
Essais expérimentaux dans le cas d'un forgeage avec une source de vibration

4.1 Introduction

Ce chapitre décrit la procédure expérimentale utilisée dans le cas du forgeage par vibration. Au cours du procédé de forgeage, des vibrations avec différentes formes d'ondes sont appliquées. L'effet de la vibration sur le procédé de forgeage a été analysé. Il s'agit d'une étape importante afin de comparer nos résultats avec ceux expliqués dans le chapitre 3.

Il a été observé lors de l'étude bibliographique (chapitre 2) qu'il est possible d'appliquer des vibrations avec une source de vibration unique dans la direction axiale (réduction de la hauteur de la pièce) ou radiale (perpendiculaire à l'axial) au cours du procédé de forgeage. Les deux méthodes ont montré leur utilité dans la réduction des efforts de déformation, comme indiqué dans le modèle d'analyse FEM présenté [8]. En simulation, il est facile d'appliquer des vibrations radiales, mais en réalité la conception et la modélisation n'est pas pratique. En effet, la plupart des travaux réalisés dans le domaine du forgeage par vibration ne s'applique que dans le cas du forgeage axial.

Dans le chapitre précédent, un modèle analytique dans le cas du forgeage par vibrations dans le sens axial a été développé, un dispositif expérimental a été également conçu dans ce but.

4.2 Objectif

Les objectifs principaux de ce chapitre sont:

- Confirmer que les modèles analytiques développés marchent dans les conditions réelles.
- Déterminer les limites de ces modèles dans les conditions réelles.

4.3 Description de l'installation expérimentale

Le dispositif expérimental utilisé pour la réalisation d'expériences se compose de deux moyens :

- Lloyd LR30K la machine de test universelle et ZWICK / Roell 1200,
- Dispositif de vibration et de génération de forme d'onde avec l'alimentation.

Les expériences ont été effectuées sur la machine Lloyd ZWICK / Roell Z1200 et une configuration spéciale a été utilisée pour l'induction de vibration dans la matrice inférieure.

La matrice supérieure se déplace avec une vitesse uniforme de haut en bas, dans le but d'effectuer l'opération de forgeage, tandis que la matrice inférieure oscille suivant un modèle de vibration. La vibration est pilotée via un actionneur piézo-électrique, ce dernier est relié à un générateur de fréquence qui fournira des vibrations sous forme de tension.

4.3.1 Machine de Lloyd LR 30kN

La machine d'essai LR30K combine haute performance, souplesse et facilité d'utilisation. Elle est idéale pour des applications jusqu'à 30 kN, et conçue également pour des tests de qualité et des tests en plusieurs étapes. La machine utilise des capteurs de haute précision interchangeable XLC.

4.3.2 ZWICK/Roell Z1200

Afin de réaliser des expériences avec des pièces plus rigides (l'aluminium et le cuivre), nous avons utilisé une machine d'essai lié au sol ZWICK Roell Z1200.

Le dispositif de production de vibrations et de forme d'onde est constitué de deux parties principales.

- Un montage mécanique spécial qui permet la génération de vibration dans une direction spécifique (pot vibrant).
- Une alimentation électrique pour l'actionneur piézoélectrique.

La signification et l'utilisation de ces deux parties sont présentées dans les sections 4.3.2.1 et 4.3.2.2.

4.3.2.1 Pot Vibrant

L'actionneur piézo-électrique est intégré dans le système pour faire vibrer la matrice inférieure. Pour éviter tout endommagement mécanique, l'actionneur piézo-électrique doit être chargé le long de son axe longitudinal. Pour ce faire, un montage mécanique spécial a été conçu pour générer des vibrations.

Ce dispositif mécanique (Figure 4-4) permet d'appliquer des vibrations dans la direction souhaitée et supprime tous les efforts sur l'actionneur piézoélectrique dans les autres directions. Un seul actionneur piézo-électrique est monté au centre du tube interne fixé au plateau supérieur. Un support avec le plateau supérieur peut déclencher le découplage cinématique nécessaire pour l'actionneur. Le plateau inférieur est encastré au tube extérieur. Les lames flexibles relient le tube intérieur au tube extérieur. Six lames divisées en deux

sous-ensembles assurent un glissement sans frottement. Le dimensionnement des lames est réalisé pour limiter la dissipation d'énergie lors de la déformation. Le système est donc élastique et prend toutes les forces exercées sur la structure de la matière. L'actionneur piézo-électrique est enfin soumis à des vibrations par le support de pointe, le tube intérieur et le plateau supérieur par rapport au tube extérieur.

4.3.2.2 Alimentation Electrique

Le bloc d'alimentation est conçu pour générer des formes d'ondes de tensions élevées à partir d'une alimentation à tension continue standard. Le schéma du circuit d'alimentation électrique de l'actionneur piézo-électrique est représenté dans la Figure 4-6. Il se compose de deux étages, à l'aide d'un onduler de 3 phases standard (Semikron).

Tout d'abord, la tension continue (tension maximale de 150 V) reliée au nœud U est augmenté par une impulsion convertisseur CC / CC, qui est réalisée avec l'un des trois bras disponibles. En utilisant un rapport cyclique de 0,17, le condensateur DC de l'onduleur atteint théoriquement 900 V. Dans la pratique et en raison des pertes diverses dans les commutateurs, la tension atteinte était de 870 V.

Le second étage est constitué d'un convertisseur abaisseur de tension CC / CC avec un rapport cyclique variable en vue de réaliser la forme d'onde désirée (bras relié au nœud V). En raison de la nature capacitive de l'actionneur piézo-électrique, une inductance en série est nécessaire. Pour éviter des pertes fer et des effets de saturation, une inductance de bobine d'air de 10 mH résistante à 1000 V a été réalisé. Cette solution était nécessaire pour fournir une dynamique suffisante. La fréquence PWM des commutateurs est de 10 kHz, et l'association de l'inductance de l'air avec la capacité de l'actionneur piezomécanique est de 1 kHz dans le pire des cas (la capacité de l'actionneur piezomécanique 1000/35/40 étant 1,6 pF). Ceci fournit une réponse rapide et de haute précision pour l'alimentation en courant alternatif.

4.3.3 Capteurs utilisés pour les mesures de données

Les principaux capteurs et instruments utilisés pour mesurer les données sont présentés dans le tableau 4-3.

4.4 Matériaux utilisé pour les expérimentations

Trois matériaux ont été utilisés dans les expériences : la plasticine, l'aluminium et le cuivre. La plasticine est utilisée initialement comme un matériau test, l'aluminium et le cuivre ont

été introduit après pour observer l'effet positive de l'utilisation de la vibration dans les cas d'autre matériaux.

4.4.1 Plasticine (pièce cylindrique avec $d=50$ mm et $h=50$ mm)

Il existe de nombreux types de plasticines utilisés en forgeage par vibration. Les propriétés physique et chimiques du matériau ne varient pas beaucoup en fonction des types (k, m et n : mentionné au chapitre 3). Les avantages d'utiliser des pièces en plasticine sont:

- Leur comportement lors de la déformation peut être assimilé à celui de l'acier à chaud à basse température,
- Elles n'ont pas besoin de grands efforts pour effectuer les opérations de forgeage,
- Elles sont faciles à modeler et à façonner.

Les pièces cylindriques faites à partir de la plasticine sont placées entre les deux matrices de la machine Lloyd et le procédé de forgeage est effectué. La pièce n'est pas mise en contact direct avec l'outillage, en effet, les différentes conditions de frottement sont vérifiées. Les expériences ont été réalisées avec du papier, d'un lubrifiant liquide (glycérine) et du talc.

4.4.2 Aluminium (pièce cylindrique avec $d=8$ mm and $h=16$ mm)

Afin de ne pas dépasser l'effort maximal de la machine Lloyd, le choix des échantillons s'est porté sur des pièces cylindriques avec un diamètre et une hauteur très petites par rapport à ceux de la plasticine.

4.4.3 Copper (pièce cylindrique avec $d=6.3$ mm and $h=8$ mm)

Le cuivre a également été utilisé dans ces expériences. Le but étant de déterminer l'influence du matériau sur ce type de procédé.

4.5 Expérimentation pour vérifier les performances du système (sans lopin)

Initialement, les expériences ont été effectuées pour vérifier le dispositif expérimental sans lopin, et surtout pour voir les effets dynamiques transférés au corps de la machine. La fréquence de résonance du pot de vibration peut être estimé. De l'évolution du déplacement, il a été constaté que le déplacement phénomène d'amplification apparaît autour de 80Hz. L'effet de l'augmentation de la fréquence et de son impact sur la matrice supérieure montre que, avec l'augmentation de la fréquence de vibration, la vibration est transmise à la matrice supérieure. Pour conclure, il existe un couplage entre la traverse (matrice supérieure) et le

châssis de sorte qu'il est préférable d'joindre la base du pot de vibration une grosse masse qui permet de filtrer les vibrations transmises au bâti.

4.6 Transfert et analyse des données

Les données sont transférées à partir du dispositif expérimental à l'aide d'une carte d'acquisition NI 6124, ensuite, elles sont stockées sous le format .tdms à l'aide du logiciel Lab View. Les données peuvent ensuite être transférées à des logiciels d'analyse de données, comme par exemple: MS Excel ou Matlab. Ces données ne peuvent pas être utilisées directement pour obtenir des résultats, il faut donc les mettre à l'échelle pour obtenir des résultats exacts. Dans le paragraphe suivant, les données analysées sont ceux relatives au déplacement, au temps et à l'effort.

4.6.1 Mesure du déplacement

Les données de déplacement sont mesurées à l'aide d'Heidenhain MT2581 qui se déplace par rapport aux deux matrices. Le déplacement doit ensuite être multiplié par un facteur de $2 \cdot 10^{-6}$ pour obtenir le déplacement exact.

4.6.2 Mesure du temps

La durée de l'opération de forgeage ne peut pas être directement calculée via la carte d'acquisition. Par contre, elle peut être calculée à l'aide de la période d'échantillonnage et le déplacement de la matrice supérieure. La période d'échantillonnage est calculée par la fréquence d'échantillonnage qui est de 2000 Hz.

$$T(\text{échantillonnage}) = 1/2000 \text{ (sec)}$$

Si N est la longueur des données de déplacement, alors le temps nécessaire pour une opération de forgeage peut être calculé à l'aide de cette formule :

$$t \text{ (procédé)} = 1/2000 * N \text{ (sec)}$$

4.6.3 Mesure de l'effort

Le capteur d'effort piézo-électrique produit une charge électrique qui varie en fonction de la charge ou de la force agissant sur l'actionneur. La charge est mesurée à l'aide du charge mètre Kistler 9351B. La force exacte appliquée peut être calculé à l'aide de la formule suivante :

$$\text{Valeur de l'effort} = \text{lecture} * \text{échelle de sortie de la tension de mesure} \text{ (N/V)}$$

L'échelle de sortie de la tension est généralement modifiée pour réaliser des expériences avec des matériaux différents.

4.7 Expérimentation pour le procédé de forgeage (avec lopin)

Les expériences ont été réalisées avec et sans vibration. Dans les sous-sections suivantes, ces expériences et leurs utilités seront décrites en détail.

4.7.1 Procédé de forgeage sans vibration

Pour vérifier les performances du dispositif expérimental, des expériences ont été effectuées dans le cas du forgeage simple, sans l'application de vibration. Ces expériences nous permettent de déterminer les propriétés du matériau utilisé et de faire la comparaison avec le procédé de forgeage avec vibration.

4.7.1.1 Expériences pour déterminer les paramètres matériaux

Ces expériences ont été réalisées pour identifier les paramètres k , n et m de la loi de comportement mentionnés dans le chapitre 3. Ces paramètres sont :

k = consistance du matériau,

n = coefficient d'écroissage de matériau et

m = coefficient de sensibilité à la vitesse de déformation

Ces paramètres sont identifiés dans le cas d'une pièce cylindrique en plasticine. Deux tests expérimentaux différents avec des vitesses de forgeage constantes ont été effectués pour la même dimension de pièce à forger.

Vitesses utilisées $v_{01} = -0.5 \text{ mm/s}$, $v_{02} = -4 \text{ mm/sec}$

Dimension de lopin en plasticine= $50 \times 51 \text{ mm}$

La méthode des moindres carrés peut être utilisée pour identifier les paramètres k , n et m ainsi que le coefficient \bar{m} , mais le modèle doit être sous la forme d'une fonction linéaire. La courbe d'effort se compose normalement de deux parties et la loi de Norton-Hoff représente la partie plastique du procédé. En réalité, la déformation de la matière suit deux étapes ; une partie élastique (au début de la courbe) et une partie plastique. Les paramètres déterminés sont montrés dans le tableau 4-5.

4.7.1.2 Expériences pour comparer les procédés de forgeage avec et sans vibration

D'autres expériences ont été réalisées pour procédé de forgeage sans vibration pour obtenir l'uniformité des résultats c'est-à-dire les tests ont été répétés pour obtenir les mêmes courbes de force pour les mêmes groupes de test. Il a été noté que les résultats obtenus à partir du même groupe d'expériences avec les mêmes paramètres ne correspondent pas.

Remarque: Les principales raisons de résultat décalage sont

- Les échantillons ne sont pas exactement de la même taille soit, il ya toujours une différence de hauteur de la pièce, dans chaque cas. Cela provoque la longueur de la courbe de force d'être différent pour chaque pièce comprimée ce qui rend la comparaison difficile,
- les surfaces des pièces à usiner ne sont pas exactement parallèles aux matrices, de sorte que les courbes de force d'obtenir ont des pentes différentes, au démarrage, provoquant ainsi la différence de la force de forgeage pour chaque pièce à usiner dans le même groupe.

Des expériences ont été réalisées pour le procédé forgeage avec des sinusoïdes, des vibrations de forme d'onde triangulaire et carré pour la gamme de fréquences comprise entre 0-125Hz. Ces expériences sont réalisées à

- Analyser l'effet des vibrations sur différents matériaux,
- Analyser l'effet des différentes formes d'onde sur la réduction de la force de forgeage,
- Validité du modèle d'analyse et de simulation a vu au chapitre 3.

Au départ, un problème a été confronté que une partie de vibration appliquée par pot vibrant à la matrice inférieure au cours du procédé de forgeage est transférée au bâti de machine de Lloyd, et le déplacement de la matrice supérieure est soumise à la vibration. Cela pourrait affecter la crédibilité des résultats obtenus. Afin d'isoler la matrice inférieure afin de minimiser la transmission des vibrations au corps de la machine, une masse rigide est placée sous la matrice inférieure pour filtrâtes les vibrations transmises à la machine.

4.7.2 Procédé de forgeage avec vibrations sinusoïdales

Les tests de forgeage ont été effectués en présence de vibrations sinusoïdales. Différents matériaux ont été utilisés comme matériau de la pièce à cet effet.

4.7.2.1 Essais de forgeage pour plasticine en présence de vibrations sinusoïdales

Initialement, les tests ont été effectués avec la plasticine comme le matériau de la pièce sur la machine Lloyd. Les paramètres géométriques et procédé pour ce test sont décrits dans le tableau 4-6.

L'amplitude de vibration des émissions plus faibles de la matrice que l'amplitude (17 μm) de la vibration est appliquée sur la matrice inférieure. L'actionneur piézo-électrique utilisé pour ce test est PZT 1000/35/40, avec l'amplitude maximale de 40 μm à 900 V. Selon les calculs théoriques, 450 V crête à crête doit correspond à 20 μm , mais en raison de l'élasticité dans le procédé, l'amplitude donnée à la matrice inférieure était de 17 μm . La raison du choix de ces valeurs de fréquence, l'amplitude est de garder le rapport de vitesse $R = 0,5$, de sorte que nous puissions comparer avec le modèle analytique.

Maintenant, si on fixe le rapport de vitesse $R = v_1/v_0$, avec v_1 est la vitesse maximum de vibrations. Nous pouvons trouver v_1 par la relation $v_1 = 2\pi fa$. Ici, a est l'amplitude moyenne et non la valeur crête à crête. Comme une valeur crête à crête d'amplitude de 17 μm est utilisée pour cette expérience, l'amplitude est de 8,5 μm . Par conséquent, R peut être calculé comme $R = v_1/v_0 = 0.57$.

De même, un autre test a été effectué avec la pièce plasticine de la même dimension et la vitesse de matrice supérieure, mais dans ce cas, aucune vibration n'a été appliquée. Il peut être vu à partir de la comparaison des procédés avec et sans vibration qui il n'ya pas de réduction de la force de forgeage. Bien que, nous obtenions un petit gain à la fin de l'essai dans l'ensemble, il n'y a pas grand avantage de l'utilisation de vibrations dans ce cas. Ainsi, l'amplitude de vibration dans le début du procédé joue un rôle important. En raison de cela, la courbe de force au début est toujours au-dessus de la courbe sans vibration. Pour $R = 0,57$, le gain de procédé de forgeage avec vibration sinusoïdale donnée par l'équation 3-31 $m = 0,116$ (pâte à modeler) est près de 1%. Ainsi, comme prévu, les résultats obtenus se situent bien dans la gamme de modèle analytique.

Afin de surmonter le problème rencontré avec deux expériences différentes, des expériences supplémentaires avec une pièce cylindrique ont été réalisées où les vibrations et pas de vibration sont appliquées au cours d'une expérience, puis la comparaison est faite entre la partie avec et sans vibration. Cela présume l'avantage supplémentaire que l'on peut obtenir le gain en forgeant à partir d'une courbe seulement.

De même, un autre test est réalisé pour en considèrent différents paramètres géométriques et de procédés. Initialement, le procédé de forgeage est démarré sans l'application de la sinusoïde et après un certain temps de vibration est appliquée. Les paramètres géométriques et du procédé pour ce test sont présentés dans le tableau 4-7. Dans le cas, $R = v_1/v_0 = 1$, la réduction obtenue est 3% dans ce cas. A partir du modèle d'analyse pour $R = 1$, le gain est de près de 4%. Notre résultat est dans la gamme de modèle analytique.

D'autres expériences ont été réalisées pour la pâte à modeler avec une légère modification. Pendant l'expérience, vibrations sinusoïdales ont été appliqués d'abord, puis elle est enlevée. Cette application et le retrait de la vibration est répétée plusieurs fois pendant le procédé. Amplitude théorique peut être calculée à partir de la tension de crête. Pour cette limite de tension piézo-électrique est comprise entre -200 / 1000 volts pour une amplitude maximale de 55 μm . Dans cette expérience, 400 V ont été appliquées de crête à crête et l'amplitude par rapport à cette valeur a été calculée a 18.3 μm . L'amplitude réelle de la vibration est mesurée à l'aide du déplacement mesuré par le capteur de déplacement. On peut voir que l'amplitude réelle de vibration est de 16 μm dans cette expérience.

Dans ce cas, le rapport de vitesse est $R = v_1/v_0 = 4$

Donc, nous sommes sortis du domaine du de modèle, puisque notre modèle est valide jusqu'à $R = 1$, mais on constate un intérêt à l'application de vibrations sinusoïdales pour le domaine élasto-viscoplastique. Le gain maximal obtenu dans ce cas est de près de 10% à la fin et il montre que l'application de vibrations sinusoïdales présente des avantages en terme de gain de réduction de la force. Comme le rapport de vitesse est supérieure à 1, le gain ne peut pas être vraiment prédire avec l'aide de notre modèle.

4.7.2.2 Essai de forgeage pour aluminium en présence de vibrations sinusoïdales

En raison du problème de rigidité liée à la machine Lloyd, il a été préférable de réaliser le test de forgeage de l'aluminium sur la machine d'essai Zwick Roell Z1200 avec une capacité de charge maximale de 1200 kN. Paramètres du matériau aluminium ont été trouvés par utilisant la même procédure que était adoptée pour la plasticine et sont donnés dans le tableau 4-9.

Les paramètres géométriques et du procédé de forgeage assisté par vibration sinusoïdale pour l'aluminium sont donnés dans le tableau 4-10.

L'avantage d'utiliser Zwick Roell Z1200 machine d'essai est que nous pouvons aller à une vitesse très faible de matrice supérieure et peut se déformer petit spécimen sans aucun problème. Dans ce test, la matrice supérieure se déplace vers le bas avec une vitesse constante de 1,5 mm / min. La tension appliquée pour ce test était de 550 V crêtes à crête, ainsi généré une amplitude de 4 μm par le pot vibration.

La courbe d'effort a été obtenue pour le procédé de forgeage avec des vibrations sinusoïdales. Nous avons choisi de rapport de vitesse que $R = 1$ afin de comparer avec le modèle analytique. L'utilisation d'amplitude dans le cas de modèle d'analyse est l'amplitude moyenne et pas de crête à crête, de sorte que $R = 1$, l'amplitude de 2 μm est utilisé.

Le gain dans la réduction de force est de 2,0% pour le procédé de forgeage lorsque vibrations sinusoïdales a été appliqué. La courbe de la force est filtrée en utilisant la moyenne mobile sur 1000 points déterminés à partir de la fréquence de vibration et de l'échantillonnage. Nous pouvons comparer nos gains avec le modèle analytique pour $m = 0,05$ et ses près de 2%, ce qui est en accord avec les résultats expérimentaux.

4.7.2.3 Essai de forgeage pour cuivre en présence de vibrations sinusoïdales

Des expériences ont également été réalisées avec du cuivre recuit cylindrique en tant que matériau de la pièce. Les propriétés des matériaux du cuivre sont décrites dans le tableau 4-11. Les paramètres géométriques et le procédé de forgeage assisté par vibration sinusoïdale pour la cuivre sont présentés dans le tableau 4-12.

La force de forgeage a été calculée et dans ce cas, le rapport de vitesse $R = 2$, le gain en réduction de la force de forgeage est près de 5-6% et le résultat ne peut être comparé avec le modèle analytique.

Cependant, nous ne pouvons pas comparer le résultat obtenu avec le modèle analytique présenté dans le chapitre 3, car il peut donner le meilleur résultat jusqu'à $R = 1$, mais l'effet de l'application de faibles vibrations peut être considéré pour le cuivre comme matériau de la pièce.

4.7.3 Procédé de forgeage assisté par vibrations triangulaire

Pour analyser l'avantage de l'utilisation nouvelle forme d'onde, de forme d'onde triangulaire est choisi pour être utilisé pendant le test. Il a été discuté plus tôt pour la vibration sinusoïdale que les forces de forgeage réduit lorsque la vibration et la vitesse de la matrice sont dans la même direction. En cas de vibrations sinusoïdales, le durée de croissance est de

décroissance est le même et nous ne pouvons pas contrôler. L'utilisation de vibrations triangulaires donne l'avantage de commande du signal temps α de service et le signal allant jusqu'à temps peut être réduit.

$$\text{Rapport cyclique} = \alpha = \frac{\text{temps de signal pour monter}}{\text{temps total de signal}}$$

Les différentes expériences des procédés de forgeage ont été réalisées avec forme d'onde triangulaire pour différents matériaux de lopin

4.7.3.1 Procédé de forgeage assisté par vibrations triangulaire pour plasticine

Comme indiqué dans le chapitre 3, tout en décrivant le détail de modèle analytique pour triangulaire procédé de forgeage assisté de vibration, il a été constaté que l'optimisation de la forme d'onde de vitesse conduit à une stratégie similaire à procédé de forgeage incrémentale.

Tout d'abord, des expériences ont été réalisées avec de la plasticine ($m = 0,116$). Le diamètre et la hauteur du lopin est 31 mm et 30,2 mm et la vitesse constante de matrice supérieur 0,25 mm / s est appliqué. La fréquence et l'amplitude de vibration respectivement appliquée dans ce cas est 15 Hz et 17 μ m. Rapport cyclique est 0,9.

Les vibrations triangulaires sont appliquées puis supprimées durant certaines périodes. Un gain de 8% est obtenu à la fin du procédé. Il est plus faible que ce qui est prédit par le modèle analytique comme indiqué ci-dessous.

$$\bar{G} = \alpha^{1-m}, \text{ pour } m = 0.116 \text{ (plasticine) et } \alpha = 0.9,$$

résultant en un gain de 8,9%. La réduction de gain peut être attribuée au temps de relaxation dans ce cas.

4.7.3.2 Procédé de forgeage pour cuivre assistée par vibration triangulaire

Les expériences pour le procédé de forgeage ont été réalisées avec l'échantillon de cuivre pour différents rapports cycliques α (0.1, 0.2 et 0.5). Ici, le résultat de l'application de vibrations triangulaire avec rapport cyclique $\alpha = 0,5$ pendant le procédé de forgeage est présenté. Le diamètre et la hauteur de la pièce à forger sont 6,3 mm et 8 mm et une vitesse constante de matrice supérieur est 0.025 mm/s est appliqué. La fréquence et l'amplitude de la vibration appliquée dans ce cas est de 50 Hz et 11 μ m.

Les vibrations triangulaires sont appliquées pendant certain temps et sont arrêtées par la suite. Il y a une réduction de seulement 3,5% seulement. La raison de ne pas obtenir le gain de la vibration triangulaire est que le temps de relaxation n'est pas grand comparé à la fréquence de l'onde.

De même, plus d'expériences avec vibration triangulaire au cours du procédé de forgeage et avec des rapports cycliques ont été effectués, mais ils ont le même problème.

4.8 Résultats et discussions

Les résultats des expériences ont été analysés dans la section 4.9. Les résultats des expériences faites sans lopin, montrent que la vibration est transmise au corps de la machine Lloyd. Dans le but de remédier à ce problème et d'isoler la machine, une masse rigide est ajoutée au-dessous du pot vibrant. Cela permet d'accroître la rigidité du système.

Les résultats obtenus via les expériences et qui n'impliquent pas l'utilisation de la vibration pendant le forgeage ont été utilisés pour :

- Déterminer les paramètres du matériau.
- Comparer les résultats des expériences utilisant un forgeage simple avec ceux obtenus en forgeage avec vibrations sinusoïdales et triangulaires.

Le premier objectif a été atteint, mais le deuxième objectif n'a pas pu l'être, pour les raisons suivantes :

- Les paramètres matériau et les paramètres géométriques varient lors de l'utilisation de deux procédés de forgeage.
- La courbe obtenue avec vibration commence toujours avec une force moyenne élevée comparée à celle obtenue sans vibration, ceci prouve que l'amplitude initiale et la fréquence de vibration sont un facteur important à prendre en compte.

C'est pour cette raison que les expériences sont réalisées avec un seul type de lopin. Les vibrations sont appliquées dans un laps de temps fixe et ensuite retirées. Ceci permet un gain de temps ainsi que l'estimation du gain à partir d'une courbe.

Les résultats obtenus en forgeage avec vibrations sinusoïdales sont conformes à notre modèle analytique. Les résultats sont vérifiés avec différents matériaux comme la plasticine, l'aluminium et le cuivre.

Les résultats obtenus en forgeage avec vibrations triangulaire sont partiellement en accord avec le modèle analytique. Les résultats sont conformes à notre modèle analytique dans le cas de la plasticine, contrairement au cuivre. Lors de l'application de vibration triangulaire, La différence de gain peut être attribuée au manque de temps pour passer la relaxation dans ce cas, contrairement à ce qu'on a pu voir dans le cas du forgeage avec relaxation.

4.9 Conclusion

Les expériences ont été réalisées sur deux machines de test, Lloyd 30K et ZWICK Roell Z1200. Une vitesse constante v_0 a été imposée à l'aide de la presse mécanique disponible avec ces machines. L'amplitude de vibration $a_1(t)$ est ajoutée au procédé à l'aide d'un système élastique entraîné par un actionneur piézo-électrique. Le pot vibrant abrite l'actionneur piézo-électrique et génère des vibrations. Ce dernier a été installé dans deux machines.

Initialement, les tests ont été effectués pour vérifier les performances du système sans la pièce, le système est analysé pour la gamme de fréquence (0-125 Hz) avec des vibrations sinusoïdales et triangulaires. Après l'obtention de résultats satisfaisants pour la performance du système, des expériences sont effectuées avec le lopin mais sans vibration. L'objectif étant d'obtenir les paramètres matériau et de comparer le procédé de forgeage sans vibration avec le procédé avec vibrations.

Les expériences effectuées sur la plasticine étaient la première étape pour démontrer les vibrations associées aux procédés de forgeage. L'avantage de travailler avec la plasticine est que la force de forgeage est très faible (autour 500-1000 N). À cette fin, nous avons utilisé la machine Lloyd LR30K. Les expériences sur les autres matériaux (l'aluminium et le cuivre) qui ont besoin de relativement plus d'effort sont effectuées sur la machine ZWICK Roell Z1200. La vibration permet de diminuer l'effort nécessaire pour forger ces matériaux. Les résultats obtenus à partir de l'application de vibrations sinusoïdales sont accord avec les résultats obtenus à partir du modèle analytique développé. Par contre, ceux obtenus avec vibrations triangulaires sont partiellement en accord avec le modèle analytique. Les résultats obtenus sur la plasticine concordent avec le modèle, contrairement au cuivre.

La raison de l'absence du gain prévu via l'application des vibrations triangulaires peut être attribuée au manque de temps de relaxation dans le cas du cuivre.