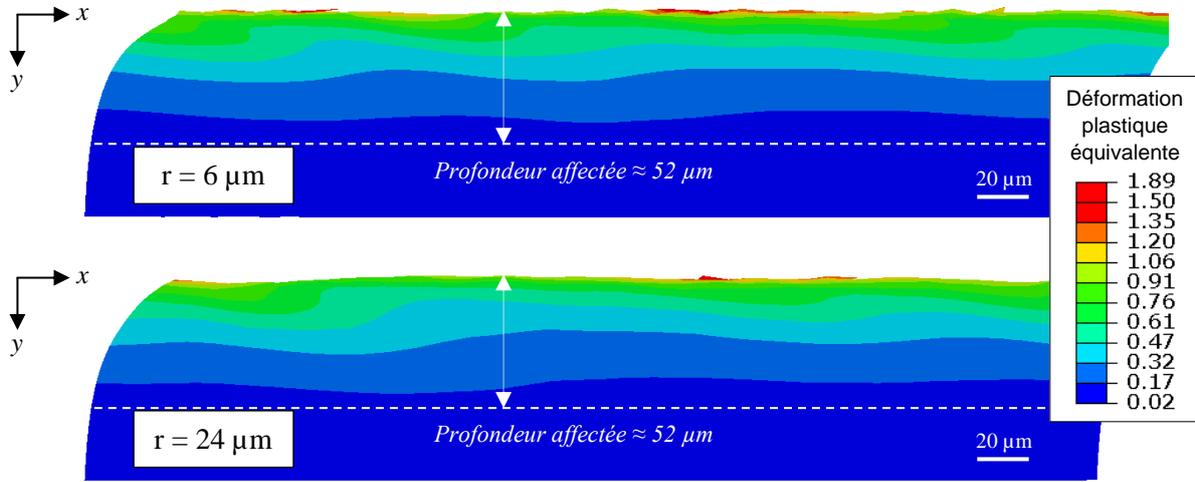


Figure 4-27 : Influence du rayon d'acuité sur l'état de déformation plastique équivalente du matériau en sous-surface, pour un angle de coupe négatif

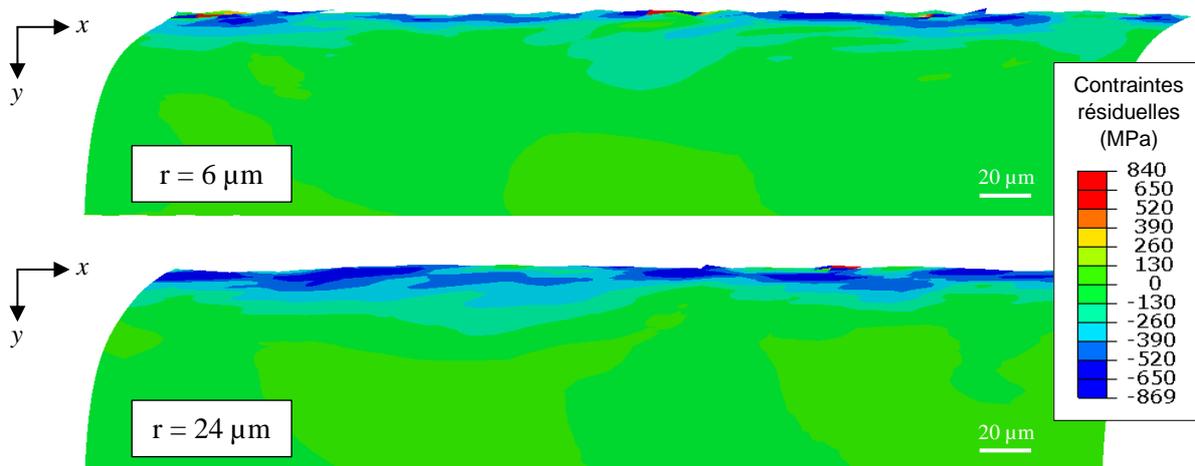


Figure 4-28 : Influence du rayon d'acuité sur l'état de contraintes résiduelles circonférentielles du matériau en sous-surface, pour un angle de coupe négatif

Pour l'angle de coupe de -10° , les résultats d'intégrité de surface obtenus avec les rayons d'acuité de 6 et $24\ \mu\text{m}$ sont similaires. Ainsi, pour le cas d'un angle de coupe négatif, l'influence du rayon d'acuité sur les aspects internes de l'intégrité de surface est beaucoup plus limitée. Ces résultats montrent donc l'influence prédominante de l'angle de coupe, et l'interaction entre ces deux paramètres.

L'interaction entre le rayon d'acuité et la vitesse de coupe a également été étudiée. L'influence de la vitesse de coupe ($120\ \text{m/min}$ ou $1005\ \text{m/min}$) sur l'intégrité de surface a été étudiée pour le cas d'un rayon d'acuité de $24\ \mu\text{m}$. De la même manière que les résultats obtenus pour un rayon d'acuité de $6\ \mu\text{m}$ (Figure 4-18 et Figure 4-19), les résultats obtenus pour un rayon d'acuité de $24\ \mu\text{m}$ ont révélé une influence mineure de la vitesse de coupe sur les aspects internes de l'intégrité de surface. L'interaction entre le rayon d'acuité et la vitesse de coupe semble donc faible.

4.4.6.3 Influence de l'avance radiale à la dent

L'influence de l'avance radiale à la dent est étudiée. Comme évoqué précédemment, celle-ci étant complexe à évaluer pour le cas des configurations de perçage étudiées, un ensemble d'avance radiale à la dent, considéré dans les travaux de Atlati (Atlati, 2012), est étudié ici (0,05 mm ; 0,1 mm ; 0,2 mm ; 0,3 mm). L'évolution de la profondeur moyenne du matériau en sous-surface affectée par les déformations plastiques en fonction de l'avance radiale à la dent est présentée en Figure 4-29. Les états de déformation plastique équivalente et de contraintes résiduelles du matériau en sous-surface obtenus avec les avances radiales à la dent minimale et maximale considérées sont présentés en Figure 4-30 et en Figure 4-31.

Les résultats obtenus révèlent une certaine influence de l'avance radiale à la dent sur les aspects internes de l'intégrité de surface. Une augmentation de l'avance radiale entraîne une augmentation de la profondeur de matériau affectée par les déformations plastiques (Figure 4-29). Par ailleurs, une variation de l'avance radiale entraîne également une variation de l'état de contraintes résiduelles du matériau en sous-surface (Figure 4-30). Cela est expliqué par l'augmentation significative de l'effort de coupe avec l'augmentation de l'épaisseur coupée (Figure 4-32).

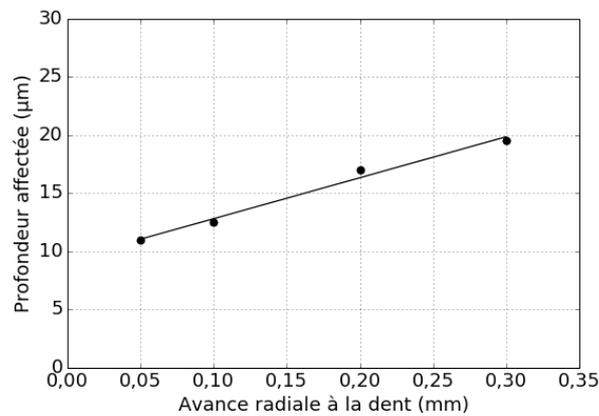


Figure 4-29 : Profondeur du matériau en sous-surface affectée par les déformations plastiques en fonction de l'avance radiale à la dent

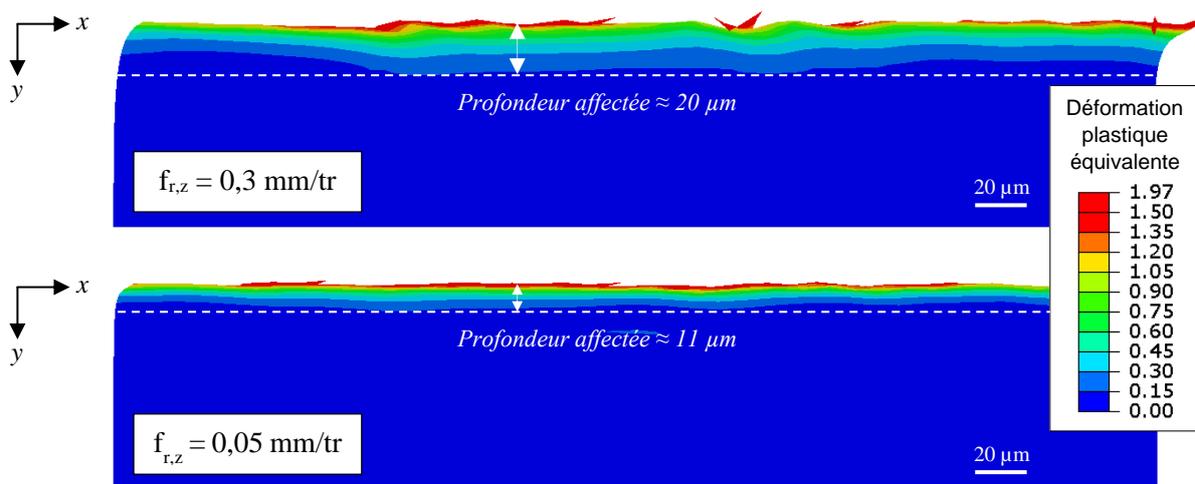


Figure 4-30 : Influence de l'avance radiale à la dent sur l'état de déformation plastique équivalente du matériau en sous-surface

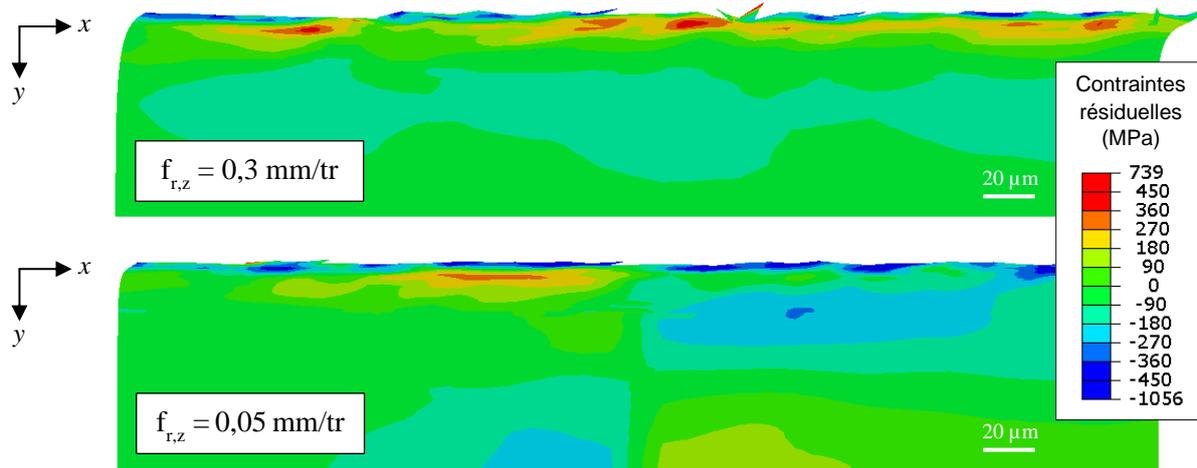


Figure 4-31 : Influence de l'avance radiale à la dent sur l'état de contraintes résiduelles circonférentielles du matériau en sous-surface

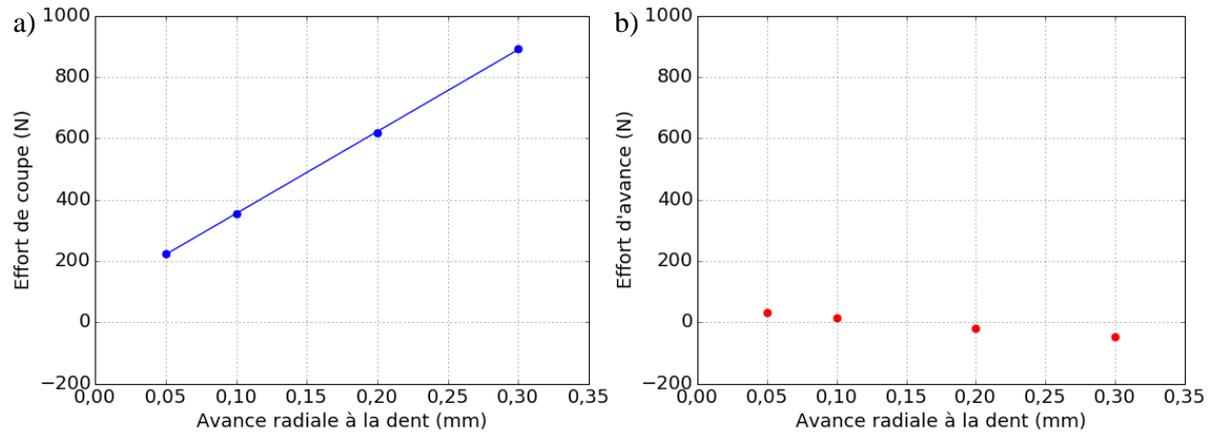


Figure 4-32 : Influence de l'avance radiale à la dent sur les efforts de coupe (a) et d'avance (b)

L'interaction de l'avance radiale avec les autres paramètres associés à la coupe latérale (vitesse de coupe, angle de coupe et rayon d'acuité) a été analysée. Pour cela, l'impact de ces paramètres sur l'intégrité de surface a été étudié pour le cas d'une avance radiale de 0,05 mm/tr, leur impact ayant déjà été évalué pour une avance radiale de 0,3 mm/tr. Les résultats obtenus ont montré une influence de la vitesse de coupe, de l'angle de coupe et du rayon d'acuité sur les aspects internes de l'intégrité de surface similaire à celle constatée pour le cas d'une avance radiale de 0,3 mm/tr. L'interaction entre l'avance radiale et les autres paramètres de perçage associés à la coupe latérale semble donc faible.

Ainsi, au-delà de l'angle de coupe en goujure, le rayon d'acuité en goujure de l'outil utilisé et l'avance radiale à la dent peuvent aussi avoir un impact notable sur les aspects internes de l'intégrité de surface des trous percés en AA2024-T351. En revanche, le frottement des listels de l'outil sur la surface percée n'a pas d'influence sur les aspects internes de l'intégrité de surface.

4.5 Corrélation entre les paramètres de l'opération de perçage et l'intégrité de surface

Le modèle numérique de coupe orthogonale développé a permis d'étudier l'influence de l'ensemble des paramètres de l'opération de perçage associés à la coupe latérale sur les aspects internes de l'intégrité de surface ayant un impact significatif sur la tenue en fatigue soient les déformations plastiques et les contraintes résiduelles. Cette étude a révélé l'influence mineure de la vitesse de coupe et du frottement des listels sur les parois du trou sur ces aspects internes de l'intégrité de surface. D'autre part, elle a montré l'influence notable de l'angle de coupe en goujure, du rayon d'acuité latéral et de l'avance radiale à la dent. L'état d'écrouissage du matériau en sous-surface augmente avec la diminution de l'angle de coupe et l'augmentation du rayon d'acuité latéral et de l'avance radiale à la dent. Concernant l'état de contraintes résiduelles du matériau en sous-surface, un état de contraintes compressives est favorisé avec un faible angle de coupe et un état de contraintes résiduelles de traction est favorisé avec un angle de coupe important. Par ailleurs, pour un angle de coupe en goujure positif, l'augmentation du rayon d'acuité latéral entraîne une augmentation du niveau de contraintes résiduelles. Enfin, l'état de contraintes du matériau en sous-surface peut aussi être impacté par l'avance radiale à la dent. Toutefois, l'influence de ces paramètres peut dépendre des niveaux des autres paramètres considérés. En effet, l'influence du rayon d'acuité latéral sur l'intégrité de surface est importante pour un angle de coupe positif alors qu'elle est mineure pour le cas d'un angle de coupe négatif. Parmi l'ensemble des paramètres de l'opération de perçage décrivant la coupe latérale, celui qui a l'impact le plus important sur les aspects internes de l'intégrité de surface semble être l'angle de coupe en goujure. Une intégrité de surface optimale, au regard des aspects internes, soit un état d'écrouissage important associé à un état de contraintes résiduelles compressives, pourrait être obtenue avec l'utilisation d'un outil avec un angle de coupe en goujure le plus faible possible, voire négatif.

En mettant en parallèle les résultats de cette étude numérique avec l'analyse des paramètres de l'opération de perçage considérés dans le cadre de cette étude, l'angle de coupe en goujure des outils utilisés apparait comme le paramètre principalement responsable des différences d'intégrité de surface observées dans cette étude. L'emploi d'un outil avec un angle de coupe en goujure négatif, pour le cas du perçage axial au diamètre 9,53 mm, explique l'état d'écrouissage important du matériau en sous-surface observé au cours de l'analyse MEB-EBSD ainsi que l'état de contraintes compressives constaté avec la technique HOCT. Ceux-ci sont liés à la compression importante de la matière devant l'outil du fait de la géométrie de celui-ci et des efforts de coupe et d'avance importants mis en jeu. Au contraire, pour les autres configurations de perçage, l'emploi d'un outil avec un angle de coupe en goujure positif explique le faible niveau d'écrouissage du matériau en sous-surface observé et la présence de contraintes résiduelles de traction en bord de trou.

Le modèle numérique de coupe développé, simulant la coupe latérale mise en jeu au cours d'une opération de perçage, ne permet pas de prédire les aspects topologiques de l'intégrité de surface. Si l'influence négligeable de ceux-ci a été observée dans le cadre de cette étude, du fait des faibles valeurs de rugosité générées, des conditions de coupe dégradées pourraient réduire la tenue en fatigue d'une pièce percée du fait de la dégradation de l'état de la surface percée. Ainsi, il serait intéressant de pouvoir étudier l'influence des paramètres de l'opération de perçage sur les aspects topologiques de l'intégrité de surface, parallèlement à leur influence sur les aspects internes. Les mesures des paramètres de rugosité présentées en Partie 3.2 montrent des valeurs plus élevées, pour certains paramètres de rugosité, pour le cas du perçage axial au diamètre 9,53 mm, qui est associé à l'utilisation d'un outil avec un angle de coupe en goujure négatif contrairement aux autres configurations de perçage (Figure 4-3). Ainsi, si un angle de coupe en goujure négatif permet d'optimiser les aspects internes de l'intégrité de surface du trou percé, il est possible qu'il dégrade, en parallèle, l'état de surface du trou du fait des efforts de coupe importants qu'il met en jeu. Afin de déterminer les paramètres optimums d'une opération de perçage, il faut donc veiller à évaluer l'impact de ceux-ci sur l'ensemble des aspects de l'intégrité de surface. Afin

d'optimiser l'intégrité de surface des trous percés en AA2024-T351, et donc la tenue en fatigue des structures, des conditions de coupe dégradées, par exemple avec l'utilisation d'un angle de coupe négatif, peuvent être mises en place pour générer un écrouissage et des contraintes résiduelles compressives au niveau du matériau en bord de trou. Cependant, celles-ci doivent être mises en place dans la limite du respect de l'exigence aéronautique en termes de rugosité.

4.6 Synthèse

Dans ce chapitre, les corrélations entre les paramètres de l'opération de perçage et les aspects internes de l'intégrité de surface sont étudiées. La coupe associée à la partie latérale de l'outil étant supposée avoir une influence prépondérante sur l'intégrité de surface devant celle associée au bout de l'outil, ce chapitre se focalise sur l'étude des paramètres de l'opération de perçage associés à la coupe latérale. Celle-ci pouvant être assimilée à une opération de coupe orthogonale, ces paramètres comprennent : l'angle de coupe en goujure, le rayon d'acuité latéral, la largeur de listel, la vitesse de coupe et l'avance radiale à la dent.

Afin d'étudier l'influence de ces paramètres sur les aspects internes de l'intégrité de surface, de façon indépendante et en considérant une large plage de valeur, un modèle numérique est développé. Celui-ci est modèle 2D mécanique de coupe orthogonale visant à simuler l'opération de coupe latérale mise en jeu au cours du perçage. Le modèle développé par Atlati (Atlati, 2012), dans le cadre de ses travaux sur les échanges thermiques à l'interface outil/copeau, appliqués à l'usinage de l'AA2024-T351 avec un outil en carbure de tungstène, est repris et adapté à cette étude se focalisant sur l'intégrité de surface et les phénomènes mécaniques mis en jeu au cours du perçage. La stratégie de simulation de l'enlèvement de matière, considérée par Atlati (Atlati, 2012), qui est basée sur la suppression d'une bande d'éléments dans la zone de passage de la pointe de l'outil, prédéfinie à l'aide de partitions, est reprise. De plus, afin de modéliser le frottement de la pointe de l'outil sur la surface usinée au niveau de la zone de cisaillement tertiaire (ZCT) et de prédire correctement les aspects internes de l'intégrité de surface, le modèle développé par Atlati est adapté. Une partition est créée au niveau de la ZCT afin d'introduire une bande d'éléments de faible épaisseur devant la valeur du rayon d'acuité et présentant un comportement avec endommagement et suppression de l'élément au-delà d'une valeur seuil d'endommagement. En association avec une position initiale de la pointe de l'outil définie de sorte à assurer le frottement de celle-ci avec cette partition, cela permet de prendre en compte l'impact des phénomènes mécaniques liés au frottement de la pointe de l'outil sur la surface usinée sur l'intégrité de surface.

Les résultats de cette étude numérique ont montré l'influence significative de l'angle de coupe en goujure, du rayon d'acuité latéral et de l'avance radiale à la dent sur les aspects internes de l'intégrité de surface et ont révélé une influence mineure de la vitesse de coupe et du frottement des listels sur la surface percée. Parmi ces paramètres, l'angle de coupe en goujure est le paramètre ayant l'influence la plus importante sur les aspects internes de l'intégrité de surface. La diminution de l'angle de coupe entraîne une augmentation significative de la profondeur de matériau en sous-surface affectée par l'écrouissage et peut induire l'évolution d'un état de contraintes résiduelles de traction vers un état de contraintes résiduelles compressives. L'augmentation du rayon d'acuité latéral et de l'avance radiale à la dent peut entraîner, quant à elle, une augmentation de la profondeur de matériau en sous-surface affectée par l'écrouissage et du niveau de contraintes résiduelles, en fonction de l'angle de coupe considéré.

Afin d'expliquer les différences d'intégrité de surface observées avec les différentes configurations de perçage étudiées dans cette étude, les paramètres de ces opérations de perçage ont été analysés. Pour cela, l'ensemble des paramètres géométriques des outils associés à l'enlèvement de matière latéral ont été mesurés. Les résultats obtenus, mis en parallèle avec l'étude numérique menée, attribuent les différences d'intégrité observées au Chapitre 3 à la différence d'angle de coupe en goujure de l'outil utilisé. L'emploi d'un outil avec un angle de coupe en goujure négatif, pour le cas du perçage axial au

diamètre 9,53 mm, explique l'état d'écaillage important et l'état de contraintes résiduelles compressives du matériau en sous-surface constaté pour cette configuration de perçage.

Ainsi, l'optimisation de l'intégrité de surface des trous percés en AA2024-T351, et donc la tenue en fatigue des structures, semble possible à travers l'utilisation d'un outil avec un angle de coupe négatif permettant l'optimisation des aspects internes de l'intégrité de surface. Cependant, les résultats de cette analyse, mis en parallèle avec les mesures des paramètres de rugosité présentées au Chapitre 3, montrent une potentielle dégradation de l'état de surface avec la diminution de l'angle de coupe en goujure employé. Il est donc crucial de prendre également en compte le respect de l'exigence aéronautique en termes de rugosité dans le cadre de la détermination des paramètres optimaux d'une opération de perçage.

