

Simulations des aspects thermomécaniques de l'étape de forge

La simulation numérique a pris une place majeure dans la conception des pièces. Elle permet entre autre de prédire les niveaux, les vitesses et les températures de déformation lors de l'étape de forge. La connaissance de ces paramètres est nécessaire pour déterminer la géométrie des préformes afin d'obtenir des pièces sans défauts avec les propriétés mécaniques désirées. Un code métier et un code académique ont été utilisés. Le logiciel Simufact permet de mener jusqu'aux grandes déformations la modélisation de la forge avec formation de bavure notamment (remaillage possible). Pour ABAQUS la formulation reconnue du contact thermomécanique ainsi que la gestion des non linéarités matériaux, permet une étude fine des conditions locales du contact outil matière. Avant de présenter les résultats, on détaillera la détermination des paramètres du modèle en se focalisant dans les paragraphes suivant sur la cinématique des outils, les conditions thermiques et enfin la loi de comportement des matériaux mis en forme.

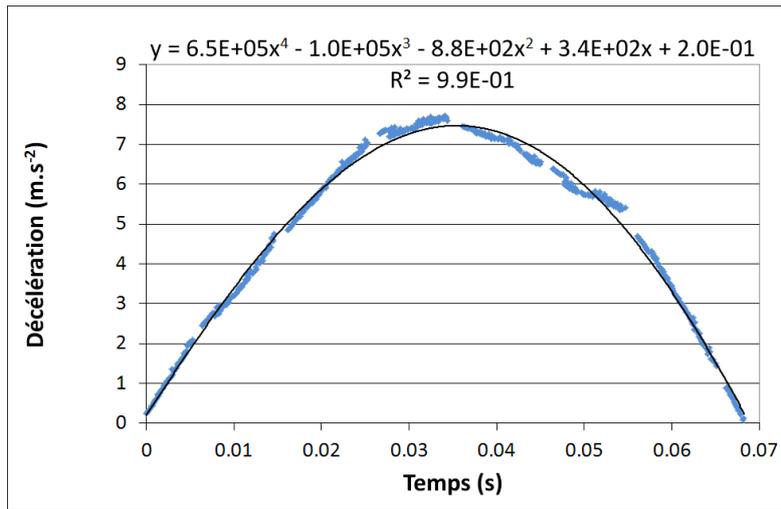
III.1 Détermination de l'évolution de la vitesse du coulisseau au cours de l'étape de forge

Comme nous avons pu le voir dans le paragraphe I.4.2, le niveau de déformation mais aussi la vitesse sont déterminantes pour les évolutions de microstructure. Aussi, pour connaître la vitesse de déformation, il est nécessaire de connaître la vitesse du coulisseau (matrice supérieure) ainsi que son évolution au cours de la forge, la matrice inférieure étant fixe. Le logiciel utilisé à Saint-Jean Industries, Simufact, prend comme hypothèse une décroissance linéaire de la vitesse. La vitesse du coulisseau au moment du premier contact avec la pièce est supposée de $0,42 \text{ m.s}^{-1}$ pour toutes les pièces. Ces paramètres de vitesse et décroissance fonctionnent assez bien et une bonne corrélation avec la réalité est observée en termes de fermeture de porosités, de défauts de forge ainsi que de longueur de bavure.

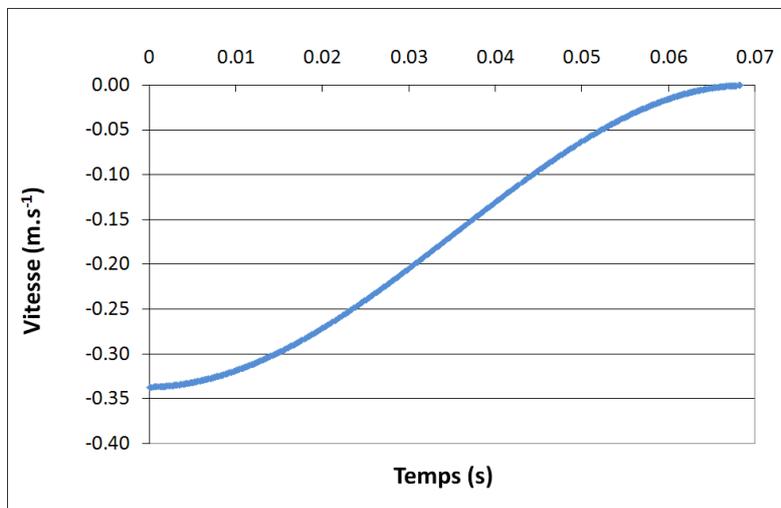
Nous avons cependant voulu mesurer plus en détails ce paramètre. Un moyen assez simple et économique est d'utiliser un accéléromètre placé sur le coulisseau lors de la frappe. En enregistrant sa décélération au cours de l'étape de forge nous pouvons par intégration remonter à l'évolution de la vitesse. Le capteur utilisé était un accéléromètre Kistler de type 8202A10 avec une gamme de mesure de $\pm 2000\text{g}$, une sensibilité de $10,76 \text{ pc/g}$, une sensibilité transversale de $3,3\%$, une fréquence propre de $45,0 \text{ kHz}$ et une plage de température de -70°C à 250°C . L'accéléromètre était ensuite relié à un amplificateur de charge Kistler de type 5011 qui avait pour

réglage, une sensibilité de $1g/V$, soit $9,81 \text{ m.s}^{-2}/V$, un filtre passe bas qui avait pour fréquence de coupure 10Hz et un filtre passe haut qui avait pour temps caractéristique 1s. L'enregistrement s'est ensuite fait sur un PC à l'aide d'une carte d'acquisition.

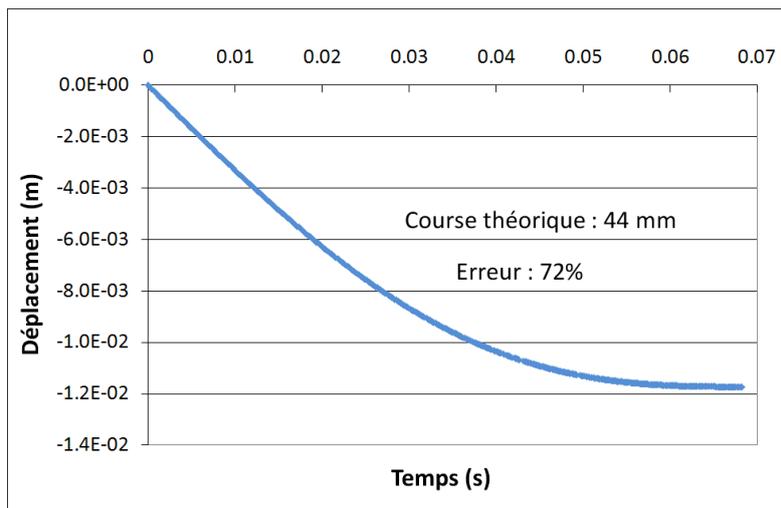
Les essais ont été réalisés sur un grand nombre de pièces différentes. Pour vérifier la précision de notre mesure nous avons intégré la vitesse calculée pour déterminer le déplacement du coulisseau et comparé avec le déplacement réellement observé. L'erreur est souvent très grande sauf dans de rare cas. L'évolution est cependant toujours assez linéaire comme le suggère la base de données de Simufact. Un exemple de résultats obtenus sur une pièce de grande série de Saint-Jean Industries que l'on nommera B8 est présenté sur la figure III.1.



(a)



(b)



(c)

Fig. III.1 – Evolution de la décélération (a), de la vitesse (b) et du déplacement (c) du coulisseau au cours de la frappe du « B8 » (Presse 2400 tonnes T1)

Le déplacement calculé est 4 fois plus faible que celui réellement mesuré. L'erreur est donc trop importante pour avoir une mesure précise de l'évolution de la vitesse. Cette erreur est due en partie à des problèmes d'interférences électromagnétiques. Le capteur et le câble sont blindés mais les champs magnétiques important dans l'usine du fait des fours et des moteurs des presses pouvaient créer des pics que nous devions lisser. Une sensibilité de mesure plus grande nous aurait aussi peut être permis d'être plus précis. Les résultats nous ont néanmoins montré que quelles que soient les pièces, la décroissance était relativement linéaire. Nous pensions qu'elle aurait pu être plus importante en fin de frappe lors de la formation de la bavure mais ce n'est pas le cas. Si nous voulons faire des mesures plus précises dans le futur nous utiliserons probablement une caméra haute vitesse qui est plus chère mais qui comporte l'avantage d'avoir une mesure directe, précise et qui est moins sujette aux bruits électromagnétiques.

Pour les simulations nous avons donc pris comme hypothèse une décroissance linéaire de la vitesse. Nous ne connaissons pas la vitesse au moment du premier impact de façon précise mais les vitesses de déformation sont assez peu dépendantes de celle-ci. En effet, nous avons observé que la majeure partie de la déformation se déroule dans les derniers instant de la frappe lors de la formation de bavure, à cet instant la vitesse du coulisseau est assez faible et changer légèrement la vitesse du premier impact n'entraîne pas de variation significative. Pour la simulation sur pièce réelle, afin de pouvoir comparer l'énergie nécessaire à la frappe, la course du coulisseau est fixée à 47 mm pour toutes les pièces. Nous avons aussi décidé d'appliquer une vitesse du coulisseau qui décroît linéairement sur les 47 mm en 0,2 s comme nous pouvons le voir sur la figure III.2. La course du coulisseau entre le premier contact et la fin de frappe n'est pas identique pour toutes les pièces. En effet, elle est de 44 mm pour le B8, 10 mm pour le lingot et 8 mm pour l'éprouvette de fatigue. L'hypothèse de décroissance linéaire utilisée répond donc aussi à une vitesse d'impact plus faible pour les pièces de plus petites dimensions, comme c'est le cas dans la réalité. Nous avons ainsi comme le souligne la figure III.2, une vitesse d'impact de 0,45 m/s pour le B8, 0,21 m/s pour le lingot et 0,17 m/s pour l'éprouvette de fatigue. Ces vitesses semblent assez satisfaisantes par rapport aux observations faites en production.

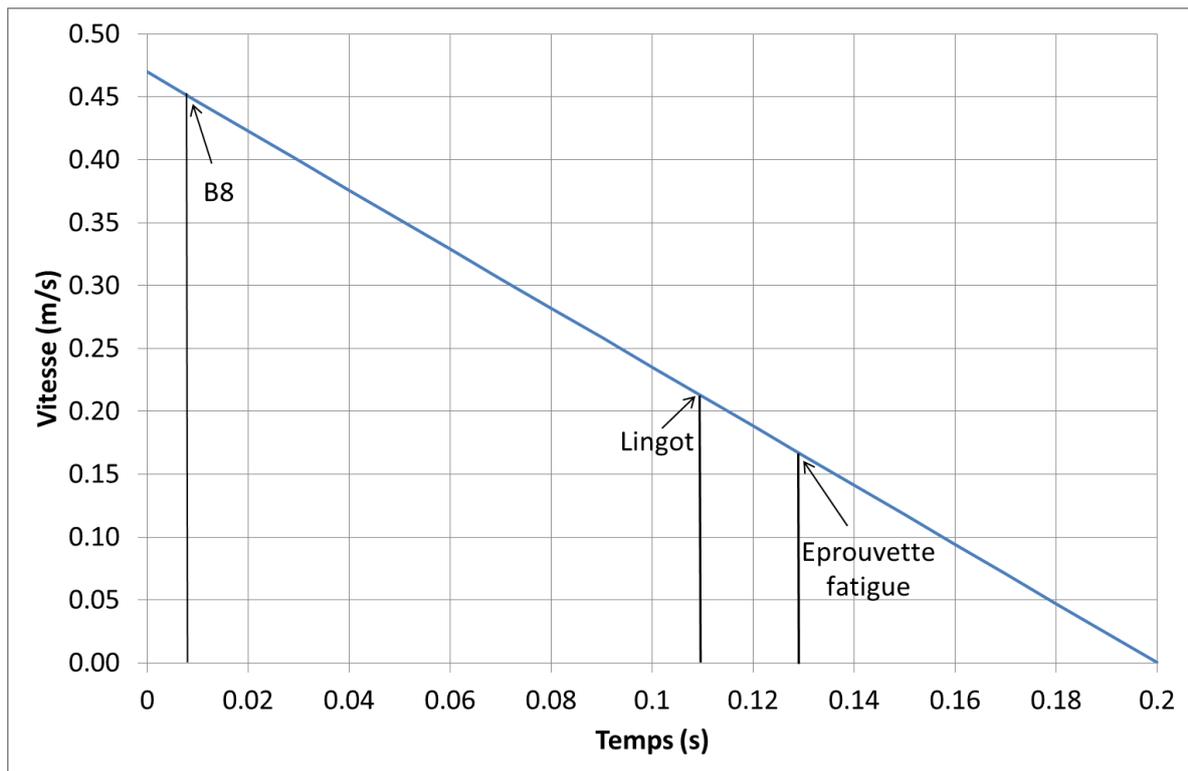


Fig. III.2 – Evolution de la vitesse du coulisseau au cours de la frappe en simulation (les cotes de fermeture des pièces sont atteintes au temps $t = 0,2$ s)

III.2 Conditions thermiques du modèle

Les pièces sont préchauffées à 540°C dans un four tunnel avant la forge. Elles sont ensuite sorties du four puis placées dans la presse avant d'être forgées. Le plus souvent cette étape de transfert est effectuée par un robot et dure entre 5 à 10 s. Les pièces se refroidissent d'environ $0,5^{\circ}\text{C/s}$ à l'air ambiant et des simulations ont montré que la différence entre la température de peau et de cœur est inférieure à 3°C . L'ouverture régulière des portes du four entraîne cependant une légère baisse de température en sortie de four, nous estimons donc et avons pris pour hypothèse une température homogène de 530°C pour les préformes de fonderie avant forge.

Les matrices sont quant à elle à une température homogène de 200°C en début de frappe.

Nous ne nous sommes pas intéressés à l'échange thermique avec l'air ambiant car l'échange est suffisamment court pour pouvoir être négligé. Le coefficient d'échange entre la matrice et la préforme de fonderie est de $5000 \text{ W}\cdot\text{m}^2\cdot\text{K}^{-1}$ (Lenhard A.L. et al., 2006).

Le coefficient de frottement a été fixé à 0,2. Cette valeur est tirée de Simufact et permet de relativement bien corréliser les efforts de frappe ainsi que les longueurs de bavure avec la réalité. Les valeurs couramment utilisées pour une lubrification au graphite sont comprises entre 0,15 et 0,2. De plus, (Lenard J.G., Pietzsch M., 1993) ont montré que la microstructure de surface était

Les résultats obtenus pour une température de 540°C sont présentés figure III.4.

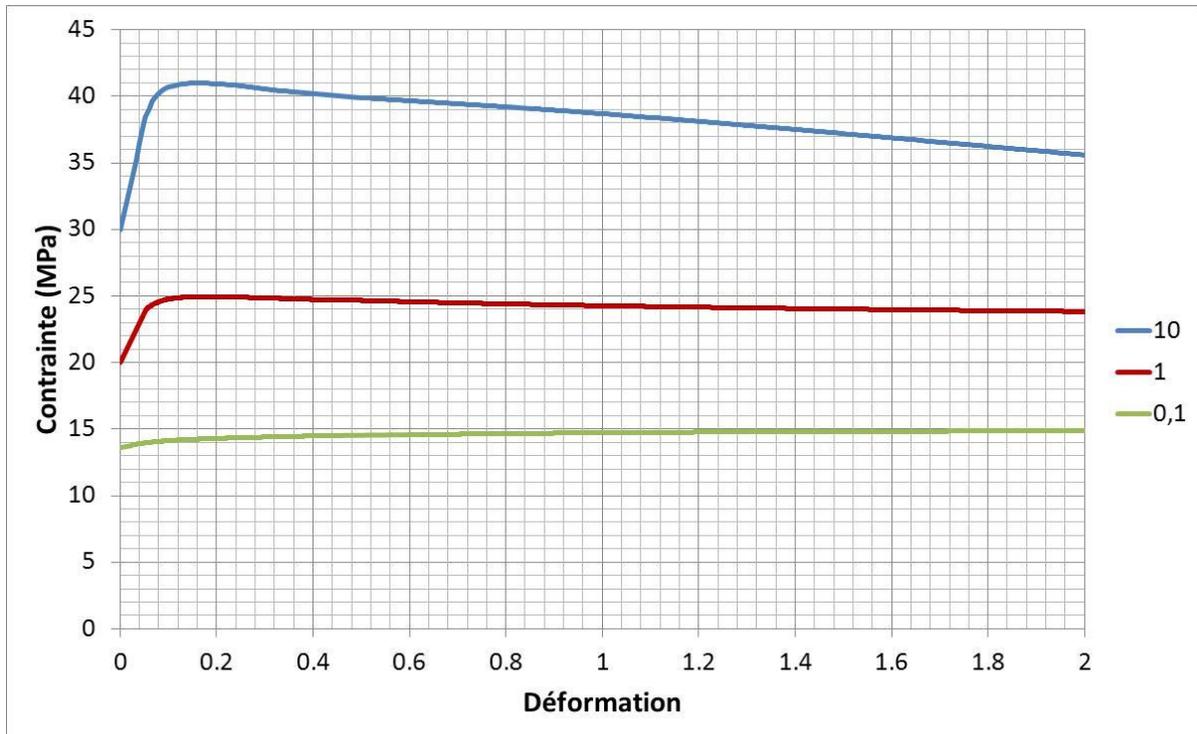


Fig. III.4 – Courbes contrainte déformation de l'AS7G03 pour une température de 540°C et des vitesses de déformations de 10 s⁻¹, 1s⁻¹ et 0,1 s⁻¹

Le module de Young est un autre paramètre important et il est difficile à connaître pour des hautes températures. Des mesures de module de Young à chaud ont donc été effectuées sur un alliage d'aluminium 6060. L'essai a d'abord consisté à usiner une éprouvette plate d'épaisseur 4mm à l'aide du plan suivant dans un barreau de 6060.

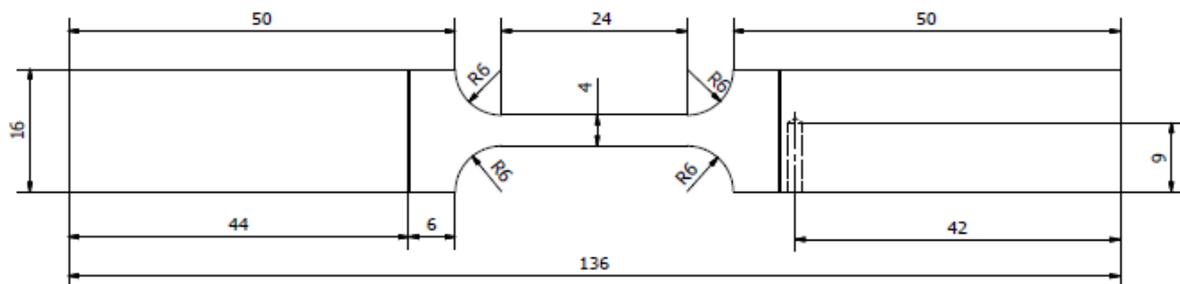


Fig. III.5 – Plan de l'éprouvette de mesure de module de Young en mm

Cette éprouvette a ensuite été montée dans une coque comme le montre la figure III.6. Cette coque est équipée de cartouches de chauffe qui sont asservies grâce à plusieurs thermocouples. Cet asservissement permet d'obtenir une température très homogène dans la partie utile de l'éprouvette.



Fig. III.6 – Photo du montage de mesure de module de Young à chaud

Nous avons fait des mesures pour plusieurs températures jusqu'à 400°C , température maximale du montage et nous avons obtenu les résultats présentés figure III.7. Nous avons pris comme hypothèse, une décroissance linéaire du module de Young avec la température. L'AS7G03 contient des particules de silicium plus rigide il a donc un module de Young légèrement plus élevé. Sa valeur est de 74 GPa à température ambiante, nous avons donc choisi de translater la courbe de l'alliage 6060 de 4 GPa. Nous obtenons donc pour une température de 530°C un module de Young de 48 GPa.

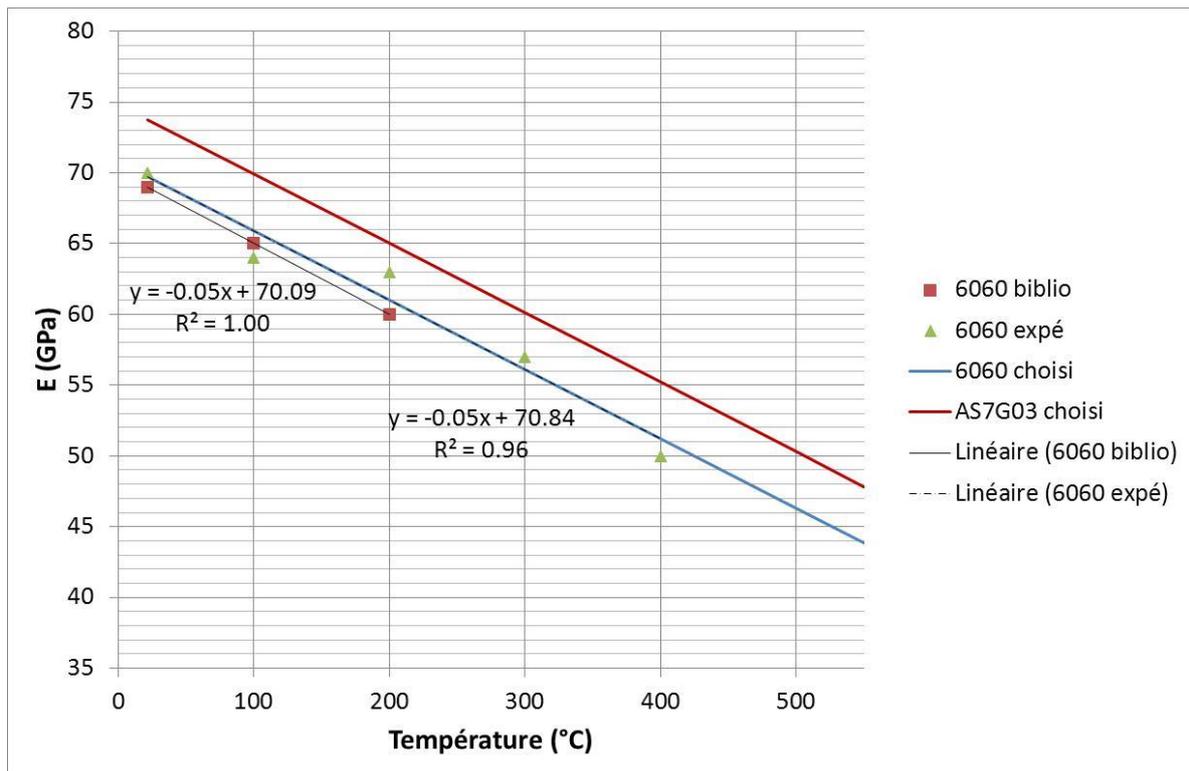


Fig. III.7 – Résultats des mesures et modules de Young choisis pour la simulation pour l’alliage d’aluminium 6060 et l’AS7G03

III.4 Résultats obtenus sur pièce réelle à l’aide du logiciel Simufact

Les simulations de forge sont réalisées à Saint-Jean Industries à l’aide du logiciel Simufact en volume finis pour avoir des temps de calculs acceptables. La figure III.8 montre les résultats des longueurs de bavure obtenues ainsi que la corrélation avec la réalité. La figure III.9 présente quant à elle les résultats de déformation plastique équivalente de Von Mises en fin de frappe dans une section des différentes pièces. La figure III.10 montre enfin les vitesses de déformation au moment où elles sont le plus importantes, lorsque la bavure se forme. Ces résultats montrent tout d’abord qu’une bonne corrélation avec la réalité est obtenue en termes de forme finale et de longueur de bavure. Les efforts de presse ainsi que les défauts de forge tel que les replis ou traces de brut (partie qui n’entre pas en contact avec la matrice) sont aussi bien anticipés grâce à un retour d’expérience important du bureau d’étude. Nous pouvons voir sur les figures III.9 et III.10 que pour les trois pièces différentes le taux de déformation ainsi que la vitesse de déformation ont un niveau plus élevé au cœur de la pièce. Cette zone est appelé le plan de joint, elle correspond à la partie située entre les matrices supérieure et inférieure où la bavure va se former. Cette caractéristique est recherchée pour avoir un taux de déformation suffisant à cœur pour pouvoir refermer les retassures qui sont principalement situées dans cette zone. Les autres parties de la pièce observent tout de même un taux de déformation de l’ordre de 10 à 20%.

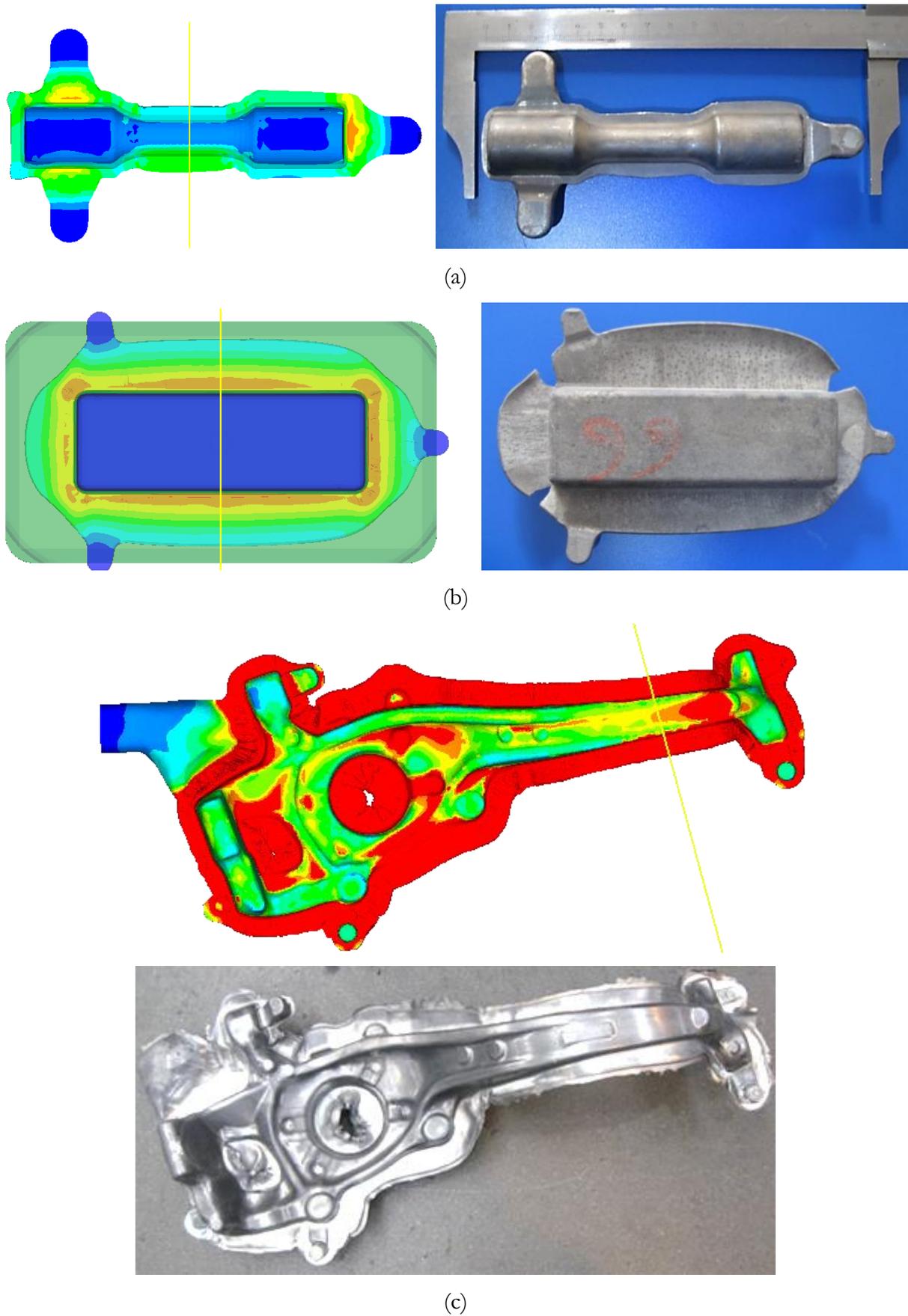


Fig. III.8 – Résultats obtenus après forge avec la simulation numérique sous Simufact et en réalité pour (a) l'éprouvette de fatigue, (b) le lingot et (c) la pièce B8

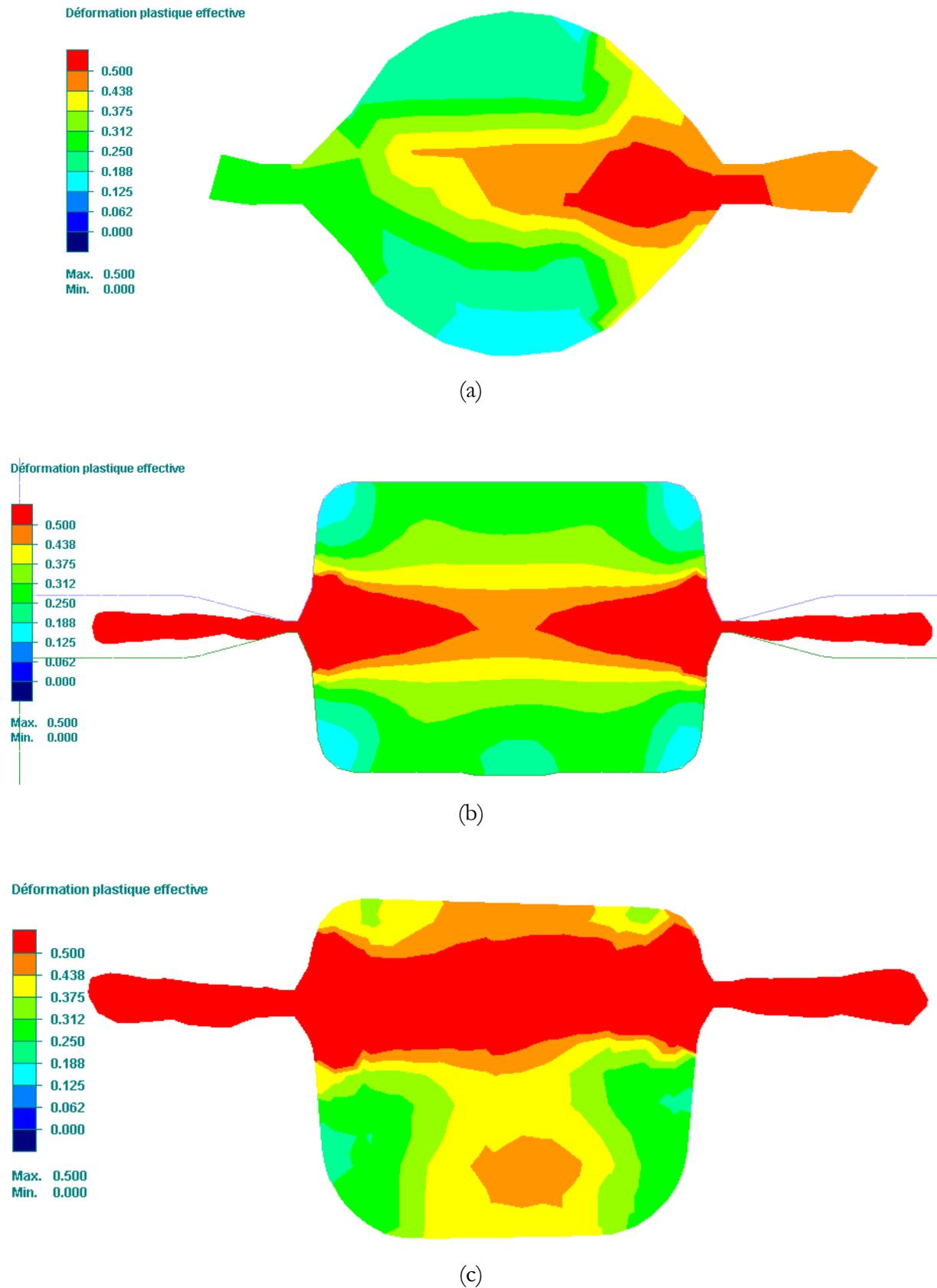


Fig. III.9 – Déformation plastique équivalente de Von Mises en fin de frappe dans une section (a) de l'éprouvette de fatigue, (b) du lingot et (c) du B8, les sections représentées sont tracées sur la figure III.8

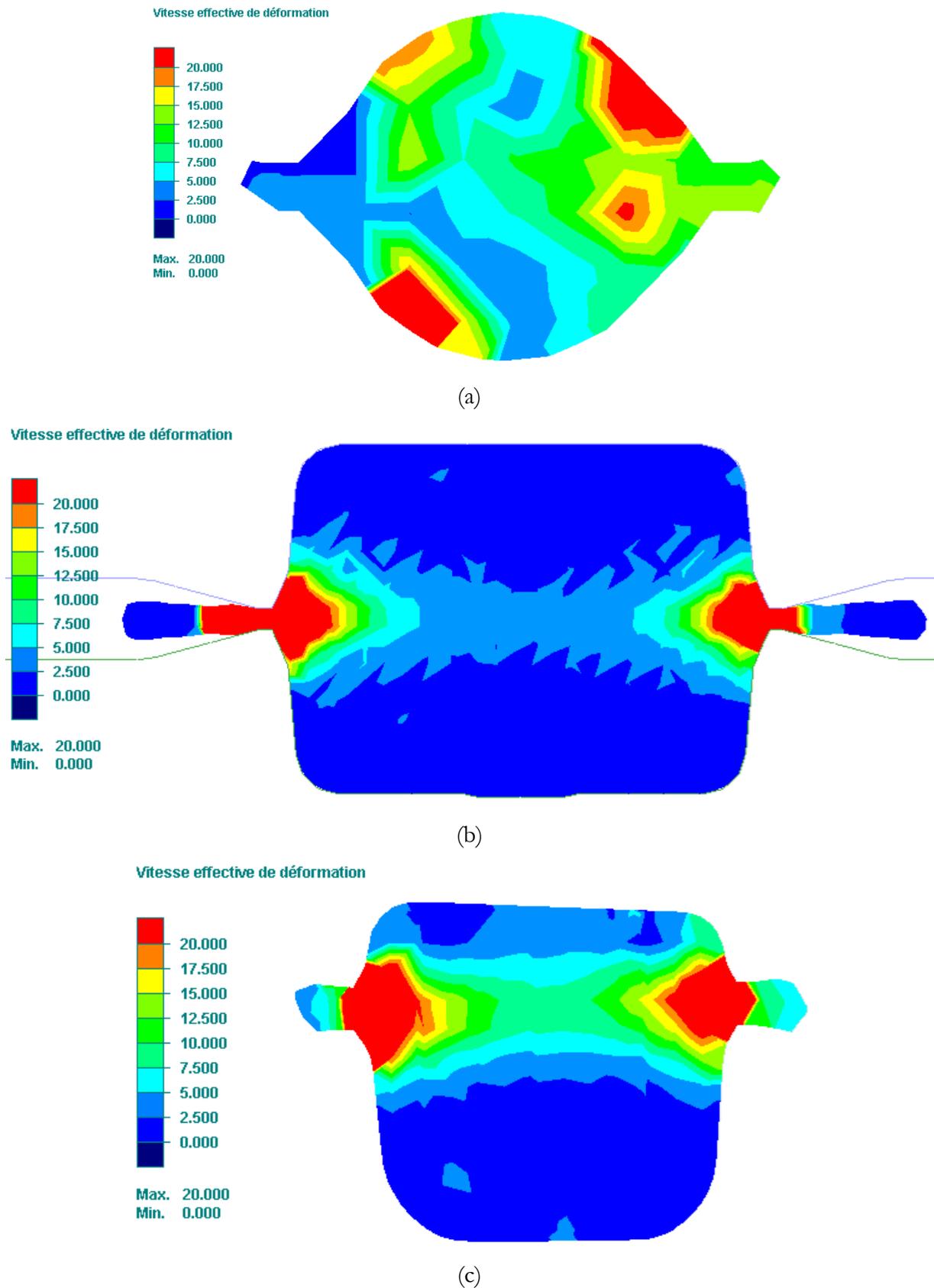


Fig. III.10 – Vitesse de déformation plastique équivalente de Von Mises au moment de la formation de bavure dans une section (a) de l'éprouvette de fatigue, (b) du lingot et (c) du B8, les sections représentées sont tracées sur la figure III.8

III.5 Modèle utilisé sur ABAQUS

Le logiciel de simulation que nous avons utilisé à l'Ecole des Mines est ABAQUS. Ce logiciel a l'avantage de pouvoir modéliser par éléments finis de nombreux phénomènes notamment dans notre cas, un couplage de thermique et de mécanique. Nous avons voulu étudier des phénomènes locaux de manière plus précise grâce à ces simulations. En effet, le logiciel Simufact est un logiciel de simulation par volumes finis et les pièces utilisées pour le calcul sont des pièces complexes en 3D. La précision des résultats ne permet pas de prendre en compte le refroidissement local en peau au cours de la forge ou l'effet de la rugosité de surface sur la déformation locale. Nous avons donc tout d'abord fait une simulation en 2D de la déformation au sein d'une section de l'éprouvette de fatigue. Les résultats de déformation ont été comparés à ceux réalisés à l'aide du logiciel Simufact afin de vérifier la validité de notre modèle. Nous nous sommes ensuite intéressés à la déformation en peau due à la rugosité de surface ainsi qu'au refroidissement créé par le contact avec la matrice qui est à une température inférieure. Pour toutes les simulations nous avons utilisé les mêmes paramètres matériau, conditions thermiques et vitesse de coulisseau que pour les simulations sous Simufact.

III.6 Simulation de la déformation en 2D dans une section de l'éprouvette de fatigue

Nous avons simulé la déformation plastique de l'éprouvette de fatigue dont la forme avant et après forge est présentée sur la figure II.4. Nous avons d'abord tenté de faire les simulations avec le mode Arbitrary Lagrangian Eulerian d'ABAQUS qui permet de faire glisser les nœuds du maillage lorsque celui-ci est trop déformé et ne permet plus une résolution précise du problème. La déformation étant beaucoup trop importante au moment de la formation de la bavure ce mode n'est pas assez efficace pour obtenir un maillage satisfaisant. Il est donc nécessaire de passer par des étapes de remaillage. La stratégie utilisée était d'arrêter la simulation lorsque le maillage devenait trop dégradé comme nous pouvons le voir sur la figure III.12a. La géométrie du modèle était alors récupérée et un nouveau maillage créé. Les résultats de l'étape de simulation précédente en termes de température et déformation étaient alors réintroduits dans le nouveau maillage et le calcul pouvait continuer par une nouvelle étape. Le modèle utilisé est présenté figure III.11 et nous n'avons simulé que la moitié supérieure de l'éprouvette pour minimiser la taille du calcul grâce à la symétrie du problème. Pour la simulation, nous avons utilisé un modèle implicite de couplage thermomécanique appelé Coupled temp-displacement dans ABAQUS. Nous avons utilisé des éléments CPE4T pour le maillage qui sont des éléments 2D

quadrilatéraux de déformation plane couplé thermiquement comportant 4 nœuds. Les conditions aux limites sont une vitesse de déplacement de 0,09 m/s pour la matrice (vitesse de la matrice réelle divisée par 2 du fait de la symétrie) et une vitesse verticale nulle sur le plan de joint de l'éprouvette. La déformation plastique équivalente de Von Mises obtenues en fin de frappe est présentée figure III.12b.

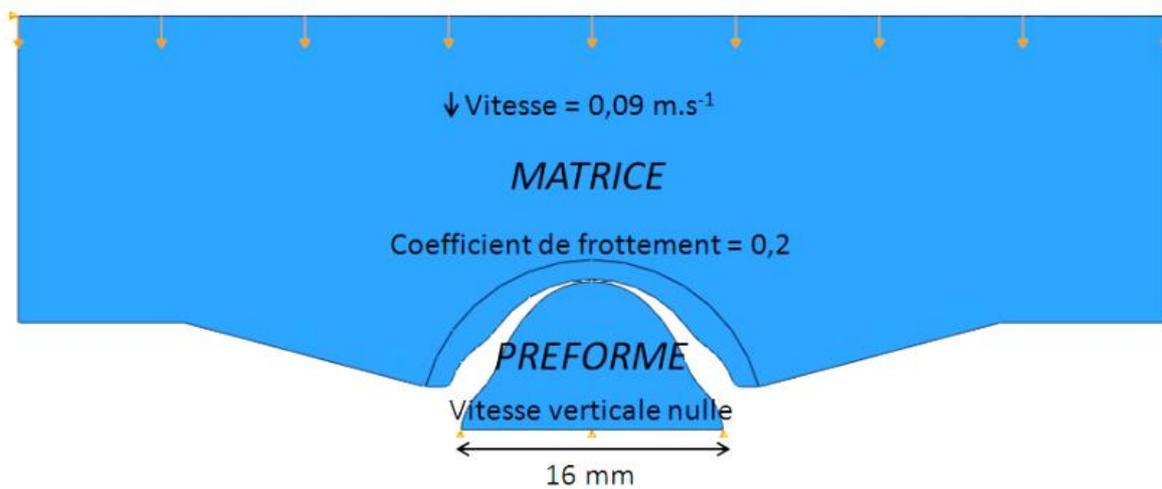
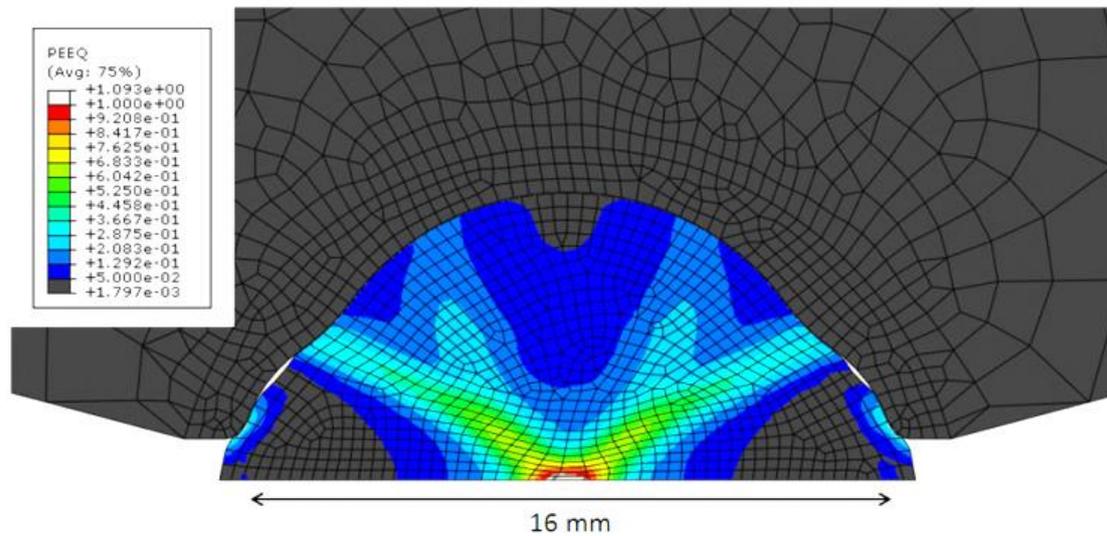
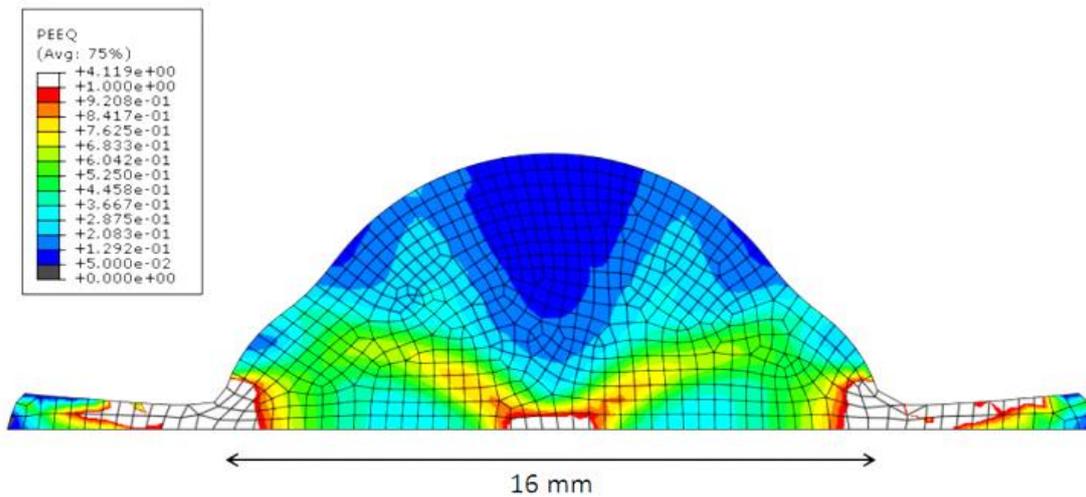


Fig. III.11 – Modèle utilisé pour simuler la déformation plastique au sein d'une section 2D de l'éprouvette de fatigue



(a)



(b)

Fig. III.12 – Déformation plastique équivalente de Von Mises dans une section de l'éprouvette de fatigue (a) au moment du premier remachage (b) en fin de frappe après 9 remachages

Comme pour la simulation sous Simufact, la déformation plastique est majoritairement localisée dans le plan de joints. Cependant, bien que la simulation soit en 2D plutôt qu'en 3D les résultats semblent plus précis sous ABAQUS. Nous pouvons ainsi observer nettement le phénomène de croix du forgeron avec une déformation localisée à cœur sous forme de croix. Un autre résultat intéressant est la très faible déformation subie par la zone extérieure au plan de joints où elle est inférieure à 10%. Simufact anticipait quant à lui une déformation de l'ordre de 20%. Cette différence peut s'expliquer par un maillage plus grossier et par le fait que dans une simulation par volume finis le matériau ne semble pas totalement incompressible, de légères erreurs sur le taux de déformation sont donc possible du fait de cette imperfection du modèle.

III.7 Influence de la rugosité de surface sur la déformation en peau

Pour cette partie, nous avons tout d'abord effectué un relevé du profil d'une surface avant forge et d'une surface après forge, le long d'une ligne, grâce à un profilomètre Perthometer M2 de marque MAHR. Les profils obtenus sont présentés sur la figure III.13. Nous pouvons voir une nette différence de rugosité entre les deux surfaces. En effet, les pièces sont coulées dans des moules de fonderie qui contiennent un poteyage avec une certaine rugosité. Les pièces cobapressées ont subi une étape de forge dans des matrices polies qui ont une très faible rugosité et qui permettent d'obtenir des pièces avec un très bon état de surface. Cette différence de profil va entraîner une déformation en surface difficile à modéliser sur une pièce réelle du fait d'un maillage trop grossier. Nous avons donc décidé de réaliser une simulation sur une zone de peau de 10 mm de côté. Le modèle est présenté figure III.14. Tous les paramètres du matériau et d'interaction matrice-préforme sont les mêmes que dans les simulations précédentes. Nous avons pris comme hypothèse de conditions aux limites d'appliquer une pression isostatique sur les trois faces libres du morceau de préforme. La valeur de cette pression est tirée des simulations de forge sur pièce (réalisée grâce à Simufact). Cette pression vaut par exemple 35 MPa pour l'éprouvette de fatigue et 70 MPa pour le lingot et le B8 au cours de la frappe. Elle monte fortement jusqu'à un niveau de 200 à 300 MPa en fin de frappe, au moment de la formation de la bavure. A cet instant, la pièce est bien positionnée dans la matrice et aucun déplacement ne se produit entre la préforme et l'outil. La majorité de la déformation est localisée dans le plan de joint et la peau est par conséquent peu cisailée. Nous avons donc choisi de ne pas simuler la fin de frappe pour ce modèle avec rugosité. Nous supposons ainsi que la surface va se déformer jusqu'à ce que le contact matrice-préforme soit suffisant pour permettre une distribution de l'effort dans le reste de la pièce. La pression isostatique passe donc de 0 à 35 MPa en 0,001 s pour un premier cas et de 0 à 70 MPa dans un deuxième cas. Ces conditions aux limites imposent d'utiliser un modèle explicite. En effet, le fait d'imposer un effort rapidement en début de simulation rendait très difficile une convergence du calcul pour le premier pas de temps avec un modèle implicite. Nous avons donc utilisé le mode Dynamic, couplé temp-disp, explicite d'ABAQUS pour réaliser cette modélisation. Les éléments utilisés sont des CPE4RT, ils sont semblables aux éléments CPE4T mais ne comporte qu'un seul point d'intégration au lieu de 4 par éléments. Ces éléments sont utilisés pour le modèle explicite d'ABAQUS.

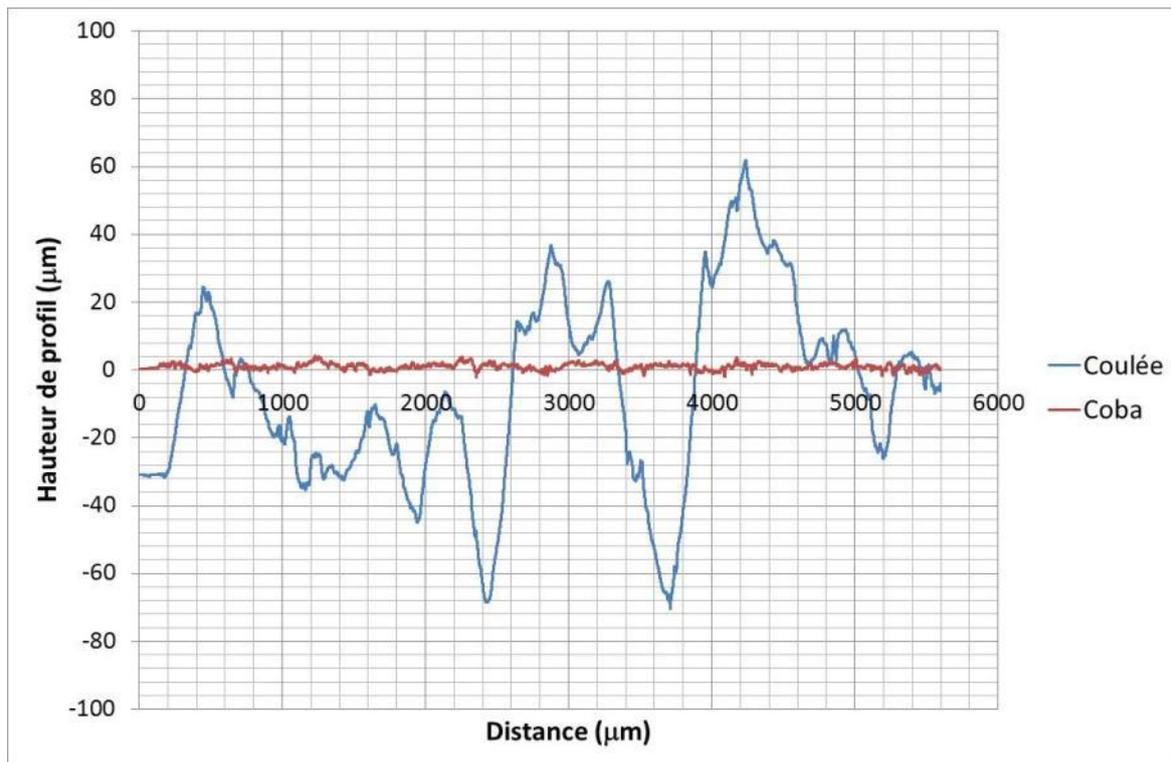


Fig. III.13 – Profil de la surface d'une pièce avant forge en bleue et après forge en rouge

La figure III.14 représente les modèles utilisés pour simuler la déformation en peau à l'aide d'un morceau de matrice et de préforme. Nous pouvons y voir les conditions aux limites avec une vitesse de déplacement de la matrice de $0,2 \text{ m.s}^{-1}$ et une pression sur les trois faces libres de la partie de la préforme. Le transfert thermique n'est pas pris en compte dans cette simulation. La température de la préforme est donc prise constante à 530°C . Comme évoqué précédemment le coefficient de friction utilisé est de 0,2. Deux modèles ont été utilisés pour les deux pressions de 35 et 70 MPa. Dans un premier temps, nous avons pris comme hypothèse qu'un élément de matière en surface ne se déplaçait pas latéralement (figure III.14a). Cependant, lors de la frappe, la peau des pièces peut glisser contre la matrice pour trouver sa position d'équilibre. Nous avons donc réalisé dans un second temps une modélisation qui utilisait les mêmes paramètres que la précédente, excepté une vitesse de déplacement latérale de $0,2 \text{ m.s}^{-1}$ (figure III.14b). Cette vitesse est assez élevée et nous avons pris un temps de simulation de 0,05 s afin que l'élément de matière se déplace de 1 cm, ce qui semble comparable à la réalité. Les résultats obtenus pour une vitesse latérale nulle sont présentés figure III.15, alors que la figure III.16 expose ceux correspondant à une vitesse latérale de $0,2 \text{ m.s}^{-1}$.

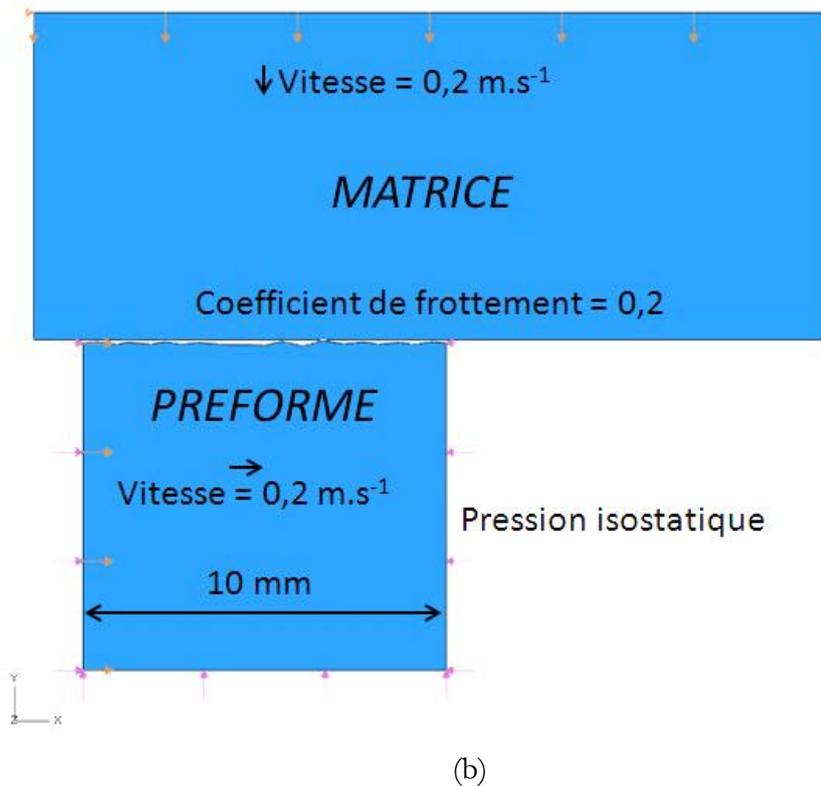
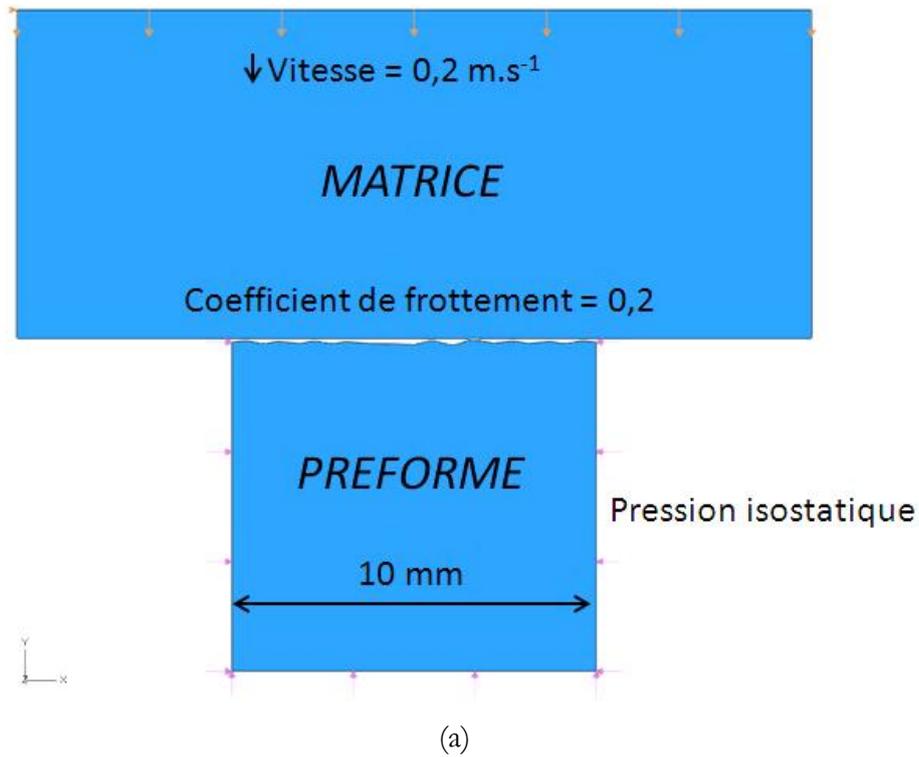
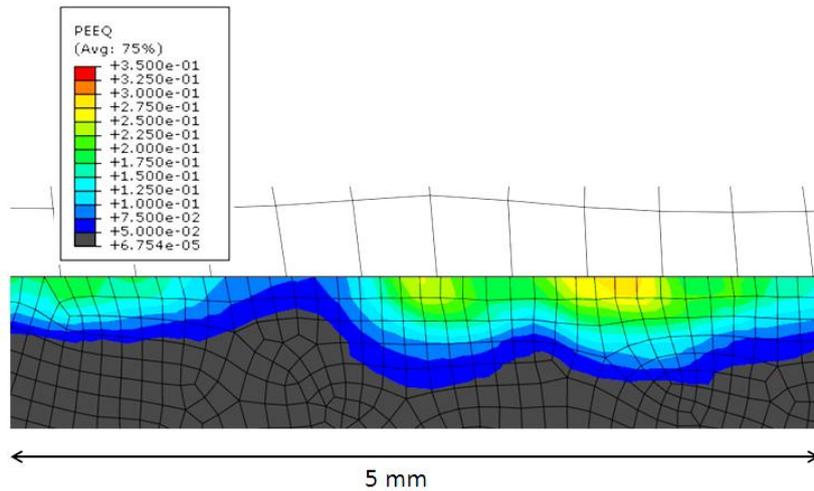
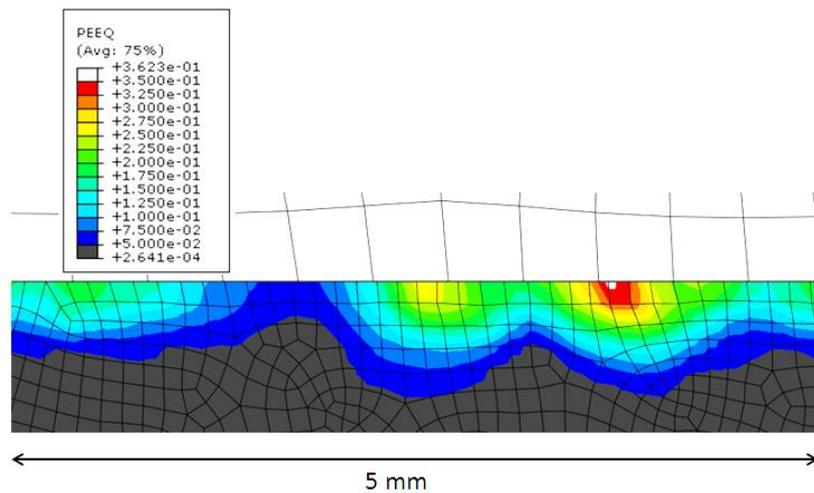


Fig. III.14 – Modèles utilisés pour simuler la déformation de surface due à la rugosité (a) avec une vitesse latérale nulle, (b) avec une vitesse latérale de $0,2 \text{ m.s}^{-1}$



(a)



(b)

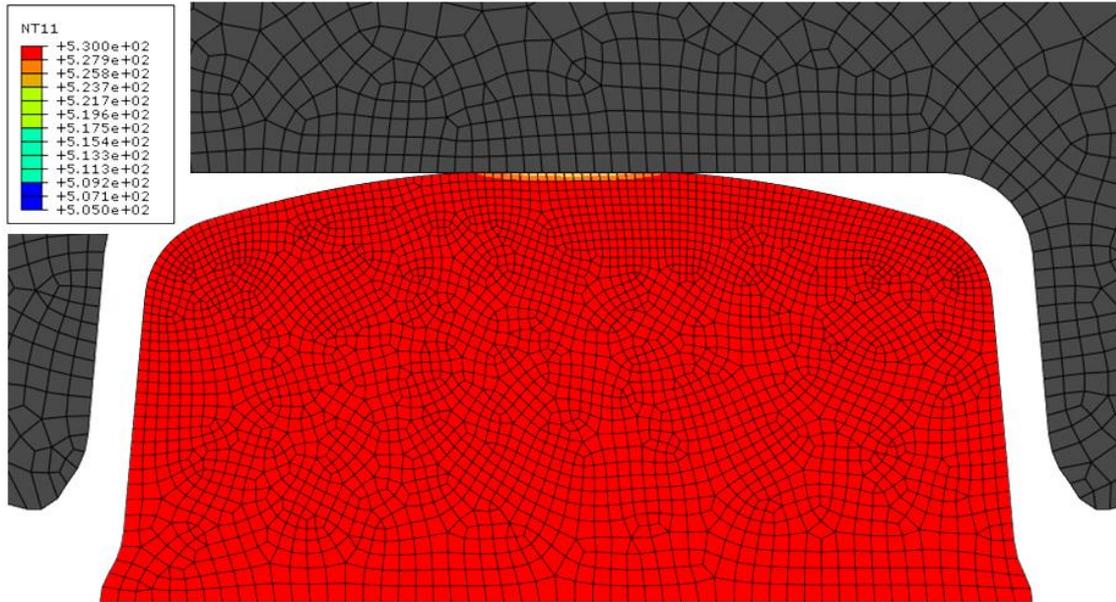
Fig. III.16 – Déformation équivalente de Von Mises en surface avec un profil de rugosité de surface réel avec une vitesse latérale de $0,2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (a) après déformation pour une pression de 35 MPa, (b) après déformation pour une pression de 70 MPa

Nous pouvons voir sur la figure III.15 que la rugosité de surface peut entraîner une déformation en surface non négligeable. Celle-ci se cumule avec la déformation simulée sur la pièce réelle dans la partie précédente, nous pouvons donc atteindre des taux de déformation de 60% dans certaines zones et la profondeur affectée est de l'ordre de $500 \mu\text{m}$. Cette déformation va engendrer une microstructure et des propriétés mécaniques spécifiques qui sont détaillées dans les chapitres suivants. Les résultats sont assez proches pour une pression de 35 et de 70 MPa. La déformation locale s'arrêtant lorsque les deux surfaces sont en contact il suffit que la pression soit suffisante pour déformer la rugosité mais une pression supérieure n'a pas d'effet. Elle joue

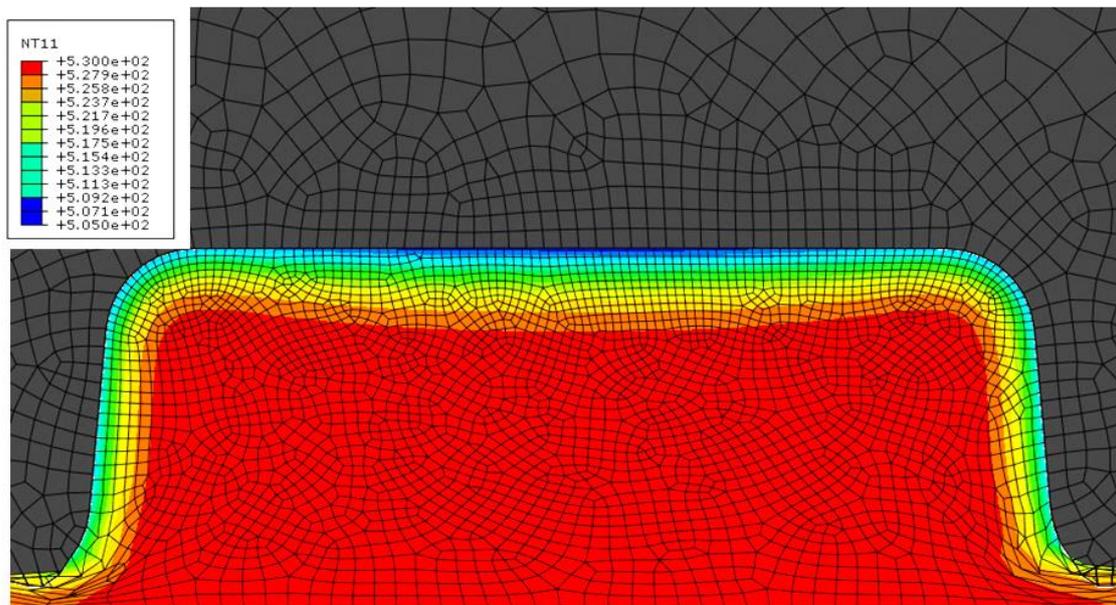
cependant un rôle lorsque l'élément de matière se déplace latéralement, comme on peut le voir sur la figure III.16. Le frottement préforme-matrice a un effet visible avec une déformation en peau légèrement supérieure. Certaines zones peu déformées passent de 1% à environ 7% de déformation. Cet impact est cependant limité et ne semble pas prépondérant pour la déformation en peau.

III.8 Simulation du refroidissement en peau au cours de la forge

La matrice étant à une température inférieure à la préforme (200°C) celle-ci refroidit localement la peau de la préforme au cours de la déformation. Une simulation en 2D de la frappe du lingot avec un maillage raffiné en surface a donc été effectuée pour voir si cette chute de température était suffisante pour avoir une influence sur l'évolution de microstructure de la peau au cours de la forge. Nous avons utilisé le modèle implicite et les éléments utilisés sont de nouveau les CPE4T. Les conditions initiales sont une température homogène de 530°C pour la préforme et de 200°C pour la matrice qui se déplace à une vitesse verticale de 0,1 m.s⁻¹ avec une décroissance linéaire sur la durée de la simulation soit 0,09 s. Le coefficient d'échange thermique entre la matrice et la préforme passe linéairement de 0 pour une pression de contact nulle à 6000 W.m⁻².K⁻¹ pour une pression de contact de 35 MPa. Une simulation a été effectuée pour un coefficient de 5000 W.m⁻².K⁻¹ mais peu de différences ont été observées. Les résultats sont exposés figure III.17. La figure III.17a montre la distribution de température dans la préforme 4ms après le premier contact avec la matrice. A cet instant, la rugosité de peau a été totalement déformée et nous pouvons voir que la température locale n'a baissé que de 3°C. Nous pouvons donc considérer que le refroidissement n'a pas d'impact sur la microstructure au premier contact avec la matrice. La distribution de température dans la préforme en fin de frappe est présentée figure III.17b. La profondeur affectée thermiquement est d'environ 5 mm en fin de frappe et la température minimum est de 505°C sur la face supérieure du lingot. Ce refroidissement doit donc avoir un léger effet sur l'évolution de la microstructure avec une sous-structuration un peu plus marquée mais la différence n'est pas très importante (environ 25°C) et la majeure partie de la déformation en peau se déroule avant que la température n'ait chuté de manière sensible (>100°C).



(a)



(b)

Fig. III.17 – Distribution de température au sein du lingot (a) après 4 ms de contact avec la matrice et (b) après 90 ms (fin de frappe)

III.9 Conclusion

En conclusion, ce chapitre nous a permis de mieux comprendre l'histoire thermomécanique des pièces au cours de l'étape de forge du procédé COBAPRESSTM. Nous nous sommes efforcés de trouver des paramètres qui correspondaient le mieux à la réalité (température, propriétés des matériaux, vitesse de coulisseau...). Les modélisations sous Simufact sont moins précises que celle réalisées sur ABAQUS cependant elles permettent de simuler la forge des pièces en 3D et de pouvoir observer la formation de bavure, les taux et vitesse de déformation. Nous avons vu que la majeure partie de la déformation se situait dans le plan de joint. Cependant, nous avons pu observer les phénomènes locaux en sous-surface des pièces. Cette peau subit une déformation locale supplémentaire due à la rugosité de surface de la préforme de fonderie qui peut atteindre 35%. Le refroidissement local est quant à lui limité mais peut avoir un léger effet sur l'évolution de microstructure.