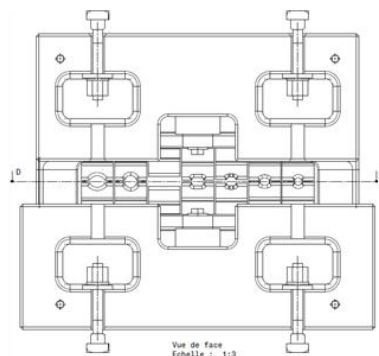
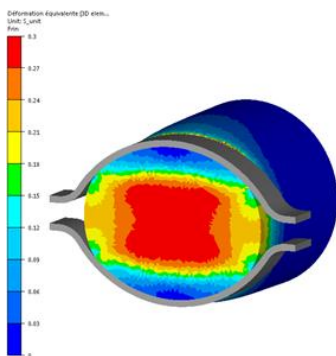


Essai de forgeage représentatif du procédé de laminage



Résumé :

Le chapitre 3 présente la stratégie employée pour mettre en œuvre un essai de forgeage expérimental à l'échelle laboratoire représentatif des sollicitations thermomécaniques subies dans la barre lors du laminage. Plusieurs essais sont étudiés et les résultats sont comparés à ceux relevés dans la barre laminée afin de n'en retenir qu'un seul. Une fois l'essai retenu, l'outillage est conçu et fabriqué pour réaliser les premiers essais sous la presse hydraulique. La robotisation du forgeage et le prélèvement de frette permettent de remédier aux problèmes thermiques rencontrés lors de ces premiers essais.

SOMMAIRE

3.1 Choix d'un essai de forgeage représentatif du laminage.....	157
3.1.1 Cahier des charges de l'essai.....	157
3.1.2 Choix de l'essai	157
3.2 Modélisation de l'essai de forgeage retenu	159
3.2.1 Mise en données de l'essai	159
3.2.2 Résultats de la simulation et comparaison avec le laminage.....	161
3.3 Mise en œuvre de l'essai de forgeage	176
3.3.1 Conception, fabrication et contrôle dimensionnel de l'outillage.....	176
3.3.2 Validation expérimentale de l'essai	177
3.4 Validation expérimentale du mode opératoire	183
3.4.1 Robotiser l'opération de forgeage.....	187
3.4.2 Valider l'opération de frettage	190
3.5 Conclusions.....	198
Références bibliographiques	200

3.1 Choix d'un essai de forgeage représentatif du laminage

3.1.1 Cahier des charges de l'essai

L'essai de forgeage mis en œuvre doit être représentatif des sollicitations thermomécaniques subies dans la barre lors du laminage. Pour étudier le couplage thermomécanique sur l'évolution des défauts lors du laminage il est nécessaire de réaliser l'essai dans des conditions similaires à celles rencontrées sur le laminoir. La température, le taux de déformation, la pression hydrostatique et la vitesse de déformation sont des paramètres clés sur la santé interne des produits. Lors du laminage la température initiale de la barre se trouve aux alentours de 1200°C et il est important de reproduire le cycle thermique du laminage lors de l'essai. Le taux de déformation appliqué à chaque passe de laminage est d'environ 20% et dépend de la levée entre les cylindres. La descente de laminage étudiée présente une alternance des directions de déformation. Ce phénomène, dû à l'alternance horizontal – vertical des axes de rotation des cylindres, peut avoir une forte influence sur l'évolution des défauts et il est donc nécessaire de le prendre en compte dans le développement de l'essai. Pour résumer, les caractéristiques principales de l'essai sont de reproduire :

- un chemin thermique similaire à celui de la barre laminée
- des amplitudes de déformation principale et des vitesses de déformation proches de celles rencontrées dans la barre laminée après chaque cage
- l'alternance des directions de laminage

L'essai ne sera pas forcément en mesure de respecter strictement ces trois conditions. Le partenariat entre le centre de recherche ACM et l'ENSAM permet d'avoir à disposition des fours et des machines pour réaliser cet essai. Plusieurs fours équipent l'atelier de l'ENSAM dont le four NABERTHERM qui à une température maximale d'utilisation de 1250°C. Les machines disponibles sont une presse hydraulique, une presse à vis ou encore une presse mécanique. La capacité de la presse hydraulique est de 600t. Cette technologie de presse est pilotée en effort et la vitesse de descente du coulisseau est constante à 30mm/s. L'effort maximal développé par la presse mécanique est de 50t et c'est la distance parcourue, avec un profil sinusoïdal, par le coulisseau qui est pilotée. Quant à la presse à vis, elle est pilotée en énergie et sa capacité maximale est de 31,5kJ. Un bras manipulateur équipe également l'atelier afin de robotiser les opérations de forgeage si nécessaire.

3.1.2 Choix de l'essai

Dans un premier temps sept essais ont été identifiés comme potentiellement représentatifs du laminage. L'essai mis en œuvre doit nous permettre de reproduire les sollicitations thermomécaniques subies dans la barre au cours du laminage pour comprendre l'évolution morphologique des inclusions. Il est possible de les classer en deux catégories : les

essais permettant de reproduire l'alternance des déformations comme en laminage et ceux ne le permettant pas. Ces derniers permettent cependant de reproduire des niveaux de déformations comparables au laminage pour chaque cage séparément. Les essais, réalisés à chaud, sont détaillés dans l'Annexe 4 afin de comprendre leur principe.

Parmi les essais permettant de reproduire l'alternance des déformations se trouve :

- L'essai de forgeage libre avec des matrices de formes
- L'essai de forgeage libre entre tas plats
- L'essai en faisant passer le lopin à travers deux cylindres ayant une rotation libre

Les essais reproduisant les déformations pour chaque cage séparément sont :

- L'essai de bi-poinçonnement sur un lopin de section carrée
- L'essai de bi-poinçonnement sur un lopin de section cylindrique
- L'essai de compression avec le dilatomètre
- L'essai de compression sous presse

Une première étude qu'on peut assimiler à une analyse fonctionnelle est réalisée pour déterminer quel essai répond au mieux au cahier des charges établi. Pour ce faire les divers essais sont simulés afin de suivre les sollicitations thermomécaniques dans le lopin au cours du forgeage. La mise en données des essais est présentée dans l'Annexe 4. Les points importants que doit respecter l'essai sont de reproduire des déformations principales (ϵ_{xx} , ϵ_{yy} , ϵ_{zz}) et un cycle thermique (T°) représentatifs du laminage ainsi que l'alternance des directions de mise en forme. Le choix d'étudier ces paramètres vient du fait qu'ils ont une forte influence sur le comportement des défauts présents dans les produits coulés. Les premiers résultats présentés dans l'Annexe 4 montrent que trois essais peuvent répondre soit totalement ou en partie au cahier des charges. Seul l'essai de forgeage libre avec des matrices de formes remplit les trois conditions énumérées précédemment. Cependant le bi-poinçonnement et l'essai de compression avec le dilatomètre permettent de reproduire des déformations proches de celles subies dans la barre en laminage mais pas l'alternance de la mise en forme. Ces deux essais pourraient être utilisés pour réaliser une étude paramétrique sur le comportement des défauts. L'essai retenu pour la suite de l'étude est celui de forgeage libre avec des matrices de formes.

Cet essai utilise des matrices qui ont comme empreinte la forme des gravures des cylindres du laminoir. Le lopin cylindrique est déformé entre les deux matrices à l'aide d'une presse. La section du lopin obtenu après forgeage est similaire à celle de la barre issue de la ligne LUNA mais à une échelle réduite. Cet essai permet de représenter toutes les cages composant le laminoir en tenant compte de l'alternance des directions de déformation. La Figure 123 illustre le principe de l'essai de forgeage libre avec des matrices de formes.

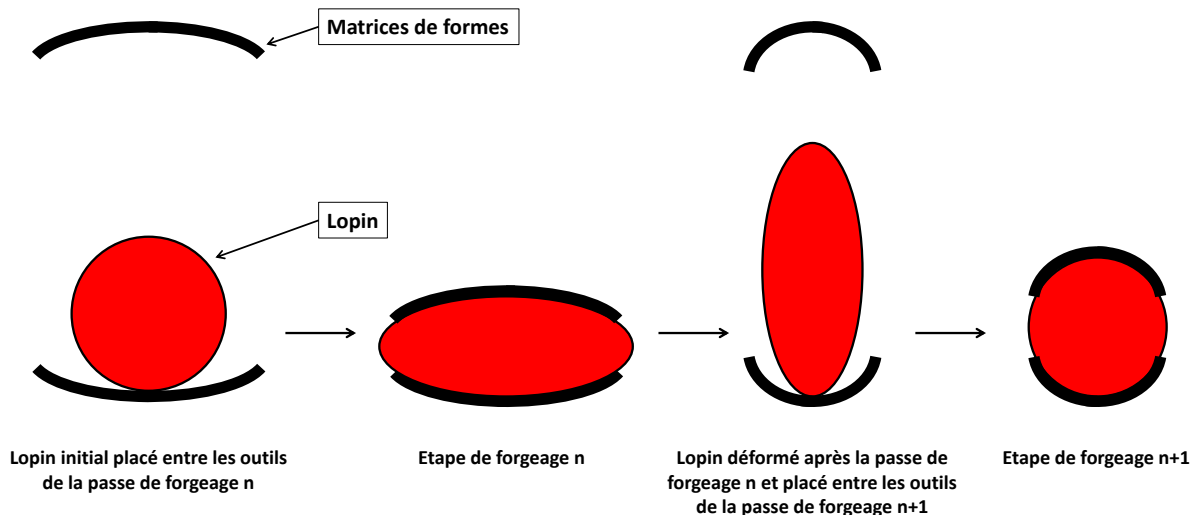


Figure 123 : Illustration de l'essai de forgeage libre avec des matrices de formes

3.2 Modélisation de l'essai de forgeage retenu

3.2.1 Mise en données de l'essai

Dans la partie précédente il est montré que l'essai de forgeage libre avec des matrices de forme est le plus représentatif du procédé de laminage pour les trois premières cages. Les passes de forgeage représentant les cages de laminage de OA à 13 sont modélisées avec le logiciel Forge.NxT® afin de connaître la représentativité de l'essai. En plus des grandeurs étudiées pour réaliser le choix de l'essai, d'autres sollicitations seront analysées comme la pression hydrostatique et la vitesse de déformation qui font parties des paramètres clés pour obtenir des produits laminés avec une santé interne de qualité.

La loi de HANSEL-SPITTEL modélise l'écoulement de la matière lors de la mise en forme du lopin. Le modèle de COULOMB limité TRESKA modélise le frottement à l'interface lopin-outils. Les échanges thermiques par conduction, convection et rayonnement sont pris en compte. Il en est de même pour l'échauffement à l'interface lopin-outils causé par le frottement. Les valeurs des coefficients retenus dans le modèle de l'essai sont identiques à celles du modèle de LUNA, mis à part pour les échanges thermiques dont la valeur est de $2000\text{W/m}^2\cdot^\circ\text{C}$ pour l'essai, contre $20000\text{W/m}^2\cdot^\circ\text{C}$ en laminage. L'explication vient du fait qu'en forgeage l'outillage est chauffé. Les valeurs des divers coefficients sont mentionnées dans le Tableau 19.

Tableau 19 : Valeurs des coefficients intervenant dans la simulation de l'essai de forgeage libre avec des matrices de formes

Coefficients thermomécaniques	Valeur du coefficient
Coefficient de frottement	0,8
Effusivité des cylindres [b en J.K-1.m-2.s-1/2]	11763
Conduction [α en W/m ² .°C]	2000
Convection [h en W/m ² .°C]	10
Rayonnement [ϵ sans unité]	0,88

Le lopin simulé a un diamètre de 27mm et une longueur de 50mm. Le diamètre du lopin est à l'échelle 1/10 du bloom laminé dans le laminage LUNA. La température initiale du lopin est homogène à 1200°C. Les données d'entrée du modèle et les levées entre les matrices sont recensées respectivement dans le Tableau 20 et le Tableau 21.

La partie active de chaque matrice représentant une passe de forgeage possède la forme de la gravure du cylindre composant la cage de laminage étudiée. Les levées entre les matrices sont égales au dixième des levées utilisées entre les cylindres de laminage. La vitesse de descente du coulisseau de la presse est de 30mm/s et les temps d'attente entre chaque passe sont pris en compte car cela influe sur la thermique du lopin. Les outils sont considérés comme des solides rigides, c'est-à-dire qu'ils ne subissent aucune déformation et que leur température reste constante bien qu'il y ait un transfert de chaleur avec l'objet déformable. La moitié du lopin et la moitié des outils sont représentés afin de réduire les temps de calculs. Ces derniers sont également optimisés en chainant numériquement les opérations de forgeage à l'aide des transitions présentes dans le logiciel de simulation numérique.

Tableau 20 : Données d'entrée de l'essai de forgeage libre avec des matrices de formes représentant la totalité des cages du laminage

Paramètres	Lopin	Outils
Section initiale	Ø27mm	Gravure des cylindres de LUNA
Température	1200°C	Entre 65 et 90°C
Matériau	41Cr4	-
Longueur	50mm	-

Tableau 21 : Levées nominales entre les matrices pour simuler l'essai de forgeage avec des matrices de formes

N° Cage	OA	OB	1	2	3	4	5	6
Levée LUNA (mm)	25	25	190	39	53	12	21	12
Levée essai forgeage (mm)	2,5	2,5	19	3,9	5,3	1,2	2,1	1,2

N° Cage	7	8	9	10	11	12	13
Levée LUNA (mm)	12	10	5	11	9	9	7
Levée essai forgeage (mm)	1,2	1	0,5	1,1	0,9	0,9	0,7

Lors de la simulation de l'essai trois capteurs sont placés dans la section du lopin afin de comparer les résultats à ceux de la ligne LUNA. Ces capteurs permettent de suivre les données de sorties comme la température, les déformations, les contraintes au cours de la mise en forme. Comme le montre la Figure 124, les capteurs placés dans la section du lopin forgé se trouvent dans les mêmes zones que ceux positionnés dans la barre simulée dans le laminoir.

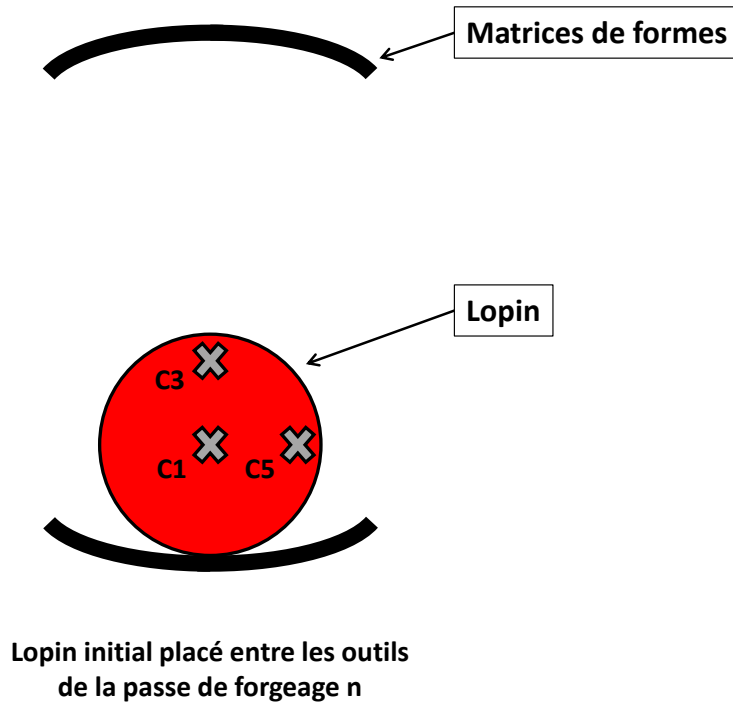


Figure 124 : Positionnement des capteurs dans la section du lopin forgé

3.2.2 Résultats de la simulation et comparaison avec le laminage

Seules les amplitudes des grandeurs relevées dans la barre laminée et dans le lopin forgé sont comparées. En effet le chemin thermomécanique subi dans le lopin n'est pas analysé. Pour la barre laminée et le lopin forgé les données de sortie comparées sont numériques. Les grandeurs analysées sont représentatives du laminage sur une largeur d'environ 6 mm au centre du lopin. Cette zone est illustrée sur la Figure 125.

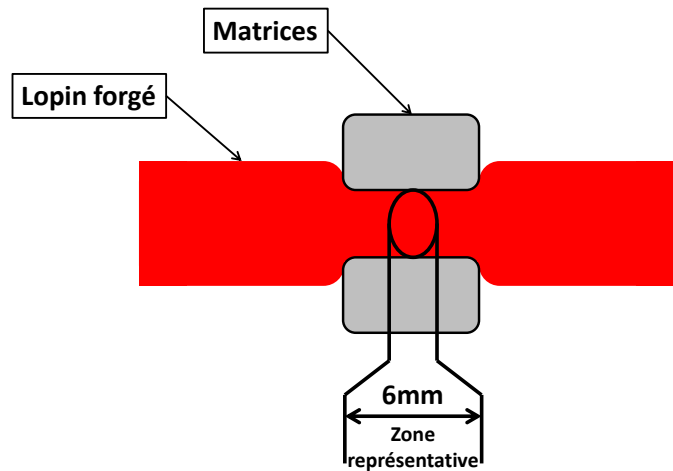


Figure 125 : Illustration de la zone dans le lopin forgé représentative du laminage

La Figure 126 montre le chemin thermique relevée par le capteur 1 au cours du temps dans les deux produits mis en forme par laminage et forgeage. Les températures relevées dans la barre laminée et le lopin forgé avec l'essai de forgeage libre sont respectivement représentées par les traits de couleur bleu et noir. L'évolution de la température n'est pas identique au sein des deux produits mis en forme. Les amplitudes des températures sont tracées pour les deux cas pour ensuite être comparées afin de vérifier la représentativité de l'essai.

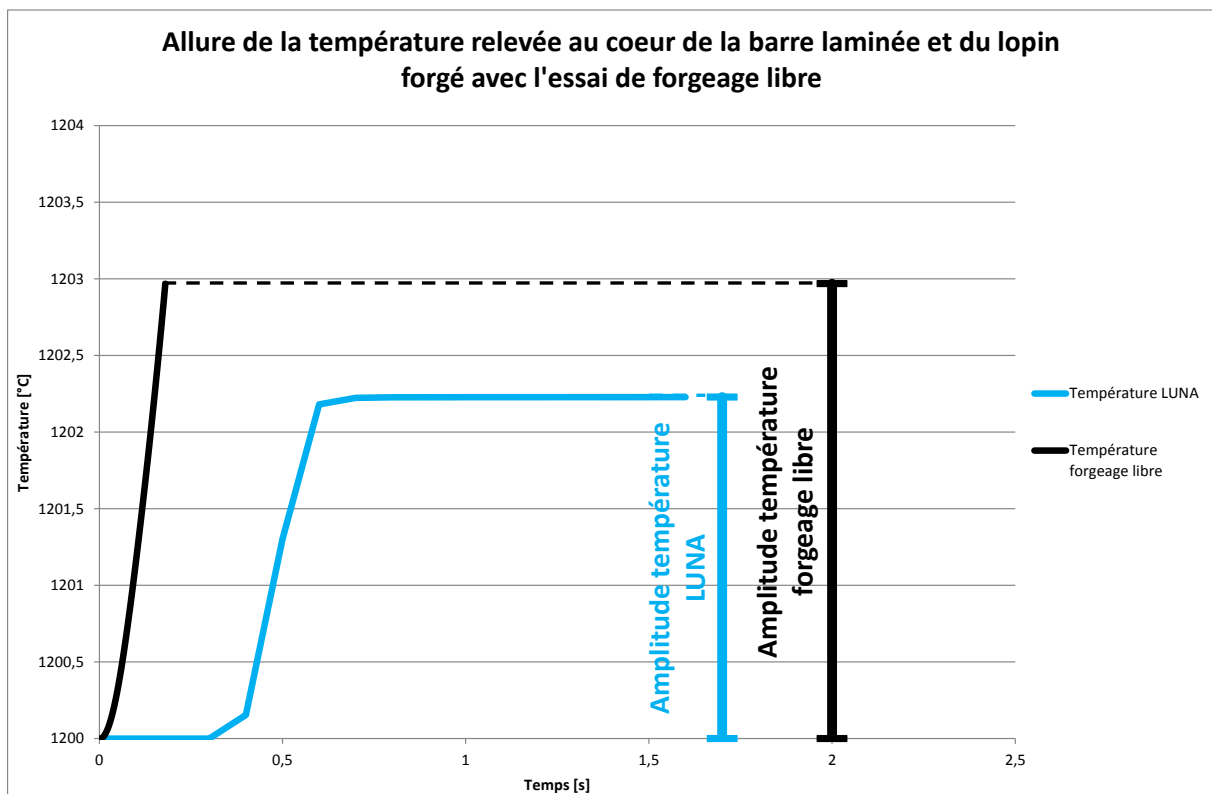


Figure 126 : Amplitude de température relevée au cœur de la barre laminée et du lopin forgé avec l'essai de forgeage libre lors du passage dans la cage OA

La Figure 127 illustre le chemin de déformation subie dans la barre laminée et le lopin forgé avec l'essai de forgeage libre suivant la direction de mise en forme Y. La déformation subie dans la barre laminée et le lopin forgé est respectivement représentée par les traits de couleur rouge et noir. Cette même figure montre que le chemin de déformation subi dans la barre laminée et le lopin forgé est différent. C'est pour cela que les amplitudes de déformation sont utilisées comme éléments de comparaison afin de valider la représentativité de l'essai. Il en est de même pour les déformations longitudinale et transverse suivant la direction Z. Que ce soit pour la comparaison des déformations ou de la température, la démarche détaillée précédemment est utilisée pour valider la représentativité de l'essai pour chaque cage de laminage.

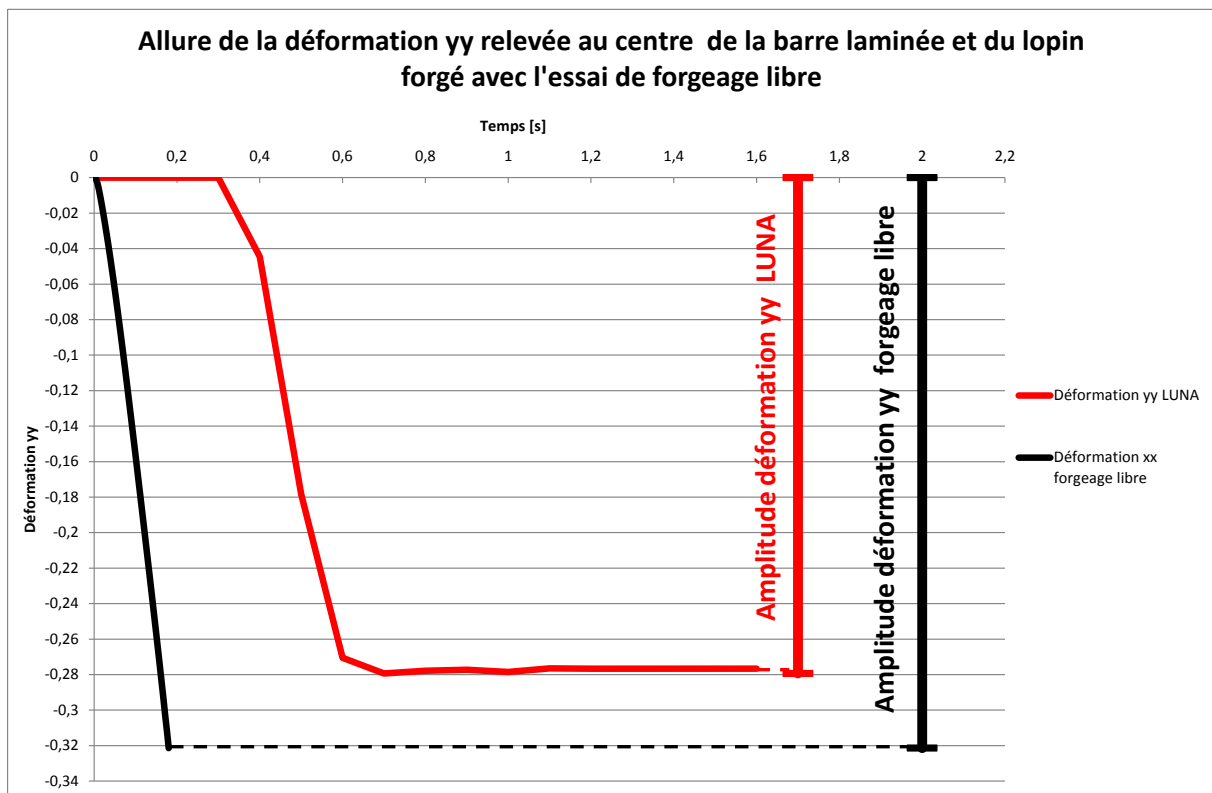


Figure 127 : Amplitude de la déformation yy subie dans la barre laminée et le lopin forgé avec l'essai de forgeage libre lors du passage dans la cage OA

3.2.2.1 Résultats de la température

Le graphique présenté Figure 128 compare les amplitudes de températures relevées au cœur du lopin forgé et celles issues du capteur 1 dans la barre laminée. La comparaison des résultats présentés s'arrête à la cage 9 car au vu des dimensions du lopin des problèmes de thermiques peuvent intervenir.

Par comparaison les amplitudes de températures du lopin forgé suivent la même tendance que les températures relevées dans la barre laminée. Cependant un écart des niveaux de températures est à noter à partir de la cage 3. Pour suivre le cycle thermique du laminage il suffit simplement de laisser un temps d'attente plus important entre les passes de forgeage.

Les températures relevées aux points 3 et 5 tendent à diminuer au cours de l'essai comme en laminage mais un écart est notable entre les deux niveaux de températures. Les températures relevées aux points 3 et 5 dans la barre laminée et dans le lopin forgé sont comparées dans l'Annexe 5.

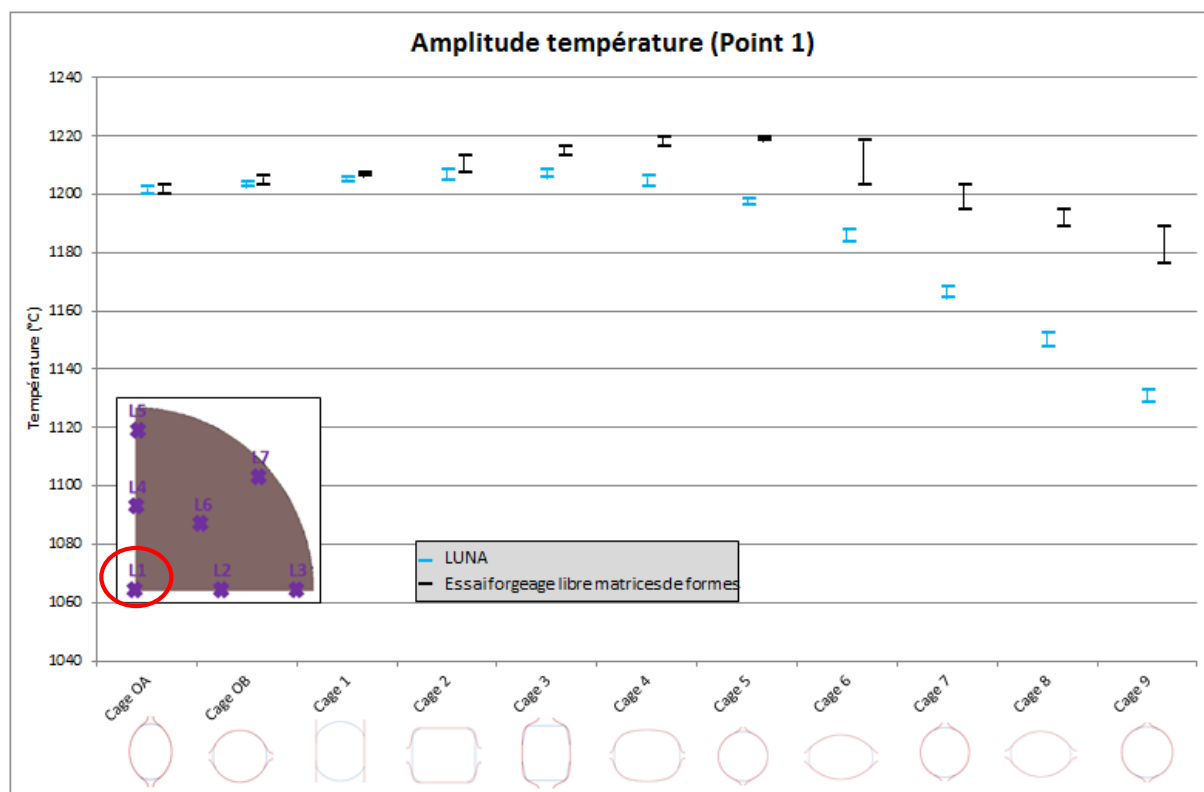


Figure 128 : Comparaison des amplitudes de températures entre la barre laminée (LUNA) et le lopin forgé (essai) au point 1 en utilisant les levées nominales du laminoir

3.2.2.2 Résultats des déformations

La Figure 129 présente les amplitudes de déformations longitudinales et la Figure 130 montre les déformations transverses subies dans le lopin forgé. Les résultats relevés au cœur du lopin forgé (point 1) sont comparés à ceux relevés au cœur de la barre laminée (point 1). Pour les deux graphiques, l'axe des abscisses indique le numéro des cages de laminage représentées et sur l'axe des ordonnées se trouvent les valeurs de la déformation.

Concernant la déformation suivant la direction de laminage, le graphique présenté Figure 129 montre que le lopin forgé s'allonge d'avantage que la barre lors du laminage. Pour les déformations dans les directions transverses, elles sont plus élevées avec l'essai de forgeage libre à partir de la cage 3. Il est notable que malgré les écarts de valeurs les déformations transverses tendent à augmenter ce soit en laminage ou en forgeage.

Plusieurs raisons peuvent expliquer les écarts de niveaux de déformations entre le lopin forgé et la barre laminée. La première explication est qu'à chaque passe de forgeage la déformation est légèrement plus élevée. Ce phénomène entraîne un cumul des déformations et donc dans les dernières passes de forgeage les déformations relevées sont nettement plus

élevées comparées à celles subies dans la barre laminée. La seconde hypothèse est qu'en simulation le forgeage est localisé au centre du lopin suivant sa longueur. La raideur des deux extrémités "contrarie" les déformations ϵ_{yy} et ϵ_{zz} dans la section du lopin, ce qui favorise la déformation ϵ_{xx} . La forme des empreintes des matrices peut également avoir un impact sur l'écoulement de la matière notamment pour les cages 2 et 3 où la gravure est de forme carrée.

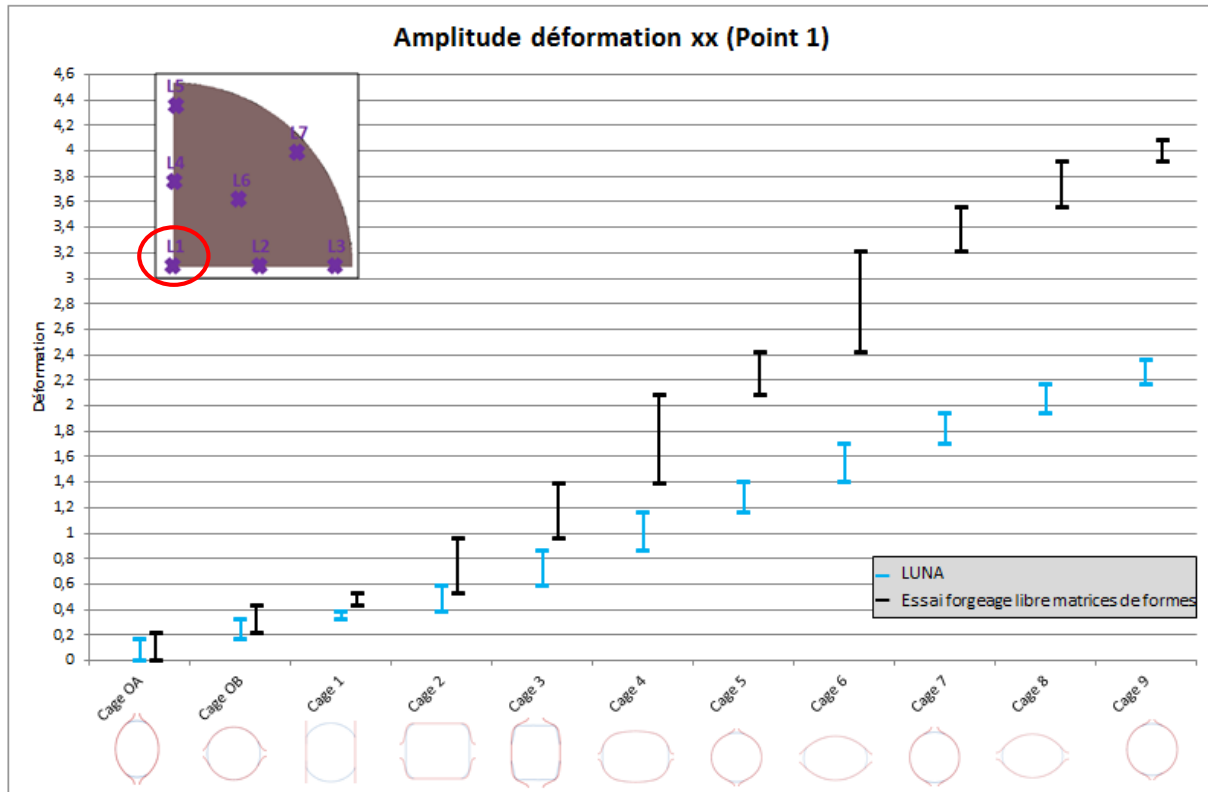


Figure 129 : Comparaison des déformations longitudinales entre la barre laminée (LUNA) et le lopin forgé (essai) au point 1 en utilisant les levés nominaux du laminoir

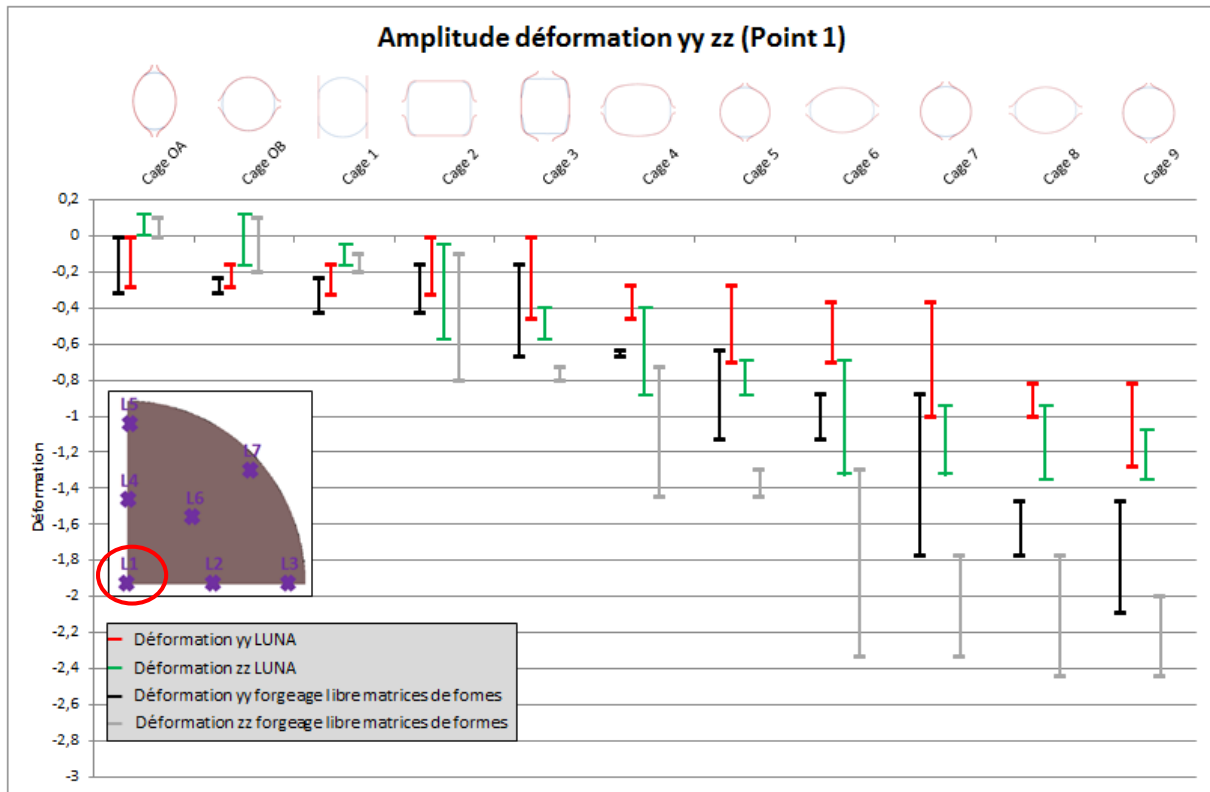


Figure 130 : Comparaison des déformations transverses entre la barre laminée (LUNA) et le lopin forgé (essai) au point 1 en utilisant les levées nominales du laminoir

Pour valider la dernière hypothèse faite pour expliquer les écarts des niveaux de déformations, les géométries du lopin et de la barre laminée sont comparées avant et après le passage dans la cage 2. Le facteur d'échelle entre les dimensions de la barre laminée et du lopin forgé est de 10. Comme le montre la Figure 131, les géométries des deux sections sont similaires après avoir subies respectivement les déformations dans la cage 1 du laminoir et la passe de forgeage 1. Il en est de même pour les aires calculées mais avec un facteur 100 entre les deux valeurs qui est dû au facteur d'échelle entre les dimensions des deux procédés. Cependant après déformation les géométries ne sont plus identiques malgré la similitude des aires des deux surfaces calculée avec un facteur d'échelle. En effet, contrairement à la barre laminée des creux apparaissent sur les bords libres du lopin forgé. L'apparition de creux est illustrée sur la Figure 132. Ce phénomène provient de l'écoulement de la matière qui est différent entre les deux procédés.

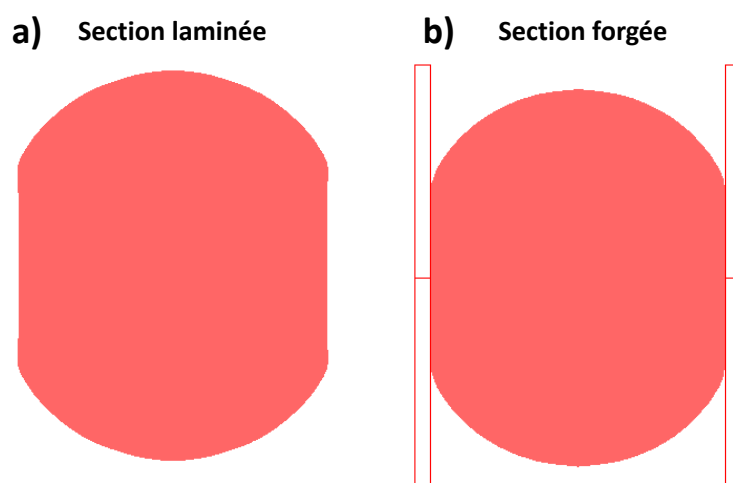


Figure 131 : Aire a) de la barre après la cage 1 (38864mm^2) et b) du lopin après forgeage de la passe 1 (392mm^2)

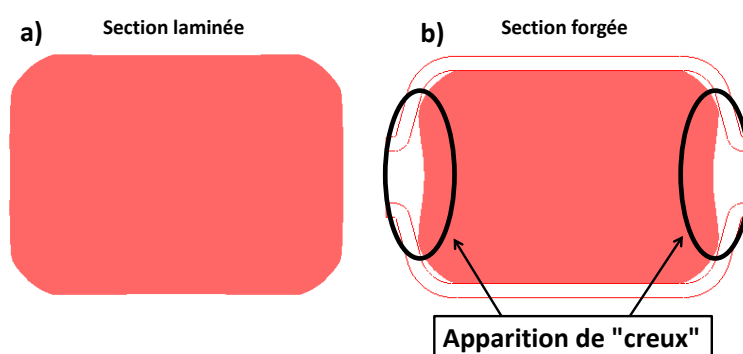


Figure 132 : Aire a) de la barre après la cage 2 (31671mm^2) et b) du lopin après forgeage de la passe 2 (311mm^2)

3.2.2.3 Comparaison de la déformation longitudinale cage par cage entre la barre laminée et le lopin forgé

La comparaison des déformations longitudinales et transverses présentée sur la Figure 129 et la Figure 130 montrent que les erreurs se cumulent à chaque passe de forgeage. Pour permettre une comparaison plus fine, les amplitudes des déformations sans cumul cage après cage sont tracées sur les figures suivantes pour le point 1. La Figure 133 montre les amplitudes des déformations longitudinales subies dans la barre laminée et le lopin forgé désignées respectivement par les couleurs bleu et noir. La tendance suivie par les déformations du lopin est en accord avec celles subies dans la barre. Cependant pour toutes les cages du laminoir représentées les déformations longitudinales subies dans le lopin forgé sont plus élevées que dans la barre laminée. Les écarts les plus importants sont à noter pour la représentation des cages 4 et 6 qui ont des cylindres de forme ovale.

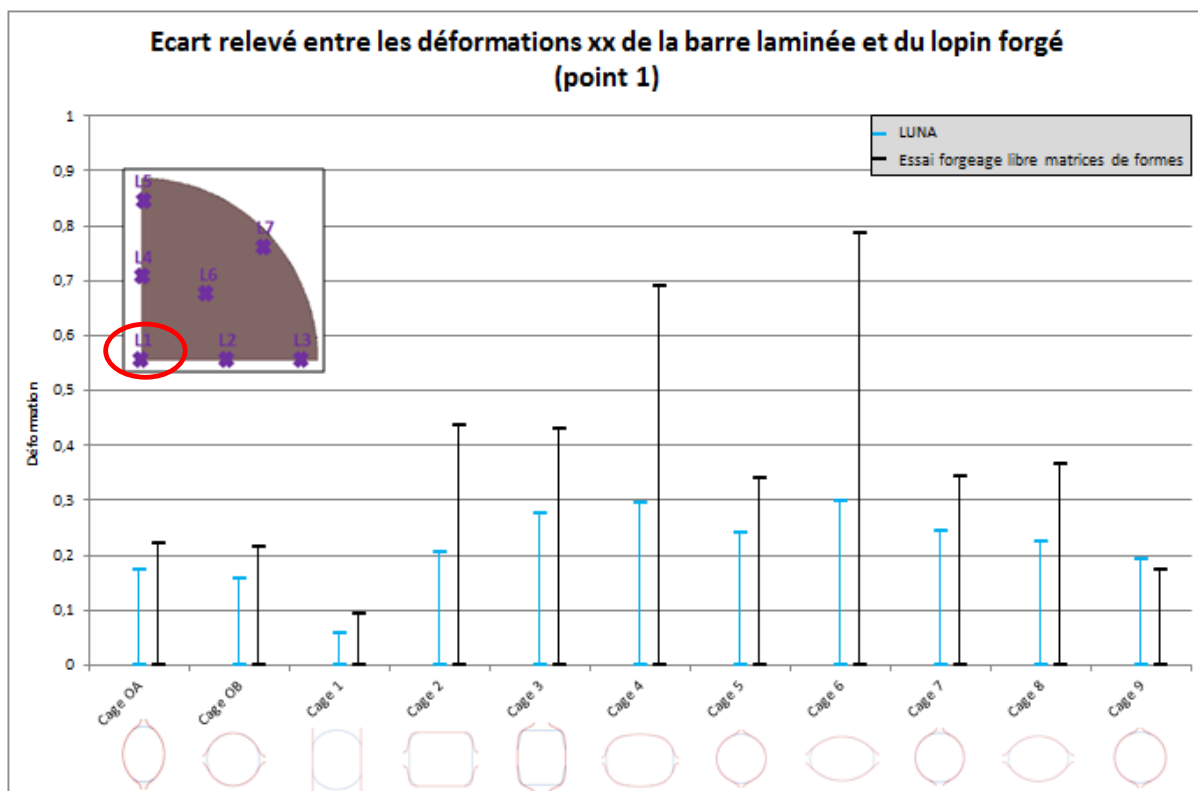


Figure 133 : Comparaison des déformations suivant X entre la barre laminée (LUNA) et le lopin forgé (essai) au point 1 en ne tenant pas compte du cumul des déformations cage après cage

3.2.2.4 Comparaison des déformations transverses cage par cage entre la barre laminée et le lopin forgé

Les Figure 134 et Figure 135 montrent les déformations transverses subies dans la barre laminée et le lopin forgé respectivement suivant les directions Y et Z. Les déformations sont relevées au point 1. Que ce soit pour la barre laminée ou le lopin forgé l'alternance des directions de déformation est présente sur les deux graphiques. Les niveaux de déformations entre la barre laminée et le lopin forgé suivant Y sont similaires mis à part pour les cages 4 et 7. Il en est de même pour les déformations relevées suivant Z où des écarts sont à noter pour les cages 4 et 6. La géométrie des outils des cages 4 et 6 est ovale et peut avoir une influence sur les écarts relevés. En effet, la barre qui sort de la cage 3 est de forme carrée et elle est déformée ensuite à travers la cage 4 dont la géométrie est ovale.

La comparaison sans le cumul des déformations montre que les amplitudes de déformations subies dans la barre laminée et le lopin forgé sont globalement proches. Les écarts les plus importants semblent dans la direction de forgeage à cause de la répercussion des cages précédentes. En effet, l'écart de section de la cage n-1 modifie les déformations induites par la cage n.

La comparaison entre les déformations transverses relevées par les capteurs 3 et 5 dans la barre laminée et le lopin forgé est détaillée dans l'Annexe 6. Les résultats montrent que les déformations dans la direction de mise en forme sont surestimées mais la tendance entre les

deux grandeurs est correcte.

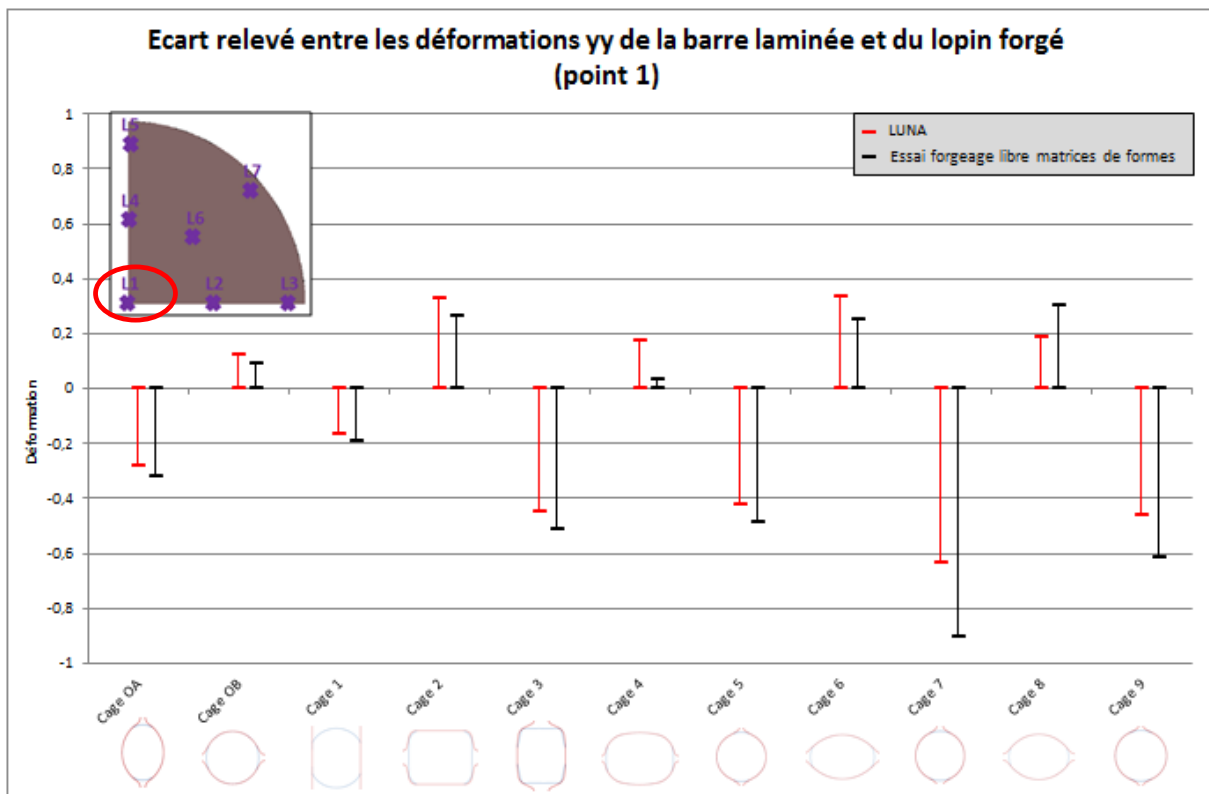


Figure 134 : Comparaison des déformations suivant Y entre la barre laminée (LUNA) et le lopin forgé (essai) au point 1 en ne tenant pas compte du cumul des déformations cage après cage

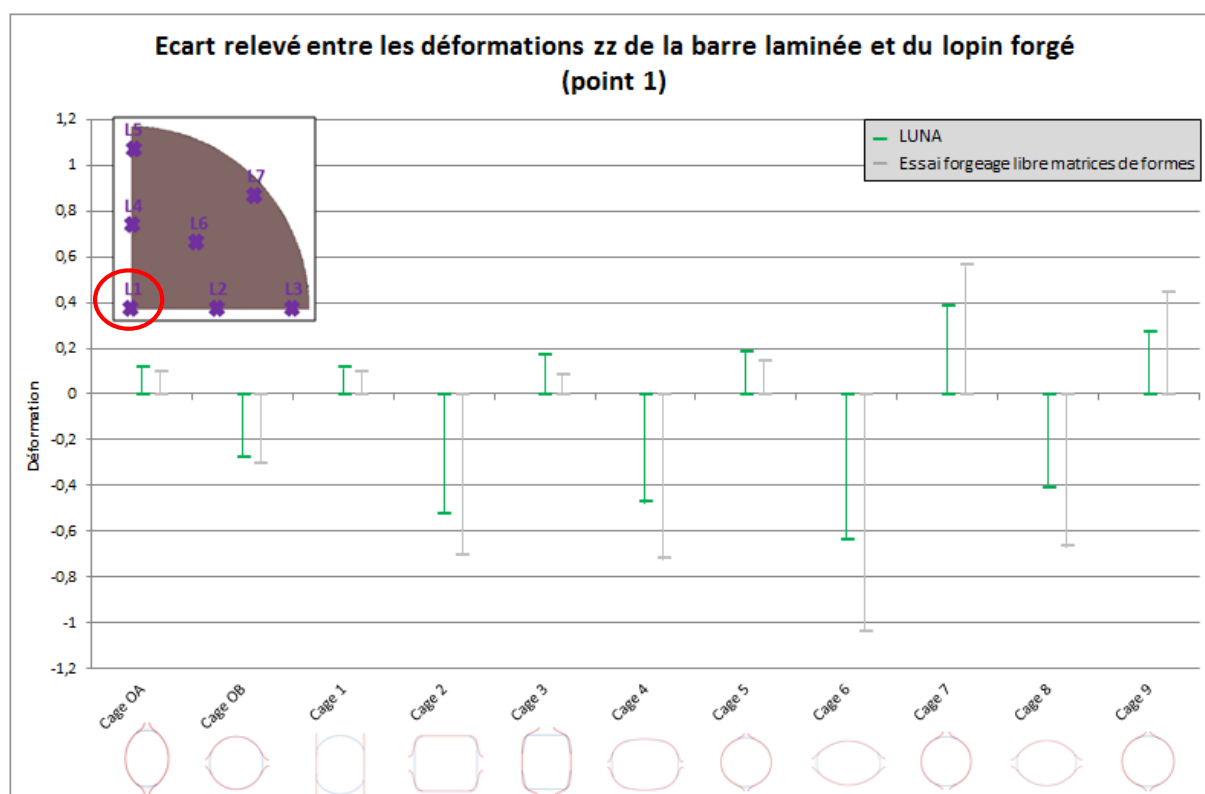


Figure 135 : Comparaison des déformations suivant Z entre la barre laminée (LUNA) et le lopin forgé (essai) au point 1 en ne tenant pas compte du cumul des déformations cage après cage

3.2.2.5 Résultats de la pression hydrostatique

La pression hydrostatique fait partie des paramètres influents sur le comportement des défauts internes présents dans les produits laminés. Les amplitudes des pressions hydrostatiques relevées au point 1 après chaque cage dans la barre laminée et le lopin forgé sont représentées respectivement en bleu et en noir sur la Figure 136. Par comparaison les niveaux de pressions subis dans le lopin forgé sont plus élevés que ceux relevés dans la barre laminée. Pour toutes les cages les amplitudes des pressions se trouvent principalement dans la zone positive du graphique, c'est-à-dire que le cœur de la barre est soumis à de la compression.

La comparaison de ce paramètre pour les points 3 et 5 est présentée en Annexe 7. Pour les deux points les pressions relevées en forgeage ont la même tendance que celles rencontrées en laminage jusqu'à la cage 3. Toutefois un écart est notable entre les deux niveaux de pressions.

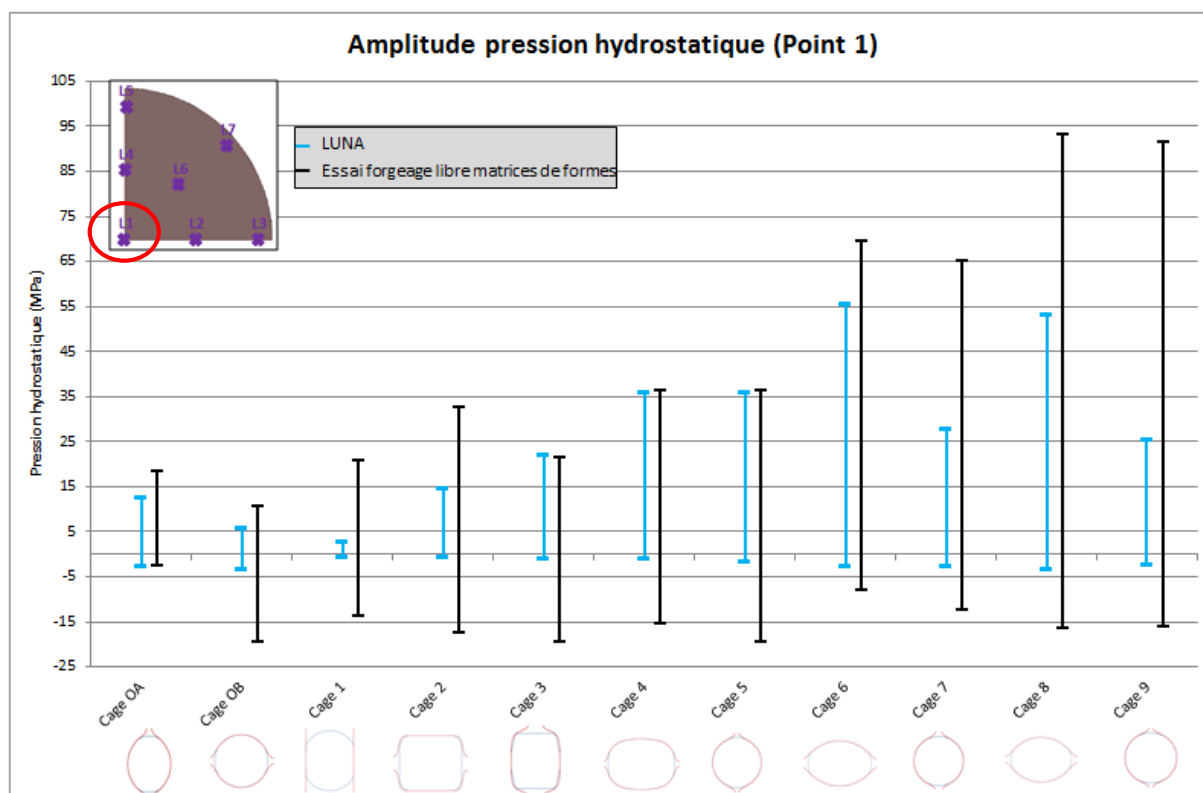


Figure 136 : Comparaison des pressions hydrostatiques entre la barre laminée (LUNA) et le lopin forgé (essai) au point 1 en utilisant les levées nominales du laminoir

3.2.2.6 Résultats de la vitesse de déformation

Le dernier paramètre influant sur la santé interne des barres laminées est la vitesse de déformation. Les barres bleues et noires représentées sur le graphique de la Figure 137 désignent les vitesses de déformation relevées respectivement dans la barre laminée et le lopin forgé après chaque cage. Lors de l'essai les vitesses de déformation sont relevées en fin de forgeage. La tendance suivie par les vitesses de déformation dans le lopin forgé est en accord avec celles de la barre laminée, mis à part pour la cage 7. Comme pour les pressions hydrostatiques, les vitesses de déformation relevées dans le lopin forgé sont nettement supérieures à celles relevées dans la barre laminée.

Les vitesses de déformation des points 3 et 5 relevées dans les deux produits mis en forme numériquement sont comparées en Annexe 8. Les résultats montrent que la vitesse de déformation est surestimée principalement lorsque le point considéré se trouve dans la zone proche des matrices.

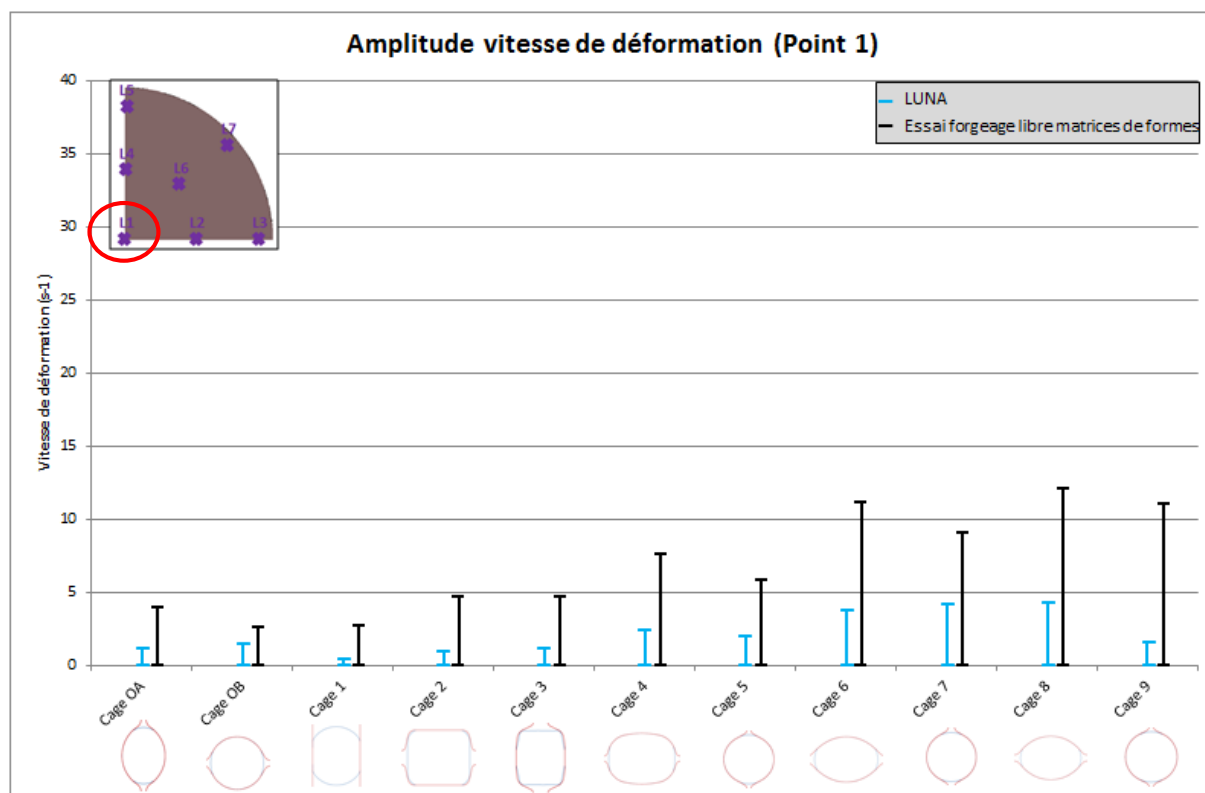


Figure 137 : Comparaison des vitesses de déformation entre la barre laminée (LUNA) et le lopin forgé (essai) au point 1 en utilisant les levées nominales du laminoir

La comparaison des paramètres influant sur les inclusions et les porosités que sont la température, les déformations principales, la pression hydrostatique et la vitesse de déformation a permis d'identifier le degré de représentabilité du procédé de laminage avec l'essai de forgeage. Les paramètres comparés au cœur des deux produits montrent que les résultats issus du lopin forgé suivent globalement la tendance des résultats relevés dans la barre laminée. Cependant des écarts de niveaux entre les divers paramètres comparés sont à noter. Afin de réduire les écarts des paramètres de sortie étudiés entre le forgeage et le laminage, les levées entre les matrices sont modifiées.

Pour ce qui est des vitesses de déformation, il est possible d'agir sur la vitesse de mise en forme lors de l'essai.

3.2.2.7 Analyses des paramètres de sortie du modèle avec les levées ajustées entre les cylindres

Les levées entre les matrices sont modifiées afin d'avoir des résultats simulés en forgeage qui se rapprochent de ceux rencontrés dans la barre laminée. Les valeurs des levées ajustées sont mentionnées dans le Tableau 22.

Tableau 22 : Levées ajustées entre les matrices pour simuler l'essai de forgeage avec des matrices de formes

N° Cage	OA	OB	1	2	3	4	5	6
Levée essai forgeage (mm)	2,5	2,5	19	3,9	5,3	1,2	2,1	1,2
Levée essai forgeage ajustée(mm)	3	2,7	19,3	4,6	5,3	2,9	2,1	2,6

N° Cage	7	8	9	10	11	12	13
Levée essai forgeage (mm)	1,2	1	0,5	1,1	0,9	0,9	0,7
Levée essai forgeage ajustée(mm)	2,9	2,8	1,9	1,9	2	1,6	2,2

Les graphiques des Figure 138 et Figure 139 montrent respectivement les déformations longitudinales et transverses subies dans la barre et dans le lopin forgé avec les levées entre les matrices modifiées. En déformant dans une moindre mesure le lopin c'est-à-dire en ayant une levée plus grande, les déformations longitudinales se rapprochent de celles subies dans la barre lors du laminage. Comme le montre la Figure 139, cela est également le cas pour les déformations transverses.

La Figure 141 présente les pressions hydrostatiques relevées dans la barre laminée et le lopin forgé. Comme pour les déformations les amplitudes de pression par cage sont moins élevées. Il en est de même pour les amplitudes des vitesses de déformation présentées sur la Figure 142. La comparaison des résultats relevés pour les points 3 et 5 avec des levées plus grandes entre les matrices est présentée en Annexe 9. Pour ces deux points la tendance entre les déformations relevées en laminage et en forgeage n'est pas correcte. Il en est de même pour les pressions et les vitesses de déformation.

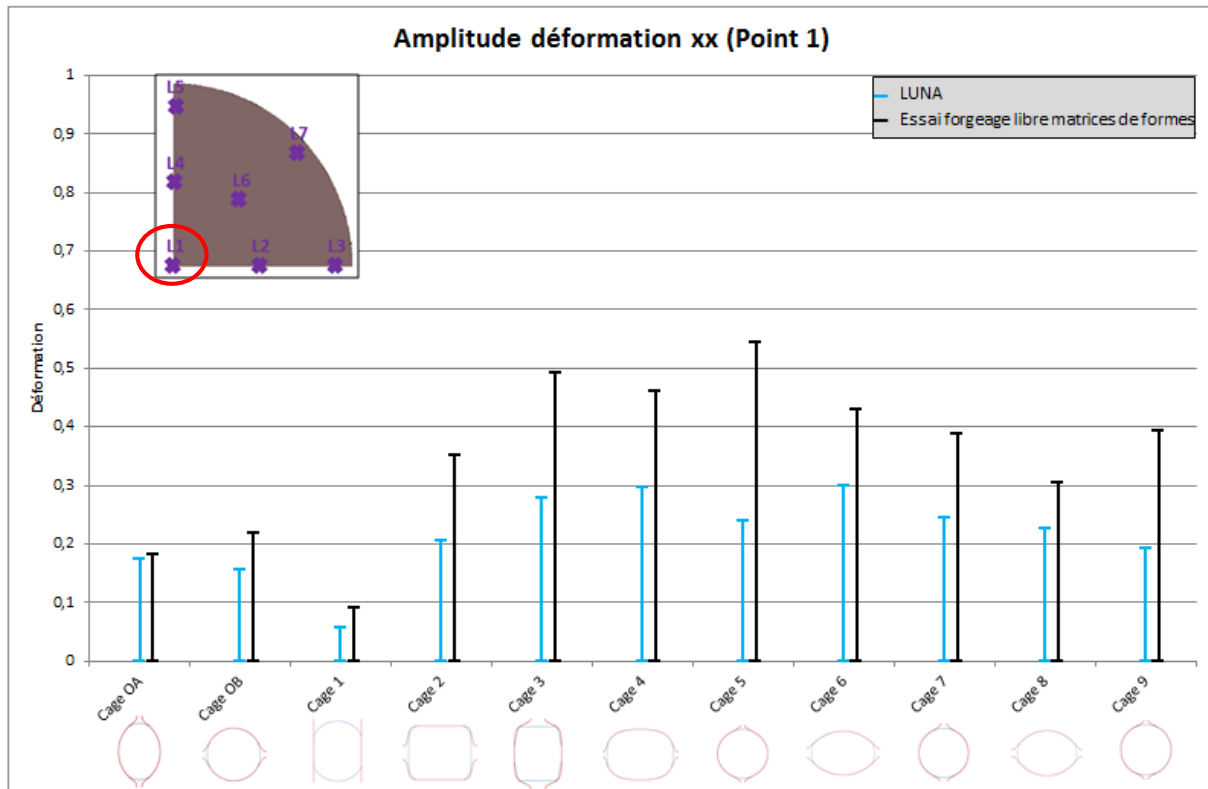


Figure 138 : Comparaison des déformations longitudinales entre la barre laminée (LUNA) et le lopin forgé (essai) au point 1 en ajustant les levées entre les matrices et sans tenir compte du cumul des déformations cage après cage

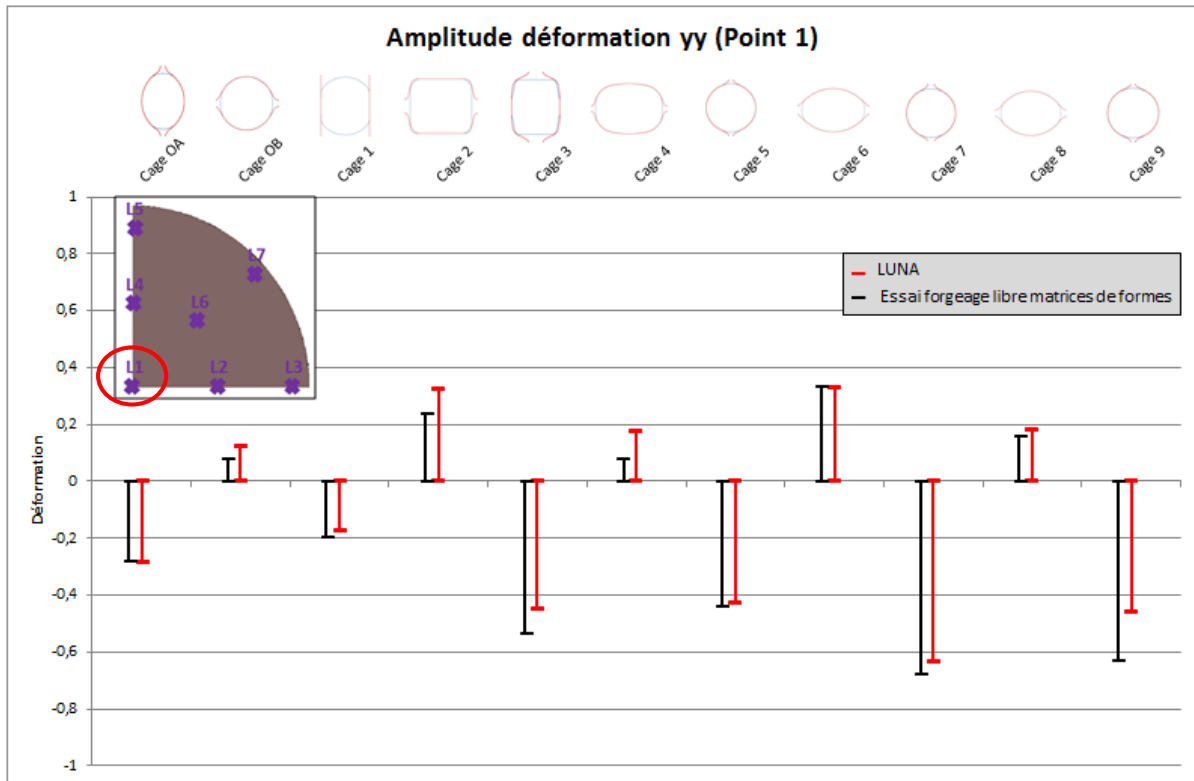


Figure 139 : Comparaison des déformations suivant Y entre la barre laminée (LUNA) et le lopin forgé (essai) au point 1 en ajustant les valeurs des levées entre les matrices et sans tenir compte du cumul des déformations cage après cage

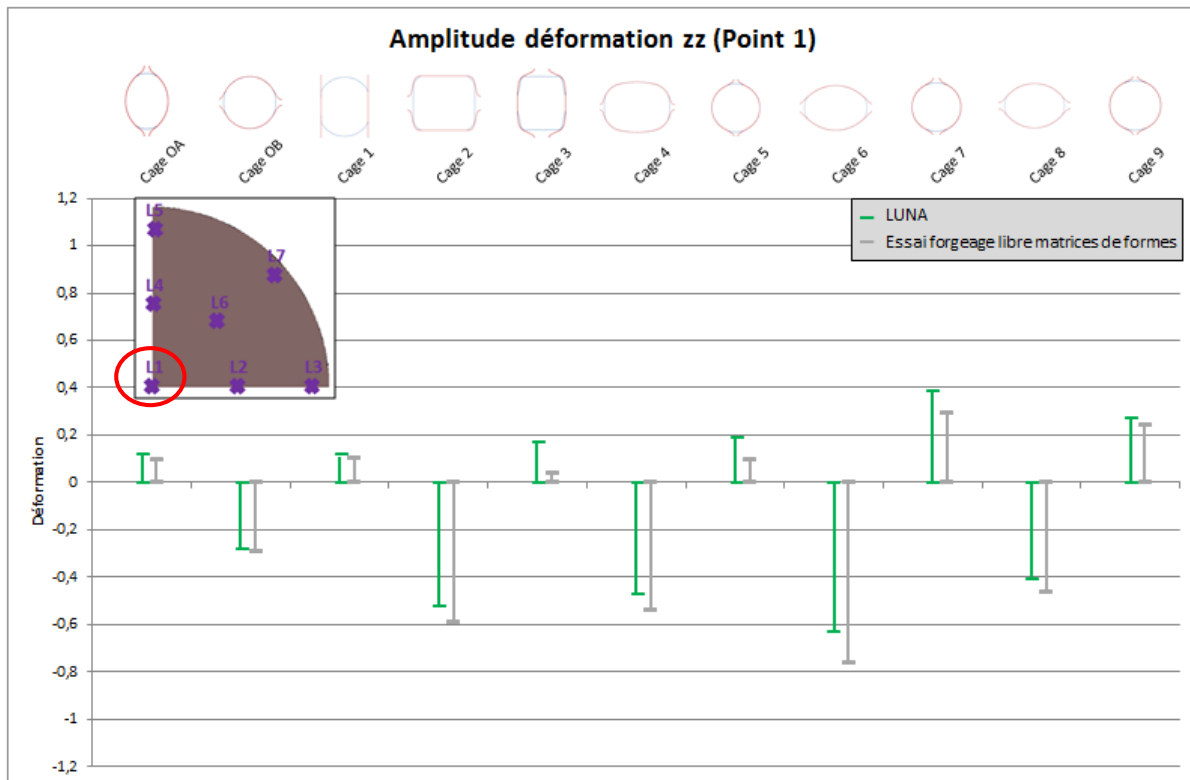


Figure 140 : Comparaison des déformations suivant Z entre la barre laminée (LUNA) et le lopin forgé (essai) au point 1 en ajustant les valeurs des levées entre les matrices et sans tenir compte du cumul des déformations cage après cage

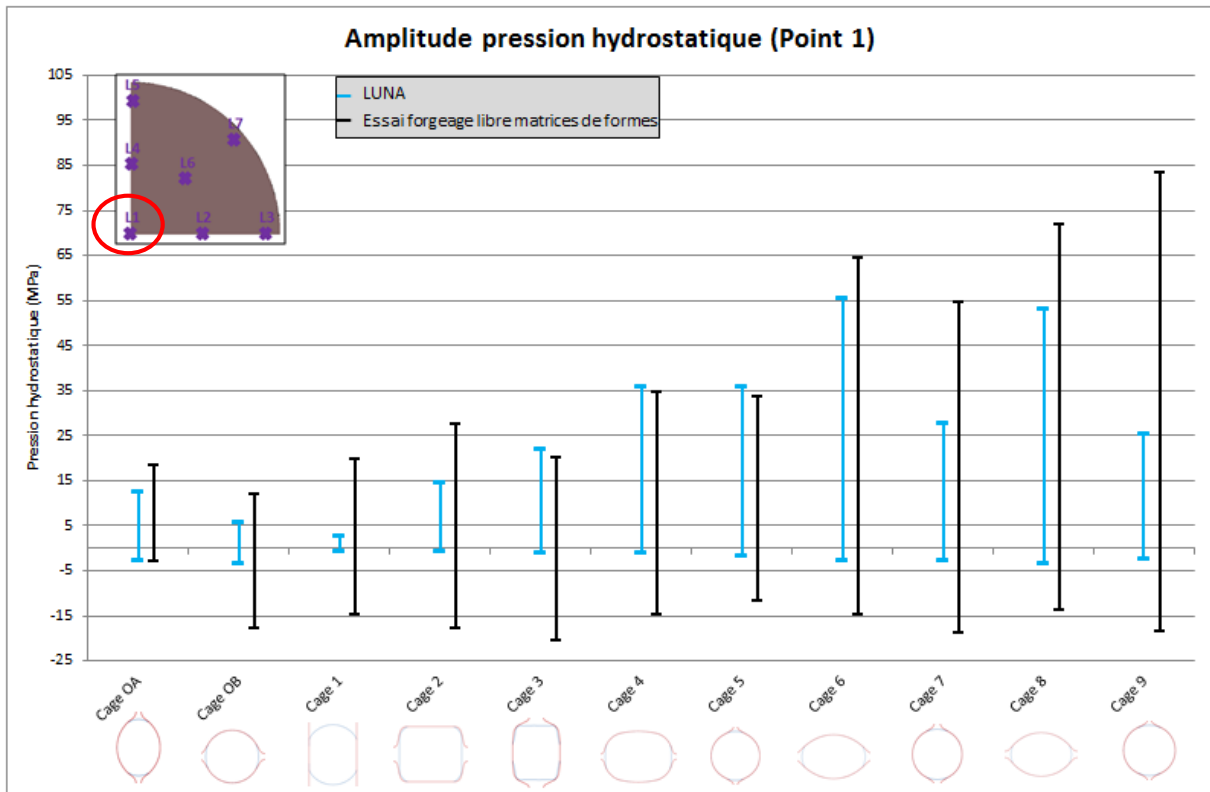


Figure 141 : Comparaison des pressions hydrostatiques entre la barre laminée (LUNA) et le lopin forgé (essai) au point 1 en ajustant les valeurs des levées entre les matrices

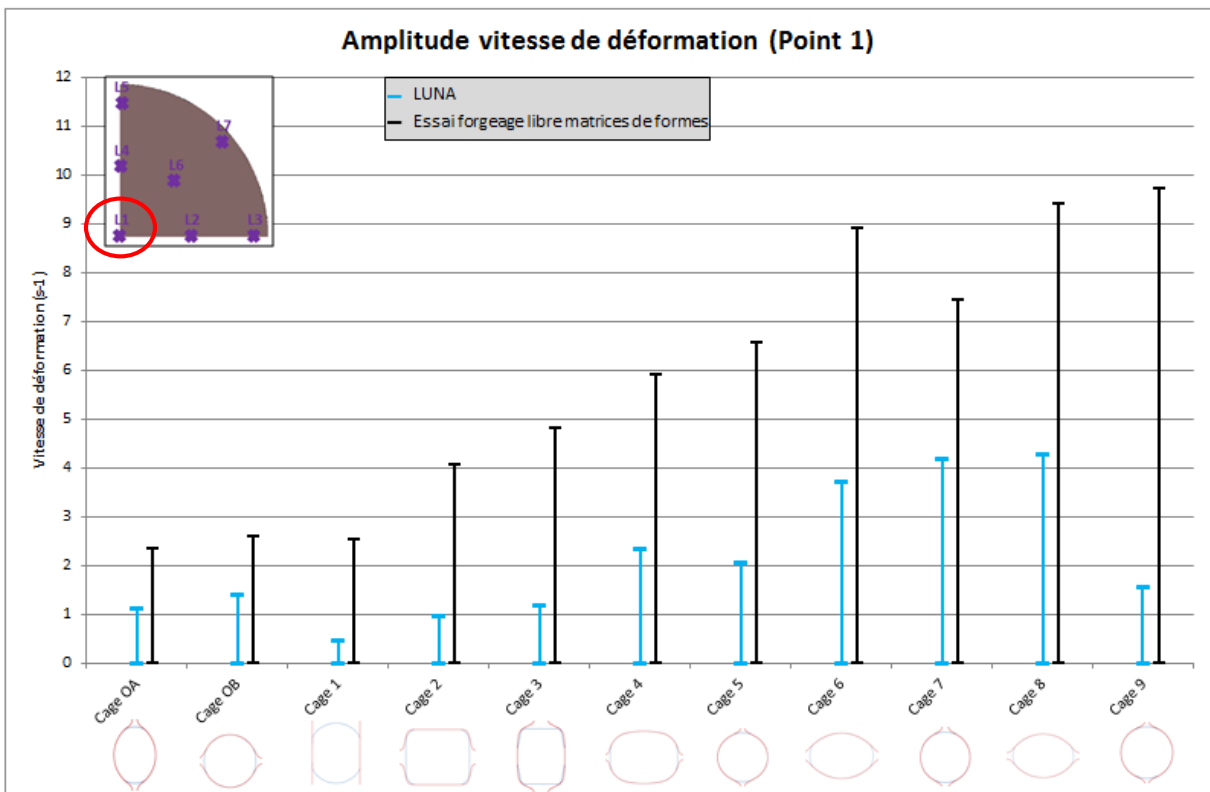


Figure 142 : Comparaison des vitesses de déformation entre la barre laminée (LUNA) et le lopin forgé (essai) au point 1 en ajustant les valeurs des levées entre les matrices

En utilisant les levées nominales de LUNA à l'échelle 1/10 dans l'essai de forgeage, les déformations, les pressions hydrostatiques et les vitesses de déformation engendrées dans le lopin sont plus importantes que celles subies par la barre lors du laminage. Lorsque les levées sont modifiées il est possible de se rapprocher des niveaux de déformations principales rencontrées dans la barre laminée.

3.3 Mise en œuvre de l'essai de forgeage

3.3.1 Conception, fabrication et contrôle dimensionnel de l'outillage

3.3.1.1 Conception et fabrication de l'outillage

L'outillage mis en œuvre doit permettre de reproduire l'alternance des déformations à 90° ainsi que des sollicitations thermomécaniques similaires à celles rencontrées en laminage. Pour satisfaire le cahier des charges l'outillage doit être adapté à la presse hydraulique et à la presse à vis présentes à l'atelier. Les essais réalisés sur la presse hydraulique permettront de valider l'outillage et de robotiser les opérations de forgeage. Des essais expérimentaux seront réalisés sur la presse hydraulique afin d'identifier l'influence de la température et de la déformation sur le comportement des défauts contenus dans les lopins. Un refroidissement rapide en peau du lopin peut avoir lieu lors de la mise en forme sur la presse hydraulique dû à la vitesse de descente de coulisseau qui est de 30mm/s. Pour éviter ce phénomène la presse à vis sera utilisée afin d'avoir un cycle thermique similaire au laminage. De plus il sera possible de faire varier la vitesse de déformation dans le lopin en modifiant l'énergie de mise en forme.

L'outillage de forge mis en œuvre est à l'échelle 1/10 des outils présents sur la ligne de production LUNA. L'encombrement disponible sur la table de la presse à vis est plus restreint que celui de la presse hydraulique donc seules les sept premières cages du laminoir seront représentées. Les matrices ont la forme des gravures des cylindres présents sur le laminoir. La levée entre les matrices inférieures et supérieures doit être réglable indépendamment pour chaque cage afin de faire varier le taux de déformation. Afin d'assurer une géométrie correcte du lopin forgé chaque jeu de matrices est guidé séparément à l'aide des goupilles d'indexage. La Figure 143 présente la conception de l'outillage réalisée avec le logiciel de CAO CatiaV5R20®.

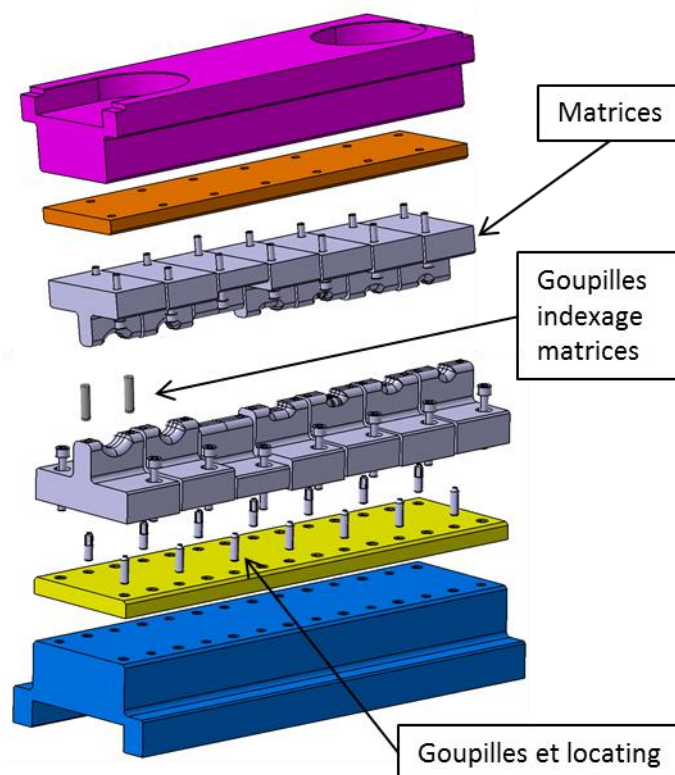


Figure 143 : Outillage réalisé avec le logiciel de CAO CATIAV5R20©

Les différentes pièces qui composent l’outillage sont obtenues par des opérations d’usinage. Le matériau utilisé est un acier X38CrMoV5 avec un traitement thermique afin d’obtenir une dureté de 55HRC. Les matrices reçoivent un traitement de nitruration qui entraîne un accroissement important de la dureté superficielle ce qui va limiter leur usure au contact des lopins chauds.

Avant de commencer les premiers essais un contrôle dimensionnel par stéréovision est réalisé afin de vérifier si les tolérances dimensionnelles et géométriques sont respectées. La technique de contrôle et les résultats sont présentés dans l’Annexe 10.

3.3.2 Validation expérimentale de l’essai

Les objectifs des premiers essais sont de vérifier l’évolution de la géométrie du lopin au cours de l’essai et de suivre l’évolution d’un défaut artificiel de taille macroscopique placé au cœur du lopin. Pour cela les dimensions finales des lopins forgés après chaque passe sont comparées aux lopins issus de la simulation numérique. Cette première série d’essais va permettre de déterminer les difficultés susceptibles d’être rencontrées lors des opérations de forgeage (thermique, position du lopin...) et de faire une première validation du modèle.

3.3.2.1 Réalisation des lopins

La première série d'essais est menée sur les sept jeux de matrices représentant les sept premières cages du laminoir. La Figure 144 montre la géométrie des matrices.

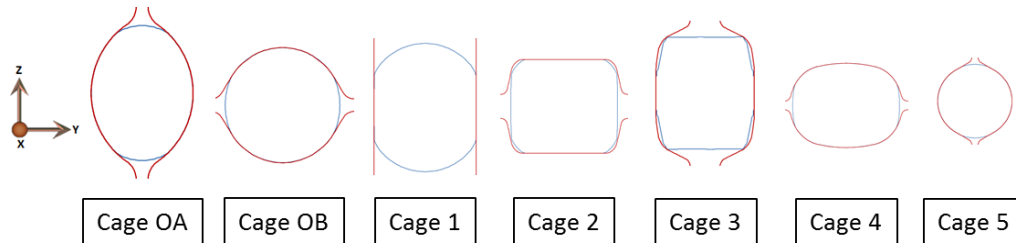


Figure 144 : Géométrie des sept jeux de matrices

Pour tester la répétabilité des résultats trois lopins sont forgés après chaque cage, soit au total vingt et un lopins. Ces derniers de longueurs 150mm sont découpés dans des barres en acier C17 de diamètre 27mm. Pour créer le défaut, un trou de diamètre 5,5mm avec une longueur de 50mm est percé au centre des lopins. L'enrobage rutile d'électrode de soudure est utilisé pour faire office de défaut. L'utilisation de ce matériau ainsi que les dimensions du défaut permettent un suivi de son évolution au cours du forgeage. La Figure 145 illustre la préparation des lopins.

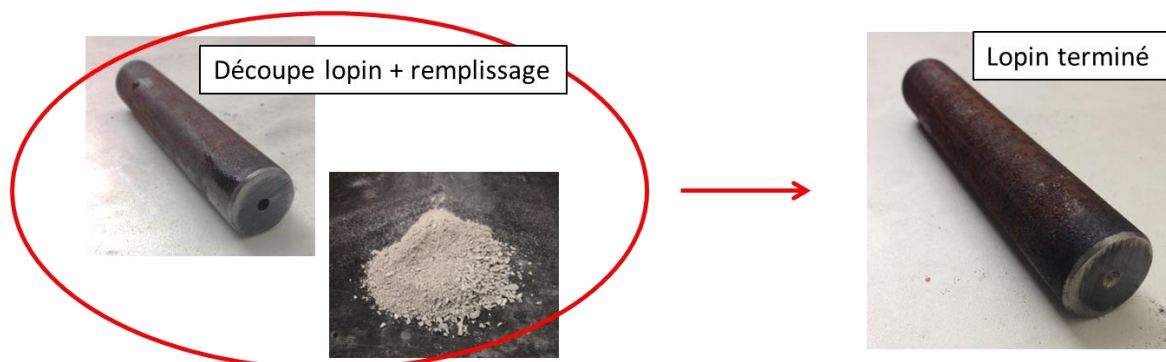


Figure 145 : Préparation des lopins avec l'enrobage d'électrode concassé

Les lopins sont chauffés dans un four électrique à une température de 1100°C tandis que les outils ne sont pas chauffés pour assurer une répétabilité de mise en œuvre des essais. La lubrification de la partie active des matrices est réalisée à l'aide de produit graphité.

3.3.2.2 Le forgeage des lopins

Dans un premier temps les opérations de forgeage sont réalisées avec la presse hydraulique car la manipulation des lopins est faite par l'opérateur. La presse hydraulique étant pilotée en effort il est nécessaire de placer des chandelles avec un empilement de cales

pour le réglage des levées entre les matrices. La Figure 146 illustre le réglage des levées qui sont répertoriées pour chaque cage dans le Tableau 23. Les levées expérimentales peuvent être différentes de celles utilisées en simulation à cause du réglage qui se fait à l'aide de cales. La vitesse de descente du coulisseau de la presse est constante à 30mm/s et l'effort de forgeage maximal est réglé pour atteindre 150t. Les lopins forgés sont présentés Figure 147.

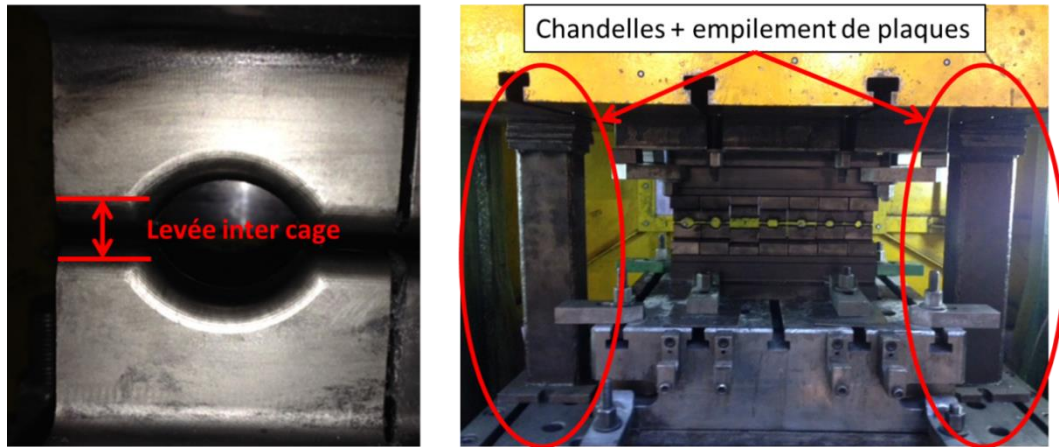


Figure 146 : Réglage de la hauteur de forgeage sur la presse

Tableau 23 : Valeurs des levées entre les matrices lors de l'essai de forgeage libre avec des matrices de formes

N° Cage	OA	OB	1	2	3	4	5
Levée essai forgeage (mm)	2,5	2,5	19	3,5	5,5	1,5	1,5



Figure 147 : Lopins forgés lors de la première campagne d'essais

3.3.2.3 Le contrôle des lopins forgés

Contrôle dimensionnel des lopins forgés

Un contrôle dimensionnel des lopins forgés après chaque cage est réalisé pour faire une comparaison avec les dimensions des lopins simulés. Pour ce faire la largeur et la hauteur

de la section forgée ainsi que la longueur du lopin sont mesurées à l'aide d'un pied à coulisse. La Figure 148 illustre les trois dimensions mesurées.

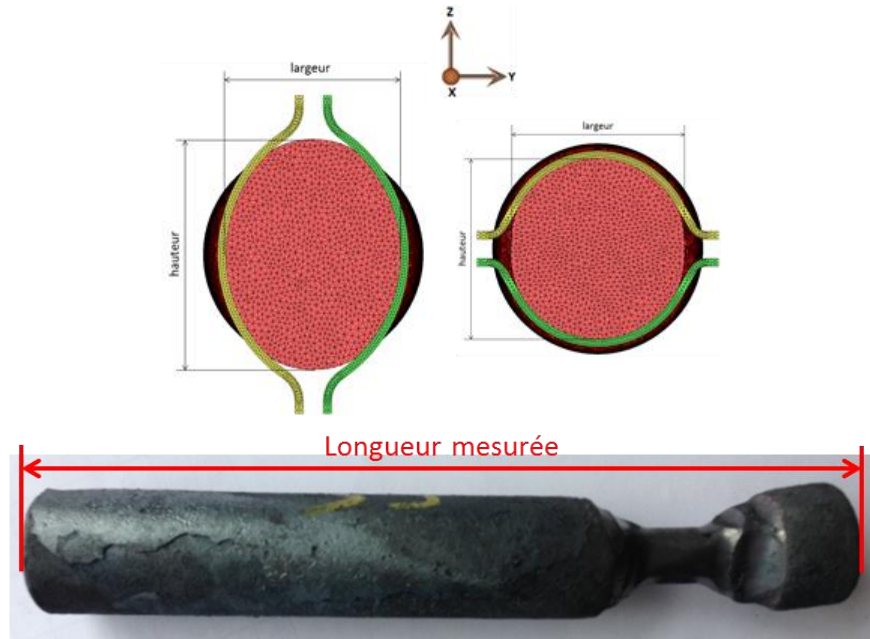


Figure 148 : Mesure de la section et de la longueur des lopins forgés

Les valeurs mesurées sur les lopins sont listées dans le Tableau 24. L'alternance des directions de mise en forme suivant Y et Z entraîne également une alternance dans la comparaison des mesures simulées et expérimentales. La hauteur des gravures des matrices est orientée suivant la direction Z car c'est la direction de forgeage. Pour les cages impaires la mesure de la largeur du lopin doit être comparée à la hauteur théorique des gravures (en rouge). Inversement pour les cages paires, la mesure de la hauteur du lopin doit être comparée à la hauteur théorique des gravures (en jaune).

Tableau 24 : Valeurs des mesures des lopins forgés

N° échantillon	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
Forgé jusqu'à la cage...	OA	OA	OA	OB	OB	OB	1	1	1	2	2	2	3	3	3	4	4	4	5	5	5
Longueur initiale	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150
Longueur après forgeage	153,82	153,72	153,68	156,78	156,28	156,8	157,48	157,26	157,3	162	161,06	161,1	165,6	165,5	164,9	169,42	169,48	169	172,7	172,5	172,3
Largeur lopin	20,9	21,0	20,9	22,6	22,8	22,5	20,0	20,0	20,0	22,9	22,0	22,8	15,7	15,7	15,7	18,0	18,1	18,0	13,7	13,7	13,7
Hauteur lopin	29,2	29,2	29,4	22,7	22,6	22,6	23,3	23,1	23,3	14,7	14,7	14,7	16,7	16,5	16,4	12,0	12,0	12,0	13,3	13,3	13,3
Hauteur théorique des gravures	21,1	21,1	21,1	22,8	22,8	22,8	20	20	20	14,5	14,5	14,5	15,6	15,6	15,6	11,8	11,8	11,8	13,4	13,4	13,4

Un exemple est donné avec le lopin n°11 qui est forgé jusqu'à la cage 2. La Figure 149 montre la géométrie du lopin après la passe de la cage 2 ainsi que l'orientation des mesures de

largeur et hauteur. Un écart d'environ 0,2mm est notable entre la hauteur du lopin mesuré et la hauteur théorique des gravures de la cage 2, cela implique que le lopin n'est pas assez écrasé. Plusieurs raisons peuvent expliquer cette différence comme les écarts dimensionnels relevés sur l'outillage ou l'élasticité du bâti de la presse qui n'est pas pris en compte dans la simulation.

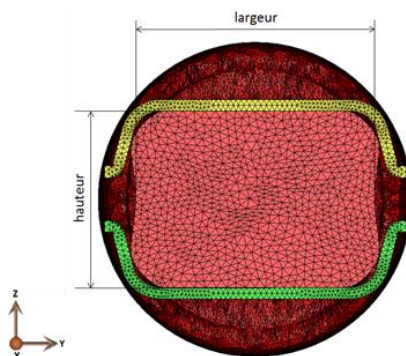


Figure 149 : Section de la barre après la cage 2

Le faible écart de mesure, de l'ordre de quelques dixièmes, permet de conclure que les sections obtenues après forgeage sont conformes aux sections simulées. L'essai avec une simulation calée sur un critère dimensionnel est maintenant disponible pour la suite de l'étude.

Contrôle dimensionnel et suivi de l'évolution du défaut placé au cœur des lopins

Ce contrôle a pour objectif de valider la possibilité de suivre l'évolution d'un défaut au cours de la déformation. Pour cela un lopin forgé est découpé puis poli après chaque passe afin de mesurer et suivre l'évolution du défaut. La Figure 150 montre l'évolution du défaut réalisé à partir d'enrobage rutile d'électrode de soudure. Les géométries du défaut mettent en évidence l'alternance des directions de forgeage. Comme pour le lopin, la largeur et la hauteur des défauts sont mesurées à l'aide d'une loupe binoculaire. Les valeurs mesurées sur le défaut sont recensées dans le Tableau 25.

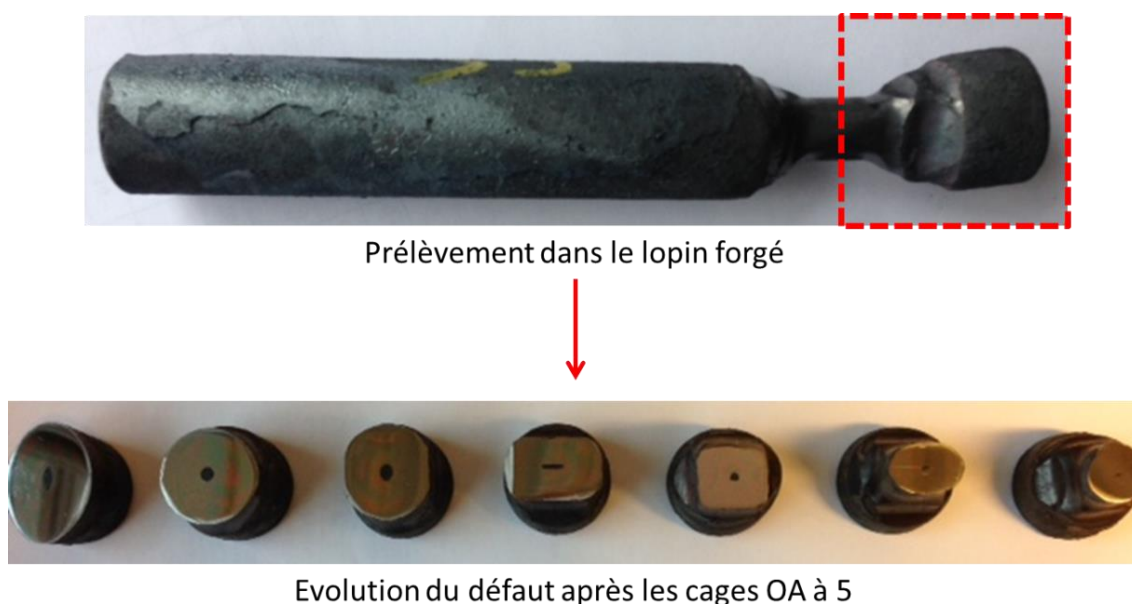


Figure 150 : Cinéma du défaut réalisé avec l'enrobage d'électrode

Le rapport largeur – hauteur du lopin (en rouge) et le rapport largeur – hauteur du défaut (en jaune) sont comparés après chaque passe de forgeage. Cela permet d'évaluer le comportement du défaut par rapport au lopin. Pour les cages OB, 1 et 3 les rapports largeur – hauteur ont des valeurs proches, ce qui veut dire que les rapports de section du lopin et du défaut sont similaires en tenant compte du facteur d'échelle. Concernant la cage 2, on s'aperçoit que dans la direction de forgeage le défaut est plus déformé que le lopin.

Tableau 25 : Valeurs des mesures du défaut réalisées avec l'enrobage d'électrode

N° échantillon	3	5	7	12	14	17	19
Forgé jusqu'à la cage...	OA	OB	1	1	1	1	1
Largeur lopin (mm)	20,9	22,8	20	22,8	15,7	18,1	13,7
Hauteur lopin (mm)	29,4	22,6	23,3	14,7	16,5	12	13,3
Rapport largeur/hauteur lopin	0,7	1	0,9	1,6	1	1,5	1
Largeur défaut (mm)	2,4	3,5	3,1	5,4	2	2,3	1
Hauteur défaut (mm)	6	3,3	4,1	1,2	2	1	1,6
Rapport largeur/hauteur défaut	0,4	1,06	0,76	4,5	1	2,3	0,63

Au vu des résultats concernant les rapports des différentes dimensions, il est possible de conclure que la déformation n'est pas uniforme dans la section de la barre contenant un défaut artificiel. L'objectif de suivre l'évolution d'un défaut au cours de la déformation est atteint.

3.4 Validation expérimentale du mode opératoire

Après les premiers essais de validation des difficultés d'ordre opératoires sont à noter et plusieurs interrogations restent en suspens. Les difficultés opératoires concernent la mise en place du lopin entre les outils. En effet il est difficile de maintenir manuellement le lopin horizontal entre les matrices et d'estimer l'angle de rotation à effectuer entre chaque passe de forgeage afin de respecter les conditions de laminage où la rotation est de 90°.

Des interrogations portent ainsi sur les aspects thermiques. La température du lopin après chaque étape de forgeage n'est pas mesurée lors des essais de validation car la température de 1100°C retenue n'est pas significative des conditions de laminage. Cependant, au vu des faibles dimensions du lopin il apparaît évident que des problèmes thermiques vont intervenir notamment à cause de la durée du cycle qui est relativement long à cause de la technologie de la presse hydraulique.

Pour résumer, les difficultés rencontrées et les interrogations énoncées sont :

- Mise en position du lopin entre les matrices
- Estimer l'angle de rotation effectué entre chaque passe de forgeage
- Cycles thermiques du lopin
- Vitesse de mise en forme

Pour remédier aux difficultés opératoires relevées lors des premiers essais la solution envisagée est de robotiser les opérations de forgeage. Le robot permettra d'assurer la répétabilité de la mise en position du lopin entre les matrices et la rotation à 90° entre chaque passe de forgeage.

Les solutions envisagées pour répondre aux questions concernant la thermique sont :

- Utiliser la presse à vis
- Chauffer les outils
- Réaliser une opération de freinage

Contrairement à la presse hydraulique, la technologie de la presse à vis offre des vitesses de mise en forme plus élevées et variables. Le forgeage manuel n'est pas possible sur la presse à vis. La robotisation mise en place pour assurer la répétabilité des opérations de forgeage permettra également de mettre en forme le lopin avec cette technologie de machine. Les temps de contact outil/matrice sont réduits, réduisant ainsi les échanges thermiques.

Une autre solution, en complément de celle énoncée précédemment, est d'utiliser une rampe de chauffe pour chauffer l'outillage et l'attente entre chaque passe de forgeage se fera sans contact avec l'outillage.

Enfin la dernière solution envisagée est de réaliser une opération de freinage à la fin de la dernière passe de forgeage. L'essai de forgeage mis en œuvre permet de représenter les passes de laminage jusqu'à la cage 5. La représentation des cages suivantes avec l'essai de forgeage est complexe notamment à cause des aspects thermiques. En effet, le diamètre du lopin forgé après la cage 13 serait de 4mm ce qui entraîne une faible inertie thermique. La

Figure 151 montre la section du lopin forgé jusqu'à la passe 13. Cette même figure montre que la section forgée étant faible, une flexion à l'extrémité du lopin peut se produire à cause de la faible rigidité en flexion.

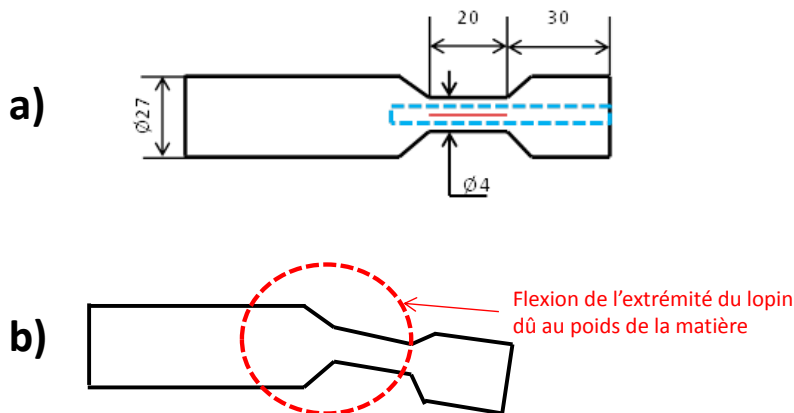


Figure 151 : a) Diamètre du lopin après le forgeage dans la cage 13 ; b) risque de flexion à l'extrémité du lopin à cause du poids de la matière

L'opération de frettage consiste à prélever une frette dans un lopin forgé et à l'insérer dans un lopin initial afin de lui faire subir de nouvelles déformations, ce qui permet de représenter les passes de laminage suivantes. Le prélèvement de la frette est représenté en bleu sur la Figure 151. Les étapes de l'opération de frettage sont détaillées sur le chronogramme de la Figure 152. Les conditions opératoires ne sont pas représentatives des conditions de laminage. En effet, le cycle thermique suivi par le lopin forgé est différent de celui de la barre dans le laminoir à cause des étapes intermédiaires de refroidissement et de réchauffage. En suivant un cycle thermique différent la microstructure du lopin est également impactée. De plus des défauts peuvent être générés à l'interface de la frette et du lopin comme le montre la Figure 153. Sous l'effet de la déformation la frette peut vouloir sortir de son logement ou dans un autre cas celle-ci ne se déforme pas ou peu contrairement au lopin, ce qui engendre un décollement. Il est nécessaire de vérifier et valider le mouvement relatif de la frette par rapport au moyeu afin d'éviter les phénomènes de glissement et/ou de décollement. Si les matrices des passes supérieures à 5 venaient à être réalisées il faudrait les concevoir en partant d'un diamètre de lopin initial de 27mm. Le facteur d'échelle pour cette deuxième série de matrices est modifié.

La succession d'essais envisagée pour valider le dispositif expérimental est présentée sur la Figure 154.

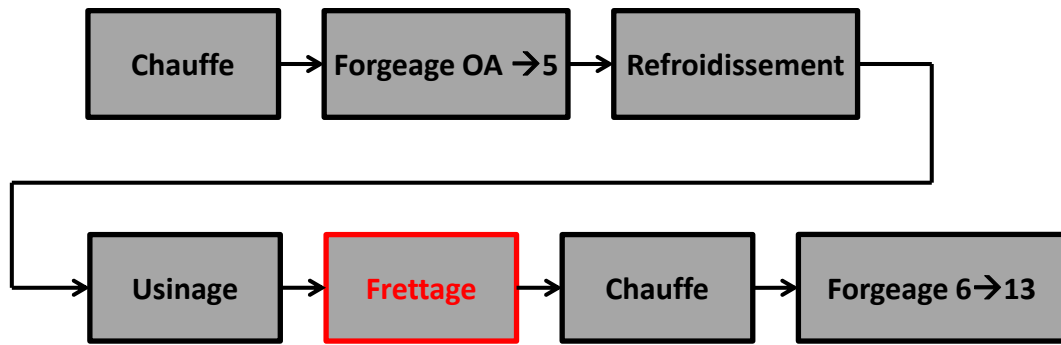


Figure 152 : Chronogramme des étapes de l'opération de frettage

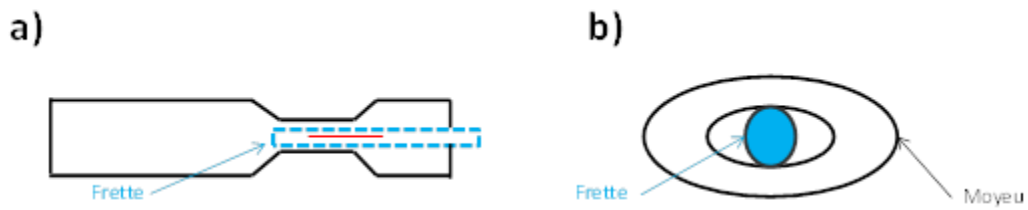


Figure 153 : Illustration a) du glissement et b) du décollement de la frette/moyeu

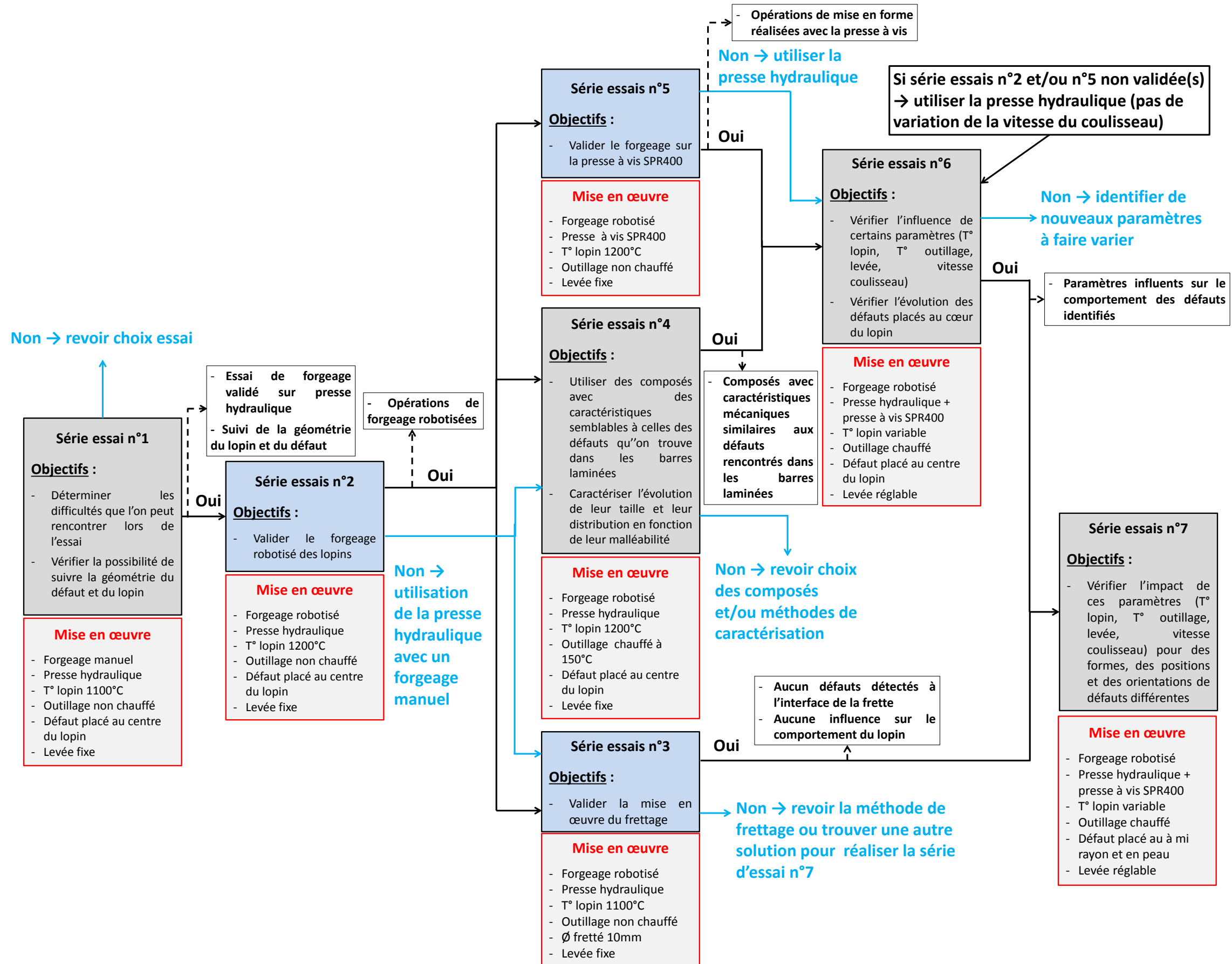


Figure 154 : Plan des divers essais à réaliser

3.4.1 Robotiser l'opération de forgeage

3.4.1.1 Objectifs et mise en œuvre

La série d'essais n°2 consiste à robotiser les opérations de forgeage. La robotisation du forgeage a deux objectifs. Le premier est d'assurer la répétabilité et la reproductibilité des opérations, chose qui est difficilement réalisable avec un forgeage manuel. Le second objectif de la robotisation est de pouvoir utiliser la presse à vis pour réduire le temps de cycle et ainsi remédier en partie aux problèmes thermiques du lopin. De plus l'attente entre chaque opération se fera sans contact avec l'outillage. Le forgeage avec la presse à vis va également permettre de faire varier la vitesse de déformation dans le lopin.

Comme le montre la Figure 155, le robot de la marque ABB est composé de 6 axes avec une capacité de manutention de 500Kg. Le robot doit maintenir et placer le lopin au-dessus de chaque gravure de l'outillage sans être en contact afin d'éviter les pertes de chaleur par conduction. De plus, il doit réaliser une rotation à 90° entre chaque cage pour reproduire l'alternance des déformations du laminage. Pour réaliser ces opérations le robot est équipé de la fonction "SoftAct" qui permet de réduire fortement la raideur des axes. Cette fonction permet ainsi au robot de suivre la déformation de la barre imposée par le mouvement de la presse. La programmation a été réalisée avec le logiciel RobotStudio©.

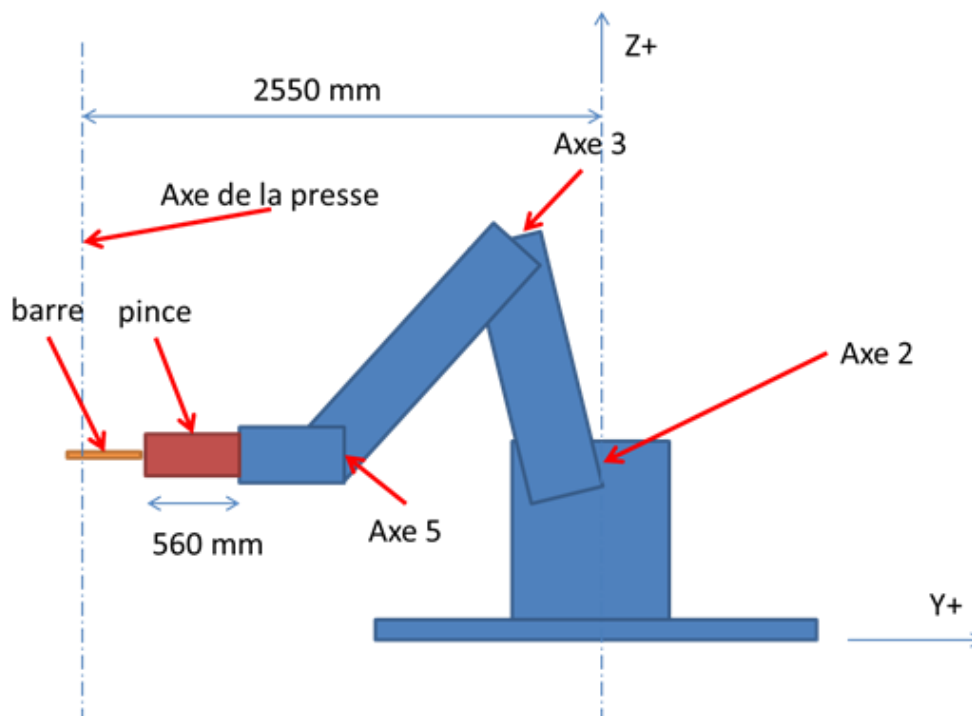


Figure 155 : Description des axes du robot ABB

La Figure 156 montre le manipulateur développé pour la préhension du lopin. Le préhenseur est actionné par l'énergie pneumatique. La longueur des mors permet de respecter

l'encombrement disponible sous la presse à vis sans entrer en collision avec les divers éléments. Une plaque d'usure en acier inoxydable est présente en bout de chaque mors afin de préserver le préhenseur des phénomènes thermiques dus à la température élevée des lopins. Pour une question de simplicité et de sécurité les premiers tests sont réalisés sur la presse hydraulique.

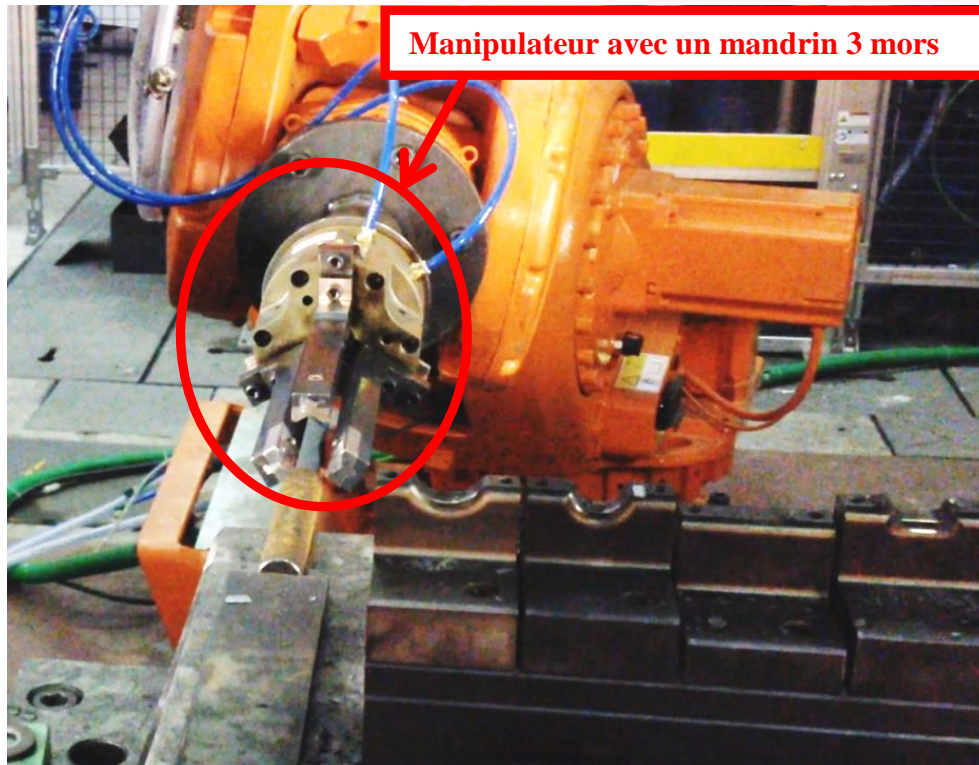


Figure 156 : Robotisation du forgeage

3.4.1.2 Répétabilité des opérations de forgeage robotisées

Au total 30 lopins sont forgés soit dix après les passes OB, 2 et 5 afin de valider la répétabilité des opérations de forgeage robotisées. La Figure 157 illustre les sections des lopins forgés après les cages étudiées.

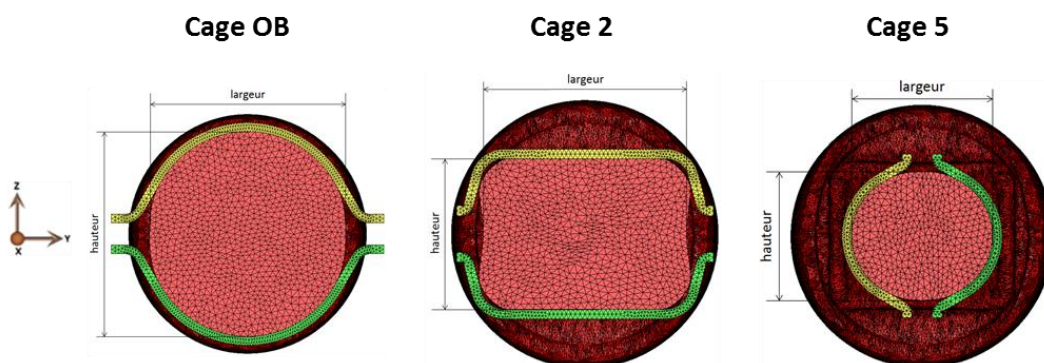


Figure 157 : Sections des lopins forgés après les cages OB, 2 et 5

L'étude de répétabilité porte sur les longueurs des lopins ainsi que la largeur et hauteur de la section forgée. Pour ce faire chaque dimension est mesurée six fois pour chaque lopin. Le Tableau 26 récapitule les six mesures de largeur réalisées sur les 10 lopins forgés après la cage OB. Pour chaque lopin la variance de répétabilité est calculée afin de caractériser la dispersion des mesures relevées.

Le test de répétabilité par la méthode de COCHRAN est appliqué pour valider la robotisation des opérations de forgeage après les cages OB, 2 et 5 [CFM12]. Le Tableau 27 présente la table de COCHRAN dont la valeur seuil retenue est 0,303 pour le cas étudié [ISO57].

Tableau 26 : Récapitulatif des six mesures de largeur pour les 10 lopins forgés après la cage OB

N° Mesure	Lopin 1	Lopin 2	Lopin 3	Lopin 4	Lopin 5	Lopin 6	Lopin 7	Lopin 8	Lopin 9	Lopin 10
1	21,2	21,4	22,07	21,58	21,58	20,92	21,45	21,7	21,94	21,98
2	21,26	21,41	22,01	21,69	21,69	21	21,33	21,68	21,92	22
3	21,19	21,44	22	21,72	21,72	21,07	21,47	21,71	22,05	21,97
4	21,26	21,42	22,03	21,7	21,7	20,98	21,41	21,6	22	21,98
5	21,21	21,44	22,05	21,68	21,68	21,01	21,44	21,65	21,97	22
6	21,22	21,41	22,06	21,6	21,6	21,05	21,52	21,73	21,88	22,08
Effectif :	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6
Moyenne :	21,22	21,42	22,04	21,66	21,66	21,01	21,44	21,68	21,96	22,00
Variance de répétabilité :	0,00090667	0,00028	0,00078667	0,00329667	0,00329667	0,00283	0,00406667	0,00221667	0,00364	0,00161667

Tableau 27 : Table de COCHRAN pour une valeur critique fixée à 5% [ISO57]

alpha = 0,05

Valeurs critiques de C (n,k) du test de Cochran = 0,05

	2	3	4	5	6	7	8	9	10
2	0.999	0.975	0.939	0.906	0.877	0.863	0.833	0.816	0.801
3	0.967	0.871	0.798	0.746	0.707	0.677	0.653	0.633	0.617
4	0.907	0.768	0.684	0.629	0.59	0.56	0.537	0.518	0.502
5	0.841	0.684	0.598	0.544	0.507	0.478	0.456	0.438	0.424
6	0.781	0.616	0.532	0.48	0.445	0.418	0.398	0.382	0.368
7	0.727	0.561	0.48	0.431	0.397	0.373	0.354	0.338	0.326
8	0.68	0.516	0.438	0.391	0.360	0.336	0.319	0.304	0.293
9	0.639	0.478	0.403	0.358	0.329	0.307	0.29	0.277	0.266
10	0.602	0.445	0.373	0.331	0.303	0.282	0.267	0.254	0.244
12	0.541	0.392	0.326	0.288	0.262	0.244	0.23	0.219	0.21
15	0.471	0.335	0.276	0.242	0.22	0.203	0.191	0.182	0.174
20	0.389	0.271	0.221	0.192	0.174	0.106	0.15	0.142	0.136
24	0.343	0.235	0.191	0.166	0.149	0.137	0.129	0.122	0.116
30	0.293	0.198	0.159	0.138	0.124	0.114	0.106	0.1	0.096
40	0.237	0.158	0.126	0.108	0.097	0.089	0.083	0.078	0.078

Le Tableau 28 recense les valeurs statistiques C du test de COCHRAN calculées à partir des dimensions relevées sur la longueur et la section des lopins après chaque passe de forgeage. Ces valeurs sont comparées à la valeur seuil de 0,303 définie dans la table de COCHRAN. Toutes les dimensions étudiées ont des valeurs statistiques inférieures à la valeur critique, ce qui assure une homogénéité des variances de répétabilité. A travers les résultats présentés la robotisation des opérations de forgeage est validée pour les cages OB, 2 et 5.

Tableau 28 : Récapitulatif des valeurs de la statistique C du test de COCHRAN pour les différentes dimensions mesurées qui sont comparées à la valeur critique afin de déterminer la répétabilité ou non des opérations de forgeage robotisées

	Dimension	Statistique C	Valeur critique	Répétabilité
Cage OB	Longueur	0,222	0,303	OUI
	Largeur	0,177	0,303	OUI
	Hauteur	0,18	0,303	OUI
Cage 2	Longueur	0,242	0,303	OUI
	Largeur	0,281	0,303	OUI
	Hauteur	0,26	0,303	OUI
Cage 5	Longueur	0,26	0,303	OUI
	Largeur	0,223	0,303	OUI
	Hauteur	0,17	0,303	OUI

3.4.2 Valider l'opération de frettage

3.4.2.1 Principe du frettage

Le principe du frettage est d'assembler deux pièces à l'aide d'un ajustement serré. La pièce extérieure est appelée "moyeu" et la partie intérieure est dite "frette". La frette et le moyeu peuvent être réalisés avec deux matériaux différents. De manière conventionnelle, le montage n'est pas possible à la main ni même à la presse. La solution de montage est de dilater le moyeu et dans certains cas de contracter la frette. Cette opération est réalisée principalement sur des pièces de révolution avec un diamètre supérieur à 50mm.

3.4.2.2 Dimensionnement et mise en œuvre de l'opération de frettage

La mise en œuvre du frettage est représentée sur la Figure 158. Le défaut est placé au cœur du lopin initial de diamètre Ø27mm (1). Le lopin avec le défaut placé à cœur subit des déformations (2). Après la cage 5 le diamètre du lopin forgé est de 13,5mm. La frette prélevée a un diamètre de 10mm afin d'avoir un minimum de matière à enlever (3). De plus, cela permet d'avoir un diamètre de frette identique pour toutes les cages. La frette est ensuite insérée dans un lopin initial de Ø27mm (4). Le lopin contenant le défaut déformé peut à nouveau être chauffé pour subir de nouvelle déformation.

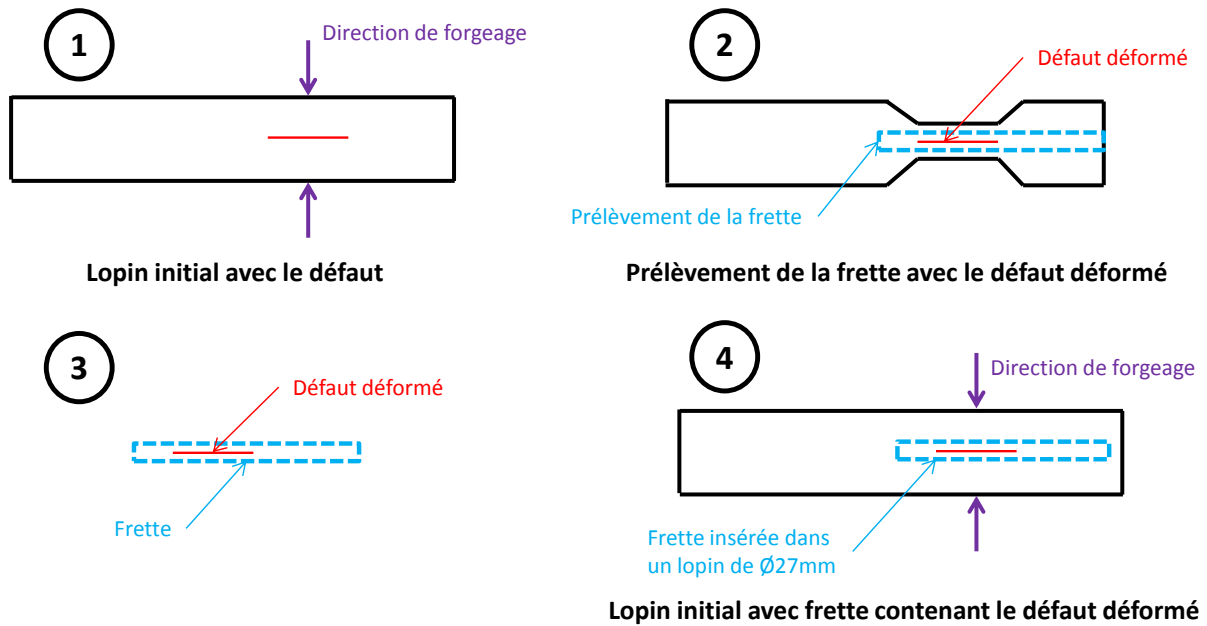


Figure 158 : Etape de l'opération de frettage

Dans un premier temps, quatre ajustements ont été retenus à partir d'abaques ($\text{Ø}10\text{H}8\text{u}7$, $\text{Ø}10\text{H}8\text{x}7$, $\text{Ø}10\text{H}7\text{p}6$, $\text{Ø}10\text{H}7\text{m}6$) pour vérifier la capacité de montage. La Figure 159 illustre l'assemblage de la frette et du moyeu et les valeurs des ajustements retenus sont mentionnées dans le Tableau 29. Pour les deux premiers ajustements il est nécessaire de dilater le moyeu (350°C) et de contracter la frette (-180°C) pour assurer le montage contrairement aux ajustements $\text{Ø}10\text{H}7\text{p}6$ et $\text{Ø}10\text{H}7\text{m}6$ pour lesquels aucune préparation n'est requise. Un point de soudure sera ajouté pour éviter à la frette de sortir du moyeu.



Figure 159 : Illustration de l'exemple du montage de la frette dans le moyeu pour un ajustement $\text{Ø}10\text{H}7\text{m}6$

Tableau 29 : Valeurs des ajustements retenus pour le moyeu et la frette

Ajustement	Moyeu		Frette	
	Valeur ajustement mini (mm)	Valeur ajustement maxi (mm)	Valeur ajustement mini (mm)	Valeur ajustement maxi (mm)
$\text{Ø}10\text{H}8\text{u}7$	0	0,022	0,028	0,043
$\text{Ø}10\text{H}8\text{x}7$	0	0,022	0,034	0,049
$\text{Ø}10\text{H}7\text{m}6$	0	0,015	0,006	0,015
$\text{Ø}10\text{H}7\text{p}6$	0	0,015	0,015	0,024

Le jeu mini des quatre ajustements est comparé afin de déterminer celui qui permettra d'assurer le meilleur maintien de la frette dans le lopin. Les valeurs du jeu mini et maxi sont mentionnées dans le Tableau 30 pour chaque ajustement. Les montages avec les ajustements demandant une dilatation du moyeu et une rétractation de la frette sont éliminés à cause des difficultés de réalisation. Dans notre cas l'ensemble fretté ne sert pas à transmettre un couple comme dans les montages conventionnels mais à permettre un contact minimum pour que la frette reste dans son logement à haute température (1250°C).

Les ajustements Ø10H7m6 et Ø10H7p6 sont encore en lice car le premier permet une mise en œuvre aisée mais n'assure pas un montage serré dans 100% des cas frettés et le second assure un maintien de la frette dans le lopin mais le montage doit être réalisé sous presse. Des tests sont réalisés afin de vérifier le comportement des frettes au cours de la déformation. Les frettes sont testées sur les cages OA à 5 qui ont des géométries ovale-rond-carrée alors qu'elles ne seraient utilisées que pour les cages 6 à 13 qui alternent des géométries ovale-rond. La réalisation du test sur les premières cages a permis de vérifier le comportement de la frette avec une complexité des déformations due à la géométrie des cages. Le point de soudure est toujours présent pour empêcher à la frette de sortir de son logement lorsque le lopin est déformé. La Figure 160 illustre les étapes de la réalisation du frettage.

Tableau 30 : Jeu mini et maxi des ajustements retenus pour le moyeu et la frette

Ajustement	Jeu mini (mm)	Jeu maxi (mm)
Ø10H8u7	-0,006	-0,043
Ø10H8x7	-0,012	-0,049
Ø10H7m6	0,009	-0,015
Ø10H7p6	0	-0,024

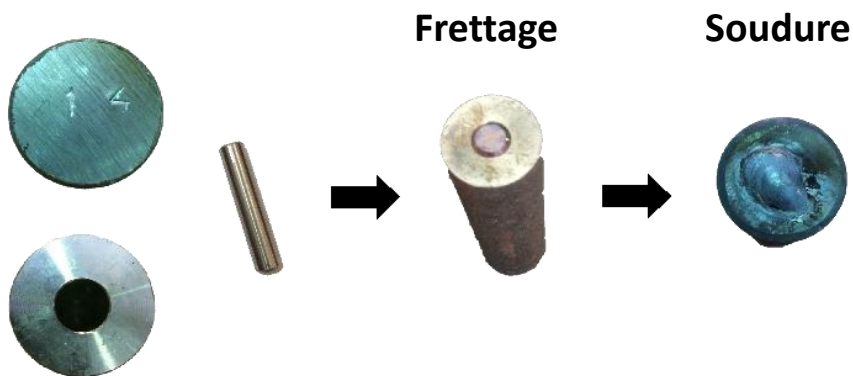


Figure 160 : Réalisation de l'opération de frettage

Pour valider l'objectif fixé précédemment, la frette et le moyeu seront réalisés dans un même matériau (C17) avec deux ajustements différents. Pour connaître l'influence du

matériau fretté sur le comportement du lopin lors du forgeage, des frettes en acier 100C6 et 316L sont usinées. Le choix de ces deux matériaux vient du fait que leur contrainte d'écoulement à chaud est plus élevée que l'acier C17. Le Tableau 31 liste les données des frettes.

Tableau 31 : Ajustements des frettes

Matériau des frettes	Ajustement
XC17	Ø10p6
XC17	Ø10m6
316L	Ø10m6
100C6	Ø10m6

Afin de limiter la mise en œuvre des essais, 9 lopins sont forgés pour chaque type de frettes :

- 3 après la cage OB
- 3 après la cage 2
- 3 après la cage 5

Les levées entre les matrices sont mentionnées dans le Tableau 32.

Tableau 32 : Levées entre les matrices pour valider l'opération de frettage

N° Cage	OA	OB	1	2	3	4	5
Levée essai forgeage (mm)	2,5	2,5	19	3,5	5,5	1,5	1,5

3.4.2.3 Contrôle du comportement des frettes

Pour analyser l'influence de la frette placée au cœur du lopin, les taux de corroyage du lopin global et de la frette sont comparés aux taux de corroyage du lopin simulé. Pour cela, les lopins sont découpés puis polis afin de visualiser la frette dans le sens longitudinal. Chaque lopin découpé est pris en photo. Les images sont ensuite traitées avec le logiciel IMAGE J pour déterminer les valeurs des sections du lopin et de la frette qui serviront à calculer les taux de corroyage. Un régle est placé dans le même plan que la surface du lopin afin de déterminer l'échelle de mesure dans IMAGE J. La Figure 161 montre le dispositif mis en place.

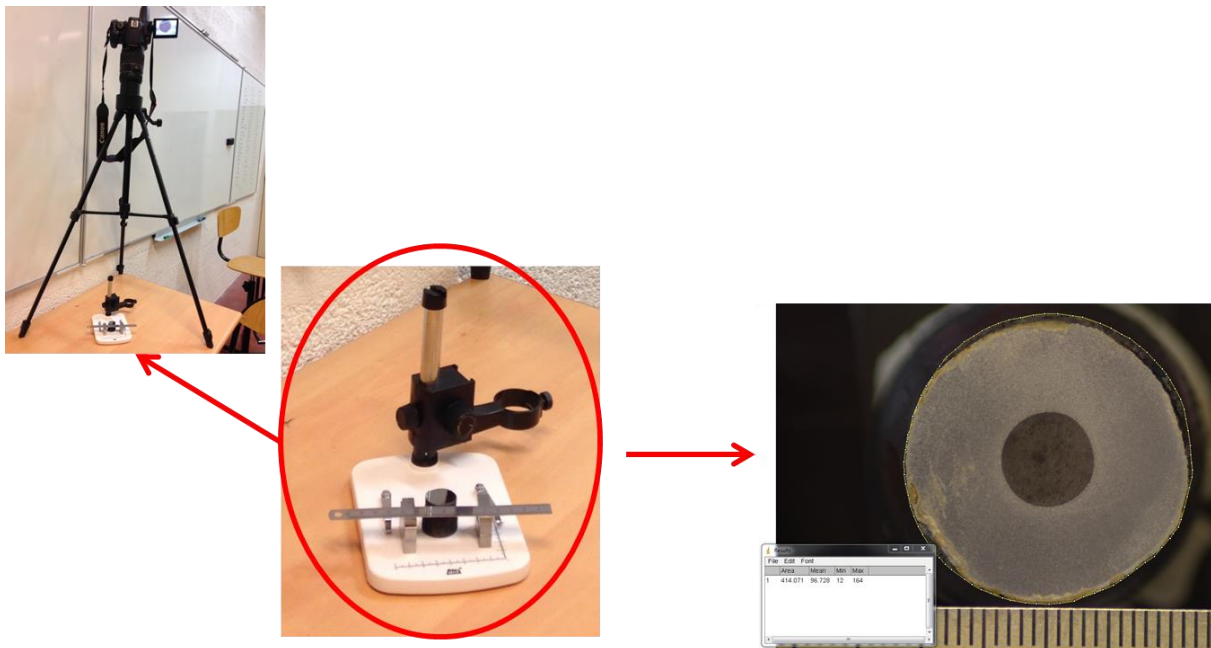


Figure 161 : Dispositif pour la prise de vue et traitement de l'image avec le logiciel IMAGE J (frette en 100C6)

Le graphique de la Figure 162 représente l'évolution du taux de corroyage cumulé des lopins forgés avec les frettes placées au centre et du lopin simulé. En simulation le lopin atteint un taux de corroyage d'environ 4 après la cage 5. Par comparaison, les taux de corroyage des lopins forgés ont les mêmes niveaux et suivent la même tendance que ceux du lopin simulé avec le logiciel Forge.NXT®.

Sur le graphique de la Figure 163 est ajouté le taux de corroyage cumulé des frettes placées au cœur du lopin. Le taux de corroyage des frettes en C17 n'apparaît pas sur le graphique car après forgeage elles ne sont plus visibles. Pour la cage OB et 2, les niveaux de corroyage entre les lopins forgés et les défauts sont similaires. Cependant pour la cage 5, le taux de corroyage des frettes est nettement plus élevé que celui des lopins forgés lorsque celles-ci sont réalisées dans un matériau avec une limite d'écoulement plus élevée de celui du moyeu.

L'étude présentée permet de conclure que les frettes réalisées en acier C17 sont soudées avec le lopin et qu'elles n'ont aucune influence sur le taux de corroyage global du lopin. Cependant les frettes réalisées dans un autre matériau que celui du moyeu ont une influence sur le résultat du taux de corroyage (100C6 et 316L). La Figure 164 montre les cartographies de la déformation équivalente dans la section du lopin après les cages 2 et 5. La déformation équivalente n'est pas homogène dans la section du lopin forgé. Elle est plus élevée au cœur du lopin ce qui peut expliquer que le taux de corroyage de la frette est plus élevé que celui du lopin global.

Pour résumer les frettes doivent être replacées dans des lopins du même matériau que celui étudié. L'opération de frettage permet de continuer les étapes de forgeage bien que le chemin thermique du lopin ne soit pas identique à celui de la barre laminée.

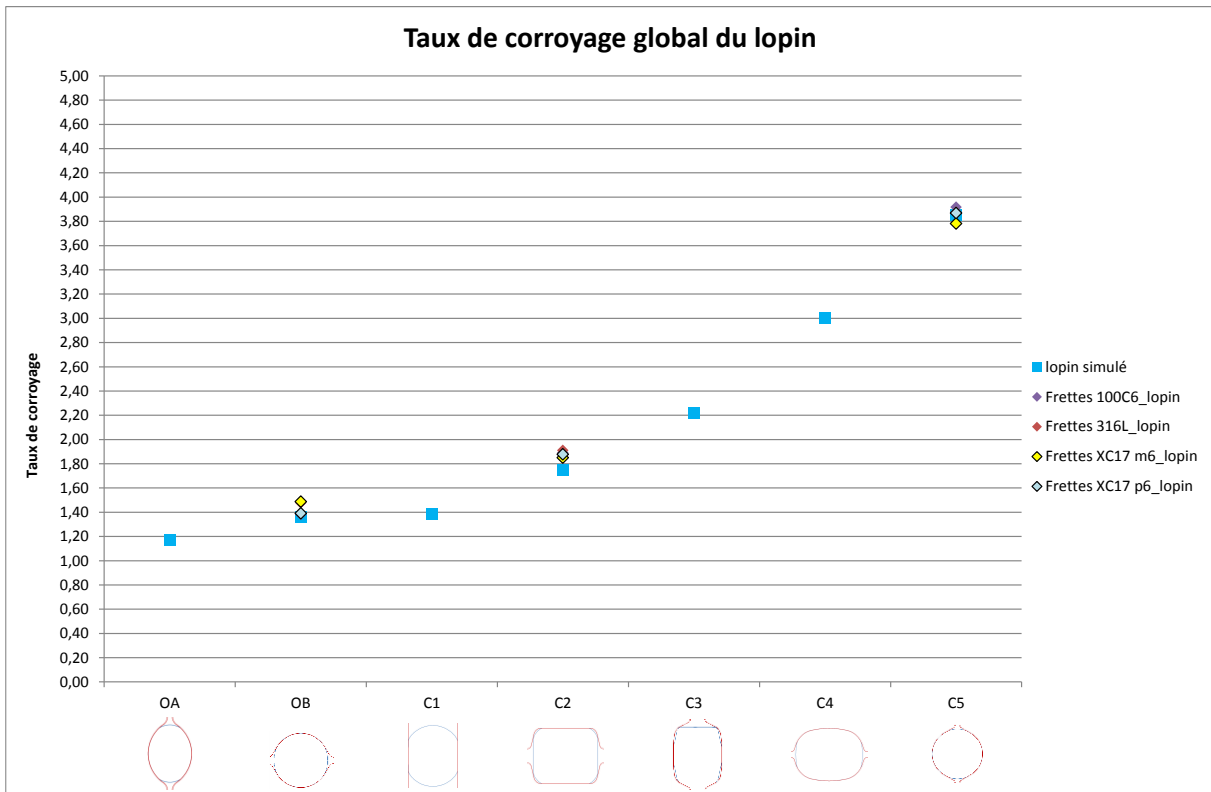


Figure 162 : Comparaison du taux de corroyage entre les lopins forgés et la barre simulée dans LUNA

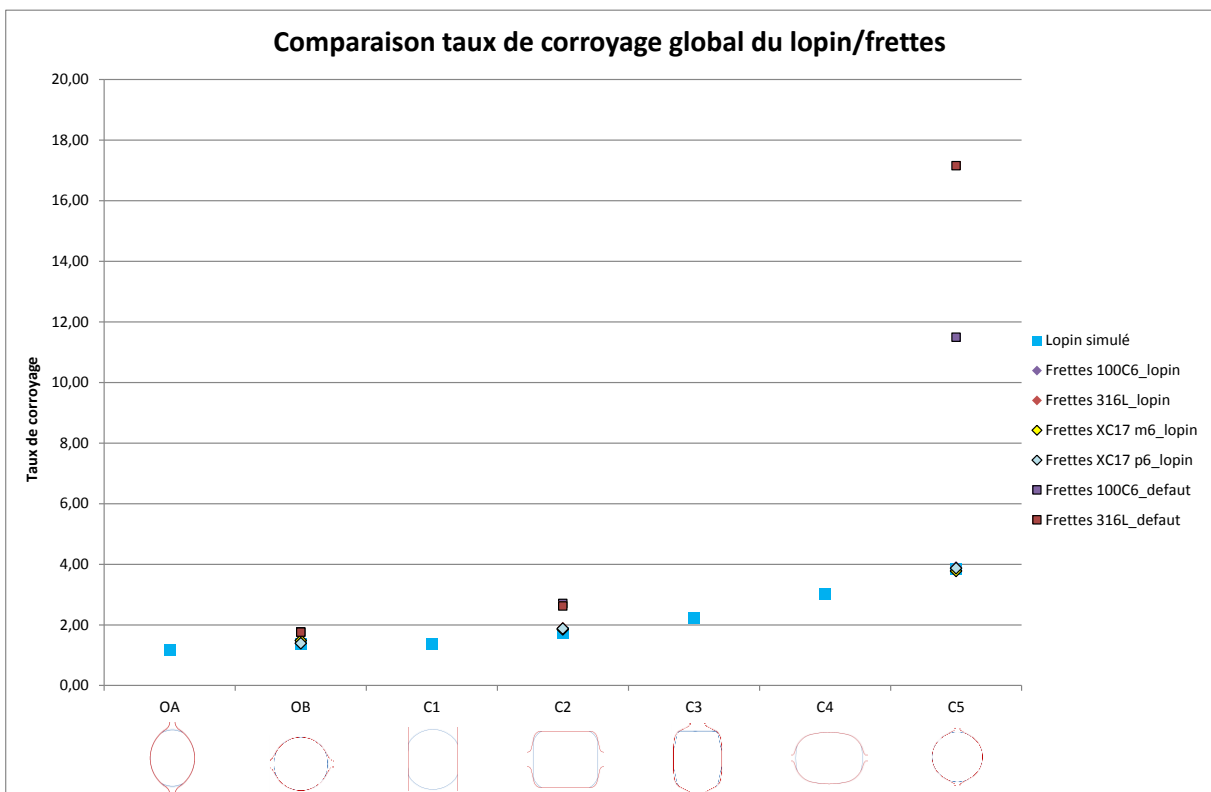


Figure 163 : Comparaison du taux de corroyage entre le lopin forgé et la frette placée à cœur

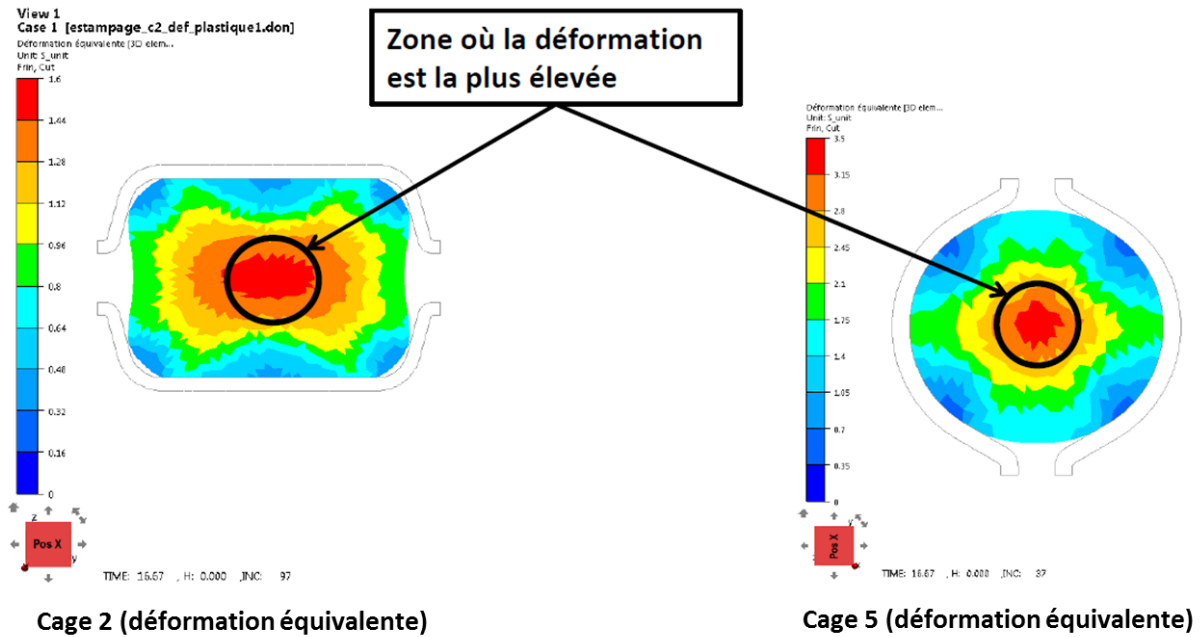


Figure 164 : Gradient de la déformation équivalente dans la section du lopin forgé

Des études micrographiques comparatives ont été réalisées sur les lopins contenant les frettes en acier C17 avec un ajustement serré type m6. Une attaque au Nital a fait ressortir la microstructure. La Figure 165 montre la microstructure des lopins à cœur ne contenant pas de frettes après les cages OB, 2 et 5 tandis que la Figure 166 montre la microstructure des lopins avec frette. La frette déformée n'est plus observable à partir de la cage OB et aucune interface n'est visible entre la frette et le lopin. Par comparaison, la taille de grain entre le lopin forgé avec et sans frette est identique pour une même cage. De plus, le taux de corroyage appliqué à chaque passe de forgeage entraîne une diminution de la taille de grain de façon homogène dû à la recristallisation. L'ajustement m6 peut être retenu pour l'opération de frettage car aucun défaut n'apparaît à l'interface de la frette et la mise en œuvre est plus aisée qu'avec les autres ajustements.

Après avoir vérifié l'évolution des taux de corroyage (lopin et frette) et l'état de la microstructure en peau et à cœur du lopin on peut dire que l'opération de frettage pour un même matériau est validée. La frette ne semble pas apporter de grandes différences au cours de l'essai comme en témoigne la Figure 166. Par contre, on ne sait pas ce qu'il en est du cycle thermique : refroidissement – réchauffage. En effet, lors de la chauffe et des opérations de forgeage le lopin a une structure austénitique. Il est ensuite refroidi afin de prélever la frette et la microstructure est principalement constituée de perlite et de ferrite. Le lopin avec la frette est ensuite réchauffé pour réaliser les opérations de forgeage suivantes. A ce moment-là on peut se demander si la taille des grains n'a pas été influencée. L'idée pour contrôler l'influence du cycle thermique sur la microstructure du lopin serait par exemple de le forger jusqu'à la cage 2, de prélever une frette et de l'introduire dans un lopin initial de Ø27mm pour le forger seulement dans la cage OA. On pourrait alors contrôler la microstructure et la comparer à un lopin sans frette forgé directement dans la cage OA afin d'évaluer l'influence de cette opération.

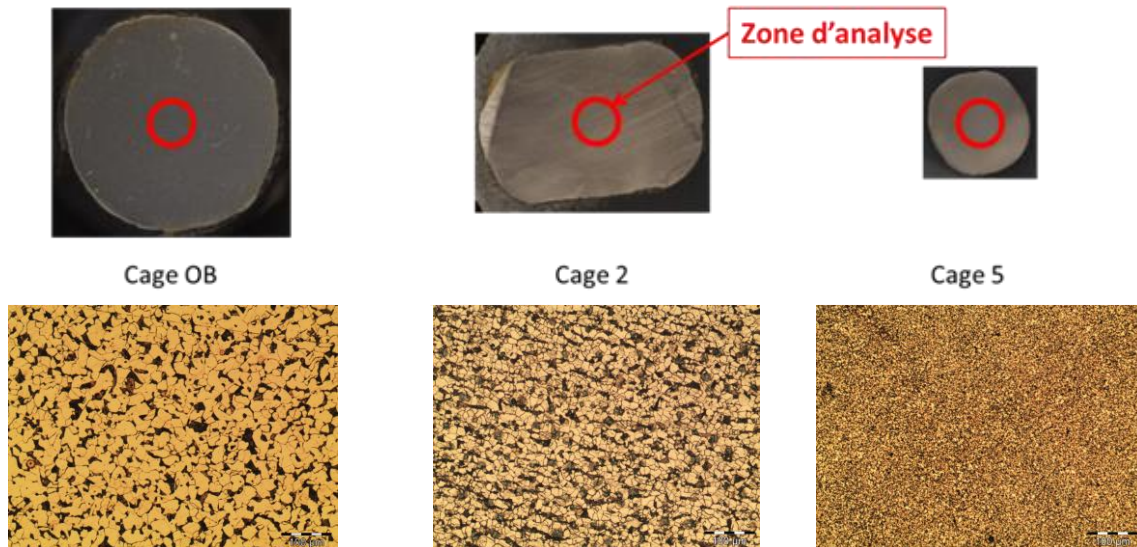


Figure 165 : Micrographies réalisées au cœur du lopin contenant une frette après les cages OB, 2 et 5

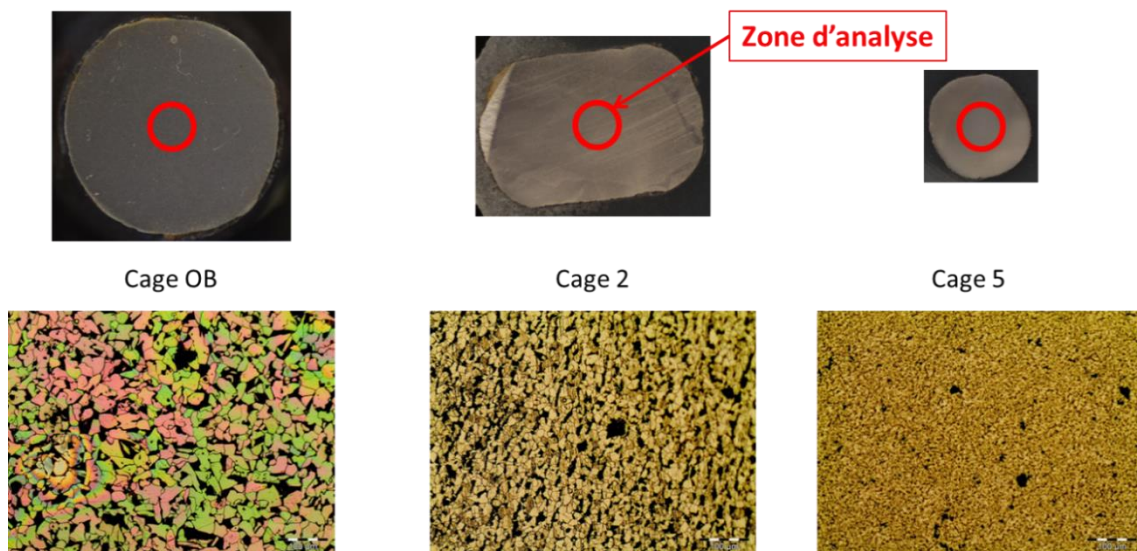


Figure 166 : Micrographies réalisées au cœur du lopin ne contenant pas de frette après les cages OB, 2 et 5

3.5 Conclusions

Le chapitre 3 a présenté la mise en place d'un essai de forgeage afin de reproduire des sollicitations thermomécaniques similaires à celles rencontrées dans la barre laminée. Cet essai à échelle laboratoire va permettre de comprendre expérimentalement les phénomènes thermomécaniques influant sur les défauts présents au sein des produits mis en forme industriellement. Deux types d'essais sont présentés : les essais permettant d'exercer des sollicitations mécaniques monotones comme l'essai de compression et le bi-poinçonnement et d'autres permettant de reproduire l'alternance des directions de déformation comme l'essai de forgeage libre. La comparaison numérique des amplitudes de déformations et de températures subies dans le lopin forgé et la barre laminée a permis dans un premier temps d'en retenir trois, l'essai de compression avec le dilatomètre, le bi-poinçonnement et le forgeage libre avec des matrices de formes. Ce dernier a été retenu car en plus de reproduire des sollicitations thermomécaniques semblables au laminage, il permet une alternance des directions de déformation entre chaque passe de forgeage. Ce phénomène d'alternance peut avoir une forte influence sur l'évolution des défauts internes et il n'est donc pas négligé. Un écart entre les déformations subies dans le lopin forgé et le produit laminé est à noter dû notamment à un cumul successif d'écart de déformation à chaque passe de forgeage. Il est possible de diminuer ces écarts en faisant varier les levées entre les matrices qui agissent sur les taux de déformations appliqués aux produits forgés.

L'essai retenu est adapté à la fois à la presse hydraulique et à la presse à vis présentes à l'atelier afin de faire varier les paramètres de mise en forme et connaître leurs influences sur le comportement des défauts internes. L'encombrement de la table de la presse à vis permet de représenter les sept premières cages du laminoir. L'outillage développé comporte des jeux de matrices interchangeables dont les parties actives possèdent les formes des gravures des cylindres de laminage à échelle 1/10. Un contrôle dimensionnel de l'outillage par mesures optiques est réalisé afin de prévenir tout écart de mesures relevé sur les lopins forgés.

Cette étude a permis de mettre en œuvre un outil expérimental avec son modèle numérique. Cependant les premiers essais ont permis de déceler quelques difficultés opératoires comme la mise en place manuelle des lopins entre les matrices en effectuant une rotation à 90° entre chaque passe de forgeage. La faible section du lopin mis en forme entraîne une faible inertie thermique et donc un refroidissement rapide ce qui empêche la représentation des cages de laminage suivantes. De plus, la technologie de la presse hydraulique entraîne des temps de cycles importants. Plusieurs solutions sont envisagées afin de remédier à ces problèmes. La première solution consiste à robotiser le forgeage afin d'assurer une bonne répétabilité des opérations de mise en forme et de permettre l'utilisation de la presse à vis dont les temps de cycles sont raccourcis comparés à la presse hydraulique. De plus une opération de frettage est envisagée afin de contrer les difficultés concernant les aspects thermiques et ainsi représenter le laminage après la cage 5. Cette opération consiste à prélever une frette comportant le défaut en fin de forgeage pour l'introduire dans un lopin initial et ainsi lui faire subir de nouvelles déformations.

L'outillage mis en place offre la possibilité de déformer des lopins contenant des défauts internes soit issus des produits bruts de coulée ou alors créés artificiellement. Les

divers essais menés en faisant varier les conditions opératoires sont présentés dans le chapitre suivant. Les essais réalisés donnent des indications sur l'influence des paramètres thermomécaniques sur le comportement des défauts. Des contrôles non destructifs par ultrasons et rayons x sont également présentés pour détecter et suivre ces défauts.

Références bibliographiques

[ISO57] : ISO5725-2, Exactitude (justesse et fidélité) des résultats et méthodes de mesure, 1994.

[CFM12] : Métrologie Collège Français de Tests de Cochran et de Grubbs, 2012.