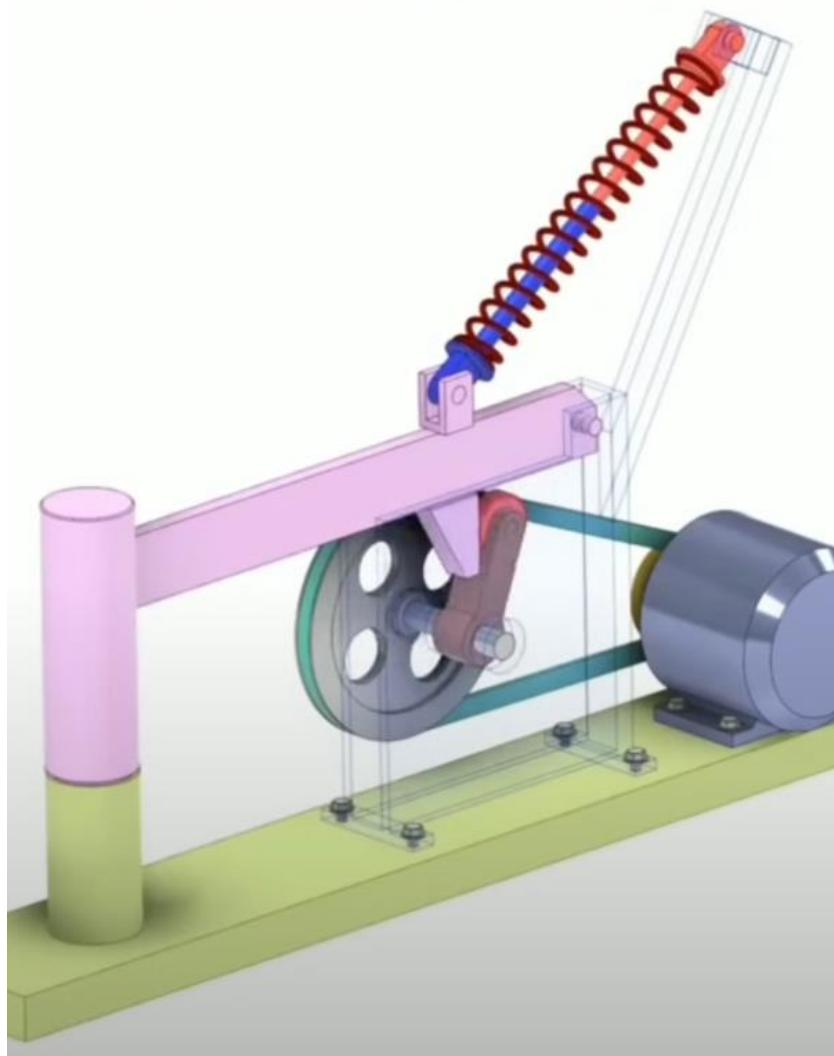


# RAPPORT PROJET : MARTEAU PILON



## Sommaire

<b>1. Introduction et mise en situation .....</b>	3
<b>2. Identification des phases de vie du produit .....</b>	4
<b>Phase 1 : Conception .....</b>	4
<b>Phase 2 : Utilisation normale .....</b>	4
<b>Phase 3 : Fin de vie / Recyclage .....</b>	4
<b>3. Diagramme des milieux (utilisation normale) .....</b>	5
<b>4. Cahier des charges .....</b>	6
<b>5. Etat de l'art .....</b>	7
<b>6. Proposition de solutions techniques (principes de fonctionnement).....</b>	8
<b>Solution 1 : Système à levier avec ressort .....</b>	8
<b>Solution 2 : Came motorisée.....</b>	9
<b>Solution 3 : Bielle-manivelle .....</b>	9
<b>7. Tableau de classement des solutions techniques proposées .....</b>	10
<b>8. Avant-projet .....</b>	11
<b>9. Notice de calcul.....</b>	15
<b>10. Bilan et perspectives.....</b>	16
<b>11. References.....</b>	17

## 1. Introduction et mise en situation

Le forgeage manuel de lames de couteaux est une pratique artisanale exigeante, nécessitant un savoir-faire important ainsi qu'un temps de mise en œuvre conséquent. Ce procédé traditionnel, bien qu'efficace pour des petites productions, reste limité par l'effort physique requis, la régularité des frappes et l'imprécision inhérente au geste humain. De plus, la répétabilité et le contrôle de la température et de la pression exercée sont essentiels pour garantir la qualité finale de la lame forgée.

C'est dans ce contexte que s'inscrit notre projet : concevoir un prototype de marteau pilon mécanique capable d'améliorer l'efficacité, la précision et la répétabilité des opérations de forgeage, et dans notre cas, d'une lame de couteau. Ce système vise à assister l'utilisateur dans la fabrication de lames d'acier, tout en assurant un contrôle rigoureux des frappes, une sécurité optimale, et une simplicité d'usage.

L'objectif général est donc de développer un prototype d'une machine à bas coût, adaptée à un environnement pédagogique (fablab, atelier de formation) ou semi-professionnel, permettant de simuler un processus de forgeage réaliste et répétable.

## 2. Identification des phases de vie du produit

L'analyse du cycle de vie permet de structurer le développement du produit en anticipant les contraintes propres à chaque étape. Trois phases principales ont été retenues pour ce projet :

### Phase 1 : Conception

Durant cette phase, le besoin est formalisé par l'analyse fonctionnelle et le cahier des charges. Plusieurs solutions sont imaginées puis comparées à l'aide d'une veille effectuée en amont. La solution la plus pertinente est ensuite développée via des schémas de principe (diagramme pieuvre, bête à corne), modélisée sur logiciel de CAO, puis les premiers calculs de dimensionnement sont réalisés. Cette phase inclut aussi une première réflexion à la préparation de la fabrication (choix matériaux, composants, etc.).

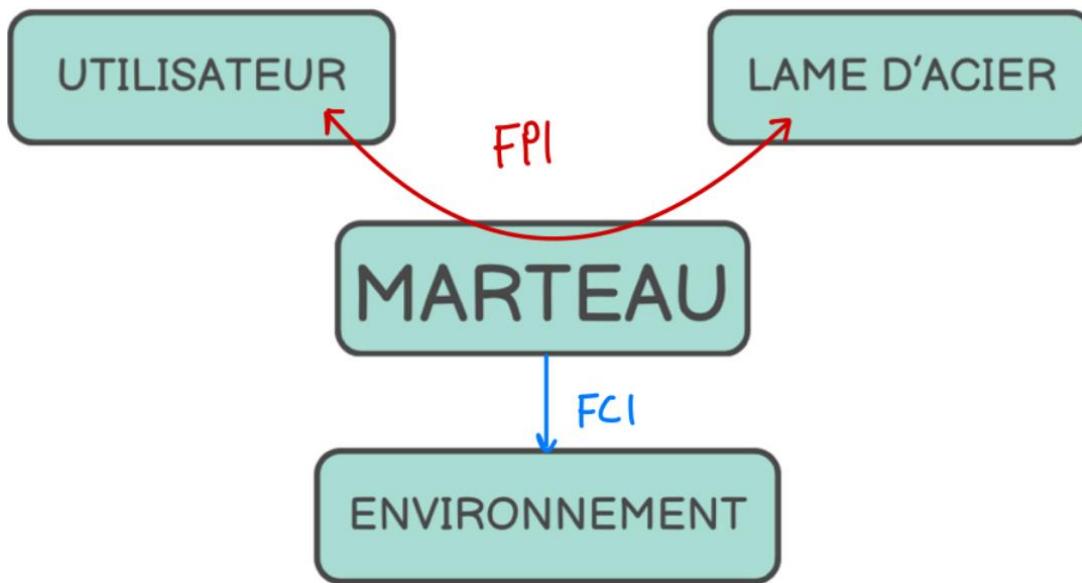
### Phase 2 : Utilisation normale

C'est la phase principale du produit : l'utilisateur utilise le marteau pilon pour forger des pièces métalliques. Cette phase implique de nombreux critères de performance : force de frappe suffisante pour déformer l'acier, cadence régulière, répétabilité, précision du mouvement, confort d'utilisation, sécurité (carter, distance de sécurité, faible niveau sonore), ergonomie, et facilité de mise en œuvre (mise en marche simple, entretien minimal).

### Phase 3 : Fin de vie / Recyclage

Un bon design implique également une fin de vie responsable. Le démontage des pièces doit être possible sans outils spécialisés, et les matériaux utilisés (acier, aluminium, ressorts, plastiques) doivent être identifiables pour faciliter le tri et le recyclage. Cette démarche s'inscrit dans une logique d'écoconception, cohérente avec les valeurs actuelles d'ingénierie durable.

### 3. Diagramme des milieux (utilisation normale)



Le diagramme des milieux (aussi appelé « diagramme pieuvre ») identifie les interactions entre le système et son environnement lors de son fonctionnement normal. Ces interactions permettent d'identifier les fonctions principales (FP) et contraintes (FC) qui orienteront la conception.

- **Utilisateur** : l'interface doit être sécurisée, simple et intuitive. L'utilisateur doit pouvoir activer et arrêter le mécanisme sans risque.
- **Lame d'acier** : le système doit pouvoir forger une lame d'acier sans difficulté
- **Environnement** : le bruit, les vibrations et les émissions thermiques doivent être limités. Le système doit être stable et ne pas présenter de danger pour son entourage immédiat.

Ce diagramme est indispensable pour garantir la complétude de l'analyse fonctionnelle.

## 4. Cahier des charges

L'expression fonctionnelle permet de traduire les besoins identifiés en cahier des charges.

Fonction	Expression	Critère	Niveaux	Flexibilité
<b>FP1</b>	Frapper la lame de couteau à la demande de l'utilisateur FP 1.1 : Utiliser énergie potentielle de la gravité FP 1.2 : Utiliser énergie potentielle du ressort	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Force d'impact exercée</li> <li>• Précision du mouvement</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Vitesse choc min = 3 m/s</li> <li>• +/- 1mm</li> <li>• <math>-20\text{mm} &lt; L &lt; 120\text{mm}</math></li> <li>• <math>10\text{mm} &lt; l &lt; 30\text{mm}</math></li> <li>• <math>1,5\text{mm} &lt; e &lt; 3,5\text{mm}</math></li> </ul>	1
<b>FC1</b>	Protéger l'environnement en mettant un carter sur le marteau pilon	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Protection contre les projections</li> <li>• Réduction du bruit</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Bouton d'arrêt d'urgence</li> <li>• Vitre de protection au point d'impact et carter de protection au niveau des parties mobile</li> </ul>	1

Chaque fonction est analysée en tenant compte de la performance attendue. La vitesse de choc (3 m/s) induit et correspond à la force nécessaire pour déformer un acier à chaud de faible section. La précision (+/- 2 mm) assure que les frappes successives tombent au bon endroit, et le dimensionnement de la lame à déformer afin de ne pas avoir une lame trop imposante.

Les critères comme la sécurité ou la maintenance sont essentiels dans une logique de développement responsable, surtout pour un projet pédagogique.

## 5. Etat de l'art

L'état de l'art permet d'étudier les solutions existantes et de s'inspirer des meilleurs principes techniques.

Le marteau pilon de Nasmyth (1839), l'un des premiers modèles industriels, fonctionne à la vapeur et repose sur une chute verticale guidée du marteau. Son efficacité repose sur une masse importante et un système de régulation de la chute.

Aujourd'hui, plusieurs technologies sont employées :

- **Systèmes hydrauliques** : très puissants, précis, mais coûteux et complexes à entretenir.
- **Systèmes pneumatiques** : cadence élevée, bon contrôle, mais nécessite un compresseur.
- **Systèmes mécaniques à came ou bielle-manivelle** : robustes, simples, automatisables, adaptés à notre contexte.

**Performances relevées dans la littérature :**

- Force de frappe : entre 100 N et 5000 N selon la masse
- Cadence : 0,5 à 2 Hz
- Précision : meilleure que 1 mm avec des guides linéaires

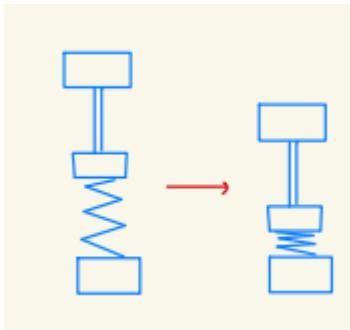
Ces données sont des repères pour évaluer nos choix et orienter notre dimensionnement.

## 6. Proposition de solutions techniques (principes de fonctionnement)

Trois concepts ont été analysés, chacun répondant aux besoins exprimés avec des avantages et limites.

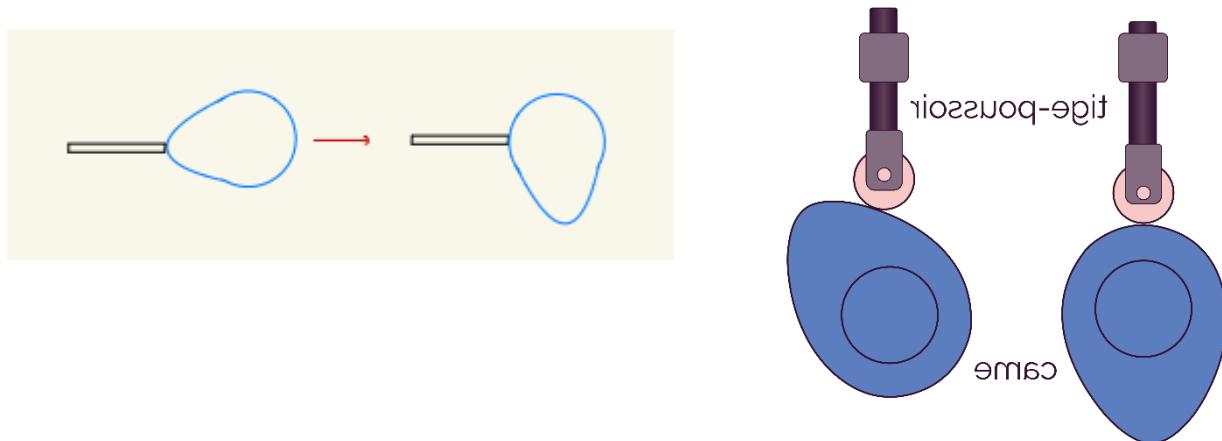
### Solution 1 : Système à levier avec ressort

- L'utilisateur tire un levier qui comprime un ressort. Lors du relâchement, le ressort libère son énergie pour frapper la pièce.
- **Avantages** : simplicité mécanique, faible coût, aucun besoin électrique.
- **Limites** : force de frappe limitée par le ressort, difficulté de réglage de la cadence et de la précision.



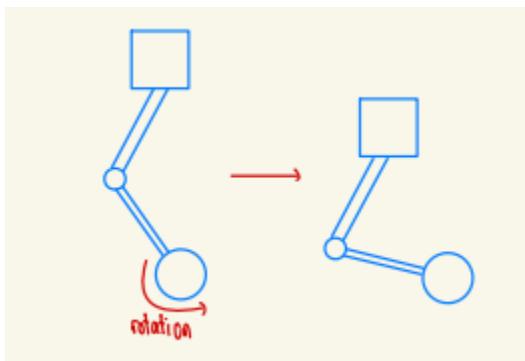
## Solution 2 : Came motorisée

- Une came fixée à un moteur fait monter et descendre le marteau à chaque rotation.
- **Avantages** : automatisation facile, cadence régulière, bon contrôle du cycle.
- **Limites** : nécessité d'un moteur, plus complexe à fabriquer, plus cher.



## Solution 3 : Bielle-manivelle

- Un moteur fait tourner une manivelle reliée à une bielle. Le mouvement rotatif est converti en mouvement vertical alternatif.
- **Avantages** : régularité du mouvement, bonne transmission d'énergie, mécanisme robuste et bien connu.
- **Limites** : encombrement, usure potentielle des liaisons.



## 7. Tableau de classement des solutions techniques proposées

Sur la base de la solution donnée, un tableau de classement est construit pour les comparer

Critères	Manivelle + Bielle	Came	Ressort
Force d'impact	2	3	2
Précision du mouvement	3	3	1
Protection contre les projections	2	2	2
Réduction du bruit	2	1	3
Simplicité de fabrication	3	3	2
Total	12	12	10

Conclusion : On a choisi d'utiliser un mécanisme similaire au came rotatif avec un ressort de soutien sur les bras tenant le marteau pour fournir une force d'impact supplémentaire

## 8. Avant-projet

### Conception

Le système de référence (depuis YouTube)

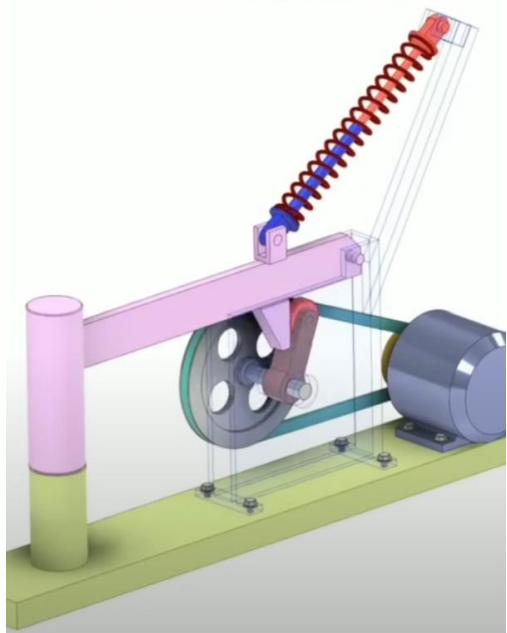
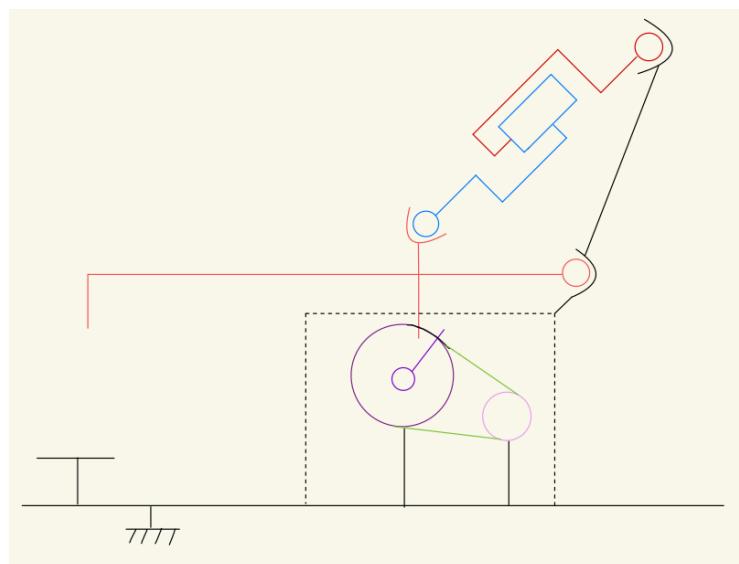
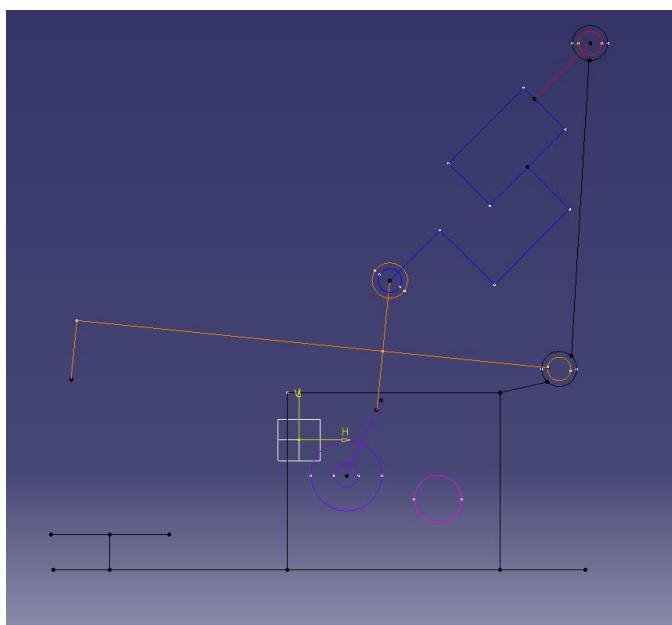


Schéma cinématique

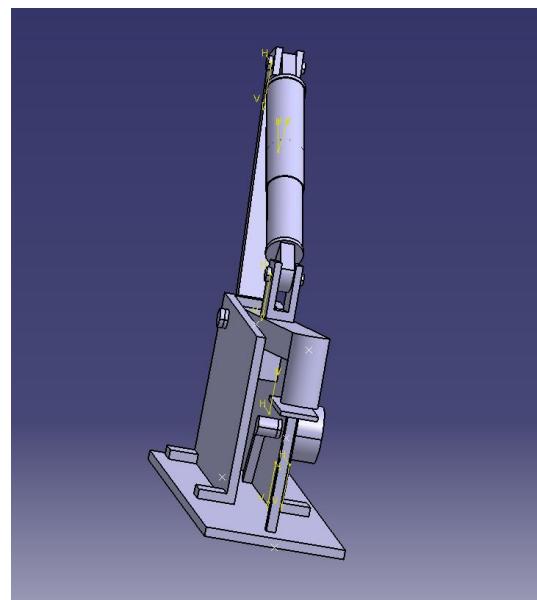
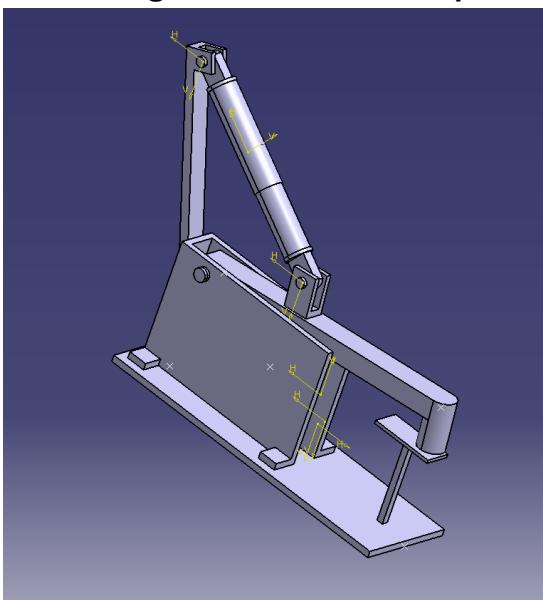


Le squelette pilotant

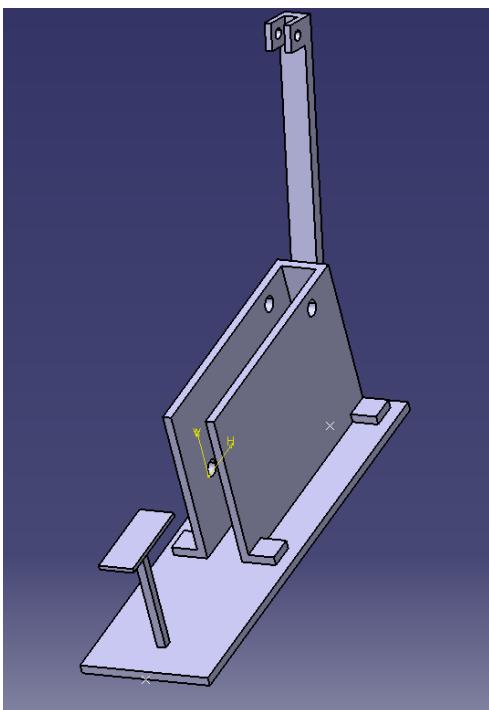


La roue est reliée à un moteur par courroie qui provoquera un mouvement de rotation pour la petite tige colorée en violet, et cette rotation provoquera une collision entre la petite tige et le marteau (partie orange) la faisant monter puis descendre. Le ressort contribue à fournir une force de frappe supplémentaire sur la pièce de forge

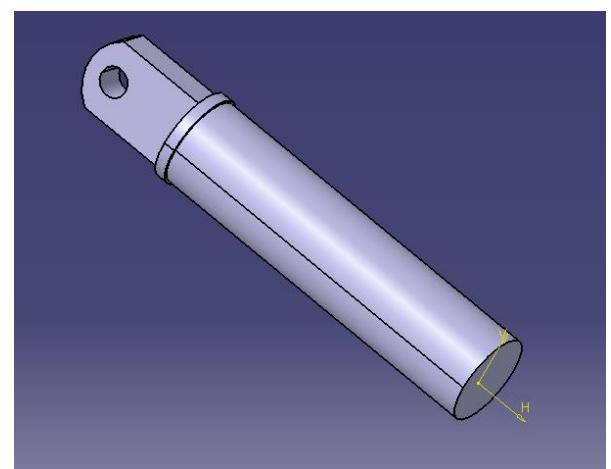
### Assemblage totale du marteau pilon



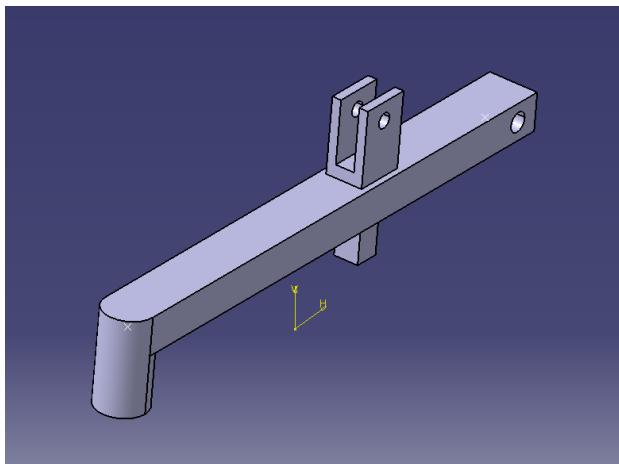
La plupart de nos pièces seraient produites par impression 3D. Le bâti, les tiges, les axes et le marteau. Mais certaines seraient produites par les machines conventionnelles, telles que les paliers lisses.



**Bati**

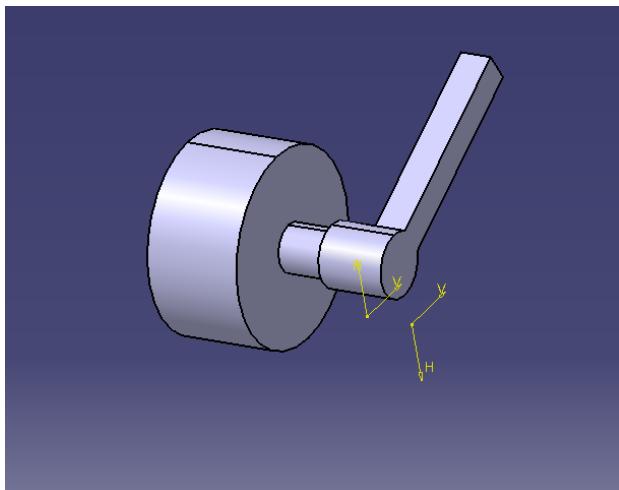


**Tige**



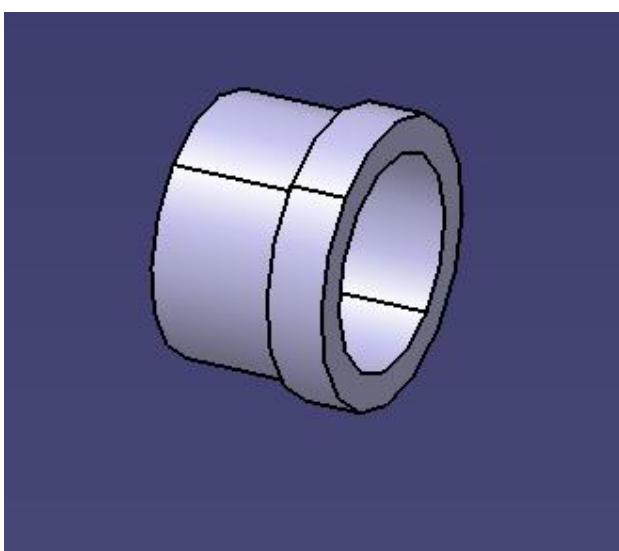
### Marteau

Une petite forme rectangulaire au bas de la barre horizontale est nécessaire pour garantir que le marteau pourra monter, ce mouvement est causé par une collision avec une petite tige



### Petite tige avec une roue

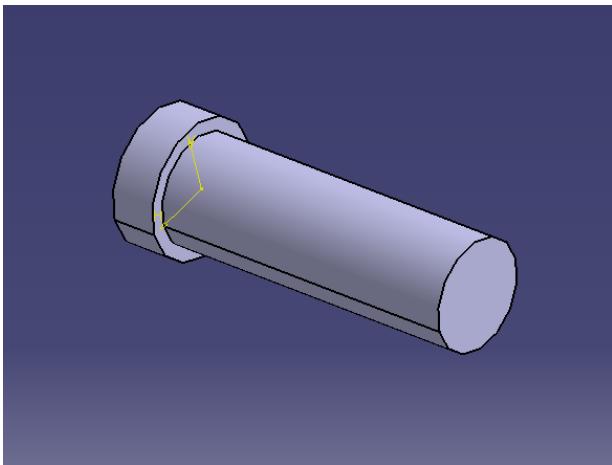
La roue sera reliée à un moteur par une courroie, et cette rotation fera également tourner la petite tige qui aidera à lever le marteau



### Palier lisse

Ce composant est utilisé pour soutenir et guider un arbre rotatif ou coulissant tout en réduisant les frottements entre les pièces mobiles. Il fonctionne par contact direct entre l'arbre et la surface du palier. Ce composant est placé entre le marteau et le bâti ainsi qu'entre la petite tige et le bâti.

J'utilise du métal pour le palier lisse car les matériaux imprimés en 3D ne sont pas assez efficaces pour gérer la friction et la chaleur provenant d'une rotation élevée, ils sont également incapables de supporter un impact élevé qui pourrait provoquer la rupture du palier lisse imprimé en 3D, de plus le métal dissipe mieux la chaleur, donc l'utilisation du métal est plus à long terme par rapport à l'impression 3D du palier lisse



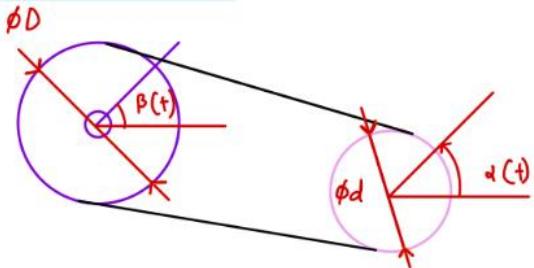
### Axe

Cette pièce sert à relier 2 pièces ensemble pour permettre des mouvements entre elles, elle est utilisée entre la tige bleue (celle en bas) et le marteau, la tige rouge (celle en haut) et le bâti ainsi que le bâti et le marteau

Pour éviter le déplacement axial des axes dans les trous, j'ai utilisé fait un épaulement sur l'axe et puis je mets un circlip sur l'autre cote de l'axe dans l'assemblage

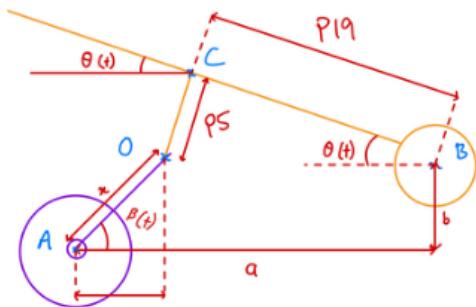
## 9. Notice de calcul

### La loi entrée sortie



$$\beta(t) = \frac{\phi d}{\phi D} \times \alpha(t)$$

### 1) Phase de charge



$$\theta(t) = \cos^{-1} \left( \frac{KP_{19} + Lx}{(P_{19})^2 + (x)^2} \right)$$

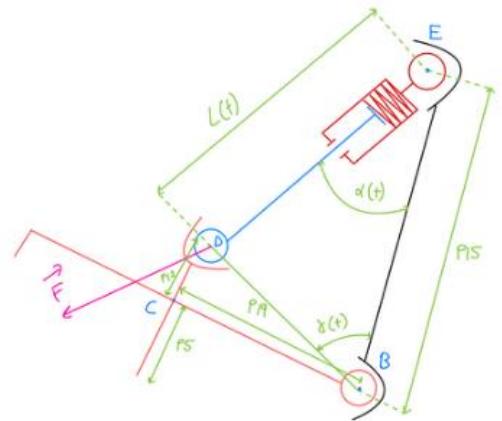
avec :

$$K = b - P_5 \sin(\beta)$$

$$L = a - P_5 \cos(\beta)$$

$$x = \sqrt{K^2 + L^2 - (P_{19})^2}$$

### 2) Phase de décharge



$$I_z \ddot{\gamma} = \vec{F} \wedge \overrightarrow{BD}$$

$$\vec{F} = k(L(t) - L_0)(\cos(\alpha + \gamma) - \sin(\alpha + \gamma))$$

$$\overrightarrow{BD} = -P_{19}\vec{x} + P_{19}\vec{y}$$

$$k = \text{constante de raideur}$$

### Equation finale

$$\ddot{\gamma} = \frac{k}{I_z} (L - L_0)(P_{12} \cos(\gamma + \alpha) - P_{19} \sin(\gamma + \alpha))$$

$$Vitesse_{choc} = \dot{\gamma} \times \text{bras de levier}$$

$$\text{avec : } L = \sqrt{(P_{19})^2 + (P_{15})^2 - 2(P_{19})(P_{15})(\cos \gamma)}$$

$$\alpha = \cos^{-1} \left( \frac{-P_{19}^2 + L^2 + P_{15}^2}{2LP_{15}} \right)$$

## 10. Bilan et perspectives

### Les points forts

- Simplicité et robustesse de la conception
- Utilisation de matériaux accessibles et peu coûteux

### Faiblesses

- Force d'impact limitée par rapport aux marteaux industriels
- Frottement dans les pièces mobiles
- Déformation du matériau dans les zones de fortes contraintes (les pièces imprimées en 3D)
- Problèmes de vibrations ou de stabilité pendant le fonctionnement

### Amélioration possible

- Amélioration de la précision des composants mobiles (alignement des arbres, tolérances)
- Fixations ou articulations plus solides
- Passage de composants imprimés en 3D à des pièces métalliques usinées
- Intégration de guides ou de glissières plus performants pour réduire les frottements

### Comparaison avec les conceptions existantes

Il existe plusieurs marteaux-pilons, mais ils sont généralement de taille énorme et utilisent des mécanismes plus complexes. Mais, le nôtre utilise uniquement un système ressort + amortisseur. En termes de taille, le modèle est plus compact et portable. La fabrication étant principalement réalisée par impression 3D, le coût est bien inférieur et le processus de fabrication est plus simple. Cependant, il offre moins de puissance et de précision que les machines professionnelles.

## 11. References

- <https://www.youtube.com/watch?v=FceTgLejlA&t=1040s>
- Issa M., Saanouni K., Labergère C., Rassineux A., Prediction of serrated chip formation in orthogonal metal cutting by advanced adaptive 2D numerical methodology., Int. J. Machining and Machinability of Material, Vol 9., Nos 3/4, 2011
- Labergere C., Rassineux A., Saanouni K., 2D adaptive mesh methodology for the simulation of metal forming processes with damage, DOI 10.1007/s12289-010-1001-z, article in Press, 2011
- Labergere C., Lestriez P., Saanouni K. Numerical design of extrusion process using finite thermoelastoviscoplasticity with damage. Prediction of chevron shaped cracks, Key Engineering Materials, Vol 424, pages 265-272, 2010
- Saanouni K., Chaboche J.L., Application to Metal Forming, Computational Damage Mechanics, Numerical and Computational methods. in Comprehensive Structural Integrity, Edited by I. Milne, R.O. Ritchie and B. Karihaloo, Vol 3, n 7, 2003
- Kobayashi, S.-I. Oh, T. Altan. Metal Forming and the Finite Elements Methods, pages 1–6, Oxford University Press, New York, 1981.
- P.Hartley, I.Pillinger. Numerical simulation of the forging process. Comput. Methods Appl.Mech.Engng. 195:6676-6690,2006
- Wagoner R. H., Chenot J.- L., Metal forming analysis, Cambridge University Press, Cambridge, 2001 Citeseerx :
- Allard M.A., 1984, Tests on piles installed in flight on the centrifuge, Symposium on recent advances in Geotechnical Centrifuge Modelling, University of California, Davis, pp. 18-20.
- Allard M.A., Scott R.F., Lee J.R., 1986, Driveability on piles. Experiments on model piles driven in flight in the centrifuge, 3rd International Conference on Numerical Methods in Offshore Piling, Nantes, pp. 91-103.
- Bloomquist D., Feld T., Townsend F.C., Gravgaard J., Gill J.J, 1991, Development of a multiple pile driver. Load test device for pile group studies, Proceeding Centrifuge'91, Editor H.Y. Ko and F.G. Mc Lean, Rotterdam: A.A. Balkema, pp. 355-359. UPDM Pile driver UPDM Pile driver 582 Instrumentation, mesures, imagerie et télédétection
- Brown M.J., Hyde A.F.L., Anderson W.F., 2002, The influence of loading rate on pile behaviour in clay, Physical Modelling in Geotechnics: ICPMG 2002, Phillips, Guo and Popescu Editors, pp. 667-672.

- Cyran T.C., Mehle J.S., Goble G.G., Centrifuge modelling of piles, Proceeding Centrifuge'91, Editor H.Y. Ko, Rotterdam: A.A. Balkema, pp. 377-384. Demichelis J., Lafont R., Servant D., 1995, Le marteau électromagnétique, Report LCPC Nantes, 11p.
- de Nicola A., Randolph M.F., 1996, Development of a miniature pile driving actuator, Proceedings Centrifuge'94, Editors Leung, Lee and Tan, Rotterdam: A.A. Balkema, pp.473- 478.
- Guo C., 2007, Mise en oeuvre et développement d'un marteau pour le battage en tête et en fond de trou de pieux modèles réduits centrifugés, Master of sciences report LCPC n°RMS/MSC 2007-4-09-1/1-a, in French, 69p.
- Levacher D., Cottineau L.M., 1996, Pile driving hammers in centrifuge modelling, 6th International Conference and Exhibition on Piling and Deep Foundations, Bombay, India, 15 - 17 January, 8p.
- Levacher D., Sieffert J.G., 1996, Physical simulation of the behaviour of piles during and after driving, Eurodyn'96, 3rd European Conference on Structural Dynamics, Florence, 5 - 8 June, volume 2, pp. 1039-1044.
- Mc Vay M., Bloomquist D., Vanderlinde D., Clausen J., 1994, Studies on laterally pile groups in sand, Proceedings Centrifuge'94, Editors Leung, Lee and Tan, Rotterdam: A.A. Balkema, pp.479-484.
- Nunez I.L., Hoadley P.J., Randolph M.F., Hulett J.M., 1988, Driving and tension loading of piles in sand on a centrifuge, Proceeding Centrifuge'88, Editor J.F. Corte, Rotterdam: A.A. Balkema, pp. 353-362.
- Pan S.S., Pu J.L., Yin K.T., Liu F.D., 1998, A new pile driver and loading set for pile group in centrifuge flight, Proceeding Centrifuge'98, Editor Kimura, Rotterdam: A.A. Balkema, pp. 91-96.
- Randolph M.F., Foray P., (1995), Centrifuge modelling of Euripides pile test, Report GEO: 95169, University of Western Australia, Department of Civil Engineering, Geomechanics Group.
- Sakr M., El Naggar M.H., Nehdi M., 2004, Novel toe driving for thin-walled piles and performance of fibreglass-reinforced polymer (FRP) pile segments, Canadian Geotechnical Journal, volume 41, pp.313-325.
- Sieffert J.G., Levacher D., 1995, Etude de l'effet d'échelle de pieux battus en cours de centrifugation, Revue Française de Géotechnique, in French, n°69, pp.1- 15.
- Thorel L., Rault G., Garnier J., Murillo C., Gauduchéau P., Néel A., Favraud C., 2008, Mesures en macrogravité sur modèles réduits de structures géotechniques, Bulletin

des Laboratoires des Ponts et Chaussées, n° spécial Instrumentation, in French, in press, 75 p. Le Wikipédia :

- "1851 Great Exhibition: Official Catalogue: Class VI.: William, John and James Garforth".
- Altan, Taylan (2005). Cold and Hot Forging: Fundamentals and Applications. ASM International. ISBN 978-1-61503-094-1. Retrieved 2013-08-13.
- Artizan Club (Great Britain) (1868). A treatise on the steam-engine in its various applications to mines, mills, steam navigation, railways, and agriculture: with theoretical investigations respecting the motive power of heat and the proper proportions of steam-engines, elaborate tables of the right dimensions of every part, and practical instructions for the manufacture and management of every species of engine in actual use. Longmans, Green. p. 301. Retrieved 2013-08-12.
- Boutany (1885). "Who Invented the Steam Hammer?". Engineering News-record. McGrawHill. Retrieved 2013-08-10.
- Brande, William Thomas; Cox, George William (1867). A Dictionary of Science, Literature, & Art: Comprising the Definitions and Derivations of the Scientific Terms in General Use, Together with the History and Descriptions of the Scientific Principles of Nearly Every Branch of Human Knowledge. Longmans, Green and Company. Retrieved 2013-08-12.
- Chomienne, C. (1888). "Notes on Steam Hammers". Railway Locomotives and Cars. Simmons-Boardman Publishing Corporation. Retrieved 2013-08-10.
- Condie (1860). "Condie's Patent Steam Hammer". Post Office Glasgow directory. Glasgow City Council. Retrieved 2013-08-12.
- Cudworth, William (1891). Histories of Bolton and Bowling (townships of Bradford): historically and topographically treated. T. Brear. p. 234. Retrieved 2013-08-12.
- Das, Braja M. (March 2010). Principles of Foundation Engineering. Cengage Learning. ISBN 978-0-495-66810-7. Retrieved 2013-08-12.
- Evans, David (January 2004). Building the Steam Navy: Dockyards, Technology and the Creation of the Victorian Battle Fleet, 1830-1906. Conway Maritime. ISBN 978-0-85177-959-1. Retrieved 2013-08-12.
- "François BOURDON". Archives Départementales numérisées de la Côte d'Or. Retrieved 2013-08-10.
- ""Fritz Let Fly."". The Record. s.n. 1884. p. 15. Retrieved 2013-08-11.
- Grimshaw, William D. (1865). "High-Speed Compressed-Air Hammer". The Mechanics' Magazine and Journal of Engineering, Agricultural Machinery,

Manufactures and Shipbuilding. Robertson,

Brooman, & Company. Retrieved 2013-08-13.

- "Hammers". Scot Forge. Retrieved 2013-08-13.
- Kaushish, J. P. (2010). Manufacturing Processes. PHI Learning Pvt. Ltd. ISBN 978-81-203- 4082-4. Retrieved 2013-08-13.
- Nasmyth, James; Smiles, Samuel (1883). James Nasmyth Engineer: An Autobiography. London: John Murray.
- "Nasmyth steam hammer, c.1850". The Science Museum. Retrieved 2013-08-10.
- "Patent granted to John Hague...for a method of working Cranes, and Tilt-hammers.– Dated August 30, 1827". The Repertory of patent inventions [formerly The Repertory of arts, manufactures and agriculture]. Vol.1-enlarged ser. 1829. p. 274. Retrieved 2013-08-13.
- Patent office (1871). Patents for inventions. Abridgments of specifications. p. 1900. Retrieved 2013-08-12.
- Rajapakse, Ruwan (2011-08-30). Pile Design and Construction Rules of Thumb. Butterworth-Heinemann. ISBN 978-0-08-055916-2. Retrieved 2013-08-12.
- Rajput, R. K. (2007). A Textbook of Manufacturing Technology: Manufacturing Processes. Firewall Media. p. 155. ISBN 978-81-318-0244-1. Retrieved 2013-08-12.
- Rowlandson, T. S. (1875). History of the Steam Hammer: With Illustrations. Palmer and Howe. Retrieved 2013-08-11.
- Sharma, P.C. (2007-01-01). A Textbook of Production Technology: Manufacturing Processes. S. Chand. p. 239. ISBN 978-81-219-1114-6. Retrieved 2013-08-12.
- Tomkins, Edward (1878). Principles of Machine Construction: Being an Application of Geometrical Drawing for the Representation of Machinery. G.P. Putnam's Sons. Retrieved 2013-08-12.
- Venkatramaiah, C (1995). Geotechnical Engineering. New Age International. p. 759. ISBN 978-81-224-0829-4. Retrieved 2013-08-13.
- Vogel, Robert M.; Shayt, David (16 September 1981). "Creusot steam hammer" (PDF). The American Society of Mechanical Engineers. Archived from the original (PDF) on 2008-10-31. Retrieved 2013-08-11.
- "Vulcan Single/Acting Hammers". Vulcan Foundation Equipment. Retrieved 2013-08-13.
- Whitlow, William (23 June 2011). "James Watt and Our World, an exhibition at the Science Museum, London". World Socialist Website. Retrieved 2013-08-11.
- Winton, John G.; Millar, William J. (1883). Modern steam practice, engineering and electricity: a guide to approved methods of construction and the principles relating



thereto, with examples, practical rules, and  
formulae. Gebbie & co. p. 51. Retrieved 2013-08-12.