

ETUDE ET REALISATION D'UN CHARIOT A PROPULSION PAR VAPEUR



Etudiants :

Cléante LANGREE

Adrien DUFRAUX

Dylan SERRE

Etienne LEFEBVRE

Benjamin GIVERNAUD

Guillaume BLANC

Olivier BIGOGNE

Enseignant-responsable du projet :

Didier VUILLAMY

Date de remise du rapport : 15/06/2015

Référence du projet : **STPI/P6/2015 – n°18**

Intitulé du projet : **Étude et réalisation d'un chariot à propulsion par vapeur**

Type de projet : **modélisation/biblio/ conception**

Objectifs du projet :

L'objectif du projet est d'effectuer des recherches sur des modèles permettant la propulsion d'un chariot et utilisant la vapeur. Ces recherches vont amener à effectuer de nombreux calculs théoriques afin de prédire le comportement du chariot. Enfin, la réalisation du chariot à vapeur et l'exposition de celui-ci à la vallée de l'aéronautique.

Mots-clefs du projet :

Vapeur

Énergie thermique

Conception

Mouvement

TABLE DES MATIÈRES

<u>1. Introduction.....</u>	<u>4</u>
<u>2. Méthodologie / Organisation du travail.....</u>	<u>5</u>
<u>3. Travail réalisé et résultats.....</u>	<u>6</u>
<u>3.1. Recherche d'un modèle.....</u>	<u>6</u>
<u>3.1.1. Appréhender notre expérience : Modèle du ressort.....</u>	<u>6</u>
<u>3.1.2. Recherche d'un concept.....</u>	<u>13</u>
<u>3.2. Expérience.....</u>	<u>18</u>
<u>3.2.1. Calculs théoriques préliminaires.....</u>	<u>18</u>
<u>3.2.2. Description expérience.....</u>	<u>20</u>
<u>4. Conclusions et perspectives.....</u>	<u>23</u>
<u>5. Annexes.....</u>	<u>24</u>
<u>5.1. Propositions de sujets de projets (en lien ou pas avec le projet réalisé).....</u>	<u>24</u>

1. INTRODUCTION

Dans le cadre du projet de P6, nous avons choisi le sujet « conception d'un chariot à vapeur ». Il consiste simplement à la réalisation d'un système de propulsion à vapeur qui serait monté sur un chariot. Le projet a pour finalité l'évaluation mais aussi l'exposition de la réalisation pour la vallée de l'aéronautique.

Parmi toutes les propositions, chaque membre du groupe a retenu celle-ci car nous étions tous intrigués par le sujet. Il est vrai que les machines à vapeur ont, dans leur temps, changé la face du monde. En effet, la révolution industrielle et l'avènement de l'industrie reposent entièrement sur l'avancée de la science et l'utilisation de la vapeur. L'idée d'entrer dans les coulisses de cette période historique majeure nous a séduite.

Mais nous n'avons pas choisi ce sujet uniquement pour son aspect historique. En effet, il est particulièrement intéressant dans la mesure où nous devons nous expérimenter à un protocole de conception que l'on devait suivre du début à la fin. Hormis notre enseignant, nous n'avions aucune base de travail, aucune approche. Nous étions parfaitement libre d'orienter notre projet dans un sens ou dans un autre. Nous avons donc dû réaliser un important travail préliminaire avant de concevoir ce fameux chariot.

2. MÉTHODOLOGIE / ORGANISATION DU TRAVAIL

Afin de mener à bien notre projet, il nous semblait évident de séparer les tâches à effectuer pour être efficace et finir celui-ci dans les temps. Ce projet s'est divisé en trois parties distinctes:

La première fût une phase de recherche d'un modèle qui satisferait notre projet.

La seconde consistait à réaliser des calculs théoriques afin de prévoir le résultat des expériences.

La troisième concernait la réalisation des expériences pour valider ou non les résultats théoriques étudiés précédemment.

Nous avons décidé de travailler ensemble pour tout ce qui concernait la phase de recherche et la partie théorique. En effet, pendant les premières séances, l'enseignant et nous mêmes étudions les théorèmes physiques associés au projet. Nous réalisons des calculs théoriques pour approximer au mieux les expériences à venir. Régulièrement, nous avons quelques recherches ou du travail à effectuer pour la semaine suivante et nous avons donc fait en sorte de le répartir équitablement entre nous.

Une fois les calculs terminés, il nous semblait logique de démarrer les études expérimentales. Nous nous sommes donc rassemblés dans les laboratoires de chimie, pour effectuer les différents essais afin de trouver la solution qui nous conviendrait. Ces études furent souvent compliquées et longues, puisque à chaque tentative nous avons des résultats mitigés. Nous étions satisfaits sur certains points mais il restait à chaque fois des imperfections. En effet, les études théoriques ne prévoyaient pas tout à l'image de la suppression des tuyaux ou encore des problèmes d'étanchéité auxquels nous reviendrons plus tard.

Ce projet se résume donc en un fort travail de groupe dans les séances suivies avec l'enseignant, dans lesquelles chacun avait son rôle pour réussir au mieux à réaliser le chariot à vapeur.

Voici un tableau décrivant l'organisation de base que nous avons pour chaque séance. L'ensemble du groupe s'est par ailleurs beaucoup impliqué pour trouver des idées et effectuer des recherches pendant les heures de travail avec notre enseignant.

Noms	Tâches effectuées
Olivier Bigogne / Guillaume Blanc	Communication du groupe avec l'extérieur (labo de chimie) et organisation
Dylan Serre / Adrien Dufraux	Prise de notes de chaque séance pour un suivi continu
Cléante Langrée / Benjamin Givernaud	Photographes des expériences et prise de notes
Etienne Lefebvre	Polyvalent, soutien de chaque binôme

3. TRAVAIL RÉALISÉ ET RÉSULTATS

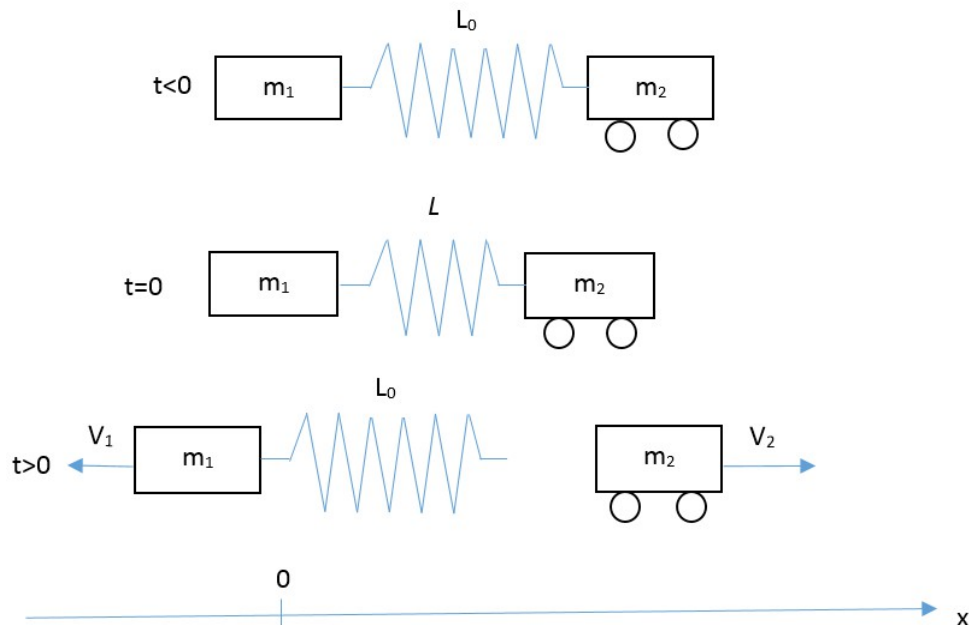
3.1. Recherche d'un modèle

3.1.1. Appréhender notre expérience : Modèle du ressort.

Pour faire avancer notre chariot, l'idée est de propulser de la masse à l'arrière du chariot. Afin de bien appréhender notre expérience, nous avons étudié un modèle très simpliste du chariot. Toutes les valeurs de positions, vitesses, accélérations et énergies sont par contre fausses : le modèle nous permet de visualiser comment évolue ces données lorsqu'un paramètre change. On peut par exemple visualiser comment évolue la vitesse du chariot lorsque la masse propulsée change.

3.1.1.1 Présentation du modèle.

On modélise l'interaction entre le chariot de masse m_2 et la masse propulsée de masse m_1 avec un ressort de longueur L_0 à vide et de raideur k . La distance entre m_1 et m_2 est ensuite notée l . Avec x_2 la position du chariot et x_1 celle de la masse, on a : $l = x_2 - x_1$



3.1.1.2 Résolution.

3.1.1.2.1 APPLICATION DU PRINCIPE FONDAMENTALE DE LA DYNAMIQUE.

On considère pour notre modèle que le contact entre les roues et le sol est parfait. On a donc pas de réaction tangentielle dû au frottement. On ne s'intéresse qu'aux forces portées par l'axe x (le poids et la réaction du support se compensent). On applique ensuite le PFD en projetant sur l'axe x.

Pour les forces, il nous reste :

- La force exercée par le ressort sur m_1 notée $F_{\text{ressort sur } m_1}$.
- La force exercée par le ressort sur m_2 $F_{\text{ressort sur } m_2}$.

Dans le cas général on a : $\overrightarrow{F_{\text{ressort}}} = k(L_0 - l)$

Avec l la longueur du ressort qui correspond aussi à la distance entre les deux masses.

Quand le ressort est comprimé, on a :

$$l < L_0$$

$$\Leftrightarrow L_0 - l > 0$$

Il faut alors :

$$\overrightarrow{F_{\text{ressort sur } m_1}} < 0$$

$$\overrightarrow{F_{\text{ressort sur } m_2}} > 0$$

On en déduit que :

$$\overrightarrow{F_{\text{ressort sur } m_1}} = -k(L_0 - (x_2 - x_1))$$

$$\overrightarrow{F_{\text{ressort sur } m_2}} = k(L_0 - (x_2 - x_1))$$

En appliquant le PFD sur m_1 puis sur m_2 , on a :

$$m_1 \ddot{x}_1 = \overrightarrow{F_{\text{ressort sur } m_1}}$$

$$m_2 \ddot{x}_2 = \overrightarrow{F_{\text{ressort sur } m_2}}$$

On obtient un système d'équations différentielles couplées :

$$\begin{cases} m_1 \ddot{x}_1 = -k(L_0 - (x_2 - x_1)) & (1) \\ m_2 \ddot{x}_2 = k(L_0 - (x_2 - x_1)) & (2) \end{cases}$$

3.1.1.2.2 RÉSOLUTION EXACTE

On essaie d'obtenir ici la position, la vitesse et l'accélération de m_2 , c'est à dire le chariot. On va résoudre le système dans le cas où initialement m_1 et m_2 sont en $x=0$ avec une vitesse initiale nulle.

(1)+(2) nous donne :

$$\begin{aligned} m_1 \ddot{x}_1 + m_2 \ddot{x}_2 &= 0 \\ \Leftrightarrow \frac{d}{dt}(m_1 \dot{x}_1 + m_2 \dot{x}_2) &= 0 \\ \Leftrightarrow m_1 \dot{x}_1 + m_2 \dot{x}_2 &= cst \end{aligned}$$

Or les vitesses initiales de m_1 et m_2 sont nulles donc :

$$m_1 \dot{x}_1(0) + m_2 \dot{x}_2(0) = 0 = cst$$

On a alors :

$$\begin{aligned} m_1 \dot{x}_1 + m_2 \dot{x}_2 &= 0 \\ \Leftrightarrow \frac{d}{dt}(m_1 x_1 + m_2 x_2) &= 0 \\ \Leftrightarrow m_1 x_1 + m_2 x_2 &= cst \end{aligned}$$

Or à l'instant $t=0$ on a $x_1=0$ et $x_2=0$ donc :

$$m_1x_1(0) + m_2x_2(0) = 0 = cst$$

On obtient alors :

$$x_1 = -\frac{m_2}{m_1}x_2$$

$$x_2 = -\frac{m_1}{m_2}x_1$$

En injectant dans (2), on obtient :

$$m_2\ddot{x}_2 = k(L_0 - (x_2 + \frac{m_2}{m_1}x_2))$$

$$\Leftrightarrow m_2\ddot{x}_2 = kL_0 - x_2k(1 + \frac{m_2}{m_1})$$

$$\Leftrightarrow m_2\ddot{x}_2 + x_2k\frac{m_1 + m_2}{m_1} = kL_0$$

$$\Leftrightarrow \ddot{x}_2 + x_2k\frac{m_1 + m_2}{m_1m_2} = \frac{kL_0}{m_2}$$

C'est une équation différentielle harmonique de la forme :

$$\ddot{x}_2 + \omega^2 x_2 = cst \quad \omega = \sqrt{\frac{k(m_1 + m_2)}{m_1m_2}}$$

Pour avoir la solution générale, il faut additionner une solution particulière et une solution générale de l'équation homogène :

$$x_{2SP} = \frac{cst}{\omega^2} = \frac{kL_0}{m_2} * \frac{m_1m_2}{k(m_1 + m_2)} = \frac{L_0m_1}{m_1 + m_2}$$

La solution générale de l'équation homogène est de la forme :

$$x_{2SG} = A \cos(\omega t) + B \sin(\omega t)$$

On obtient donc :

$$x_2 = x_{2_{SP}} + x_{2_{SG}} = A \cos(\omega t) + B \sin(\omega t) + \frac{L_0 m_1}{m_1 + m_2}$$

On a $x_2(0)=0$ donc :

$$A + \frac{L_0 m_1}{m_1 + m_2} = 0$$

$$A = -\frac{L_0 m_1}{m_1 + m_2}$$

On calcule la dérivée de x_2 :

$$\dot{x}_2 = -A\omega \sin(\omega t) + B\omega \cos(\omega t)$$

La vitesse de m_2 est nulle à l'instant $t=0$ donc :

$$\dot{x}_2(0) = 0$$

$$\Leftrightarrow B\omega = 0 \Leftrightarrow B = 0$$

Finalement nous avons :

$$x_2(t) = A \cos(\omega t) + \frac{L_0 m_1}{m_1 + m_2}$$

$$\dot{x}_2(t) = -A\omega \sin(\omega t)$$

$$\ddot{x}_2(t) = -A\omega^2 \cos(\omega t)$$

C'est à dire :

$$x_2(t) = -\frac{L_0 m_1}{m_1 + m_2} \cos\left(\sqrt{\frac{k(m_1 + m_2)}{m_1 m_2}} t\right) + \frac{L_0 m_1}{m_1 + m_2}$$

$$\dot{x}_2(t) = \frac{L_0 m_1}{m_1 + m_2} \sqrt{\frac{k(m_1 + m_2)}{m_1 m_2}} \sin\left(\sqrt{\frac{k(m_1 + m_2)}{m_1 m_2}} t\right)$$

$$\ddot{x}_2(t) = \frac{L_0 m_1}{m_1 + m_2} \frac{k(m_1 + m_2)}{m_1 m_2} \cos\left(\sqrt{\frac{k(m_1 + m_2)}{m_1 m_2}} t\right) = \frac{L_0 k}{m_2} \cos\left(\sqrt{\frac{k(m_1 + m_2)}{m_1 m_2}} t\right)$$

3.1.1.2.3 RÉSOLUTION NUMÉRIQUE

Nous allons maintenant utiliser une feuille de calcul Excel pour étudier notre système. On résoudra notamment nos équations (1) et (2) numériquement. L'intérêt étant de gagner en efficacité pour observer le phénomène. On peut changer nos conditions de départ facilement et voir le résultat graphiquement. On peut observer quel est l'effet de l'évolution d'un paramètre sur la vitesse par exemple.

Nos calculs ne seront pas exacts mais on vérifiera qu'ils sont proches de la résolution précédente. De toute manière nous étudions un modèle éloigné de la réalité, les résultats exacts n'ont donc pas d'importance.

Nous approximerons l'accélération d'une masse à l'instant t_n par la pente du segment $[v(t_n);v(t_{n+1})]$. Ainsi :

$$a(t_n) = \frac{v(t_{n+1}) - v(t_n)}{t_{n+1} - t_n}$$

$$\Leftrightarrow v(t_{n+1}) = v(t_n) + a(t_n)(t_{n+1} - t_n)$$

On a : $v_1(t_{n+1})$ dépend de $v_1(t_n)$ et $a_1(t_n)$. $v_2(t_{n+1})$ dépend de $v_2(t_n)$ et $a_2(t_n)$ (3)

Nous approximerons la vitesse d'une masse à l'instant t_{n+1} par la pente du segment $[x(t_n);x(t_{n+1})]$.

Ainsi :

$$v(t_{n+1}) = \frac{x(t_{n+1}) - x(t_n)}{t_{n+1} - t_n}$$

$$x(t_{n+1}) = x(t_n) + v(t_{n+1})(t_{n+1} - t_n)$$

On a : $x_1(t_{n+1})$ dépend de $x_1(t_n)$ et $v_1(t_{n+1})$. $x_2(t_{n+1})$ dépend de $x_2(t_n)$ et $v_2(t_{n+1})$ (4)

Nous utilisons les équations (1) et (2) :

$$a_1(t_n) = -\frac{k}{m_1}(L_0 - (x_2(t_n) - x_1(t_n)))$$

$$a_2(t_n) = \frac{k}{m_2}(L_0 - (x_2(t_n) - x_1(t_n)))$$

Donc $a_1(t_n)$ et $a_2(t_n)$ qui dépendent de $x_1(t_n)$ et $x_2(t_n)$. (5)

On démontre par récurrence la propriété suivante :

$P(n)$: « x_1, x_2, v_1 et v_2 sont connues à l'instant t_n »

$P(0)$: $x_1(0), x_2(0), v_1(0)$ et $v_2(0)$ sont nos conditions initiales : Ils sont donc connues.

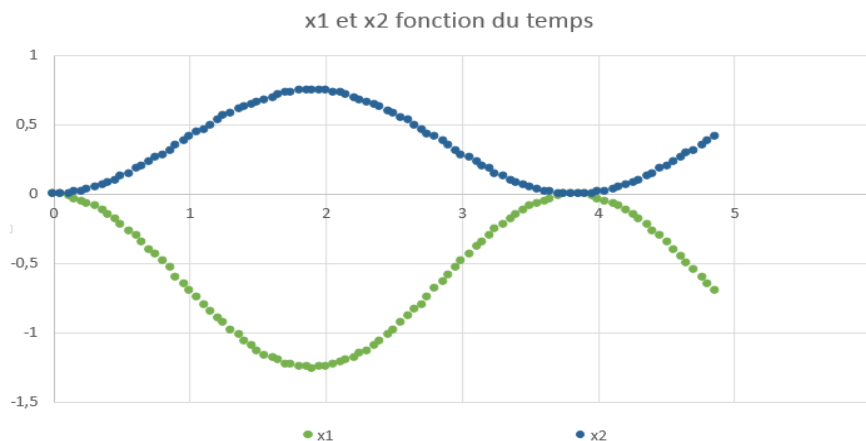
Supposons $P(n)$ soit vraie pour un rang n donné. Démontrons que $P(n+1)$ est vraie.

- D'après (5) et l'hypothèse de récurrence $a_1(t_n)$ et $a_2(t_n)$ sont connues puisqu'elles dépendent de $x_1(t_n)$ et $x_2(t_n)$.
- D'après (3) $v_1(t_{n+1})$ et $v_2(t_{n+1})$ sont connues puisque $v_1(t_{n+1})$ dépend de $v_1(t_n)$ et $a_1(t_n)$, $v_2(t_{n+1})$ dépend de $v_2(t_n)$ et $a_2(t_n)$.
- D'après (4) $x_1(t_{n+1})$ et $x_2(t_{n+1})$ sont connues puisque $x_1(t_{n+1})$ dépend de $x_1(t_n)$ et $v_1(t_{n+1})$, $x_2(t_{n+1})$ dépend de $x_2(t_n)$ et $v_2(t_{n+1})$.

$P(n+1)$ est donc vérifiée. Notre propriété est vraie pour tout n plus grand ou égal à 0.

Excel va donc comprendre ce qu'on lui demande puisqu'il n'y a pas de référence cyclique.

En prenant des valeurs arbitraires pour k, L_0, m_1 et m_2 nous obtenons ces nuages de points :

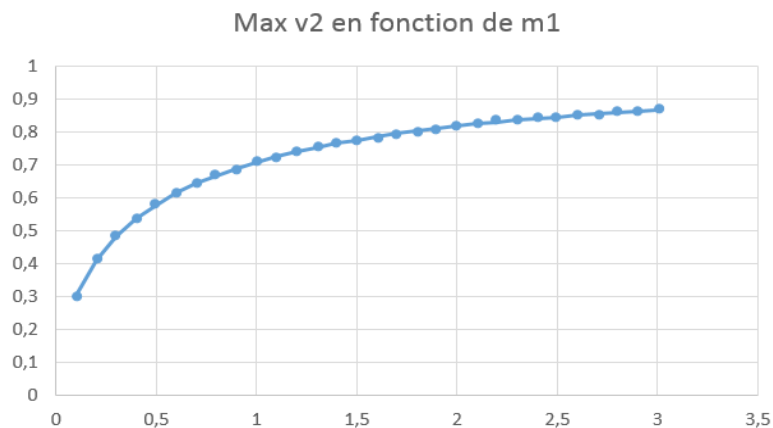


Si on compare avec la solution exacte, on constate que la moyenne de l'écart relatif entre la valeur exacte et l'approximation numérique est de 7%. Cela nous suffit pour ce qu'on veut en faire.

Sur ces courbes, il n'y a que les parties où m_1 et m_2 s'éloignent entre eux qui nous intéressent. Le reste n'a plus de sens par rapport à notre expérience puisque ni m_1 ni m_2 ne reviennent vers la position d'origine.

3.1.1.3 Interprétation

Fixons maintenant tous les paramètres sauf m_1 . Pour chaque valeur de m_1 on calcule le maximum de v_2 . Nous obtenons le résultat suivant :



Ce modèle nous indique que plus la masse m_1 est grande, plus le chariot sera rapide. Ce résultat nous donne une première approche de ce qu'il faut choisir pour m_1 .

3.1.2. Recherche d'un concept

Les premières séances de P6 avaient pour but de trouver une solution technique répondant à notre problématique : l'étude et la réalisation d'un chariot à propulsion par vapeur.

Nous avons donc durant notre premier TD de P6 effectué un « brainstorming » afin d'avoir un maximum d'idées concernant le système propulsif de notre chariot à vapeur. Guidés par notre professeur, nous sommes donc parvenus à établir plusieurs solutions pouvant potentiellement répondre à notre sujet. Nous avons ainsi énoncé les propositions suivantes:

- propulsion par éjection de vapeur
- propulsion par éjection d'eau (modèle à un récipient) :
 - modèle de chauffe électrique ou au gaz
 - modèle de chauffe avec réaction chimique
 - modèle de chauffe avec injection d'un solide chaud
- propulsion par éjection d'eau (modèle à 2 récipients) :
 - modèle avec piston étanche
 - modèle actuel.

Avec un total de 6 solutions il nous fallait maintenant étudier chacune d'entre elles afin de déterminer laquelle serait la plus adaptée. Pour effectuer ce tri, nous nous sommes basés sur 3 principaux critères :

- faisabilité
- sécurité
- efficacité.

3.1.2.1 Propulsion par éjection de vapeur

Une de nos premières idées concernant la création d'un système propulsif à base de vapeur a été un modèle dans lequel de la vapeur d'eau surchauffée serait directement éjectée.

3.1.2.1.1 ETAPES DE FONCTIONNEMENT

- De l'eau est placée dans un récipient en verre (résistant à la chaleur et aux parois indéformables).
- Cette eau est chauffée à l'aide d'une source de chaleur extérieure (flamme ou résistance électrique) jusqu'à atteindre l'état de vapeur.
- A l'état de vapeur, cette eau est toujours chauffée jusqu'à ce qu'il y ait une certaine pression à l'intérieur du récipient.
- Une fois cette pression atteinte, une vanne est ouverte et la vapeur s'échappe par un tube d'échappement.
- En sortant du tube et par le principe de conservation de la quantité de mouvement, la vapeur qui sort dans un sens propulse le chariot dans le sens opposé.

3.1.2.1.2 COMMENTAIRES

Le principal avantage de ce système est qu'il est relativement facile à mettre en place. Il requiert peu de matériel et de manipulation. Cependant son efficacité est très fortement limitée du fait de la faible masse que l'on éjecte (l'eau est sous forme de vapeur soit environ 1000 fois moins lourde que sous forme liquide) ainsi la quantité de mouvement transmise au chariot est très faible comparée aux système à éjection d'eau liquide (cf étude ressort). Du côté de la sécurité, cette solution présente certains risques non négligeables :

- travail à des pressions relativement élevées pour de la verrerie de laboratoire
- éjection de vapeur à haute température.

3.1.2.2 Propulsion par éjection d'eau (modèle à un récipient)

Afin de palier le problème de la masse d'eau éjectée, nous avons eu l'idée d'un système utilisant de la vapeur d'eau pour éjecter de l'eau sous forme liquide. Nous nous sommes inspirés du fonctionnement des machines à café que nous avons adapté à un système propulsif.

3.1.2.2.1 ÉTAPES DE FONCTIONNEMENT

- De l'eau est placée dans un récipient en verre (résistant à la chaleur et aux parois indéformables).
- Cette eau est chauffée à l'aide d'une source de chaleur diverse (3 solutions retenues) jusqu'à ce que de la vapeur de forme.
- La vapeur ainsi créée va exercer une pression à la surface de l'eau liquide (considérée comme indéformable).
- Cette pression va entraîner l'eau liquide dans le tube d'échappement.
- Une fois une certaine pression atteinte, une vanne est ouverte et l'eau liquide s'échappe hors du tube d'échappement.
- En sortant du tube et par le principe de conservation de la quantité de mouvement, l'eau liquide qui sort dans un sens propulse le chariot dans le sens opposé.

Nous avons ici eu l'idée d'utiliser 3 systèmes de chauffe différents. En effet, la difficulté majeure de ce système est qu'il faut faire en sorte que la vapeur soit créée rapidement afin qu'elle ne se condense pas sur les parois du récipient. Cela entraînerait une grosse perte de rendement. Les trois systèmes de chauffe que nous avons retenus sont :

- l'utilisation d'une flamme ou d'une résistance électrique
- l'exploitation de la chaleur créée par une réaction chimique exothermique au sein du récipient
- l'insertion d'un solide à très haute température directement dans le récipient.

3.1.2.2 COMMENTAIRES

Le principal avantage de cette solution est qu'elle permet l'éjection d'eau liquide et donc d'une masse supérieure à la vapeur d'eau. La quantité de mouvement créée sera donc bien supérieure au modèle précédent. De plus ce système est relativement simple à mettre en place. Cependant les différents modèles de chauffe ont chacun leurs avantages et inconvénients :

- le système électrique ou à flamme ne chauffe pas très rapidement bien qu'il soit facile à adapter au montage.
- le système avec réaction chimique est relativement complexe à mettre en place dans le sens où de nombreux facteurs sont à prendre en compte (dangerosité des produits/réactifs, quantité de chaleur créée adéquate...). Cependant il permet s'il est bien réalisé une création de vapeur très rapide.
- le système avec injection d'un solide à haute température a pour principal inconvénient sa difficulté de mise en place. Il faut en effet parvenir à injecter dans le récipient contenant de l'eau liquide, un solide à très haute température tout en maintenant l'étanchéité du système. Pour un tel dispositif, il faut aussi prendre beaucoup de précautions lors de la manipulation de solides aussi chauds. La vapeur est cependant rapidement créée.

3.1.2.3 Propulsion par éjection d'eau (modèle à deux récipients)

Enfin, notre dernière solution reprend le principe de l'éjection d'eau liquide par de la vapeur d'eau mais en utilisant deux sources d'eau différentes. En effet, la vapeur créée dans un récipient sera envoyée dans un autre récipient contenant l'eau liquide qui sera éjectée.

Une variante de ce système utilise un piston étanche dans le récipient contenant la vapeur. Dans ce cas, c'est l'air propulsé par la vapeur sous pression qui entraînera l'éjection de l'eau liquide (schéma en annexe).

3.1.2.3.1 ETAPES DE FONCTIONNEMENT

- De l'eau liquide en faible quantité est placée dans le récipient n°1.
- On place un piston étanche au niveau de l'eau dans le récipient n°1 (cas de la variante avec piston).
- De l'eau liquide est placée dans le récipient n°2.
- Les deux récipients sont reliés par un tuyau en plastique auquel on a adapté une vanne. Le tout constitue un système étanche.
- On chauffe le récipient n°1 avec une plaque électrique ou une flamme.
- La vapeur créée va monter en pression (ou compresser l'air situé entre le piston et la vanne).
- Une fois une certaine pression atteinte, on ouvre la vanne et la vapeur (ou l'air) sous pression propulse l'eau liquide du récipient n°2 hors du tube d'échappement.

3.1.2.3.2 COMMENTAIRES

Le principal avantage de ce système est que l'eau liquide éjectée est différente de l'eau chauffée. Ainsi, à l'inverse du système à un récipient où une grande partie de l'énergie thermique était utilisée inutilement pour chauffer l'eau éjectée, ici, la chaleur générée par le système de chauffe est entièrement consacrée à la transformation de l'eau en vapeur (récipient n°1) et à la montée en pression de cette vapeur. L'efficacité de ce système est donc bien supérieure à celle des systèmes précédents (éjection d'eau liquide + meilleure exploitation de l'énergie). Cependant, il reste des pertes de rendement au niveau des surfaces de contact entre vapeur chaude / eau liquide et parois froides. Pour diminuer ces pertes, nous avons eu l'idée de mettre en place une variante utilisant un piston. L'air ainsi propulsé par la vapeur serait froid et les pertes seraient fortement réduites (surface de contact avec la vapeur égale à la surface du piston).

Le système à deux récipients avec piston reste cependant complexe à mettre en place surtout à cause du piston qui doit impérativement être étanche.

Concernant la sécurité, ce modèle d'éjection d'eau avec deux récipients comporte peu de risques (pressions relativement faibles et système de chauffe facilement manipulable).

3.1.2.4 Tableau récapitulatif

Système\ Critères d'étude		Faisabilité	Efficacité	Sécurité	TOTAL
Éjection de vapeur sèche		5/5	1/5	2/5	8/15
Éjection d'eau : modèle à un récipient	Chauffe électrique ou au gaz	5/5	2/5	4/5	11/15
	Chauffe avec réaction chimique	1/5	3/5	2/5	6/15
	Chauffe avec injection d'un solide chaud	1/5	3/5	1/5	5/15
Éjection d'eau : modèle à deux récipients	Modèle avec piston étanche	2/5	4/5	4/5	10/15
	Modèle classique	5/5	4/5	4/5	13/15

A l'issue de notre étude, nous avons donc choisi de retenir le système à éjection d'eau liquide avec deux récipients et billes en polystyrène.

3.2. Expérience

3.2.1. *Calculs théoriques préliminaires*

Dans le cadre de notre recherche d'un système de propulsion nous nous sommes arrêtés sur un modèle qui expulserait un fluide d'un réservoir afin que le contrecoup propulse notre système.

Il s'agira donc ici de déterminer la force produite par une telle expulsion en fonction des différents paramètres de l'expérience à savoir :

- Les différentes caractéristiques du réservoir
- Les différentes caractéristiques du fluide

L'expérience modélisée est la suivante :

On place un fluide de masse volumique μ dans un réservoir fermé de volume V . On passe de la pression atmosphérique P_0 à P_1 dans notre réservoir en injectant de la vapeur sous pression issue d'un réservoir annexe. On ouvre ensuite un orifice de section S dans ce réservoir et sous l'effet de la pression le fluide s'éjecte à une vitesse $v_{\text{éjection}}$. Cette éjection crée une force F qui s'applique sur l'ensemble de notre système et que l'on cherche ici à déterminer.

Nous avons décidé d'utiliser l'eau comme fluide pour l'expérience pour des raisons purement pratiques (prix, nocivité etc ...).

Premièrement, on se servira ici de la formule de la force de poussée, très utilisée en aérodynamique.

$$\begin{aligned}
 &\rightarrow F = v_{\text{éjection}} \times Q_m \text{ (ou } Q_m \text{ est le débit massique du fluide). Or,} \\
 &\rightarrow Q_m = \mu \times Q_v \text{ (ou } Q_v \text{ est le débit volumique) et} \\
 &\rightarrow Q_v = v_{\text{éjection}} \times S \text{ (avec } S \text{ la section de sortie)} \\
 &\rightarrow F = v_{\text{éjection}}^2 \times \mu \times S \tag{1}
 \end{aligned}$$

L'eau liquide est ici considérée comme un fluide parfait, incompressible et irrotationnel. On peut donc écrire le théorème

$$\rightarrow P + (\mu \times v^2)/2 = \text{Cst}$$

Ici on appliquera donc ce théorème à l'instant 0 quand le fluide est immobile à la pression P_1 , puis à l'instant t quand le fluide aura une vitesse $v_{\text{éjection}}$ et sera soumis à une pression P_0 . On obtient :

$$\rightarrow P_1 + (\mu \times v_0^2)/2 = P_0 + (\mu \times v_{\text{éjection}}^2)/2$$

Or à l'instant 0 le fluide est immobile donc $v_0 = 0$

$$\rightarrow P_1 = P_0 + (\mu \times v_{\text{éjection}}^2) / 2$$

$$\rightarrow P_1 - P_0 = (\mu \times v_{\text{éjection}}^2) / 2$$

$$\rightarrow \Delta P = (\mu \times v_{\text{éjection}}^2) / 2$$

$$\rightarrow (2 \times \Delta P) / \mu = v_{\text{éjection}}^2$$

On remplace donc véjection² dans l'équation (1) par sa valeur trouvée à l'aide du théorème de Bernoulli

$$\rightarrow F = ((2 \times \Delta P) / \mu) \times \mu \times S$$

$$\rightarrow F = 2 \times \Delta P \times S$$

On obtient donc une expression de la force de poussée initiale dépendante de la surface de sortie et de la différence de pression. On peut noter que cette force représente uniquement la poussée initiale. En réalité cette poussée s'étalera sur plusieurs secondes le temps que le réservoir se vide.

A noter qu'il vaut mieux propulser une masse importante à une faible vitesse que l'inverse. En effet nous avons vu que :

$$\rightarrow F = \text{véjection} \times Q_m$$

Or l'énergie cinétique d'un corps en mouvement est donnée par la relation suivante

$$\rightarrow E_c = \frac{1}{2} \times m \times v^2$$

On sait que l'énergie ne se crée pas, elle se transmet. A noter que l'on peut parler de perte d'énergie mais qu'il s'agit en fait uniquement d'un transfert d'énergie utile vers une énergie inutile (le plus souvent thermique dans le cadre de frottement).

Ainsi pour que le fluide expulsé ait une énergie cinétique E_c . Il faut que la même quantité d'énergie soit fournie au système.

Nous allons donc étudier le système à poussée constante.

Si la masse diminue, la poussée restant constante, la vitesse va augmenter. Or dans ce cas l'énergie cinétique du fluide augmentera puisque que la vitesse est au carré dans la formule de l'énergie tandis que la masse est à la puissance 1. L'énergie à fournir au système sera donc plus grande.

Dans un deuxième temps, si la masse augmente, alors fatalement la vitesse diminuera. Or cette baisse de vitesse entraînera une baisse de l'énergie cinétique pour des raisons similaires à celles évoquées précédemment.

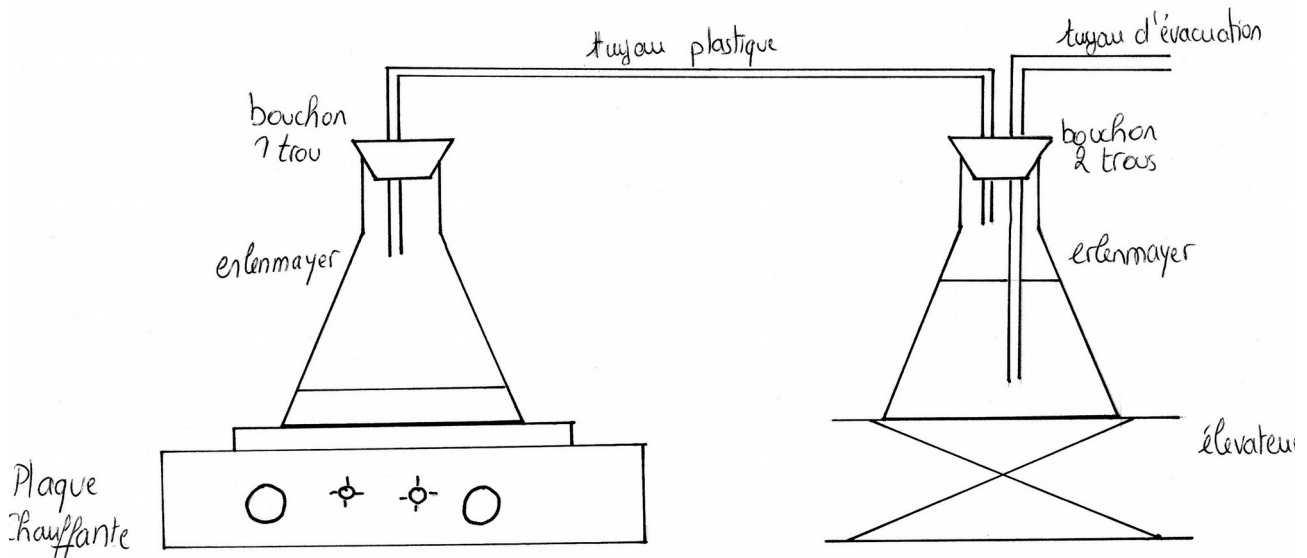
Ainsi pour une question de rendement il est préférable d'éjecter une masse plus importante.

3.2.2. Description expérience

Nous nous sommes rendus dans les laboratoires du bâtiment Darwin pour réaliser la première manipulation de notre projet.

Le but était de réaliser, avec du matériel de chimie simple, un montage qui permettrait de développer une force suffisante pour faire avancer un chariot grâce à la vapeur, en s'inspirant de la cafetière italienne.

Nous avons alors réalisé le montage suivant :



Dans l'erenmeyer de gauche, on place un petit volume d'eau que l'on va porter à ébullition. Il n'est pas nécessaire de chauffer une grande quantité d'eau car on a calculé qu'il y a un facteur 1000 entre le volume occupé par une mole de gaz et le volume occupé par une mole de liquide.

La vapeur qui se forme va alors monter dans le tuyau en plastique pour aller se loger dans le second erlenmeyer, qui lui, est rempli d'une grande quantité d'eau qui sera expulsée ensuite. L'augmentation de pression liée à l'augmentation de la quantité de vapeur, va venir exercer une force de pression à la surface de l'eau. Cette eau n'a pas d'autre choix que de monter dans le tuyau relié à l'extérieur.

Cependant, lors de l'expérience, nous nous sommes rendus compte que l'eau éjectée ne sortait pas avec assez de force pour faire avancer un chariot. Nous avons alors réfléchi aux causes de ce problème et nous avons trouvé les défauts qui suivent :

- Problème de condensation dans le montage qui fait perdre de la pression et de l'énergie.
- Temps de chauffe pas assez rapide et donc la vapeur se forme pas assez vite.
- Trop d'échange thermique au niveau de l'interface eau-vapeur.
- Le bouchon « pop » si on laisse la pression monter.

Nous avons alors chercher de nouveaux systèmes qui permettraient de résoudre ces problèmes et donc de rendre notre système plus performant.

- Tout d'abord nous avons penser à créer une interface qui n'autorise pas les échanges thermiques. Nous avons alors pensé à utiliser des morceaux de polystyrène car ce matériau flotte sur l'eau et est un très bon isolant.

- Ensuite pour éviter que le bouchon ne saute lorsque la pression augmente, nous avons pensé à installer un manomètre qui nous permettrait de connaître la pression à l'intérieur du récipient de chauffe.

- Nous avons aussi eu l'idée de changer l'erlenmeyer dans lequel l'eau chauffe par un ballon pour augmenter la surface de contact entre la verrerie et le chauffage et ainsi diminuer le temps de chauffe et donc former la vapeur plus rapidement.

Nous avons alors prévu une autre séance de manipulation pour le mercredi 22 avril afin de mettre en place ces modifications dans l'espoir que la poussée sera plus importante et permettrait de faire avancer un chariot.

Pour notre deuxième séance d'expérimentation, c'est encore dans les locaux de Darwin que nous nous sommes rendus. Nous avons alors utiliser du matériel différent et tenter de réaliser les modifications auxquelles nous avons réfléchi après notre première séance de manipulation.

Nous avons donc utilisé de petits morceaux de polystyrène pour limiter les échanges thermiques au niveau de l'interface. De plus, nous avons opté pour utiliser un ballon avec un chauffe ballon pour permettre une meilleure transmission de chaleur à l'eau. Nous avons aussi utiliser une valve de chambre à air ainsi qu'un manomètre pour mesurer la pression au sein du ballon de chauffe. Afin de monter plus en pression, nous avons décidé de pincer le tuyau de raccord entre les deux réservoirs grâce à une pince en ayant pris soin de mettre des gants de protection.

Cependant, lors de la manipulation, nous nous sommes rendus compte que le manomètre ne remplissait pas son rôle. En effet, d'importantes fuites de vapeur apparaissaient au niveau de la jonction entre le bouchon et la valve. Nous avons alors décidé d'enlever le manomètre.

Après avoir retiré la valve et remplacé le bouchon avec deux trous par un bouchon avec un unique trou, nous avons réitéré notre manipulation.

Nous avons alors remarqué que la vapeur se formait plus vite que lors de la première manipulation, certainement grâce au meilleur contact offert par le chauffe ballon.

Cependant avec l'augmentation de pression et de température, le tuyau de raccord a éclaté à cause de sa dilatation. Ceci fut un autre problème qui a remplacé le problème du bouchon qui pop.

Nous avons donc pas réussi à observer de poussée en sortie de montage et nous sommes venus à nous demander si notre montage ne nécessitait pas des moyens plus importants, moyens que le laboratoire de chimie ne pouvait pas nous offrir. Nos besoins en pression n'étaient pas réalisable. Il nous aurait fallu des tuyaux plus résistants comme en métal ou en PVC. De plus, nous avons pensé que nous aurions difficilement assez de poussée pour faire bouger un chariot chargé d'autant de matériels avec ce même système, nous devrions prévoir le montage à une échelle plus grande.

4. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Dans la formation INSA, du moins dans le cycle préparatoire, nous accumulons des connaissances qui nous arment pour notre future vie professionnelle en tant qu'ingénieur. Cependant, nous n'avons pas encore conscience d'un côté plus terre-à-terre. Après la conceptualisation, nous devons nous poser la question de la faisabilité. De plus, nous réalisons que d'autres facteurs, comme la sécurité, doivent être pris en compte. Par exemple, dans le cadre de l'exposition notre chariot pourrait être utilisé par des enfants, pouvons-nous alors nous propulser en rejetant de la vapeur (chaude) ?

De plus les projets de P6 permettent d'apprendre à travailler en équipe. En effet, nous nous sommes rapidement rendus compte de l'importance de savoir scinder le travail entre les membres du groupe, sans quoi nous n'aurions pas pu avancer.

5. ANNEXES

5.1. Propositions de sujets de projets (en lien ou pas avec le projet réalisé)

Comme nous l'avons vu , notre projet s'est vu freiné par l'apparition de plusieurs problèmes. Nous avons relevé deux problèmes majeurs :

Le premier est celui de la condensation. En effet, la vapeur se condensant sur les parois a eu tendance à gêner l'augmentation de la pression.

Le second problème majeur est celui du matériel. Lors de nos différentes expériences nous avons eu beaucoup de problèmes d'étanchéité dans nos montages ce qui logiquement empêchaient toute augmentation de la pression. De plus, le moyen de chauffe utilisé, à savoir un chauffe-ballon, était peu rapide pour amener l'eau de nos montages à ébullition. Par ailleurs, même sans réussir à obtenir de fortes pressions, les différents tuyaux que nous avons essayé ne résistaient pas.

En définitive, nous nous sommes rendus compte que l'origine de tous ces problèmes était avant tout thermique.

Nous avons donc réfléchi à une solution alternative pouvant à la fois proposer un système par propulsion tout en n'étant pas directement lié à un apport de chaleur par voie thermique.

L'idée d'utiliser un extincteur nous est alors apparue. En effet, ce dernier présente l'avantage d'être conçu pour résister à de fortes pressions internes. De plus le système de valves qu'il propose nous a paru très adapté pour éviter les problèmes de fuite.

Le système que nous avons imaginé est le suivant :

Nous prendrions un extincteur vide et nous ferions en sorte de percer deux trous pour y placer des valves de voiture garantissant l'étanchéité. L'un des trous serait utilisé pour comprimer de l'air dans l'extincteur. Le second trou permettrait de placer un manomètre et ainsi de toujours avoir une sécurité sur la pression dans l'extincteur. Le tuyau placé sur la tête de l'extincteur serait conservé et servirait à évacuer l'air contenu au moment voulu.

Le principe serait alors de comprimer assez d'air pour que la pression dans l'extincteur monte à des valeurs de l'ordre de 5 à 10 bars (en fonction de la capacité de résistance à la pression de l'extincteur). Nous placerions alors l'extincteur sur le chariot et nous n'aurions alors plus qu'à libérer l'air par le tuyau principal. La vitesse de dégagement de l'air devrait alors être suffisante pour réussir à faire avancer le chariot.

Nous n'avons malheureusement pas pu expérimenter pour confirmer si le système pourrait marcher par faute de temps et de moyens. Cependant, notre professeur nous a assuré que nos travaux serviraient à d'autres groupes pour la poursuite du projet.