Science Arts & Métiers (SAM)
is an open access repository that collects the work of Arts et Métiers Institute of Technology researchers and makes it freely available over the web where possible.

This is an author-deposited version published in: https://sam.ensam.eu
Handle ID: .http://hdl.handle.net/10985/23343

To cite this version :

Camille DURAND, Ludovic FREUND, Cyrille BAUDOUIN, Jean Dominique GUÉRIN, Regis BIGOT - Instrumentation d'un procédé de forgeage : comparaison de différentes technologies de capteurs - In: 17ème Colloque National S.mart « Le jumeau numérique au service de l'industrie 4.0 », France, 2021 - Actes du 17ème colloque S.mart (AIP PRIMECA) - 2021

Any correspondence concerning this service should be sent to the repository Administrator : scienceouverte@ensam.eu

Instrumentation d'un procédé de forgeage : comparaison de différentes technologies de capteurs

Camille Durand, Ludovic Freund, Cyrille Baudouin, Régis Bigot
Arts et Métiers, Institute of Technology, Université de Lorraine, LCFC, HESAM Université
F-57070 Metz – France
camille.durand@ensam.eu

Jean-Dominique Guérin
Université Polytechnique Hauts de France, CNRS, LAMIH UMR 8201
F-59313 Valenciennes – France

Résumé— De nos jours, les simulations numériques sont de plus en plus utilisées dans l'industrie de la forge, et leur prédictibilité est validée grâce à des comparaisons avec des campagnes expérimentales. Il arrive cependant parfois que les résultats expérimentaux et numériques soient significativement différents. Dans ce contexte se sont bien souvent les modèles numériques implémentés dans les simulations qui sont tenus pour responsables des divergences avec les résultats expérimentaux. Les résultats issus de l'expérience peuvent toutefois également être discutés et remis en cause. Selon les conditions opératoires, ou le type de capteur utilisé, les résultats mesurés peuvent être différents. Sans compter que l'intégration de capteurs pour surveiller des procédés de forgeage, n'est pas aisée puisque que les capteurs peuvent être exposés à des conditions extrêmes en termes de vitesses, d'efforts appliqués, de hautes températures, de rayonnement… Dans cette étude, les valeurs de déplacement de l'outil supérieur d'une machine de forgeage et de l'effort appliqué, sont mesurées par différents capteurs et sont comparées. Les avantages des différentes technologies de capteur sont discutés dans le cas de procédé de forgeage à chaud mis en œuvre avec des machines pilotées en énergie.

Mots-clés— capteur laser, codeur incrémental, accélérometre, surveillance de procédé, procédé de forgeage

I. INTRODUCTION

Dans le domaine de la mise en forme, les industriels font actuellement face à de nouveaux défis puisqu'ils doivent produire avec un parc machine vieillissant tout en répondant aux exigences croissantes des clients, concernant la qualité des produits. Il faut donc trouver des solutions pour permettre l'instrumentation des machines de forgeage et ainsi surveiller les principaux paramètres procédés. Avec l'émergence des jumeaux numériques pour les procédés de fabrication [1], la façon de surveiller certains paramètres a été discutée. Concernant le forgeage à chaud, Hawryluk et al. [2] passent en revue les techniques de mesure de température et de dimensions des pièces ainsi que de l'usure matrice. L'utilisation des émissions acoustiques permet la détection des défauts dans les outillages et les pièces [3], et la position des capteurs d'onde acoustique peut être optimisée afin de surveiller le procédé de forgeage [4]. Concernant la surveillance machine, il a été montré qu'avec l'aide d'une caméra rapide, la vitesse d'impact du coulisseau peut être déterminée pour des marteaux pilons [5] ou des pilons contre-frappe [6]. Et grâce à cette méthode, l'énergie cinétique peut être déduite à partir de la vitesse d'impact mesurée. Par ailleurs, les systèmes de stéréovision [7] permettent aussi la mesure de la déformation de certains éléments de presse lors du forgeage : pour une presse mécanique [8] ou une presse à vis [9]. Mesurer la force développée par la machine pendant le forgeage peut aussi être une façon de surveiller les performances des presses et être un indicateur de rupture d'outils. Hsia et al. [10] et Kim et al. [11] ont ainsi disposé plusieurs capteurs piézoélectriques au sein d'un outillage. Sur une presse mécanique, une surveillance prédictive et un système de diagnostic ont été développés pour contrôler un procédé d'extrusion à froid. Pour cela, la presse a été instrumentée avec des capteurs piézoélectriques mesurant l'effort à différents endroits et des accéléromètres mesurant les accélérations spatiales, les vibrations et les torsions. Ces signaux sont utilisés pour détecter des déviations par rapport au procédé optimal [12]. Les presses mécaniques et hydrauliques sont plus faciles à instrumenter que des presses à vis ou des marteaux pilons ayant de hautes vitesse d'impact, rendant les conditions plus sévères. En outre, aucune comparaison de signaux provenant de différents types de capteurs n'a été trouvée dans la littérature afin de donner des directives pour obtenir l'instrumentation machine la plus fiable et la plus juste possible en fonction de l'environnement de travail (laboratoire ou industrie) et des objectifs visés. Pourtant, selon le type de capteur utilisé et de sa position, les informations enregistrées peuvent être très différentes et cela doit être pris en compte si un procédé doit être surveillé avec précision.

C'est pourquoi, dans ce papier, une étude sur la réponse des différents capteurs de déplacement et de force est réalisée, pour le cas du refoulement d'un cylindre de cuivre sur une presse à vis. Les différentes technologies de capteurs utilisées sont présentées et les résultats obtenus sont comparés et discutés. Une méthode pour déduire la vitesse du coulisseau à partir des capteurs de déplacements et grâce à un filtre Kalman est proposée. Enfin, une analyse critique des performances des différents capteurs permet de proposer des méthodes optimales pour utiliser les capteurs pour surveiller un procédé de mise en forme avec une machine pilotée en énergie, que ce soit en industrie ou en laboratoire. Des mesures rigoureuses de

déplacement, vitesse, accélération et effort du coulisseau permettent jusqu'à la détermination d'un modèle dynamique d'un moyen de production, ou un suivi de production en connaissant les efforts et la déformation subis par la pièce, ainsi que la sollicitation outillage.

II. PROCEDE DE FORGEAGE ET CAPTEURS

Cette étude est conduite sur la presse à vis Lasco SPR 400 de la plateforme Vulcain à Metz en France. Cette presse appartient à la catégorie des presses pilotées en énergie et a donc un comportement dynamique. Cela requiert alors l'utilisation de capteurs adaptés aux conditions dynamiques. Le but de cette étude est d'être capable d'enregistrer avec justesse le déplacement et la vitesse du coulisseau, ainsi que la force appliqué par le coulisseau sur la pièce. Cette étude ne prétend pas être exhaustive, en effet d'autres types de capteurs auraient pu être utilisés.

Avec les machines pilotées en énergie, 2 différents types de chocs peuvent avoir lieu : les « chocs mous » ou inélastiques pour lesquels l'énergie développée par la machine est absorbée de façon significative par la déformation plastique de la pièce, et les « chocs durs » ou élastiques, où l'énergie développée par la presse est absorbée de façon significative en déformation élastique du bâti de la machine.

Dans cette étude, les « chocs mous » ont été analysés grâce au refoulement de lopin de cuivre alors que les « chocs durs » ont été obtenus grâce à des frappes à vides, sans lopins. Les conditions expérimentales sont résumées dans le tableau 1.

choc mou		**choc dur**	
refoulement de cuivre		frappes à vide (sans lopin)	
Diamètre	50 mm		
Hauteur	30 mm		
Température	19 °C		
Energie(%)	25 %	**Energie (%)**	28 %
Energie(kJ)	7,25 kJ	**Energie (kJ)**	8,12 kJ
Vitesse d'impact	340 mm/s	**Vitesse d'impact**	360 mm/s

Tableau 1. CONDITIONS EXPERIMENTALES POUR LES CHOCS MOUS ET DURS

A. *Capteurs de déplacement*

Pour enregistrer le déplacement du coulisseau, les capteurs suivants ont été utilisés : une caméra rapide, un codeur magnétique incrémental, 3 capteurs laser, et un accéléromètre. La caméra rapide n'est pas en liaison avec la presse puisqu'elle est placée à 1 mètre de celle-ci et vise les mires collées sur l'outillage, le codeur magnétique est intégré à la presse, et les lasers ainsi que les accéléromètres sont fixés aux outillages. La position de tous les différents capteurs utilisés est synthétisée figure 1.

1) *Caméra rapide*

De nos jours les caméras rapides sont capables de filmer des scènes avec une très grande résolution (allant de 60×10 pixels jusqu'à 2 000×2 000 pixels) à de grandes fréquences d'acquisition (de 24 images/s à 650 000 images/s) avec suffisamment de mémoire interne pour enregistrer toutes les données. Cependant, il faut rappeler qu'il est impossible d'enregistrer d'un film à la plus haute résolution avec la plus grande fréquence d'acquisition. Il y a une relation entre le choix de la résolution et le choix de la fréquence d'acquisition : plus la fréquence d'acquisition est grande, plus basse sera la résolution, et inversement. Afin de mesurer le déplacement du coulisseau d'une machine de forgeage lors d'un coup, le critère le plus important est de définir la fréquence d'acquisition, car elle doit être suffisamment grande par rapport à la vitesse maximale du coulisseau. Pour les machines pilotées en énergie, la vitesse du coulisseau varie de 0,5 m/s à 9 m/s.

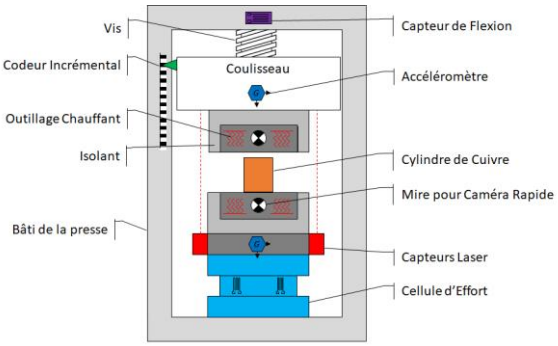

Figure 1. SCHEMA DE POSITION DES DIFFERENTS CAPTEURS

Dans notre cas, la presse à vis à une vitesse maximale de 0,7 m/s, et notre caméra rapide Photron Fastcam SA3 a une fréquence d'acquisition maximum de 120 000 images/s. La caméra est placée devant la presse, donc dans un référentiel absolu, avec un projecteur de lumière continue éclairant les mires disposées sur les outillages, afin de suivre leurs déplacements lors des frappes. Les images enregistrées sont ensuite calibrées : la relation entre la taille d'un pixel et la distance en mm est définie. En comptant le nombre de pixels entre 2 mires, la distance peut être déduite.

2) *Codeur magnétique incrémental*

Les systèmes de mesure magnétique fonctionnent de façon à ce que le capteur se déplace sans contact sur une bande magnétique aimantée à intervalles réguliers avec des pôles magnétiques. En balayant les pôles magnétiques, un signal analogique est généré, puis est converti en un signal numérique traité par l'électronique. Le capteur détecte l'intervalle de la bande et convertit les informations en un trajet haute résolution, et permet ainsi d'enregistrer la position du coulisseau par rapport au Point Mort Bas (PMB) du système, pour chaque incrément. Les capteurs magnétiques ont l'avantage d'être insensibles à la saleté, aux huiles et à l'humidité et sont relativement stables face aux chocs et aux vibrations. Ils peuvent également travailler à des températures allant de 0°C à 60°C et enregistrer des déplacements avec une vitesse maximale de 20 m/s.

Un codeur magnétique (MW991424 de IPF Electronic) est intégré à notre presse à vis, la bande magnétique est située sur un des montants de la presse. Le codeur magnétique peut enregistrer une vitesse de coulisseau jusqu'à 5 m/s avec une résolution de 10 µm.

3) *Capteurs laser*

Les spots laser sont projetés sur une surface et la lumière réfléchie tombe incidente sur l'élément récepteur des capteurs, selon un certain angle, en fonction de la distance. A partir de la

position du spot lumineux sur l'élément récepteur et de la distance entre l'émetteur et le récepteur, la distance à l'objet de mesure est calculée par le capteur. Les capteurs lasers peuvent mesurer des distances comprises entre 2 et 750 mm, avec une fréquence de mesure pouvant atteindre jusqu'à 50 kHz et une résolution pouvant aller jusqu'à 0,03 µm. Cependant, avec un capteur laser, il n'est pas possible de mesurer la distance la plus grande avec la plus grande fréquence de mesure et la plus haute résolution. Il existe une relation entre le choix de la plage de mesure, la résolution et la fréquence d'acquisition : plus la plage de mesure est grande, plus la résolution et la vitesse de mesure seront faibles, et inversement.

Dans cette étude, 3 capteurs laser sont disposés autour de l'outillage inférieur et les spots laser sont projetés sur la surface de l'outillage supérieur. Les capteurs laser utilisés sont des micro-epsilon ILD 1401-200 avec une plage de mesure pouvant aller jusqu'à 200 mm, une fréquence de mesure de 1 kHz et une résolution de 40 µm. La distance de mesure de 200 mm limite la hauteur de frappe mesurable pour la mise en forme, mais dans notre cas, cette limite est suffisamment haute car la course maximale de refoulement est d'environ 150 mm à une vitesse maximale de 0,7m/s.

4) Accéléromètres

L'accéléromètre est constitué d'éléments de détection à capacité variable MEMS sur chaque axe, qui se compose d'une très petite masse d'inertie et d'un élément de flexion en porte-à-faux positionné entre 2 plaques. Au fur et à mesure que la masse dévie sous l'accélération, la capacité entre ces plaques change. Le conditionneur de signal interne de l'accéléromètre fournit alors un signal de sortie analogique, proportionnel à l'accélération appliquée. Ce signal de sortie est mis à l'échelle en tant que tension proportionnelle à l'accélération appliquée. L'accéléromètre peut fonctionner à des températures allant de -55°C à 125°C avec une réponse en fréquence de 2 kHz.

Sur notre presse à vis, 2 accéléromètres triaxiaux (Kistler 8396A050) sont mis en place : l'un sur l'outil supérieur et l'autre sur l'outil inférieur pour mesurer l'accélération selon les 3 axes. Ces accéléromètres ont une plage d'accélération de +/- 50g, et une fréquence de résonnance de 6,5 kHz.

B. *Déduction de la vitesse du coulisseau à partir de la mesure de déplacement*

La vitesse du coulisseau peut être calculée en dérivant le déplacement du coulisseau. Une autre méthode pour déduire la vitesse du coulisseau, est d'appliquer un filtre de Kalman sur le signal enregistré par l'accéléromètre. Comme les accéléromètres mesurent l'accélération d'un objet en mouvement, mathématiquement, il est possible de déterminer la position de l'objet en intégrant 2 fois le signal de l'accélération et en connaissant les conditions initiales de positions et de vitesses de l'objet. Malheureusement, l'erreur d'estimation des conditions initiales, les erreurs de mesures de l'accélération et les bruits du signal rendent cette approche inappropriée à cause des biais d'intégration [13]. Néanmoins, si l'accéléromètre est couplé avec une mesure de déplacement (même de mauvaise qualité), il devient possible d'estimer le déplacement et la vitesse de l'objet avec une bonne précision grâce à un filtre de Kalman [14 -16]. L'emploi d'une telle méthode utilisant le filtre de Kalman a déjà été vue dans la littérature pour ce qui concerne le secteur de l'aéronautique, mais est totalement nouveau dans le domaine du forgeage.

Ici, le filtre de Kalman a été appliqué, d'abord pour filtrer le signal de déplacement obtenu avec les capteurs laser, mais aussi et surtout pour estimer la vitesse du coulisseau. Le problème peut être discrétisé avec les matrices suivantes [17] :

$$\mathbf{x}(k+1) = \mathbf{A_d}\mathbf{x} + \mathbf{B_d}\gamma_m + \mathbf{w_k} \quad (1)$$

$$z_m = [1\ 0]\mathbf{x} + \eta_d \quad (2)$$

avec

$$\boldsymbol{x} = \begin{bmatrix} z \\ \dot{z} \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\boldsymbol{A_d} = \begin{bmatrix} 1 & T_a \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\boldsymbol{B_d} = \begin{bmatrix} \frac{1}{2}T_a^2 \\ T_a \end{bmatrix} \quad (5)$$

Et z_m, γ_m la position et l'accélération mesurées, z et $\dot{z}$ la position et la vitesse estimées, T_a l'intervalle de mesure, w_k la matrice de covariance et $\acute{\eta}_d$ le bruit de mesure associé au déplacement.

C. *Capteurs de force*

Concernant les capteurs d'effort, les transducteurs piézoélectriques sont souvent utilisés pour enregistrer la force sous conditions dynamiques. Mais ici une autre technologie de capteur a été choisi, utilisant un extensomètre de contact, aussi adaptée pour les mesure de forces en dynamique et dans nos ordres de grandeur de fréquence.

Un capteur de flexion est intégré à la presse : la force est mesurée et enregistrée par des jauges de déformation localisées sur la traverse de la presse. Une connexion solide est formée entre le transducteur de déformation et la traverse de la presse avec 4 vis. Les chargements mécaniques causent un changement dans la longueur de la traverse qui est transféré au transducteur de déformation. Le changement de longueur change la résistance électrique de la jauge de déformation proportionnellement à la déformation. C'est converti en un signal extérieur output par l'amplificateur DC intégrateur. Ici l'extensomètre est un HBM SLB-700A/06VA1 avec une tension de sortie de 0 à 10V, une étendue de mesure jusqu'à 500 µm/m et une température opératoire de -20°C à 60°C.

La même technologie de capteur est utilisée pour un capteur de force externe intégré à l'outillage et localisé sous la matrice inférieure. Donc à cette position, le capteur de force est plus proche du lieu de frappe. Ici l'extensomètre est fabriqué par Doerler, il a une tension de sortie de 0 à 10V, une jauge de résistance de 350 Ω et peut mesurer jusqu'à 6 300kN. Le capteur a une rigidité de 3,4 e^{10} N/m qui est plus grande que celle de la presse (approximativement 2,6 e^{9} N/m) et ainsi ne devrait pas avoir d'impact sur la presse.

Pour compléter ce dispositif expérimental, la force est aussi déduite de la déformation d'un cylindre de cuivre calibré. Dans la littérature, la méthode du refoulement de cuivre est utilisée

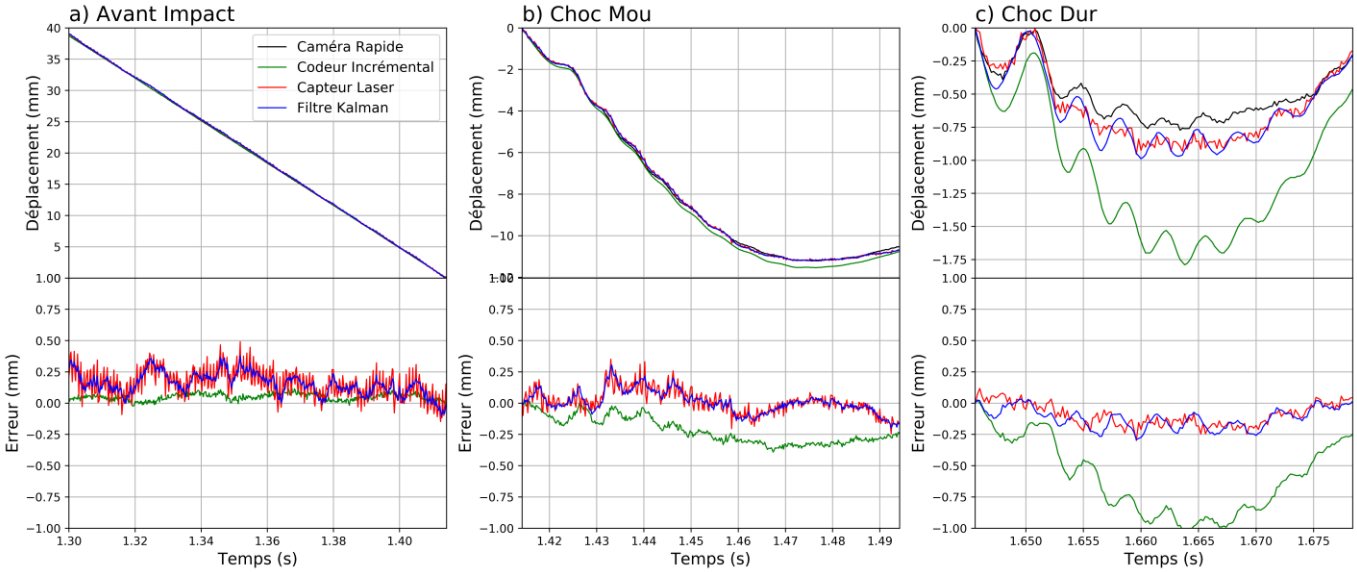

Figure 2. COMPARAISON DES DEPLACEMENTS ENREGISTRES PAR LES DIFFERENTS CAPTEURS

pour déterminer l'énergie des équipements de forgeage [18-19], [6] connaissant la rhéologie du matériau. Ici la même méthode est appliquée et poussée plus loin pour déterminer la force de forgeage. Le cuivre est utilisé car c'est un matériau avec une faible sensibilité à la vitesse de déformation [20] et les cylindres sont conçus pour limiter la chauffe thermique dans le but de limiter l'influence de la température sur la contrainte d'écoulement. Ensuite, si la déformation est considérée comme uniforme pendant la compression des lopins de cuivre, l'expression de l'effort de forgeage peut être déterminé par une intégration de l'équation d'équilibre et la méthode des tranches. Si le frottement entre la matrice et le lopin est exprimé selon la loi de Coulomb, l'expression de la force de forgeage peut être réduite à [21-22] :

$$F_i = \frac{\pi D_i h_i \sigma_i}{2\,\mu}\left(\frac{\exp\left(\mu \frac{D}{h_i}\right)}{\mu \frac{D}{h_i}} - 1\right) \tag{6}$$

Ou D_i et h_i sont le diamètre et la hauteur du lopin, σ_i la contrainte d'écoulement, et μ le coefficient de frottement. La contrainte d'écoulement du matériau peut être exprimée par la loi de Hansel-Spittel avec $\{A, m_1, m_2, m_3, m_4\}$ les paramètres dépendants du matériau :

$$\sigma_i = A \exp(m_1 T)\, \varepsilon^{m_2} \dot{\varepsilon}^{m_3} \exp\left(\frac{m_4}{\varepsilon}\right) \tag{7}$$

Ou la déformation peut être définie par :

$$\varepsilon_i = ln\left(\frac{h_0}{h_i}\right) \tag{8}$$

Et la vitesse de déformation est estimée grâce à la méthode d'Euler (si le temps d'échantillonnage T_a est assez faible)

$$\dot{\varepsilon}_i = (\varepsilon_i - \varepsilon_{i-1})/T_a \tag{9}$$

Si l'effet tonneau est négligé, le diamètre du spécimen peut être exprimé comme une fonction de la hauteur grâce au principe de conservation du volume.

$$D_i = D_0 \sqrt{\frac{h_0}{h_i}} \tag{10}$$

Ainsi, en mesurant la hauteur du cylindre de cuivre pendant la déformation, il est possible d'estimer l'effort de forgeage. Les paramètres de la loi d'Hansel-Spittel utilisé correspondent à un cuivre pur à 99,7% et sont résumés dans le tableau 2.

A	411,19 MPa
m_1	-0,00121
m_2	0,21554
m_3	0,01472
m_4	-0,00935

Tableau 2. PARAMETRES DE LA LOI HANSEL-SPITTEL POUR 99,7% CU

III. RESULTATS

A. *Déplacements du coulisseau*

Les déplacements issus des différents capteurs sont comparés sur la Figure 2. Le déplacement mesuré par caméra rapide est pris comme référence, car contrairement aux autres capteurs, la caméra est indépendante de la presse. En effet, le codeur magnétique et les lasers mesurent le déplacement du coulisseau respectivement par rapport au bâti de la presse et par rapport à l'outillage inférieur fixé sur la table de la presse. Seule la caméra rapide n'est pas liée à la presse, puisqu'elle est liée au sol, et est donc dans un référentiel absolu. Tout d'abord, tous les déplacements sont comparés avant l'impact et ils sont clairement tous superposés. Donc, durant la phase d'accélération du coulisseau, tous les capteurs donnent la

même information, ce qui signifie que la caméra rapide était correctement calibrée.

Les différences entre les signaux apparaissent pendant le choc. Pendant un choc « mou » sur un cylindre de cuivre, le déplacement du codeur incrémental est légèrement au-dessus du déplacement enregistré par les autres capteurs. On relève un écart maximal de 0,25 mm par rapport au déplacement caméra rapide. Les écarts les plus grands sont observés pour les chocs durs : tous les signaux varient à cause de la vibration de la presse, mais les déplacements issus de la caméra, des capteurs laser et du filtre Kalman sont proches. Seul le déplacement enregistré par le codeur incrémental est foncièrement différent des autres : un écart d'1 mm est observé par rapport au déplacement caméra. C'est une différence non-négligeable.

B. *Vitesse du coulisseau*

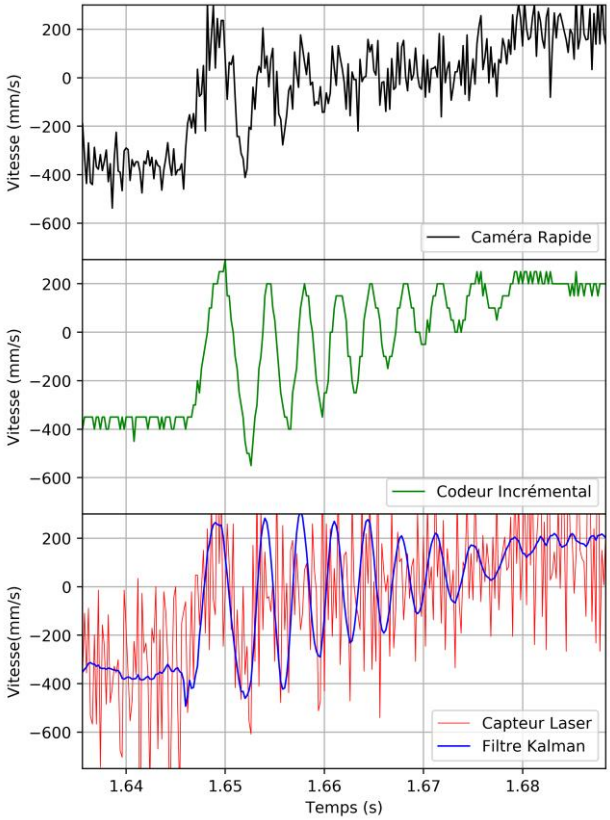

Figure 3. COMPARAISON DES VITESSES DE COULISSEAU DEDUITES DES DIFFERENTS CAPTEURS

Figure 3, les vitesses du coulisseau sont tracées séparément, afin de distinguer clairement la forme de chaque signal. Les vitesses déduites de la caméra rapide et du codeur incrémental sont toutes 2 bruitées et suivent la même tendance, cependant les vitesses du codeur ont une grande amplitude de variation. Concernant les capteurs laser, la vitesse de coulisseau qui en est obtenue est sérieusement bruitée, c'est pourquoi le filtre Kalman a été utilisé et fournit un signal bien plus propre.

Si l'on compare les vitesses issues du codeur et du filtre Kalman sur la figure 4, il apparait que les 2 signaux sont très proches avec des variations de vitesse de même amplitude.

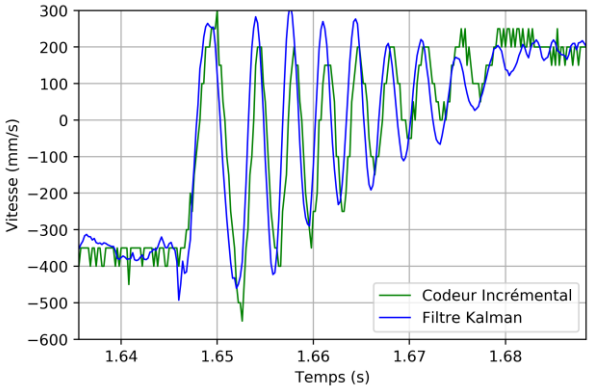

Figure 4. COMPARAISON DES VITESSES DE COULISSEAU OBTENUES GRACE AU CODEUR INCREMENTAL ET AU FILTRE KALMAN

C. *Effort de forgeage*

La Figure 5 présente les forces mesurées par les différents capteurs pendant le choc sur les lopins de cuivre. Pendant le choc, de grandes variations de force sont visibles sur l'acquisition du capteur de flexion intégré à la presse, alors que l'acquisition de la cellule d'effort intégrée à l'outillage inférieur est plus lisse. L'effort déduit de la déformation du cuivre semble être assez proche de la force enregistrée par la cellule d'effort, à l'exception du début et de la fin du choc, quand la force déduite du comportement du cuivre ne décroit pas comme celle de la cellule d'effort. Mais ceci est normal, car la force déduite de la loi matériau du cuivre ne tient pas compte de l'effet de retour élastique.

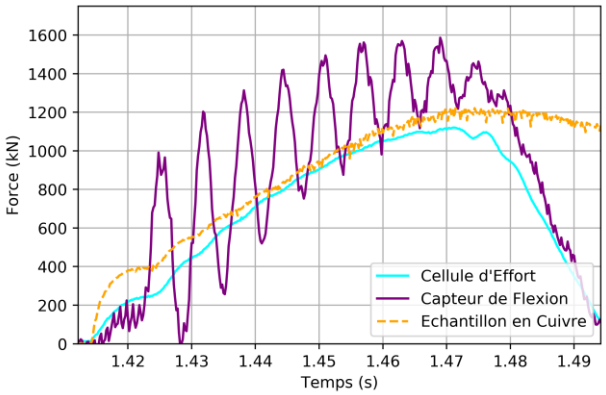

Figure 5. COMPARAISON DES EFFORTS DE FORGEAGE MESURES PAR LES DIFFERENTS CAPTEURS LORS DU REFOULEMENT DE CUIVRE

IV. DISCUSSION

A. *Déplacements du coulisseau*

Pour mesurer les déplacements du coulisseau, la caméra rapide présente l'avantage d'être dans un référentiel absolu, mais cela a pour conséquences que la caméra est difficile à mettre en place, et que le système n'est pas automatisable. De plus, le temps d'acquisition est limité par la capacité mémoire de la caméra et le temps de traitement des données est long. Par ailleurs, les résultats provenant de la caméra rapide peuvent être entachés d'erreur à cause de la résolution minimale limitée de +/- 1 pixel, ou d'un mauvais étalonnage distance-pixel, ou de parallaxes. Malgré tout, des stratégies ont été développées

pour obtenir des précisions inférieures au pixel dans les taches de reconnaissance d'image [23]. Donc, la solution d'utiliser une caméra rapide pour mesurer le déplacement du coulisseau est une bonne option dans le cadre d'un laboratoire, afin d'avoir une redondance d'information ou avec l'objectif de définir de façon précise un modèle mécanique. Ce système peut aussi être utilisé dans l'industrie, mais plutôt dans le cadre d'occasions exceptionnelles et non pas dans des conditions normales de production.

Le codeur incrémental, intégré à la presse, permet l'enregistrement automatisé des déplacements du coulisseau, mais prend en compte les vibrations du bâti de la presse. Pour les chocs mous, les phénomènes vibratoires ne sont pas activés et donc la justesse du codeur incrémental est acceptable comparée aux autres méthodes utilisées. En revanche, pendant un choc dur, le codeur surestime le déplacement de 1 mm par rapport aux autres capteurs, et cela peut être attribué à l'élongation de la presse pendant le choc. Ainsi, le codeur constitue une solution intégrée, automatisable et adaptée pour les laboratoires comme pour l'industrie, mais qui requiert un filtre pour supprimer les vibrations parasites du bâti de la presse.

Les capteurs laser, fixés aux matrices, ont un référentiel lié à la machine, mais ils ne sont pas parasités par les vibrations de la presse. Ils conviennent bien pour les procédés de forgeage à température ambiante, puisqu'ils peuvent être placés directement sur les matrices, sans avoir besoin d'être protégé par un isolant thermique, comme pour le forgeage à chaud. Les mesures de capteurs laser peuvent être entachées d'erreur si le faisceau laser n'est pas perpendiculaire à la surface mesurée. Les lasers montrent aussi des limites en dynamique, avec leur fréquence d'acquisition et leur résolution souvent bien plus faible qu'en statique. Ainsi, pour le choc dur, les capteurs laser ne sont pas capables de mesurer le comportement dynamique de la presse. Plus important encore, les lasers sont très sensibles à la saleté et le signal peut être perturbé si un objet traverse le faisceau (oxyde, flamme, huile etc…). C'est pourquoi plusieurs capteurs laser sont utilisés simultanément : si un signal est perturbé, les autres peuvent encore fournir les informations nécessaires. Une autre solution pourrait être d'éloigner un peu plus les lasers du lieu de frappe, mais ils perdraient alors leur intérêt, et resteraient plus sensibles que des codeurs incrémentaux. Donc pour toutes ces raisons, les capteurs lasers ne sont pas vraiment adaptés aux conditions de production industrielles, mais peuvent être utilisés en laboratoire.

Enfin, un accéléromètre seul, ne permet pas la mesure du déplacement du coulisseau car les doubles intégrations numériques du signal sont très sensibles au bruit et aux erreurs d'étalonnage. Cependant, l'utilisation de l'accéléromètre en plus d'une autre mesure de déplacement peut être utile pour identifier l'instant de contact entre la matrice supérieure et le lopin (Figure 6). Ceci est particulièrement utile pour le cas de frappes successives, car cela permet de savoir pour chaque frappe, la hauteur initiale du lopin. De plus, un signal de déplacement peut être combiné au signal d'un accéléromètre grâce à un filtre Kalman, ce qui améliore la justesse du déplacement, particulièrement en dynamique. Mais l'utilisation d'un accéléromètre peut aussi présenter des limites : des erreurs peuvent être commises si l'axe de l'accéléromètre n'est pas aligné avec l'axe de la frappe, et les accéléromètres de type piézoélectriques ne peuvent pas mesurer d'accélérations constantes et ne peuvent donc pas être utilisés pour des chocs mous. Ainsi, les accéléromètres peuvent être utilisés en laboratoire comme en industrie, mais ils ne suffisent pas, à eux seuls, à surveiller un procédé et la technologie du capteur doit être choisie avec attention, afin de correspondre aux objectifs visés.

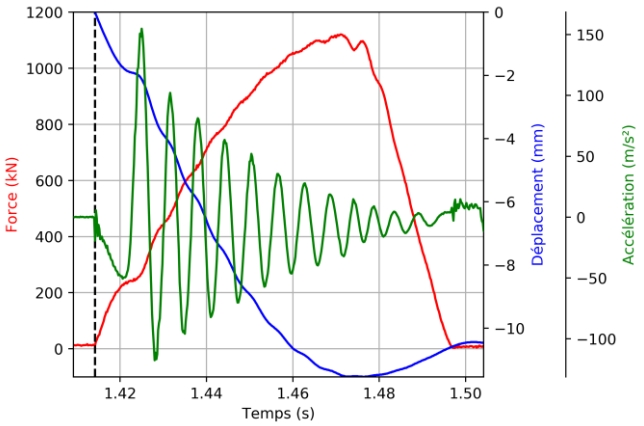

Figure 6. ACQUISITION SYNCHRONISEE DU DEPLACEMENT MESURE PAR LE CODEUR INCREMENTAL, DE L'ACCELERATION MESURE PAR L'ACCELEROMETRE ET DE L'EFFORT DE FORGEAGE MESURE PAR LA CELLULE D'EFFORT

B. *Vitesse du coulisseau*

La vitesse du coulisseau est déterminée en dérivant le déplacement mesuré par la caméra rapide, le codeur incrémental et les capteurs laser. La vitesse obtenue par caméra est modérément bruitée, alors que celle émanant du codeur est plus propre. Dériver le déplacement mesuré par les lasers donne un signal extrêmement bruité et impossible à analyser. Et intégrer l'accélération mesurée par les accéléromètres génère des biais d'intégration et requiert de connaitre précisément la vitesse initiale. Alors, une nouvelle méthode est appliquée, combinant à la fois les signaux des capteurs laser et des accéléromètres au travers d'un filtre Kalman. Cela résulte en un signal de vitesse propre et lisse, proche des vitesses issues de la caméra et du codeur, mais avec encore moins de bruit. Cette méthode, utilisant un filtre Kalman, fournit des résultats fiables pour 2 raisons : d'abord le déplacement issu des lasers est filtré et la dynamique est ajoutée grâce aux accéléromètres, et enfin les biais d'intégration sur le signal de l'accéléromètre sont réduits grâce à l'addition du signal de déplacement des lasers.

C. *Effort de forgeage*

Le capteur de force intégré à la presse est automatisable mais parasité par les vibrations du bâti de la presse, contrairement à la cellule d'effort intégrée à l'outillage qui est proche du lieu de frappe. En contrepartie, le capteur de l'outillage inférieur doit être déformable pour mesurer une déformation par extensomètre, ce qui ajoute une compliance à l'ensemble du système et donc une source de dissipation d'énergie. Par ailleurs, le comportement thermique du procédé

doit être sous contrôle, car les capteurs ne résistent pas à de hautes températures.

La force a aussi été déduite à partir de la déformation du cuivre. Bien sûr, cette méthode ne peut être appliquée que dans des conditions spécifiques : l'échauffement adiabatique doit être maitrisé, les conditions de frottement doivent être connues, la loi rhéologique du matériau doit être correctement identifiée et le déplacement mesuré doit être juste. Mais cette méthode est réellement intéressante car elle permet de connaitre la force sans avoir besoin d'ajouter d'un capteur. Or ceci peut être très utile pour réaliser des mesures sur des machines de forgeage industrielles qu'il n'est pas possible d'instrumenter en capteurs.

Enfin, il ne faut pas oublier que d'autres erreurs, qui concernent tous les types de capteurs, peuvent se produire au niveau de la chaine d'acquisition : erreur de calibrage ou défaut de synchronisation des signaux.

V. Conclusions

Dans cette étude, différent types de capteurs ont été utilisés pour mesurer le déplacement et les efforts dans le cas du refoulement de cylindres de cuivre sur une presse à vis. La technologie de chaque capteur a été détaillée ainsi que leurs avantages et inconvénients. Une nouvelle application du filtre de Kalman a été développée pour en déduire la vitesse du coulisseau à partir du déplacement et de l'accélération.

Pour mesurer le déplacement du coulisseau, les capteurs laser fixés sur l'outillage, semblent être une bonne option pour des conditions de laboratoire, puisque le signal est très proche de la référence, pour les chocs mous comme pour les chocs durs. Cependant, dans cette étude, les capteurs laser montrent des limites pour mesurer le comportement dynamique du procédé de forgeage, mais ceci devrait pouvoir être corrigé en choisissant des capteurs laser conçus pour la dynamique. Malgré tout, des capteurs laser seuls ne suffisent pas pour déduire la vitesse du coulisseau : un accéléromètre doit être ajouté et un filtre de Kalman doit être appliqué à la fois sur le déplacement et l'accélération. Les accéléromètres permettent aussi de déterminer, avec précision, le point d'impact, ce qui est intéressant pour des frappes successives. En conditions industrielles, le codeur incrémental intégré à la machine fournit une bonne alternative pour mesurer le déplacement : les résultats sont fiables et peuvent être filtrés pour supprimer les vibrations, si besoin. Concernant les efforts de forgeage, les cellules de mesure par extensomètre fournissent des résultats satisfaisants quand le capteur est proche du lieu de frappe. Dans le cas où une cellule de mesure ne peut être intégrée que dans le bâti de la machine, les données doivent être filtrées pour supprimer les vibrations parasites. Et si une machine ne peut être instrumentée en effort, il a été montré que déduire la force à partir de la déformation d'un lopin dont la rhéologie est connue, permet d'avoir de bonnes prédictions jusqu'à ce que la force maximale soit atteinte.

VI. Aknowledgements

Les auteurs veulent remercier M. Jean François Mull et M. Alexandre Fendler pour leur aide sur ce projet. Les auteurs souhaitent également remercier ISEETECH pour les fournitures de la plateforme Vulcain 4.0, dédiée au forgeage.

VII. References

[1] C. Cimino, E. Negri, L. Fumagalli, "Review of digital twin applications in manufacturing", Computers in industry, vol. 113, 2019

[2] M. Hawryluk, J. Ziemba, "Possibilities of application measurement techniques in hot die forging processes", Measurement vol. 110, pp. 284-295, 2017

[3] I. El-Galy, BA. Behrens, "Online monitoring of hot die forging processes using acoustic emission (part 1)", Journal for acoustic emission, vol.26, pp. 208-218, 2008

[4] C.K. Mukhopadhyay, S. Venugopal, T. Jayakumar, S.L. Mannan, B. Raj, B. Chatterji, R. Srinivasan, V. Gopalakrishnan, G. Madhusudan, R.S. Triapthi, "Optimisation of positionning of an acoustic emission sensor for monitoring hot forging", Materials and Manufacturing processes, vol. 21, pp. 543-549, 2006

[5] T. Yoneyama, K. Miyoshi, T. Tate, "Contact Stress and Temperature during Air-Stamp Hammer Upsetting of a Circular Cylinder", Journal of Manufacturing Processes 32 : 791-801. doi : 10.1016/j.jmapro.2018.04.012.

[6] L. Galdos, E. S. de Argandoña, N. Herrero, M. Ongay, J. Adanez, M. Sanchez, "The Calibration of High Energy-Rate Impact Forging Hammers by the Copper-Column Upsetting Method and High Speed Camera Measurements", Key Engineering Materials 611-612 : 173-177.

[7] R. Chen, Z. Li, K. Zhong, X. Liu, Y. Wu, C. Wang, Y. Shi, "A Stereo-Vision System for Measuring the Ram Speed of Steam Hammers in an Environment with a Large Field of View and Strong Vibrations", Sensors 19.5 : 996. doi : 10.3390/s19050996.

[8] C. Brecher, W. Klein, M. Tannert, "Optimization of Multi-Stage Closed-Die Forging Processes by Coupled Simulation of the Machine and the Forging Processes", Production Engineering 4.2-3 : 279-286.

[9] C. Durand, R. Bigot, C. Baudouin, "Contribution to the characterization of metal forming machines: application to screw presses ", 17th International Conference on Metal Forming, Metal Forming 2018.

[10] S.Y. Hsia, Y.T Chou, C.C Chang, L.Y. Hsu, "Measurement of wisdom forging force using piezoelectric materials", ICPMMT 2017, vol. 123

[11] S.Y. Kim, A. Ebina, A. SAno, S. Kubota, "Monitoring of process and tool status in forging process by using bolt type piezo-sensor", Procedia Manufacturing, vol. 15, pp. 542-549, 2018

[12] S.A. Spiewak, R. Duggirala, K. Barnett, "Predictive monitoring and control of the cold extrusion process", Annals of CIRP, Vol. 49, pp. 383-386, 2000

[13] S. Han, "Measuring displacement signal with an accelerometer," J. Mech. Sci. Technol., vol. 24, no. 6, pp. 1329–1335, 2010

[14] R. Ferrero, F. Gandino, M. Hemmatpour, B. Montrucchio, M. Rebaudengo, "Exploiting accelerometers to estimate displacement," 2016 5th

Mediterr. Conf. Embed. Comput. MECO 2016 - Incl. ECyPS 2016, BIOENG.MED 2016, MECO Student Chall. 2016, no. March 2018, pp. 206–210, 2016

[15] G. Koo, K. Kim, JY. Chung, J. Choi, N-Y. Kwon, D-Y. Kang, H. Sohn, "Development of a high precision displacement measurement system by fusing a low cost RTK-GPS sensor and a force feedback accelerometer for infrastructure monitoring," Sensors (Switzerland), vol. 17, no. 12, 2017, doi: 10.3390/s17122745.

[16] K.-T. Park, S.-H. Kim, H.-S. Park, K.-W. Lee, "The determination of bridge displacement using measured acceleration," Engeneeing Struct., vol. 27, pp. 371–378, 2005, doi: 10.1016/j.engstruct.2004.10.013.

[17] A. Smyth, M. Wu, "Multi-rate Kalman filtering for the data fusion of displacement and acceleration response measurements in dynamic system monitoring," Mech. Syst. Signal Process., vol. 21, no. 2, pp. 706–723, 2007

[18] A. J. Organ, " The calibration of high energy-rate impact forming machines", Int. J. Mach. Tool Des. Res., Vol.7, pp.325-349, Pergamon press, 1967

[19] T. Altan, D.E. Nichols, "Use of standardized copper cylinders for determining load and energy in forging equipment", Journal of engineering for industry, Transactions of the ASME, pp. 769-774, 1972

[20] R.P. Carreker Jr., W.R. Hibbard Jr, "Tensile deformation of high-purity copper as a function of temperature, strain rate, and grain size ", Acta Metallurgica, Vol.1, pp. 654-663, Nov. 1953

[21] H. Han, "The validity of mathematical models evaluated by two-specimen method under the unknown coefficient of friction and flow stress", J. Mater. Process. Technol., vol. 122, no. 2–3, pp. 386–396, 2002

[22] P. Christiansen, P. A. F. Martins, N. Bay, "Friction Compensation in the Upsetting of Cylindrical Test Specimens," Exp. Mech., vol. 56, no. 7, pp. 1271–1279, 2016, doi: 10.1007/s11340-016-0164-z.

[23] A. Trujillo-Pino, K. Krissian, M. Alemàn-Flores, D. Santana-Cedrès, "Accurate subpixel edge location based on partial area effet," Image and vision computing, Vol. 31, Issue 1, 2013, pp. 72-90