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/10985/23469

To cite this version :

Camille DURAND, Cyrille BAUDOUIN, Regis BIGOT - Modélisation pour évaluer l'efficacité d'une opération de forgeage : application aux machines pilotées en énergie - Forge et fonderie - Vol. 03, p.20-29 - 2022

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

Modélisation pour évaluer l'efficacité d'une opération de forgeage : application aux machines pilotées en énergie

Durand Camille[1]; Baudouin Cyrille[1]; Bigot Régis[1]

1 *Arts et Metiers Institute of Technology, Université de Lorraine, LCFC, HESAM Université, F-57070 Metz, France*

1 Introduction

La résistance à la déformation de matériaux à hautes performances implique de mettre en œuvre des efforts importants pour les forger, cela conduisant souvent à atteindre les limites de la machine qui n'est plus en mesure de transmettre l'intégralité de l'énergie de la frappe au lopin. Au-delà des efforts importants, les très fortes décélérations des éléments en mouvement durant la déformation du lopin provoque l'activation de phénomènes dynamiques, eux aussi, à l'origine de pertes énergétiques. Il devient alors nécessaire de quantifier ces pertes, en utilisant la notion d'efficacité correspondant au rapport de l'énergie transmise au lopin sur l'énergie disponible fournie par la machine. Expérimentalement, l'efficacité est différente selon les conditions opératoires. Les forgerons ont défini plusieurs types de chocs : les chocs mous ou inélastiques et les chocs durs ou élastiques [1]. Les chocs inélastiques sont caractérisés par des efforts faibles et des temps de forgeage élevés pour une efficacité importante. Par opposition, les chocs élastiques présentent des efforts élevés et une durée brève avec une efficacité faible. Généralement, les chocs inélastiques sont observés pour les premières frappes réalisées sur la pièce, tandis que les chocs élastiques apparaissent après plusieurs coups. Cela témoigne d'une évolution du comportement de la machine coup après coup durant le forgeage de la pièce.

Avec les machines pilotées en énergie, comme les marteaux pilons, les températures, les vitesses d'impact et les énergies développées peuvent être très élevées, ce qui rend leur instrumentation difficile et donc limite leur modélisation. C'est pour cette raison qu'il n'existe actuellement que des modèles théoriques, sans liens directs avec la réalité, pour représenter le comportement des machines pilotées en énergie [2].

Les travaux présentés ici visent à modéliser le comportement dynamique des machines de forgeage, afin de considérer à terme, l'influence du comportement des machines sur le procédé. Pour se faire, l'étude se limite au cas des machines pilotées en énergie, et l'ensemble {machine + outillages} est considéré. De plus, les modèles développés s'attachent à modéliser le comportement de l'ensemble uniquement pendant la phase de frappe. L'objectif est de rendre les simulations plus prédictives en intégrant l'efficacité de la machine. Ces avancées auront pour conséquence une meilleure connaissance du chemin thermomécanique subi par la pièce dès la simulation. Ce qui contribuera à l'optimisation des gammes de forgeage pour la maîtrise de la microstructure des matériaux et de la qualité des pièces forgées.

2 Méthodologie

Un modèle macroscopique de la machine et des outillages lors d'une opération de forgeage est défini par des masses, des ressorts et des amortisseurs (Figure 1) : le modèle est constitué de *m* masses, de *m-1* ressorts et de *m-1* amortisseurs. On l'appelle modèle BIM pour Billette-Interface-Machine car il couple le comportement de la Billette (ou lopin), les phénomènes de friction à l'Interface et le comportement de la machine [3]. Le développement du modèle s'appuie sur la mesure de grandeurs expérimentales et non sur la conception de la machine. Ainsi, c'est le comportement du système {machine + outillages} qui est modélisé et non pas la machine à proprement parlé. Ce modèle de l'ensemble {machine + outillages + lopin} peut être décomposé en 3 sous-modèles : la partie mobile du sous ensemble {machine + outillages}, le lopin et la partie fixe du sous ensemble {machine + outillages}. On présente ici le modèle générique, cependant, selon la machine étudiée, le modèle peut être différent.

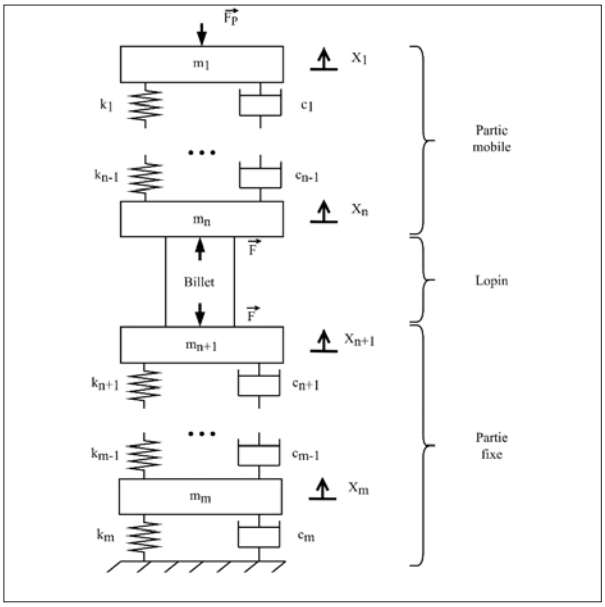


Figure 1 : Modèle général BIM pour une machine pilotée en énergie

La méthodologie globale pour parvenir à déterminer le modèle de la machine et des outillages est résumée au travers de la figure 2. Le modèle et ses paramètres associés sont identifiés à partir de l'analyse d'un signal d'effort, de la connaissance de la rhéologie du lopin et de la mesure de la vitesse d'impact ainsi que du coefficient de frottement. Une analyse spectrale permet d'identifier les modes vibratoires présents dans le signal d'effort et d'en déduire le nombre de degrés de liberté du modèle (nombre de masses-ressorts-amortisseurs) qui sera associé au comportement de la machine et des outillages. Pour cela, une Transformée de Fourier Discrète (TFD) est réalisée sur le signal d'effort, uniquement durant la phase de choc. L'identification des paramètres du modèle BIM est réalisée en faisant « fitter » le signal d'effort prédit pour un ressort du modèle, sur le signal d'effort mesuré expérimentalement.

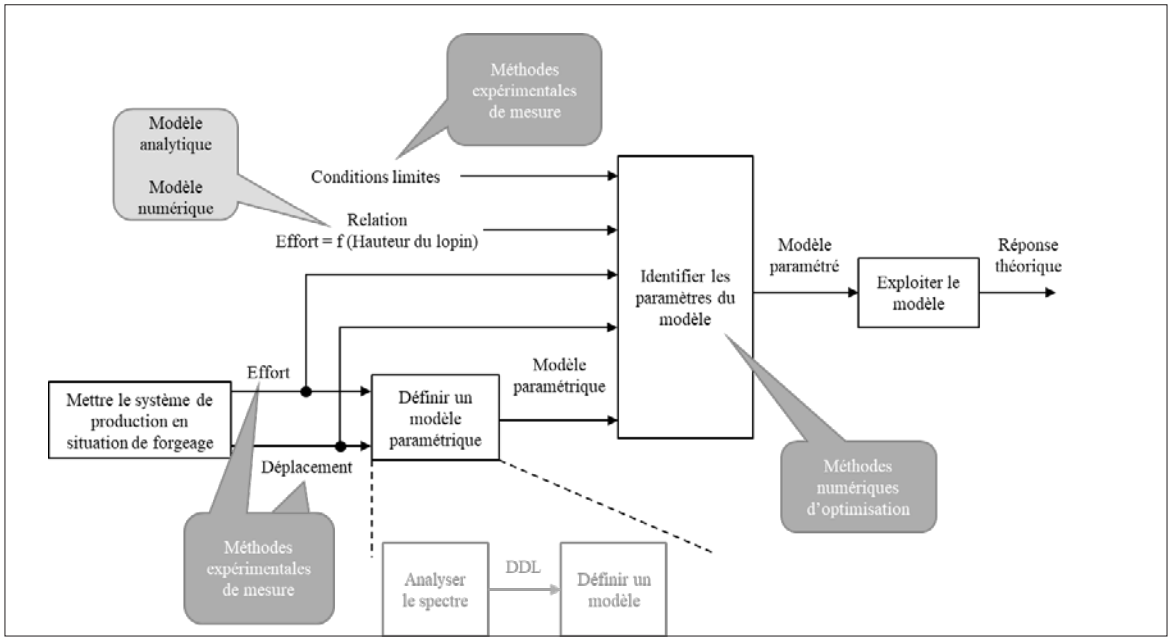


Figure 2 : Méthodologie générale pour la définition d'un modèle décrivant le comportement de la machine et l'identification de ses paramètres

Cette démarche présente l'avantage de pouvoir identifier les paramètres du modèle en seulement une frappe représentative des conditions de travail de la machine et grâce à la mesure d'un nombre limité de paramètres. De plus, l'approche fournit une solution sur-mesure pour décrire le comportement du système {machine + outillages} durant le processus de forgeage, ce qui permet de considérer dans la modélisation les spécificités propres du moyen de production.

3 Applications

3.1 Presse à vis SPR 400

La méthode a d'abord été mise au point et appliquée sur la presse à vis SPR 400 de la plateforme Vulcain des Arts et Métiers de Metz. Cette presse à vis est instrumentée en déplacement et en effort. La mesure du déplacement du coulisseau durant le forgeage est réalisée grâce à un codeur magnétique incrémental. La partie du signal représentant l'accélération du coulisseau permet la détermination de la vitesse d'impact.

Pour l'instrumentation en effort, deux capteurs sont utilisés (Figure 3) : Un capteur intégré à la presse et un capteur intégré à l'outillage. Le capteur de la presse est un extensomètre constitué de jauges de déformation, fixé sur la traverse supérieure de la presse. Le capteur intégré à l'outillage est lui aussi constitué d'un pont de jauges et est placé sur la table de la presse. Un tas plan, ayant le rôle d'outil inférieur, est directement vissé sur le capteur et le surmonte.

Le comportement de la presse à vis et des outillages lors d'opération de forgeage est étudié en réalisant une frappe outil contre outil, c'est-à-dire sans lopin, avec une consigne de 2,8 kJ. La frappe est réalisée à vide, afin d'être sûr d'avoir un choc dur ou élastique et donc de solliciter le comportement de la presse.

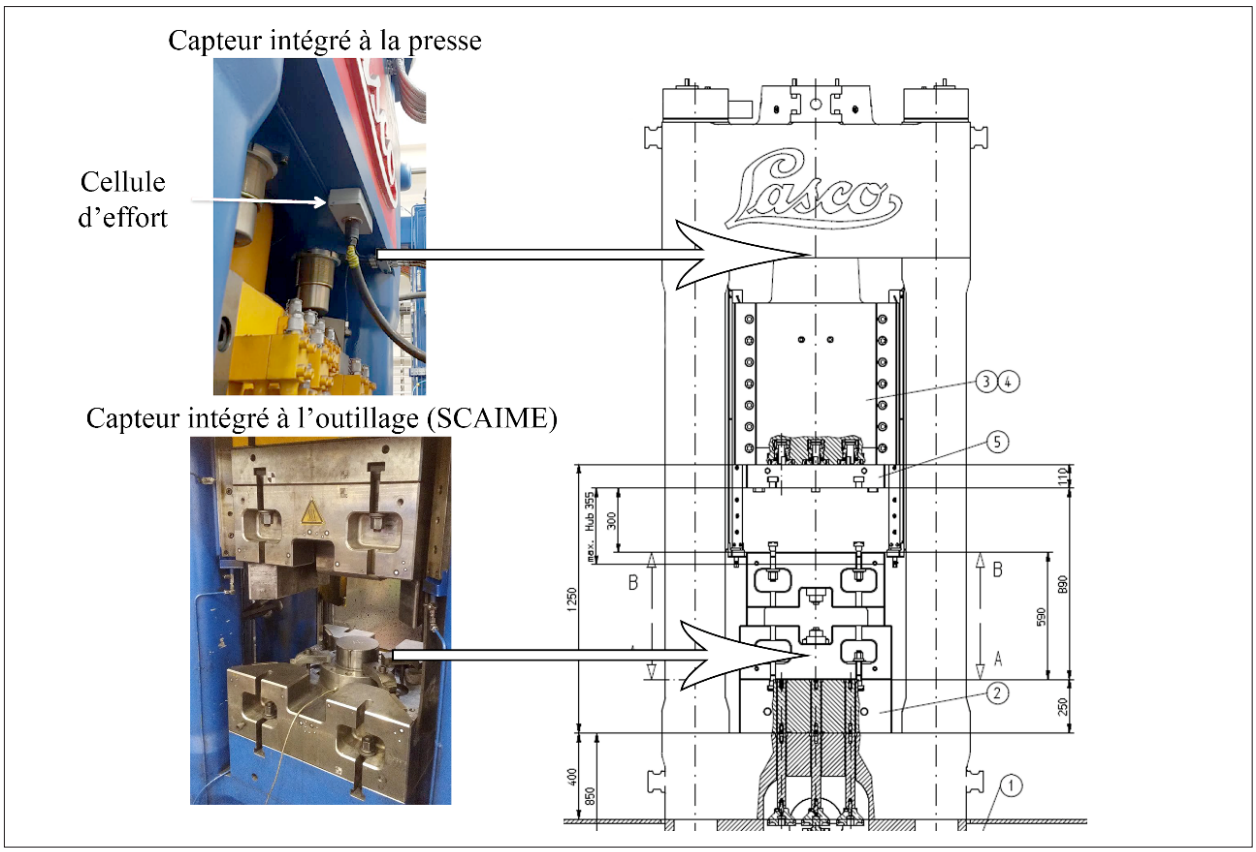


Figure 3 : Schéma de l'ensemble de la presse à vis avec la position des deux capteurs

La Figure 4 montre l'évolution de trois signaux : l'effort mesuré par chacun des deux capteurs et le déplacement du coulisseau. L'étude du déplacement du coulisseau met en évidence que l'outil supérieur impacte l'outil inférieur à deux reprises durant la frappe. Lors du premier contact, les efforts exercés par l'outil supérieur engendrent une déformation élastique du bâti. Le coulisseau est ensuite repoussé dans le sens inverse de la frappe, l'effort diminue, c'est le retour élastique jusqu'à la perte de contact entre les outils. Puis, le coulisseau est accéléré à nouveau dans le sens de la frappe et il y a un second choc. Le premier contact entre les deux outils est, dans cette étude, négligé car il semble être du a des déformations élastiques et des rattrapages de jeux dans la liaison entre le coulisseau et la vis, or cela n'est pas modélisable avec un modèle masses-ressorts-amortisseurs.

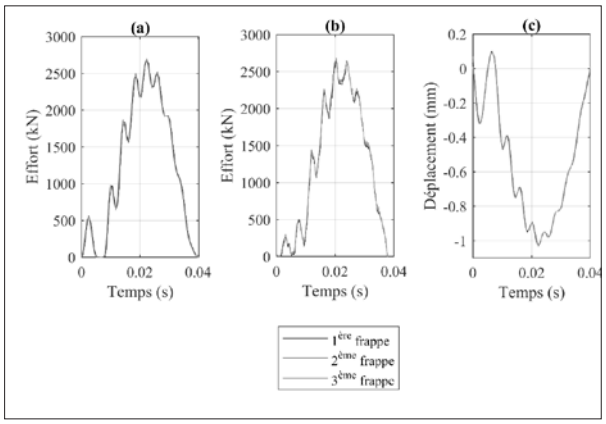


Figure 4 : Evolution de trois signaux au cours de trois frappes outil contre outil a) 'effort mesuré par le capteur intégré à l'outillage b) effort mesuré par le capteur de la presse c) déplacement du coulisseau mesuré par la presse

Le spectre d'amplitude associé au signal d'effort lors d'une frappe outil contre outil met en évidence deux fréquences dominantes : le comportement de la machine et des outillages sera donc modélisé par un système à deux degrés de liberté (Figure 5). Les deux masses représentent les éléments en mouvement dans le système (outils, porte-outils, coulisseau, vis, volant d'inertie). Le ressort k_{Moving} et l'amortisseur c_{Moving} relient les deux masses. Ils traduisent respectivement les déformations élastiques et l'effet d'amortissement entre les pièces en mouvement dans le système. Le ressort k_{Fixed} et l'amortisseur c_{Fixed} traduisent les déformations élastiques et l'effet d'amortissement de la structure.

Le capteur d'effort intégré dans l'outillage inférieur a une influence sur le comportement du système et doit être pris en compte car sa raideur est relativement faible par rapport à d'autres éléments de la presse. Par conséquent, le ressort k_{Sensor} est introduit dans le modèle. Ce ressort est lié à la masse m_2 et à la partie fixe.

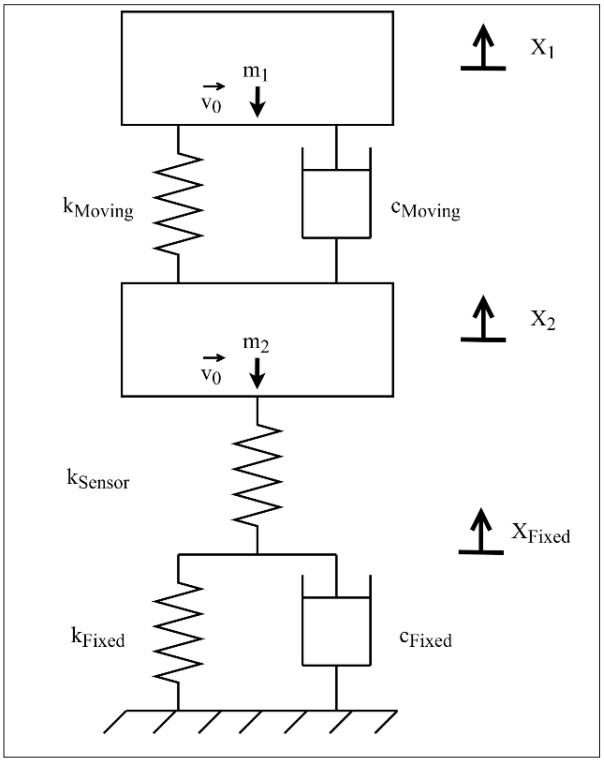
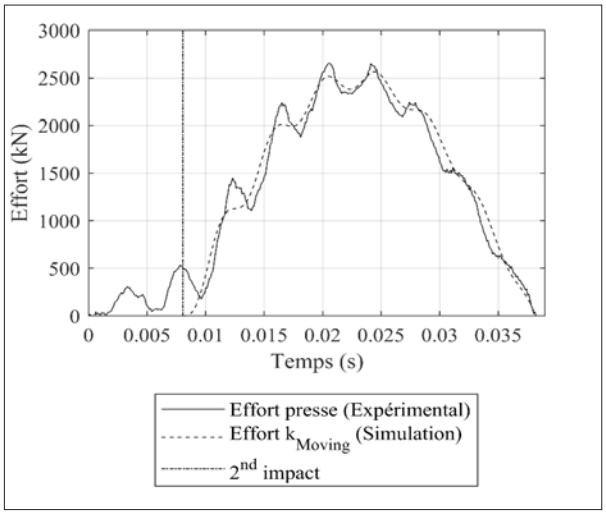


Figure 5 : Modèle du système {machine + outillages + capteur} pour une frappe outil contre outil

La Figure 6 permet de comparer les efforts mesurés à la fois par le capteur de la presse et par le capteur intégré à l'outillage avec les efforts calculés grâce au modèle BIM . L'effort calculé est calé sur le second impact entre les outils puisque le premier contact ne peut pas être décrit par le modèle. A l'instant du second impact, le modèle et les paramètres identifiés permettent de simuler un signal d'effort de même allure que l'effort mesuré que ce soit par le capteur intégré à la presse ou à l'outillage. Cependant, le capteur intégré à l'outillage présente l'avantage d'enregistrer l'effort au plus près du lieu de la frappe, et en contact direct avec le lopin contrairement au capteur de la presse qui mesure également les vibrations de la presse.



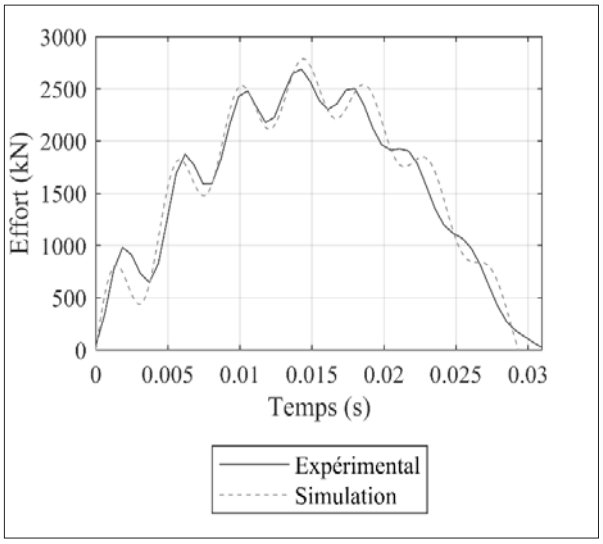


Figure 6 : Signaux expérimentaux et prédits avec les paramètres identifiés pour une frappe outil contre outil a) au niveau du capteur de la presse et b) au niveau du capteur intégré à l'outillage

Une frappe outil contre outil n'étant pas représentative d'une opération de forgeage, pour valider le modèle, il est donc nécessaire d'analyser la simulation d'une frappe sur un lopin. Ainsi, le refoulement d'un lopin en cuivre (diamètre 30 mm et hauteur 60 mm) à froid et sans lubrification est simulé et les résultats sont comparés à des mesures expérimentales. Le modèle BIM doit donc intégrer le lopin et un modèle pour décrire son comportement. Il est envisageable d'utiliser une méthode numérique type éléments finis, mais ici, la méthode des tranches est utilisée car elle permet une résolution analytique des équations et donc un gain en temps de calcul. L'effort de forgeage est calculé à partir du modèle issu de la méthode des tranches et s'exprime tel que :

$$F_L = \frac{\pi . r_e . h}{\mu} . \sigma_0 . (\frac{e^A - 1}{A} - 1)$$

avec r_e le rayon courant du lopin calculé à partir de la géométrie initiale du lopin et de sa hauteur courante h en supposant que le lopin conserve sa géométrie cylindrique et son volume durant la déformation, μ le coefficient de frottement de Coulomb et $A=2\mu r_e/h$. Les déplacements ainsi que les efforts mesurés et simulés sont comparés (Figure 7). Les résultats sont proches, ce qui valide le modèle identifié pour la presse à vis.

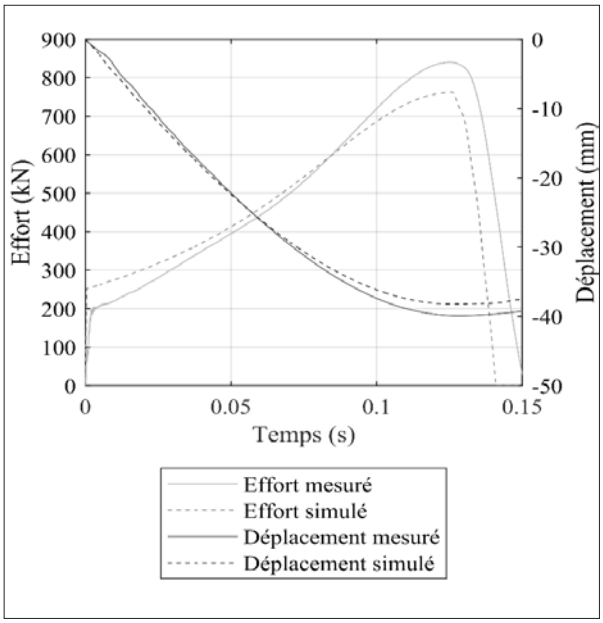


Figure 7 : Effort mesuré avec le capteur intégré à l'outillage et déplacement de coulisseau mesuré avec le capteur de la presse, effort prédit au ressort k_{Sensor} et déplacement prédit pour la masse m_1

Six frappes consécutives sont ensuite simulées sur le même lopin en cuivre avec le modèle BIM et la 8 montre l'évolution de l'effort calculé pour le ressort k_{Sensor} pour ces six coups consécutifs. Le modèle est capable de prédire la transition d'un choc inélastique vers un choc élastique. Après chaque coup, le temps de forgeage diminue et l'effort maximal augmente. Les vibrations associées au second mode vibratoire peuvent être observées du deuxième au sixième coup. L'amplitude du second mode vibratoire augmente avec le nombre de coups.

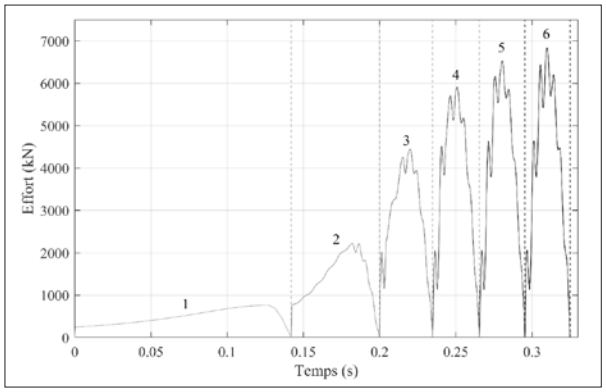


Figure 8 : Effort prédit au ressort k_{Sensor} pour six coups consécutifs sur un lopin en cuivre

3.2 Pilon LMC

La méthode est appliquée à une autre machine de forgeage, un marteau pilon simple-effet, le Montbard LG1000 du lycée Marie Curie (Figure 9). La mesure du déplacement de la masse est réalisée grâce à une caméra et est uniquement utilisée pour la détermination de la vitesse d'impact. Pour l'instrumentation en effort, un outillage spécifique a été développé [4] : un corps d'épreuve cylindrique, traversé d'un goujon de mesure transversale à quartz mesurant les déformations horizontales, a été usiné de façon à pouvoir être intégré à un porte outils du pilon.

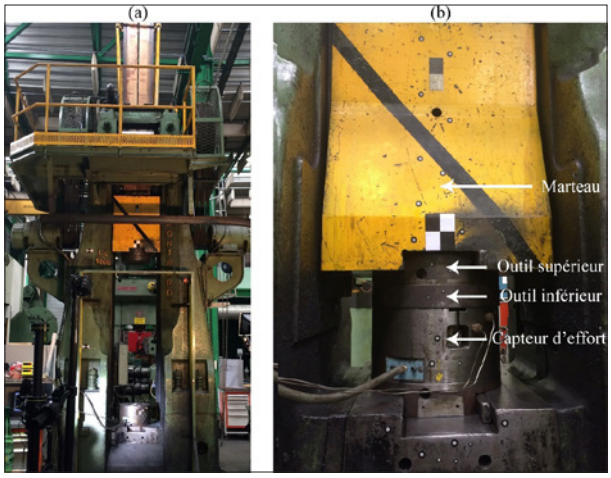


Figure 9 : a) Vue globale de la machine b) outil instrumenté avec capteur d'effort

Sept frappes de refoulement sont effectuées sur un lopin en acier (16NiCrMo13 diamètre 60 mm et hauteur 112 mm) chauffé à 1100°C à l'aide de tas plans lubrifié à l'huile graphitée. Dans un premier temps, seul le signal d'effort pour le septième coup est exploité pour lui appliquer une transformation de Fourier rapide (FFT) car c'est celui où la machine est la plus sollicitée lors d'un choc élastique. Identifiant deux pics de fréquence grâce au spectre d'amplitude, le modèle choisi pour caractériser l'opération de forgeage sur ce pilon aura ainsi deux degrés de liberté. Le septième coup est ensuite utilisé pour identifier les paramètres du modèle par optimisation. Le modèle masses-ressorts-amortisseurs proposé pour décrire le comportement du pilon Montbard LG1000 est présenté en Figure 10. Les deux masses représentent les éléments en mouvement dans le système : m_1 correspond au système masse tombante et outil supérieur tandis que m_2 représente l'outil inférieur et le capteur d'effort. Apres identification des paramètres, la masse m_2 apparait comme très faible [5].

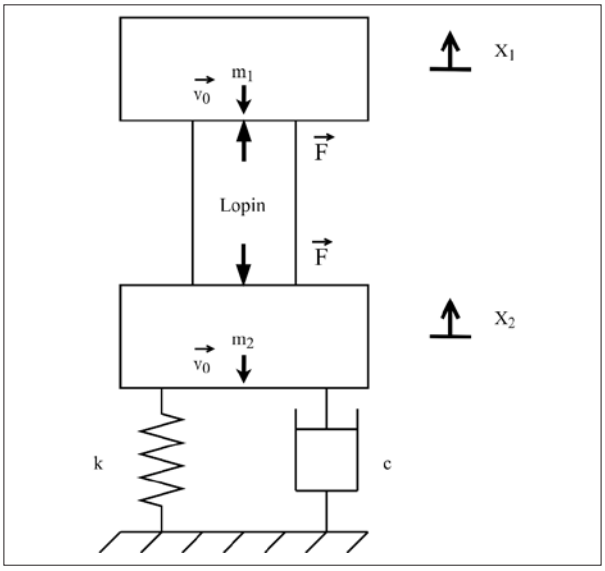


Figure 10 : Modèle Billette-Interface-Machine (BIM) pour le marteau pilon Montbard LG1000

L'effort est calculé analytiquement selon la méthode des tranches. La Figure 11 montre l'effort mesuré pour le septième coup et l'effort calculé grâce au modèle BIM avec les paramètres identifiés.

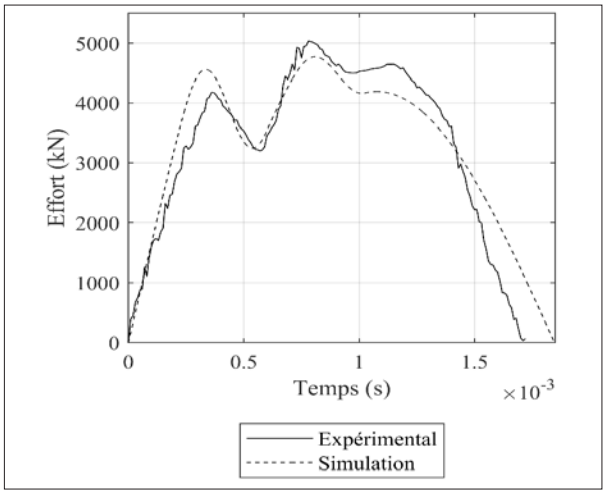
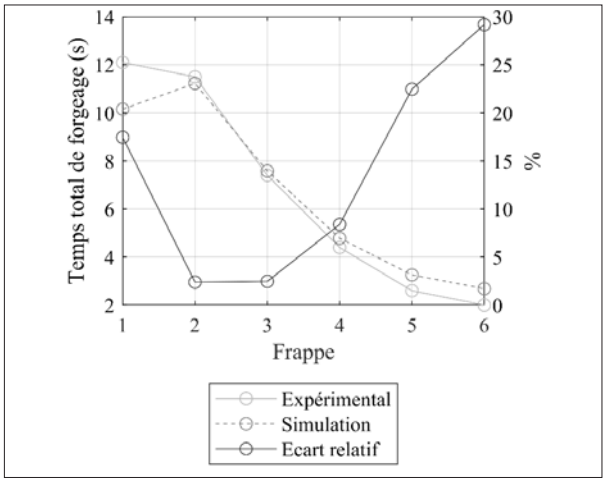
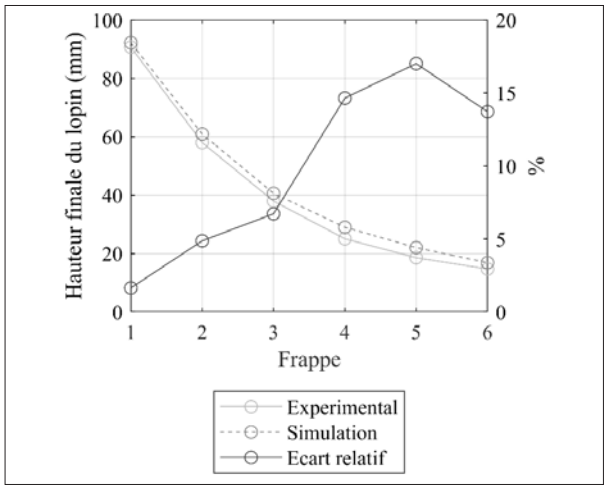


Figure 11 : Effort mesuré pour la septième frappe sur le lopin en acier et effort prédit avec le modèle BIM

Le modèle étant identifié et caractérisé il est ensuite éprouvé sur un lopin en aluminium. Les six coups sont simulés consécutivement. Après chaque coup, le temps de forgeage diminue et l'effort final augmente, numériquement et expérimentalement (Figure 12). Les indicateurs déterminés en simulation et expérimentalement présentent les mêmes tendances d'évolution. Néanmoins, le temps de forgeage et la hauteur finale du lopin sont globalement surestimés en simulation, tandis que l'effort de forgeage est légèrement sous-estimé par rapport aux signaux expérimentaux. Cela pourrait s'expliquer par une incertitude sur la détermination des paramètres du modèle BIM. De plus, comme pour les simulations sur le lopin en acier, le modèle ne parvient pas à prédire le retour élastique. L'augmentation de l'erreur relative avec le nombre de coups peut aussi être notée pour les trois indicateurs, cela s'explique par l'accumulation d'erreurs dues aux simulations consécutives.





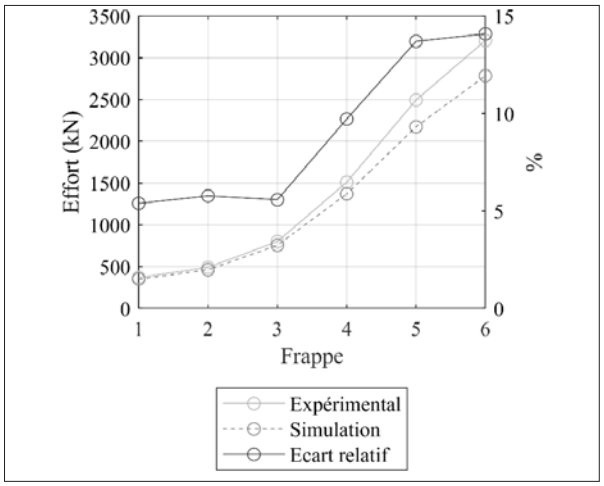


Figure 12 : Temps, hauteur finale et effort de forgeage expérimental et prédit pour six coups consécutifs sur un lopin en aluminium

L'augmentation de l'effort final et la diminution du temps de forgeage avec le nombre de coups sont aussi observées expérimentalement dans la littérature [6]. Pendant le processus de forgeage, la section en contact avec les outils augmente, ainsi un effort de forgeage plus élevé est nécessaire pour atteindre la contrainte d'écoulement requise pour déformer le lopin. L'augmentation de l'effort de forgeage appliqué par le lopin sur m_1 implique alors une décélération plus rapide de m_1, expliquant la diminution du temps de forgeage.

4 Exploitation du modèle

Grace au modèle BIM, il est possible de déterminer la distribution énergétique dans le système durant une opération de forgeage. Ainsi, l'énergie utile transmise au lopin peut être calculée et l'efficacité du processus estimée. Il existe cinq formes d'énergies dans le système à chaque instant : l'énergie cinétique (vitesse des masses), l'énergie élastique (déformation élastique des ressorts), l'énergie amortie (dissipation dans les amortisseurs), l'énergie de friction (frottements outils-lopin) et l'énergie plastique (déformation plastique du lopin).

La Figure 13 présente la distribution de l'énergie dans le système et l'efficacité lorsque le lopin a atteint sa hauteur finale pour les six frappes effectuées avec la presse à vis sur le lopin en cuivre.

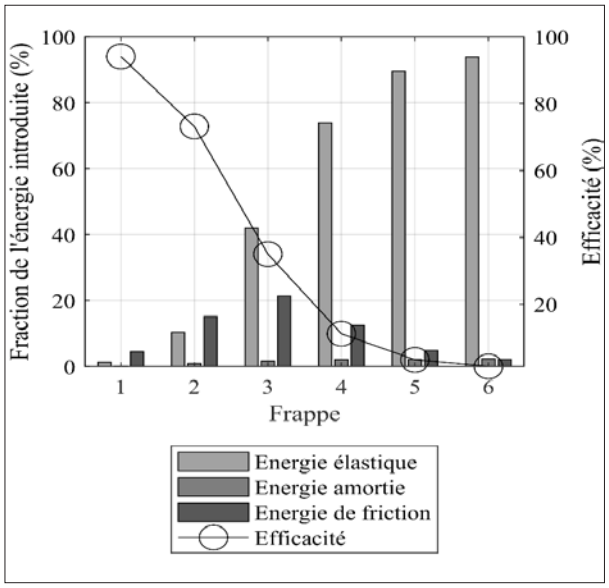


Figure 13 : Distribution de l'énergie et efficacité à la fin du forgeage pour les six coups simulés sur le lopin en cuivre

L'énergie élastique croît du fait de l'augmentation des efforts de forgeage coup après coup qui implique plus de déformation du système {machine + outillages} par vibrations. Pour les premières frappes, la section du lopin en contact avec les outils augmente fortement ce qui conduit à l'augmentation de l'énergie dissipée en friction. Mais pour les dernières frappes, la variation de la section du lopin est de plus en plus faible, car il est de moins en moins déformé. Ainsi, la part de l'énergie dissipée en friction diminue et tend vers 0 avec le nombre de coups. L'énergie dissipée sous forme d'amortissement est due à l'atténuation de la vibration du second mode vibratoire. Pour les premières frappes, ce mode n'est que très peu excité et transporte donc très peu d'énergie, l'amortissement est donc faible. Coup après coup, le second mode vibratoire est de plus en plus excité, il peut ainsi être de plus en plus amorti, ce qui augmente la part d'énergie dissipée. Etant donné que ces trois types d'énergie (de friction, élastique et amortie) consomment de plus en plus l'énergie cinétique introduite à l'impact, la part de l'énergie plastique diminue et donc l'efficacité du processus décroît coup après coup. A la sixième frappe, 96% de l'énergie introduite est dissipée sous forme d'amortissement (2%), ou est convertie en énergie élastique (94%) : ces phénomènes ne peuvent donc pas être négligés en simulation.

Pour le forgeage sur le pilon simple effet, la distribution de l'énergie à la fin du processus et l'efficacité pour chacun des six coups prédits sur la billette en aluminium sont présentées en Figure 14. Etant donné que la masse m_2 identifiée dans le modèle est très faible, l'énergie cinétique associée est négligeable, ainsi elle n'est pas représentée.

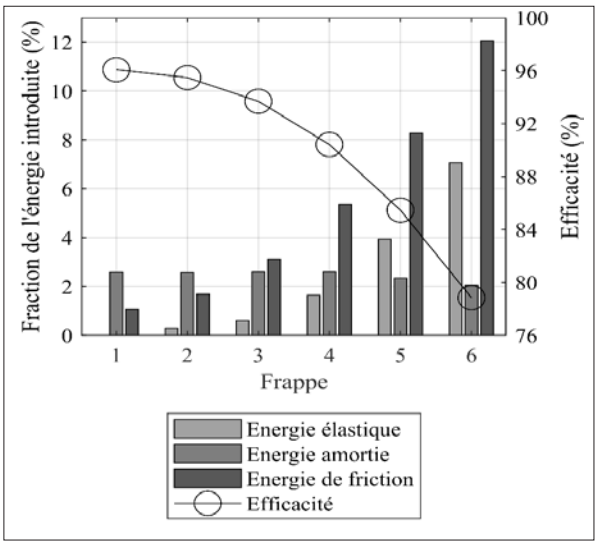


Figure 14 : Efficacité et distribution de l'énergie à la fin du procédé de forgeage pour six coups consécutifs sur un lopin en aluminium

L'énergie dissipée dans le frottement augmente avec le nombre de coups car la section en contact avec les outils augmente. Étant donné que l'effort de forgeage est plus élevé coup après coup, et que les déformations élastiques sont proportionnelles à l'effort appliqué, l'énergie élastique dans le système augmente. L'unique amortisseur du modèle relie m_2 au bâti, ainsi seul le mouvement de la masse m_2 est amorti. Pour chaque coup, l'énergie amortie correspond à l'énergie cinétique initiale de la masse m_2. La valeur de l'énergie amortie reste stable par rapport à l'énergie introduite initialement car les vibrations du second mode vibratoire sont presque complètement amorties quelle que soit la frappe. Par ailleurs, le temps de forgeage étant plus court pour les derniers coups, l'onde du second mode vibratoire n'est pas atténuée en intégralité à la fin de la frappe. Ainsi, moins d'énergie est amortie par le système, ce qui explique la très légère baisse de 0,5% de l'énergie amortie sur les six coups.

5 Conclusions et perspectives

Une méthode de modélisation dynamique du comportement du système {machine + outillages} durant la mise en forme a été proposée. Cette méthode est basée sur une analyse expérimentale grâce à la mesure d'un nombre limité de grandeurs caractéristiques de forgeage comme l'effort ou le déplacement et de paramètres opératoires comme la vitesse, le coefficient de frottement, les géométries du lopin et la contrainte d'écoulement du matériau. Grâce à une analyse spectrale d'un signal de d'effort, un modèle peut être défini. Celui-ci ne considère pas le comportement réel des éléments particuliers de la machine mais un comportement global de la structure à partir de masses, d'amortisseurs et de ressorts. Puis avec l'aide de méthodes numériques d'optimisation, les paramètres du modèle sont identifiés en calant la réponse théorique du modèle sur les courbes expérimentales. Cette méthodologie conduit alors à un modèle « sur-mesure » dont le degré de liberté et les paramètres sont spécifiquement adaptés à la représentation du comportement du système {machine + outillages}.

Les prédictions des modèles concernant l'effort de forgeage, le déplacement des outils et la hauteur finale du lopin sont comparables aux valeurs expérimentales. Le caractère prédictif du modèle est donc validé, même si l'identification des paramètres pourrait encore être affinée. Par ailleurs, la méthodologie est mise en œuvre sur deux technologies de machines : une presse à vis et un pilon simple-effet. Ainsi, la généricité de la méthode a été mise à l'épreuve, elle semble applicable quel que soit le type de machine pilotée en énergie.

Les modèles développés étant validés, il est possible de les exploiter pour la détermination de la distribution de l'énergie en fin de forgeage. Le comportement élastique et amortissant du système {machine + outillages} explique une part plus ou moins importante de l'énergie non-utile à la déformation qui est fonction de la machine et des paramètres opératoires. Dans les cas étudiés, la somme de l'énergie élastique et amortie est estimée à 10% de l'énergie totale introduite, avant même que le dixième coup sur la billette soit atteint. La tendance est à une augmentation de l'énergie élastique avec le nombre de coups, ce qui est à l'origine de la baisse d'efficacité du processus. Ce phénomène explique la transition du choc inélastique au choc élastique, coup après coup. Ainsi, pour des gammes de forgeage constituées d'un nombre de coups plus important, les pertes énergétiques dues à ces phénomènes pourraient être significatives et mal anticipées par la simulation éléments-finis. L'amortissement a un rôle secondaire dans la consommation de l'énergie, représentant toujours moins de 3% de l'énergie introduite dans les cas étudiés.

Cette méthodologie a également été mise en œuvre sur des marteaux pilons contre frappe. Des travaux sont en cours afin de dissocier la modélisation du comportement de la machine, de la modélisation du comportement du porte outil. Le cas du forgeage d'une pièce aux géométries complexes pourra également être traitée grâce à un couplage faible entre une simulation éléments-finis et le modèle BIM. Enfin les travaux présentés ont donné lieu au démarrage d'une thèse sur le jumeau numérique de l'estampage sous presse à vis, dont une application est de piloter au plus juste l'énergie de la presse par rapport à l'énergie de déformation plastique.

Remerciements

Les auteurs remercient les équipes de SETFORGE BOUZONVILLE (anciennement Manoir Industries Bouzonville) et la région Grand Est pour leur support financier sur ce projet mené dans le cadre d'une thèse de doctorat par J.F. Mull. Les auteurs sont reconnaissants à M. Payelleville du lycée Marie Curie pour les échanges autour du marteau pilon.

Références

[1] Altan, T., G. Ngaile & G. Shen 2005 *Cold and Hot Forging: Fundamentals and Applications*, ASM International (« Cold and Hot Forging: Fundamentals and Applications » vol. 1).

[2] Vajpayee, S. & M. M. Sadek 1977 « Analytical Study of Forming Efficiency as Influenced by the Process and the Machine Structure », *International Journal of Production Research* 15.2 : 203-218

[3] Mull, J.F, 2020, Contribution à la modélisation du comportement dynamique du système de production composé de la machine et de ses outillages durant la phase de mise en forme. Application aux machines pilotées en énergie : de la presse à vis au pilon contre frappe, thèse de doctorat, LCFC, Arts et Métiers Metz.

[4] Mull, J.F, Durand, C, Baudouin, C. Bigot, R., A new tailored solution to predict blow efficiency and energy consumption of hammer-forging machines, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology 111* (2020) 1941-1954

[5] Payelleville, M. 2016 « *Etude des chocs sur le marteau pilon MONTBARD LG 1000 - Amélioration de la simulation des chocs durs* », rapport d'étude dans le cadre d'un groupe de travail du CETIM

[6] Haller, H. W. 1983 « The Force in a Die Forging Hammer », *Journal of Engineering for Industry* 105.4 : 270