

Formage assisté par vibrations

L'utilisation de vibrations dans les procédés de formage a suscité de nombreuses recherches depuis près de soixante ans. Dans leur article fondateur de 1955, Blaha et Langenecker [12, 13] appliquent, grâce à un résonateur, des vibrations sinusoïdales ultrasoniques (jusqu'à 800 kHz) superposées lors d'un essai de traction de différents matériaux. Une réduction significative de la résistance de traction est présentée sur la figure 1.3 pour les cristaux de zinc et d'aluminium.

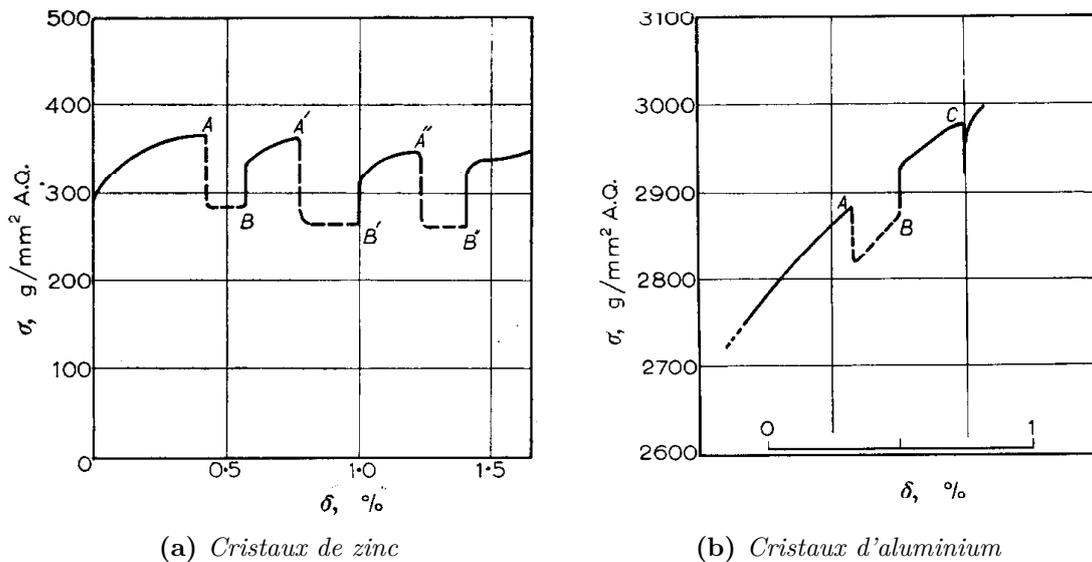


Figure 1.3: Courbe de contrainte-déformation pour un traitement ultrasonique des cristaux [13]

Sur la figure 1.3a, la courbe montre une réduction nette de contrainte entre le point A et B quand des vibrations ultrasoniques sont appliquées à des cristaux de zinc, en plus d'une force de traction. En B, les vibrations sont supprimées et une augmentation nette de contrainte est observée jusqu'au point A'. Le protocole est répété jusqu'à ce que l'essai de traction s'achève. La tendance à la diminution de contrainte des points A, A', A'' est causée par l'augmentation de température de procédé en raison de l'échauffement du dispositif ultrasonique au cours du temps. La figure 1.3b présente le résultat sur des cristaux d'aluminium quand des vibrations ultrasoniques sont appliquées de A à B et un choc en C. Dans ce cas, une réduction considérable est aussi enregistrée. Des résultats similaires ont été obtenus pour des expériences avec des fréquences plus basses (de 10 à 15 kHz). Depuis lors, d'autres chercheurs ont reproduit ce phénomène sur différents procédés de formage. En plus de la réduction de l'effort moyen durant le procédé, l'utilisation des vibrations donne d'autres avantages selon certains auteurs, tels que l'amélioration des qualités des surfaces. Pour comprendre mieux l'influence des vibrations sur le formage, nous allons décrire brièvement ces applications de vibrations dans quelques procédés de formage, telles le tréfilage, l'emboutissage, l'extrusion.

1.2.1 Tréfilage assisté par vibrations

L'avantage potentiel des vibrations pour le formage a été étudié sur les processus de tréfilage et étirage des tubes par R. Pohlman et E. Lehfeldt [4]. Le schéma d'essai est présenté sur la figure 1.4a. L'échantillon est soumis à une vibration à 21 kHz appliquée par un transducteur magnéto-strictif selon la direction de tréfilage. Une réduction de la force appliquée est montrée sur la figure 1.4b pour le tréfilage d'un fil en cuivre de 2,27 mm à 2,07 mm. La réduction de force est attribuée à la réduction de frottement externe entre le fil et l'outillage et celle du frottement interne du matériau, qui peut s'expliquer par la superposition de contraintes acoustiques sur la contrainte statique. En plus, une étude métallographique montre qu'il n'y a pas de changement de l'état de surface et des tests de micro dureté ne permettent pas de mettre en évidence de modification des propriétés physiques du fil.

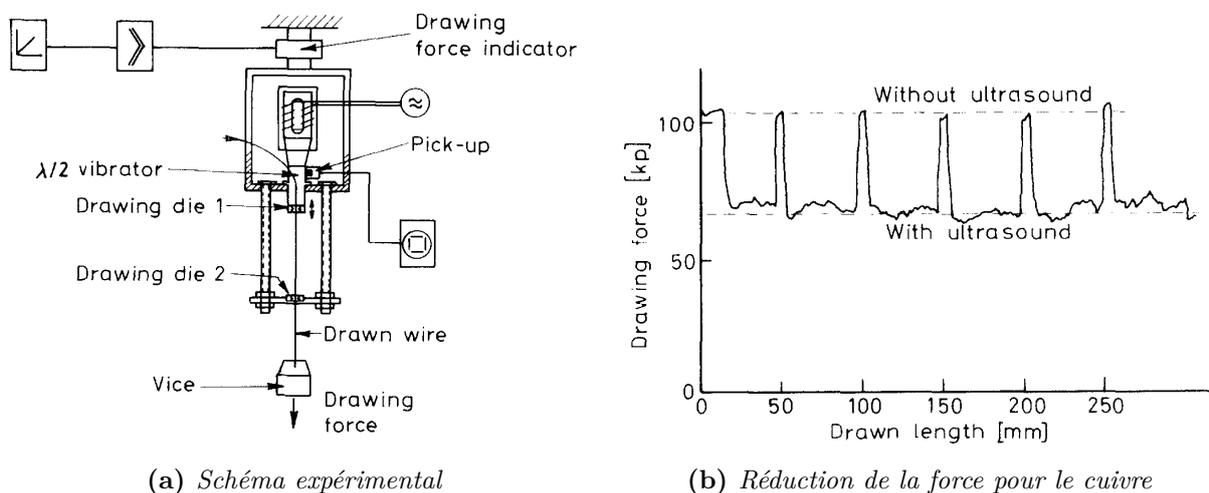


Figure 1.4: Tréfilage avec injection de vibrations ultrasonores [4]

Le procédé de tréfilage a été étudié ultérieurement par différents auteurs [14–19]. Winsper et Sansome [14] ont utilisé un système expérimental présenté sur la figure 1.5a, qui est simplifié sur la figure 1.5b, pour étudier l'influence des paramètres des vibrations longitudinales sur la force du procédé de tréfilage. Le tréfilage est réalisé par un tambour en superposant des vibrations par un oscillateur électro-hydraulique. Selon cette étude, la réduction de la force moyenne est dépendante de l'amplitude mais indépendante de la fréquence des vibrations (de 50 Hz à 500 Hz). D'après les résultats montrés sur la figure 1.6a, la force moyenne de tréfilage de l'acier doux est réduite à une même valeur avec différentes fréquences sous une même amplitude de vibration. Si l'amplitude des vibrations est constante et la vitesse de tréfilage augmente, la variation de force est réduite et la valeur maximale de force approche la force mesurée dans le cas sans vibrations (voir la figure 1.6b). Une réduction négligeable de la limite d'élasticité et du coefficient de frottement est constatée dans la plage étudiée de fréquence.

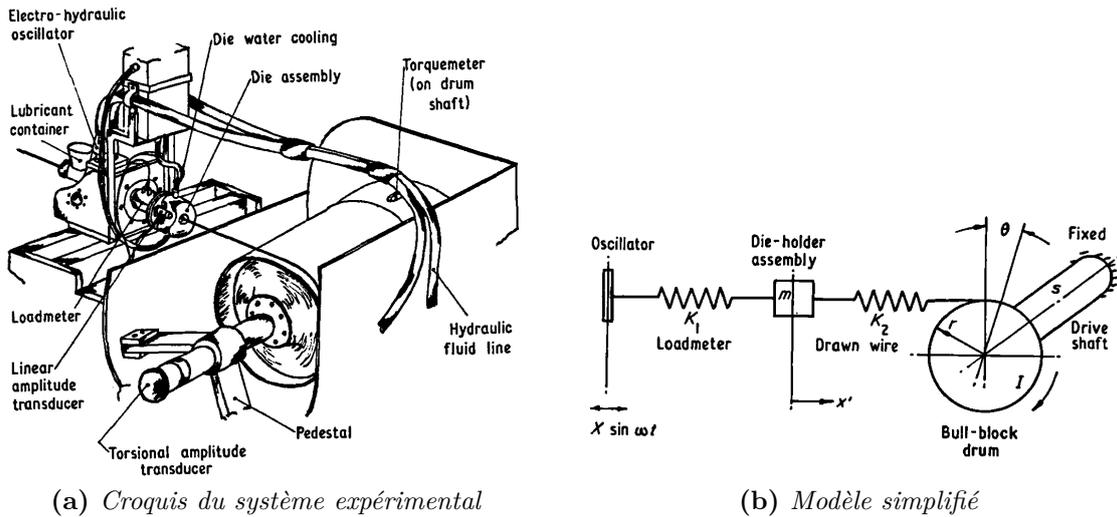
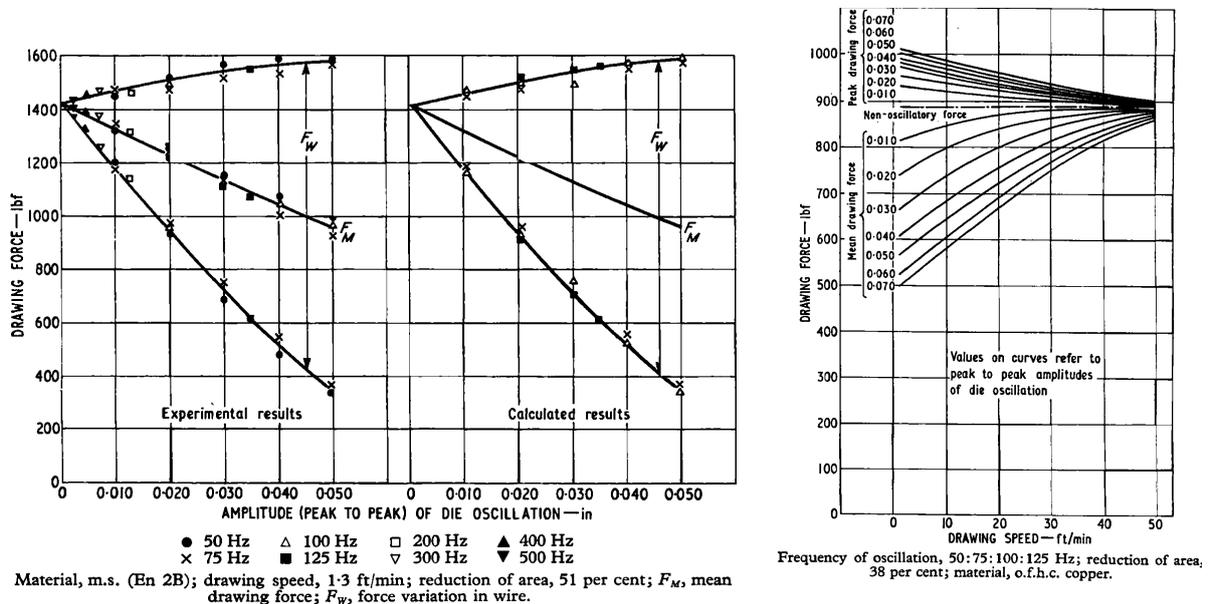


Figure 1.5: Superposition de vibrations longitudinales sur le procédé de tréfilage [14]



(a) Variation de la force de tréfilage en fonction de l'amplitude de l'outilage pour différentes fréquences (b) Variation de la force de tréfilage en fonction de la vitesse de tréfilage

Figure 1.6: Variation de la force de tréfilage assisté par vibrations [14]

Par contre, une réduction de coefficient de frottement est observée par Rozner [15] quand une vibration ultrasonique avec la fréquence constante de 20 kHz est appliquée lors du tréfilage de cuivre et d'acier. Ces résultats sont présentés sur la figure 1.7. A cette fréquence, la réduction de force est faible (environ 7,5 %) mais cohérente avec les résultats présentés par Pohlman [4]. En plus, l'étude microscopique de l'échantillon après le tréfilage montre que les vibrations ultrasoniques n'influencent ni la micro-structure ni la rigidité du matériau.

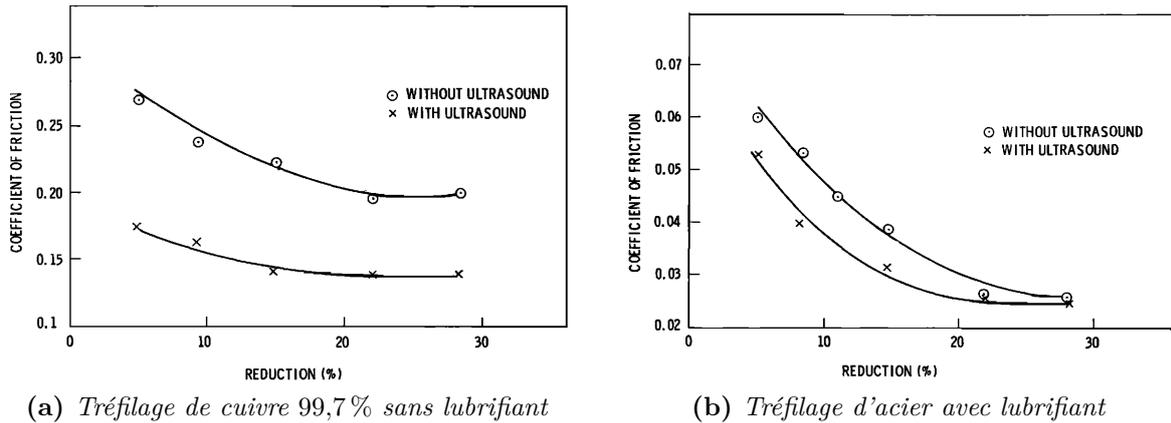


Figure 1.7: Réduction de coefficient de frottement du tréfilage avec vibrations [15]

Dans [16], Siegert et Möck utilisent un transducteur piézoélectrique (amplitude appliquée de 7 μm à 10 μm) pour faire vibrer l'outillage de tréfilage à la fréquence ultrasonique (fréquence de 22 kHz) selon la direction perpendiculaire à la direction de tréfilage (figure 1.8a). Les résultats expérimentaux montrent que la réduction de force est dépendante de l'amplitude des vibrations ultrasoniques (comme la figure 1.8b) et de la vitesse de tréfilage mais indépendante de la force de tréfilage.

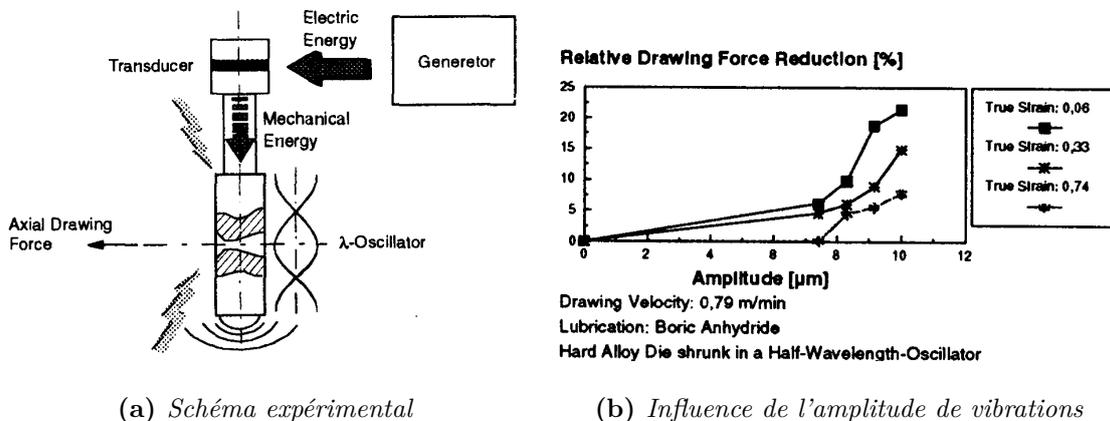


Figure 1.8: Tréfilage avec l'assistance des vibrations [16]

Un modèle du frottement est proposé par Siegert et Ulmer [17, 18] pour expliquer la réduction de friction en fonction des différents paramètres du procédé (rapport de la vitesse de tréfilage et de vibration, pression de contact, lubrifiant, paramètres du matériau et surface). Le modèle estime l'influence de la vitesse, pression de contact et viscosité du lubrifiant sur la réduction de force par l'équation : $\Delta F = C - B \ln(v_{Norm})$ où $v_{Norm} = \frac{v_{tréfilage}}{v_{vibration} - v_{tréfilage}}$ est la vitesse normalisée, B, C sont des paramètres d'ajustement qui dépendent des paramètres du matériau étudiés et du procédé. Les résultats expérimentaux sur la figure 1.9 montrent une cohérence entre les résultats calculés par le modèle théorique proposé et les résultats mesurés.

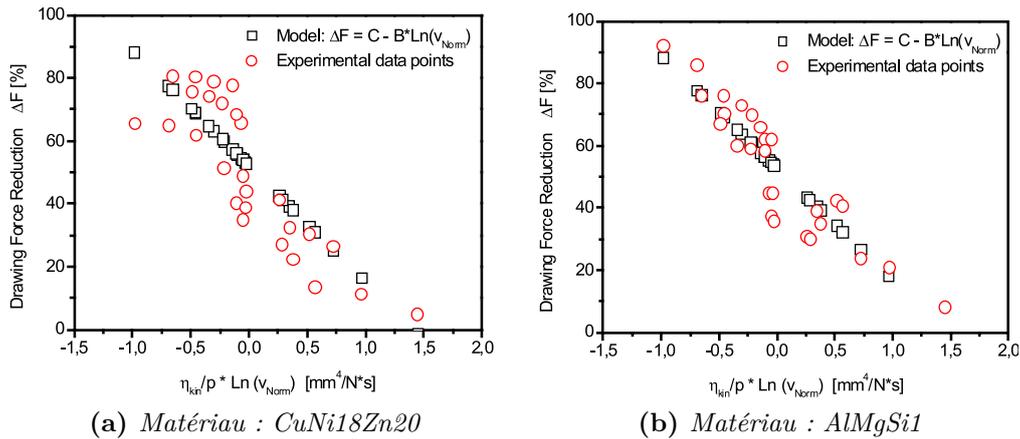


Figure 1.9: Comparaison des résultats expérimentaux et théoriques [17, 18]

Une étude sur l'influence de la direction des vibrations appliquées sur la matrice de tréfilage a été réalisée par Marakawa et al. [19]. Ces auteurs ont étudié les effets du tréfilage assisté par vibrations ultrasoniques radiales (RVD) et axiales (AVD), et les ont comparés au tréfilage conventionnel (CD). Le résultat présenté sur la figure 1.10 a prouvé que la vitesse critique de tréfilage avec RVD est presque 10 fois plus grande que celle avec AVD. En plus, quand les vibrations sont appliquées radialement à la matrice, une meilleure qualité de surface est trouvée, similaire au cas de tréfilage avec une bonne lubrification. Ces résultats sont confirmés dans une autre étude de Hayashi et al. [20] par la méthode

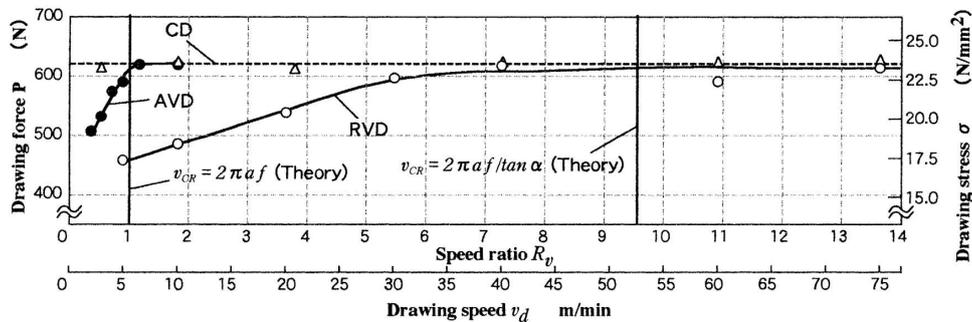


Figure 1.10: Force de tréfilage en fonction de vitesse dans le cas de vibrations radiales (RVD) et de vibrations axiales (AVD)[19]

des éléments finis. Cette méthode permet aussi de démontrer un changement périodique de contrainte du fil dans les deux cas. La valeur maximale de contrainte est réduite lors du tréfilage avec vibrations radiales.

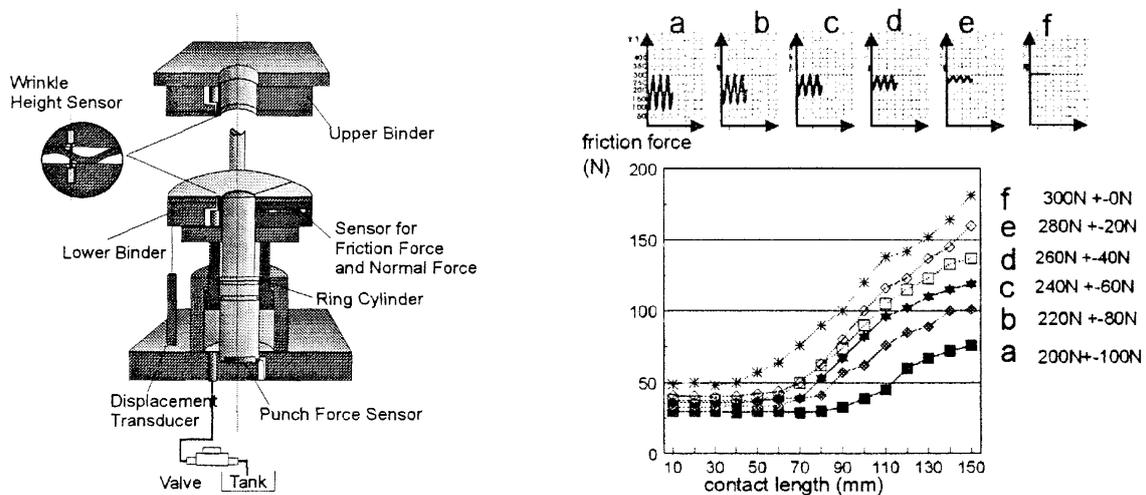
Pour résumer, les études de tréfilage assisté par vibrations nous montrent que :

- Le phénomène trouvé par Blaha et Langenecker peut être étendu à d'autres procédés que la compression, en particulier le tréfilage ;
- La réduction de force est aussi effective avec l'assistance des vibrations à basse fréquence (de 50 Hz à 500 Hz) ;

- La réduction de force dépend de l'amplitude des vibrations et de la vitesse de tréfilage ;
- Le coefficient de frottement est réduit lors du procédé avec vibrations ;
- L'effet existe avec l'application des vibrations dans les deux directions radiale et axiale.

1.2.2 Emboutissage assisté par vibrations

L'application des vibrations a aussi été étudiée pour le procédé d'emboutissage, un procédé de cisaillement du matériau [5, 21]. Dans [21], l'emboutissage d'une bouteille de 100 mm de diamètre avec l'assistance des vibrations (fréquence de 1,5 à 100 Hz) est réalisée par Siegert et Ziegler avec les dispositifs présentés sur la figure 1.11a. Cette étude montre que si la fréquence appliquée est plus grande qu'avec une certaine valeur seuil, la force de frottement se trouve réduite sans augmentation du risque de plissage. La figure 1.11b montre cette réduction de force en fonction de l'amplitude vibratoire pour l'emboutissage assisté par vibrations axiales avec la fréquence de 12 Hz.



(a) Schéma expérimental

(b) Réduction de la force de frottement pour différentes amplitudes vibratoires en fonction de la longueur de contact des outillages (vitesse d'emboutissage de 100 mm/s fréquence : 12 Hz). Le cas f correspond à l'emboutissage sans vibrations.

Figure 1.11: Emboutissage avec l'assistance des vibrations [21]

L'emboutissage assisté par vibrations radiales en haute fréquence de l'outillage est réalisé par Jimma et al. [5]. Dans cette étude, l'élimination du plissage lors de l'emboutissage d'une bouteille s'obtient lorsque l'amplitude de vibrations augmente (voir la figure 1.12).

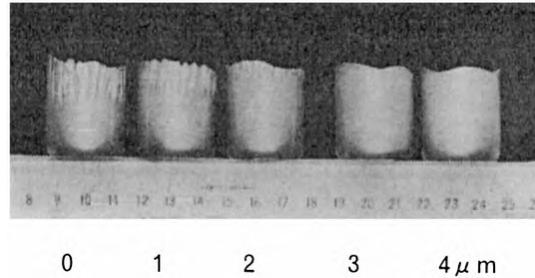


Figure 1.12: Emboutissage avec l'assistance des vibrations ultrasoniques [5]

1.2.3 Extrusion assistée par vibrations

En ce qui concerne le processus d'extrusion, Moussavi et al. [6] ont étudié les effets de la vitesse d'extrusion, de l'amplitude de vibration, de la fréquence de vibration et des conditions de frottement sur la force d'extrusion à l'aide de la méthode des éléments finis. Les résultats sont présentés sur la figure 1.13. Ils montrent que si la vitesse d'extrusion est inférieure à une valeur critique V_{cr} , la force d'extrusion est réduite (figure 1.13a). Cette force est réduite de façon plus significative avec l'augmentation de l'amplitude de vibrations comme le montre la figure 1.13b. Ce phénomène est attribué à l'augmentation du temps de séparation du contact. De plus, l'influence de la fréquence n'est pas aussi importante que celle de l'amplitude et influence peu le coefficient de frottement.

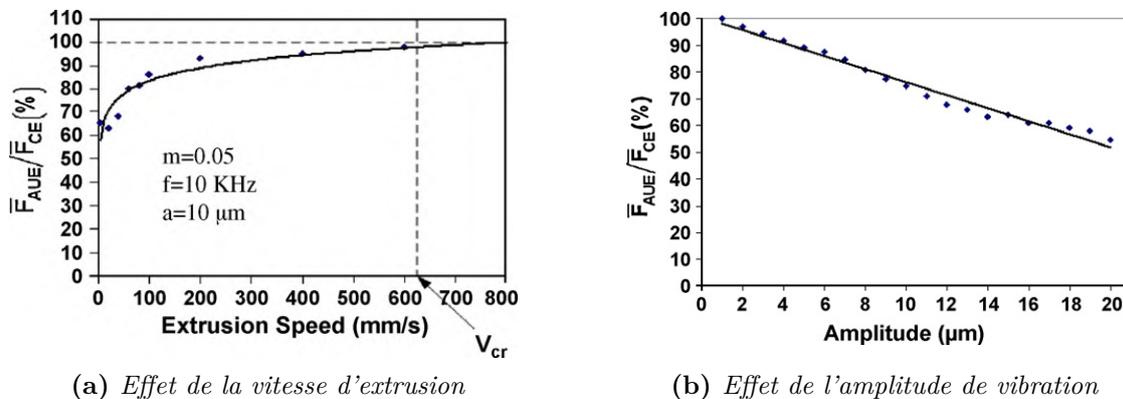


Figure 1.13: Effet des paramètres de vibrations sur la force d'extrusion [6]

Ces études sont intéressantes pour l'utilisation de vibrations à petite échelle dans le procédé de micro-extrusion. Une étude par Bunget et Ngaille [7] sur l'influence de vibrations ultrasoniques a été effectuée avec le dispositif du schéma 1.14a. Une réduction significative de charge appliquée est constatée, jusqu'à 25 % pour un échantillon en laiton. Mais la réduction est dépendante du type d'extrusion et du type de lubrifiant utilisé. En outre, des améliorations substantielles de la surface des pièces micro-formées se retrouvent dans tous les tests. Une comparaison des états de surface avec et sans vibrations ultrasoniques est présentée sur la figure 1.14b. Elle montre une amélioration significative et cet effet

est attribué à l'amélioration de la condition de lubrification à l'interface de la pièce et de l'outillage grâce aux vibrations.

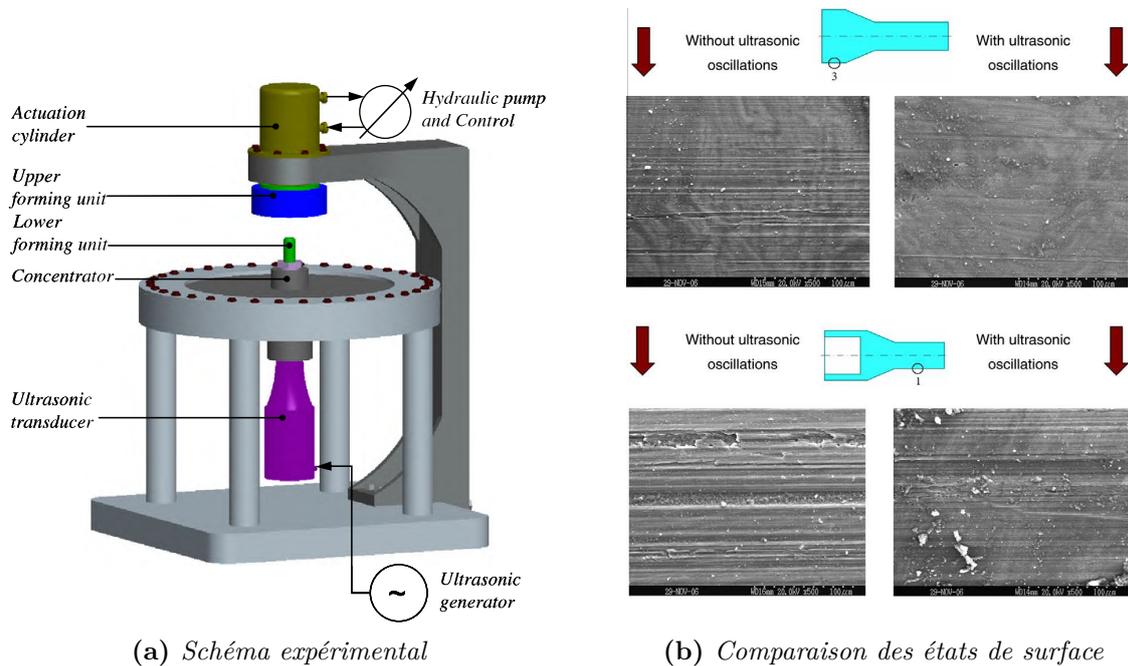


Figure 1.14: Micro-extrusion avec l'assistance des vibrations ultrasoniques [7]

1.2.4 Synthèse

L'efficacité de l'utilisation des vibrations pour assister des procédés de formage a été démontrée dans les études précédentes. La force de formage est réduite significativement à basse et haute fréquences. D'autres effets favorables imputables aux vibrations sont aussi trouvés comme l'amélioration de la surface du produit lors du tréfilage et de l'extrusion ou la réduction du risque de plissage lors de l'emboutissage. Pour expliquer le mécanisme, plusieurs études ont démontré que l'application de vibrations ultrasoniques dans le formage conduit à une réduction de contrainte du matériau, une réduction de frottement et une augmentation de température entre l'outillage et la pièce. La réduction de contrainte vient peut-être de la superposition de la contrainte constante et des contraintes alternées par vibrations qui conduit à l'absorption d'énergie par des dislocations via la résonance ou contrainte périodique, ou effet de frottement interne... La valeur de réduction de force dépend de plusieurs paramètres du matériau et du procédé, comme par exemple la vitesse du procédé, l'amplitude, la direction de l'application des vibrations. En général, les effets de vibration sur le formage des métaux sont très compliqués à distinguer et à quantifier.

Dans le cas du forgeage où la force nécessaire est plus élevée, la méthode d'application des vibrations est aussi utilisée pour réduire la force de forgeage et améliorer des caractéristiques mécaniques de produit. Une étude biographique dans la partie suivante nous montrera l'avantage de l'utilisation des vibrations dans le forgeage.

1.3 Forgeage assisté par vibrations

Le forgeage est un procédé d'élaboration des matériaux par déformation plastique grâce au mouvement relatif de deux matrices ayant la forme du produit. Le forgeage produit généralement peu ou pas de bavure et permet d'obtenir la géométrie finale du produit dans un temps très court, habituellement en un ou quelques coups (de la presse ou du marteau). En plus, les pièces produites par forgeage présentent de meilleures propriétés mécaniques et métallurgiques que celles fabriquées par moulage ou usinage. Cependant, la force nécessaire pour le forgeage est très élevée en comparaison des autres procédés de formage et atteint plusieurs centaines de kN pour un produit métallique de petite taille. Par conséquent, la réduction de la force de forgeage facilite la réalisation du procédé et aussi améliore la durée d'utilisation des outillages. L'étude de la réduction de force par vibrations est menée aussi bien dans le domaine des hautes fréquences (de quelques kHz à ultrasoniques) et basses fréquences (de quelques Hz à quelques centaines de Hz). Les résultats dans ces deux cas sont présentés dans ce qui suit.

1.3.1 Vibrations en haute fréquence

Vibrations générées par transducteur magnéto-strictif

Izumi et al. [22, 23] ont étudié l'effet des vibrations ultrasoniques lors de la compression des différents métaux. Le schéma du dispositif est présenté sur la figure 1.15.

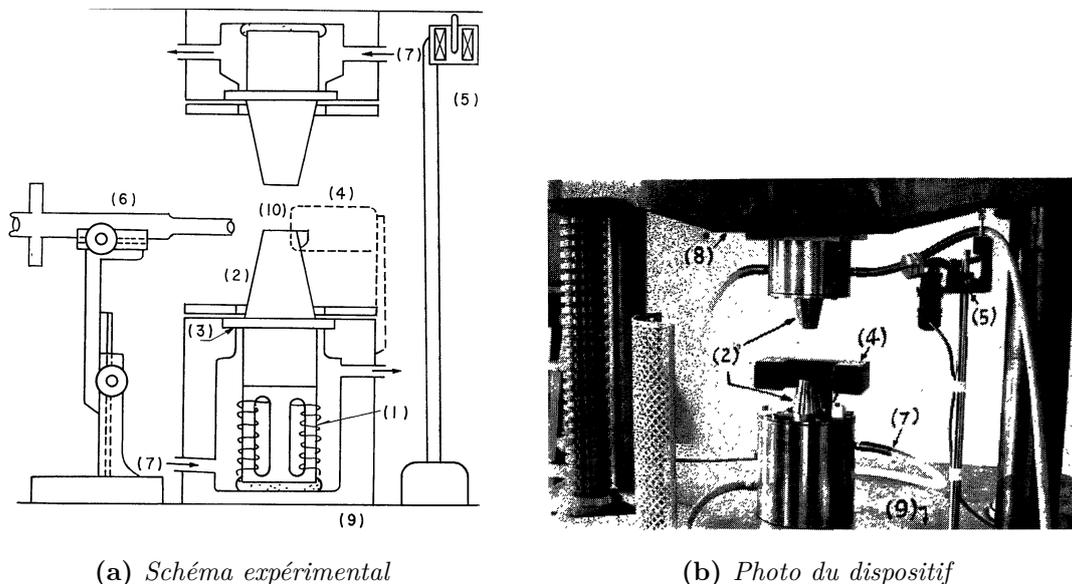


Figure 1.15: Dispositif expérimental : (1) transducteur magnéto-strictif; (2) cône d'amplification; (3) bride; (4) système de mesure d'amplitude; (5) D.T.F; (6) Microscope; (7) l'eau; (8) plateau mobile; (9) châssis; (10) échantillon [22]

Grâce à un transducteur magnéto-strictif et une paire de cônes d'amplification, on

superpose à la charge statique, générée par la machine hydraulique, des vibrations ultrasoniques de 22 kHz avec une amplitude pouvant atteindre 17 μm . La vitesse de compression est maintenue constante à 0,5 mm/min et l'amplitude a été modifiée entre 0 et 15 μm . Une réduction de charge est observée et par ailleurs, la dureté est distribuée plus uniformément dans les échantillons. La réduction est considérable mais la sensibilité à la vibration change selon les matériaux comme le montre la figure 1.16. Sauf dans le cas de l'acier doux et du laiton, la charge diminue de façon remarquable quand l'amplitude de vibrations augmente. Plusieurs paramètres du matériau, comme l'impédance acoustique, le module d'élasticité, la température de fusion, le coefficient d'érouissage, l'énergie des dislocations, influent sur la réduction mais l'influence de chaque paramètre n'est pas encore discriminée ni quantifiée.

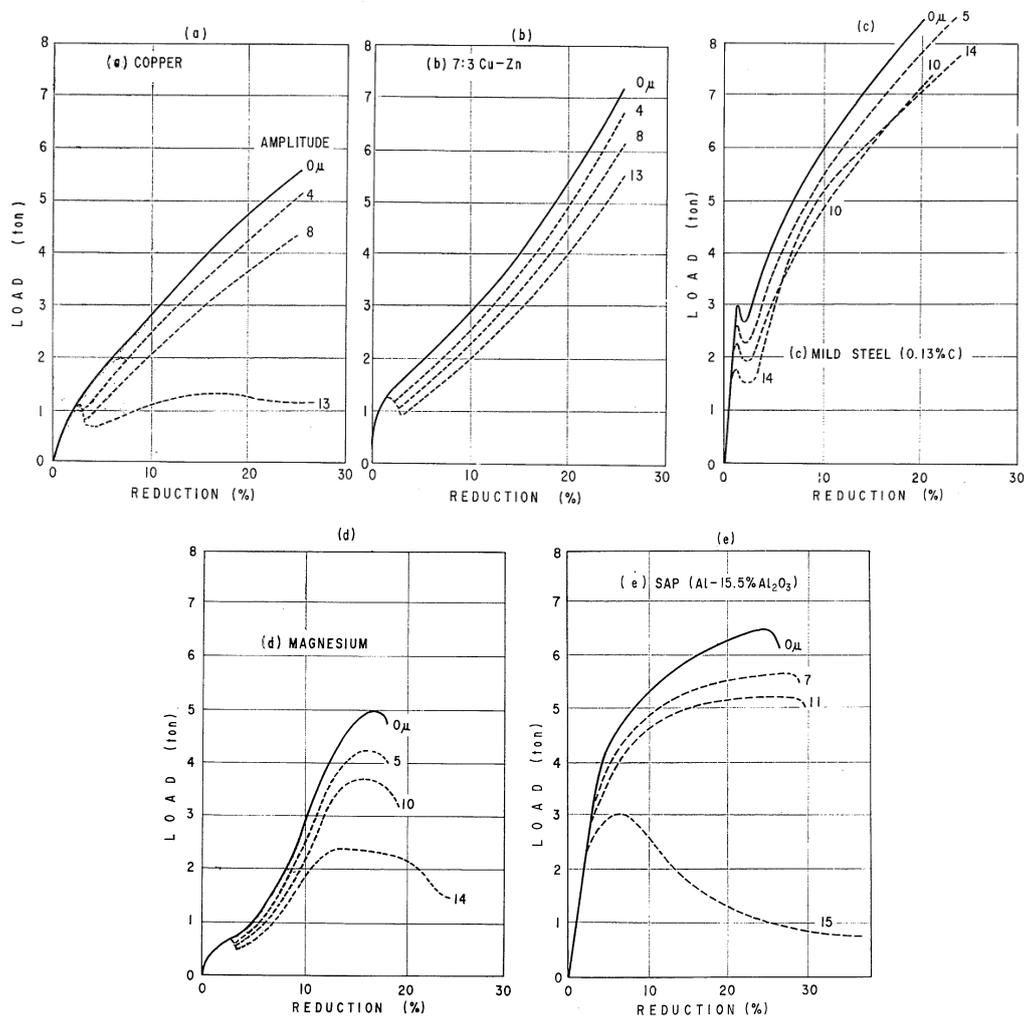
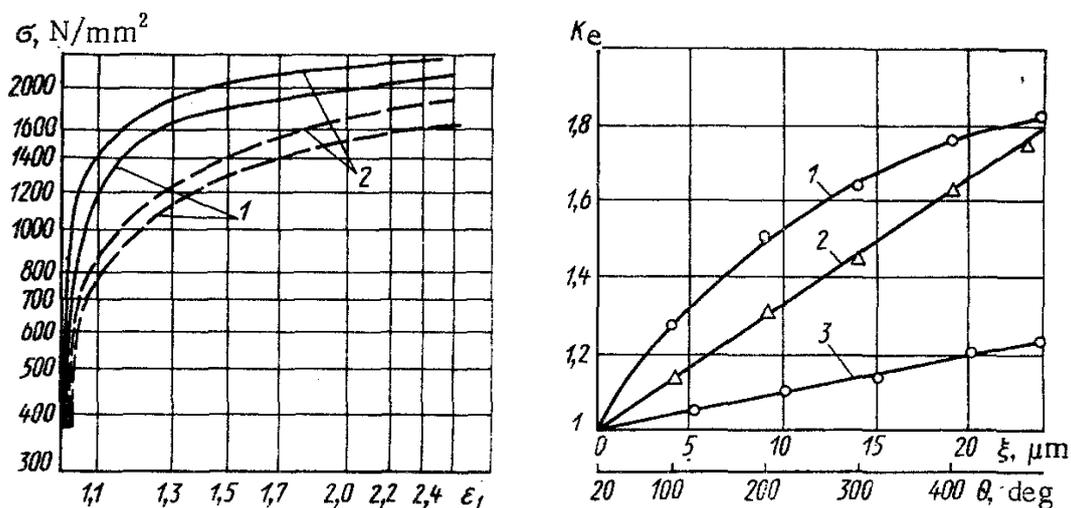


Figure 1.16: Relation entre la charge compressive et la réduction pour différents matériaux : (a) Cuivre ; (b) Laiton ; (c) Acier doux ; (d) Magnésium ; (e) SAP [23]

Nerubai [24] a aussi utilisé ce principe dans des tests de compression avec différents matériaux durs (difficile à déformer) comme certains aciers et les alliages de titane. Les vibrations appliquées sont de 22 kHz avec une amplitude de 5 à 20 μm . Une réduction de

36 % de la force, correspondent à une chute de 25 kN à 16 kN, est observée dans les tests de compression des alliages de KhN77TYuR avec l'amplitude de 5 μm . La réduction de contrainte est présentée sur la figure 1.17a. L'auteur remarque que la réduction dépend de la structure et de la composition chimique du matériau étudié. Dans cette étude, l'indicateur K_e , qui est le rapport de la limite d'élasticité dans la condition normale à celle obtenue lors de l'application de vibrations ou par effet thermique, est utilisé comme un critère pour évaluer l'efficacité de l'application des vibrations. La variation relative de limite d'élasticité de l'alliage de titane est présentée sur la figure 1.17b. Elle indique que l'influence des vibrations sur la limite d'élasticité est liée à l'amplitude de vibrations et à la température. D'après la courbe (1), l'influence de la température devient dominante sur celle des vibrations à partir de 300 °C. Et à partir de 450 - 500 °C, la limite d'élasticité est réduite seulement par l'effet thermique.



(a) Diagramme de contrainte dans deux cas : compression conventionnelle (ligne continue) et avec vibrations (ligne pointillée) pour deux alliages (1) KhN77TYuR (norme européenne NiCr20TiAl) et (2) KhN70VMTYu

(b) Variation relative de la limite d'élasticité des alliages de titane VT3-1 en fonction de l'amplitude (ξ) de vibrations et la température (θ) de test : (1) compression ultrasonique à différentes températures ($\xi = 10 \mu\text{m}$); (2) compression normale; (3) compression ultrasonique ($\xi = 10 \mu\text{m}$, $\theta = 20^\circ\text{C}$)

Figure 1.17: Résultats expérimentaux de la compression des métaux durs avec l'assistance de vibrations ultrasoniques [24]

Vibrations à la résonance d'un dispositif

Dans une étude récente, Huang et al. [8] ont tiré parti de la résonance d'un dispositif mécanique soumis à des vibrations ultrasoniques pour la compression de « plasticine » (utilisé comme un matériau élasto-viscoplastique général). Les dispositifs utilisés pour des essais sont présentés sur la figure 1.18a. Les vibrations ultrasoniques du générateur ultrasonique sont superposées à la pièce via un dispositif (appelé « block horn ») qui est conçu pour avoir la fréquence de résonance longitudinale à 20 kHz et générer des vibrations uniformes

avec l'amplitude de $10\ \mu\text{m}$ à la surface de contact. La vitesse des vibrations appliquées est mesurée par un vibromètre tandis que la force appliquée par la machine d'essai est mesurée par un transducteur piézoélectrique. Une chute de la force appliquée est observée sur la figure 1.18c lors de l'application de vibrations ultrasoniques. La figure 1.18b démontre une réduction significative de la déformation en « tonneau » grâce à la réduction du coefficient de frottement entre l'échantillon et l'outillage. En plus, la forme de l'échantillon dans le cas avec vibrations montre un faible frottement à la surface de contact avec l'outillage vibrant. Le test par ces dispositifs avec des échantillons d'aluminium par Daud et al. [25, 26] montre aussi une réduction de la force appliquée comme dans le cas de la plasticine. En outre, un modèle par éléments finis est construit pour décrire l'effet de la superposition de vibrations ultrasoniques pour les essais de compression et de traction. Les résultats indiquent que la superposition des contraintes et des frottements de contact était insuffisante pour expliquer les effets des vibrations ultrasoniques dans les procédés de forgeage des métaux. L'auteur suggère alors une étude au niveau de la micro-structure du matériau pour comprendre le mécanisme de l'absorption d'énergie ultrasonique.

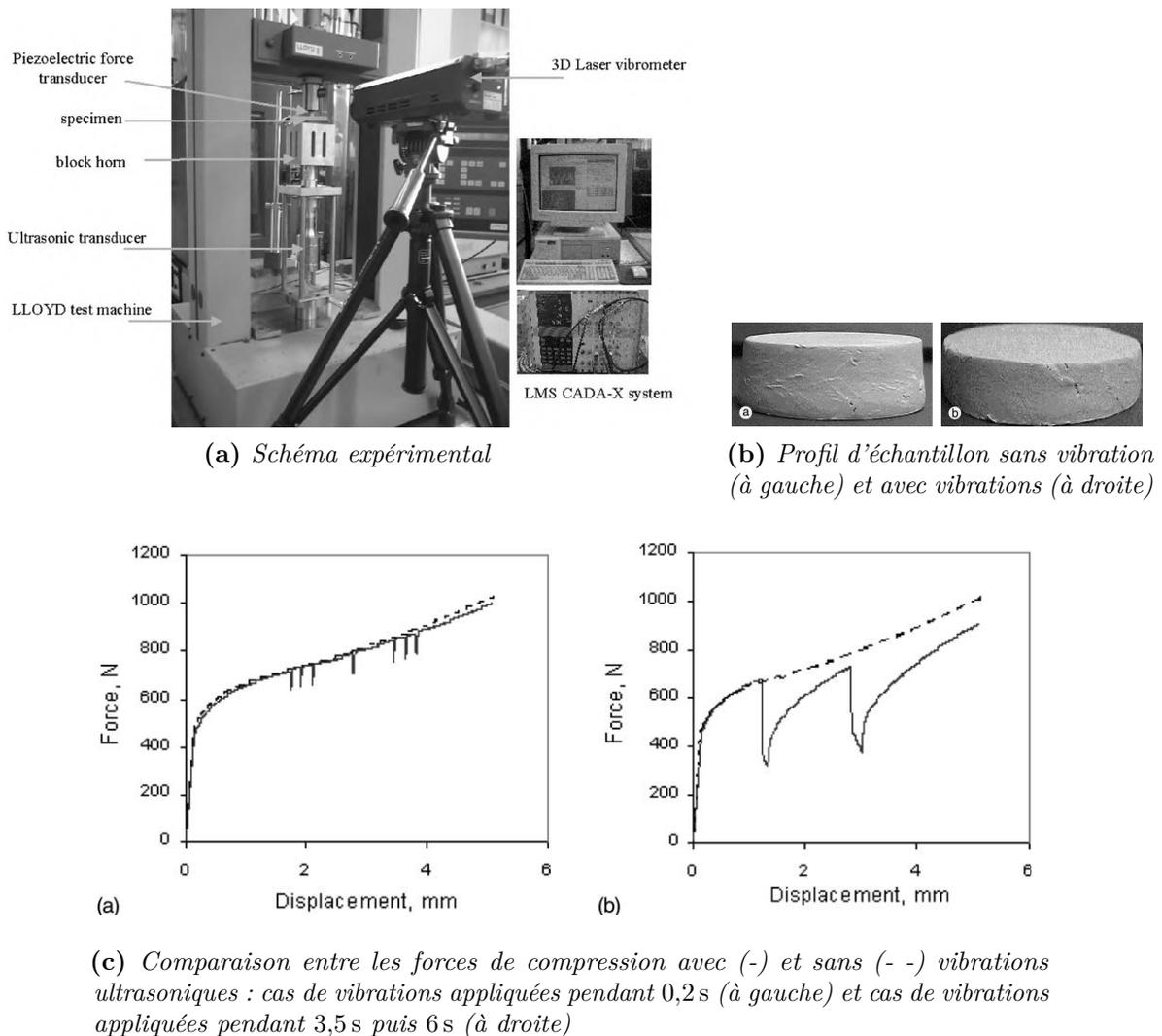
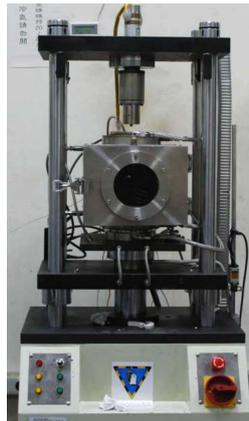


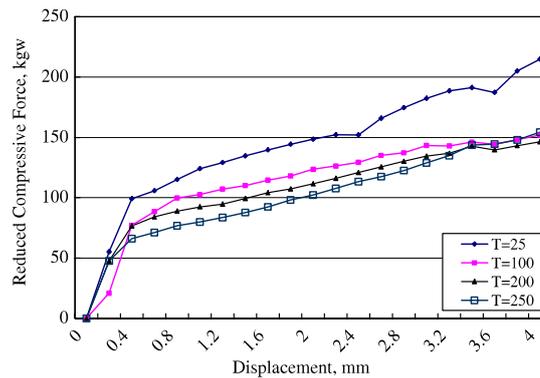
Figure 1.18: Compression avec vibrations ultrasoniques [8]

Influence de la température dans le forgeage assisté par vibrations

J.C. Hung et C. Hung [27] ont développé un système dédié, comme le montre la figure 1.19a, à l'étude de l'influence de la température et de la vitesse de déformation dans le forgeage assisté par vibrations. Un système de chauffage par radiation thermique est utilisé pour augmenter la température des échantillons (aluminium) et des outillages, qui sont placés dans une chambre sous vide (1×10^{-3} Torr) pour prévenir l'oxydation. Les vibrations sont appliquées à la fréquence de 20 kHz avec l'amplitude de 5,6 μm .



(a) Montage expérimental

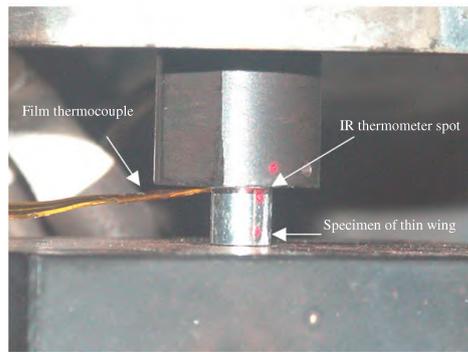


(b) Réduction de force en fonction du déplacement à différentes températures

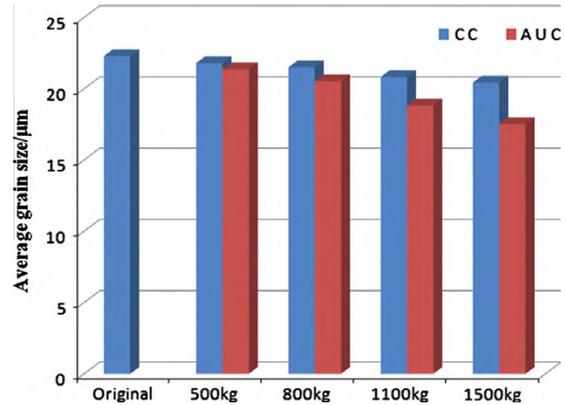
Figure 1.19: Schéma de « Hot upsetting » et résultat sur la réduction de la force [27]

Le résultat montre que la réduction de force par la vibration ultrasonique diminue à mesure que la température augmente. Le comportement de fluage du matériau à haute température devient peut-être dominant par rapport à l'effet de vibrations. Les résultats expérimentaux indiquent que la vitesse de déformation n'influence pas considérablement la contrainte d'écoulement du matériau.

Par une extrapolation des résultats, il est constaté dans [28] que la contrainte du matériau est réduite même dans le cas où le frottement externe est négligeable. L'effet du frottement entre la pièce et l'outillage ne peut donc pas être compté comme une cause de la réduction de la force. Une mesure de température des échantillons d'aluminium dans le procédé est réalisée par un film de thermocouple et un thermomètre infrarouge comme le montre la figure 1.20a. Les mesures de température ont montré que l'échantillon peut absorber l'énergie de vibration ultrasonique par une conversion d'énergie thermo-élastique, ce qui pourrait conduire à une réduction de la force de forgeage. En outre, les résultats des analyses métallographiques montrent sur la figure 1.20b que les grains sur les surfaces ont été affinés avec l'application de vibrations. Cette étude conclut que l'échantillon a absorbé l'énergie du mouvement de dislocation pour réduire la force de forgeage. Le test de micro-dureté a aussi prouvé que la résistance de la surface était améliorée par l'affinage des grains.



(a) Schéma expérimental de mesure de température



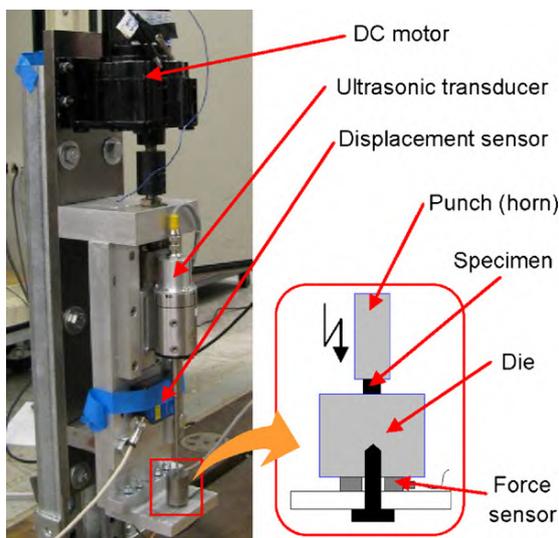
(b) Changement de taille des grains dans le cas avec vibrations (AUC) et sans vibrations (CC)

Figure 1.20: Influence de la température sur la microstructure [28]

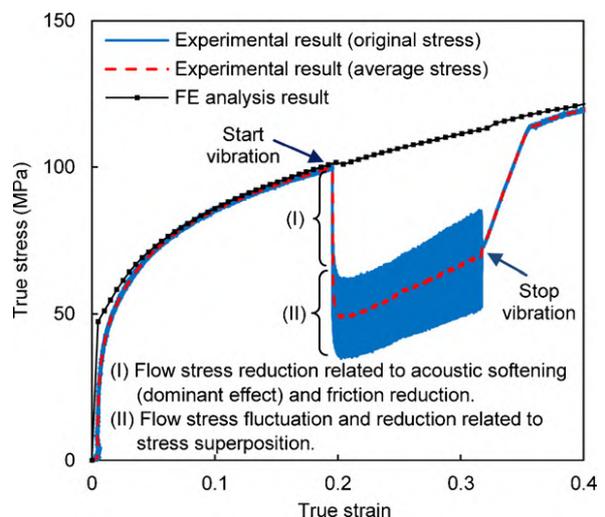
Micro-forgeage

L'utilisation des vibrations de faible amplitude est aussi une méthode favorable à la réduction de la force de forgeage à l'échelle du micro/meso - forgeage [29-31]

Yao et al. [29] ont analysé l'effet des vibrations à haute fréquence (9,3 kHz) avec l'amplitude de $2,8 \mu\text{m}$ sur le micro-forgeage. Le forgeage d'un échantillon d'aluminium de diamètre $2,032 \text{ mm}$ est effectué par le mouvement d'une matrice conduite par un moteur à courant continu et la superposition de vibrations générées par un transducteur magnétostrictif.



(a) Dispositif expérimental



(b) Courbe contrainte - déformation

Figure 1.21: Micro-forgeage assisté par vibrations [29]

La figure 1.21b montre les résultats expérimentaux obtenus par l'évolution de la force de forgeage en fonction des déformations. L'auteur fait apparaître 2 causes de réduction de

la force moyenne : l'effet d'adoucissement dû aux ondes acoustiques (« acoustic softening ») et l'effet dû à la superposition de contraintes. Sur la figure 1.21b, le résultat du calcul par éléments finis montre aussi une réduction de la force, toutefois très sous estimée car ce calcul ne tient compte que de la réduction du coefficient de frottement, ici estimée de 0,14 à 0,07. L'article montre également que la rugosité de la surface a été réduite de $1,5\ \mu\text{m}$ à $0,9\ \mu\text{m}$ par vibration et la forme finale obtenue présente une réduction de la forme en « tonneau » de l'échantillon. L'« acoustic softening » a été attribué à divers facteurs, dont les effets thermiques et l'effet dynamique de contrainte par vibrations. Les métaux peuvent absorber l'énergie acoustique par la conversion de l'énergie thermo-élastique, le mouvement des dislocations et la transformation de l'énergie par diffusion inélastique [29, 30].

Une autre étude de Bai et al [31] consiste à améliorer la surface d'une feuille métallique d'épaisseur $100\ \mu\text{m}$. Dans le schéma présenté sur la figure 1.22a, un actionneur piézoélectrique est utilisé pour générer des vibrations de $1\ \text{kHz}$ avec l'amplitude de $5,43\ \mu\text{m}$. La charge statique est appliquée par le mouvement d'un positionneur 3-axes.

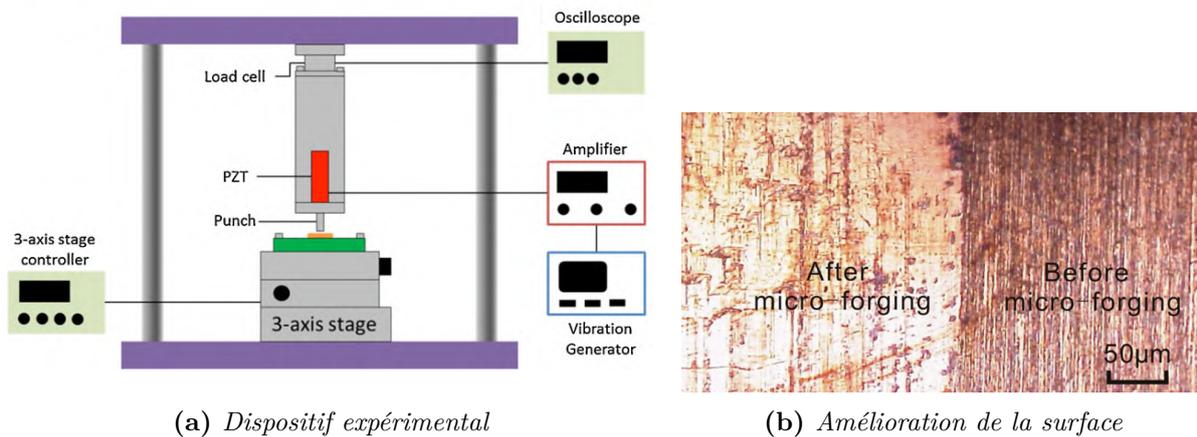


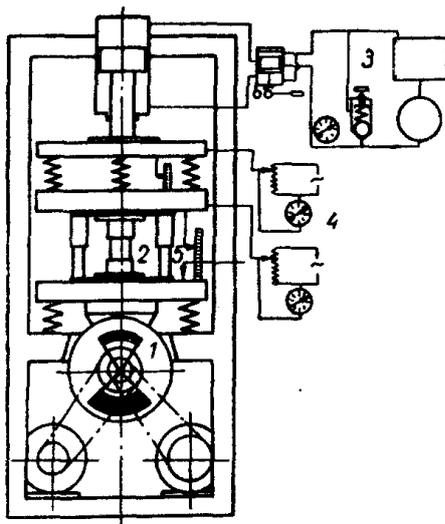
Figure 1.22: *Micro-forgeage assisté par vibrations pour améliorer la surface [31]*

D'après les résultats obtenus, l'auteur constate que la déformation de la feuille de métal a lieu principalement dans la phase initiale de micro-forgeage (environ 20 ms). La quantité de déformation plastique par cycle de vibration diminue avec le temps. La micro-dureté augmente deux fois de $1,5\ \text{GPa}$ à $3\ \text{GPa}$ dans les vingt cycles initiaux de vibrations et reste constante ensuite. Au contraire, la rugosité de surface est réduite deux fois de $97\ \text{nm}$ à $50\ \text{nm}$, ce qui prouve une efficacité de la finition de surface par vibrations. Une comparaison des topographies de surface avant et après le micro-forgeage est montrée figure 1.22b. Il est facile de remarquer que la surface est plus lisse après micro-forgeage, mais quelques défauts demeurent même après le procédé.

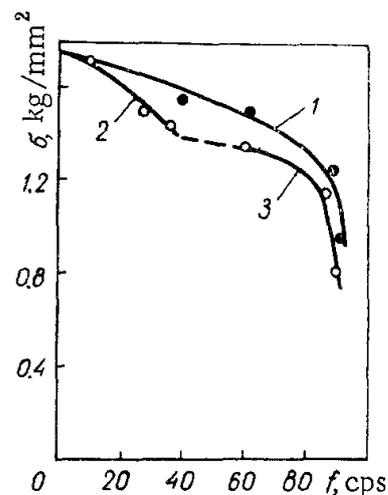
1.3.2 Vibrations en basse fréquence

Vibrations générées par moteur électrique

Une étude de l'application des vibrations pour assister le forgeage a été réalisée par Polyakov et Mikhailov [32] en 1966. Les auteurs ont utilisé une presse (2) assistée par vibrations, présentée figure 1.23a. La force générée par le vérin hydraulique (3) est appliquée sur le lopin par l'intermédiaire de ressorts rigides connectés au piston et à la matrice supérieure. La matrice inférieure est soutenue par le même type de ressort et mise en vibrations. Les vibrations sont amorties par des ressorts pour éviter le transfert des vibrations à la base. Les déplacements et la pression des matrices sont mesurés par des jauges de contraintes (4). L'accélération et la fréquence sont mesurées par des capteurs piézoélectriques (5). Deux moteurs (1) sont utilisés pour générer les vibrations et dont la fréquence est modifiée par un changement de vitesse. Un moteur peut faire varier la fréquence de l'arbre de 5 à 40 Hz avec une amplitude de 0,6 mm et l'autre moteur agit sur la fréquence de 15 à 100 Hz avec une amplitude de 0,15 mm.



(a) Dispositif expérimental



(b) Résistance de déformation en fonction de la fréquence :
 (1) Amplitude de 0,15 mm , (2) Amplitude de 0,6 mm , (3)
 Amplitude de 0,15 mm sauf 40 Hz à 0,6 mm

Figure 1.23: de la force de forgeage par pulsation de charge [32]

Le test est fait avec du plomb et les résultats montrent une réduction favorable de la résistance à la déformation (figure 1.23b). Les résultats montrent une dépendance de la résistance de déformation à la fréquence et à l'amplitude : lorsque la fréquence et l'amplitude augmentent, la résistance est réduite. La pièce est déformée de façon plus uniforme et présente moins de formation en « tonneau », causée par le frottement avec les deux matrices.

Simulation par méthode d'élément finis de l'écrasement

Une étude par la méthode des élément finis a été réalisée par Huang et al [33] pour simuler l'écrasement d'un échantillon cylindrique de plasticine sous différentes charges et conditions aux limites. La déformation du matériau est représentée par un modèle de comportement uni-axial viscoplastique Herschel- Bulkley tandis que le frottement de l'interface est décrit par le modèle de Coulomb dans le cas sans glissement. Le résultat sur la figure 1.24a nous montre une comparaison entre le résultat de la simulation et de l'expérience dans le cas de l'écrasement d'un lopin cylindrique de plasticine. Le phénomène de formation en tonneau est clairement mis en évidence par la simulation et un même diamètre de lopin après écrasement apparaît dans le cas expérimental.

Différentes vibrations avec l'amplitude de $5\ \mu\text{m}$ à $40\ \mu\text{m}$ et les fréquences de $5\ \text{Hz}$ à $100\ \text{Hz}$ sont appliquées au modèle d'élément finis. Les résultats obtenus montrent que la contrainte moyenne nécessaire dans le cas avec superposition des vibrations diminue considérablement par rapport à celui avec une déformation purement statique. Et la réduction de la force moyenne de forgeage dépend de l'amplitude des vibrations, alors qu'une dépendance faible en fonction de la fréquence est observée. Le résultat sur la figure 1.24b a démontré que la simulation par éléments finis peut prédire avec précision les effets de vibrations superposées au forgeage de matériau élasto-viscoplastique.

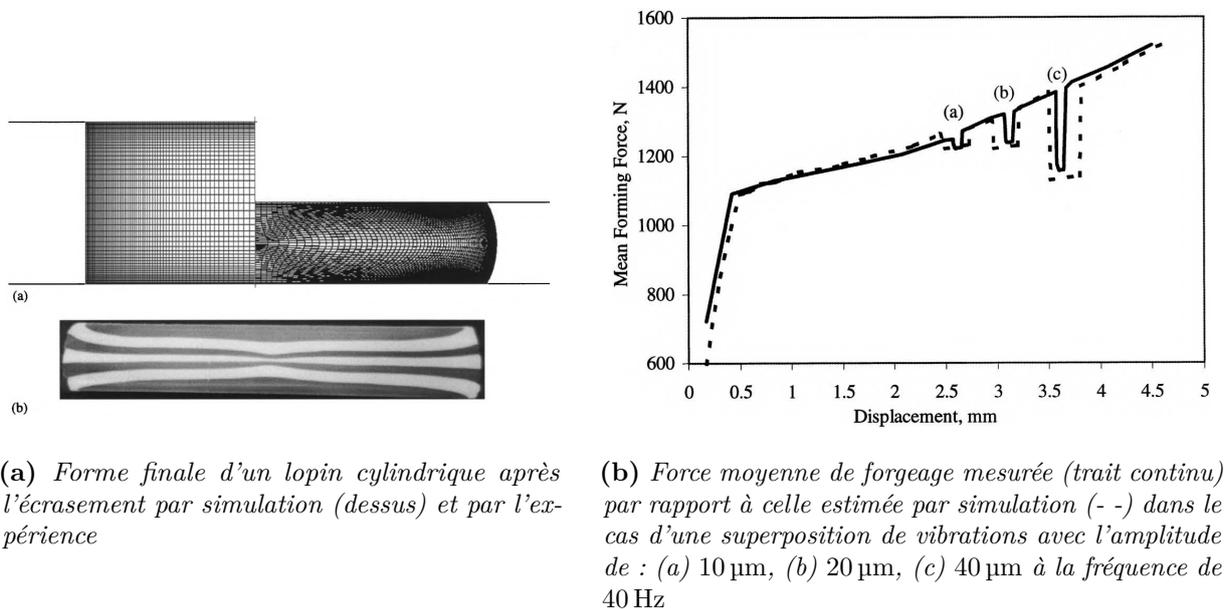
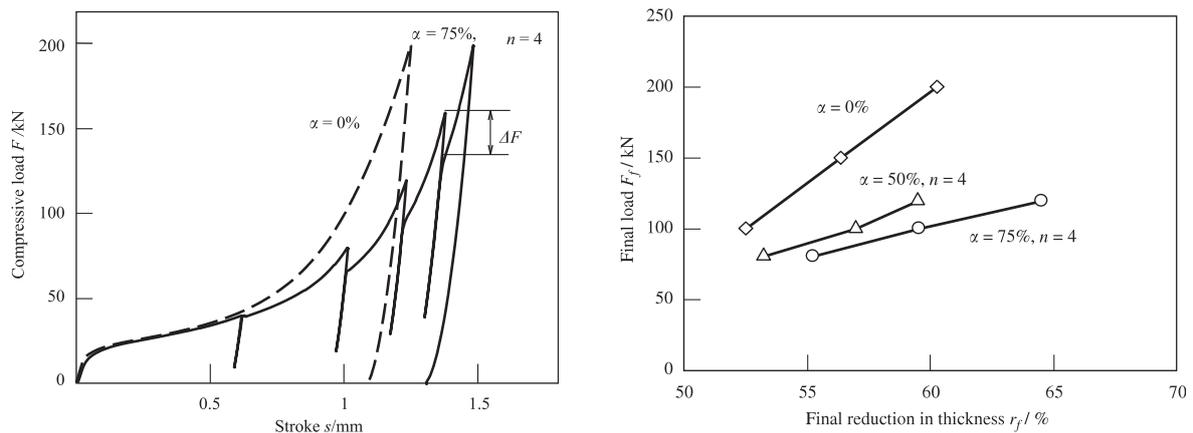


Figure 1.24: Comparaison des résultats de simulation et d'expérience [33]

Application d'une charge variable par une presse servo

Récemment, Maeno et al. [34] ont étudié l'influence d'une charge variable en basse fréquence dans le procédé de compression de plaques circulaires en aluminium de $10\ \text{mm}$ lubrifiées par huile. La vitesse de compression est $0,02\ \text{mm/s}$. La force mesurée en fonction

du déplacement est présentée figure 1.25a, avec α est le pourcentage de variation de la force dans un cycle. La figure 1.25b montre une réduction significative de la force, jusqu'à 50 % d'après 4 variations de force pour une même réduction d'épaisseur de la plaque à compresser. Une amélioration de planéité est observée sur la surface de la plaque. Une simulation par élément finis est réalisée pour analyser le mécanisme de la réduction : grâce à la relaxation de force, il y a un détachement partiel des deux surfaces de contact. Le lubrifiant est alors automatiquement introduit dans cet espace et la force est réduite par la ré-lubrification, qui conduit à la réduction de frottement.



(a) Force de compression F en fonction du déplacement s dans les cas avec et sans variation de charge

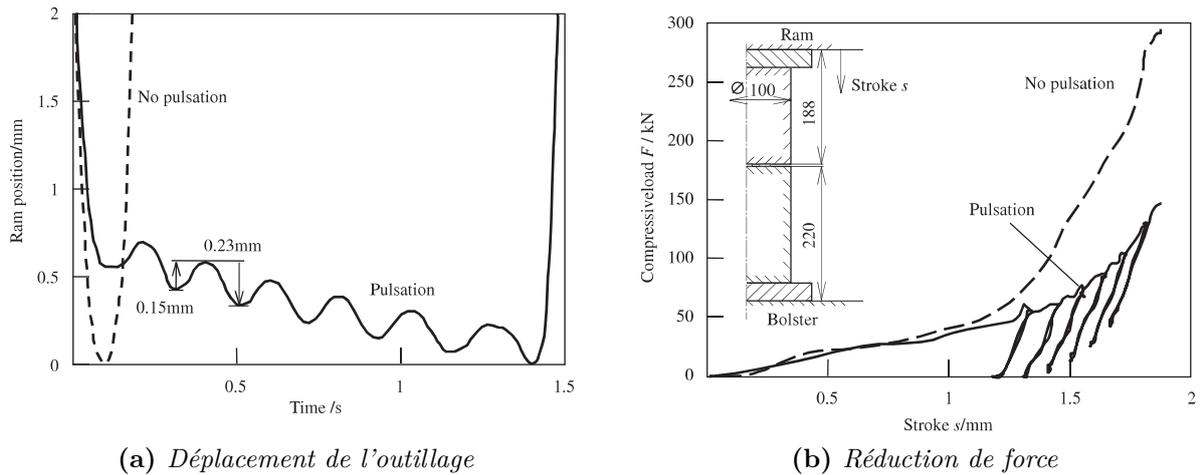
(b) Relation entre la force finale et la réduction finale d'épaisseur

Figure 1.25: Compression par variation de force avec une machine d'essai universelle [34]

Pour adapter l'expérience au forgeage, l'approche est reprise avec une presse servo qui donne une grande vitesse et une grande précision de position. Avec cette presse servo, la vitesse moyenne de forgeage atteint 80 mm/s et la force 1500 kN. Le déplacement de l'outil est présenté figure 1.26a pour les deux cas avec et sans vibrations. On remarque que les 2 trajectoires sont très différentes. Les forces dans les deux cas sont présentées sur la figure 1.26b. Les deux valeurs de forces sont proches jusqu'au déplacement de 1,2 mm puis la force sans vibrations augmente fortement. Ceci montre un résultat très favorable pour appliquer les vibrations dans le procédé de forgeage.

Vibrations générées par actionneur piézoélectrique

Dans le cadre d'une collaboration entre le Laboratoire de Conception, Fabrication et Commande (LCFC) et le Laboratoire de Physique et Mécanique des Matériaux (LPMM), une étude sur l'application des vibrations dans le procédé de forgeage est réalisée grâce à l'utilisation d'un actionneur piézoélectrique. Le dispositif expérimental est présenté sur la figure 1.27a. Ly et al. [9, 35, 36] ont développé un modèle par la méthode des éléments finis de l'actionneur piézoélectrique selon la direction longitudinale. Le modèle est donc couplé à un modèle analytique simplifié du procédé de forgeage afin de simuler l'ensemble

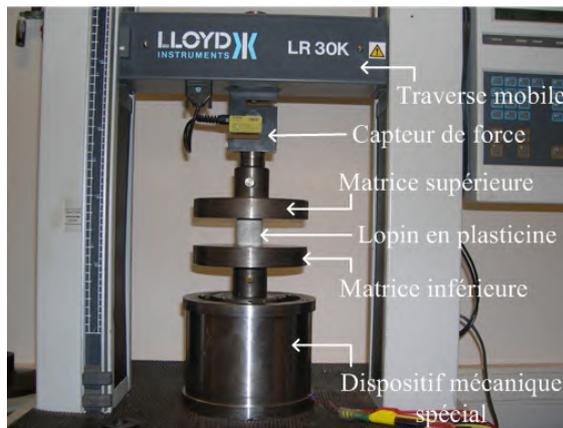


(a) Déplacement de l'outillage

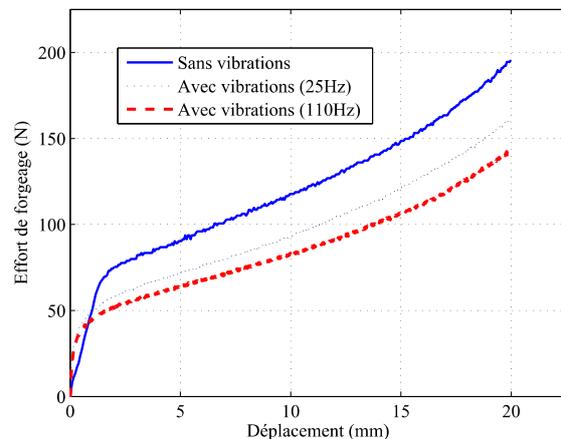
(b) Réduction de force

Figure 1.26: Compression par variation de force avec une presse servo[34]

actionneur-procédé. Une comparaison des résultats expérimentaux dans le cas avec et sans vibrations sur la figure 1.27b nous présente une diminution de l'effort moyen nécessaire en appliquant des vibrations sur des petits échantillons de plastiline (environ 25 %) [36] avec l'assistance des vibrations en basse fréquence (25 Hz et 110 Hz).



(a) Montage expérimental



(b) Réduction de force

Figure 1.27: Forgeage en utilisation d'un actionneur piézoélectrique [36]

En raison de leur rigidité, et compte tenu des amplitudes et des fréquences, les actionneurs piézoélectriques sont particulièrement bien adaptés à la génération des vibrations nécessaires pour l'assistance au forgeage mais leurs efforts restent limités.

En conclusion, les résultats des applications de vibrations en basse fréquence dans le forgeage nous montrent l'efficacité de cette plage de fréquence pour la réduction de la force de forgeage. Les effets de surface comme la réduction de frottement, l'amélioration de la surface du produit sont aussi obtenus dans cette plage de fréquence.

1.4 Problématique et méthodologie de la thèse

Ce travail de thèse est une prolongation des recherches entreprises par Ly et al [9] pour l'étude de l'application des vibrations afin d'assister le forgeage dans le cadre d'une collaboration entre le Laboratoire d'Électrotechnique et d'Électronique de Puissance de Lille (L2EP) et le Laboratoire de Conception, Fabrication et Commande (LCFC). Avec le dispositif initialement intégrant un seul actionneur piézoélectrique, la force générée reste limitée, particulièrement dans le cas du forgeage d'un échantillon de métaux. Pour obtenir une plus grande force totale, une solution est d'augmenter le nombre d'actionneurs piézoélectriques du système. De plus, l'utilisation de plusieurs actionneurs nous donne une possibilité de générer des vibrations avec diverses formes d'ondes plutôt qu'une vibration selon la direction de forgeage. Jusqu'à présent, toutes les recherches expérimentales de l'application des vibrations pour assister le procédé de forgeage se sont concentrées sur l'effet de vibration uni-axiale; l'application de vibrations dans d'autres directions n'a jamais été étudiée.

Une étude récente par la méthode des éléments finis, effectuée par Khan [10], a analysé l'application d'une onde progressive dans l'écrasement d'un lopin cylindrique comme le montre la figure 1.28a. Deux rotations respectivement autour de l'axe Ox et de l'axe Oy sont imposées à la matrice inférieure en contact avec le lopin. La simulation par le logiciel FORGE® a montré une réduction significative de l'effort lorsqu'une onde progressive est générée à la surface du lopin en contact avec la matrice inférieure. De plus, par rapport au cas où la vibration est unidirectionnelle, la variation de force est beaucoup régulière [10, 37].

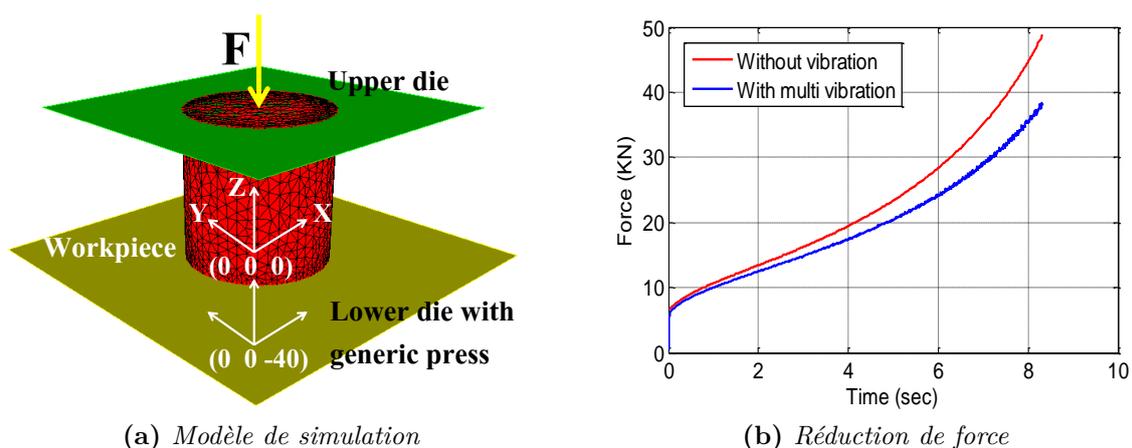


Figure 1.28: Résultat de simulation numérique pour l'application d'une onde progressive [10]

Le gain de réduction de la force du forgeage dans cette étude est présenté sur la figure 1.29. Une réduction jusqu'à 21 % (une valeur moyenne environ 14 %) a été obtenue à la fin du déplacement par rapport à la réduction d'environ 3 % par vibrations uni-axiales

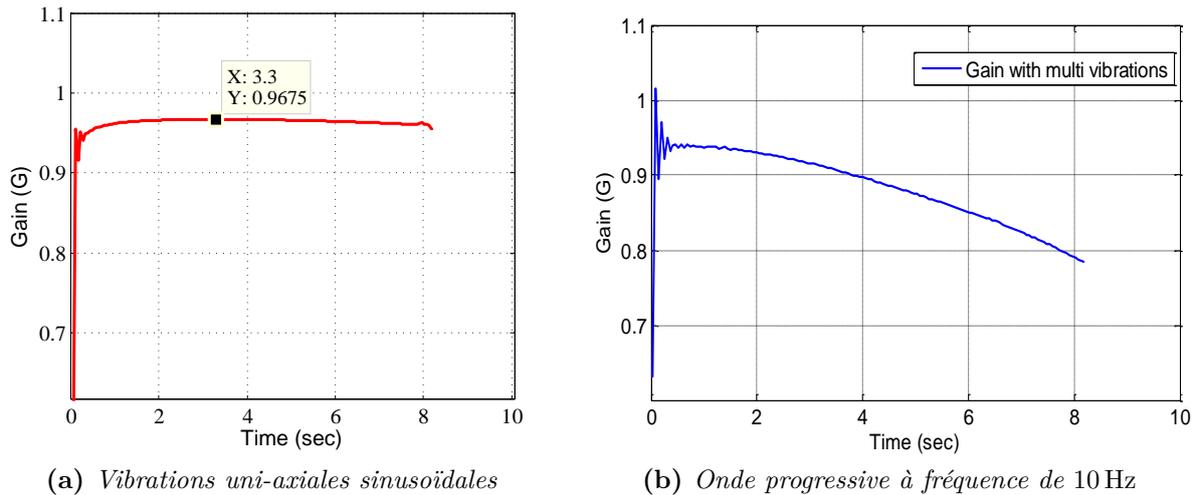


Figure 1.29: Gain en réduction de la charge du forgeage avec l'assistance des vibrations [10]

sinusoïdales avec un seul actionneur pour un lopin d'aluminium (figure 1.29a). Le gain initial sur la force est faible, mais il augmente en fonction du temps. Cette étude montre l'avantage de l'utilisation des ondes progressives dans le procédé de forgeage. Ces résultats démontrent l'intérêt de l'application de vibrations plus complexes telles l'onde progressive pour assister le forgeage. D'ailleurs, une combinaison des deux types de vibrations, onde progressive et vibration uni-axiale, pourrait être une solution favorable pour augmenter l'efficacité de la méthode d'assistance par vibrations.

Cependant, la forme d'onde des vibrations uni-axiales selon la direction de forgeage peut également différer de la forme sinusoïdale. L'intérêt d'utiliser d'autres formes d'onde de vibrations, en carré, en triangulaire, a été présenté dans l'étude de Khan [10] par l'étude analytique d'un lopin cylindrique sous l'application de vibrations. Le résultat de calcul est cohérent avec celui de la simulation avec FORGE® et avec les résultats expérimentaux dans le cas d'un échantillon de plasticine. Mais dans le cas des échantillon d'aluminium ou de cuivre, une erreur apparaît. Elle vient de l'utilisation d'un comportement viscoplastique pour le modèle du lopin qui ne donne pas un comportement correct des métaux à froid. Une étude du système mono-actionneur avec un modèle différent de comportement des métaux est nécessaire pour mieux comprendre l'influence des paramètres de vibrations et donner le cahier des charges pour une vibration selon la direction de forgeage. La modélisation globale du système mono-actionneur par une approche systématique sera effectuée dans le deuxième chapitre de la thèse.

Pour réaliser en pratique le mouvement en onde progressive couplé avec une vibration verticale, il faut ensuite concevoir un système multi-actionneurs piézoélectriques qui permet de réaliser ces mouvements sur la matrice inférieure. La conception de ce système multi-actionneur est un verrou technique de la thèse parce que les caractéristiques mécaniques du système (cinématique, déformation élastique ...) sont très influentes sur les vibrations

obtenues à l'interface de contact avec le lopin de forgeage. Le comportement du système mécanique influence le comportement du système complet et doit être pris en compte en vue de la commande. Les différents étapes de conception seront présentées en détail dans le troisième chapitre de la thèse.

Ensuite, pour obtenir les formes désirées de vibrations, la commande du système complet doit être réalisée. Une première étape de modélisation du système mécatronique couplé comprenant l'électronique d'alimentation, les actionneurs piézoélectriques et le système mécanique sera développée, et aboutira à la Représentation Énergétique Macroscopique du système. Enfin, par inversion de cette représentation, une structure de commande sera obtenue. Ces deux parties seront abordées dans les deux derniers chapitres de la thèse.

