

# Contribution à la caractérisation des moyens de mise en forme : application aux presses à vis

C. DURAND<sup>a</sup>, C. BAUDOUIN<sup>a</sup>, R. BIGOT<sup>a</sup>

a. Laboratoire de Conception Fabrication Commande (LCFC), Arts et Métiers ParisTech, Centre de Metz, 4 rue Augustin Fresnel 57000 METZ, France, [camille.durand@ensam.eu](mailto:camille.durand@ensam.eu)

## Résumé :

*L'industrie de la forge utilise de plus en plus la simulation numérique, et notamment le logiciel Eléments Finis Forge®, et ce pour répondre à 3 objectifs principaux: prédire la casse des outillages, prédire la quantité d'énergie nécessaire pour arriver à la mise en forme souhaitée d'une pièce et prédire le chemin thermomécanique adéquat pour obtenir une microstructure finale optimale. Actuellement la simulation numérique permet de bonnes prédictions pour ce qui concerne la mise en forme de matériaux couramment utilisés comme les aciers. Mais pour rester compétitives les forges ne peuvent plus se permettre de forger uniquement des aciers et doivent innover notamment en mettant au point des procédés de forgeage pour des matériaux à haute valeur ajoutée. Or pour la mise en forme de ces nouveaux matériaux à hautes performances, des différences significatives sont observées entre les prédictions obtenues par simulation et les résultats de l'expérimentation. Notamment pour ce qui concerne la prédiction de l'énergie nécessaire à la mise en forme d'une pièce.*

*Cette étude cherche donc à comprendre d'où vient cette disparité entre les résultats numériques et expérimentaux, dans le cas particulier des presses à vis. Pour cela, la première étape est d'abord de bien comprendre le fonctionnement des presses à vis, mais aussi de comprendre le modèle de presse à vis implémenté dans le logiciel Forge. Des résultats expérimentaux d'essais de refoulement dans 2 cas distincts sont ensuite comparés aux résultats obtenus par simulation numérique des mêmes essais. Des différences significatives apparaissent, et la nécessité de la définition de raideur de presse est mise en évidence. Deux méthodes ont été mise en œuvre pour déterminer la raideur de presse, une théorique et une expérimentale. Pour la méthode expérimentale des outils d'acquisition extérieurs comme une caméra rapide et un système de suivi de points dans l'espace ont été utilisé pour capter le comportement de la presse lors des frappes. Les valeurs des raideurs obtenues sont finalement comparées.*

## Abstract:

*The forging industry uses more and more numerical simulation, and especially the Finite Element software Forge®, with the aim to fulfill 3 main objectives: predict tooling breakage, predict the amount of energy required to obtain the part desired and predict the thermomechanical path leading to the optimal finale microstructure. Currently, numerical simulations allow good predictions regarding forging operations with material currently used, like steel. But to remain competitive forging industries cannot work only with steel, and have to innovate by developing new forging process for high performance material. But concerning the forging operations of these new high performing material, significant difference are observed between numerical and experimental results. In particular regarding the prediction of energy required to correctly forge a part.*

*This study aims at understanding where this disparity between numerical and experimental results comes from, in the special case of screw presses. For that, the first step is to develop a deep understanding of the functioning of screw presses but also to understand the screw presses model implemented into the Forge software. Experimental results of upsetting tests in 2 different conditions have then been compared to results obtained numerically by simulating the corresponding forging tests. Significant differences are observed, and the necessity to define a stiffness coefficient for the press is highlighted. Two methods have been carried out to determine the stiffness of the press, a one theoretical one and an experimental one. Concerning the experimental one, external tools of acquisition like a rapid camera and a 3D tracking points system have been used to analyze the press behavior during blows. Finally, stiffness values obtained with the two different methods are compared.*

**Mots clefs: Forgeage, caractérisation, modélisation, presse, simulation**

## 1 Introduction

Il existe bon nombre d'études s'intéressant à la déformation des matériaux lors d'opérations de forgeage, mais peu d'études sont consacrées aux machines de mise en forme elle-même. Pourtant leur comportement mécanique influence les opérations de forgeage et donc les produits en résultants.

Quelques recherches ont cependant été faites, notamment pour déterminer l'influence des différentes structures de presses de mise en forme sur les forces, les déformations et les contraintes développées par les presses [1]. L'impact des systèmes de guidages des presses hydrauliques sur les opérations de forgeage a également été mis en évidence en analysant les pertes d'énergie [2]. Enfin plus récemment, une étude a été conduite concernant les déformations élastiques des machines de forgeage [3]. Plusieurs modèles rhéologiques étaient analysés ainsi que leur implémentation dans le logiciel Forge. Pour notre étude, on souhaite s'intéresser à une machine fréquemment utilisée dans l'industrie et qui est une machine limitée en énergie. Les presses à vis remplissent ces conditions et présentent de nombreux avantages vis-à-vis d'autres technologies de machine de mise en forme. Les presses à vis peuvent délivrer plus d'énergie par coup que les presses mécaniques à effort nominal équivalent, et offrent également la possibilité de programmer cette énergie par rapport à l'énergie maximale déployée. De plus, la vitesse maximale de forgeage des presses à vis est très rapide par comparaison avec les presses hydrauliques par exemple. En revanche elles ont des vitesses inférieures à celles des marteaux pilons, mais présentent une capacité de maintien d'effort en fin de course que les marteaux pilons n'ont pas. Les presses à vis sont adaptées pour le forgeage et le matricage de moyennes et grandes séries grâce au maintien en effort qu'implique l'inertie du volant [4]. De plus la structure relativement peu encombrante des presses à vis permet une automatisation et une robotisation aisée des procédés.

Cette étude constitue une première étape vers la compréhension des presses à vis. Pour commencer, le fonctionnement d'une presse à vis a été étudié, et 2 types d'essais de refoulement ont été effectués sur la presse. Les résultats obtenus ont ensuite été comparés aux résultats numériques obtenus par simulation des essais correspondants. Ces essais permettent de mieux comprendre la réaction de la presse mais également de mieux comprendre le modèle de presse à vis implémenté dans le logiciel Forge. Une caractérisation de la presse s'avère nécessaire et sa raideur est alors déterminée de manière théorique et expérimentale.

## 2 Description de la presse à vis Lasco SPR 400 et de son fonctionnement

La presse à vis de notre étude est la presse à vis Lasco SPR 400 de la plateforme VULCAIN située au centre Arts et Métiers de Metz (Figure 1). Cette presse à vis est constituée d'un bâti multi-composant en forme de portique. La zone de frappe est donc encadrée par 4 montants et 2 traverses en fonte moulée. La tenue mécanique des montants est assurée par la présence de tirants précontraints en acier forgé insérés dans les montants. Sur la partie inférieure du bâti, entre les montants est installée la table de la presse : un bloc d'acier usiné de fixations qui sert de support au porte outil et aux outillages inférieurs. Sur chaque montant du bâti une glissière en acier est disposée à 45° permettant de guider le mouvement du coulisseau via ses glissières en bronze. Le coulisseau étant la partie mobile de la presse et qui sert de support aux portes outils et aux outillages supérieurs.

Le coulisseau est lié au système vis-écrou qui initie le mouvement de translation (Figure 2). Dans notre cas, l'écrou est mobile puisqu'il est fixé au coulisseau. C'est la vis qui est liée au bâti par une liaison pivot. Le couple vis-écrou entraîne toujours le coulisseau, mais sans mouvement de translation au niveau de la vis. Pour ce qui concerne les matériaux du couple vis-écrou, la vis est en acier fortement allié de chrome, nickel et molybdène, et l'écrou est en bronze [6].

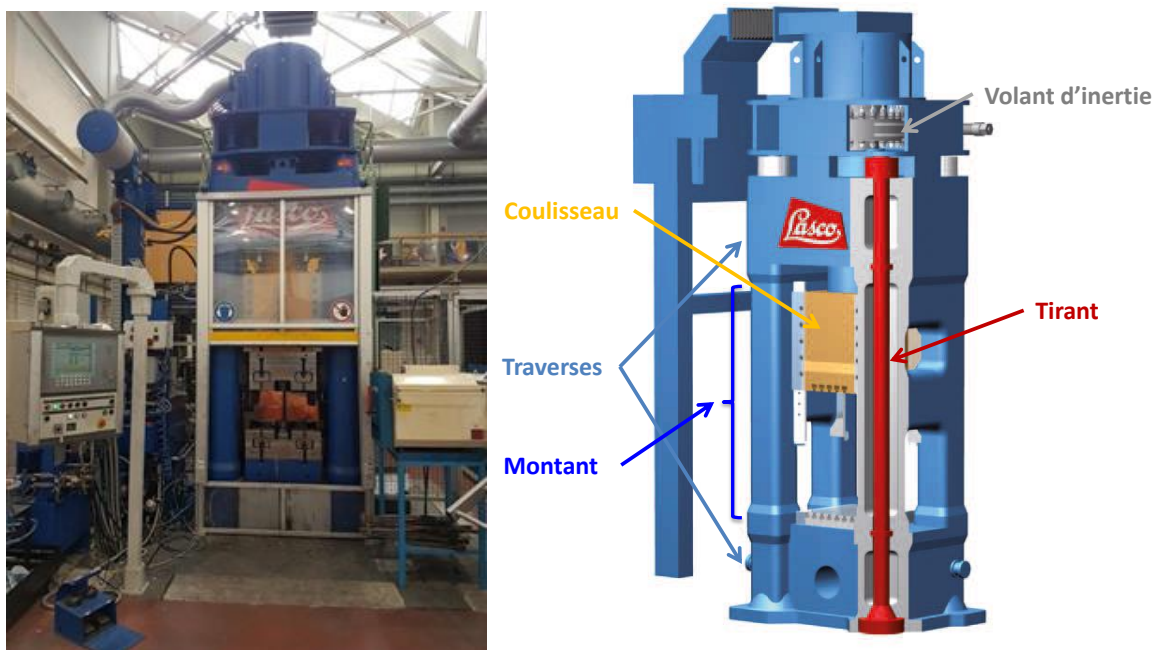


Figure 1 : Photo et schéma de la presse à vis Lasco SPR 400 de la plateforme Vulcain

La presse Lasco SPR 400 est une presse à vis dite « direct drive » c'est-à-dire à entraînement direct (Figure 3). Sa motorisation est électrique : un moteur électrique réversible est installé au sommet de la presse, dans l'axe de la vis. Le rotor de ce moteur est positionné directement sur le volant d'inertie, qui est une roue moulée, et le stator autour. C'est donc grâce au moteur que l'énergie peut être directement programmée : l'opérateur programme donc un pourcentage d'énergie par rapport à l'énergie maximale de la presse, et la fin de course a lieu lorsque toute l'énergie a été dissipée. La mise en rotation du volant d'inertie permet l'accumulation d'énergie cinétique. Plus le diamètre du volant d'inertie est grand, plus la mise en rotation du volant génèrera une grande inertie, cette inertie représentant l'énergie développée par les presses à vis. Au travers du couple vis-écrou, le mouvement de rotation

du volant d'inertie, est transmis au coulisseau sous forme de mouvement de translation vertical et donc d'énergie de forgeage. Ainsi les presses à vis sont des machines de forge limitées en énergie à course non imposée.

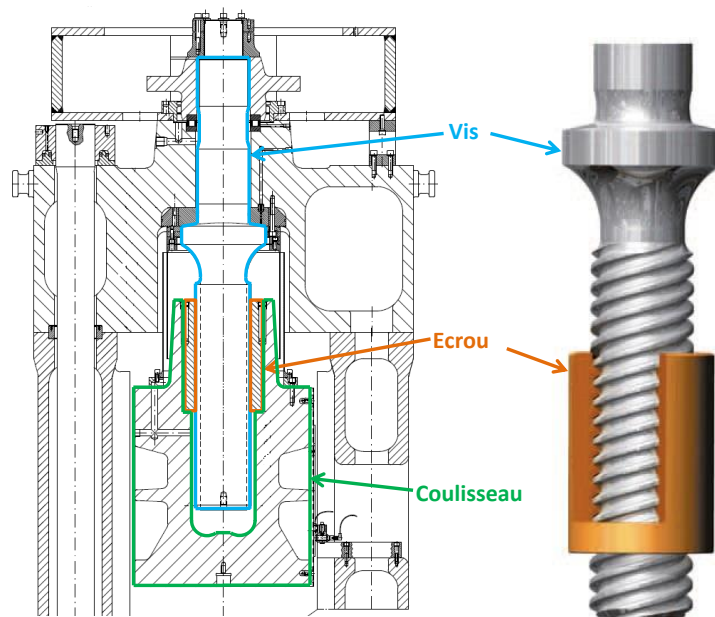


Figure 2 : Coupe de la partie supérieure de la presse SPR 400 et représentation du couple vis/écrou [5,6]

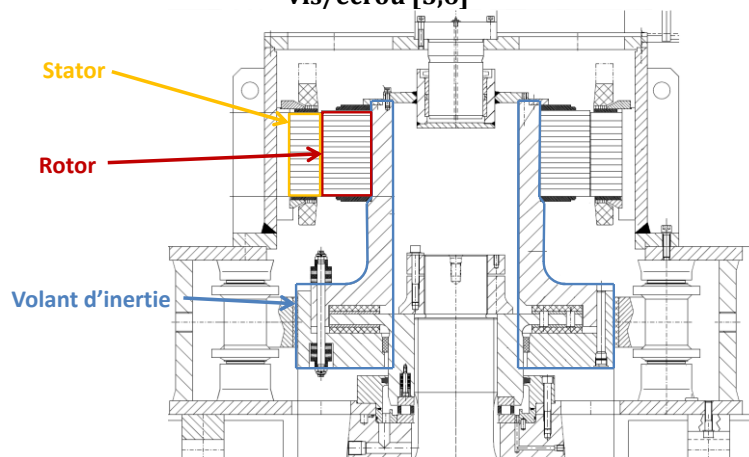


Figure 3 : Coupe de la motorisation de la SPR 400 [5]

L'énergie cinétique développée par le volant d'inertie et correspondant à l'énergie de forgeage est fonction de la vitesse, comme l'indique la formule :

$$E_c = \frac{1}{2} M_{eq} V_t^2 \quad Eq.1$$

Avec  $E_c$  l'énergie cinétique,  $V_t$  la vitesse de translation du coulisseau et  $M_{eq}$ , la masse équivalente de la presse :

$$M_{eq} = \frac{1}{2} M_v R_v^2 \cdot (2\pi/Pas)^2 + M_t \quad Eq.2$$

Avec  $M_v$  la masse du volant,  $R_v$  le rayon du volant,  $Pas$  le pas de la vis et  $M_t$  la masse en translation.

Pendant une opération de forgeage, lorsque l'outillage entre en contact avec la pièce, le coulisseau est freiné par l'effort de forgeage et ralentit. Dans cette configuration, 2 cas sont possibles :

- La presse ne dispose plus d'assez d'énergie pour déformer la pièce jusqu'à atteindre le plan de frappe : la course du coulisseau s'arrête.

- La presse dispose d'assez d'énergie pour déformer la pièce jusqu'au plan de frappe : la course du coulisseau est arrêtée par les plans de frappe. L'énergie cinétique restante sera dissipée dans le bâti de la presse sous forme de déformation élastique.

La remontée du coulisseau se fait en inversant le sens de rotation de la vis et donc du volant d'inertie.

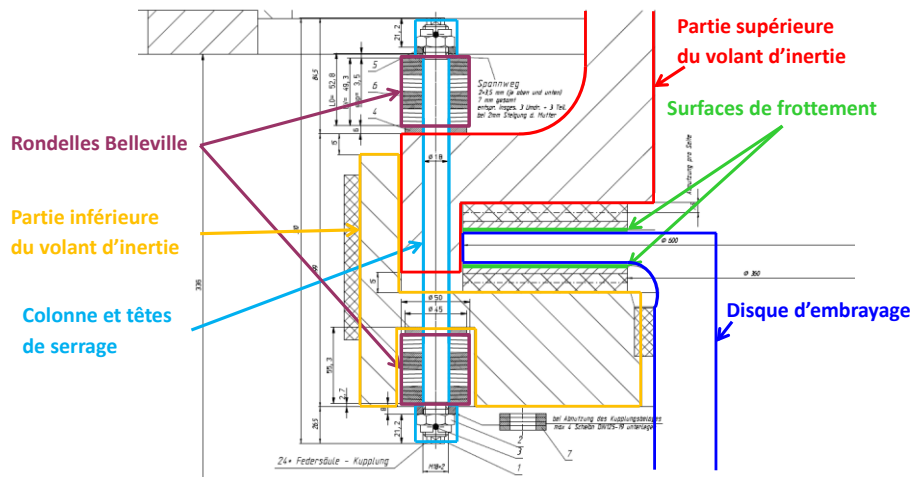


Figure 4 : Coupe du limiteur d'effort de la presse SPR 400 [5]

Enfin, la SPR 400 dispose d'une particularité au niveau de son volant d'inertie. En effet, celui-ci transmet l'énergie accumulée à la vis, au travers d'un limiteur de couple à friction. Le limiteur d'effort est composé de trois parties (Figure 4):

- Une partie supérieure sur laquelle le rotor du moteur est fixé
- Une partie inférieure reliée à la partie supérieure par les colonnes, les rondelles Belleville et les têtes de serrage
- Un disque d'embrayage fixé sur la vis

Lors d'une frappe, si la résistance du matériau est très importante, la vitesse de translation du coulisseau va diminuer très rapidement dès l'entrée en contact avec le matériau, ce qui va ralentir également la vitesse de rotation de la vis, et donc celle du volant, et ce malgré son inertie. Lors d'un ralentissement significatif de la vis, et donc du disque d'embrayage, l'inertie du volant est trop importante pour que les surfaces de frottement restent en appui. Une différence de vitesse apparaît alors entre le disque d'embrayage et les deux autres parties du volant d'inertie, et l'énergie du volant est dissipée en frottement au niveau des surfaces représentées en vert sur la Figure 4.

### 3 Essais de refoulement

Dans un premier temps des essais de refoulement sur tas plans striés ont été effectués sur la presse à vis Lasco SPR 400. Pour cela 2 matériaux différents ont été utilisés : un acier carbone C17 et un superalliage d'inconel 625 (NiCr22Mo9Nb). Les paramètres des essais sont résumés dans le Tableau 1.

Concernant les outillages, afin de ne pas abimer les tas plans, ceux-ci n'entrent pas en contact lorsque la course maximale du coulisseau est atteinte et que l'on est sur les plans de frappes. En effet, lorsque l'on est sur les plans de frappes, il y a un jour de 7.8 mm entre l'outillage supérieur et l'outillage inférieur (Figure 5).

	essai 1	essai 2
matériau	acier C17	inconel 625
diametre (mm)	27	70
hauteur (mm)	88,3	100
outillage	tas plans striés	tas plans striés
T° outil inf	50	250
T° outil sup	50	250
T° chauffe	1150	1000
temps de chauffe	1h08	1h49
consigne énergie	100%	100%

**Tableau 1 : Tableau récapitulatif des essais réalisés sous la presse à vis**



**Figure 5 : Photo des opérations de refoulement et des outillages en position fermée**

Les lopins ont été chauffés dans un four à résistance et leur température était contrôlée par des thermocouples K placés dans un lopin martyr. Les outillages ont été chauffés au chalumeau et leur température était contrôlée par thermomètre infrarouge. Enfin les cellules d'acquisitions de la presse nous permettent d'enregistrer les efforts grâce à un capteur d'effort situé sur la traverse de la presse et aussi d'enregistrer les déplacements du coulisseau.

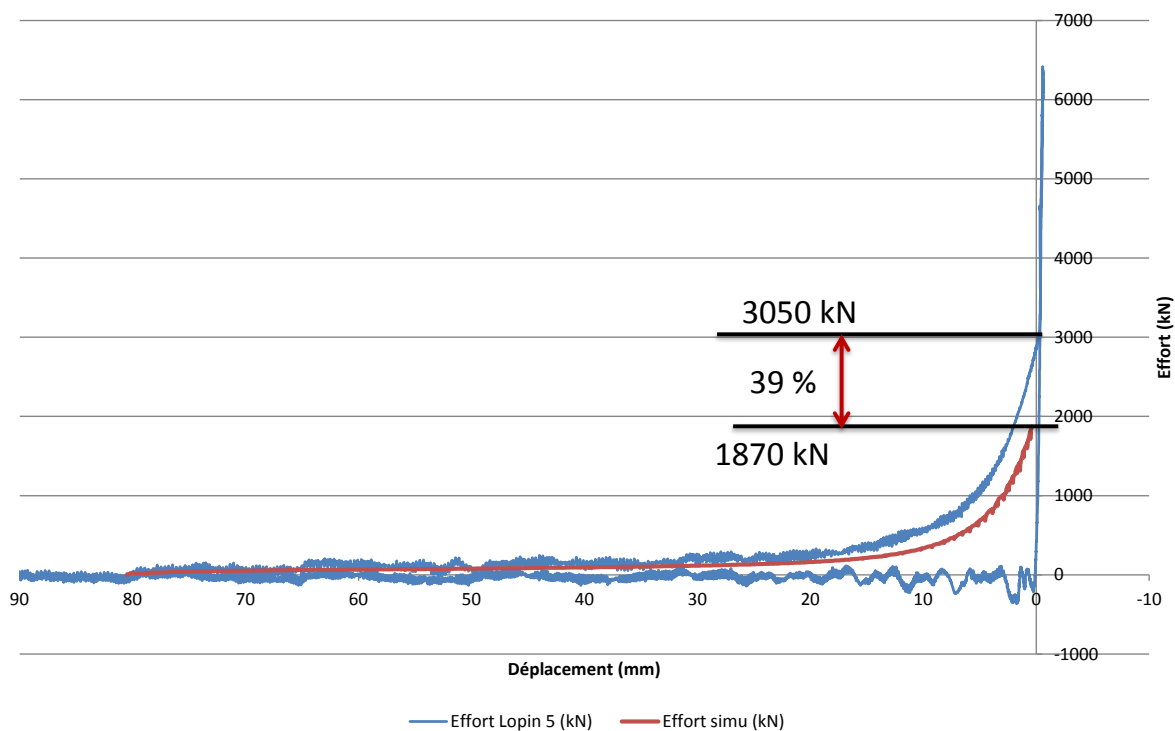
Les 2 essais qui ont été réalisés sous la presse ont ensuite été simulés numériquement via le logiciel élément finis Forge. Pour la mise en donnée, les dimensions de nos lopins et les fichiers CATIA des outillages ont été importés dans Forge. Les lois de comportement des matériaux ont été choisies dans la base de données du logiciel et les conditions aux limites ont été définies pour correspondre à celles des essais. Dans un premier temps ces simulations ont été réalisées en considérant la presse comme purement rigide.

## 4 Analyse des résultats des essais de refoulement

Pour le cas du refoulement de l'acier carbone, les courbes d'effort-déplacement issus de l'essai et de la simulation sont tracés Figure 6.

Ici nous sommes dans le cas d'un forgeage d'un matériau à faible résistance, et l'on observe que l'effort augmente progressivement à mesure que l'outillage supérieur écrase le lopin. On a donc une courbe caractéristique d'un choc inélastique dit aussi « choc mou ». On parle de choc mou lorsque les 2 objets entrés en collision se lient au cours du choc pour ne former qu'un seul solide animé d'une seule nouvelle et même vitesse. Donc ici l'énergie développée par la presse est dépensée de façon

significative en déformation plastique du lopin. On constate également que lors de cet essai, le lopin a été déformé jusqu'à atteindre les plans de frappe. En effet à la fin de la courbe, notre déplacement de coulisseau dépasse le zéro et l'effort monte alors en flèche. Lorsque l'on atteint les plans de frappe, une partie de l'énergie développée par la presse est alors transmise au bâti de la presse sous forme de déformation élastique. Cela se traduit sur la courbe par de légères vibrations du bâti lors de la remontée du coulisseau juste après la fin de la frappe.



**Figure 6 : Courbe effort-déplacement pour un refoulement d'inconel**

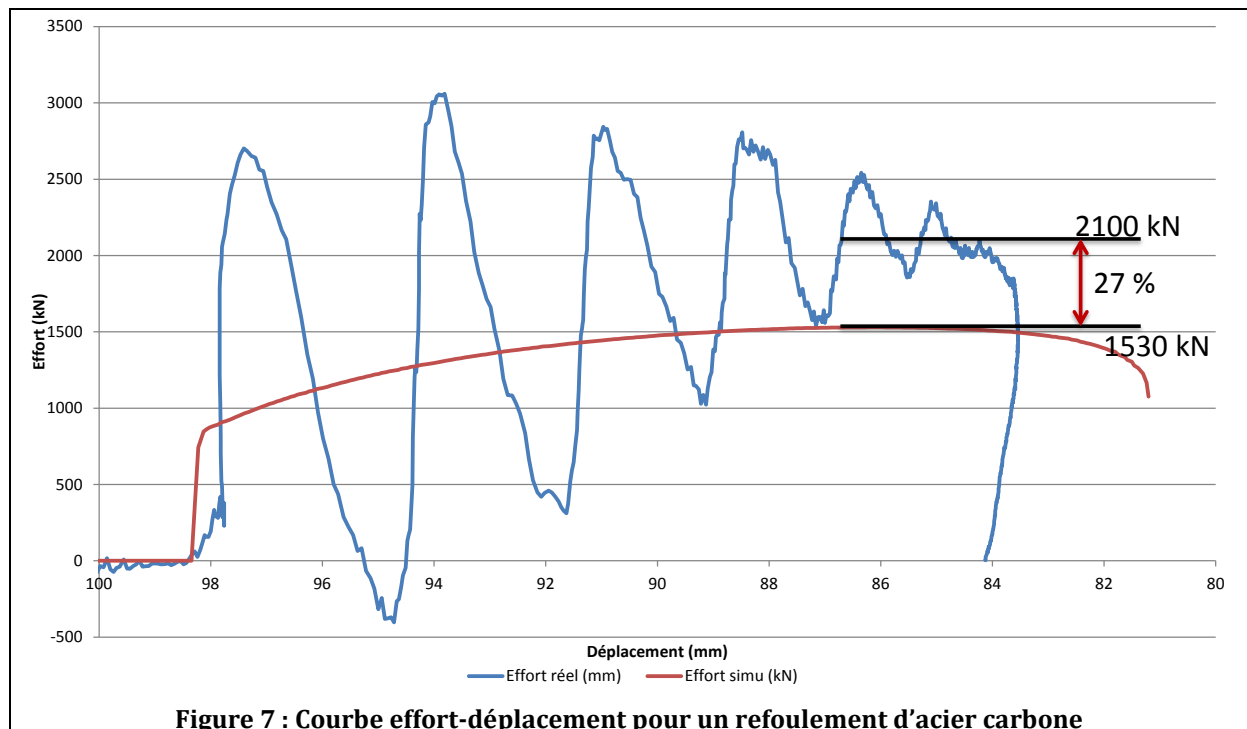
Pour ce qui est de la confrontation des résultats expérimentaux et numériques, on s'aperçoit que les 2 courbes suivent la même tendance, cependant on constate une différence notable dans les valeurs d'effort maximal. Précisons qu'ici la valeur d'effort maximal correspond à la valeur de l'effort obtenu en fin de déformation plastique du lopin et non à la valeur de l'effort maximal obtenu en fin d'essai, puisque l'on atteint les plans de frappe. La simulation sous-estime l'effort de forgeage nécessaire de 39% par rapport à la réalité, ce qui est non négligeable. La simulation surestime donc les capacités de notre presse.

Cette surestimation des capacités de la presse par la simulation peut s'expliquer par le fait que dans cette simulation, la presse a été considérée comme purement rigide en première approche. Ce qui signifie que la presse a été modélisée de telle sorte que toute l'énergie développée par la presse soit dépensée en énergie utile pour la déformation plastique d'un lopin. La déformation élastique du bâti est donc totalement négligée, augmentant ainsi l'efficacité du forgeage.

Pour le cas du refoulement du superalliage d'inconel 625, les courbes d'effort-déplacement issus de l'essai et de la simulation sont tracés Figure 7. L'inconel est un matériau très résistant mécaniquement, et on constate immédiatement que l'allure de la courbe expérimentale n'a rien à voir avec celle présentée précédemment pour le refoulement de l'acier carbone. Tout d'abord, à énergie identique le déplacement du coulisseau dans le cas de l'inconel est plus faible que pour l'acier carbone: à température similaire la contrainte du matériau pour l'inconel est plus importante que pour l'acier carbone.

De plus, on a d'importantes variations d'efforts dès lors que l'outil supérieur entre en contact avec le lopin. Ces fortes variations d'efforts illustrent la vibration du bâti de la presse. En effet, l'inconel étant un matériau fortement résistant, lorsque l'outil supérieur entre en contact avec le lopin, l'énergie déployée par la presse n'est pas uniquement consommée par le lopin sous forme de déformation

plastique, mais une partie de l'énergie se dissipe également sous forme de déformation élastique du bâti. Ces fortes variations d'efforts sont caractéristiques de ce que l'on appelle un choc élastique ou « choc dur ». On parle de choc dur lorsqu'aucun des 2 corps entrés en collision n'absorbe d'énergie, et dans ce cas chaque masse repart avec une nouvelle vitesse.



L'amplitude des variations d'effort diminue progressivement à mesure que le lopin se déforme, ce qui signifie que le lopin absorbe de l'énergie et joue un rôle d'amortisseur.

En ce qui concerne la comparaison des résultats expérimentaux et numériques, on constate que dans le cas du choc dur, la simulation numérique ne parvient pas à retranscrire la vibration du bâti au travers d'oscillations des efforts. Et cela est normal puisque pour la simulation, la presse avait été considérée comme purement rigide. La déformation élastique de la presse n'est donc pas prise en compte dans le modèle, et l'on ne peut donc pas simuler de chocs durs.

Enfin si l'on compare la valeur de l'effort maximal simulé et la valeur moyenne de l'effort maximal réel, on remarque que l'effort simulé est 27% inférieur à l'effort moyen maximal. Donc ici aussi la simulation sous-estime l'effort de forgeage réel nécessaire, et surestime donc la capacité de la presse. Mais là encore cela est dû à la modélisation de la presse purement rigide dans la simulation.

Il faut cependant nuancer les différences observées entre réel et simulation, car les valeurs des efforts expérimentaux ont été obtenues grâce à la cellule d'acquisition de la presse. Or le capteur d'effort est situé sur la traverse supérieure de la presse, donc assez loin du lieu de frappe. De plus, sur la courbe expérimentale, on s'aperçoit qu'il y a des valeurs d'efforts négatives, ce qui ne devrait normalement pas se produire. Là encore cela s'explique sans doute par la position du capteur. En effet, celui-ci est sûrement placé au niveau d'un ventre et non d'un nœud de flexion. On peut donc remettre en cause l'exactitude des valeurs obtenues, alors que le logiciel Forge, lui, donne la valeur des efforts au niveau de l'outil supérieur.

Ces 2 essais de refoulement et les simulations associées montrent bien que l'hypothèse d'une presse purement rigide n'est pas suffisante pour modéliser correctement le comportement de la presse, et ainsi estimer correctement les valeurs des efforts de forgeage nécessaires. Il faut donc définir une raideur de presse dans nos modèles de simulation. Pour cela la raideur de notre presse à vis doit donc être déterminée.



## 4 Détermination de raideur

Pour déterminer la raideur de la presse à vis, plusieurs méthodes ont été mises en œuvre. Premièrement, la raideur de la presse a été déduite en supposant que toute l'énergie développée par la presse est dissipée en énergie élastique. La raideur a également été déterminée expérimentalement en observant l'allongement de la presse lors de frappes.

### 4.1 Méthode théorique

Si l'on considère la presse comme un ressort de constante de raideur  $K$  (Figure 8), on peut écrire l'équation :

$$F = K \Delta x \text{ ou } \Delta x = F/K \quad \text{Eq. 3}$$

Avec  $F$  l'effort appliqué, et  $\Delta x$  l'allongement du bâti de la presse.

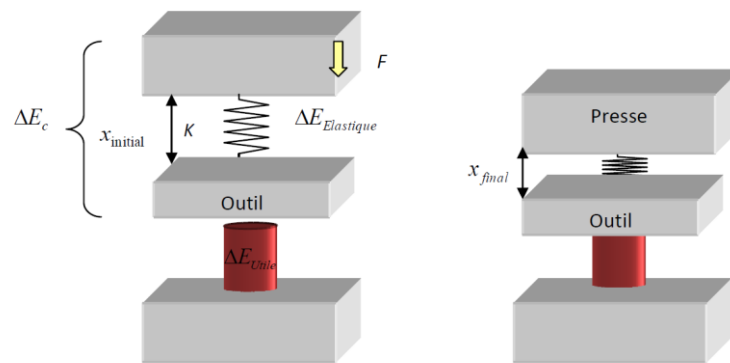


Figure 8 : Modèle d'une presse à vis avec raideur défini dans Forge [7]

Ensuite dans le cas d'une frappe à vide, on peut écrire que toute l'énergie déployée par la presse est dissipée en énergie élastique. On vérifie donc l'équation suivante :

$$E_{totale} = E_{elastique} = \frac{1}{2} K \Delta x^2 \quad \text{Eq. 4}$$

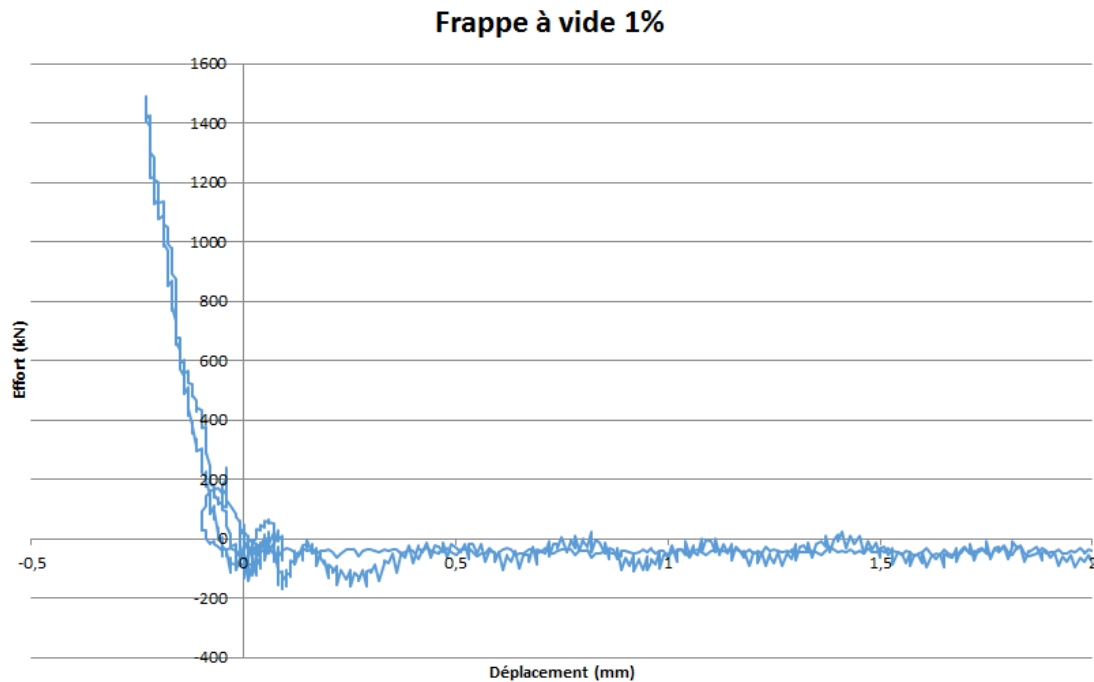
Et si l'on remplace dans cette équation,  $\Delta x$  par  $F/K$ , on obtient alors une équation pour la constante de raideur de bâti  $K$  :

$$K = F^2 / 2E \quad \text{Eq. 5}$$

Ainsi connaissant pour une énergie donnée la valeur de l'effort développé par la presse, on peut en déduire la valeur de la constante de raideur  $K$  de la presse. Cette formule est d'ailleurs utilisée par le logiciel Forge pour calculer la raideur des machines de forge. Attention cependant aux conditions d'applications de cette formule. Pour que celle-ci soit valable, il faut se placer dans un cas où toute l'énergie développée par la presse serait dissipée en énergie de forgeage. Il ne faut donc pas prendre des valeurs d'énergie trop élevée et pour lesquelles l'effet du limiteur de couple interviendrait.

Dans notre cas, pour nous affranchir de l'effet du limiteur de couple, on choisit une énergie  $E$  de 1% de l'énergie maximum qui est de 31.5kJ, ce qui donne 315J. En réalisant une frappe à vide à 1% d'énergie maximum de la presse, on obtient un effort associé de 1491 kN (Figure 9). En appliquant ces valeurs dans la formule on obtient alors :

$$K = F^2 / 2E = (1\,491\,000\,N)^2 / (2 \times 315\,J) = 3.53 \cdot 10^9\,N/m$$



**Figure 9 : Courbe effort-déplacement d'une frappe à vide à 1% d'énergie maximum**

Avec cette méthode on obtient alors une constante de raideur de notre presse de  $3.53 \cdot 10^9$  N/m.

## 4.2 Méthode expérimentale

Pour déterminer la raideur de la presse expérimentalement, il faut pouvoir mesurer l'allongement du bâti de la presse lors d'une opération de forgeage. Pour cela des systèmes d'acquisition extérieurs sont nécessaires. Une caméra rapide ainsi qu'un système de suivi de points, appelé Pontos et conçu par la société GOM, ont été utilisés. La caméra rapide permet l'analyse de phénomènes physiques courts et rapides ainsi que le suivi de trajectoire de mires préalablement collées sur les objets à étudier. Sa fréquence d'acquisition maximale est de 120.000 images/s, un éclairage continu additionnel est donc nécessaire. Le système de suivi de points, le Pontos, est basé sur le principe de la triangulation, avec un système de stéréo caméra qui fournit des coordonnées 3D précises grâce à des marqueurs de points de référence, matérialisé par des gommettes, préalablement collées sur l'objet à analyser. La fréquence maximale d'acquisition du Pontos est de 1.300 images/s. Afin de s'affranchir de l'éclairage environnant chaque caméra est entourée de 6 projecteurs rouges ayant une fréquence de clignotement synchronisé avec la fréquence d'acquisition des caméras que l'opérateur règle selon ses besoins.

De plus, pour pouvoir mesurer la raideur de la presse, il faut se placer dans des conditions expérimentales où une part de l'énergie déployée par la presse est dissipée dans le bâti. C'est-à-dire, soit une frappe à vide, soit un choc dur ou encore un choc mou mais pour lequel on forgerait jusqu'à atteindre les plans de frappes. Ensuite, quel que soit le cas dans lequel on se placera, il faudra que le temps de forgeage soit assez long pour permettre aux systèmes d'acquisitions extérieurs d'enregistrer suffisamment de données. Enfin, pour que l'allongement du bâti soit visible, il faut maximiser la valeur maximale de l'effort appliqué lors du forgeage, puisque l'allongement dépend directement de l'effort ( $\Delta x = F/K$ ).

Pour définir les conditions expérimentales les plus optimales, les efforts maximum ont été comparés :

Effort maximum pour la frappe à vide à 1% : 1491 kN

Effort maximum pour le choc dur sur Inconel : 3059 kN

Effort maximum pour le choc mou sur C17 et plans de frappes : 6414 kN

L'effort étant nettement plus élevé dans le cas du choc mou avec forgeage jusqu'au plans de frappes, c'est donc ces conditions expérimentales qui ont été choisies. De plus, afin de maximiser le temps de forgeage, les lopins auront un rapport d'élanement assez élevé.

Les essais instrumentés ont été réalisés sur la presse à vis :

- La caméra rapide était placée face à la presse, avec le projecteur éclairant les outillages préalablement équipés de mires pour suivre leurs déplacements lors des frappes (Figure 10).
- Le Pontos était placé de l'autre côté de la presse, de manière à mesurer l'allongement du bâti lors des frappes. Des gommettes réfléchissantes ont donc été collées sur un des tirants du bâti de la presse et le Pontos a suivi ses points pendant les opérations de forgeage (Figure 11).



Figure 10 : Installation de la caméra rapide et du projecteur face à la presse



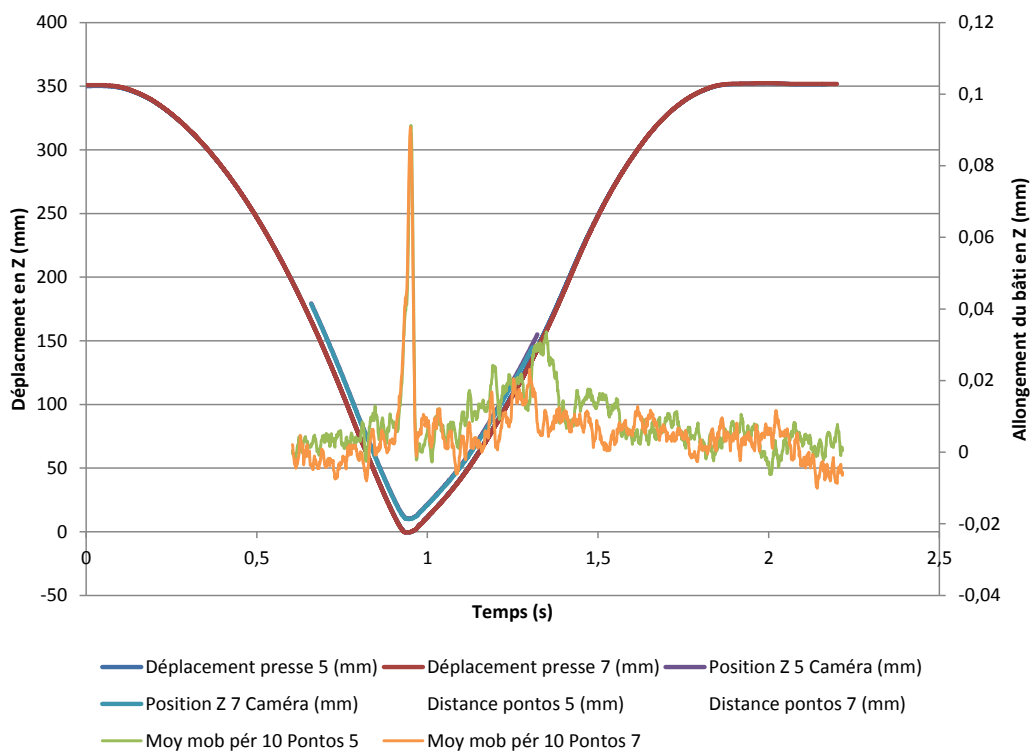
Figure 11 : Installation du Pontos et des gommettes sur un des tirants de la presse et affichage du Pontos représentant la distance initiale entre les gommettes sélectionnées

Pour ces essais instrumentés, comme expliqué précédemment, des opérations de refoulement d'acier carbone C17 sur tas plans striés ont été réalisées. Pour s'assurer de la répétabilité, le même essai a été réalisé 2 fois dans les mêmes conditions. Pour s'assurer d'avoir un effort maximal, la consigne en énergie était fixée à 100% de l'énergie maximale, soit 31.5kJ. Pour augmenter le temps de forgeage les lopins ont été choisis avec un fort coefficient d'élanement : diamètre 27 mm et hauteur 88 mm, ce qui donne un coefficient d'élanement  $h/d = 3.26$ . De plus, les refoulements ont été faits à chaud, les outillages avaient une température de 50°C et les lopins sortaient du four à 1150°C.

Nuance	C17	C17
Lopin	5	7
Diamètre $\varnothing$ (mm)	27	27
Hauteur H (mm)	88,3	87,95
<b>Outils</b>		
Température outil inférieur (°C)	50	50
Température outil supérieur (°C)	50	50
Distance entre outils au PMB (mm)	7,8	7,8
<b>Paramètres des essais</b>		
Température de chauffe (°C)	1150	1150
Temps de chauffe (s)	4080	4200
Temps de transfert (s)	8	8
Consigne presse (%)	100	100
Vitesse pupitre (mm/s)	652	648
Energie pupitre (kJ)	29	28,6
Effort pupitre (kN)	6414	6369
Point bas acquisition (mm)	7,8	7,8
<b>Allongement max Pontos (mm)</b>		
	0,109	0,109

**Tableau 2 : Récapitulatif des paramètres des essais et de leurs résultats**

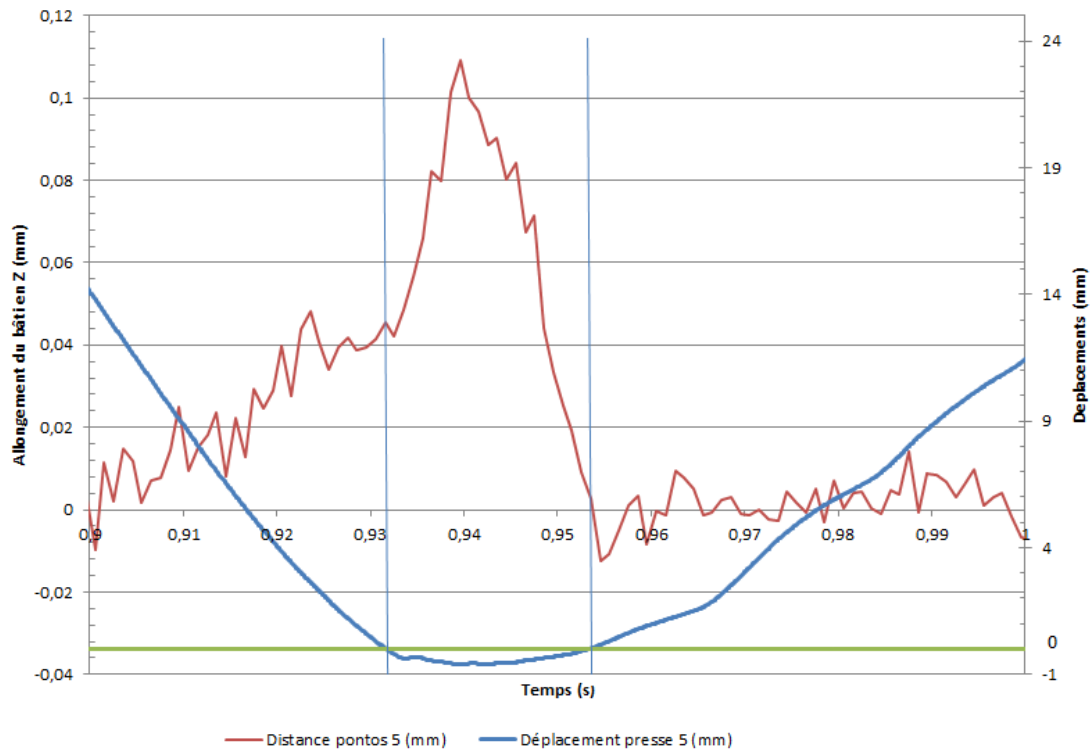
Les paramètres des essais ainsi que les résultats obtenus pour les 2 refoulements sont résumés dans le Tableau 2. En observant les résultats, on remarque que les essais sont bien répétables. Cela s'observe également sur la Figure 12 où les déplacements du coulisseau enregistrés par la presse, les déplacements de l'outillage observés par caméra rapide, ainsi que l'allongement d'un tirant enregistré par le Pontos sont représentés en fonction du temps. Les courbes de déplacements et si l'on fait abstraction du bruit les courbes d'allongement du bâti, se superposent pour les essais sur les lopins n° 5 et 7. Ainsi pour plus de clarté, dans l'analyse des résultats qui va suivre, seul l'essai 5 sera étudié en détail.



**Figure 12 : Déplacement du coulisseau et des outillages et allongement du bâti pour les lopins 5 et 7 en fonction du temps**

Sur la Figure 12, on observe un décalage entre les déplacements enregistrés par la presse et ceux observés par la caméra rapide. En effet, ce décalage entre les 2 courbes correspond à 7.8 mm, soit la distance minimale existante entre l'outillage inférieur et l'outillage supérieur. Les déplacements enregistrés par ces 2 moyens d'acquisition sont donc les mêmes, ils n'ont simplement pas la même définition du zéro déplacement de référence. Ainsi, pour la suite, seuls les déplacements enregistrés par la presse seront analysés.

On remarque aussi clairement que la brusque augmentation de l'allongement du bâti, se produit au moment même où le déplacement maximum du coulisseau est enregistré, c'est-à-dire au moment où l'on arrive sur les plans de frappes. La Figure 13 le montre d'autant mieux que le graphique zoom sur la partie où l'on atteint les plans de frappes.



**Figure 13 : Déplacement du coulisseau et allongement du bâti pour le lopin 5 en fonction du temps**

L'évolution de l'effort et de l'allongement du bâti sont tracés sur un même graphique Figure 14. La courbe de l'allongement du bâti suit celle de l'augmentation en effort. Cela montre donc le rôle important de la montée en effort qui permet l'observation de l'allongement du bâti. A partir de ces courbes d'effort et d'allongement du bâti, il est possible de déterminer la raideur de la presse, puisque l'on a :  $K = F/x$ .

La valeur de l'effort  $F$  correspond directement aux valeurs enregistrées par la presse. En revanche pour déterminer le  $x$ , c'est-à-dire l'allongement de la presse, on ne peut pas utiliser directement la valeur donnée par le Pontos. En effet, l'allongement mesuré par le Pontos sur un tirant de la presse, est un allongement mesuré sur la distance initiale entre 2 gommettes, soit 635 mm. Or on souhaite connaître l'allongement sur la hauteur totale du bâti, qui vaut 3685 mm. On suppose donc la déformation du bâti homogène sur toute sa hauteur. On obtient ainsi la Figure 15 représentant les valeurs de la raideur de la presse  $K$  en fonction du temps, pour la période où l'on est sur les plans de frappes et où l'effort est maximal. La valeur de la raideur de presse varie, puisque l'effort et l'allongement variaient eux aussi. On calcule alors une valeur moyenne de raideur  $K$ , et l'on obtient :  $K = 11\,670 \text{ kN/mm} = 11,6 \cdot 10^9 \text{ N/m}$ .

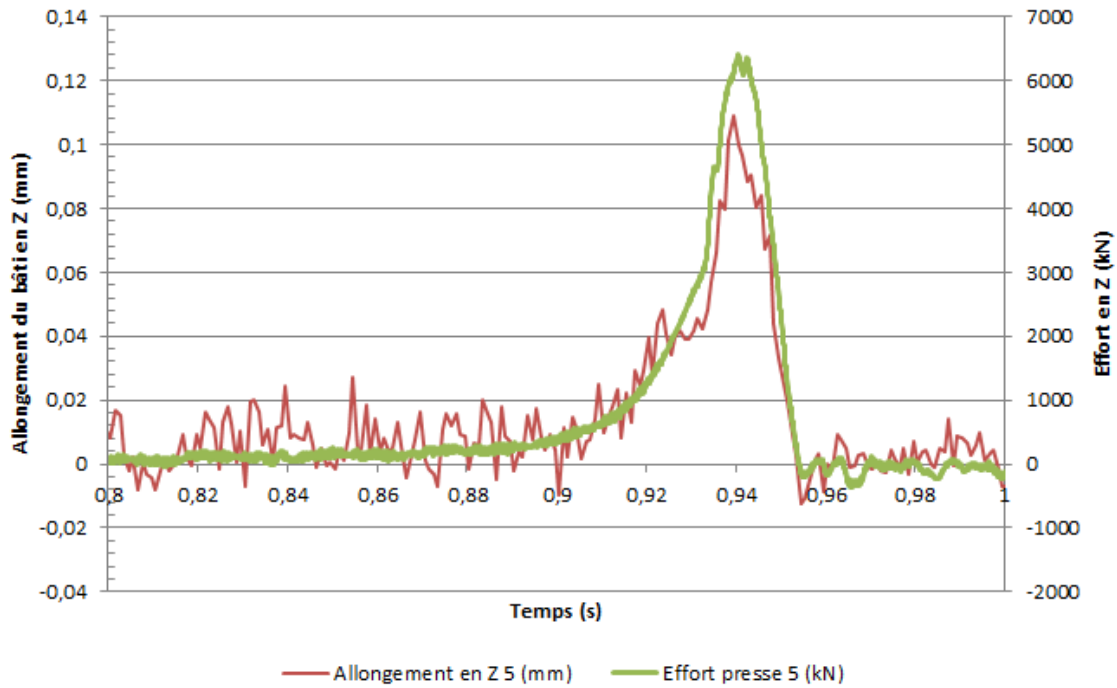


Figure 14 : Effort et allongement du bâti en fonction du temps pour le lopin 5

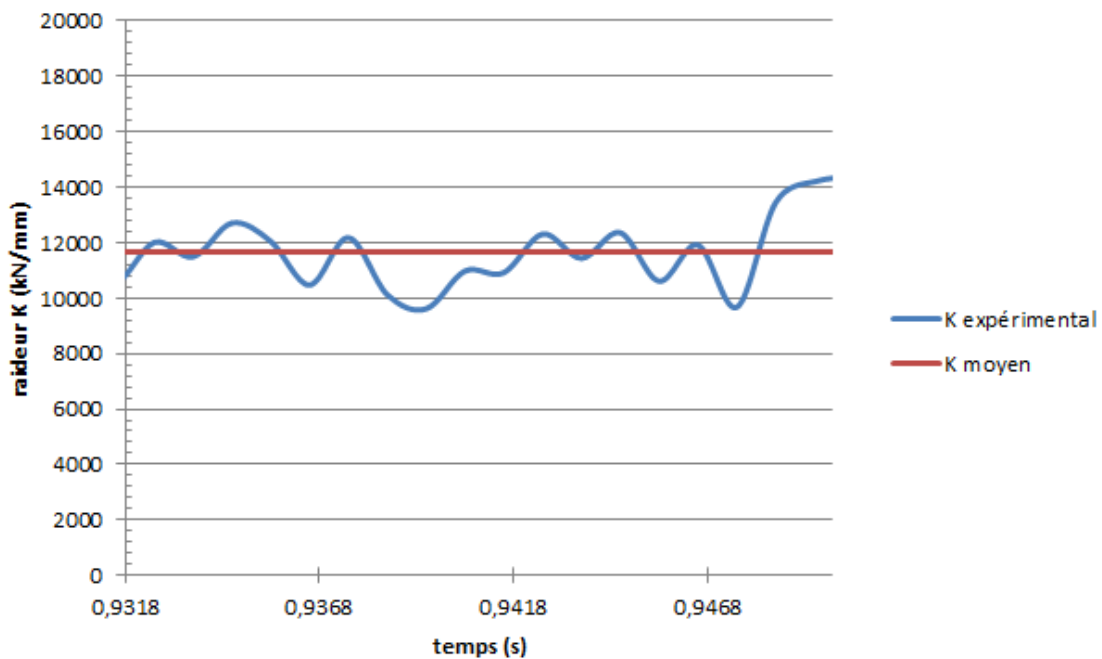


Figure 15 : Raideur expérimentale en fonction du temps

### 4.3 Comparaison des raideurs

Si l'on compare les raideurs obtenues de manière théorique et expérimentale, on constate que la raideur expérimentale est 3.4 fois plus grande que la valeur théorique. Le rapport entre les deux est donc non négligeable. L'étude doit se poursuivre afin de mieux comprendre le comportement de la presse et affiner sa caractérisation.

## Conclusions

Cette étude constitue un premier pas vers la compréhension et la caractérisation de la presse à vis ainsi que la compréhension de la modélisation des presses à vis dans le logiciel Forge. Les phénomènes de chocs mous et chocs durs sous la presse à vis ont été mis en évidence. La raideur de la presse a été déterminée de manière théorique et expérimentale, cependant ces 2 valeurs ne correspondent pas. L'étude doit donc se poursuivre afin de mieux comprendre le comportement de la presse et affiner sa caractérisation. Afin de lever le doute concernant l'exactitude des valeurs d'efforts données par le capteur de la presse, d'autres essais sont envisagés avec des capteurs supplémentaires placés à différents endroits sur la presse. La flexion de la traverse de la presse lors des opérations de forgeage devrait également être étudiée. Pour chacun de ses tests plusieurs essais seront programmés afin de vérifier la répétabilité des résultats. L'influence du cépage des outillages devrait également être analysée. Enfin concernant les simulations numériques, des simulations avec les valeurs de raideurs déterminées théoriquement et expérimentalement devrait être réalisées, afin d'évaluer l'influence de la raideur dans le modèle des presses à vis. Les résultats expérimentaux, ainsi que les résultats numériques avec et sans raideur seront alors comparés.

## Remerciements

Les auteurs souhaitent remercier M. Tiphaine Friot et M. Jean-Baptiste Croué pour leur aide sur ce projet.

## Références

- [1] E. Doege, G. Silberbach, Influence of various machine tool components on workpiece quality, *Annals of the CIRP*, Vol. 39, (1990) 209-214
- [2] M. Gao, H. Huang, Z. Liu, X. Li and J.W. Sutherland, Design and optimization of the slide guide system of hydraulic press based on energy loss analysis, *Energies*, 2016
- [3] O. Karaseva, Déformation élastique des presses de forgeage et calcul parallèle, Thèse, Ecole des Mines de Paris, 2005
- [4] Schuller Handbook : Fundamentals of press design, Springer-Verlag Heidelberg, 1998
- [5] Données techniques Lasco SPR 400, 2014
- [6] Documentation commerciale Lasco SPR et SPP – Machines de forgeage : Presses à vis, octobre 2012
- [7] Documentation Forge<sup>®</sup>, Partie 5 : Données procédés, Transvalor