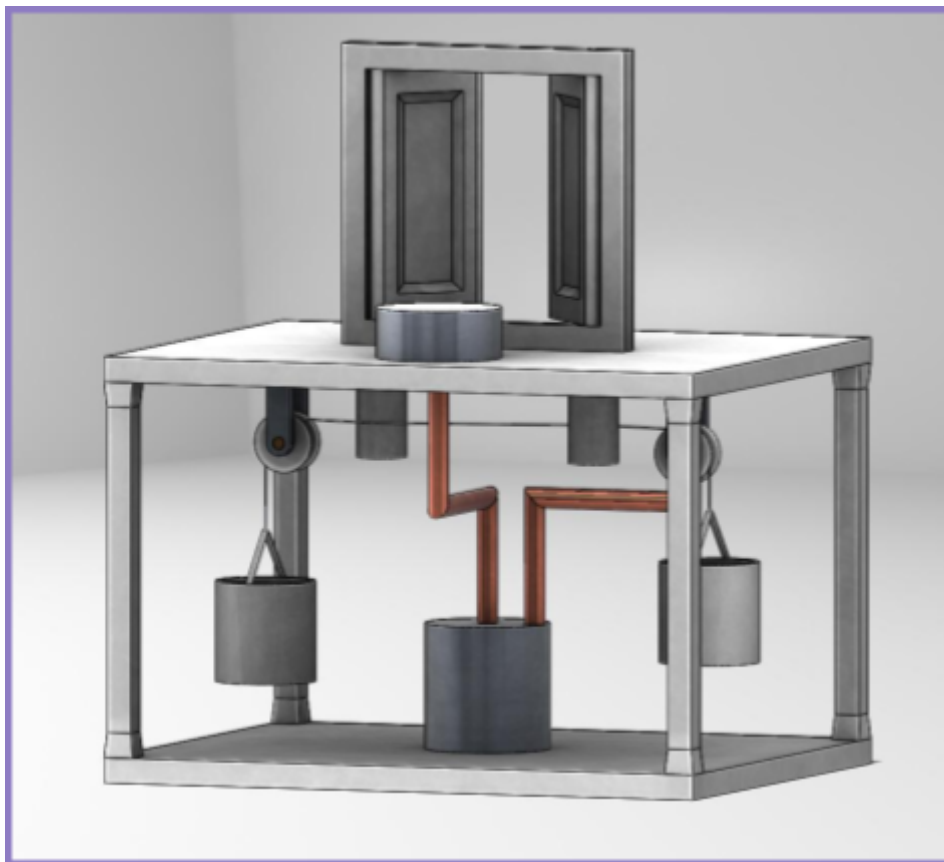


Flamme, air, eau :

Ouverture automatique de porte par Héron d'Alexandrie



Etudiants :

Angelo BOU TANOUS

Gatien MOSQUERON

Elsa LEVAUX

Lisa COUTADEUR

Mathys DAVOUST

Grégoire MAMES

Enseignant-responsable du projet :

Antoine BLAISE

Date de remise du rapport : 17/06/2023

Référence du projet : STPI/P6/2023 – 12

Intitulé du projet :

Flamme, air, eau: ouverture automatique de porte par Héron d’Alexandrie

Type de projet :

Expérimental et bibliographique

Objectifs du projet : ***Comprendre et analyser le mécanisme ancien d’ouverture des portes réalisées par Héron d’Alexandrie dans le but de mettre le système en équations puis de le modéliser. L’objectif final est de se servir de ce travail réalisé en amont pour construire une maquette du modèle afin d’expérimenter les conditions de fonctionnement de ce système***

Mots-clefs du projet : ***Analyse - Compréhension - Modélisation - Pluridisciplinarité***

TABLE DES MATIÈRES

1. Introduction	7
2. Méthodologie / Organisation du travail	8
3. Travail réalisé et résultats	9
3.1. Équations théoriques	9
3.1.1. Contextualisation et analyse du sujet	9
3.1.2. Système thermodynamique	10
3.1.3. Vitesse d'écoulement de l'eau du réservoir de la cuve dans le tuyau	11
3.1.3. Équations thermiques	15
3.1.4. Vitesse d'ouverture des portes	17
3.2. Modélisations	18
3.2.1. Modélisation de la flamme	18
3.2.2. Modélisation du système	22
3.3 Maquette	27
4. Conclusions et perspectives	28
5. Bibliographie	29
6. Annexes	30
6.1. Listings des programmes réalisés	30
6.2. Schémas de montages, plans de conception	34
6.3. Analyse descendante du projet	37

Table des figures

Figure 1: Schéma représentant le système à l'époque d'Héron

Figure 2 : Frise du travail réalisé

Figure 3: Screenshot du diaporama réalisé pour l'organisation

Figure 4: Organigramme sur la répartition du travail

Figure 5: Schéma porte fermée

Figure 6: Schéma porte ouverte

Figure 7: Schéma de l'écoulement du fluide du réservoir à la cuve

Figure 8: Graphique représentant la température en fonction de différentes valeurs de richesse

Figure 9: Graphique représentant l'évolution de certaines espèces chimiques en fonction de la distance du domaine étudié

Figure 10 : Graphique représentant l'évolution du taux de chaleur en fonction de la distance

Figure 11 : Graphique représentant l'évolution l'évolution du taux de chaleur en fonction de la richesse de la flamme

Figure 12 : Esquisse du porte poulie

Figure 13 : Image d'esquisse de la fonction volumique

Figure 14 : Contrainte du sous-assemblage porte

Figure 15 : Image ajustement des portes

Figure 16 : Contrainte assemblage finale

Figure 17 : QR code vidéo

Figure 18 : Rendu réaliste maquette finale légendée

NOTATIONS, ACRONYMES

d_p : diamètre des poulies (mm)

r_c : rayon du cylindre (mm)

h_{eau} : hauteur du volume d'eau déplacé (mm)

m_{eau} : masse de l'eau (kg)

V_{eau} : volume de l'eau (m³)

P_0 : la pression atmosphérique (Pa)

V_{cuve} : volume dans la cuve 4 (m³)

$V_{stagnant}$: volume d'eau stagnant dans la cuve 4 (m³)

T_0 : température initiale de l'air (K)

T_f : température finale (K)

d_s : diamètre du siphon (mm)

h : hauteur entre l'eau à la surface du réservoir d'altitude z_A et la partie supérieure du siphon d'altitude z_B (cm)

H : hauteur entre la partie inférieure du siphon d'altitude z_s et l'eau à la surface du réservoir (cm)

P_{atm} : pression atmosphérique (Pa)

P_A : pression de l'eau dans le réservoir (Pa)

P_S : pression de l'eau dans le siphon (Pa)
(Pa)

P_B : pression de l'eau dans le siphon à l'altitude z_B

v_s : vitesse d'écoulement au niveau de l'altitude z_s (m.s⁻¹)

v_b : vitesse d'écoulement au niveau de l'altitude z_B (m.s⁻¹)

v_A : vitesse d'écoulement au niveau de l'altitude z_A (m.s⁻¹)

S_A : surface de l'eau au-dessus du réservoir (mm²)

S_s : Surface de l'eau dans une section du siphon (mm²)

ρ_{eau} : masse volumique de l'eau à température ambiante et à pression atmosphérique (kg/m³)

g : accélération de la pesanteur (m.s⁻²)

k_m : coefficient de conduction thermique du cuivre (W m⁻¹ K⁻¹)

h_{int} : coefficient de convection thermique intérieur (W m⁻² K⁻¹)

h_{ext} : coefficient de convection thermique extérieur (W m⁻² K⁻¹)

e : épaisseur de tuyau en contact avec la flamme (mm)

T_f : température de la flamme (K)

T_{air} : température de l'air (K)

L_c : largeur du tuyau qui sera en contact avec la flamme (mm)

1. INTRODUCTION

Au cours de ce quatrième semestre de classe préparatoire, il nous a été donné l'opportunité de développer nos compétences de travail en équipe ainsi que de nourrir notre curiosité scientifique en travaillant sur un projet scientifique dans le cadre de l'EC Projet de P6.

Les étudiants de notre groupe ont préféré un sujet de mise en pratique de nos apprentissages qui demande tant de la réflexion et de la compréhension que de l'expérimentation grâce à la réalisation d'une maquette à la fin.

Pour cela, nous allons nous intéresser aux portes réalisées par Héron d'Alexandrie à l'Antiquité. Ces portes étaient situées à l'entrée d'un temple et avaient la particularité d'être ouvertes par la chaleur d'un feu situé sur un autel à l'extérieur du bâtiment. Héron d'Alexandrie était un mathématicien, ingénieur et physicien grec qui a vécu au 1^{er} siècle après J-C. Il est surtout connu pour ses contributions importantes à la mécanique et à l'optique. Il a écrit un traité intitulé « Mécanique », qui est considéré comme le premier traité sur ce sujet écrit par un auteur ancien. Dans ce traité Héron décrit plusieurs machines, y compris des catapultes, des pompes, des horloges à eau et des machines à vapeur. Sa machine à vapeur, connue sous le nom de « aeolipile », a été la première à être utilisée pour produire un mouvement circulaire.

Le système de la porte fonctionnait en utilisant la chaleur produite par le feu de l'autel. Une fois que le feu était allumé et que le sacrifice avait été effectué, l'air chaud s'accumulait dans un compartiment, ce qui créait une dilatation de l'air qui poussait l'eau d'un réservoir dans un autre. Sous la masse de l'eau le second réservoir descendait et entraînait une chaîne qui elle-même faisait entrer en rotation deux pivots reliés aux portes et ces dernières s'ouvraient automatiquement.

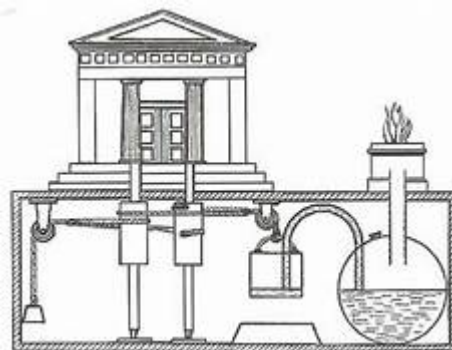


Figure 1: Schéma représentant le système à l'époque d'Héron

Au cours de ce projet, il a donc fallu chercher dans un premier temps la modélisation théorique de ce système à l'aide des équations mécaniques, thermodynamiques et de transfert thermique. Puis un intérêt a été porté sur la modélisation numérique de la flamme et des éléments du système dans le but final de réaliser une maquette.

2. MÉTHODOLOGIE / ORGANISATION DU TRAVAIL

Afin de mener à bien ce projet, il a été primordial de mettre en place une bonne répartition du travail dans le but de pouvoir optimiser notre temps et de réaliser toutes les tâches qui avaient été décidées.

Ainsi, il a fallu dans un premier temps déterminer les enjeux et les objectifs de ce projet en vue d'établir un plan général de ce qu'il était question de réaliser. Pour ce faire, il a été question de chercher à remonter le déroulé du projet : le but final du projet était la réalisation d'une maquette et il a donc fallu déterminer les étapes intermédiaires. Le travail a ainsi été réparti en 3 grands axes : une étude théorique afin de résoudre les équations concernant les fluides (eau et air) dans le système, une modélisation pour obtenir les données inhérentes à la flamme et une modélisation du système afin de pouvoir par la suite faire la maquette. Pour la partie théorique, Lisa, Grégoire, Mathys et Elsa se sont penchés sur la compréhension du projet, la thermodynamique, la vitesse d'écoulement de l'eau dans le système, le transfert thermique ainsi que la vitesse d'ouverture des portes. Angelo et Gatien se sont attelés à la modélisation : Angelo sur Cantera, qui lui fut conseillée par notre enseignant responsable du projet, pour modéliser la flamme et Gatien en CAO sur SolidWorks qu'il a appris à maîtriser grâce à son choix d'EC électif.

En effet, de manière générale, le fond du travail consistait à comprendre et à mettre en équation le chemin qui relie la flamme à l'ouverture des portes afin de pouvoir finalement, une fois la maquette réalisée, utiliser la bonne puissance de flamme pour faire s'ouvrir les portes. Ainsi, chaque étape de ce projet s'inscrit dans ce but profond, que ce soit l'aspect théorique de la mise en équation ou le côté plus pratique des modélisations.

Voici donc une frise chronologique du travail réalisé :

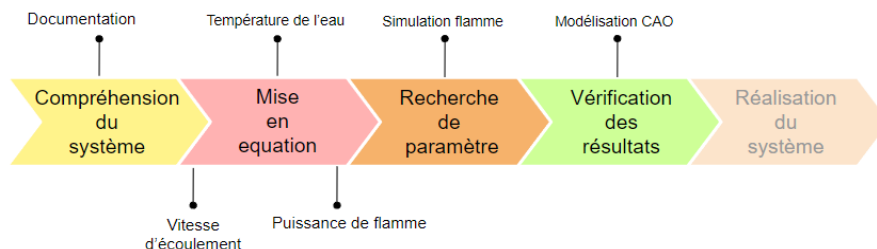


Figure 2 : Frise du travail réalisé

De plus, dans le but de maîtriser l'avancée du projet et de ne pas se retrouver pris par le temps, un agenda des tâches à faire à été réalisé et l'ensemble du groupe a essayé de s'y cantonner le plus possible.

(Répartition des semaines)

numéro de la séance	Avancement prévu
1	Appropriation du thème et recherches bibliographiques
2	Calculs théoriques (mécanique et thermodynamiques) des équations
3-6	Planification de la réalisation de la maquette et début de la simulation de la flamme
7-8	Simulation de la flamme finie
9	Maquette réalisée et tentative de d'autres systèmes ne nécessitant pas de flamme
10	Réalisation d'un système alternatif à la flamme
13	Réalisation du poster et du rapport. Oral blanc

Figure 3: Screenshot du diaporama réalisé pour l'organisation

Voici un organigramme représentant les tâches effectuées et les personnes concernées, une analyse descendante représentant l'entièreté des tâches ainsi que leurs liens les unes entre les autres à également été ajoutée en annexe.

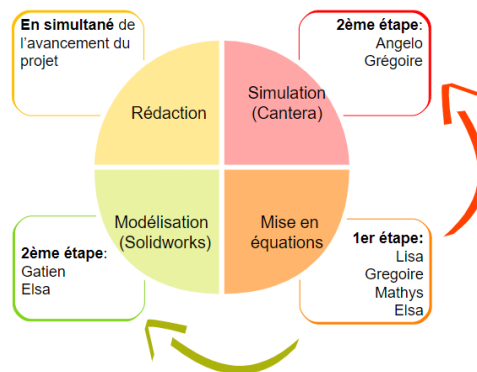


Figure 4: Organigramme sur la répartition du travail

3. TRAVAIL RÉALISÉ ET RÉSULTATS

3.1. Équations théoriques

3.1.1. Contextualisation et analyse du sujet

Afin de mieux comprendre ce système complexe et de le modéliser physiquement, ce projet a commencé par la pose d'équations théoriques visant à quantifier le sujet. Il est donc premièrement question d'analyser le sujet.

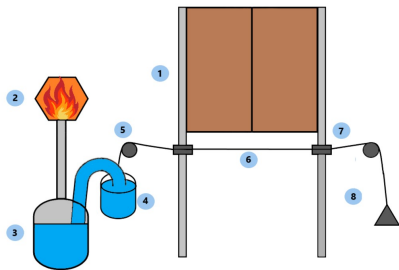


Figure 5: Schéma porte fermée

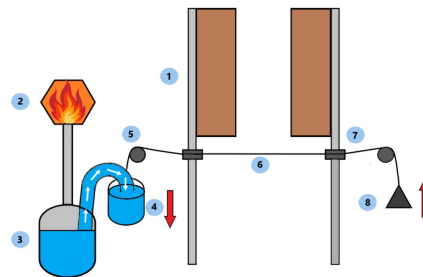


Figure 6: Schéma porte ouverte

Ainsi, le système est composé de deux cuves (3 et 4) qui jouent un système de balance. La première cuve (3) contenant un fond d'eau et de l'air est en contact avec le brasier (2) par un tuyau. L'air qui est en circuit fermé dans cette partie (hermétique au niveau de la cuve puisque le tuyau menant à la seconde cuve (4) est plongé dans l'eau en bas) se réchauffe donc dans le tuyau au niveau de la flamme et ainsi se dilate. Ceci faisant, il vient pousser un volume d'eau présent dans le fond de la cuve qui se déplace donc vers la seconde cuve. Cette cuve est reliée à un contre-poids (8) par un fil/courroie (6) qui passe par un système de poulies (5) et qui s'enroule autour des pivots. Ces pivots sont solidaires des axes des portes, les faisant ainsi pivoter quand cette seconde cuve monte ou descend.

A la position fermée, la seconde cuve est plus légère que le contre-poids et est donc plus haute, sa hauteur étant bloquée par la rotation maximale des portes dans leur cadre. Lorsque que le feu est allumé, que l'air chauffe et que l'eau est déplacée, la masse de cette seconde cuve augmente et elle descend donc jusqu'à arriver à la même hauteur que le contre-poids. On atteint ainsi un nouvel équilibre.

3.1.2. *Système thermodynamique*

Il est question ici de déterminer à quelle température l'air doit-il être chauffé afin de pouvoir calculer la puissance nécessaire à la flamme. Il sera nécessaire une fois la température finale de l'air T_f déterminée de passer par une équation de transfert thermique, calcul que nous réaliserons par la suite. Ainsi, l'objectif est de déterminer le volume d'eau déplacé afin d'ensuite appliquer le modèle des gaz parfait à l'air : une fois ce volume déterminé, il sera soustrait au volume d'air compris dans la cuve 3, de même que le volume d'eau stagnant dans le fond et permettant l'étanchéité du système.

Soit d_p le diamètre des pivots (7). Pour passer de la position fermée à la position ouverte, la poulie effectue un quart de tour.

La longueur de fil déplacée équivaut donc à un quart du périmètre d'un cercle, soit : $d_p \pi / 4$. Or, les deux poids étant originellement sur la même ligne de niveau, ils s'en éloignent tous les deux autant, le récipient remonte donc de $d_p \pi / 8$.

Ainsi, le niveau d'eau monte d'autant que le récipient est descendu puisque le récipient se remplit. Prenons r_c le rayon de la seconde cuve. On a donc un volume d'eau déplacé qui équivaut au volume du cylindre de rayon r_c et d'hauteur $h_{eau} = d_p \times \frac{\pi}{8} mm$, soit :

$$\text{eq.1} \quad V = \pi r_c^2 d_p \frac{\pi}{8} m^3$$

et comme la masse volumique de l'eau vaut:

$$\rho_{eau} = 1 kg.L^{-1}$$

On a donc

$$m_{eau} = V_{eau}$$

Par définition, il y a un transfert thermique par la paroi du haut du tuyau, la dilatation de l'air n'est donc pas adiabatique : on ne peut pas utiliser Laplace. Utilisons donc la loi des gaz parfaits qu'on applique à l'air : $PV = nRT$. Soit P^0 la pression atmosphérique. On établit donc les deux équations, pour la cuve secondaire sans eau puis avec de l'eau dedans.

On a donc :

- cuve remplie d'eau :

$$\text{eq.2} \quad P^0(V_{cuve} - (V_{stagnant} + \pi r_c^2 d_p \frac{\pi}{8})) = nRT_0 P^0 \rightarrow \text{portes fermées}$$

- cuve vidée d'eau :

$$\text{eq.3} \quad P^0(V_{cuve} - V_{stagnant}) = nRT_f \rightarrow \text{portes ouvertes}$$

On obtient ainsi grâce à **eq.2** et **eq.3** en les combinant :

$$\text{eq.4} \quad T_f = \frac{((V_{cuve} - V_{stagnant})T_0)}{(V_{cuve} - (V_{stagnant} + \pi r_c^2 d_p \frac{\pi}{8}))} K$$

De plus, T_f doit rester inférieure à $100^\circ C$ car l'eau doit rester à l'état liquide.

Il sera donc question par la suite de réaliser un bilan de transfert thermique pour la transmission de chaleur entre la chambre avec le feu et le tuyau avec l'eau, mais nous allons d'abord nous intéresser à la vitesse d'écoulement de l'eau de la cuve dans le tuyau

3.1.3. Vitesse d'écoulement de l'eau du réservoir de la cuve dans le tuyau

Précédemment, la quantité d'eau transportée a été déterminée. L'objectif, maintenant, est de connaître à quelle vitesse celle-ci va s'écouler.¹

¹ voir sources [2],[3],[4] en annexe

Une fois cette vitesse définie, la vitesse à laquelle les portes s'ouvriront pourra être trouvée. En effet, un écoulement trop rapide engendrerait une ouverture des portes bien trop brusque et l'inverse n'est pas envisageable non plus car l'ouverture serait beaucoup trop lente. Pour déterminer ces valeurs, certains paramètres concordant avec l'échelle de réalisation de la maquette, ont été fixés.

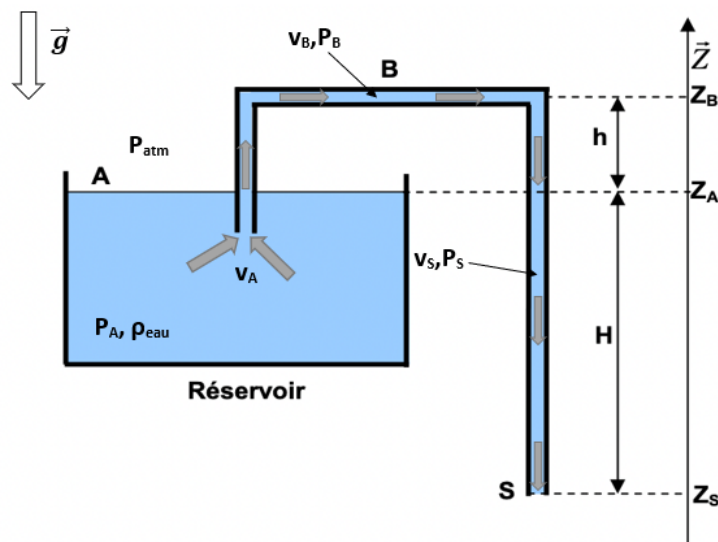


Figure 7: Schéma de l'écoulement du fluide du réservoir à la cuve

Ainsi, le siphon possède un diamètre d_s de 8 mm. Conformément au schéma ci-dessus, la hauteur h entre l'eau à la surface du réservoir d'altitude z_A et la partie supérieure du siphon d'altitude z_B est de 2,5 cm tandis que la hauteur H entre la partie inférieure du siphon d'altitude z_s et l'eau à la surface du réservoir.

Ce n'est pas tout car des suppositions ont également été émises pour pouvoir simplifier les calculs ou appliquer un théorème. C'est pourquoi, par la suite, l'eau sera supposée comme un fluide parfait et la pression atmosphérique P_{atm} égale à $10^5 Pa$, exactement comme la pression de l'eau dans le réservoir et la pression de l'eau dans le siphon.

Ensuite, la vitesse d'écoulement v_s au niveau de l'altitude z_s a été supposée la même que la vitesse d'écoulement v_b au niveau de l'altitude z_B . Concernant la vitesse d'écoulement v_A au niveau de l'altitude z_A , elle a été supposée négligeable.

En effet, à l'aide du modèle de la maquette sur Solidworks, la surface S_A de l'eau au-dessus du réservoir a été trouvée égale à $1862,96 \text{ mm}^2$. Celle-ci est très grande devant la surface S_s de l'eau dans une section du siphon qui est de $38,48 \text{ mm}^2$. Ainsi, par cette différence de surfaces, la vitesse d'écoulement au niveau de l'altitude z_A sera tellement lente

devant celle à la sortie d'altitude z_s qu'elle pourra être négligée. Cela permet ainsi la conservation du débit.

Il est important de noter la prise en considération de la masse volumique ρ_{eau} de l'eau, à température ambiante et à pression atmosphérique, égale à 1 kg/m^3 et celle de l'accélération de la pesanteur g égale à $g = 9,81 \text{ m.s}^{-2}$.

Précédemment, l'application d'un théorème qui pourrait aider dans la résolution de ce problème a été évoquée. Il s'agit du théorème de Bernoulli qui repose sur le fait que la somme de la pression, de la densité volumique d'énergie cinétique et de la densité volumique d'énergie potentielle est constante le long d'une ligne de courant. En d'autres termes, ce théorème permet la conversion de l'énergie mécanique d'une particule le long d'une ligne de courant. Il est d'ailleurs très utile pour les études d'écoulements de fluide le long de tuyaux ou autour d'objet dans l'eau et également dans l'air puisqu'il permet d'étudier les phénomènes de portance d'une aile d'avion ou bien le fonctionnement d'une tuyère de propulsion.

Pour pouvoir appliquer ce théorème il a fallu supposer que le fluide incompressible de viscosité négligeable était en écoulement stationnaire, c'est-à-dire que ses propriétés telles que sa pression ou sa vitesse ne varient pas au cours du temps.

L'écoulement doit également se faire le long d'une ligne de courant qui est une ligne imaginaire le long de laquelle se déplace chaque particule fluide.

Enfin, l'énergie potentielle gravitationnelle doit rester constante le long de la ligne de courant.

Il faut tout de même souligner le fait que ce théorème ne donne qu'une approximation puisque dans la réalité, d'autres paramètres tels que des phénomènes de frottements ou de turbulences, qui sont des mouvements désordonnés et chaotiques du fluide, pourraient changer la manière dont ce dernier s'écoule. Ces facteurs seraient donc à prendre en considération en utilisant des modèles plus complexes.

Résumé des suppositions/données :

- Le siphon est de diamètre: $d = 8 \text{ mm}$
- Le fluide, l'eau, est considéré comme parfait et incompressible
- Le niveau du fluide varie lentement
- écoulement le long d'une ligne de courant
- La hauteur h vaut: $h = 2,5 \text{ cm}$
- La hauteur H vaut: $H = z_A - z_s = 10 \text{ cm}$

- masse volumique de l'eau à température ambiante et à pression atmosphérique:
 $\rho = 1 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$
- accélération de la pesanteur: $g = 9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$
- $P_A = P_S = P_{atm} = 10^5 \text{ Pa}$
- $v_A = 0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$
- $v_S = v_B$

Calcul de la vitesse d'écoulement dans le siphon :

D'après le théorème de Bernoulli :

$$\text{eq.5} \quad P + \rho \times \frac{v^2}{2} + \rho g Z = \text{constante}$$

Appliquons **eq.5** dans notre cas:

$$P_S + \rho \times \frac{v_S^2}{2} + \rho g Z_S = P_A + \rho \times \frac{v_A^2}{2} + \rho g Z_A$$

$$\Leftrightarrow \rho \times \frac{v_S^2}{2} = P_A - P_S + \rho \times \left(\frac{v_A^2}{2} + g(Z_A - Z_S) \right)$$

$$\Leftrightarrow v_S^2 = \frac{2(P_A - P_S)}{\rho} + v_A^2 + 2gH$$

Or $P_A = P_S = P_{atm}$ et $v_A = 0$, ainsi:

$$\text{eq.6} \quad v_S = \sqrt{2gH}$$

On retrouve l'expression de la vitesse de Torricelli.

$$\text{AN: } v_S = \sqrt{2 \times 9,81 \times 0,1} = 1,4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

Cela donne donc une idée de la vitesse d'écoulement du fluide dans l'entièreté du siphon puisque $v_S = v_B$.

Il s'agit dorénavant de calculer le débit volumique.

Calcul du débit volumique :

$$\text{eq.7} \quad q_v = v_S \times \frac{\pi d^2}{4}$$

$$\text{AN: } q_v = 7 \times 10^{-5} \text{ L.s}^{-1}$$

Un débit volumique assez faible est alors obtenu. Ceci est cohérent avec l'échelle de notre modèle. Vis à vis de cette échelle, la question suivante peut alors être posée : La différence de pression entre les altitudes z_B et z_S peut-elle être vraiment considérée comme négligeable ?

Calcul de la pression entre B et S :

En appliquant de nouveau l'**eq.5** on obtient:

$$P_B + \rho \times \frac{v_B^2}{2} + \rho g z_B = P_S + \rho \times \frac{v_S^2}{2} + \rho g z_S$$

$$\Leftrightarrow P_B = P_S + \rho \times \frac{v_S^2}{2} + \rho g z_S - \rho \times \frac{v_B^2}{2} - \rho g z_B$$

$$\Leftrightarrow P_B = P_S + \rho \left(\frac{v_S^2}{2} - \frac{v_B^2}{2} + g(z_S - z_B) \right)$$

$$\text{Or, } P_S = P_{atm}, v_S = v_B, z_S - z_B = -(H + h)$$

On obtient ainsi:

$$\text{eq.8} \quad P_B = P_S - \rho \times g(H + h)$$

$$\text{AN : } P_B = 10^5 - 1 \times 9,81(0,1 + 0,025) = 99998,8 \text{ Pa} \approx 1 \text{ bar}$$

La différence de pression entre les différentes parties du siphon peut donc être négligée puisque celle-ci est quasiment la même.

L'étude de la mécanique des fluides étant réalisée, l'objectif maintenant est de savoir par quel moyen l'eau va pouvoir se mettre en mouvement pour circuler dans le tuyau. Pour comprendre ce phénomène, il s'agirait donc d'étudier les transferts thermiques.

3.1.3. *Équations thermiques*

1. Cas sans convection:

La flamme étant à température constante, le cas quasi-stationnaire peut être pris en considération.

Le profil de la conduction est donc affine et $T(x) = ax + b$

Il s'en suit :

$$\vec{\varphi}_{cond} = -k_m \vec{grad}(T(x)) \quad \text{avec } T(x) = \frac{T_{air} - T_f}{e} x + T_f$$

Le calcul du flux est donné par l'équation suivante :

$$\text{eq.9} \quad \phi = \int \int_S \vec{\varphi}_{cond} \cdot \vec{u}_x dS = \int \int_S -k_m \frac{T_{air} - T_f}{e} \cdot \vec{u}_x \cdot \vec{u}_x dS = k_m \frac{T_{air} - T_f}{e} S \quad (\text{en W})$$

On a finalement une équation pour la puissance de la flamme dans le cas sans prendre en considération la convection :

$$\text{eq.10} \quad P = k_m \frac{T_{air} - T_f}{e} S \quad \text{W}$$

2. Cas avec convection:

Pour le cas avec convection l'hypothèse de quasi-stationnarité est toujours valable et cela donne donc $P = P_{cond} = P_{conv,int} = P_{conv,ext}$

Il s'en suit :

$$\bullet \quad \vec{\varphi}_{conv,int} = h_{int} (T'_{air} - T_{air}) \vec{u}_x$$

$$\Rightarrow \phi_{conv,int} = \int \int_S h_{int} (T'_{air} - T_{air}) u_x \cdot u_x dS = h_{int} (T'_{air} - T_{air}) S \quad (\text{en W})$$

$$\bullet \quad \vec{\varphi}_{conv,ext} = h_{ext} (T_f - T'_f) (-u_x)$$

$$\Rightarrow \phi_{conv,ext} = \int \int_S h_{ext} (T_f - T'_f) (-u_x) \cdot u_x dS = h_{ext} (T'_f - T_f) S \quad (\text{en W})$$

$$\bullet \quad \vec{\varphi}_{cond} = -k_m \vec{grad}(T(x)) \quad \text{avec } T(x) = \frac{T'_{air} - T'_f}{e} x + T'_f$$

$$\Rightarrow \phi_{cond} = \int \int_S -k_m \frac{T'_{air} - T'_f}{e} u_x \cdot u_x dS = k_m \frac{T'_f - T'_{air}}{e} S \quad (\text{en W})$$

Pour mettre en relation les flux trouvés précédemment l'équation suivante peut être utilisée :

$$\text{eq.11} \quad T_f - T_{air} = T_f - T'_f + T'_f - T'_{air} + T'_{air} - T'_{air}$$

$$\Leftrightarrow T_f - T_{air} = \frac{P}{h_{ext}S} + \frac{Pe}{k_{mt}S} + \frac{P}{h_{int}S}$$

$$\Leftrightarrow T_f - T_{air} = P\left(\frac{1}{h_{ext}S} + \frac{e}{k_{mt}S} + \frac{1}{h_{int}S}\right)$$

$$\Leftrightarrow T_f = P\left(\frac{1}{h_{ext}S} + \frac{e}{k_{mt}S} + \frac{1}{h_{int}S}\right) + T_{air} \quad \text{K}$$

Finalement l'équation de la puissance de la flamme en prenant en considération la convection est :

$$\text{eq.12} \quad P = \frac{T_f - T_{air}}{\frac{1}{h_{ext}S} + \frac{1}{k_{mt}S} + \frac{1}{h_{int}S}} \quad \text{W}$$

3. Nombre de Biot

Maintenant une analyse du nombre de Biot est nécessaire pour savoir si la convection a réellement une importance dans le calcul ou non.

Le nombre de Biot est : $B_i = \frac{hL_c}{k_m}$

Ici: k_m correspond à la conductivité thermique du cuivre donc $380 \text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$

L_c correspond à la largeur du tuyau qui sera en contact avec la flamme donc 6mm

h correspond au coefficient global de transfert thermique de l'air et vaut donc $20 \text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$

Finalement l'application numérique nous donne $B_i = \frac{20 \times 0,006}{380} \approx 0,000316$

Or le résultat est très petit devant 1.

Conclusion, les effets de convection n'ont aucuns impacts dans le problème donc le cas sans convection peut être considéré valable. On retiendra donc **eq.11**.

3.1.4. Vitesse d'ouverture des portes

A la suite de chaque partie étudiée précédemment, il est alors possible de déterminer la vitesse d'ouverture des portes.

En effet, la partie transfert thermique engendre l'écoulement de l'eau du réservoir vers la cuve à travers le siphon. Lorsque la somme de la masse d'eau et celle de la cuve sont supérieures au contrepoids présent à l'autre bout du fil, les portes commencent à s'ouvrir.

Il s'agit d'un problème dynamique, il est donc nécessaire d'utiliser le principe fondamental de la dynamique qui dit que la somme des forces extérieures est égale à l'accélération multipliée par la masse. Cependant, la masse d'eau dans la cuve varie en fonction du temps. La masse est donc une fonction du temps.

En appliquant le principe fondamental de la dynamique à ce système dont les seules forces prises en compte sont la tension du fil relié à la poulie et le poids de la cuve servant de contrepoids, il vient une équation différentielle du premier ordre avec second membre et avec coefficient non constant. Il est nécessaire d'avoir des connaissances avancées pour résoudre une équation différentielle de ce type avec des coefficients non constants.

Suite à cela, si l'équation parvient à être résolue, elle donnera une idée de la vitesse de la descente de la cuve. Il faudrait ensuite prendre en compte la puissance de la flamme, les frottements dûs au fil et à la poulie ainsi que les frottements solides entre la porte et le bâti de la structure. Tous ces éléments apportent encore des complications qui impliquent forcément une résolution numérique car il semble compliqué de trouver un résultat convenable manuellement.

Bien que la vitesse d'ouverture des portes soit quelque chose de pertinent dans ce rapport et qu'elle ait été réfléchi, elle n'a pas pu être déterminée par manque de notions.

Néanmoins, il reste toujours utile de s'intéresser à la modélisation de la flamme et tenter de calculer la puissance de la flamme qui permettra d'ouvrir les portes du temple.

3.2. Modélisations

3.2.1. *Modélisation de la flamme*

La modélisation d'une flamme est un problème complexe qui couvre une grande importance dans de nombreux domaines scientifiques. L'étude des caractéristiques d'une flamme, telles que la vitesse de propagation, la température et la composition des espèces réactives, représente une importance cruciale pour comprendre les mécanismes de combustion. Dans le cadre d'un tel projet, il est intéressant de modéliser une flamme 1D afin d'observer les caractéristiques importantes liées à cette flamme en fonction d'une réaction spécifique. Ici, l'intérêt principal est d'obtenir la température à fournir en entrée des équations thermodynamiques. Pour aller plus loin, il est possible de calculer le taux de chaleur dégagé, ce qui permettra d'en déduire la puissance de la flamme et la vitesse d'ouverture des portes par exemple.

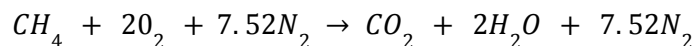
Pour résoudre ce problème de modélisation de flamme, il est possible d'utiliser la bibliothèque Cantera de Python sur Jupyter Notebook. Cantera est une bibliothèque logicielle open source spécialisée dans la modélisation 0D et 1D des processus de combustion et de la chimie réactive. Elle propose de nombreux outils pour simuler et analyser les systèmes réactifs complexes, notamment les flammes. La bibliothèque permet également de manipuler les propriétés thermodynamiques et le transport des espèces chimiques impliquées dans la

combustion, ce qui est essentiel pour représenter de manière précise et réaliste les processus physico-chimiques se déroulant au sein d'une flamme.

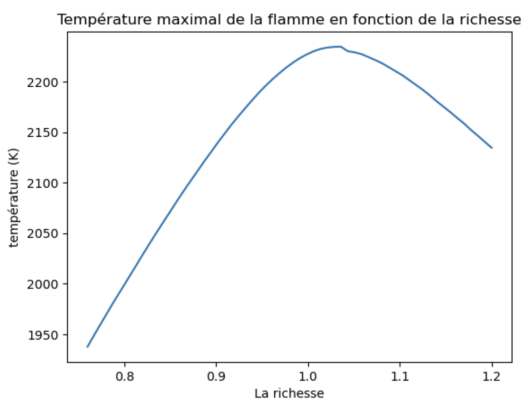
Afin de modéliser une première flamme 1D, il est important de respecter les grandes étapes clés :

- Spécifier les espèces chimiques impliquées dans cette combustion à savoir, les réactifs, les produits et éventuellement les espèces intermédiaires.
- Définir le mécanisme de réaction. Cantera prend plusieurs formats de mécanismes de réaction : YAML, CTI, XML, etc.
- Définir les conditions initiales de simulation de la flamme. Cette étape permet ainsi de préciser la température initiale, la pression, la composition initiale des espèces chimiques et la taille de la flamme.
- Résoudre le système de réactions chimiques dans la flamme.
- Analyser et visualiser les résultats de la simulation notamment grâce à la bibliothèque matplotlib.pyplot.

Pour le projet, la combustion simulée pour un premier cas d'étude est celle du méthane (CH_4) avec le dioxygène O_2 . Ce carburant est chimiquement simple dont la cinétique est bien documentée. L'équation de réaction dans les proportions stoechiométriques de cette combustion est :



Après avoir fixé les conditions initiales à savoir, la température (300 K), la pression (pression atmosphérique), et le mécanisme cinétique ("gri30.yaml"), voici un graphique représentant la température maximale en fonction de la richesse de la flamme.



Il est observable qu'en fonction de la richesse de la flamme, la température maximale augmente ou diminue. Cette température maximale est observée au niveau du front de flamme, c'est-à-dire de la zone où la combustion se produit.

Ici, la température maximale est atteinte pour une valeur de 2 234 Kelvin et ce, pour une richesse de 1,03.

Figure 8 : Graphique représentant la température en fonction de différentes valeurs de richesse

Il est aussi possible de visualiser quelques résultats tels que l'évolution de certaines espèces chimiques et la richesse de la réaction.

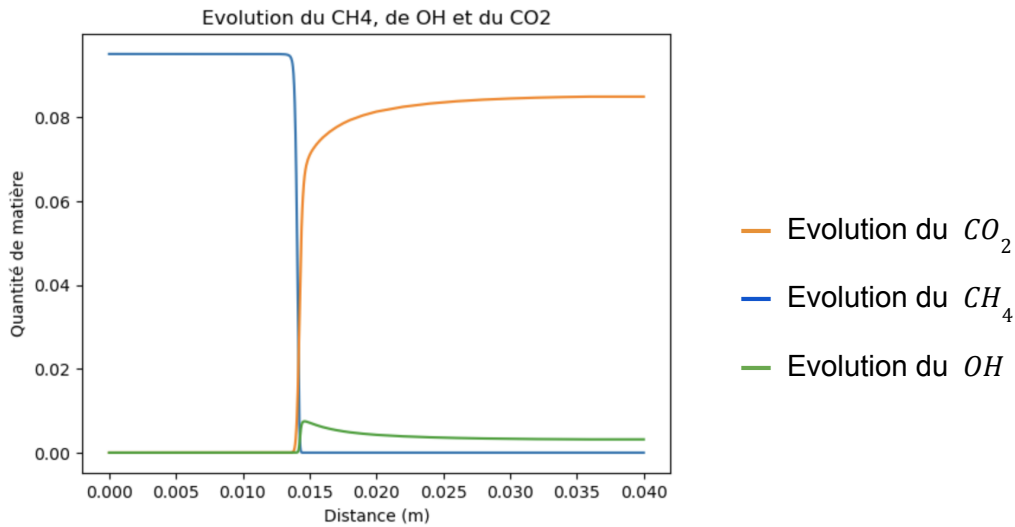


Figure 9 : Graphique de l'évolution de certaines espèces chimiques en fonction de la distance du domaine étudié

Ce graphique permet d'avoir une idée de la longueur du front de flamme. Cette zone est désignée par la région de transition entre les réactifs et les produits dans une réaction de combustion. Ici, cette région se situe entre le début de la disparition du CH_4 et le début de l'apparition du CO_2 .

Pour observer ce front de flamme d'une manière différente, il est ingénieux de tracer le taux de chaleur dégagé en fonction de la distance.

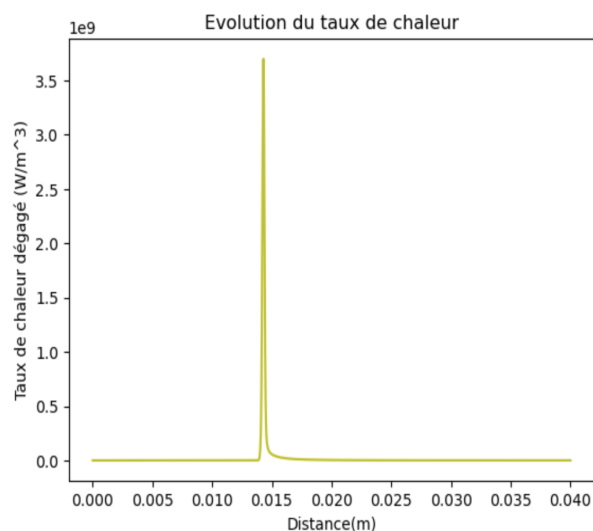


Figure 10 : Graphique de l'évolution du taux de chaleur en fonction de la distance

Ce graphique est cohérent avec le graphique ci-dessus. En effet, il est observable que le front de flamme se situe environ entre 0,0140 et 0,0145 mètres soit d'une distance de 500 micromètres.

Par ailleurs, l'ordre de grandeur du taux de chaleur dégagé peut être critiquable puisque celui-ci correspond à celui d'une réaction nucléaire (10^9 W/m^3). Néanmoins, l'unité est en Watt par mètre cube et ici le front de flamme n'est que de l'ordre des micromètres donc en pratique cela est totalement envisageable.

Pour finaliser la modélisation de la flamme, il peut être bénéfique de pousser notre simulation en observant le taux de chaleur dégagé en fonction de différentes valeurs de la richesse φ définie par la formule suivante :

eq.13
$$\varphi = \frac{\left(\frac{\text{Masse de combustible}}{\text{Masse d'air}}\right)_{\text{réel}}}{\left(\frac{\text{Masse de combustible}}{\text{Masse d'air}}\right)_{\text{stoechiometrique}}} .$$

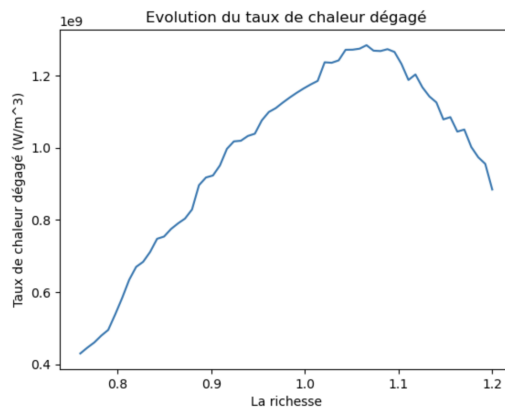


Figure 11 : Graphique de l'évolution du taux de chaleur en fonction de la richesse (φ) de la flamme

Ce graphique permet ainsi d'obtenir la valeur de la richesse φ pour laquelle le taux de chaleur dégagé est maximal. Dans le cas étudié, ce taux de chaleur Q maximal est obtenu pour $\varphi = 1.07$ et atteint une valeur d'environ $1,3 \cdot 10^9 \text{ W/m}^3$.

De ce fait, il est maintenant possible de calculer la puissance de cette flamme. Il existe une formule connue pour ce calcul : $P = Q \times H$, avec Q le débit de combustible en $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$ et H le pouvoir calorifique inférieur en $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$. Néanmoins, dans la modélisation faite sur Cantera, le taux de chaleur est donné en W/m^3 et non pas sous forme de débit. Une alternative est de calculer cette puissance grâce à la formule suivante: $P = Q \times V$, avec Q en W/m^3 et V le volume de la flamme en m^3 .

Étant donné que la modélisation de la flamme est faite pour une seule dimension, nous faisons l'hypothèse que la flamme est de forme sphérique de rayon égal au front de flamme soit 500 micromètres. On obtient ainsi une puissance égale à 0,68W. Ce résultat paraît trop peu élevé mais est cohérent avec la longueur du front de flamme. Il peut être intéressant d'obtenir une valeur de Q en $kg.s^{-1}$ afin d'utiliser la première équation. Cette manipulation permettra de valider ou de rejeter l'hypothèse d'approximation d'une flamme sphérique.

Grâce à cette puissance, il est ensuite possible de calculer la vitesse d'ouverture des portes en prenant en considération les frottements et le poids des portes. La vitesse peut être ajustée en choisissant une richesse plus ou moins faible, qui agira forcément sur le taux de chaleur. A partir de ce taux de chaleur, il est possible d'en déduire la puissance de la flamme.

Par ailleurs, il est bon de réaliser une deuxième modélisation en utilisant la réaction de combustion de l'éthanol. Cela permettra d'obtenir de différents résultats que l'on pourra comparer avec notre modèle.

Bien que cette modélisation soit primordiale dans la conception du projet, la modélisation 3D du système complet l'est aussi.

3.2.2. Modélisation du système

En effet, la modélisation en trois dimensions joue un rôle essentiel dans la réalisation de projets en offrant une approche virtuelle et détaillée pour la conception et la visualisation d'un produit. Grâce au logiciel de CAO², il est possible de créer des représentations en trois dimensions des différents composants et des assemblages, permettant ainsi une exploration approfondie du système avant même sa concrétisation physique. Cette capacité à modéliser numériquement offre de nombreux avantages en termes de dimensionnement, de conception et d'analyse de système, ce qui en fait une étape cruciale pour la compréhension et la réalisation de projets techniques.

SolidWorks est un logiciel de CAO utilisé pour la modélisation 3D et la création de dessins techniques. Il offre une large gamme d'outils et de fonctionnalités pour concevoir des pièces mécaniques, des assemblages et des plans détaillés. Ce logiciel permet de créer rapidement et précisément des modèles virtuels, d'effectuer des simulations cinématique et d'analyser les performances mécaniques d'un produit avant sa fabrication. Dans le cadre de ce projet nous avons choisi SolidWorks pour son approche intuitive et rapide à prendre en main, de plus nous avons pu profiter d'une approche de ce logiciel dans l'EC électif CT13.

L'objectif de ce projet étant en partie la réalisation d'une maquette physique, il était nécessaire de commencer par la réalisation d'une maquette numérique afin de pouvoir analyser en détail le fonctionnement du système, d'identifier les points critiques de

² CAO: Conception Assistée par Ordinateur

fonctionnement et de prévoir d'éventuels problèmes de conception. De plus grâce au logiciel SolidWorks nous avons eu la possibilité de créer directement à partir des pièces modélisées des plans détaillés pour la conception de la maquette réelle.

Dans la suite de ce rapport, nous détaillerons les étapes de la conception de la maquette 3D, les aspects spécifiques de notre modélisation ainsi que les problèmes que nous avons pu rencontrer.

La première étape de la conception a été de lister toutes les pièces présentes dans le système (bâti, axe de porte, poulie, etc.), ainsi que de séparer le système en sous-assemblages fonctionnels, c'est-à-dire regrouper les pièces qui vont être fixées ensemble dans des fichiers distincts afin de faciliter l'assemblage final. Voici les groupes de sous-assemblages qui ont été retenus.

<ul style="list-style-type: none"> - Structure : <ul style="list-style-type: none"> - Plaque support (x2) - Pilier (x4) 	<ul style="list-style-type: none"> - Transfert de rotation : <ul style="list-style-type: none"> - Poulie (x2) - Pivot accroché à l'axe de porte (x2) - Fil
<ul style="list-style-type: none"> - Portes : <ul style="list-style-type: none"> - Cadran de porte - Porte (x2) - Axe de porte (x2) 	<ul style="list-style-type: none"> - Système hydraulique <ul style="list-style-type: none"> - Tuyaux - Cuve réservoir eau - Cuve contrepoid (x2)

La seconde étape consiste à rechercher les pièces qui pourraient être déjà présentes dans le commerce (tuyaux en cuivre, poulie) afin d'avoir une première idée des dimensions réelles de notre système. Après avoir eu une idée des dimensions globale de notre système, vient la création des composants qui ont été listés précédemment.

Tout d'abord, il faut créer une esquisse avec des cotations. Cette esquisse servira de base pour la création du volume.

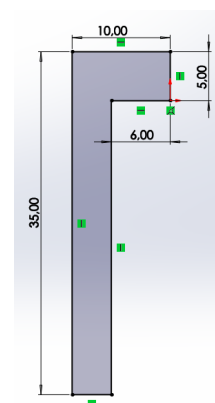
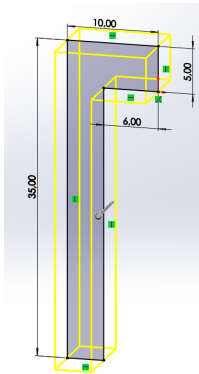


Figure 12: Esquisse du porte poulie



Il faut ensuite appliquer une fonction volumique d'extrudage de matière afin d'obtenir une pièce volumique.

Figure 13: Image d'esquisse de la fonction volumique

L'une des difficultés ici était de dimensionner correctement les pièces pour que l'ensemble soit cohérent, en effet il n'est pas utile d'avoir une poulie d'un diamètre trop important. Étant donné que nous n'avons pas de plan, cette étape prend particulièrement du temps car il faut se mettre d'accord sur la taille de chaque composants du système.

Une fois cette étape terminée, vient la création des sous-assemblages. C'est à ce moment que l'on se rend compte si notre dimensionnement est correct ou non, et si certaines pièces ne correspondent pas il faut alors effectuer des modifications pour que tout fonctionne parfaitement.

L'image ci contre illustre les contraintes entre les différents composants du sous-assemblage des portes. Ces premières contraintes définissent les limites physiques du fonctionnement des portes, les angles limites permettant de déterminer l'ouverture minimale et maximale des portes. Les contres engrenage quant à eux fixe la rotation des portes par rapport à leurs axes.

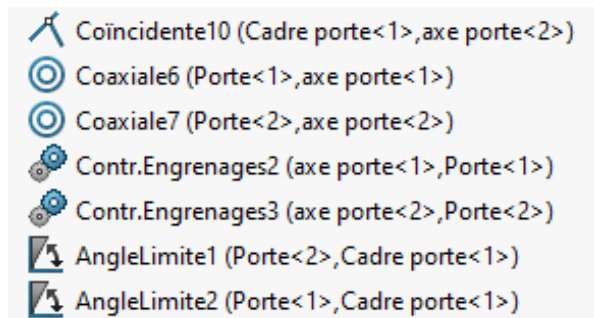


Figure 14: Contrainte du sous-assemblage porte

C'est lors de cette étape qu'il est possible de relever des potentielles interférences entre les pièces, auquel cas il faut alors ajuster le design des pièces qui posent problèmes.

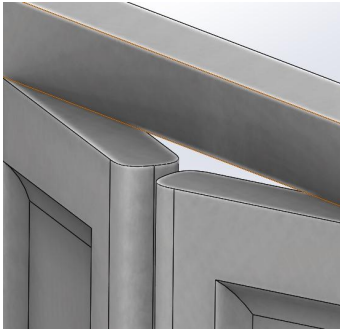


Figure 15: Image ajustement des portes

Ici il a été préférable d'arrondir les extrémités des portes car avec la précision des outils utilisés lors de la création de la maquette réelle il est possible que les portes interfèrent entre elles, provoquant ainsi des frottements.

Après toutes ces étapes arrive enfin l'assemblage final, il faut d'abord mettre en place la structure souvent appelée "bâti" qui sera fixe et y ajouter les sous-assemblages. Les dernières contraintes sont alors fixées ainsi que les liaisons mécaniques entre les différentes parties du mécanisme. Cette étape a permis de visualiser l'ensemble du système et de vérifier la faisabilité de l'assemblage final.

La liste suivante est non exhaustive, elle regroupe une partie des contraintes qui servent au positionnement des sous-assemblages entre eux notamment les contraintes de coaxialité et de coïncidence.

Les contraintes suivantes servent au fonctionnement du mécanisme. Sur SolidWorks et sur tous les logiciels de CAO en général, il n'est pas possible de simplement modéliser un fil qui agit sur les éléments du système.

- Coaxiale8 (Cuve reservoir eau<1>,Tuyau entre les deux cuves d'eau<1>)
- Coïncidente43 (Tuyau entre les deux cuves d'eau<1>,Plan de face)
- Coïncidente44 (Cuve contrepoids<1>,Plan de face)
- Coïncidente45 (Cuve contrepoids<1>,Esquisse1)
- Parallèle3 (Plaque support bas<1>,Cuve contrepoids<1>)
- Coïncidente47 (Cuve contrepoids<2>,Plan de face)
- Parallèle4 (Plaque support bas<1>,Cuve contrepoids<2>)
- Coïncidente49 (Cuve contrepoids<2>,Esquisse1)
- Contr.Engrenages2 (assemblage poulie<1>,Pivot<1>)
- Sur place5 (Pièce6^Assemblage Finale<1>,Plan de face)
- Contr.Engrenages3 (Pivot<2>,assemblage poulie<2>)
- RackPinionMate5 (Cuve contrepoids<1>,assemblage poulie<1>)
- Contr.Engrenages4 (Pivot<2>,Pivot<1>)
- DistancLimite2 (Esquisse1,Cuve contrepoids<1>)
- Coupleur linéaire/linéaire1 (Cuve contrepoids<2>,Cuve contrepoids<1>)

Figure 16: Contrainte assemblage finale

Il faut donc analyser les mouvements relatifs entre les différents composants et ainsi choisir l'action mécanique qui semble la plus cohérente. Si l'on prend l'exemple ici du mouvement entre le contrepoids et la poulie, on remarque que lorsque le contrepoids se déplace selon l'axe y, la poulie effectue une rotation autour de l'axe z, cela correspond mécaniquement à un mouvement de pignon crémaillère (Rack Pinion Mate 5). Le coupleur linéaire/linéaire sert à lier les mouvements verticaux des deux contrepoids, lorsque l'un

descend, l'autre monte. Les liaisons contre engrenages ont pour but de transmettre les rotations entre les poulies et les pivots afin de finalement mettre en rotation les portes. On notera aussi l'ajout de différents matériaux sur les pièces qui sont uniquement présents ici dans un souci de rendu réaliste.

Une fois l'assemblage totalement terminé, des simulations de cinématique ont été réalisées afin d'étudier le mouvement d'ouverture et de fermeture des portes ainsi que celui des autres composants en rotation (pivot et poulie), permettant ainsi de s'assurer du bon fonctionnement du système.

Pour finir, à partir de ce modèle numérique, des plans de conceptions détaillés ont été créés, destinés à l'atelier en charge de la fabrication des pièces de la maquette réelle. (voir annexes)

Pour diverses raisons la maquette réelle n'a pas pu être réalisée dans les délais, c'est pourquoi nous nous sommes concentré sur la maquette numérique afin d'obtenir un rendu qui soit le plus réaliste possible. Le QR code ci-dessous permet de visualiser une vidéo de son fonctionnement.



Figure 17: QR code vidéo

3.3 Maquette

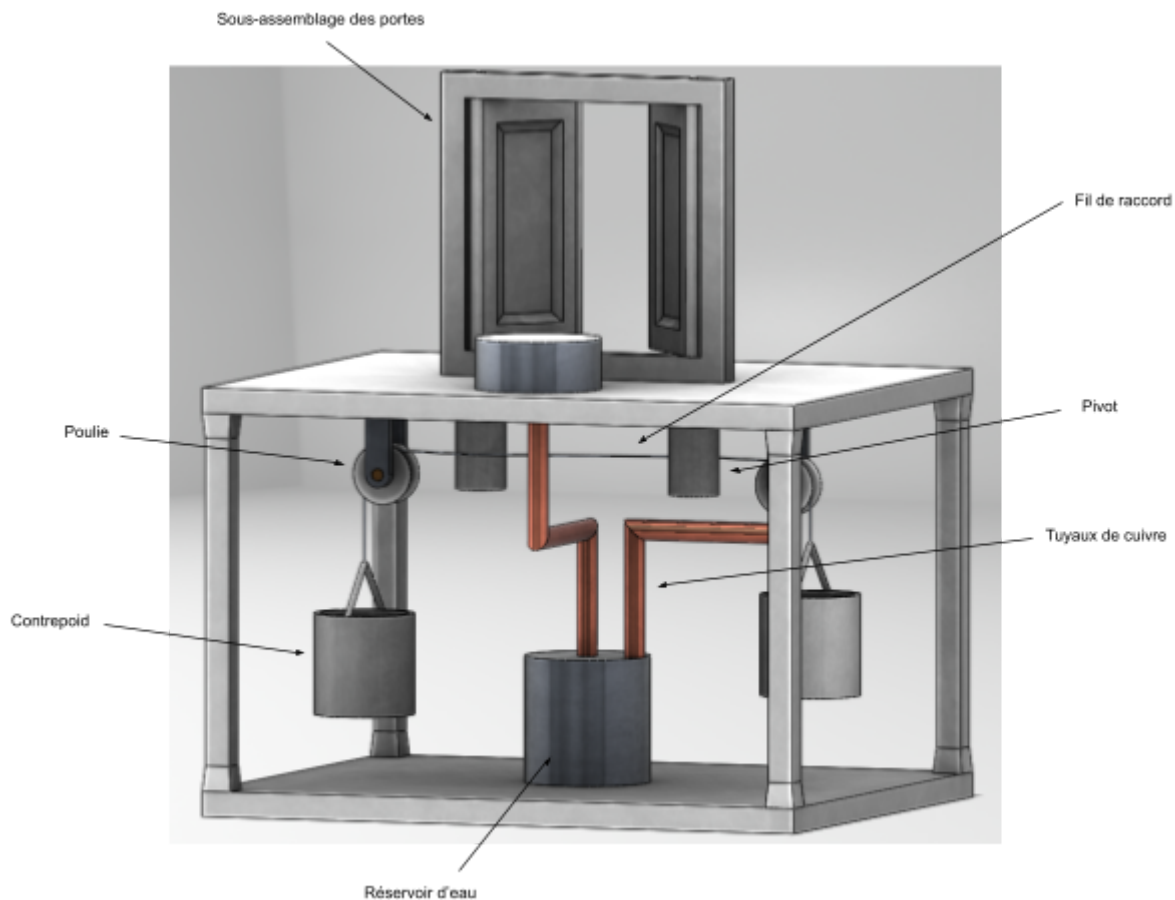


Figure 18: Rendu réaliste maquette finale légendée

Le schéma ci-dessus est une représentation en trois dimensions de la maquette finale. Par la suite, il aurait été possible de créer une maquette réelle et de la mettre en fonctionnement mais des difficultés ont été rencontrées notamment au niveau du délai à respecter pour mener à bien cette conception.

En effet, le planning récapitulatif de l'organisation n'incluait pas l'entièreté des démarches puisque certaines d'entre elles ont été découvertes durant l'avancée du projet. Il a donc fallu s'adapter afin de pouvoir concrétiser la plus grande partie du projet. Mais le temps étant limité, il n'a pas été possible de finaliser la dernière étape qui était celle de la maquette.

Cependant, cette partie atypique, propre à ce projet, a permis de s'initier à la mise en contact avec un atelier pour discuter des besoins nécessaires à la conceptualisation des pièces, notamment sur le choix des matériaux ou la réflexion sur le type de combustible.

4. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Bien que la maquette n'ait pu être réalisée, ce projet a été une expérience enrichissante.

De plus, il serait possible d'envisager différentes perspectives pour l'évolution du projet telles que la réalisation d'un modèle réduit de la maquette et l'amélioration technologique de celle-ci, tant dans les matériaux, que dans le système utilisé pour la dilatation de l'air (système électrique).

En se penchant sur les différents aspects, il est possible de dire qu'il y a eu du positif comme des difficultés. Concernant les difficultés, il n'y a pas eu beaucoup de documents trouvables sur Internet et dans la littérature qui auraient pu nous aider à concevoir la maquette des portes automatiques d'Héron d'Alexandrie. Ceci rendant d'autant plus complexe la réalisation de ce projet puisqu'il n'a pas été possible de retrouver des valeurs et des paramètres propres au système réel. Il a donc fallu trouver les équations et les données permettant d'obtenir un rendu avec des valeurs cohérentes.

Par ailleurs, concernant les aspects positifs, ce projet a donné une approche du métier d'ingénieur. En effet, en tant qu'ingénieur, le travail en équipe avec des personnes exerçant des métiers divers est très important. Il faudra alors adapter les instructions à donner et évaluer les charges de travail afin d'améliorer la productivité de l'entreprise.

Outre l'organisation, des connaissances tant historiques que scientifiques ont été acquises pour la culture générale personnelle.

De plus, il existe un autre point positif qui est d'avoir eu une première approche sur un projet utilisant plusieurs domaines scientifiques. Ceci reliant la thermodynamique, les transferts thermiques, la mécanique des fluides ou bien l'informatique et la CAO avec des logiciels comme Cantera ou Solidworks. Toutes ces connaissances acquises sont très appréciées par les entreprises et seront très certainement utiles dans un futur proche.

Enfin, ce projet a permis d'apprendre à s'adapter aux difficultés rencontrées puisque même avec un cahier des charges, il peut arriver des imprévus qui contraindront l'ingénieur à chercher une solution pour les contourner afin de mener à bien son projet.

5. BIBLIOGRAPHIE

[1] Prof, "Thermodynamique", cours de P1, 2023

[2] Jérôme Yon, "Mécanique des fluides", cours de P8, 2023

[3] Cahier de Prépa : <https://cahier-de-prepa.fr/mustapha-saim/download?id=629> (valide à la date du 12/06/2023).

[4] Wikipedia : https://fr.wikipedia.org/wiki/Théorème_de_Bernoulli (valide à la date du 12/06/2023).

[5] Cantera : <https://cantera.org> (valide à la date du 12/06/2023).

[6] Cerfacs : <https://www.cerfacs.fr/cantera/index.php> (valide à la date du 12/06/2023).

Sources ayant servi à la compréhension du sujet :

[7] Les automates de Héron d'Alexandrie :

[https://atelier-canope-95.canoprof.fr/eleve/Automates%20et%20robots/res/robot.dossierHtml/co/04heronDalexandrie_4.html#:~:text=Il%20s'agit%20d'un,Antiquit%C3%A9%20\(kotsanas.com\)](https://atelier-canope-95.canoprof.fr/eleve/Automates%20et%20robots/res/robot.dossierHtml/co/04heronDalexandrie_4.html#:~:text=Il%20s'agit%20d'un,Antiquit%C3%A9%20(kotsanas.com)) (valide à la date du 12/06/2023)

[8] Héron et les portes du temple : <https://mathantique.hypotheses.org/776> (valide à la date du 12/06/2023)

[9] Wikipédia : https://fr.wikipedia.org/wiki/H%C3%A9ron_d%27Alexandrie (valide à la date du 12/06/2023)

6. ANNEXES

6.1. Listings des programmes réalisés

```

Entrée [2]: # On importe les bibliothèque dont on a besoin

import cantera as ct
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt

Entrée [3]: # définir les conditions des réactifs, le mélange de gaz et le mécanisme cinétique

gas = ct.Solution ("gri30.yaml")

Entrée [4]: # Définir les conditions initiales de simulation de la flamme

T0 = 300 #K
P0 = ct.one_atm #Pa

# largeur du domaine, 2cm
width = 0.02

#Réaction et espèces chimiques
gas.set_equivalence_ratio(1.0, "CH4", "O2:1, N2:3.76")

gas.TP = T0, P0

Entrée [5]: flame = ct.FreeFlame(gas, width=width) #création de la flamme

Entrée [6]: flame.transport_model = "Mix"

Entrée [7]: flame.set_refine_criteria(ratio=3, slope=0.1, curve=0.1)

Entrée [8]: flame.solve(loglevel=1, auto=True) #résoudre le problème
Attempt Newton solution of steady-state problem... failure.
Take 10 timesteps 3.653e-05 5.706
Attempt Newton solution of steady-state problem... failure.
Take 10 timesteps 3.901e-05 5.857
Attempt Newton solution of steady-state problem... failure.
Take 10 timesteps 0.0009998 4.153
Attempt Newton solution of steady-state problem... success.

Problem solved on [9] point grid(s).
Expanding domain to accommodate flame thickness. New width: 0.04 m
#####
Refining grid in flame.
New points inserted after grid points 0 1 2 3 4 5 6
to resolve C C2H2 C2H3 C2H4 C2H5 C2H6 C3H7 C3H8 CH CH2 CH2(S) CH2CHO CH2CO CH2O CH2OH C
H3 CH3CHO CH3O CH3OH CH4 CO CO2 H H2 H2O H2O2 HCCO HCN HCN0 HCO HNC0 HO2 N N2 N2O NCO NH NO
NO2 O O2 OH T velocity
#####
***** Solving on 16 point grid with energy equation enabled *****

Entrée [9]: Su0 = flame.velocity[0]

print(f"La vitesse de la flamme est : {Su0*100:.2f} cm/s")

flame.show_stats()

La vitesse de la flamme est : 38.33 cm/s

Statistics:

Grid Timesteps Functions Time Jacobians Time
11 50 1307 0.2505 53 1.1578
10 0 1054 0.6027 75 2.2641

```

```

Entrée [10]: # graphe temperature avec distance
plt.figure(figsize=(20,20))
plt.subplot(531)
plt.grid=True
plt.plot(flame.grid, flame.T) # grid -> vecteur avec les points initiaux
plt.title('Temperature')
plt.xlabel('Distance (m)')
plt.ylabel('Temperature (K)')

#graphe composition du CH4
plt.subplot(533)
plt.plot(flame.grid, flame.X[gas.species_index('CH4'),:]) # chercher la quantité de matière
plt.title('Evolution du CH4')
plt.xlabel('Distance (m)')

plt.figure(figsize=(5,5))
plt.figure(figsize=(20,20))

#graphe composition du CO2
plt.subplot(537)
plt.plot(flame.grid, flame.X[gas.species_index('CO2'),:])
plt.title('CO2')
plt.xlabel('Distance (m)')

#graphe composition du OH
plt.subplot(539)
plt.plot(flame.grid, flame.X[gas.species_index('OH'),:])
plt.title('OH')
plt.xlabel('Distance (m)')

plt.figure(figsize=(5,5))
plt.figure(figsize=(15,15))

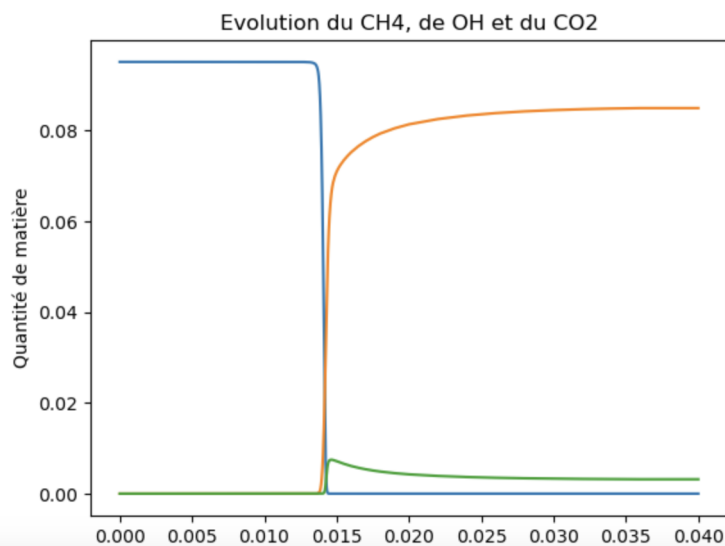
```

```

Entrée [11]: plt.plot(flame.grid, flame.X[gas.species_index('CH4'),:])
plt.plot(flame.grid, flame.X[gas.species_index('CO2'),:])
plt.plot(flame.grid, flame.X[gas.species_index('OH'),:])
plt.xlabel('Distance (m)')
plt.ylabel('Quantité de matière')
plt.title('Evolution du CH4, de OH et du CO2')

```

Out[11]: Text(0.5, 1.0, 'Evolution du CH4, de OH et du CO2')



```

Entrée [13]: #graphe richesse/taux de chaleur dégagé

#richesses = [0.76, 0.85, 0.9, 0.95, 0.98, 1.0, 1.2] # minimum et maximum sinon inexistence

richesses = [0.76, 0.85, 0.9, 0.95, 0.98, 1.0, 1.2]
ifuel1 = gas.species_index('CH4')
io2 = gas.species_index('O2')
in2 = gas.species_index('N2')
ico2 = gas.species_index('CO2')
ico = gas.species_index('CO')
ioh = gas.species_index('OH')
ih2o = gas.species_index('H2O')

air_N2_O2_ratio = 3.76
stoich_O2 = 2.0

X = np.zeros(gas.n_species) # Molar fractions array of all species (size 'n_species')
X[ifuel1] = richesses[0]
X[io2] = stoich_O2
X[in2] = stoich_O2 * air_N2_O2_ratio

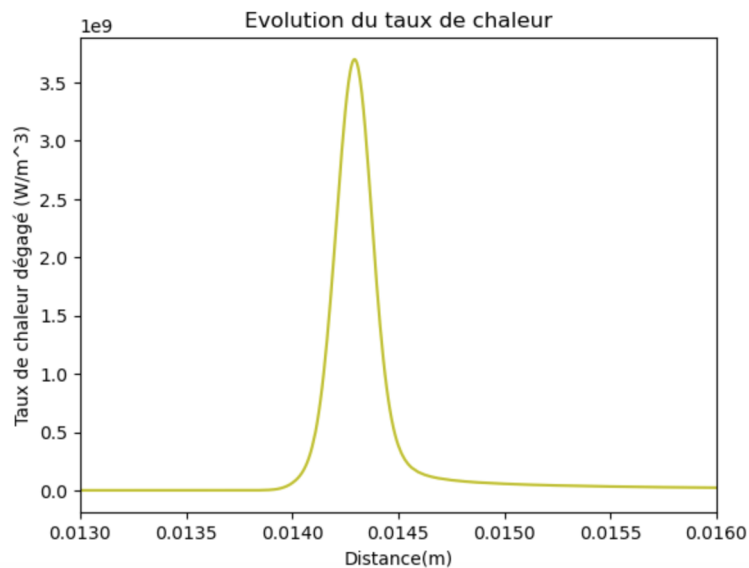
taux_de_chaleur = []

for i in range(len(richesses)):
    gas = ct.Solution("gri30.yaml")
    gas.TPX = T0, P0, X
    gas.set_equivalence_ratio(richesses[i], "CH4", "O2:1, N2:3.76")
    flame = ct.FreeFlame(gas, width=0.02)
    flame.set_refine_criteria(ratio=3, slope=0.1, curve=0.1)
    flame.solve(loglevel=1, auto=True)
    q = flame.heat_release_rate
    taux_de_chaleur.append(sum(q)/len(q))
    
```

```

Entrée [16]: plt.plot(flame.grid, q, '-y')
plt.title('Evolution du taux de chaleur')
plt.ylabel('Taux de chaleur dégagé (W/m^3)')
plt.xlabel('Distance(m)')
plt.xlim(0.013, 0.016)
    
```

Out[16]: (0.013, 0.016)



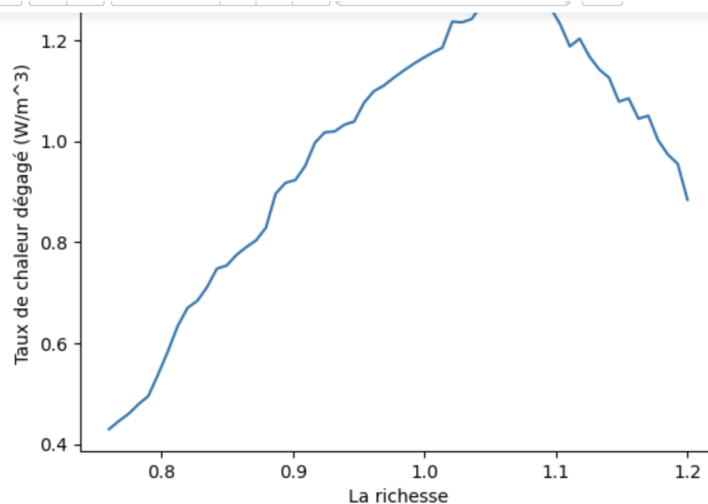

```
Entrée [18]: phi = np.linspace(0.76, 1.2, 60)
for i in range(len(phi)):
    gas = ct.Solution("gri30.yaml")
    gas.TPX = T0, P0, X
    gas.set_equivalence_ratio(phi[i], "CH4", "O2:1, N2:3.76")
    flame = ct.FreeFlame(gas, width=0.02)
    flame.set_refine_criteria(ratio=3, slope=0.1, curve=0.1)
    flame.solve(loglevel=1, auto=True)
    q = flame.heat_release_rate
    taux_de_chaleur.append(sum(q)/len(q))
```

```
Problem solved on [9] point grid(s).
Expanding domain to accommodate flame thickness. New width: 0.04 m
#####
Refining grid in flame.
    New points inserted after grid points 0 1 2 3 4 5 6 7
    to resolve C2H2 C2H3 C2H4 C2H5 C2H6 C3H8 CH2 CH2(S) CH2CHO CH2CO CH2O CH2OH CH3 CH3CHO
CH3O CH3OH CH4 CO CO2 H H2 H2O H2O2 HCCO HCCOH HCN HCN0 HCO HNC0 HO2 N2 N2O NO NO2 O O2 OH
T velocity
#####

***** Solving on 17 point grid with energy equation enabled *****

.....
Attempt Newton solution of steady-state problem... failure.
Take 10 timesteps      4.271e-05      4.66
Attempt Newton solution of steady-state problem... failure.
Take 10 timesteps      1.14e-05      6.24
Attempt Newton solution of steady-state problem... failure.
Take 10 timesteps      0.0002023      4.761
```

```
Entrée [20]: plt.plot(phi, taux_de_chaleur[7:])
```



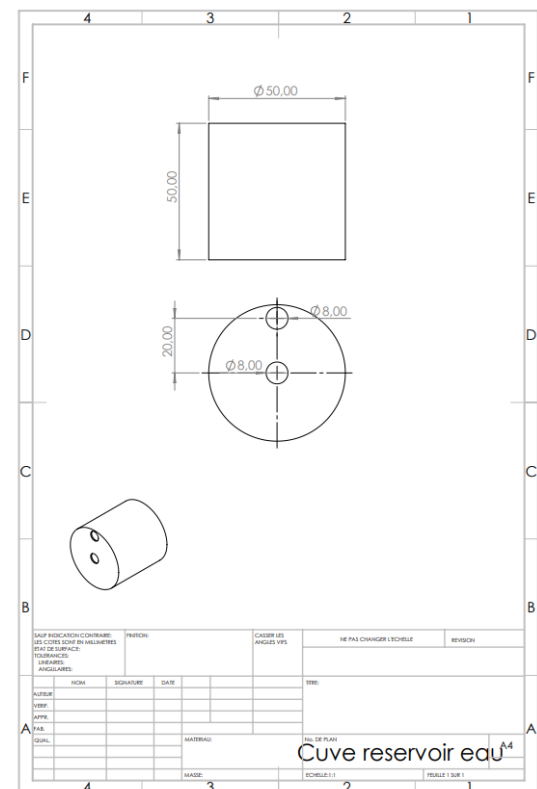
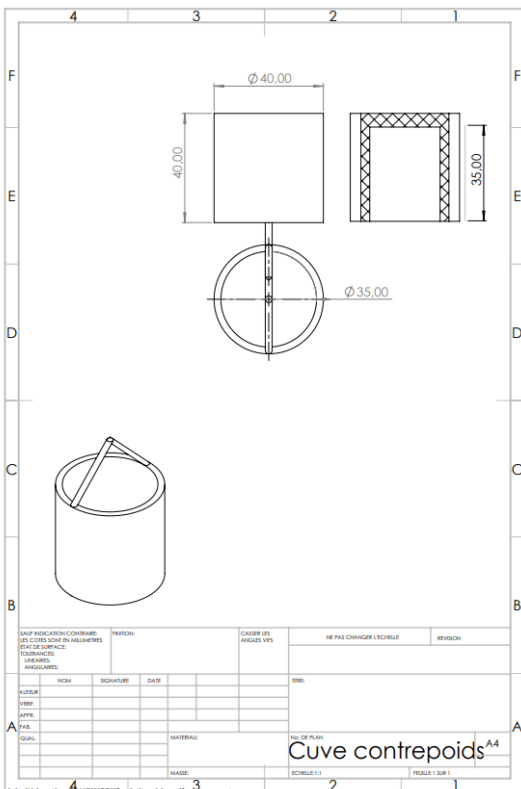
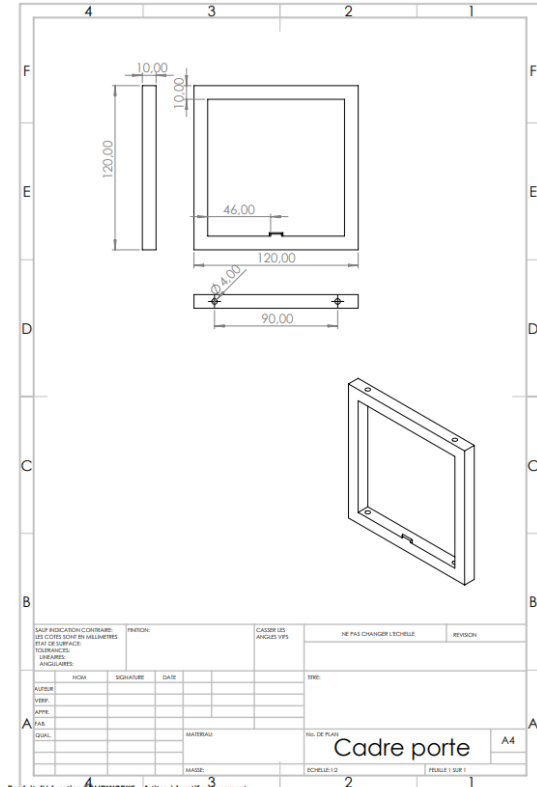
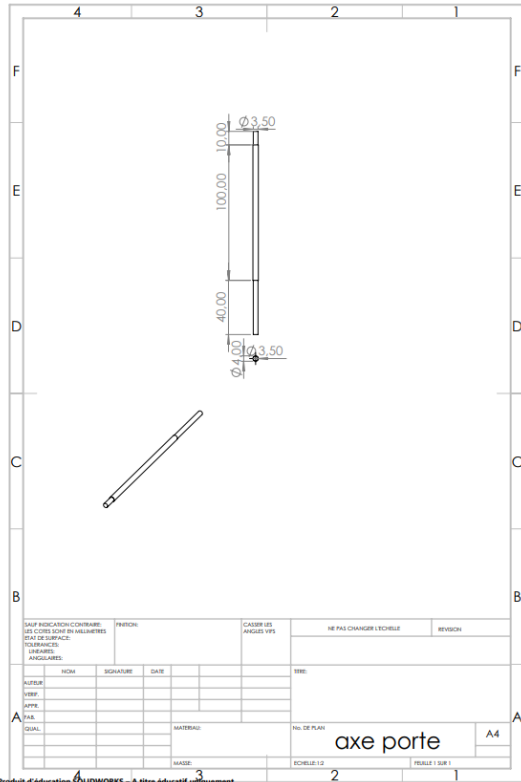
```
Entrée [33]: taux_de_chaleur_MAX = np.argmax(taux_de_chaleur)
print(taux_de_chaleur_MAX)
richesse_MAX = phi[taux_de_chaleur_MAX]
print(richesse_MAX)
```

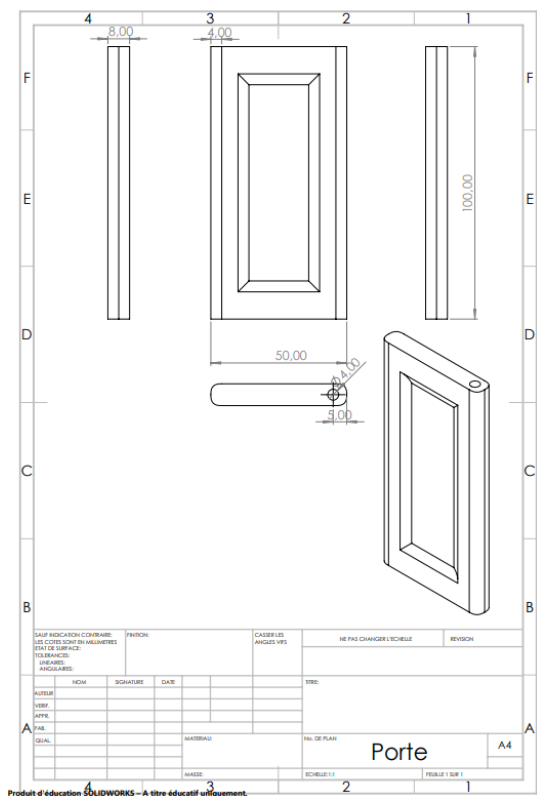
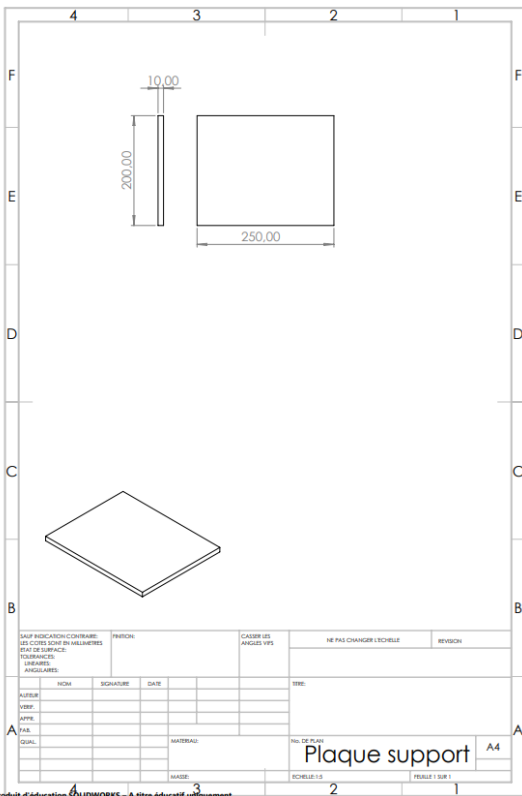
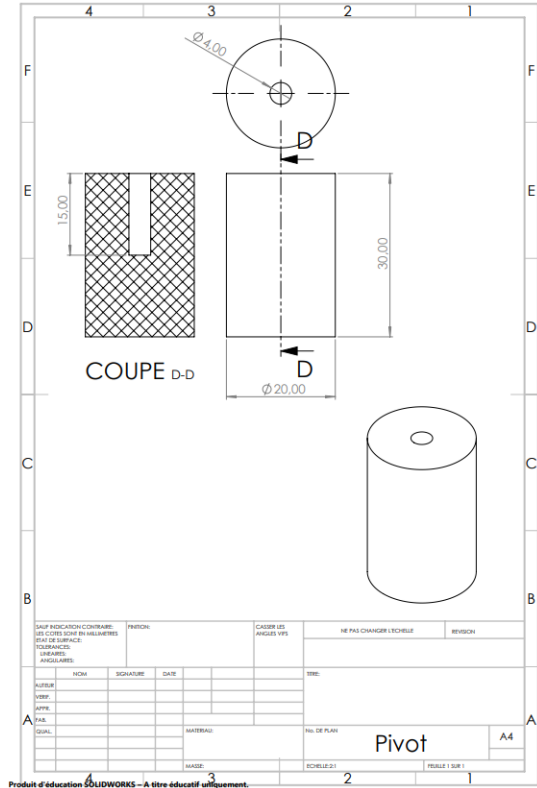
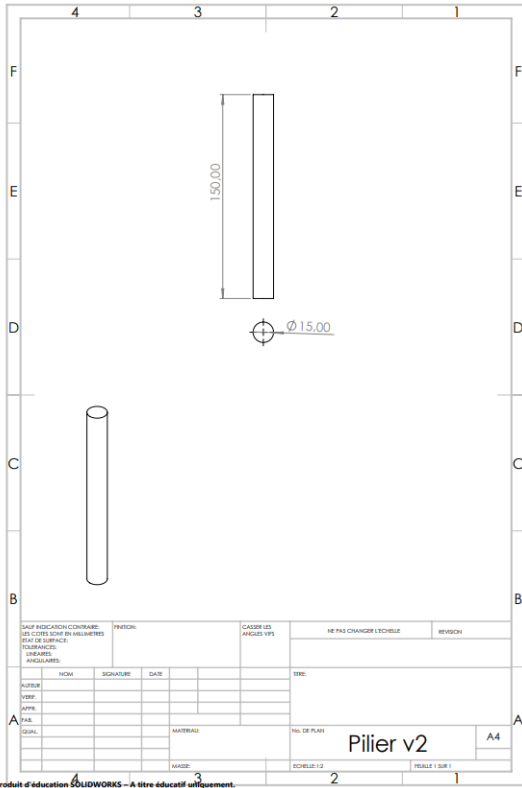
```
48
1.1179661016949152
```

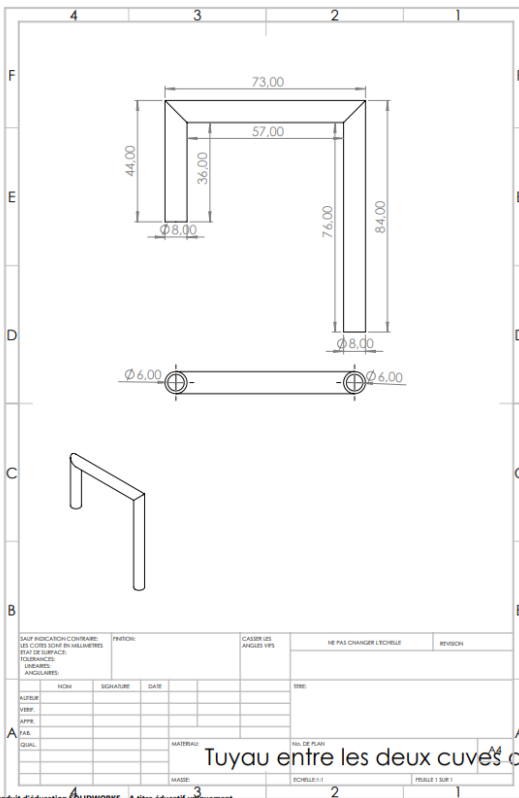
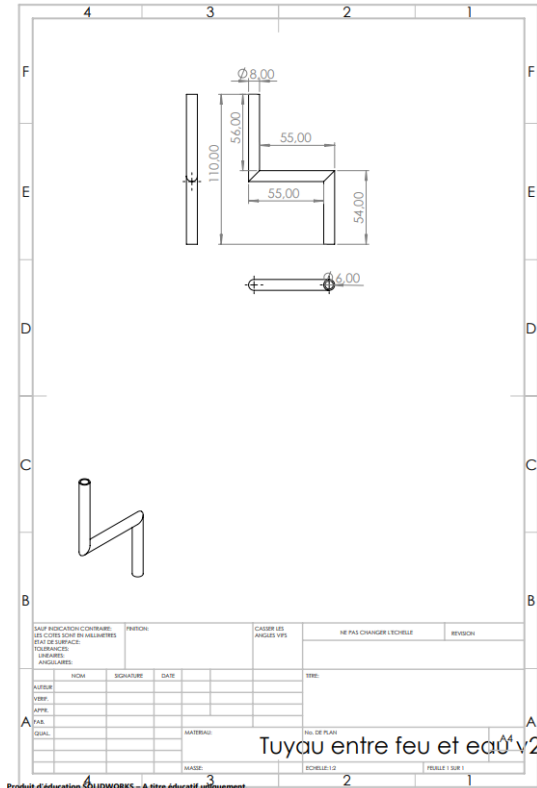
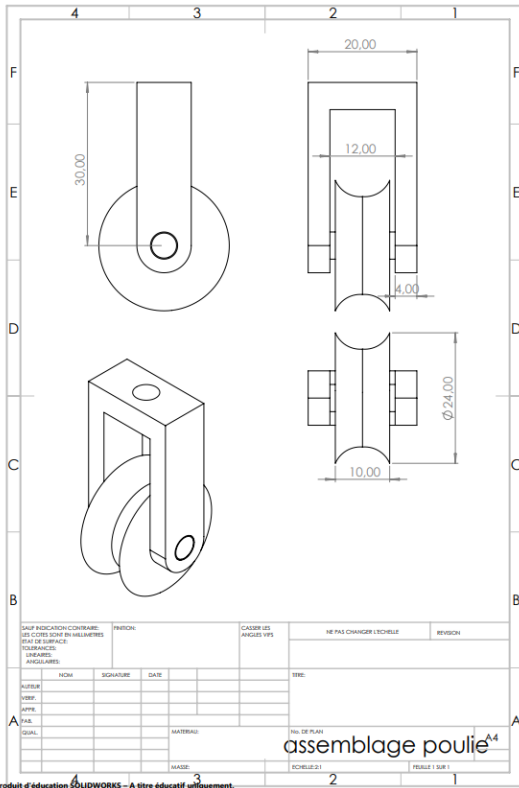
```
Entrée [34]: print(taux_de_chaleur[taux_de_chaleur_MAX])
```

```
1283716080.5524907
```

6.2. Schémas de montages, plans de conception







6.3. Analyse descendante du projet

