

Projet de Physique P6
STPI/P6/2015 – 17

Amélioration de la machine de jet de l'an passé



Étudiants :
Louison Boulier
Valentin Cluzel
Chloé Decultot

Adrian Lecoutre
Nicolas Torion
Guillaume Palissiere

Enseignant-responsable du projet :
Didier Vuillamy

Date de remise du rapport : 15/06/2015

Référence du projet : **STPI/P6/2015 – 17**

Intitulé du projet : **Amélioration de la machine de jet de l'an passé**

Type de projet : **expérimental, simulation**

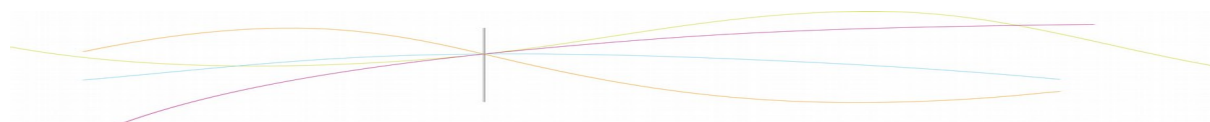
Objectifs du projet (10 lignes maxi) :
Améliorer la machine de jet de l'an passé.

Mots-clefs du projet (4 maxi) : Trébuchet, **machine, physique**

Si existant, n° cahier de laboratoire associé : xxx

Table des matières

Méthodologie, organisation du travail.....	5
Introduction.....	6
Le trébuchet dans l'histoire.....	7
Les armes à torsion.....	7
Les armes à balancier.....	8
Les armes à feu.....	8
Notre machine.....	9
Partie Théorique.....	10
Utilisation des tableurs.....	16
L'intérêt du tableur :.....	16
Les différentes variables.....	16
Détermination de la longueur PA.....	17
Comparaison entre ancien et nouveau modèle :.....	17
Bilan.....	18
Comparaison avec l'ancien modèle et améliorations.....	19
Modèle existant.....	19
Améliorations et modifications.....	19
Résultats.....	22
Montage du trébuchet :.....	24
Conclusion.....	26
Perspectives pour la poursuite de ce projet.....	26
Conclusions sur l'apport personnel de cet E.C. projet.....	27
Bibliographie.....	28

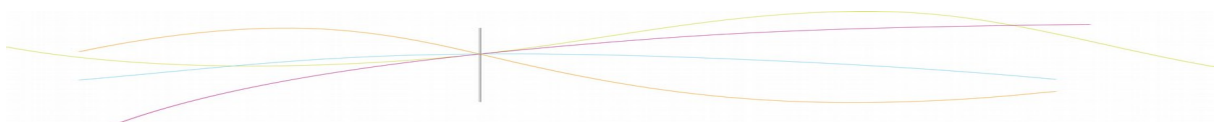


Méthodologie, organisation du travail

Le projet était constitué de deux parties principales : la partie théorique et la partie expérimentale. Pendant la première partie du semestre, nous avons donc effectué, à l'aide de M. Vuillamy, les calculs, qui ont ensuite conduit à la réalisation de la simulation Excel. Nous avons également imaginé le nouveau modèle de trébuchet, en reprenant les plans du projet de l'an dernier. Nous avons par la suite, lors de la deuxième partie du semestre, fabriqué le trébuchet puis réalisé les tests. Enfin, nous avons écrit le rapport en divisant les parties entre les différents membres du groupe.

Toutes ces étapes du projet ont été réalisées par l'ensemble du groupe. La rédaction du rapport a été divisée de la façon suivante :

- Adrian Lecoutre : Introduction, Conclusion, mise en page, photographie
- Louison Boulter : Historique du trébuchet
- Nicolas Torion : Partie théorique sur les calculs
- Valentin Cluzel : Partie théorique sur l'utilisation des tableurs
- Chloé Decultot et Guillaume Palissiere : Description de la partie expérimentale



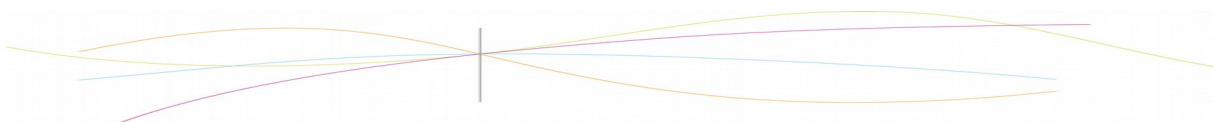
Introduction

Dans le cadre de notre formation ingénieur INSA de deuxième année, nous nous sommes vu recevoir comme sujet de projet de P6 l'**amélioration de la machine de jet de l'an passé**. L'objectif de ce projet était de concevoir un système mécanique permettant de lancer des projectiles en nous appuyant sur nos acquis et nos connaissances en physique mécanique. Le fonctionnement de la machine de jet a donc été basé sur le modèle du trébuchet médiévale, car il semblait offrir le meilleur rendement possible en vue des ressources mises à disposition. Ce projet nécessitant du temps et de la réflexion, les membres du groupe de l'an passé n'ont pas pu terminer intégralement leur œuvre, leur laissant alors ce goût amer d'inachevé en bouche. La suite de cette lourde mission nous a alors été confiée, avec pour objectif de régler les défauts techniques et d'améliorer l'efficacité et le rendement de la machine. Nous avons donc à l'unanimité été enthousiasmé à l'idée de reprendre cette tâche inaboutie, et nous sommes alors promis de fournir le maximum d'énergie et d'efforts dans cette aventure qu'est le projet de P6.

Nous souhaiterions donc dans un premier temps remercier le professeur responsable de notre projet, M. Didier Vuillamy, car sans lui, son énergie, ou son implication hors du commun, la machine de jet n'aurait jamais pu voir la lumière du jour.

Nous remercions également les étudiants du groupe de l'an passé et leur travail sur lequel nous avons pu fortement nous appuyé.

Le rapport est divisé en plusieurs sections : dans une première partie, nous effectuerons un bref résumé historique de l'invention et l'utilisation du trébuchet. Par la suite, nous présenterons la partie théorique de notre travail, avant d'expliquer son application grâce aux tableurs. Nous ferons ensuite une présentation des améliorations proposées en comparant la machine actuelle et le modèle précédent. Enfin, nous présenterons les résultats de nos tests, avant de finir en détaillant la conception du dispositif.



Le trébuchet dans l'histoire

Notre projet présente une dimension historique : il s'agissait pour nous de modéliser puis de fabriquer d'abord une arme de guerre médiévale (un trébuchet) de dimensions réduites, puis une version « inédite » du concept de trébuchet dont le rendement énergétique serait meilleur. Nous avons donc en premier lieu étudié le contexte historique dans lequel se sont développés l'artillerie médiévale en générale, et le trébuchet en particulier. Voici un court rappel historique sur le sujet.

L'artillerie médiévale regroupe toutes les armes lourdes utilisées au Moyen-Âge. Par définition, une arme lourde ne peut pas être transportée par un seul homme et n'est pas faite pour être déplacée au cours d'une bataille. Les premières armes de ce type datent de l'Antiquité, la civilisation grecque et la civilisation romaine utilisaient déjà massivement ce genre d'arme. Cependant, c'est au Moyen-Âge que leur utilisation se généralise et que de nombreuses armes voient le jour : en effet, c'est l'époque des sièges de châteaux et de places fortes. C'est notamment un usage habile et novateur de l'artillerie lourde qui a permis à l'armée du roi Charles VII de mettre fin à la Guerre de Cent Ans.

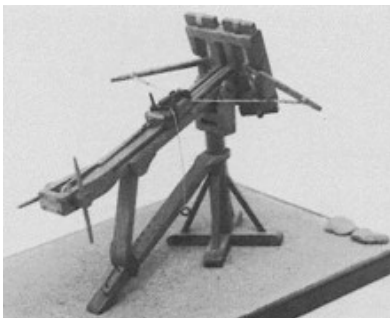
Les armes lourdes présentent une cadence de tir très réduite et une visée approximative, mais peuvent tirer des projectiles très lourds à une grande distance : certains trébuchets pouvaient envoyer des boulets de 140 kg à une portée pouvant atteindre 200 mètres, à raison d'un à deux tirs par heure. Ces caractéristiques font que ces armes sont bien plus utilisées pour abattre des murs d'enceinte que pour atteindre des cibles humaines.

On peut classer l'artillerie médiévale en trois catégories distinctes basées sur leur principe de fonctionnement :

- Les armes à torsion
- Les armes à balancier
- Les armes à feu

Quel que soit le fonctionnement de ces armes, leur but est de libérer brutalement un projectile afin de détruire les fortifications ennemies.

Les armes à torsion



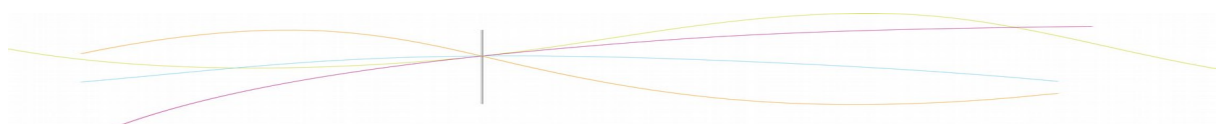
Modèle de baliste

Ces armes utilisent le principe de l'arc : l'énergie emmagasinée par le système provient de la déformation d'un de ses éléments. La torsion de la pièce est assurée par la traction d'une corde, attachée à ses deux extrémités, à l'aide d'un treuil. Ces armes sont rassemblées sous la dénomination de catapulte, mais on peut en distinguer deux variantes, selon le projectile utilisé :

Les catapultes appartenant à la première catégorie tirent des traits, c'est le cas des balistes et des scorpions lourds, dont le fonctionnement s'approche de celui de l'arbalète. Vers la fin du XV^e siècle apparaissent les arbalètes de tour, dont la pièce subissant la torsion est en métal, et non en bois comme

c'était le cas jusqu'alors.

Les catapultes de la seconde catégorie envoient des boulets de pierre : la corde de l'arc agit sur un levier terminé par une cuillère dans laquelle sont posés les projectiles à envoyer. C'est la machine que les Romains connaissaient sous le nom d'onagre. Ce principe fut vite abandonné au début du Moyen Âge à cause du climat occidental plus humide rendant l'entretien de l'arme difficile.



Les armes à balancier

Nous allons de nouveau présenter ces armes selon deux catégories.

Les armes à traction sont la forme la plus primitive d'armement lourd à balancier. Le fonctionnement en est très simple : un projectile est suspendu à l'extrémité d'un balancier fixé à un axe, et un groupe d'hommes tire brutalement sur l'autre extrémité afin de le projeter avec le plus de force possible. On constate qu'ici il n'y a pas forcément d'énergie emmagasinée mécaniquement puis libérée. L'usage de cet arme remonte à plusieurs siècles avant l'ère chrétienne avec la civilisation chinoise, mais la version la plus connue de cette arme est la bricole, dont la traction est facilitée par l'usage d'un contre-poids. Ces armes présentent des performances médiocres et ont été remplacées au début du Moyen-Âge par les armes à balancier de la deuxième catégorie.

Il est cependant à noter que c'est de cette arme que provient l'expression « s'attirer des bricoles » !



Chapiteau de la cathédrale de Carcassonne représentant une bricole. Source : Wikipédia

Le deuxième type d'armes à balancier regroupe des engins de plus grande dimensions, avec un contre-poids plus important. La traction humaine n'est plus utilisée pour lancer le projectile, mais sert pour élever le contre-poids (et donc emmagasiner de l'énergie). Les mangonneaux sont les premières armes de ce type, ils apparaissent au XII^e siècle. Plus tard, on leur associe des roues à carrier, dans lesquelles s'installent un ou plusieurs hommes qui marchent pour lever le contre-poids.

Seulement, ces machines prennent des dimensions si importantes que les vibrations dues à la chute du contre-poids faussent la précision de tirs, et menacent même la stabilité de l'engin.

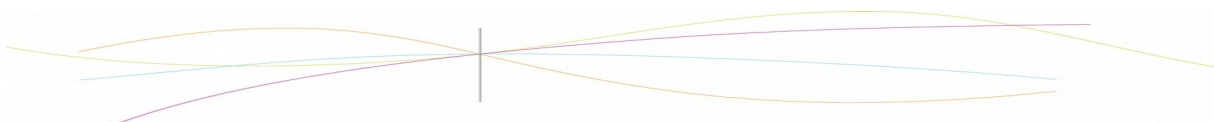
Les ingénieurs (appelés « *engingneurs* » à l'époque) trouvent une astuce qui consiste à articuler le contre-poids par rapport au balancier, ce qui atténue les vibrations. Ce nouveau type d'arme est appelé

trébuchet. Ce modèle sera utilisé du XII^e jusqu'au XVI^e siècle. Cependant, cette arme nécessite l'intervention d'une main-d'œuvre importante et offre une cadence de tir réduite : jusqu'à 60 servants toutes professions confondues sont nécessaires, pour tirer 2 fois par heure !

Un modèle plus compact voit alors le jour : le couillard. Sur cette arme, le contre-poids est divisé en deux de part et d'autre du balancier (d'où le nom), et les dimensions de l'arme sont plus réduites. Quatre à huit hommes suffisent à le faire fonctionner, pour une cadence de tir d'une dizaine de coups par heure. Dans les meilleures conditions, le couillard peut tirer des boulets de 80 kilogrammes à 180 mètres

Les armes à feu

Ces armes sont basées sur l'explosion de poudre à canon. Le principe du canon, très connu, apparaît au XIII^e siècle, en Chine, et les premières bouches à feu voient le jour au XIV^e siècle en Europe. Le principe général est simplement de mettre feu à de la poudre à



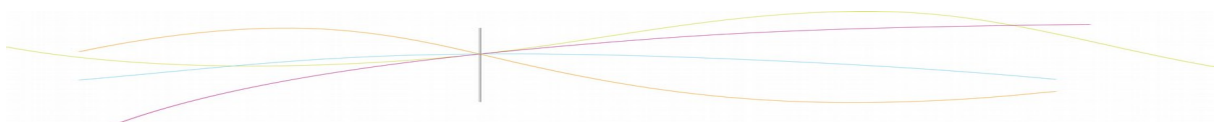
canon dans une chambre cylindrique fermée à une extrémité et qui contient un boulet. Celui-ci est alors projeté par l'autre extrémité. Jean Bureau, Maître d'artillerie du roi Charles VII, préconise l'utilisation de boulets de fer pour remplacer ceux en pierre. Ainsi, le projectile offre une meilleure résistance à l'explosion de la poudre et ne se brise pas dans la maçonnerie, et offre une résistance à l'air plus faible qui limite les déperditions d'énergie.

Paradoxalement, les armes à contre-poids et les armes à feu cohabitent pendant un peu plus de deux siècles. En effet, la poudre à canon est chère à acquérir et les premières bouches à feu étaient dangereuses pour les servants qui les maniaient. Leur développement graduel fait que l'utilisation de ces armes remplace petit à petit les armes de siège à balancier, dont l'utilisation est abandonnée au XVI^e siècle.

Notre machine

L'arme que nous avons fabriquée fait partie de la catégorie des armes à balancier. Ce n'est pas à proprement parler un trébuchet puisque le contrepoids n'est pas articulé, il s'agirait donc plutôt d'une forme compacte de mangonneau. Cependant, le déclencheur et le système de libération du projectile doté d'une goupille que nous avons utilisés ne sont pas caractéristiques du mangonneau.

Notre machine est donc un modèle combiné de différentes armes médiévales, et adapté pour correspondre à nos contraintes techniques. De plus, le second modèle que nous avons étudié, avec un balancier désaxé, ne correspond à aucune réalité historique.



Partie Théorique

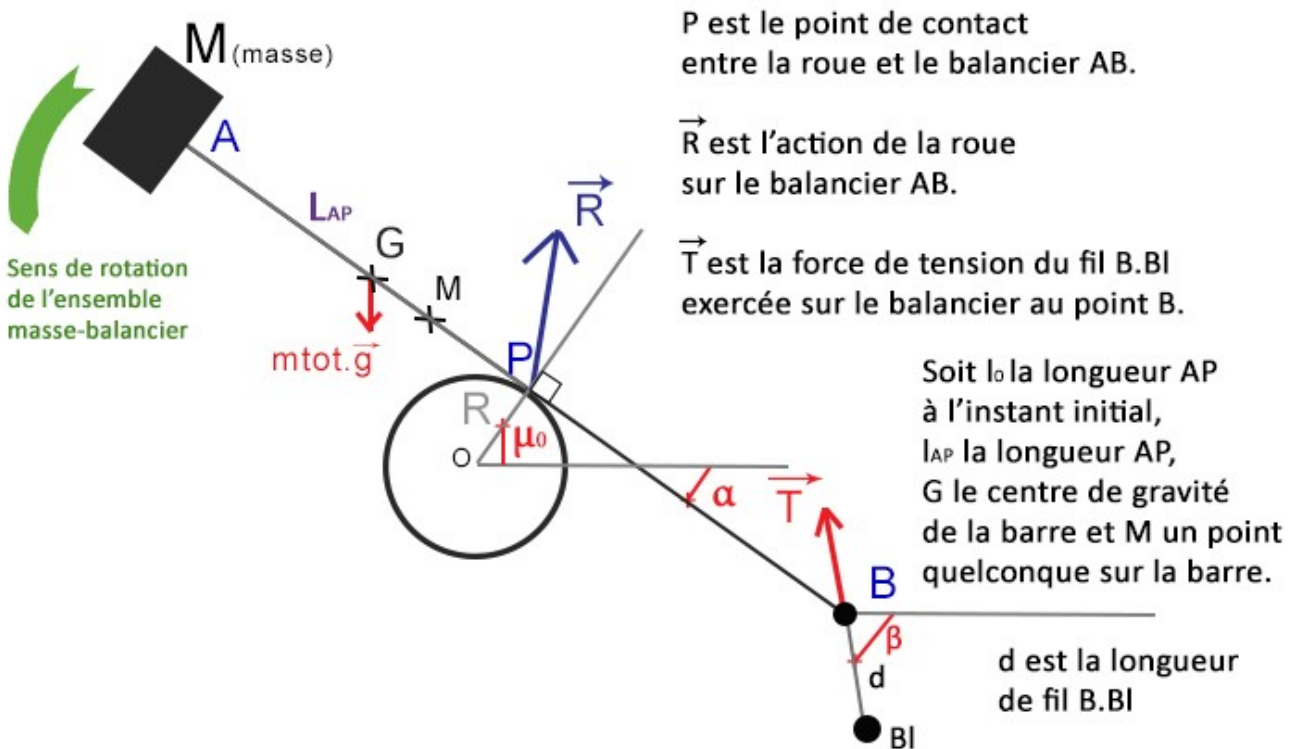
Pour réaliser des simulations en fonction de différents paramètres sous Excel de notre nouveau mécanisme, il a fallu tout d'abord réaliser une étude théorique.

Cette dernière nous a permise de définir totalement le système mécanique et ainsi de déterminer la vitesse et la position du boulet en chaque instant.

Pour commencer cette recherche théorique, on schématise notre nouveau mécanisme en nommant les différents paramètres (angles, longueurs) et en représentant les différentes forces s'appliquant sur le trébuchet.

Toutes les équations s'appuient sur les principes de la mécanique du point (Principe Fondamental de la dynamique, théorème du moment cinétique).

Schéma du trébuchet avec le nouveau mécanisme :



Le but de la recherche à venir est d'exprimer les angles α et β , uniquement en fonction du temps. Nous aurons alors défini totalement le système mécanique.

On remarque tout d'abord qu'il existe une relation entre les angles μ et α :

$$\mu - \alpha = \pi/2 \quad \mu = \alpha + \pi/2$$

D'autre part, la longueur AP, l_{AP} , est dépendante de α :



$$\begin{aligned}
 l_{AP} &= l_0 - R(\mu - \mu_0) \\
 l_{AP} &= l_0 - R(\pi/2 + \alpha - \mu_0) \\
 l_{AP} &= -R\alpha + [l_0 - R(\pi/2 - \mu_0)]
 \end{aligned}$$

On dérive pour obtenir la vitesse de la barre : $\dot{l}_{AP} = -R \dot{\alpha}$

Ensuite, on cherche à déterminer le moment cinétique de la barre AB par rapport à O. Pour cela, on pose l'expression suivante du moment cinétique :

$$\sigma_{\text{Barre AB/O}}^{\vec{}} = \Sigma m \vec{O}\vec{M} \quad \vec{V}_M = \Sigma m (\vec{O}\vec{P} + \vec{P}\vec{M}) \quad \vec{V}_M = \vec{O}\vec{P} \quad \Sigma m \vec{V}_M + \Sigma m \vec{P}\vec{M} \quad \vec{V}_M$$

On détermine la vitesse de M en décomposant le vecteur OM en OP + PA + AM, et on remplace les dérivées de la longueur l_{AP} par la relation trouvée précédemment, on obtient ainsi :

$$\vec{V}_M = \dot{\alpha} (x - l_{AP}) \begin{pmatrix} -\sin \alpha \\ \cos \alpha \end{pmatrix}$$

On en déduit :

$$\Sigma m \vec{P}\vec{M} \quad \vec{V}_M = M \dot{\alpha} l_{AP}^2 - \rho \dot{\alpha} \left(\frac{(l_{AP} - L)^3 - l_{AP}^3}{3} \right) \vec{z}$$

où ρ est la masse linéique de la barre

Enfin, on a : $\vec{O}\vec{P} \quad \Sigma m \vec{V}_M = \vec{O}\vec{P} \quad m_{\text{totG}} \vec{V}_G = m_{\text{totG}} \dot{\alpha} R (l_{AP} - x_G) (\sin \alpha \cos \alpha - \sin \alpha \cos \alpha) = 0$

Et donc, le moment cinétique de la barre AB par rapport à O équivaut à :

$$\sigma_{\text{Barre AB/O}}^{\vec{}} = M \dot{\alpha} l_{AP}^2 - \frac{\rho \dot{\alpha}}{3} ((l_{AP} - L)^3 - l_{AP}^3) \vec{z}$$

On dérive cette relation par rapport au temps, en prenant garde que l_{AP} est une fonction du temps via sa dépendance sur α .

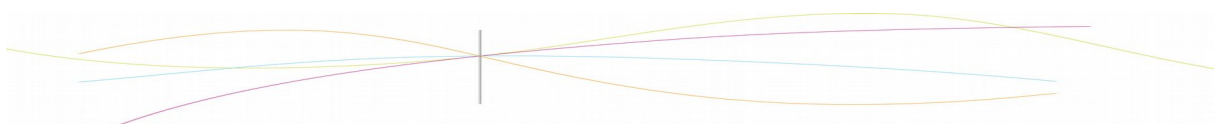
On obtient une relation différentielle d'ordre 2 sur α :

$$\frac{d\sigma_{\text{Barre AB/O}}^{\vec{}}}{dt} = \ddot{\alpha} A_1 + (\dot{\alpha})^2 A_2$$

Avec :

$$\begin{aligned}
 A_1 &= M l_{AP} - \frac{\rho}{3} [(l_{AP} - L)^3 - l_{AP}^3] \\
 A_2 &= -2 M l_{AP} R + \rho R [(l_{AP} - L)^2 - l_{AP}^2]
 \end{aligned}$$

Selon le principe de la mécanique, la dérivée du moment cinétique de la barre AB par rapport à O est égale à la somme des moments des forces appliquées sur la barre. Ici, les



forces appliquées sur la barre AB sont : $m_{tot} \vec{g}$, \vec{R} et \vec{T} .

Ainsi, après calcul des moments de ces forces, on obtient la relation suivante qui fait apparaître les composantes R_x, R_y de la réaction du support \vec{R} , et de celle de l'effort sur le boulet \vec{T}, T_x, T_y :

$$\ddot{\alpha} A_1 + (\dot{\alpha})^2 A_2 = A_3 + R_x A_4 + R_y A_5 + T_y A_6 + T_x A_7$$

Avec :

$$A_3 = -m_{tot} g [-R \sin \alpha + (x_G - l_{AP}) \cos \alpha]$$

$$A_4 = -R \cos \alpha$$

$$A_5 = -R \sin \alpha$$

$$A_6 = -R \sin \alpha + (L - l_{AP}) \cos \alpha$$

$$A_7 = -[R \cos \alpha + (L - l_{AP}) \sin \alpha]$$

Par la suite, on va chercher à exprimer R_x, R_y, T_x et T_y pour n'avoir que des angles dans la dernière relation.

On étudie donc le mouvement du centre de gravité de la barre AB.

On a :

$$\vec{OG} = R \begin{pmatrix} -\sin \alpha \\ \cos \alpha \end{pmatrix} + (x_G - l_{AP}) \begin{pmatrix} \cos \alpha \\ \sin \alpha \end{pmatrix}$$

$$\vec{V}_G = \dot{\alpha} (x_G - l_{AP}) \begin{pmatrix} -\sin \alpha \\ \cos \alpha \end{pmatrix}$$

$$\vec{\gamma}_G = \ddot{\alpha} \begin{pmatrix} A_8 \\ A_9 \end{pmatrix} + (\dot{\alpha})^2 \begin{pmatrix} A_{10} \\ A_{11} \end{pmatrix}$$

Avec :

$$A_8 = -(x_G - l_{AP}) \sin \alpha$$

$$A_9 = (x_G - l_{AP}) \cos \alpha$$

$$A_{10} = -R \sin \alpha - (x_G - l_{AP}) \cos \alpha$$

$$A_{11} = R \cos \alpha - (x_G - l_{AP}) \sin \alpha$$

Selon le principe de la mécanique, on pose l'expression suivante :

$$m_{tot} \vec{\gamma}_G = m_{tot} \vec{g} + \vec{R} + \vec{T}$$

Ce qui nous donne, deux expressions qui vont nous permettre d'exprimer R_x et R_y :



$$m_{tot}(\ddot{\alpha} A_8 + (\dot{\alpha})^2 A_{10}) = R_x + T_x$$

$$m_{tot}(\ddot{\alpha} A_9 + (\dot{\alpha})^2 A_{11}) = -m_{tot}g + R_y + T_y$$

Ainsi, on remplace les expressions de R_x et R_y dans la relation obtenue précédemment et on obtient une nouvelle relation :

$$\ddot{\alpha} B_1 + (\dot{\alpha})^2 B_2 = A_3 + B_3 T_x + B_4 T_y + A_5 m_{tot} g$$

Avec :

$$\begin{aligned} B_1 &= A_1 - m_{tot}(A_4 A_8 + A_5 A_9) \\ B_2 &= A_2 - m_{tot}(A_4 A_{10} + A_5 A_{11}) \\ B_3 &= A_7 - A_4 \\ B_4 &= A_6 - A_5 \end{aligned}$$

Dans l'objectif de déterminer les expressions de T_x et T_y , on s'intéresse maintenant au mouvement du boulet.

On a donc :

$$\begin{aligned} \vec{OB} &= R \begin{pmatrix} -\sin \alpha \\ \cos \alpha \end{pmatrix} + (L - l_{AP}) \begin{pmatrix} \cos \alpha \\ \sin \alpha \end{pmatrix} + d \begin{pmatrix} \cos \beta \\ \sin \beta \end{pmatrix} \\ \text{où } d &\text{ est la longueur du fil} \end{aligned}$$

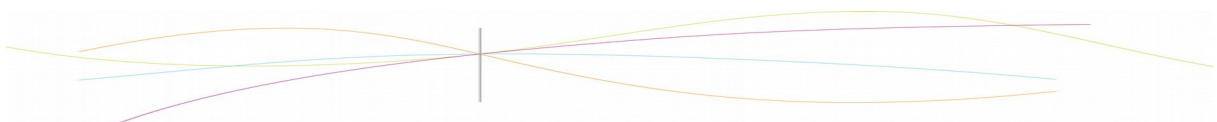
$$\vec{V}_{Bl} = \dot{\alpha} (l_{AP} - L) \begin{pmatrix} \sin \alpha \\ -\cos \alpha \end{pmatrix} + \dot{\beta} d \begin{pmatrix} -\sin \beta \\ \cos \beta \end{pmatrix}$$

$$\vec{\gamma}_{Bl} = \ddot{\alpha} \begin{pmatrix} B_5 \\ B_6 \end{pmatrix} + (\dot{\alpha})^2 \begin{pmatrix} B_7 \\ B_8 \end{pmatrix} + \ddot{\beta} \begin{pmatrix} B_9 \\ B_{10} \end{pmatrix} + (\dot{\beta})^2 \begin{pmatrix} B_{11} \\ B_{12} \end{pmatrix}$$

Avec :

$$\begin{aligned} B_5 &= (l_{AP} - L) \sin \alpha \\ B_6 &= -(l_{AP} - L) \cos \alpha \\ B_7 &= -R \sin \alpha + (l_{AP} - L) \cos \alpha \\ B_8 &= R \cos \alpha + (l_{AP} - L) \sin \alpha \\ B_9 &= -d \sin \beta \\ B_{10} &= d \cos \beta \\ B_{11} &= -d \cos \beta \\ B_{12} &= -d \sin \beta \end{aligned}$$

D'autre part, on a : $m_l \vec{\gamma}_{Bl} = m_l \vec{g} - \vec{T}$. Ce qui nous donne les deux expressions de T_x et T_y :



$$T_x = -m_l(\ddot{\alpha} B_5 + (\dot{\alpha})^2 B_7 + \ddot{\beta} B_9 + (\dot{\beta})^2 B_{11})$$

$$T_y = -m_l(\ddot{\alpha} B_6 + (\dot{\alpha})^2 B_8 + \ddot{\beta} B_{10} + (\dot{\beta})^2 B_{12}) - m_l g$$

On remplace ainsi les T_x et T_y par leurs expressions dans la relation trouvée précédemment :

$$\ddot{\alpha} C_1 + (\dot{\alpha})^2 C_2 + \ddot{\beta} C_3 + (\dot{\beta})^2 C_4 = C_5 \quad \mathbf{1}$$

Avec :

$$C_1 = B_1 + m_l(B_3 B_5 + B_4 B_6)$$

$$C_2 = B_2 + m_l(B_3 B_7 + B_4 B_8)$$

$$C_3 = m_l(B_3 B_9 + B_4 B_{10})$$

$$C_4 = m_l(B_3 B_{11} + B_4 B_{12})$$

$$C_5 = A_3 + g(m_{tot} A_5 - m_l B_4)$$

On va calculer maintenant le moment cinétique du boulet, puis sa dérivée. Ce qui nous permettra plus tard en déterminant la somme des moments des forces appliquées au boulet, d'établir une deuxième relation entre les angles α et β et leurs dérivées comme celle juste au dessus.

On a :

$$\sigma_{BI/O}^{\vec{}} = m_l \vec{O}\vec{M} \quad \vec{V}_I = m_l(\vec{O}\vec{B} + \vec{B}\vec{M}) \quad \vec{V}_I = m_l \vec{O}\vec{B} \quad \vec{V}_I + m_l \vec{B}\vec{M} \quad \vec{V}_I$$

Au final, on obtient :

$$\sigma_{BI/O}^{\vec{}} = m_l \left[\dot{\alpha} \left((L - l_{AP})^2 + d(L - l_{AP}) \cos(\alpha - \beta) \right) + \dot{\beta} \left(-Rd \sin(\alpha - \beta) + d(L - l_{AP}) \cos(\alpha - \beta) + d^2 \right) \right]$$

On dérive :

$$\frac{d\sigma_{BI/O}^{\vec{}}}{dt} = m_l(\ddot{\alpha} D_1 + \ddot{\beta} D_2 + (\dot{\alpha})^2 D_3 + (\dot{\beta})^2 D_4)$$

Avec :

$$D_1 = (L - l_{AP})^2 + d(L - l_{AP}) \cos(\alpha - \beta)$$

$$D_2 = Rd \sin(\beta - \alpha) + d(L - l_{AP}) \cos(\alpha - \beta) + d^2$$

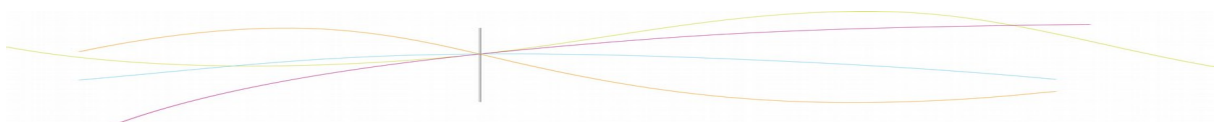
$$D_3 = 2(L - l_{AP})R + Rd \cos(\alpha - \beta) - d(L - l_{AP}) \sin(\alpha - \beta)$$

$$D_4 = Rd \cos(\alpha - \beta) + d(L - l_{AP}) \sin(\alpha - \beta)$$

On calcule la somme des moments des forces appliquées sur le boulet et on obtient :

$$\ddot{\alpha} m_l D_5 + \ddot{\beta} m_l D_6 + (\dot{\alpha})^2 m_l D_7 + (\dot{\beta})^2 m_l D_8 - m_l D_9$$

Avec :



$$D_5 = \begin{pmatrix} B_{13} \\ B_{14} \end{pmatrix} \wedge \begin{pmatrix} B_5 \\ B_6 \end{pmatrix}$$

$$D_6 = \begin{pmatrix} B_{13} \\ B_{14} \end{pmatrix} \wedge \begin{pmatrix} B_9 \\ B_{10} \end{pmatrix}$$

$$D_7 = \begin{pmatrix} B_{13} \\ B_{14} \end{pmatrix} \wedge \begin{pmatrix} B_7 \\ B_8 \end{pmatrix}$$

$$D_8 = \begin{pmatrix} B_{13} \\ B_{14} \end{pmatrix} \wedge \begin{pmatrix} B_{11} \\ B_{12} \end{pmatrix}$$

Cette somme est égale à la dérivée du moment cinétique du boulet, ce qui nous donne la seconde relation entre les angles α et β et leurs dérivées :

$$\ddot{\alpha}(D_1 - D_5) + \ddot{\beta}(D_2 - D_6) + (\dot{\alpha})^2(D_3 - D_7) + (\dot{\beta})^2(D_4 - D_8) = -D_9 \quad 2$$

Cette seconde relation définit totalement le système mécanique.

La résolution numérique

On emploie la méthode de résolution de Runge Kutta d'ordre 4.

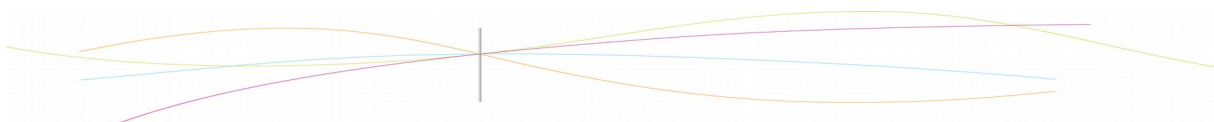
On pose $X_1 = \alpha$, $X_2 = \beta$, $X_3 = \dot{\alpha}$, $X_4 = \dot{\beta}$.

Alors :

$$\dot{X}_1 = \dot{\alpha} = X_3$$

$$\dot{X}_2 = \dot{\beta} = X_4$$

\dot{X}_3, \dot{X}_4 sont $\ddot{\alpha}, \ddot{\beta}$ et sont donnés par les relations 1 et 2 de la mécanique.



Utilisation des tableurs

L'intérêt du tableur :

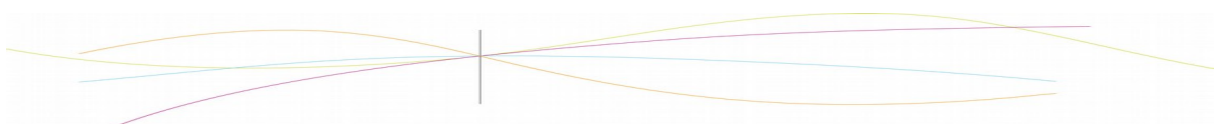
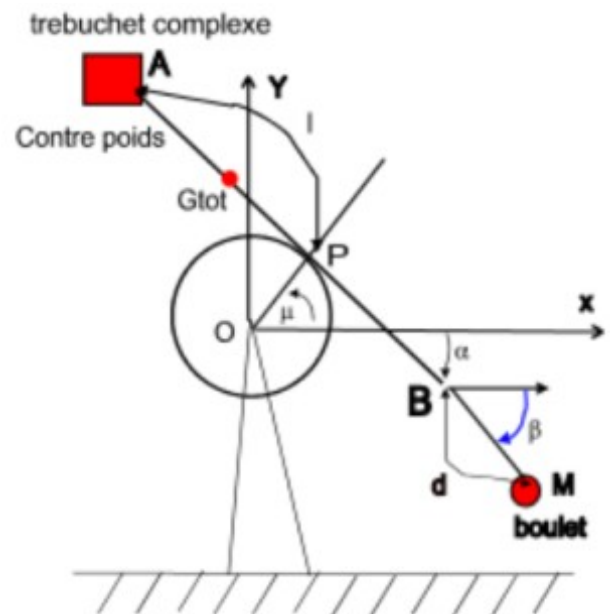
La phase de travail théorique nous a conduit à des relations cinématiques et mécaniques complexes reliant les différentes variables du système. En injectant ces relations dans un tableur, nous pouvons arriver à une résolution numérique. Cette résolution nous permet ensuite de prévoir, selon les valeurs choisies pour les variables, les évolutions de l'énergie, de la portée, ou du rendement énergétique entre autres au cours d'un lancer. Et ces évolutions vont nous permettre de savoir quelle valeur choisir pour chaque variable.

Cette phase d'utilisation du tableur est donc primordiale. Elle nous permet en effet de déterminer la valeur théorique optimale pour chaque variable. Pour ce faire, il suffit de changer les variables entre chaque test et de comparer les valeurs théoriques de portée (notre objectif étant de lancer le plus loin possible un projectile) en lançant la simulation. Cela nous évite de faire une grande quantité d'essais avec le trébuchet, ce qui prendrait plus de temps, et serait plus coûteux (car il faudrait posséder plusieurs fois la même pièce avec des dimensions différentes). On peut ensuite, au moment de passer à la phase pratique et à la mise en action du trébuchet, aller droit au but, avec du matériel directement dimensionné de manière optimale.

Cette phase d'utilisation des tableurs nous a également permis de comparer le modèle de trébuchet de l'an passé (avec un balancier qui exécute une rotation simple autour d'un axe de rayon nul) et le nouveau modèle (avec un balancier qui s'enroule autour d'un axe de rayon important). Ainsi, on a pu vérifier que ce nouveau modèle était théoriquement mieux que l'ancien.

Les différentes variables

X1=Alpha (en degré)	-45
X2=Beta (en degré)	-90
X3=d(Alpha)/dt (en degré/s)	0
X4=d(Beta)/dt (en degré/s)	0
T init	0
T final	2
dt, pas de temps	
d'intégration	0,01
M masse du contrepois	10
mb1, masse boulet	0,3
G0, gravité	9,81
L, longueur du balancier, distance AB	2
lap0 (distance PA)	0.85
d (longueur de la corde d'attache du boulet)	0,5
Ro, masse linéique de la barre, kg/m	1
R, rayon du cylindre	0,12



Ce tableau (en jaune), regroupe l'ensemble des variables que l'on peut changer avant de lancer la simulation. Parmi ces paramètres, de nombreux ont été fixés pour des raisons pratiques. C'est le cas de la masse M du contrepoids (10 kg) qui a été choisie pour être à l'échelle de notre trébuchet, d'une taille restreinte. De même, la longueur L du balancier (2 m) n'a pas réellement été choisie. Le trébuchet étant fabriqué avec du matériel de récupération, il s'est avéré que nous avons une pièce de bois de deux mètres pour faire office de balancier. Celle-ci étant parfaitement adapté à la taille de notre machine, nous avons décidé de ne pas la modifier. De plus, la masse linéique de cette barre est de un kilogramme par mètre. La longueur de la corde (une cinquantaine de centimètres), a été choisie pour des raisons pratiques également. Il ne fallait pas qu'elle soit trop longue, pour ne pas frotter trop longtemps au sol au moment du lancer. Enfin, le cylindre est une petite roue de vélo récupérée, dont on n'a pas non plus choisi les dimensions du rayon (0,12 m).

Pour la masse m_{bl} du projectile, on a décidé de la faire varier pendant la phase pratique (nous avons plusieurs ballons de masses différentes).

Finalement, il ne reste qu'une variable à déterminer pour que notre modèle soit optimal : la longueur PA , entre le contrepoids et le point de contact avec le cylindre.

Détermination de la longueur PA

Pour déterminer la longueur PA qui serait la meilleure, il suffit alors de réaliser plusieurs simulations, en modifiant à chaque fois cette dernière. On gardera la valeur qui a permis d'obtenir la meilleur portée théorique.

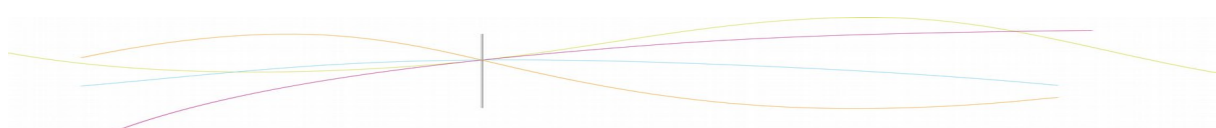
Cas	Alpha	Beta	d(Alpha)/dt	d(Beta)/dt	M	m_{bl}	L	PA	d	Ro	R	Portée	rendement
1	-45	-90	0	0	10	0,5	2	0,7	0,5	1,00	0,120	16,5324187	0,0594502
2	-45	-90	0	0	10	0,5	2	0,8	0,5	1,00	0,120	18,1054986	0,05840636
3	-45	-90	0	0	10	0,5	2	0,85	0,5	1,00	0,120	18,3302599	0,05728172
4	-45	-90	0	0	10	0,5	2	0,9	0,5	1	0,12	18,1602289	0,05477701
5	-45	-90	0	0	10	0,5	2	1	0,5	1,00	0,120	17,0145999	0,04909461
								On fait varier la distance PA				La portée et le rendement varient	

En faisant varier la distance PA , nous obtenons une variation de portée et de rendement. Or, en ne s'intéressant qu'à la portée, on observe que celle-ci est maximale pour une longueur PA de 85 centimètres. Nous avons donc réaliser nos essais de trébuchet avec cette longueur, qui permet d'obtenir le pic théorique de portée.

Comparaison entre ancien et nouveau modèle :

Cette simulation nous permet enfin de comparer de manière théorique les deux modèles de trébuchets. Cette comparaison va confirmer ou non notre hypothèse que notre nouveau modèle est plus efficace.

Pour cela, il suffit juste de changer la variable R , le rayon du cylindre. En effet, il



suffit de mettre un rayon presque nul pour simuler le balancier du modèle de l'an passé. Cette simulation nous permet d'obtenir la comparaison suivante :

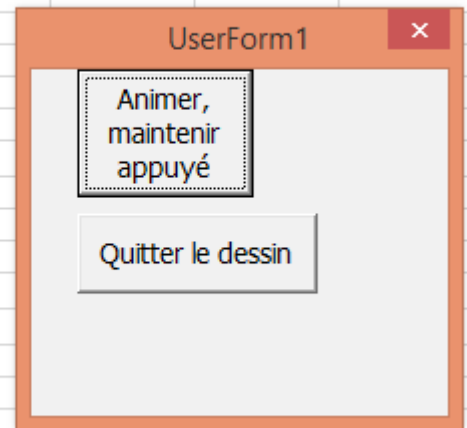
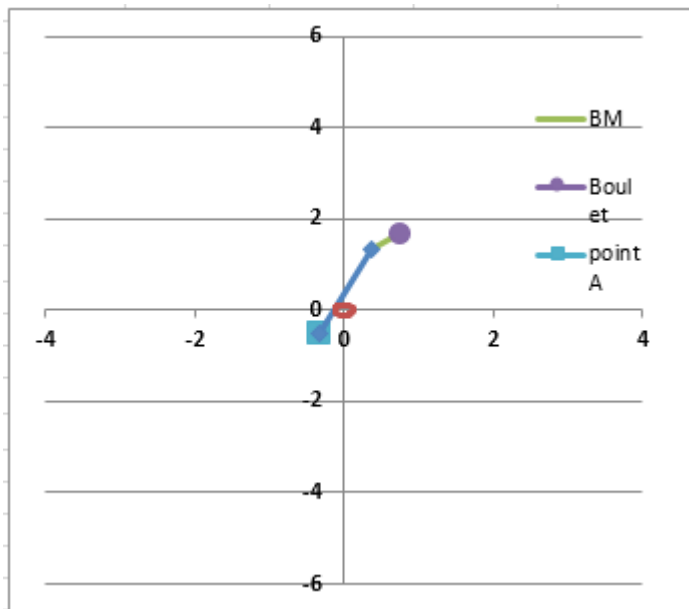
Cas	Alpha	Beta	d(Alpha)/dt	d(Beta)/dt	M	mbl	L	PA	d	Ro	R	Portée	rendement
1	-45	-90	0	0	10	0,5	2	0,85	0,5	1,00	0,120	18,3302599	0,05728172
2	-45	-90	0	0	10	0,5	2	0,85	0,5	1,00	0,010	13,751331	0,0346017

En modifiant R, on obtient une meilleure portée et un meilleur rendement

Dans le cas 1, on a pour un rayon de 12 centimètres une portée de plus de 18 mètres et un rendement de 5,7 %. Dans la cas 2, avec un rayon de 1 centimètre, on obtient une portée de 13,75 mètres et un rendement de 3,5 %. Théoriquement, notre nouvelle version du trébuchet nous permet donc d'obtenir une portée bien meilleure, tout en augmentant sensiblement le rendement. Nous n'aurions pas pu arriver à cette conclusion sans l'utilisation de tableurs

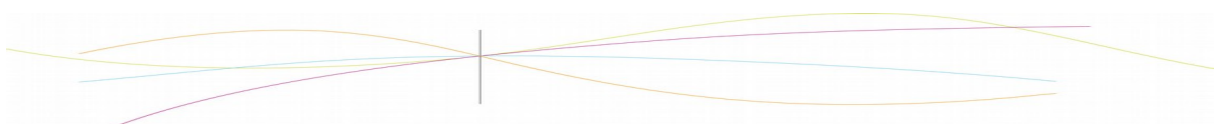
Bilan

Finalement, l'utilisation de tableurs est primordiale. Cela permet la résolution de calculs complexes de manière très rapide et efficace. Cette phase de travail nous a permis de fixer les variables du système pour un lancer optimal. Elle nous a également permis de confirmer notre hypothèse, sur notre deuxième modèle plus efficace que l'ancien. De plus, la simulation nous permet d'observer la position du trébuchet à chaque instant, et nous montre le meilleur moment où lâcher le projectile. La valeur de la portée était maximale pour un lancer à cet instant précis :



Il a donc fallu prévoir un système pour délivrer le projectile au plus proche de cet instant.

L'utilisation essentielle des tableurs marquait la fin de la phase théorique. Nous pouvions alors passer aux essais du trébuchet. On peut noter que, si le nouveau modèle de trébuchet ne nous a pas permis d'améliorer nos lancers pour diverses raisons, nous avons atteint presque 12 mètres avec l'ancien modèle. Ce résultat confirme la bonne précision de nos résultats théoriques.

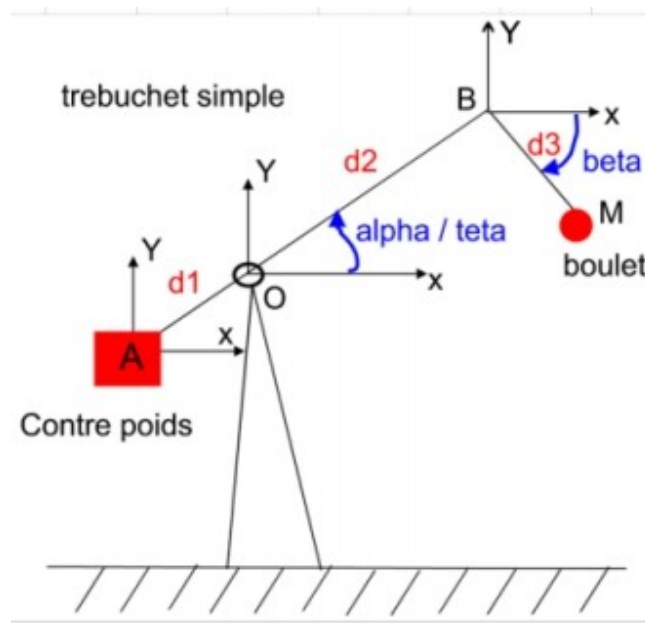


Comparaison avec l'ancien modèle et améliorations

Modèle existant

L'an passé, un autre groupe d'élèves de deuxième année avait déjà eu affaire à ce projet physique qu'est l'étude et la modélisation d'une machine de jet. En s'inspirant des armes de sièges médiévales, ils avaient dû choisir entre plusieurs de ces machines la quelle serait la plus intéressante à étudier, tout en prenant en compte la faisabilité de la réalisation concrète d'un tel engin. Après plusieurs séances, leur choix se porte sur le trébuchet, utilisant le principe du levier, c'est à dire de la conservation de l'énergie cinétique et de l'énergie potentielle de pesanteur pour projeter des objets à une distance importante par rapport à la taille de la machine.

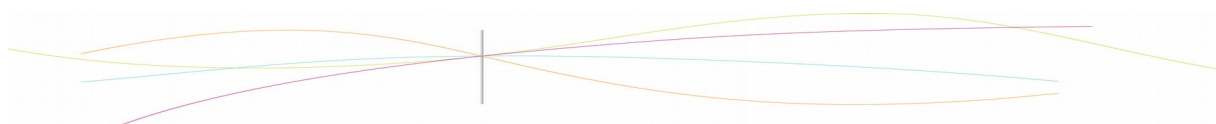
Ils ont donc réalisé un trébuchet classique, composé d'une base, d'une poutre principale dans l'axe du lancer, d'un contrepoids et d'un projectile. En voici un schéma simplifié :



Améliorations et modifications

En nous basant sur ce modèle préexistant nous avons entrepris d'améliorer ce trébuchet. Tout d'abord il est important de comprendre ce que nous entendions par « améliorer ». En effet le but premier d'un trébuchet est d'envoyer un projectile non seulement à de grande distance, mais aussi avec le plus d'énergie possible, c'est à dire avec le meilleur rendement possible entre la distance maximale à laquelle on peut lancer en fonction de son poids et de la masse en contrepoids. En effet notre but n'était donc pas de modifier le trébuchet pour produire une machine de jet envoyant des projectiles plus loin, mais plutôt de les envoyer le plus loin possible en utilisant un minimum d'énergie.

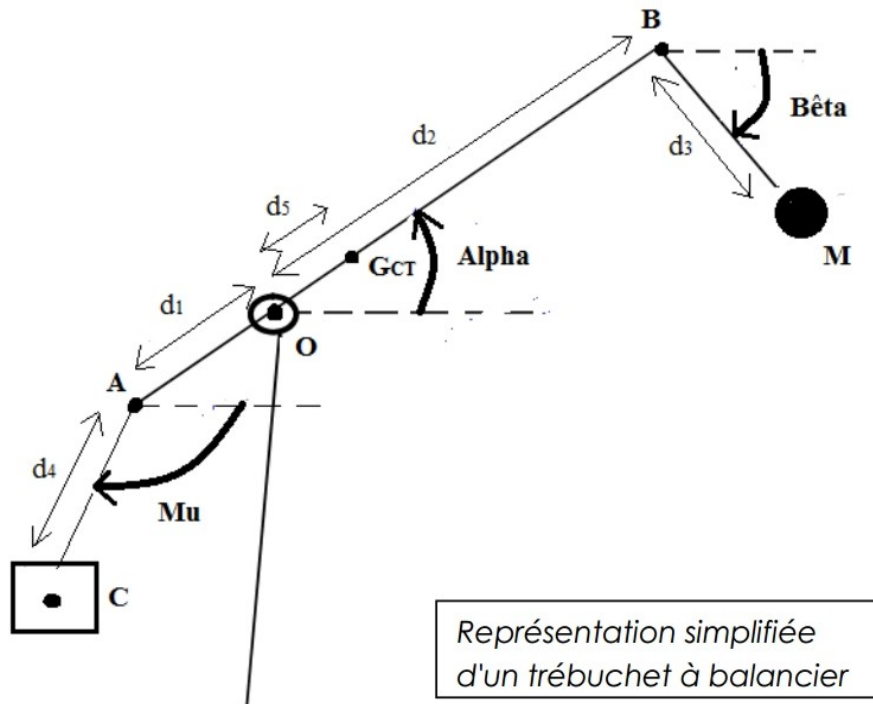
Dans cette optique nous avons tout d'abord réduit les dimensions du trébuchet originel, afin de pouvoir plus facilement nous procurer les différents éléments dont nous pourrions



avoir besoin sans trop se soucier de devoir les trouver à une échelle déraisonnable. L'envergure du trébuchet passe donc de 2M de hauteur à 1M.

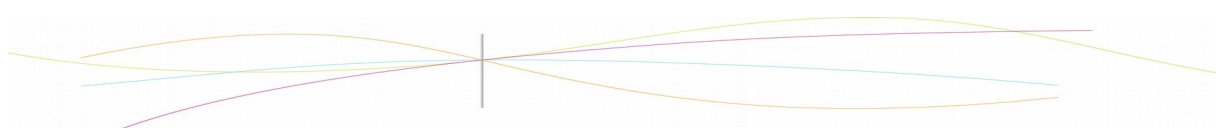
Une fois cela fait nous avons eu plusieurs idées ; la première d'entre elle a été de rajouter un mouvement de balancier au contrepoids. En effet après diverses recherches nous avons constaté que la plupart des trébuchets de siège , pour ne pas dire presque tous étaient conçus avec un balancier. L'utilisation d'un contrepoids fixe dans le prolongement du mât, qui passe de l'horizontale à la verticale avec un déplacement irrégulier et brusque de la charge, influe défavorablement sur la précision du tir et sur la conservation et la transmission de l'énergie de pesanteur à la verge.

Cette modification était très facilement réalisable mais ne changeais pas assez significativement le rendement de la machine, c'est pourquoi nous avons cherché d'autres pistes.

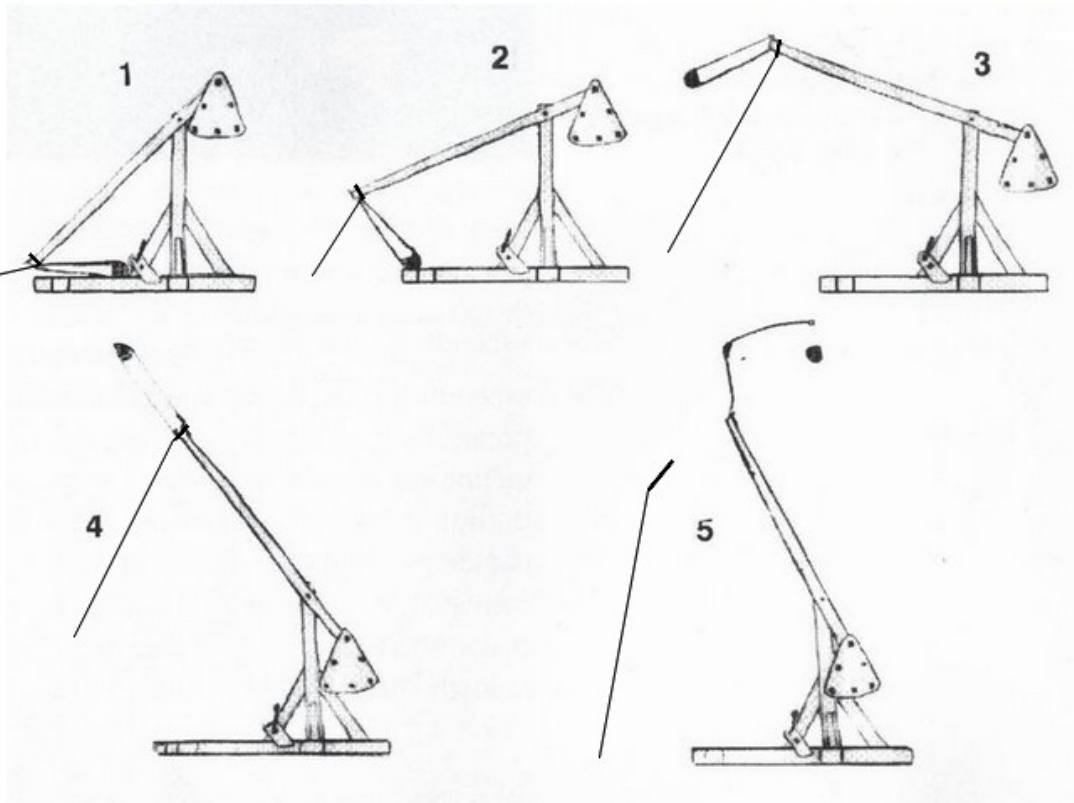


Nous avons donc eu une autre idée, celle de faire glisser le fléau à terre avant le lancé. En effet dans la version antérieure , le projectile reposait sur le sol, ce qui créait un à-coup lorsque le fléau entra en tension avec la poutre , et ceci avait souvent pour conséquence de déclencher involontairement le dégoupillage du sac qui retient le projectile. Il en résulte que le projectile n'a presque pas le temps de quitter le sol et roule vers l'arrière sur quelques centimètres. Nous avons donc pensé à un nouveau système qui permettrait une transmission de l'énergie plus fluide, et c'est ainsi que nous avons utilisé un rail disposé sur la base du trébuchet. Le fléau peut ainsi glisser le long du rail dès la mise en mouvement de la verge.

Ensuite nous nous sommes entrepris d'améliorer le système de dégoupillage du fléau afin de pouvoir mieux gérer le moment auquel le projectile pourrait se désolidariser de la machine et donc d'avoir la portance optimale. Ainsi nous avons pensé à utiliser une goupille reliée à une corde. En fixant la corde a un endroit nous pouvions savoir exactement quand le projectile allait être relâché en fonction de la longueur de corde que nous laissions libre. En faisant passer la goupille par le bas , elle retenais la partie inférieure de la cordelette relié au sac contenant le projectile.



Sur le schéma on voit bien que grâce à ce système la goupille n'est relâchée que lorsque l'angle entre la verge et la corde est orthogonal, permettant de retirer la goupille avec le minimum d'efforts transversaux.

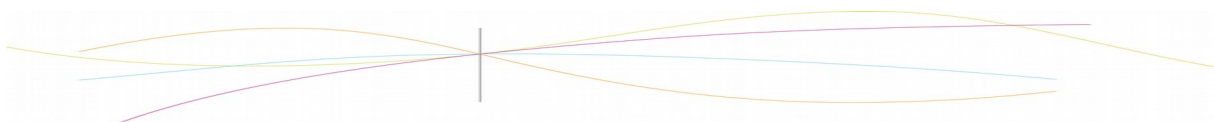


Enfin nous avons imaginé un système qui pourrait permettre d'effectuer un mouvement plus ample à la poutre pour avoir le temps de transmettre plus d'énergie au projectile. C'est ainsi que nous avons eu l'idée d'excentrer l'axe de la verge par rapport à la barre qui joignait le battis et la verge. Nous voulions que l'arbre de transmission se déplace sur un disque qui lui serait fixe par rapport au battis, induisant une rotation supplémentaire et augmentant le rendement de manière significative. Néanmoins nous avons fait face à plusieurs problèmes techniques quand à la réalisation de ce système. En effet il se posait plusieurs problèmes ; comment être sûr que la verge aller s'enrouler autour de la roue et ne pas glisser le long de celle-ci ? Et une fois sa rotation effectuée, quel serait le système empêchant cette même verge de se désolidariser du battis ?

Dans un premiers temps nous voulions utiliser un système d'engrenages en prenant pour roue un disque cranté comme ceux présent sur les vélos et ainsi fixer une chaîne de vélo sur la verge qui lors de la rotation viendrait obligatoirement se fixer dans les cran du disque et empêcherait tout glissements entre les deux lors de la rotation. Cependant le fait que la verge soit une poutre droite et non arqué posait problème, cela induisait un décalage entre la chaîne et le disque, et en aurais résulté des frottements très importants.

Enfin nous avons tout simplement utilisé une roue avec un pneu en caoutchouc sans chambre à air. En effet la forme convexe de la roue permettait à la verge de se caler dedans comme une sorte de rail et le caoutchouc du pneu étant très adhérent la verge ne glissait pas ou très peu sur la roue. Nous avons donc un modèle théorique très prometteur avec un rendement supérieur à celui de la machine de jet originel.

Après plusieurs ajustements, notamment pour bien fixer la roue sur l'axe du battis et



l'axe sur le battis, qui était précédemment conçu pour pouvoir entrer en rotation presque sans efforts, nous avons commencé les tests.

Premièrement une série de tests avec le trébuchet simple pour vérifier que la modification de l'échelle n'a pas trop influé sur le rendement.

Résultats

Série de test 1 : modèle utilisé l'année dernière (point de rotation fixe)

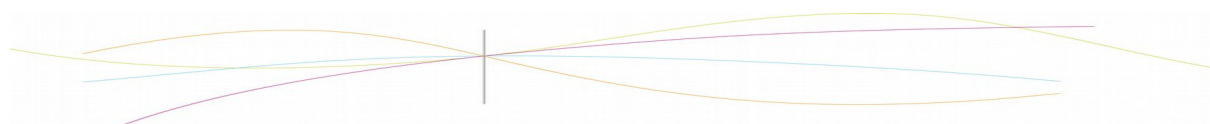
Numéro de test	Contrepoids (en kg)	Poids (en g)	Portée (en m)	Explications
1	10	500	0	Lâcher trop tôt. Le projectile est parti à la verticale
2	10	500	/	Problème avec le système de lâché du projectile. Celui-ci est parti à l'arrière
3	10	500	9	
4	10	500	11.20	
5	10	400	10	
6	10	400	9.8	
7	10	400	10.2	
8	16	400	/	Le contrepoids était trop lourd et s'est séparé de la verge
9	10	400	11	

Précédemment , avec 330g de masse de projectile et 10kg de contrepoids, l'ancien trébuchet affichait entre 10 et 12 mètres de portée , et 17 avec un contrepoids de 20kg. La raison pour laquelle nos résultats sont si proche des anciens malgré la réduction de la longueur de la verge est que notre système de goupille permet de délivrer le projectile au point ou l'angle est optimal, entraînant des lancers plus performants.

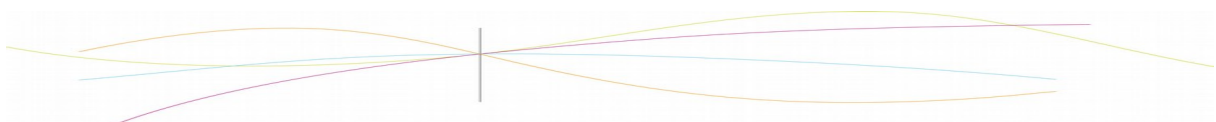
Après le test raté avec un contrepoids de 16kg, nous avons décidé de garder un contrepoids de 10kg pour le reste des tests.

Série de test 2 : nouveau modèle avec point de rotation mobile

Numéro de test	Contrepoids (en kg)	Poids (en g)	Portée (en m)	Explications
1	10	900	2	Roue de vélo mal fixée, elle a tourné
2	10	900	1.5	Barre non correctement fixé : elle a tourné
3	10	900	5	Lâché trop tard
4	10	900	7	
5	10	900	3	
6	10	500	3	Lâché trop tôt
7	10	500	4	Lâché trop tard



Les résultats de ces lancers sont moins différents pour plusieurs raisons. Premièrement le fait que la verge repose simplement sur la roue entraînait parfois des mouvements parasites transversaux qui perturbaient le lancé ou encore modifiait quelque peu la distance de corde à prendre pour le dégoupillage. Néanmoins nous obtenons tout de même un lancé à 7 mètres avec un projectile deux fois plus lourd que précédemment ,et avec le même contrepoids, ce qui démontre l'efficacité de ce montage quand à la transmission de l'énergie.



Montage du trébuchet :

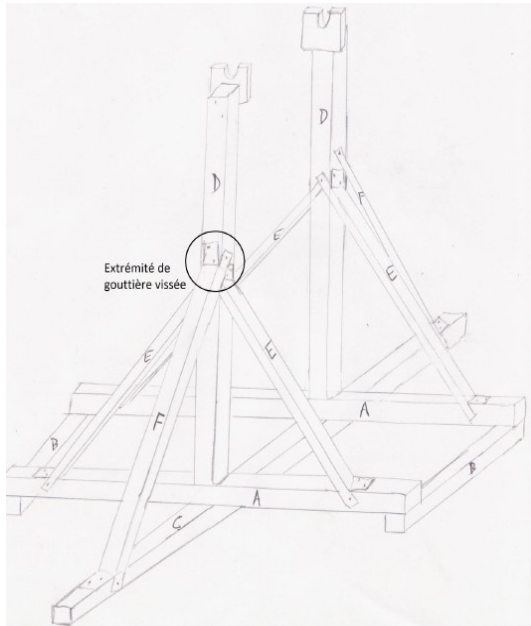


Illustration 1: Schéma de montage de la base du trébuchet

Nous avons repris le modèle de trébuchet de l'année passée dans le but de l'améliorer. Nous avons donc gardé sa structure. Cependant le trébuchet que nous avons construit est moitié moins grand que le précédent. Les poutres que nous avons utilisées étaient donc deux fois moins longues.

Pour les deux modèles différents, la base de notre trébuchet est la même. Ce sont seulement les axes de rotations qui diffèrent.

Pour le premier modèle, nous avons repris la pièce servant à faire tourner le fléau. Cependant, pour le fléau lui-même il nous a fallu trouver un moyen d'éviter qu'il ne casse comme l'an dernier. Pour cela, nous avons pris une poutre en bois que nous avons glissé dans le support métallique qui sert à le faire tourner. Nous avons solidifié le tout à l'aide de cales en bois. Nous avons placé à chaque extrémité du fléau une pièce métallique, l'une

pour porter le contrepoids et l'autre pour le système de déclenchement.

Nous avons cependant modifié le système de déclenchement par rapport à celui de l'année dernière qui ne semblait pas marcher excellemment. Nous avons utilisé une goupille que l'on tirait au bon moment. Pour cela, il nous a fallu trouser une des extrémités du fléau, l'autre servant à accrocher le contrepoids. Nous avons utilisé une poche en tissu de montgolfière pour notre projectile.

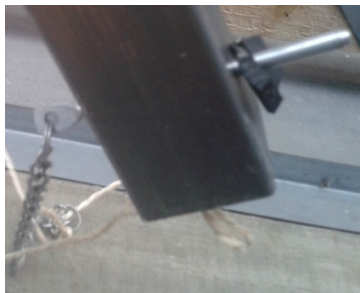


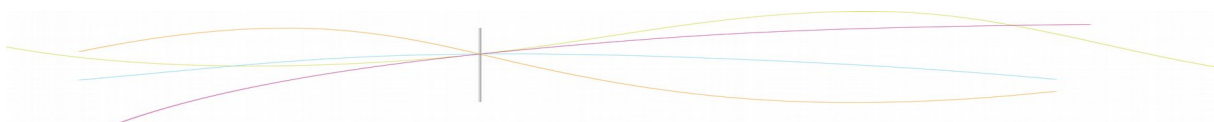
Illustration 2: Système de déclenchement avec la goupille



Illustration 3: Contrepoids sans les poids



Illustration 4: Poche



Voici donc le premier modèle, prêt à démarrer :



Pour le deuxième modèle, nous avons utilisé une roue de vélo sur laquelle nous avons fixé une chambre à air un peu dégonflée pour créer des frottements et ainsi éviter que le fléau ne glisse. Après quelques test, il nous a fallu fixer à l'aide d'une vis cette roue sur la barre car elle tournait. Nous avons également dû fixer les deux cotés de la tige en métal soutenant la roue aux deux cotés de la base. Pour cela, nous avons utilisé des cales en bois.



Illustration 5: Modèle numéro 2

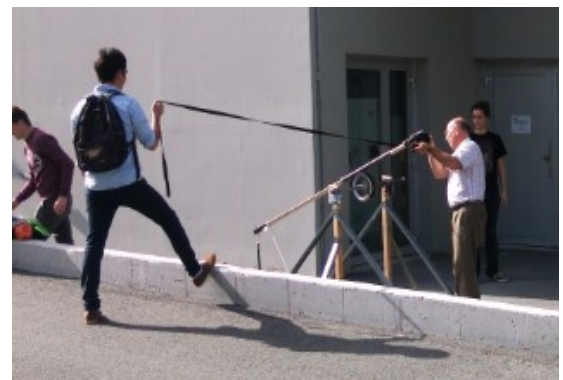
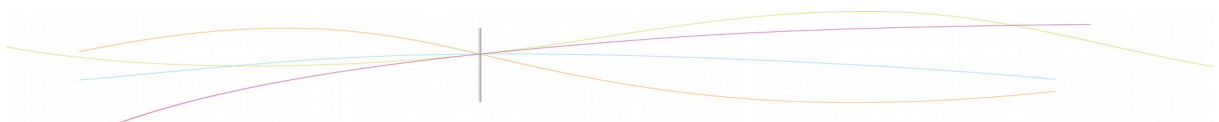


Illustration 6: Trébuchet modèle numéro 2 prêt à lancer



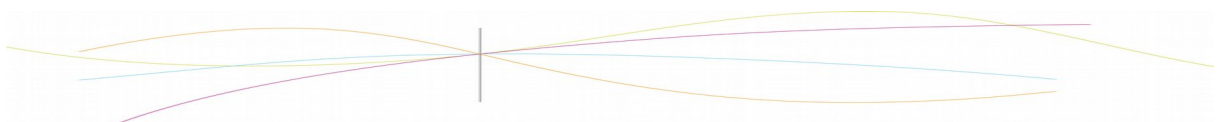
Conclusion

En conclusion, nous pouvons dire que ce projet de P6 a été un relatif succès. Tout d'abord sur le plan théorique, nous avons pu trouver une nette amélioration grâce au nouveau système. Mais aussi sur la pratique, malgré le fait que certains résultats aient été peu concluants, nous avons démontré que les perspectives d'évolution étaient encore nombreuses. La théorie et la pratique se rejoignent difficilement, et cela est probablement dû aux imprécisions sur le montage et le matériel qui se font beaucoup plus ressentir lorsqu'elles agissent sur un modèle très réduit de machine. Cependant, en comparant au projet de l'an passé, on peut voir une nette amélioration des résultats.

Le projet de P6 a su mettre en application nos connaissances et notre travail d'équipe pour mener à bien notre mission. Même si le temps nous a encore une fois fait défaut, nous ressortons grandit de cette expérience. C'est donc avec un léger pincement au cœur que nous transmettons le flambeau au groupe de P6 de l'an prochain, qui nous l'espérons, arriveront au bout de leurs attentes et auront tout le plaisir que nous avons pu ressentir au cours de ce semestre.

Perspectives pour la poursuite de ce projet

- Le trébuchet avec notre nouveau mécanisme peut encore être amélioré. En effet, comme cela a pu être constaté lors des essais, le système de rotation du balancier autour d'un cercle doit être encore amélioré pour obtenir de bons lancers. Lancers qui devraient en théorie, être plus importants que ceux effectués avec l'ancien mécanisme.
- Le système de dégoupillage peut lui aussi être amélioré.
- Un système de déclenchement à distance pourrait également être rajouté.



Conclusions sur l'apport personnel de cet E.C. projet

Chloé

Pour moi ce projet fut très positif. Il est en effet agréable de pouvoir mettre en pratique ce que nous avons vu en mécanique du point. De plus, les machines de guerre médiévales m'ont toujours fascinée et en voir une, bien que de dimensions réduites, fonctionner devant moi m'a paru être une fin digne de notre projet. D'autre part, le travail de groupe s'est très bien déroulé et je tiens à remercier M. Vuillamy pour son aide très précieuse lors de ce projet.

Louison

Ce projet P6 s'inscrit en fin de cursus STPI, il est le plus concret que nous ayons eu à mener à bien, après un projet Maths et un projet Informatique au Semestre 3. Le projet « amélioration d'une machine de jet » était prometteur : une équipe de 6 personnes qui se donne pour but, sur le long terme, d'améliorer une reconstitution de machine de guerre précédemment développée par des camarades insaïens. Ce projet nous a permis d'employer nos compétences dans divers domaines : les connaissances de mécanique acquises pendant nos deux années de STPI, la réflexion sur des solutions à des problèmes techniques et pratiques, l'organisation de travail pour un groupe relativement important. Nous avons aussi dû remettre continuellement en question notre travail pour améliorer notre machine dans les délais et avec les moyens qui nous étaient impartis. Nous avons ainsi eu à accomplir des tâches variées, seuls, en petits groupe voire avec l'équipe entière. Ce projet a donc été une expérience très instructive, mais surtout très plaisante !

Je tiens à remercier tout particulièrement M. Vuillamy, qui s'est beaucoup investi avec nous dans ce projet, et dont l'aide et les conseils ont été primordiaux pour la réussite de notre entreprise.

Nicolas

Ce projet fut pour moi une expérience très enrichissante. En effet, que ce soit lors de l'étude théorique, de la recherche de solutions techniques ou lors du montage du trébuchet, le travail de groupe m'a beaucoup apporté.

J'ai pu comprendre l'efficacité qu'avait un groupe de personnes face à un problème quelconque.

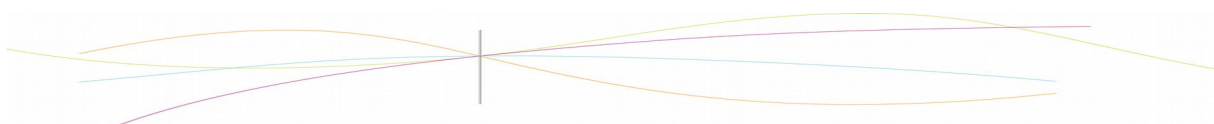
Je tiens à remercier M. Vuillamy pour son aide indispensable à notre projet lors de ce semestre.

Valentin

Ce projet était très enrichissant et nos impressions finales sont très positives. On a pu, tel des ingénieurs, à partir d'une idée, suivre toute l'évolution et l'avancement d'un projet, jusqu'à la production. Ce projet était en effet particulièrement complet : il a fallu réaliser des recherches théoriques avant une partie purement expérimentale. De plus, le travail de groupe s'est très bien passé. Je tiens à remercier mes camarades, mais aussi et surtout M. Vuillamy, qui nous a apporté une aide indispensable au bon déroulement du projet.

Adrian

Je suis très heureux d'avoir eu la chance d'obtenir l'*amélioration de la machine de jet* comme projet de P6. Ce fut une expérience très enrichissante. Nous avons pu clairement nous faire une idée du travail et de la démarche que peut avoir un ingénieur face à un problème quelconque. Je souhaite remercier le professeur en charge de notre projet, M. Vuillamy, sans qui rien de tout cela n'aurait été possible.



Bibliographie

-http://fr.wikipedia.org/wiki/Artillerie_m%C3%A9di%C3%A9vale

-<http://fr.wikipedia.org/wiki/Tr%C3%A9buchet>

-<http://le.trebuchet.free.fr/index2.htm>

-« *Etude et réalisation d'une machine de guerre médiévale* » (Rapport de l'an passé)

