

SOMMAIRE

I. Introduction et problématique

- 1) Introduction aux fusées hydropneumatiques
- 2) Notre objectif, problématique
- 3) Notre cahier des charges

II. Etude d'optimisation

- 1) La base de lancement
- 2) La vitesse de la fusée
- 3) La stabilité de la fusée
- 4) Conclusion

III. Validation de notre modèle de fusée à eau

- 1) Caractéristiques de notre fusée
- 2) Construction de notre fusée
- 3) Vols d'essais

IV. Conclusion

V. Annexe

- 1) Documents consultés, logiciels utilisés
- 2) Remerciements

PARTIE I.

Introduction et problématique



1) Introduction à l'univers humide de la fusée à eau

1.1) Un peu d'histoire pour commencer...

Les fusées hydropneumatiques, plus communément appelés « fusées à eau », « FAO » ou encore « FHP », apparaissent dans les années 1960 sous la forme de kits complets qui permettaient de s'amuser tout en s'initiant de manière ludique aux lois de la physique...



Ci-contre : Modèle de fusée à eau « Rokit » des années 1990

Mais c'est au Japon que le phénomène des fusées à eau est le plus important. Là bas des ingénieurs membres de clubs locaux participent à la réalisation de fusées à eau de conception très avancée ; en 2003 un homme a effectué un vol de deux mètres, propulsé par un ensemble composé d'une centaine de fusées synchronisés...



C'est durant les années 1990 que se diffuse la pratique des fusées à eau en France, notamment grâce à Marc Zirnheld, l'un des piliers du groupe Espace de Planète Sciences.

La facilité de mise en œuvre des fusées à eau et la non dépendance de l'accès à des propulseurs réglementés ont permis un essaimage de la pratique et son appropriation par de nombreux groupes.

C'est ainsi qu'en 2005, nous avons découvert la fusée à eau.

1.2) Comment ça marche ?

La propulsion des fusées repose sur un principe physique simple: la troisième loi de Newton, dite de l'action et de la réaction.

Enoncé de la troisième loi de Newton :

« Lorsqu'un solide S_1 exerce une force sur un solide S_2 , le solide S_2 exerce sur le solide S_1 , la force directement opposée. »

Force exercée par 1 sur 2	Force exercée par 2 sur 1
$\vec{F}_{1/2}$	$= -\vec{F}_{2/1}$

Par exemple si l'on est debout sur une planche à roulette avec une balle de basket en main et que le sol est plat et lisse, le fait de lancer la balle devant nous, nous fera reculer.



Dans une fusée, de la matière est éjectée à grande vitesse et crée une force dirigée vers le bas (c'est l'action). D'après le principe de l'action et de la réaction, la fusée sera propulsée dans la direction opposée (c'est la réaction).

Dans une fusée hydropneumatique c'est de l'eau sous pression, éjectée *via* une tuyère, qui crée l'action.

Une fusée hydropneumatique ne décolle pas d'elle-même, une base de lancement qui maintiendra le réservoir fermé durant la mise sous pression est nécessaire ! Une fois la pression voulue atteinte il suffit alors de libérer le réservoir et la fusée décolle.

Pour assurer cela il existe une pléthore de systèmes, tous plus ingénieux les uns que les autres.

2) Notre objectif

Le lancement de fusées hydropneumatiques est certes un loisir très divertissant, mais on est souvent amené à s'interroger sur les performances de ces fusées, très aléatoires et souvent plutôt hasardeuses : pourquoi certaines fusées à eau volent-elles plus haut, plus vite, plus loin que d'autres ?

En voulant répondre à ces questions nous avons vite découvert toute la complexité du fonctionnement d'une fusée à eau qui, bien qu'à première vue tient plus du jouet pour enfant que de l'objet d'une étude scientifique ; fait entrer en jeu les mêmes lois physiques que celles qui définissent le vol des vraies fusées !

Dans ce dossier nous allons donc analyser quels paramètres, et en quelle mesure, influencent le vol d'une fusée hydropneumatique, et de là nous tenterons de trouver des solutions permettant d'optimiser leur vol. Nous construirons ensuite une fusée hydropneumatique répondant à un cahier des charges établi par nos soins, afin de valider nos recherches, et y trouver les failles le cas échéant...

Notre problématique sera donc : Comment optimiser le vol d'une fusée à eau ?

Nous procéderons à une étude d'optimisation que l'on validera par la construction d'un modèle de fusée établi d'après un cahier des charges que nous aurons défini. Nous pourrons alors vérifier si notre étude s'est avérée correcte...

Néanmoins afin de restreindre le domaine d'étude nous étudierons un type de fusée hydropneumatique bien précis, que nous détaillerons dans la suite.

3) Notre cahier des charges

Afin de limiter notre étude concernant les fusées à eau, nous nous accorderons à définir quelques standards :

3.1) Base de lancement

Tous les connecteurs, tuyaux sous pressions, robinets, seront du matériel de la marque de jardinage « Gardena ».

Nous avons choisi ce système à cause de sa popularité dans la communauté des lanceurs de fusées hydropneumatiques, aussi à cause de sa simplicité de fonctionnement et sa fiabilité (pas de fuites intempestives !)

Le tableau ci-dessous présente les deux éléments fondamentaux du système.

Elément	Description	Photo
Raccord rapide grand débit	<p>Pour tuyau Ø int. 19 mm Permet le branchement et le débranchement rapide de tous les accessoires grand débit Gardena lorsque l'on abaisse le manchon de couleur orange.</p> <p>Cela maintiendra la tuyère sur la base de lancement...</p>	
Nez de robinets grand débit	<p>Se visse aux robinets compatibles et se connecte aux connecteurs Gardena gros débit. Se branche sur le connecteur ci-dessus.</p> <p>Ce sera notre tuyère...</p>	

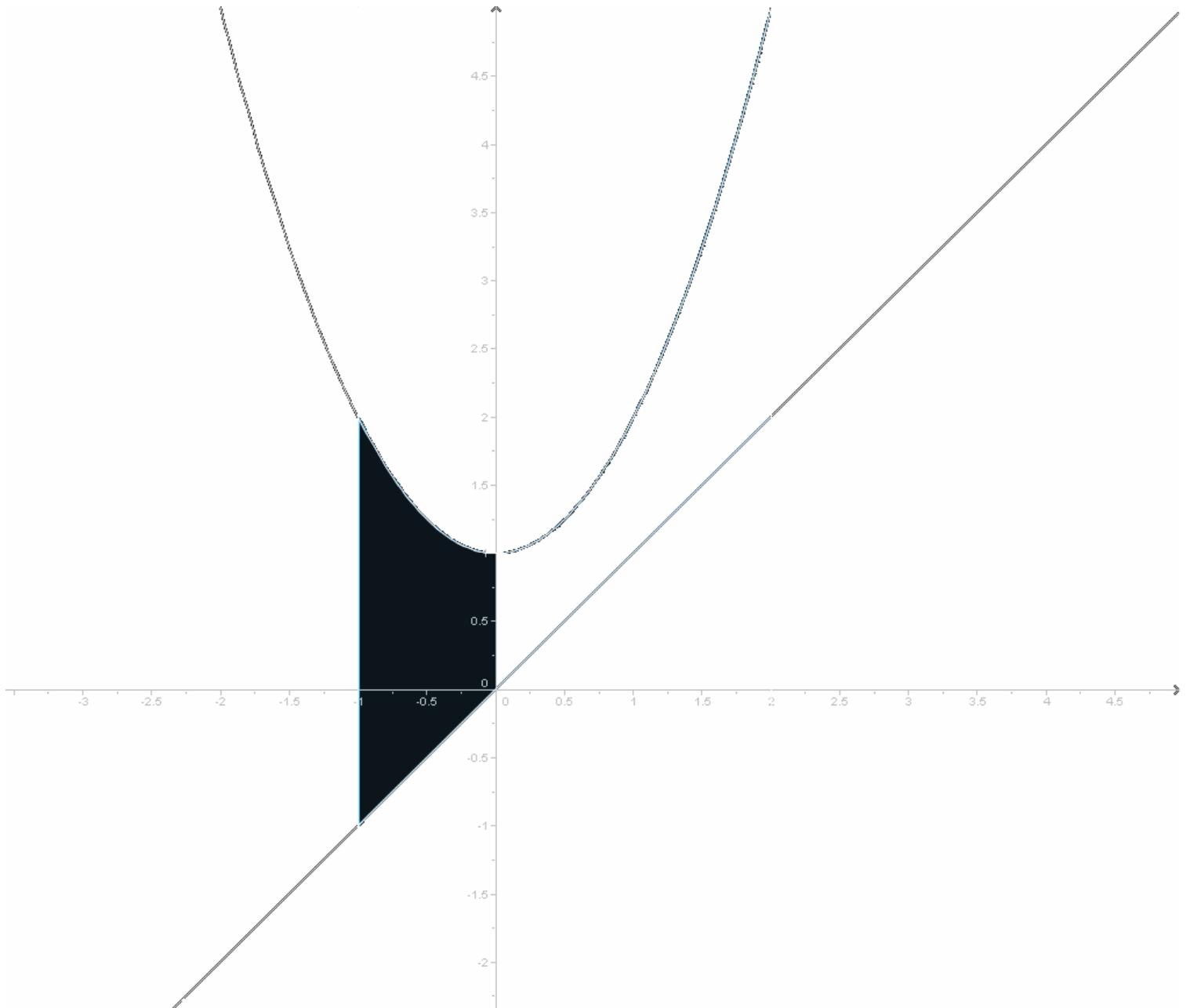
La pression sera fournie par une pompe à vélo de la marque « Décathlon », avec un manomètre gradué jusqu'à 12bars

3.2) La fusée

- La fusée devra être munie d'un système de récupération afin d'éviter des « dommages collatéraux »
- Son réservoir devra être constitué uniquement d'une, voire de plusieurs bouteilles de boissons gazeuses assemblées.
- La pression maximale admissible dans le réservoir sera de 8 bars, au-delà de cette valeur une bouteille en plastique PET risque d'exploser...

PARTIE II.

Etude d'optimisation



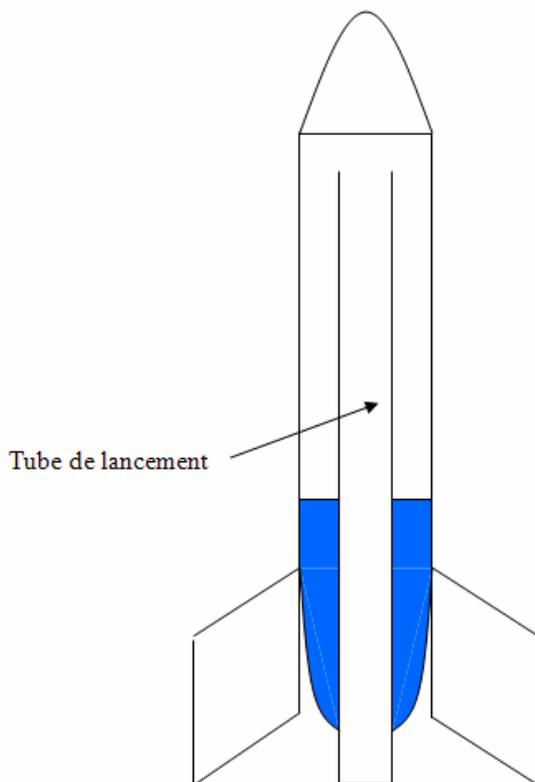
Dans cette partie nous traiterons le sujet suivant : définir, puis proposer des moyens d'optimiser les paramètres qui entrent en jeu lors du vol d'une fusée hydro-pneumatique.

Pour cela nous étudierons séparément le couple base de lancement/fusée, dans lequel c'est bien sûr la fusée qui nous demandera la plus grande réflexion : afin d'établir une progression claire et précise dans notre étude nous définirons les forces qui influencent le vecteur vitesse de la fusée, ainsi pourrons-nous traiter chacun de ces vecteurs séparément avant d'établir une synthèse.

1) La base de lancement

La principale difficulté technique consiste à relâcher la bouteille sous pression de façon instantanée, et symétriquement afin que la bouteille parte bien vers le haut ! Cette difficulté est aisément résolue par le système que nous employons, à savoir le système « Gardena ».

Nous pouvons optimiser ce système :



Lorsque la bouteille est relâchée, l'air sous pression se détend et expulse l'eau contenue dans la tuyère.

Inconvénient : L'eau est immédiatement expulsée, ce qui réduit le temps total de la poussée

Pour maximiser la durée de la poussée, on utilisera donc un tube de lancement, constitué d'un simple tube que l'on glisse dans le réservoir de la fusée

L'utilisation d'un tube de lancement a deux avantages :

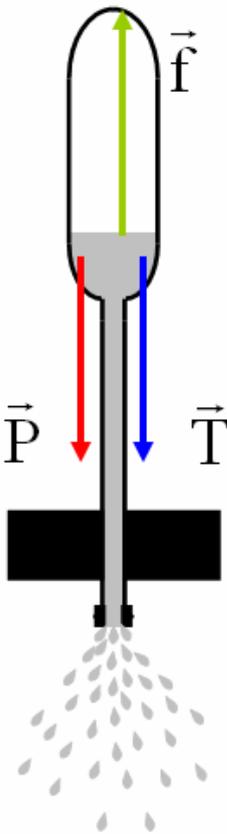
- La fusée s'élève sur le tube de lancement sans éjecter d'eau, seul l'air sous pression se détend. En conséquence, lorsque la fusée est éjectée du tube de lancement et que la poussée de l'eau commence, la fusée a déjà acquis une vitesse non négligeable. On a donc intérêt à ce que l'espace entre le tube de lancement et la tuyère soit le plus réduit

possible afin de minimiser les pertes d'eau durant la durée de l'éjection du lanceur. Cette application du tube de lancement produit un effet appelé « effet piston »

- Le tube de lancement constitue un excellent rail de guidage pour la fusée ce qui contribue à sa stabilité lorsqu'elle a quitté la base de lancement.

2) La vitesse de la fusée

Représentons de façon schématique les trois forces qui s'exercent sur une fusée hydropneumatique au cours de son vol :



\vec{f} : Force de poussée

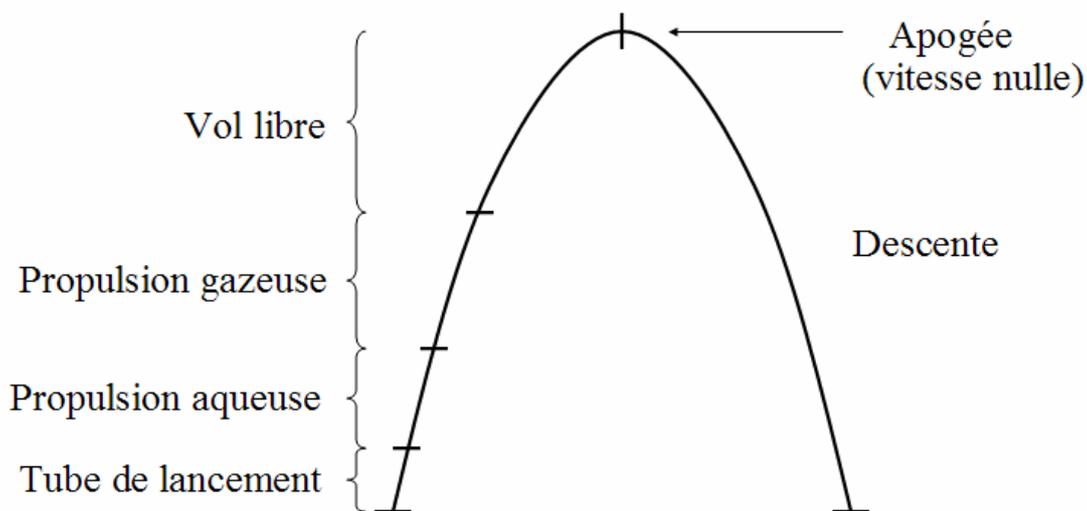
\vec{P} : Poids (= $m_{fusée} \cdot g$)

\vec{T} : Résistance de l'air (Traînée)

Leur résultante est le vecteur vitesse de la fusée, on peut donc en déduire que pour optimiser le vol de notre projectile on a tout intérêt à minimiser la norme des vecteurs P et T , et à maximiser la norme du vecteur f tout au long du vol.

Dans la suite nous allons donc effectuer une analyse de chacune des forces s'appliquant sur la fusée afin de trouver quels sont les paramètres qui les influencent.

Le principal problème de cette étude est que la norme de chacun de ces vecteurs n'est pas constante tout au long du vol. On peut alors décomposer le vol d'une fusée hydropneumatique de la manière suivante :



Afin d'apprécier les performances de notre modèle de fusée hydropneumatique tout au long d'un vol, nous nous aiderons d'une simulation de vol de fusée hydropneumatique conçue par Serge Henne, professeur de Physique-Chimie en Lycée.

Voici une capture de l'écran principal : A gauche les paramètres que l'on peut faire varier, à droite les résultats

caractéristiques de la fusée	
volume total	5,00 L
diamètre tuyère	1,70 cm
diamètre de la fusée	9,00 cm
masse à vide	190 g
Cx de la fusée	0,4

caractéristiques lancement	
volume eau (% total)	33 %
pression manomètre	8,0 bar
longueur tube lanceur	10 cm
volume réservoir + tuyau	0,00 L
masse surcharge	0 g
température	20 °C
pression atmosphérique	101300 Pa

RESULTATS				
phases	date t s	altitude m	vitesse m/s km/h	
Sortie tube	0,048	0,10	4,1	15
Sortie phase eau	0,266	6,48	69,1	249
Sortie phase air	0,395	17,83	89,9	324
Apogée	4,66	143,8	0	0
Retour sol	11,16	0,0	-33,1	-119

Ce simulateur fonctionne par une méthode dite « pas à pas » : le vol est décomposé en intervalles de temps réduits au minimum, entre lesquels on suppose que les forces sont fixes : connaissant les paramètres au départ, le simulateur peut calculer les paramètres à l'instant $t + 1$, connaissant alors ces paramètres il peut calculer les paramètres à l'instant $t + 2$, etc...

Le fait que le vol soit décomposé en plusieurs phases complique le calcul (et nous empêche de le faire nous-mêmes), car des variables et des principes différents entrent en jeu lors de ces différentes phases...

2.1) La masse de la fusée

La masse de la fusée diminue au cours de son vol, maximale au décollage et minimale (masse à vide) à partir de la phase « vol libre ».

On a tendance à croire que plus la fusée est légère plus elle ira haut après l'extinction de son moteur, mais cette hypothèse n'est pas toujours vérifiée, du fait d'une notion de physique : l'énergie cinétique.

2.2.1) Définition

L'énergie cinétique est l'énergie que possède un corps du fait de son mouvement. L'énergie cinétique d'un corps est égale au travail nécessaire pour faire passer ce corps d'une position de repos à un mouvement de translation ou de rotation actuel.

L'énergie cinétique d'un corps en mouvement est proportionnelle à sa masse et au carré de sa vitesse :

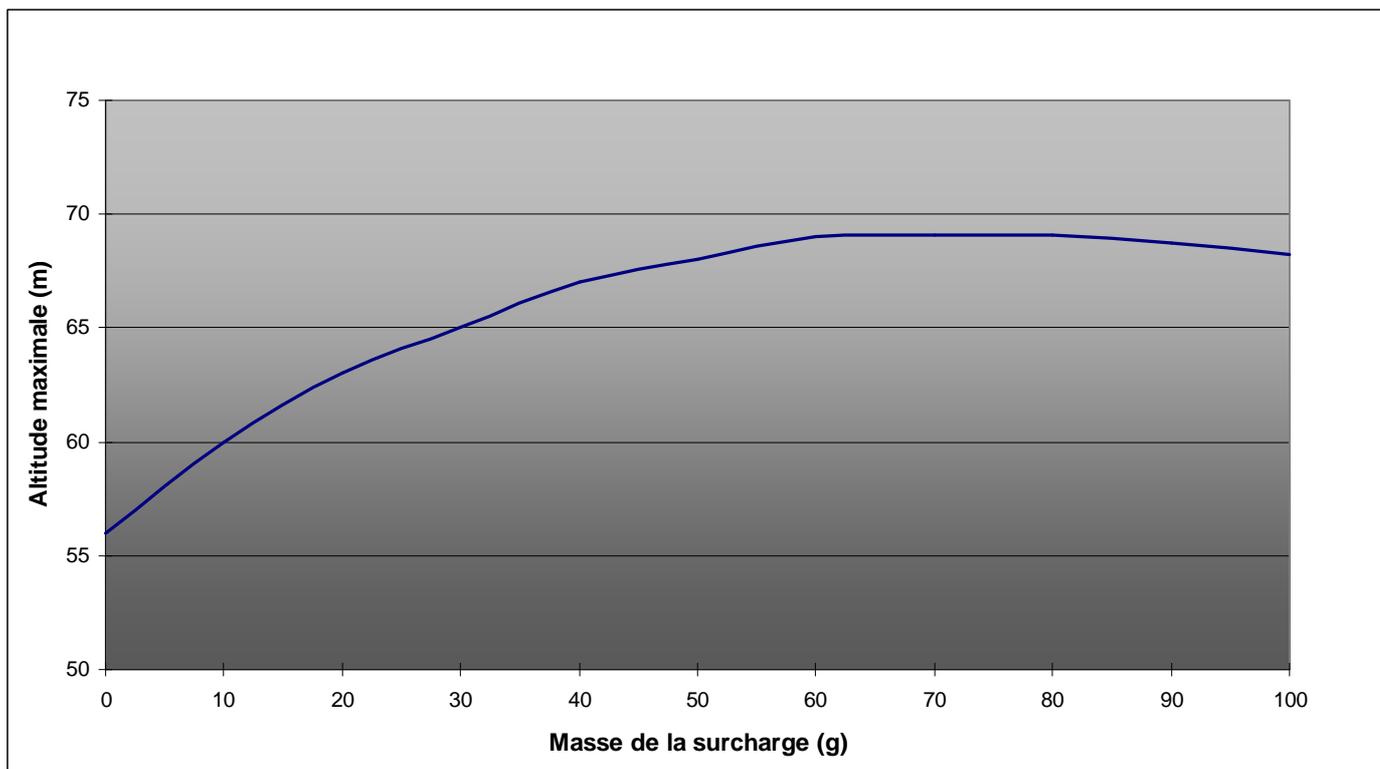
$$E_c = \frac{1}{2} . m . v^2$$

2.2.2) Application à nos fusées

Dans la simulation de Serge Henne, avec les caractéristiques suivantes :

caractéristiques de la fusée	
volume total	1,00 L
diamètre tuyère	1,50 cm
diamètre de la fusée	9,00 cm
masse à vide	50 g
Cx de la fusée	0,4
caractéristiques lancement	
volume eau (% total)	33 %
pression manomètre	8,0 bar
longueur tube lanceur	20 cm
volume réservoir + tuyau	0,00 L
masse surcharge	X g
température	20 °C
pression atmosphérique	101300 Pa

On obtient la courbe suivante :

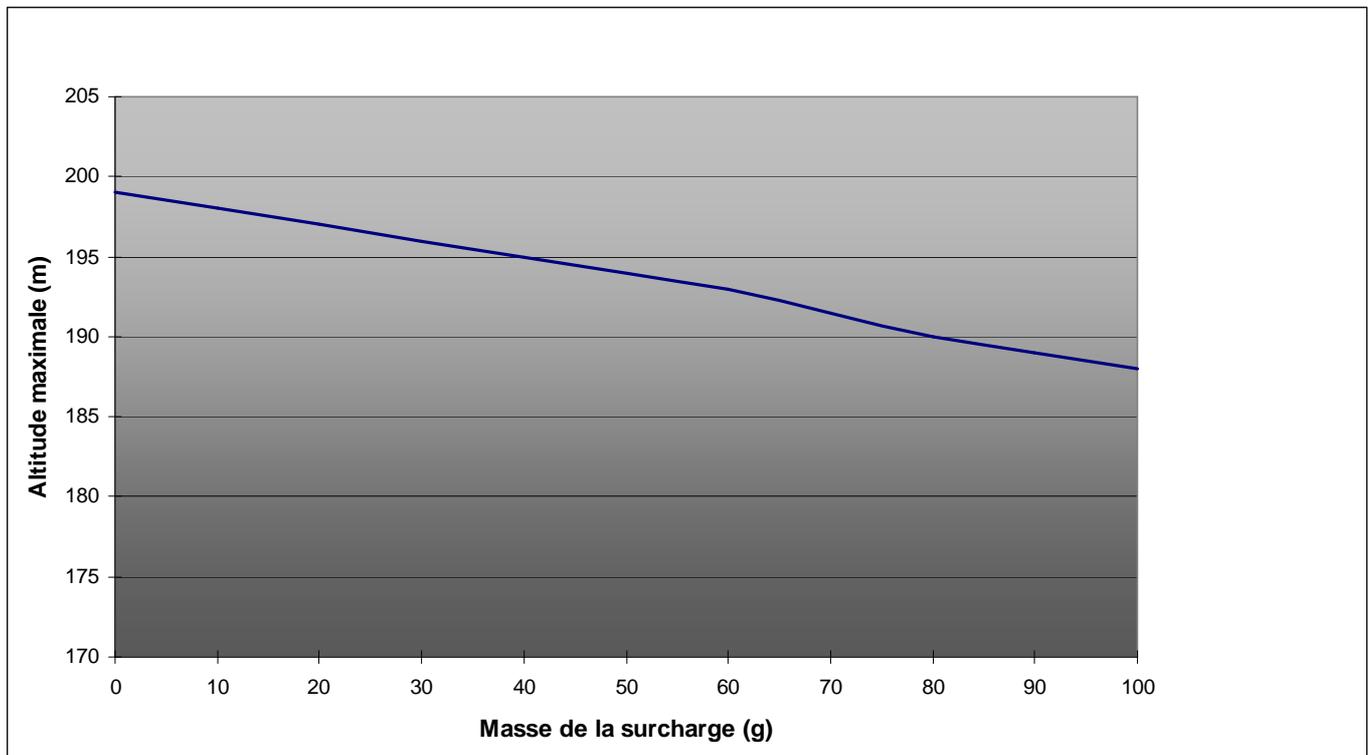


Ici la fusée est légère : lester la fusée dans des proportions raisonnables (70g) augmentera l'énergie cinétique de la fusée et contribuera donc à ses performances.

Si l'on augmente le volume du réservoir (on considère que chaque litre de réservoir nécessite une masse de 50g, comme dans la précédente simulation) :

caractéristiques de la fusée	
volume total	10,00 L
diamètre tuyère	1,50 cm
diamètre de la fusée	9,00 cm
masse à vide	500 g
Cx de la fusée	0,4
caractéristiques lancement	
volume eau (% total)	33 %
pression manomètre	8,0 bar
longueur tube lanceur	20 cm
volume réservoir + tuyau	0,00 L
masse surcharge	X
température	20 °C
pression atmosphérique	101300 Pa

On obtient la courbe suivante :



Dans ce cas, la masse de la fusée à vide est trop importante par rapport à la vitesse qu'elle pourra atteindre, ici alourdir la fusée ne présente aucun intérêt si l'on cherche à établir des records d'altitude !

2.2.3) Conclusion

Comme la vitesse de nos engins est limitée :

- Dans le cas d'une fusée à petit réservoir (donc très légère), lester la fusée s'avère être judicieux, il conviendra de déterminer soigneusement la masse de la surcharge !
- Dans le cas de fusées ayant un réservoir de gros volume, le poids de la fusée et de ses équipements ne justifie plus l'emploi de lest, on cherchera au contraire à alléger la fusée !

2.2) La force de poussée

La force de poussée provient de l'éjection de l'eau, puis de l'air sous pression contenue dans le réservoir de la fusée. Elle intervient dans les phases « Propulsion aqueuse » et « Propulsion gazeuse ». La phase « tube de lancement » ne fait pas intervenir la poussée car on suppose qu'aucune matière n'est éjectée.

Notre fusée, comme toutes les fusées, dépend du principe dit « d'action/réaction » : L'éjection de matière engendre une force opposée à celle générée par cette éjection, donc la fusée s'élève. Dans l'étude qui suit, on cherchera à déterminer quels sont les facteurs qui influencent l'action et sa réaction associée.

2.1.1) Quels paramètres influencent la poussée ?

Supposons notre fusée non soumise à des forces extérieures (poids, résistance de l'air etc..). Nous supposons de plus que le réservoir de notre fusée a un volume fixe. (pas de dilatation due à la pression) A un instant t après le décollage, la masse de la fusée est m , sa vitesse v et la vitesse d'éjection de l'eau est $v_{\text{éjection}}$ (donc par rapport à la terre, la vitesse de l'eau est $v - v_{\text{éjection}}$).

Utilisons le théorème de la quantité de mouvement : La quantité de mouvement à cet instant t est donc : $p = m.v$

Considérons maintenant l'instant infiniment voisin $t + \Delta t$, pendant le laps de temps très court Δt , une masse Δm d'eau va être éjectée, donc la masse de la fusée aura diminué de Δm , mais sa vitesse aura augmentée de Δv .

La quantité de mouvement de la fusée, à ce moment, sera de $(m - \Delta m).(v + \Delta v)$

La quantité de mouvement de la masse d'eau éjectée au même moment sera : $\Delta m.(v - v_{\text{éjection}})$.

Comme il y a conservation de la quantité de mouvement, on peut dire que la quantité de mouvement à l'instant t est égale à la quantité de mouvement à l'instant $t + \Delta t$, ce qui donne l'équation suivante :

$$(m - \Delta m).(v + \Delta v) + \Delta m.(v - v_{\text{éjection}}) = m.v$$

En réduisant, et en négligeant le terme $\Delta m.\Delta v$, très petit devant les autres, on obtient :

$$m.\Delta v = \Delta m. v_{\text{éjection}}$$

Comme l'expression du débit massique de l'eau est : $q_{\text{eau}} = \frac{\Delta m_{\text{eau}}}{\Delta t}$, on a $\Delta m_{\text{eau}} = q.\Delta t$

Si on remplace Δm dans l'équation précédente, on obtient : $m.\Delta v = q.\Delta t. v_{\text{éjection}}$, soit :

$$m \frac{\Delta v}{\Delta t} = q_{\text{eau}}.v_{\text{éjection}}$$

Or $\frac{\Delta v}{\Delta t}$ correspond à l'expression de l'accélération

On peut alors appliquer le principe fondamental de la dynamique.

Enoncé : Si la somme vectorielle des forces extérieures appliquées à un solide n'est pas nulle alors le vecteur vitesse plus centre d'inertie varie.

$$F = m.a$$

Donc d'après le principe fondamental de la dynamique on en déduit que $m \frac{\Delta v}{\Delta t}$ correspond à la force générée par l'éjection de l'eau. Cette force est la poussée P

On a donc : $P = q_{eau} \cdot v_{éjection}$

D'après les définitions des débits massiques et volumiques, on peut dire que :

$$q_{eau} = \frac{m_{eau \text{ éjectée}}}{S} = \rho_{eau} \cdot \frac{V_{eau \text{ éjectée}}}{S}$$

Or le volume d'eau éjecté par seconde est égal au produit de la surface d'éjection par la vitesse d'éjection, on a donc :

$$q_{eau} = \rho_{eau} \cdot S_{éjection} \cdot v_{éjection}$$

Ou encore :

$$P = \rho_{eau} \cdot S_{éjection} \cdot v_{éjection} \cdot v_{éjection}$$

En simplifiant les grandeurs, il vient donc la formule suivante :

$$P = \rho_{eau} \cdot S_{éjection} \cdot v_{éjection}^2$$

Calculons maintenant de quoi dépend v^2 :

Pour calculer la vitesse d'éjection de l'eau nous utiliserons un théorème établi par Daniel Bernoulli, ce théorème dit en substance que pour un liquide incompressible et non visqueux, il y a conservation de l'énergie mécanique dans l'écoulement en régime permanent et non turbulent de ce fluide.

Cette énergie mécanique est la somme des trois composantes que sont les énergies cinétique, potentielle et de pression. Entre deux points 1 et 2 d'un filet fluide, on a la relation :

$$\frac{\rho_{eau} \cdot v_1^2}{2} + \rho_{eau} \cdot g \cdot h_1 + P_1 = \frac{\rho_{eau} \cdot v_2^2}{2} + \rho_{eau} \cdot g \cdot h_2 + P_2$$

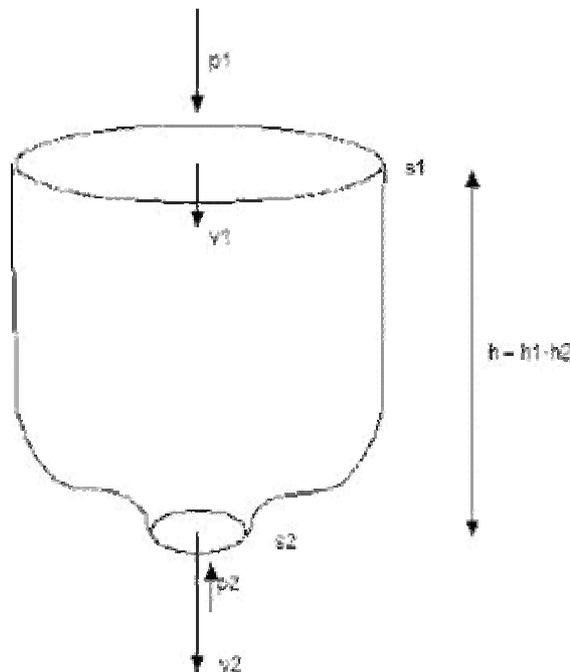
L'eau étant un fluide incompressible, on peut appliquer le principe de conservation du débit

$$q = S_1 \cdot v_1 = S_2 \cdot v_2$$

Le liquide étant incompressible, le débit en 1 est égal au débit en 2, d'après le principe de conservation du débit on a :

$$v_1 = v_2 \cdot \frac{S_2}{S_1}$$

Les variables de ces formules seront employées suivant le schéma suivant :



A la surface de séparation entre l'eau et l'air sous pression, à un instant donné, on a une pression p_1 , une surface s_1 (celle du corps de la bouteille) et une vitesse v_1 .

A la sortie du goulot de la bouteille, au même instant, on a :

- une pression P_2 qui est la pression atmosphérique P_{atm}
- une surface s_2 qui peut s'écrire $S_{éjection}$
- une vitesse v_2 , qui correspond à $v_{éjection}$

La pression interne P_1 pourra donc se nommer plus simplement P

Entre les deux surfaces, on a une hauteur d'eau h qui est la différence d'altitude entre les surfaces 1 et 2 .

Dans l'équation du théorème de Bernoulli on aura donc :

$$\frac{\rho_{eau} \cdot \left(v_{\text{éjection}} \cdot \frac{S_{\text{éjection}}}{S_1} \right)^2}{2} + \rho_{eau} \cdot g \cdot h_1 + P = \frac{\rho_{eau} \cdot v_{\text{éjection}}^2}{2} + \rho_{eau} \cdot g \cdot h_2 + P_{atm}$$

. Exprimons l'équation précédente en fonction de $v_{\text{éjection}}^2$:

$$v_{\text{éjection}}^2 = \frac{2(\rho_{eau} \cdot g \cdot h + P - P_{atm})}{\rho_{eau} \cdot \left(1 - \left(\frac{S_{\text{éjection}}}{S_1} \right)^2 \right)}$$

La nouvelle expression de la poussée sera donc :

$$P = \rho_{eau} \cdot S_{\text{éjection}} \cdot \frac{2(\rho_{eau} \cdot g \cdot h + P - P_{atm})}{\rho_{eau} \cdot \left(1 - \left(\frac{S_{\text{éjection}}}{S_1} \right)^2 \right)}$$

Constatations

La poussée de la fusée hydropneumatique dépend donc de :

- La pression extérieure
- La pression interne du réservoir
- La masse volumique du fluide
- La surface d'éjection du fluide
- La surface d'une section de bouteille à la limite eau/air (relatif à S_1)
- Le volume de fluide contenu dans le réservoir (relatif à h)

2.1.2) Etude d'optimisation

Ici nous ne devons pas seulement nous contenter de quantifier la poussée à un instant précis mais sur toute la durée du vol

Nous avons fixé que le fluide utilisé serait exclusivement de l'eau, le problème est donc simplifié.

On constate alors que :

- Augmenter la pression augmente la poussée
- Augmenter la hauteur d'eau (donc le volume) augmente la poussée
- Augmenter le diamètre de la tuyère augmente la poussée
- Augmenter le diamètre moyen du réservoir diminue la poussée (ce paramètre n'influe pas beaucoup sur la poussée, on le négligera)

D'après les définitions du débit massique et volumique, on peut aussi dire que :

- Augmenter la pression diminue la durée de la poussée
- Augmenter le diamètre de la tuyère diminue la durée de la poussée
- Augmenter le volume allonge la durée de la poussée

Il s'agira donc de trouver le bon compromis !

Là nous devons nous reposer sur la simulation conçue par Serge Henne car les calculs deviennent très compliqués !

Nous tiendrons compte de l'influence de la masse, car si on la néglige il suffirait d'augmenter indéfiniment le volume d'eau embarqué pour avoir une longue poussée efficace. Dans la réalité cette hypothèse n'apporte pas toujours un gain de performances, car augmenter le volume d'eau augmente aussi la masse !

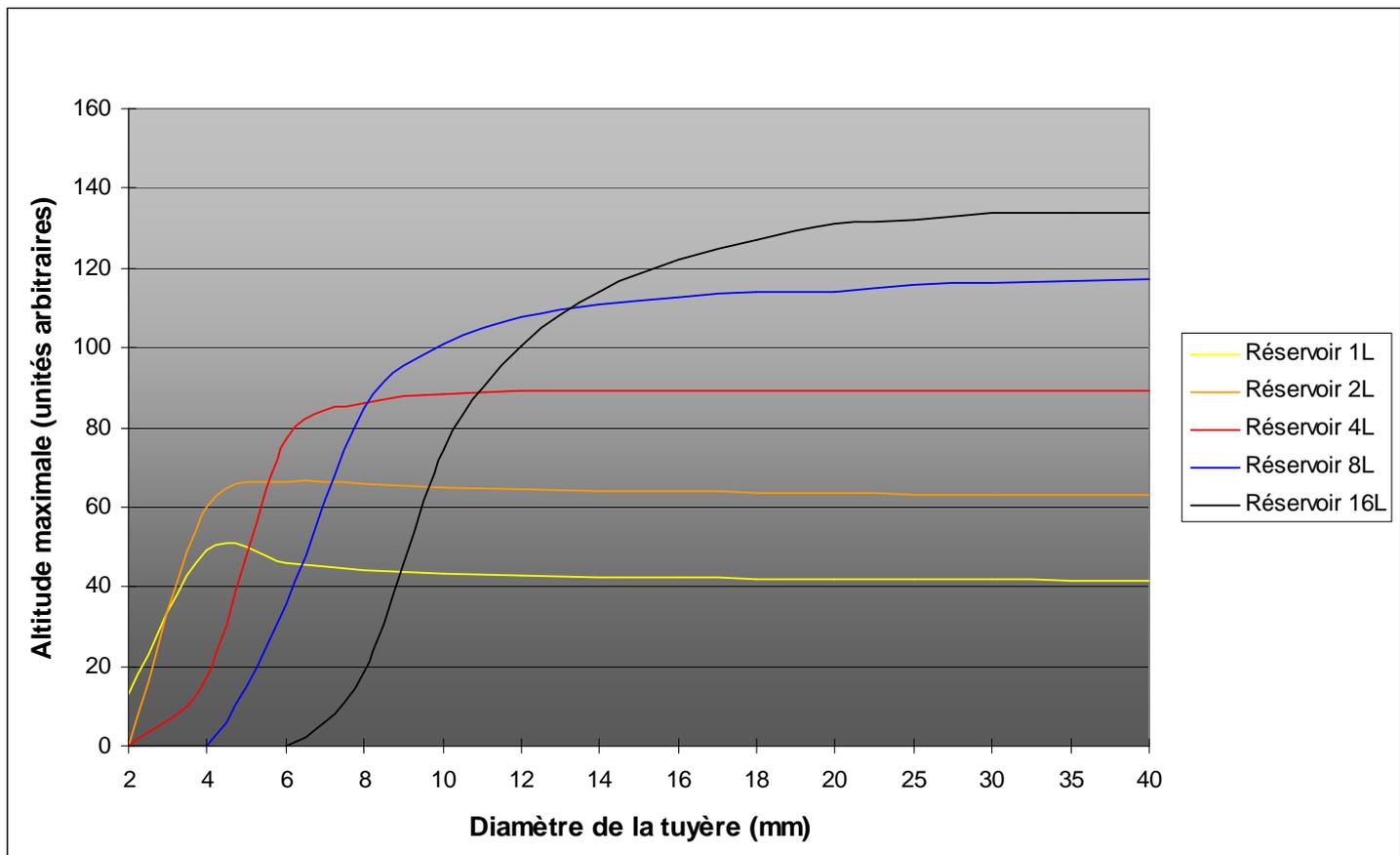
caractéristiques de la fusée	
volume total	X
diamètre tuyère	Y
diamètre de la fusée	9,00 cm
masse à vide	50.X
Cx de la fusée	0,4
caractéristiques lancement	
volume eau (% total)	33 %
pression manomètre	8,0 bar
longueur tube lanceur	0 cm
volume réservoir + tuyau	0,00 L
masse surcharge	0 g
température	20 °C
pression atmosphérique	101300 Pa

On fait varier les valeurs de Y de 5mm à 40mm

On prend comme valeurs de X : 2, 4, 8 et enfin 12 litres.

Comme toujours on considère que chaque litre de réservoir nécessite 50g

On obtient le graphique suivant, qui donne l'altitude maximale atteinte en fonction du diamètre de la tuyère pour différentes configurations.

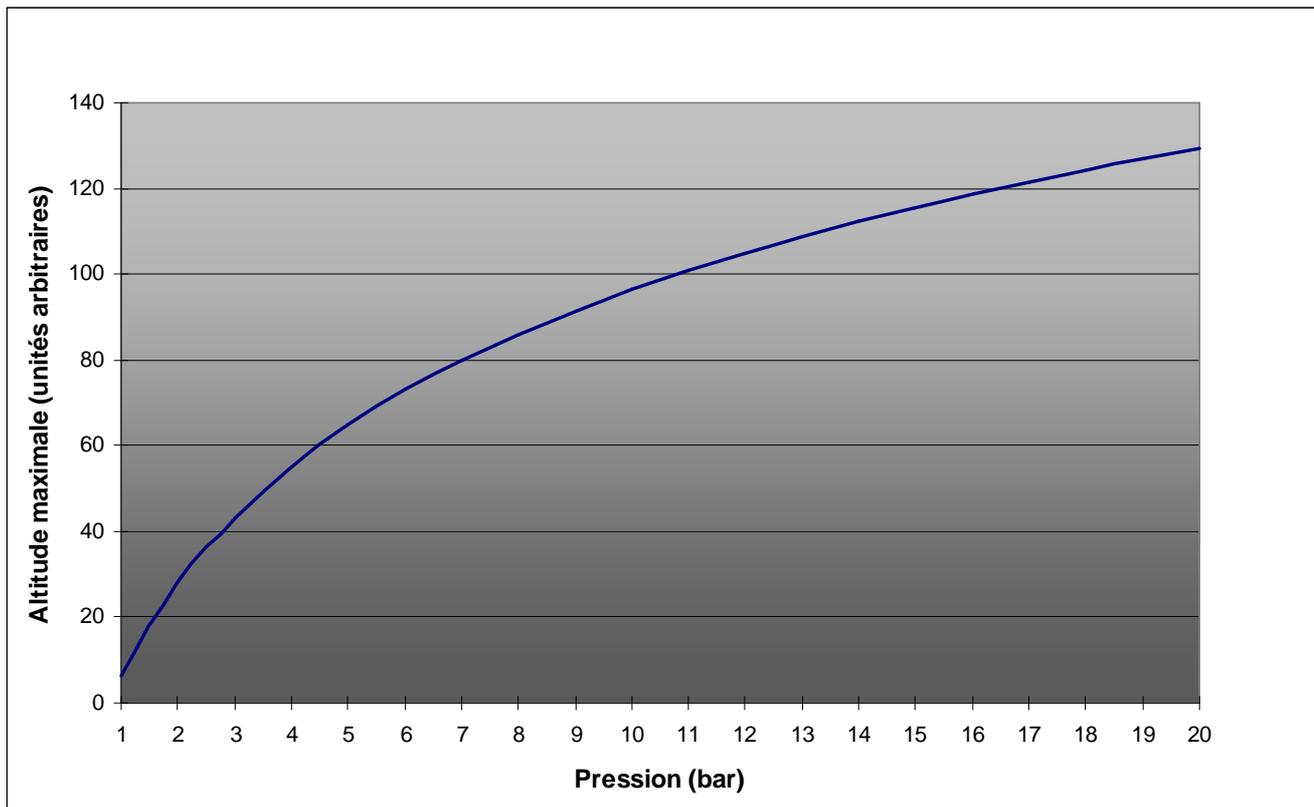


On constate qu'à partir d'une certaine valeur, si l'on augmente le diamètre de la tuyère l'altitude maximale atteinte ne varie plus.

On peut donc dire que plus on augmente le volume du réservoir, plus l'altitude atteinte sera importante si le diamètre de la tuyère est optimal. Ce diamètre optimal peut se définir de la façon suivante : plus on augmente le volume du réservoir plus le diamètre de la tuyère devra être important.

Concernant la pression, nos expérimentation réelles ainsi que nos simulations aboutissent à une constatation récurrente : Augmenter la pression dans le réservoir améliore les performances, quels que soit le volume embarqué ainsi que le diamètre de la tuyère.

Voici une courbe présentatrice de nos constatations :

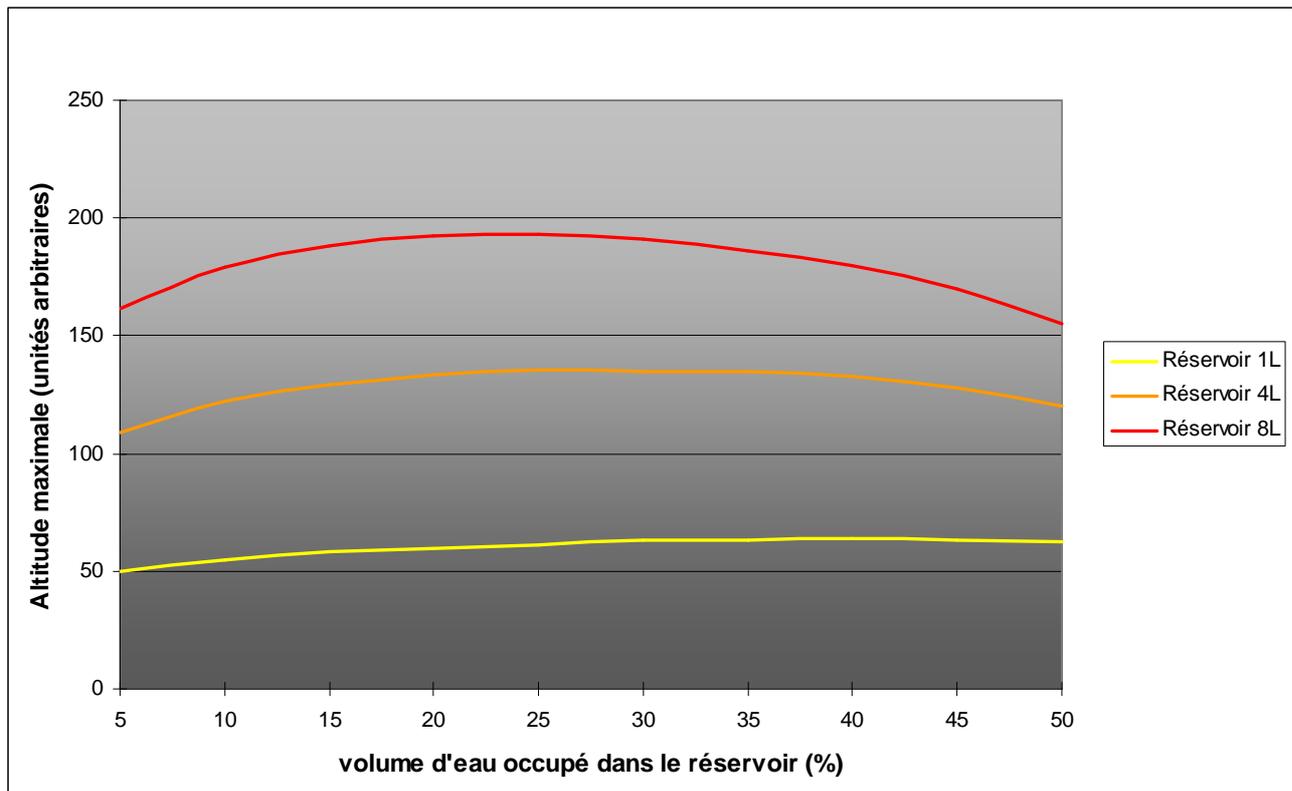


Cherchons maintenant quel est le volume d'eau optimal à embarquer. En effet trop d'eau allonge la poussée mais alourdit la fusée, pas assez allège la fusée mais réduit la durée de sa poussée

On reprend les paramètres optimaux résultant de la dernière simulation concernant volume et diamètre de la tuyère :

caractéristiques de la fusée	
volume total	1, 4, 8L
diamètre tuyère	0.5, 1, 2cm
diamètre de la fusée	9,00 cm
masse à vide	50.volume
Cx de la fusée	0,4
caractéristiques lancement	
volume eau (% total)	X
pression manomètre	8,0 bar
longueur tube lanceur	20 cm
volume réservoir + tuyau	0,00 L
masse surcharge	0 g
température	20 °C
pression atmosphérique	101300 Pa

On obtient les courbes suivantes :



Les courbes suggèrent des valeurs différentes selon les configuration, aussi déterminerons-nous expérimentalement le volume d'eau à embarquer lorsque nous aurons construit notre modèle de fusée. Généralement une valeur de 1/3 est recommandée, c'est pour cela que nous utilisons cette valeur par défaut dans nos simulations.

2.1.3) Conclusion

Afin d'optimiser la poussée de notre fusée, il faut donc :

- Pressuriser au maximum le réservoir
- Augmenter le volume du réservoir, et adapter le diamètre de la tuyère en conséquence

Note : L'un des deux paramètres peut être augmenté au détriment de l'autre (les fusées détentrices du record du monde d'altitude ont un réservoir de faible volume, mais pressurisé à plus de 80bars !)

- Soigneusement définir le volume d'eau à embarquer

2.3) La résistance de l'air

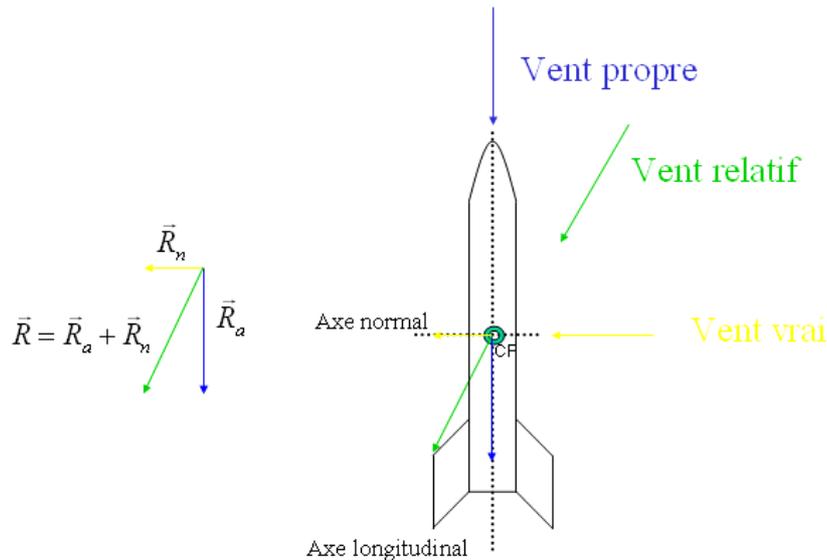
La résistance de l'air est une force qui s'oppose au mouvement de la fusée. Elle opère donc tout au long du vol !

2.3.1) Principes

Lors de son vol, la fusée doit se frayer un passage dans l'atmosphère qui l'entoure. Cette atmosphère freine la fusée dans des proportions non négligeables. La résistance que l'air oppose à la fusée est la conséquence :

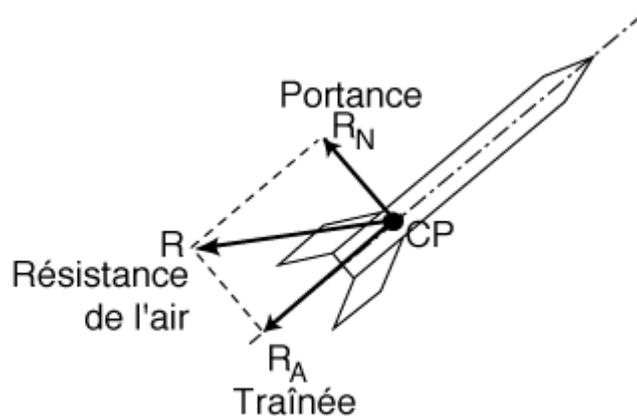
- Du déplacement d'air dû à la vitesse de déplacement de la fusée. Ce déplacement d'air est appelé « Vent propre »
- De l'air en déplacement autour de la fusée, dû aux conditions météorologiques. Ce déplacement d'air est appelé « Vent vrai » ou encore « Vent météo »

Les vitesses de ces deux vents s'additionnent pour ne donner qu'un seul déplacement d'air apparent : le vent relatif ou apparent.



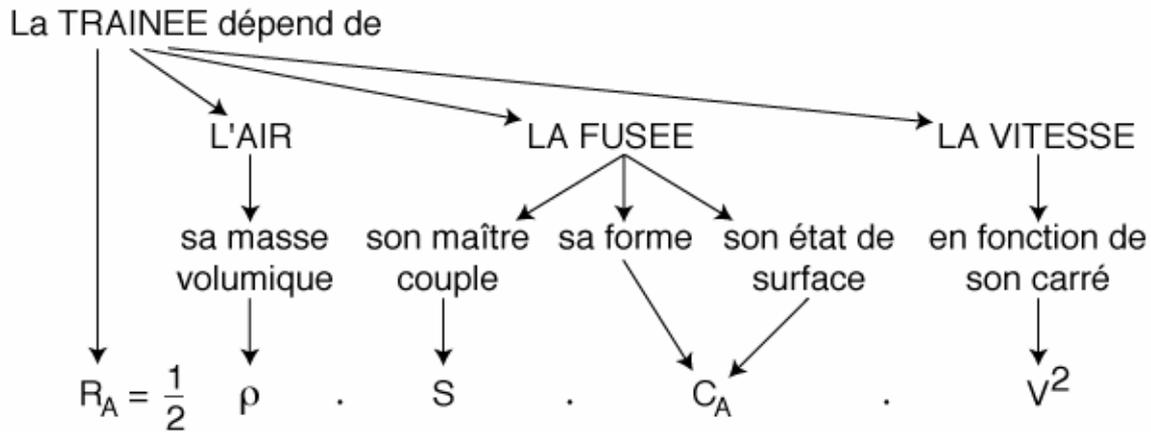
La résistance de l'air est la conséquence de l'existence de ce vent relatif par rapport à la fusée supposée immobile. Elle est de même direction et de même sens que ce vent. Sa valeur R est en relation avec le carré de la vitesse de ce vent relatif.

Cette résistance se décompose en deux composantes : la portance R_N et la traînée R_A .



On constate que la composante R_A s'oppose à la poussée de la fusée, et donc à ses performances...

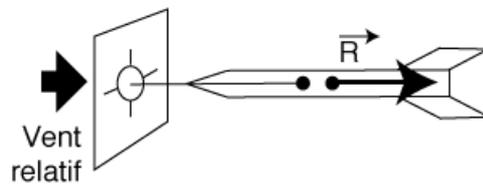
2.3.2) Comment réduire la traînée ?



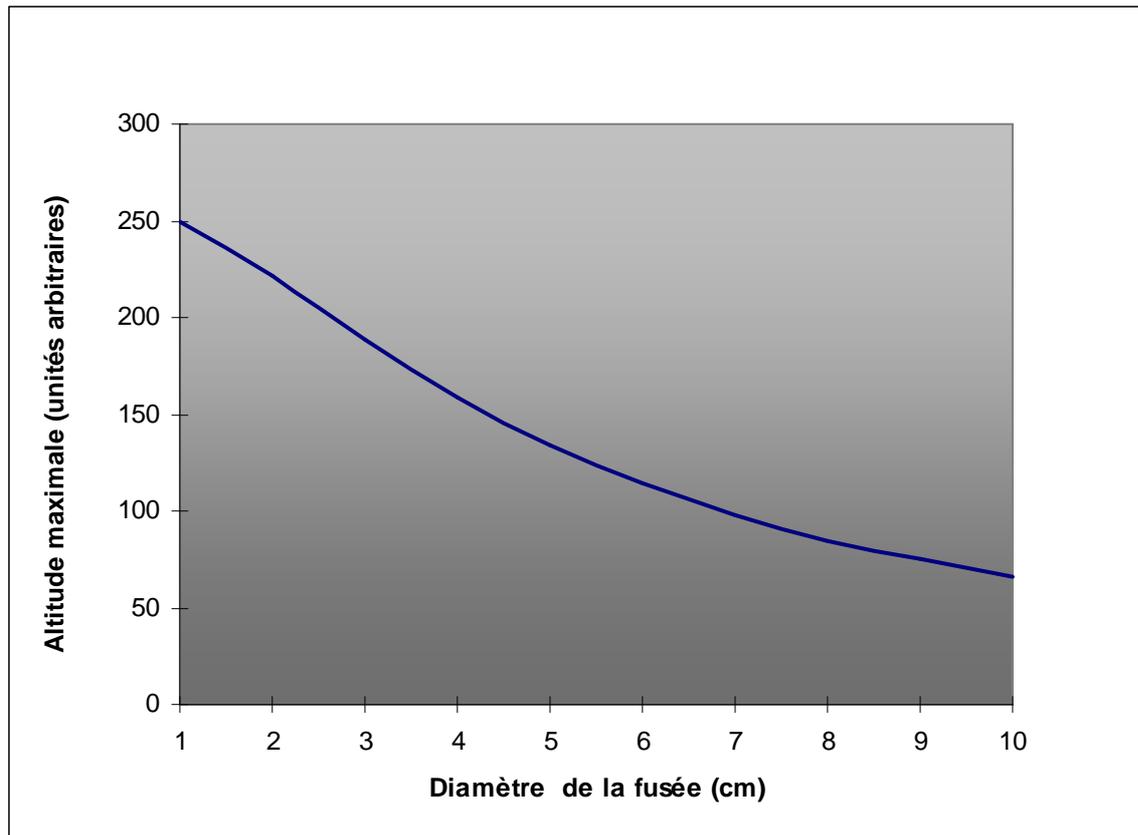
La masse volumique de l'air dépend des conditions atmosphériques, mais étant donné la faible altitude qu'atteignent nos fusées (comparé aux fusées qui atteignent l'espace...), ce paramètre n'a pas grande incidence sur le vol de nos fusées.

On peut tout de même en déduire que la traînée de nos fusées sera moindre dans des conditions météorologiques dépressionnaires, ainsi que lors de lancements effectués à haute altitude...

Le maître-couple est l'aire de la projection de la fusée sur un plan perpendiculaire à l'axe du vent relatif :



On en déduit donc que le maître couple est directement proportionnel au carré du diamètre de la fusée. La simulation de Serge Henne permet l'entrée d'un paramètre « diamètre de la fusée ». Le graphique suivant, obtenu d'après la simulation, est équivoque :

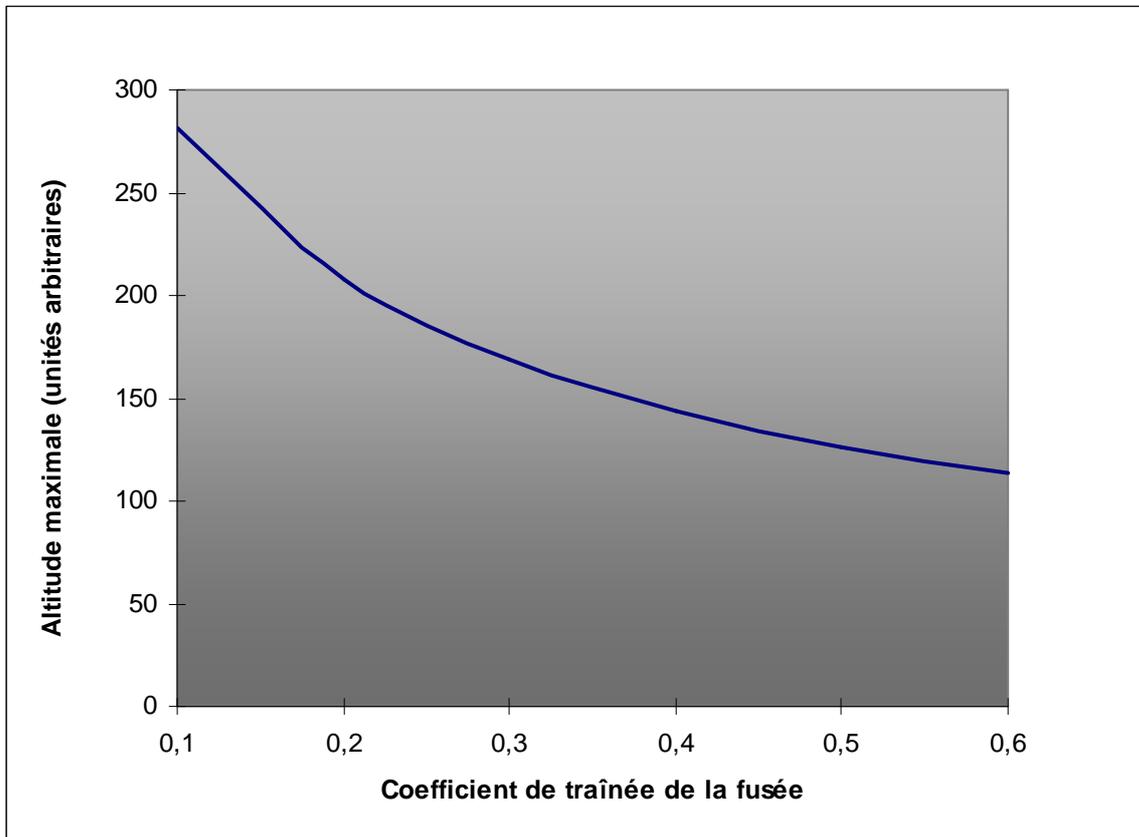


La forme de la fusée intervient dans l'expression de la traînée, néanmoins l'appréciation des performances de telle ou telle forme ne pourra se faire qu'intuitivement... Nous nous contenterons de nous inspirer des formes des vraies fusées, qui ont été soigneusement conçues et étudiées en soufflerie !

L'état de surface : un revêtement de papier abrasif sera moins performant qu'un vernis poncé finement. Conférer des surfaces parfaitement lisses à notre fusée sera donc un gage de performances.

Note : $S.C_A$ correspond au coefficient de traînée, ou C_X . Ce coefficient de traînée est le rapport de l'effort nécessaire pour maintenir un objet dans un écoulement d'air par rapport à une plaque de 1 m².

D'après la simulation de Serge Henne, nous pouvons aussi simuler les performances d'une fusée à eau en fonction de son C_X :



Il nous est difficile de trouver le C_x de nos fusées (voir plus haut), néanmoins d'après nos recherches sur Internet (Encyclopédies en ligne, sites spécialisés, forums), il apparaît qu'il est compris entre 0,2 et 0,4 pour une fusée à eau « bien construite ».

2.3.3) Conclusion

La traînée est proportionnelle au carré de la vitesse de la fusée, ce qui confirme que l'aérodynamique est un élément essentiel à prendre en compte pour la construction des fusées, même hydroaérodynamiques (une fusée à eau peut atteindre plus de 200km/h...).

Réduire la traînée aura donc un effet bénéfique sur les performances de la fusée, en effet le vecteur R_A est opposé au vecteur qui caractérise la poussée

Pour réduire la traînée, on a donc tout intérêt à :

- Réduire le diamètre de la fusée (ce qui revient à augmenter sa longueur à volume égal)
- Conférer à notre fusée des surfaces lisses
- Optimiser la forme des ailerons ainsi que de l'ogive

3) La stabilité de la fusée

Rien ne sert de construire une fusée puissante si l'on est incapable de lui assurer un vol stable, c'est-à-dire un vol dont on pourra prédire avec plus ou moins de précision la trajectoire (si possible verticale et rectiligne !)

Pour être stable, la fusée doit conserver la même attitude durant son vol, c'est à dire maintenir son axe longitudinal aligné avec le vent relatif.

Pour garantir un vol stable à notre fusée nous devons agir sur deux paramètres (voir 2.3.1.) :

- La position du point d'application des efforts aérodynamiques s'appliquant sur la fusée (relatif à la « Marge Statique » de la fusée)
- La valeur de la portance générée par la fusée

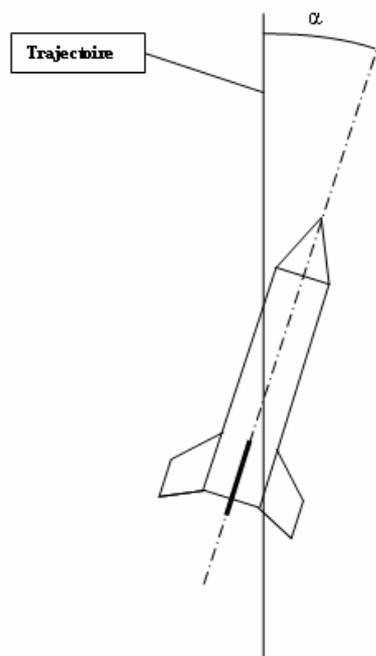
3.1) La Marge Statique

Le point d'application des forces de portance et de traînée s'appelle le « Centre de Portance Aérodynamique », noté **CP** ou **CPA**.

Nous appellerons aussi le centre de gravité de la fusée **CdM** (Centre des Masses)

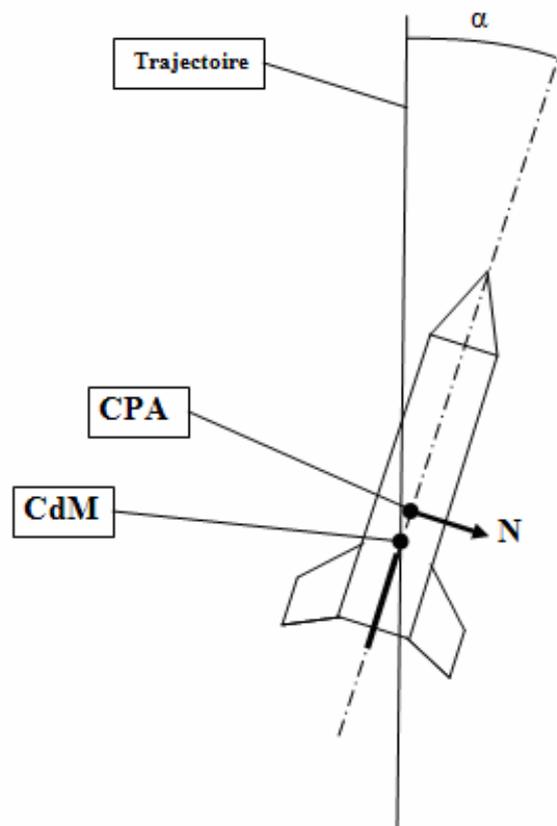
Comme le point d'application du Centre de Portance reste fixe tout au long du vol de la fusée (alors que le centre de gravité de la fusée « monte » à mesure que l'eau du réservoir de la fusée est éjectée), le problème est simplifié.

Considérons l'une de nos fusées alors qu'une perturbation vient de l'écarter d'un angle α de l'axe de sa trajectoire.

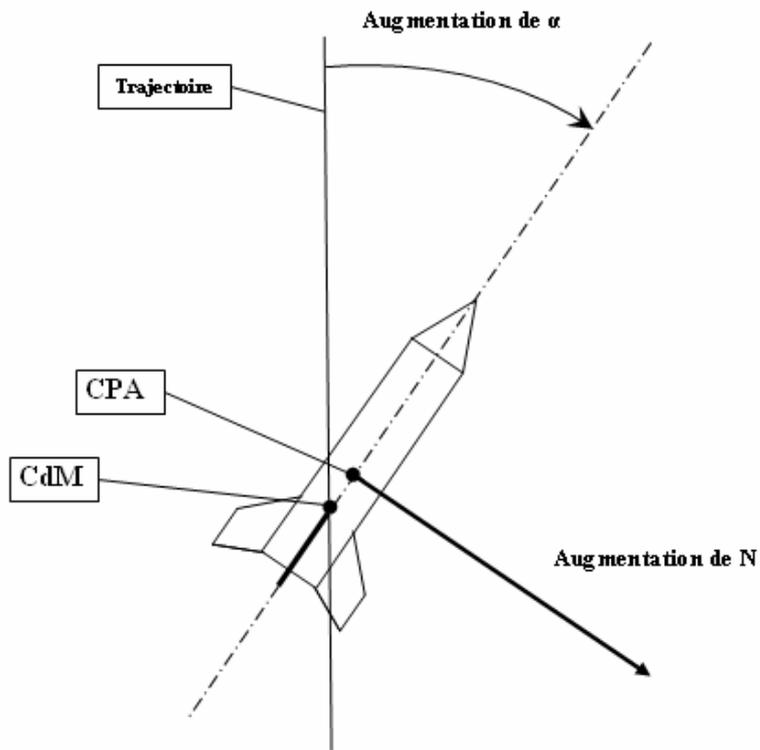


La fusée se déplace alors en « crabe » : il se développe sur son fuselage et sur ses ailerons des efforts aérodynamiques.

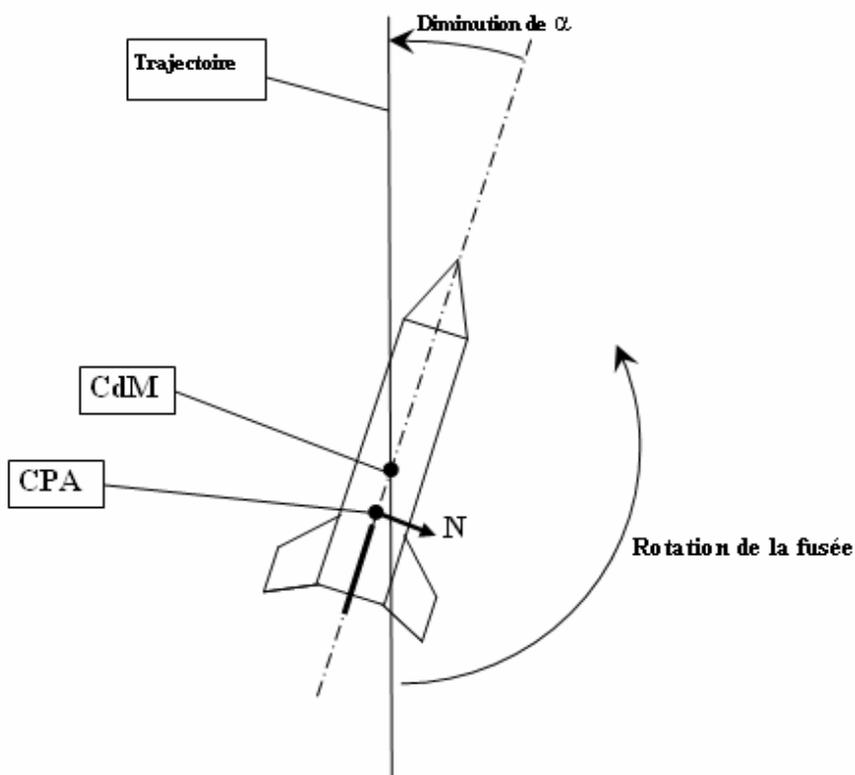
Appelons N la valeur de l'intensité de ces efforts, qui s'appliquent au CPA. N correspond alors la portance générée par la fusée



La composante N induit un moment de rotation de la fusée autour de son CdM. Il est aisé de voir, en observant le dessin ci-dessus, que si le CPA se situe en avant du CdM, cette rotation induite par N ne fera qu'augmenter l'angle d'embarquée de la fusée.



On comprend que dans ce cas là, la fusée est alors instable...

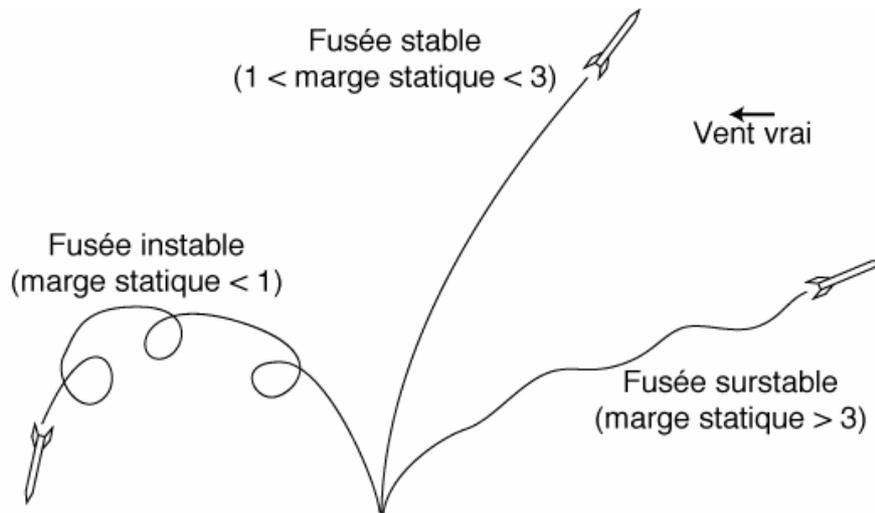


Par contre, si le CPA est en arrière du CdM (voir schéma précédent), la rotation induite par N (qui est dans le sens inverse de la précédente) fera diminuer l'angle de la fusée sur sa trajectoire. L'embarquée de la fusée diminuera, on peut donc assurer que celle-ci est stable.

En conclusion, pour qu'un mobile aérien soit naturellement stable, il faut que son Centre de Portance Aérodynamique soit en arrière de son Centre des Masses. Cette distance entre le CPA et le CdM est traditionnellement appelée « Marge Statique »

Néanmoins une Marge Statique trop importante nuit aussi à la stabilité de la fusée : la force de rappel sera très vigoureuse, renverra la fusée de l'autre côté du vent relatif et la fusée oscillera continuellement sans jamais trouver de position d'équilibre. La Marge Statique d'une fusée doit donc être comprise entre 1 et 3 diamètres de son fuselage, d'après les expérimentations des amateurs de fusées...

On a donc :



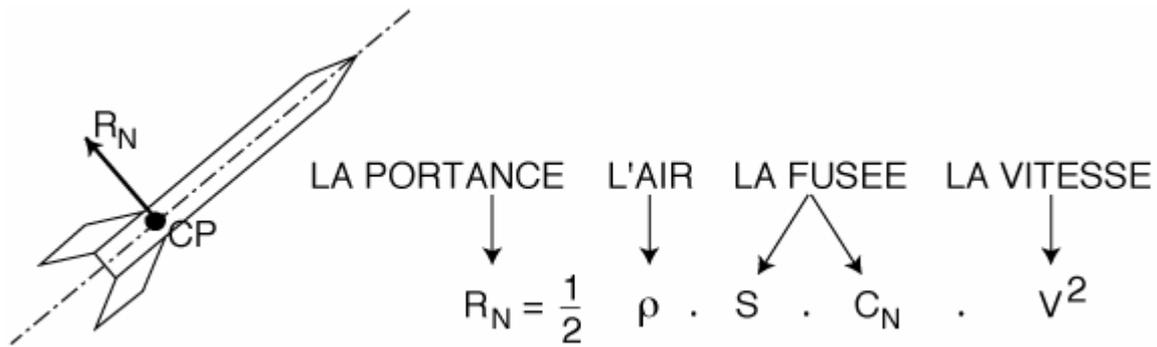
3.2) La portance

La valeur de la portance (composante N sur les précédents schémas) de notre fusée est donc un paramètre essentiel de la stabilité de la fusée au cours de son vol, en effet c'est la portance des ailerons qui vient contrebalancer celle (déstabilisatrice) de l'ogive. Ce contre-balancement est facilement quantifié par les valeurs des portances des ailerons et de l'ogive par rapport au CdM.

On peut donc dire que :

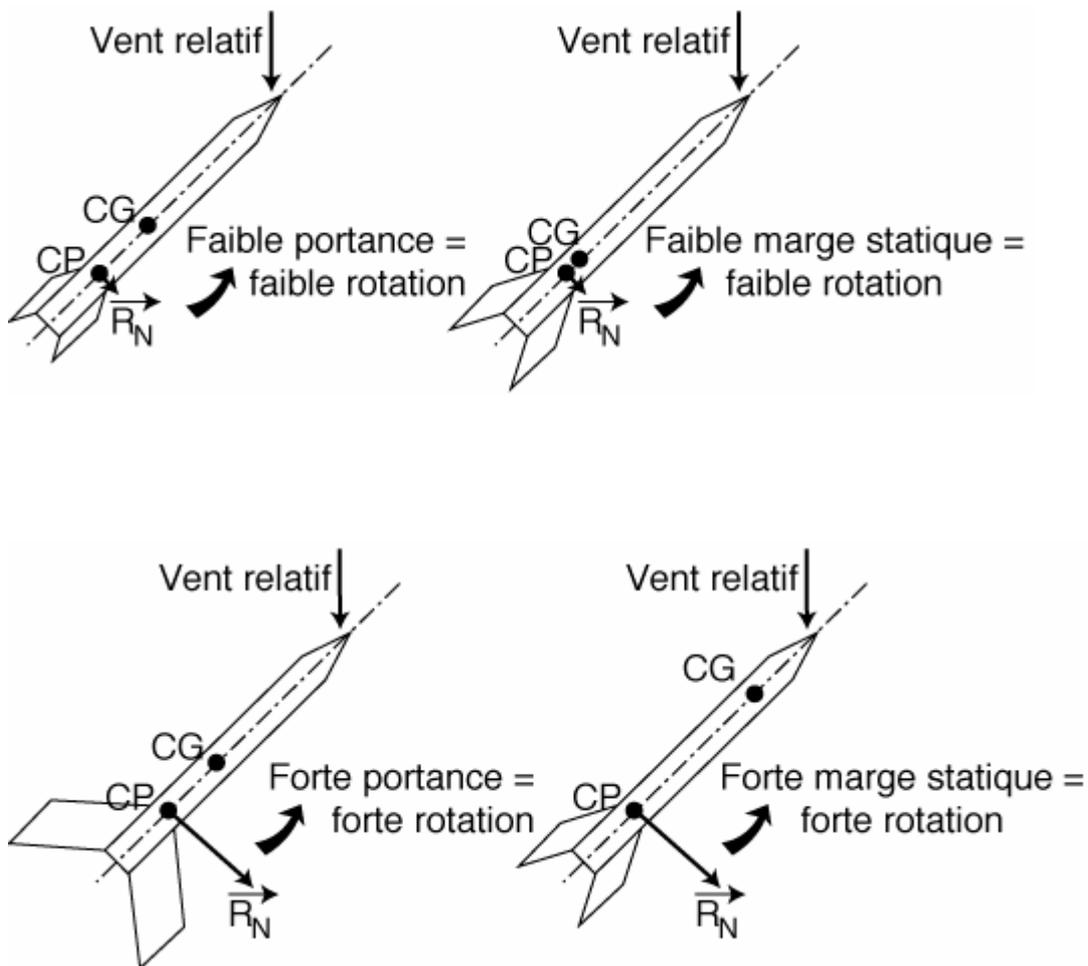
- Si la valeur de N est trop élevée la fusée aura une Marge Statique trop importante
- Si la valeur de N est trop faible la fusée aura une Marge Statique trop faible.

L'expression de la portance aérodynamique est identique à celle de la traînée, au coefficient près qui devient coefficient de portance C_N et qui prend bien entendu une autre valeur :



3.3) Conclusion

On a donc les cas à éviter suivants :



Pour assurer un vol stable à notre fusée, nous devons donc déterminer soigneusement sa Marge Statique (c'est-à-dire définir la position des ailerons ainsi que leur portance, par rapport au centre de gravité de la fusée).

Ces paramètres peuvent être calculés par le logiciel « Carina » (bien qu'ayant effectué ces calculs « à la main », ce logiciel permet une automatisation des tâches fort pratique !), nous l'utiliserons donc lors de la construction de notre fusée afin de lui conférer des formes lui assurant un vol stable...

4) Conclusion

On peut maintenant dégager les conditions essentielles qui assureront un vol optimal à notre fusée :

- On doit chercher à réduire au maximum la traînée de la fusée (Surfaces lisses, fuselage fin, formes « optimisées »).
- Il faut chercher à pressuriser au maximum le réservoir de la fusée (donc au maximum que nous nous sommes fixés, c'est-à-dire 8bars).
- Comme nous ne pouvons pas pressuriser fortement nos fusées, il faut augmenter le volume du réservoir de notre fusée (Il n'y a là comme limite que le nombre de bouteilles à notre disposition !).
- Il faut adapter le diamètre de la tuyère en fonction du volume de réservoir choisi.
- Il faut alléger la fusée (puisque les configurations à grand réservoir sont les plus performantes à notre niveau).
- Il faut soigneusement calculer les formes des appendices aérodynamiques assurant la stabilité de nos fusées.
- Doter la base de lancement d'un « launch tube » le plus efficace possible : limiter l'espace entre le tube et la tuyère de la fusée.

PARTIE III.

Validation de notre modèle de fusée hydropneumatique



1) Caractéristiques de notre fusée

D'après les résultats de notre analyse, nous pouvons maintenant établir un cahier des charges.

1.1) La fusée

L'optimisation d'une fusée hydropneumatique peut se faire en fonction du volume de son réservoir, chaque volume de réservoir nécessite une configuration propre.

1.2.1) Définissons alors un volume de réservoir pour notre fusée

Nous choisissons un volume de **4.5L pour notre réservoir**.

1.2.2) Quel type de bouteilles de boisson gazeuse employer ?

- Les petites bouteilles sont certes fines, mais leur assemblage engendrera une masse supplémentaire trop importante
- Les bouteilles de 2L sont très larges...
- Les bouteilles de 1.5L semblent alors être une bonne alternative : leur diamètre de 9cm associé à un volume suffisant est idéal.

Nous prendrons donc des bouteilles de boisson gazeuse de 1.5L

Bien entendu **les parois de ces bouteilles devront être lisses !**

Pour obtenir notre volume de 4.5L, d'après nos calculs il faut au moins emboîter 4 bouteilles

1.2.5) Quel diamètre de tuyère ?

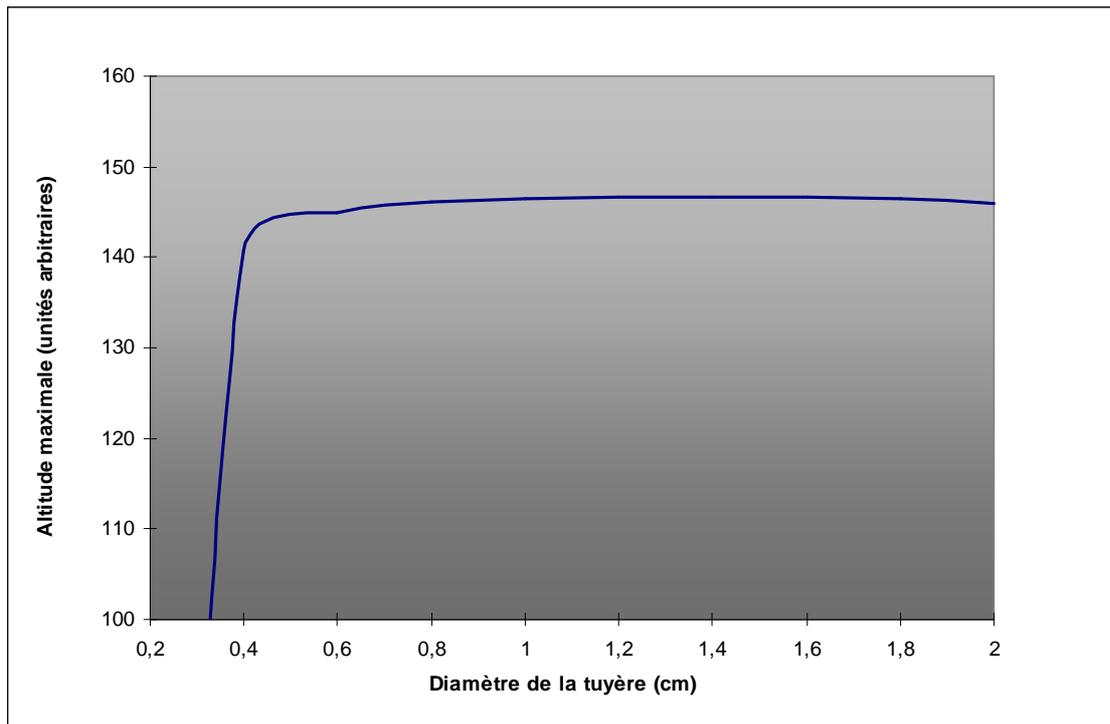
caractéristiques de la fusée	
volume total	4,50 L
diamètre tuyère	X
diamètre de la fusée	9,00 cm
masse à vide	225 g
Cx de la fusée	0,4

caractéristiques lancement	
volume eau (% total)	33 %
pression manomètre	8,0 bar
longueur tube lanceur	80 cm
volume réservoir + tuyau	0,00 L
masse surcharge	0 g
température	20 °C
pression atmosphérique	101300 Pa

Afin d'établir un diamètre optimal à notre tuyère (rappelons qu'il doit principalement s'effectuer en fonction du volume du réservoir de la fusée), utilisons la simulation de Serge Henne

On peut déjà affiner les paramètres : seul la masse de la fusée est approximative

On obtient alors la courbe suivante :



On a vu que si la masse de la fusée augmente on a intérêt à accélérer fortement la fusée (donc augmenter la poussée, donc augmenter le diamètre de la tuyère). La masse de notre fusée étant susceptible d'augmenter, choisissons le plus grand diamètre de tuyère acceptable dans cette configuration (et pour le système Gardena) : Nous choisissons donc un **diamètre de tuyère de 17 mm**

1.2) La base de lancement

Elle devra disposer d'un tube de lancement, le lancement devra pouvoir s'opérer à distance et une dépressurisation devra être possible (pour satisfaire nos exigences en matière de sécurité).

[Quelle longueur pour le tube de lancement ?](#)

L'emboîtement de 4 bouteilles de 1.5L donne une hauteur d'environ 85cm au réservoir. Nous prévoyons alors un **tube de lancement de 80 cm**

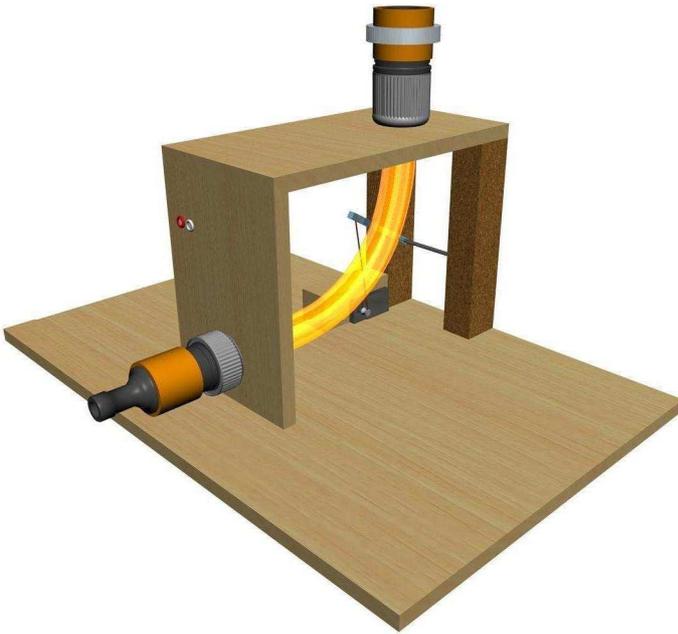
2) Construction de notre fusée

Dans cette partie nous expliquerons comment nous avons traduit les caractéristiques de notre fusée en réalisation concrète. Nous avons essayé de trouver les solutions qui permettront d'appliquer au mieux les recommandations que nous avons établies précédemment.

Nous précisons à chaque fois le matériel spécifique à employer. Les outils utilisés sont ceux détenus par tout bricoleur qui se respecte un minimum : perceuse, fraiseuse, tournevis, scie sauteuse, scie circulaire, lime, marteau pour les cas désespérés...

2.1) Le dispositif au sol

2.1.1) La base de lancement



Nous avons d'abord utilisé une base de lancement comme celle représenté ci-contre, mais celle-ci présentait quelques problèmes de stabilité, et le bois n'aimait pas beaucoup les douches qu'on lui administrait à chaque décollage !

Nous avons donc décidé de construire une base en métal, plus stable et plus solide, avec laquelle on peut déclencher le vol à distance, électriquement. Pour cela on installera un petit moteur qui se chargera d'abaisser le manchon du connecteur Gardena.

Matériel :

- Tubes rectangulaires en métal
- Plaque de bois
- Moteur de direction de voiture télécommandée
- Fils de pêche



On soude tout d'abord les tubes afin d'obtenir la forme désirée

La partie supérieure est sciée de manière à accueillir une plateforme



On découpe ensuite la plateforme (elle sera en bois que l'on vernira, n'ayant pas de métal à disposition...), on y colle le connecteur Gardena et les fils de pêche qui permettront au moteur d'abaisser la rondelle. Puis on la visse sur le support métallique.

Il ne reste plus qu'à installer le tube et à coller le moteur qui permettra de tirer le fil de pêche vers le bas et de ce fait d'abaisser le manchon (orange), afin de déclencher le décollage

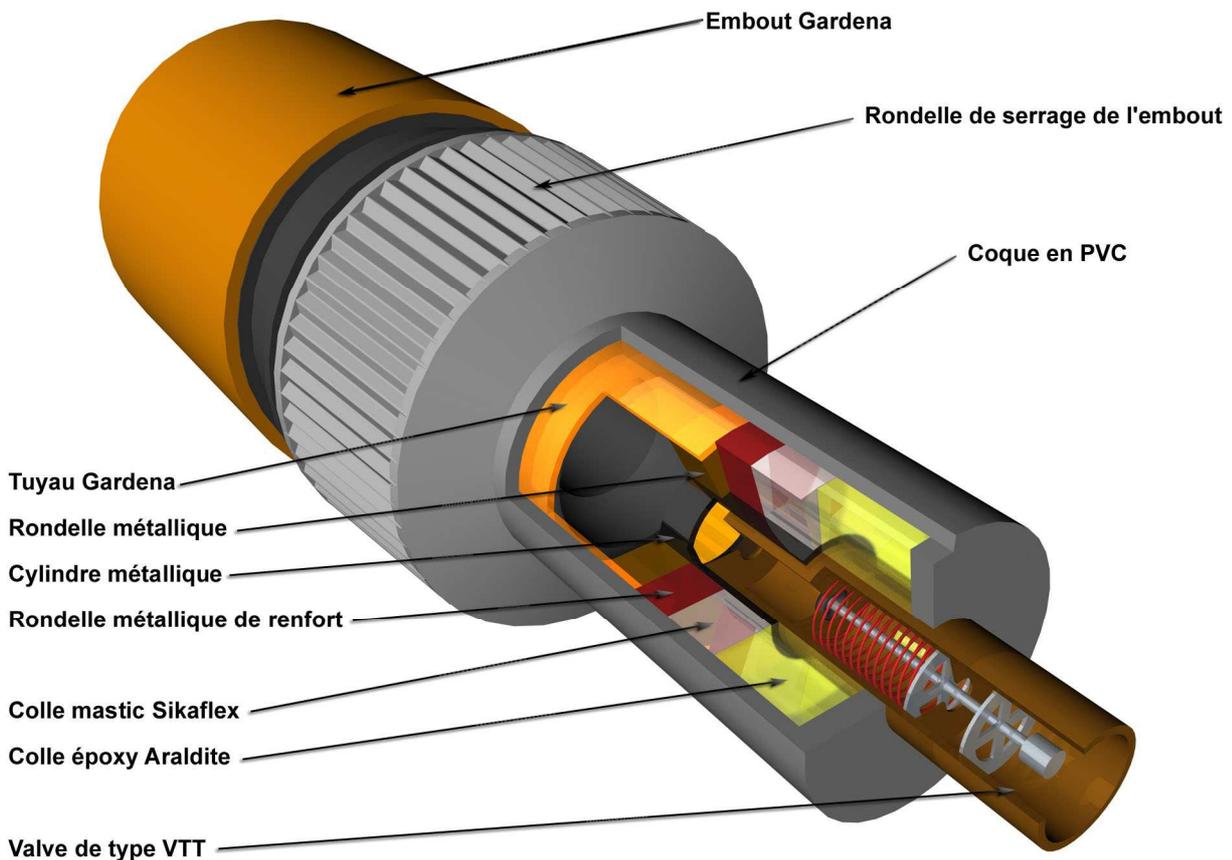


2.1.2) [Les systèmes de connections](#)

Nous utilisons le système « Gardena » pour assurer les connections sous pression ; et une pompe à vélo pour fournir cette pression. Il faut donc concevoir un élément permettant d'établir une connection étanche entre la pompe et le système « Gardena »

Le principe est simple : il s'agit de relier une valve de pneu de VTT (qui sera connecté à la pompe à vélo) à un embout Gardena

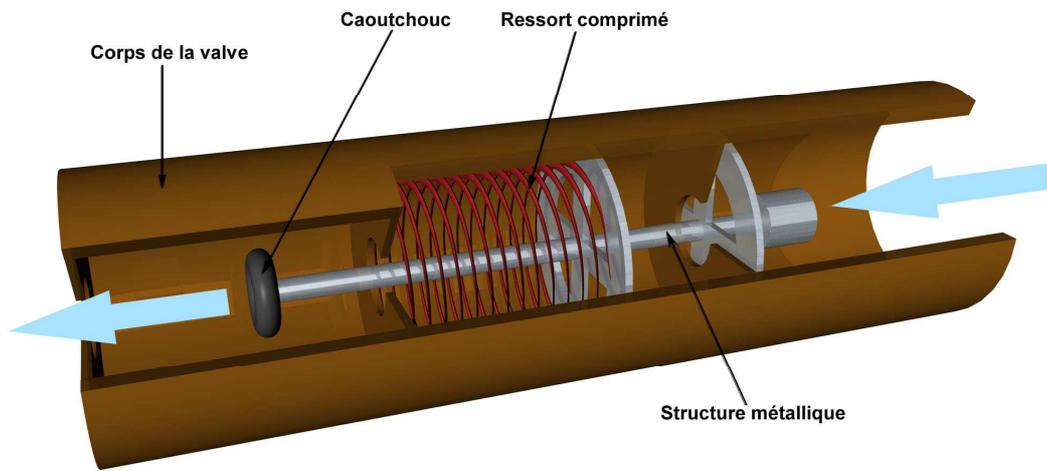
Voici un schéma général du système :



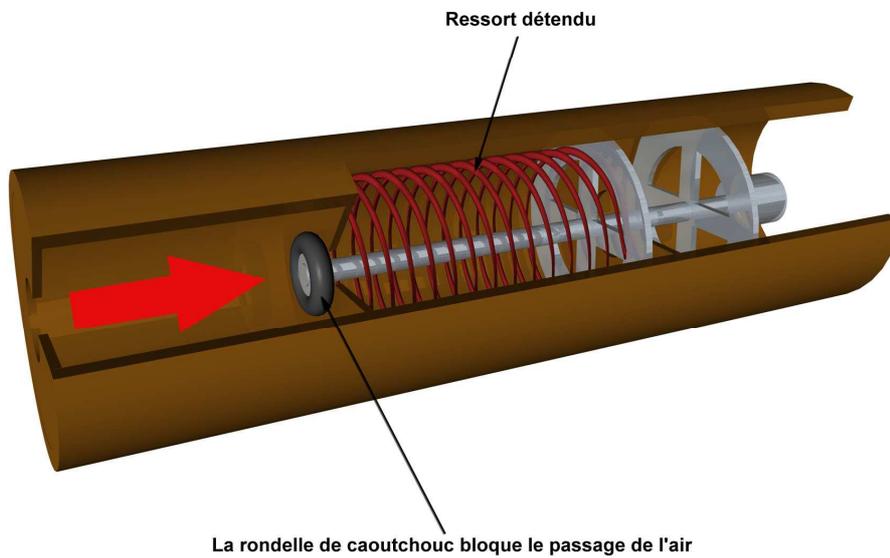
Le tuyau Gardena est embranché sur le connecteur, il nous a donc juste fallu trouver un moyen de le relier à une valve de VTT d'un diamètre plus petit, pour cela nous avons procédé de la sorte :

1. On colle sur la rondelle de serrage de l'embout un tube en PVC, que l'on a au préalable glissé autour du tuyau.
2. À l'aide de rondelles et de tubes on établit une jonction entre la valve de VTT et le tuyau Gardena
3. On remplit ensuite la cavité restante de colle, en deux parties : Au niveau de l'intersection entre les rondelles et la valve on applique un cordon de colle mastic qui assurera l'étanchéité ; puis on laisse sécher, et ensuite on emplit le reste avec de la colle époxy qui assurera la solidité du montage.

La valve en position "ouvert"



La valve en position "fermée" : Pas de passage de l'air



On peut alors réaliser le montage :

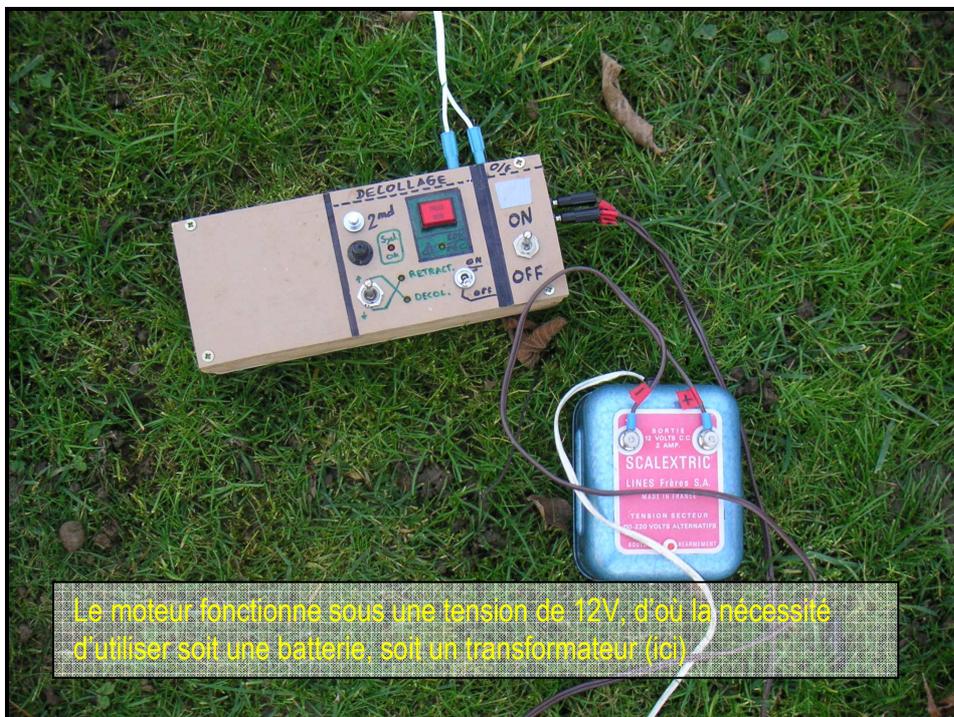


2.1.3) Le boîtier de commande

Nous voulons être capables de commander le décollage de notre fusée à distance, pour cela nous avons installé un dispositif électrique (voir 2.1.1). Il ne nous reste plus qu'à fabriquer la commande de ce dispositif.

Matériel :

- Bois
- Plusieurs DEL de couleurs différentes
- Des interrupteurs 2 positions



Ce boîtier contient simplement trois interrupteurs (un pour la mise sous tension, un autre pour le décollage et un dernier pour la sécurité, afin d'éviter de déclencher le décollage par mégarde...), et des diodes de contrôle

2.2) La fusée

2.2.2) La tuyère

La tuyère est l'élément qui assure la jonction avec le pas de tir durant la pressurisation de la fusée : cette jonction doit donc être étanche et capable de résister à la pression. Nous utilisons le système « Gardena », donc nous allons devoir adapter un embout sur le goulot du réservoir de la fusée.

Matériel :

- Connecteur grand débit « Gardena » mâle
- Bouchon de bouteille de boisson gazeuse
- Tube en PVC $\varnothing 19\text{mm}$
- Colle Epoxy « Araldite »

Comme nous avons défini que le diamètre de la tuyère serait de 17mm, nous commençons par fraiser l'intérieur du connecteur Gardena



L'embout Gardena assure la jonction avec le pas de tir tandis ce que le bouchon permet de visser l'ensemble sur la bouteille.

Il faut percer le bouchon : un trou $\varnothing 19\text{mm}$, centré sur le centre du bouchon. Ensuite on glisse par ce trou une section de tube en PVC qui permettra d'assurer le bon maintien des deux éléments. Entailler les bords externes du bouchon, parallèlement à sa base, permet de limiter encore plus les risques de désolidarisation de l'ensemble Gardena/bouchon. On s'y emploiera à l'aide d'un cutter.



Ensuite on emboîte les deux éléments, après avoir copieusement encollé l'intérieur de l'embout Gardena à l'aide de colle époxy.



Lorsque la colle a séché, on peut aisément visser la tuyère sur n'importe quelle bouteille ayant le bon diamètre de goulot ; le montage est étanche et résiste très bien à la pression (nous l'avons testé jusqu'à 10 bars).



- Avantages :
- Modularité
 - Simplicité d'emploi
 - Fiabilité

Inconvénients :

- Nécessite l'utilisation exclusive du système « Gardena »
- Alourdit l'arrière de la fusée
- Diamètre de la tuyère limité

2.2.1) Le réservoir

Nous avons décidé de fabriquer un réservoir de 4.5 litres, contenu dans une fusée ayant un fuselage de 90mm. Malheureusement il n'existe pas de bouteilles de boissons gazeuses ayant ces mensurations...

Un problème se pose alors : comment coller les bouteilles ensemble de façon à obtenir le volume de 4.5L requis ?

Après quelques tests, nous décidons d'utiliser la technique dite du « double collage ». Cette technique consiste à « empiler » plusieurs bouteilles, puis à les coller à l'intérieur à l'aide d'un mastic assurant l'étanchéité, à l'extérieur avec de la colle époxy qui assure la rigidité.

Matériel :

- Colle époxy (Araldite) pour la rigidité
- Mastic (Sikaflex 11FC) pour l'étanchéité
- Bouteilles de boisson gazeuse cylindriques, de volume 1,5L
- Ruban adhésif pour plomberie

On découpe le goulot de l'une des deux bouteilles et le cul de l'autre, et on ponce les parties qui seront en contact à l'aide de toile émeri (une ponceuse électrique enlève trop de matière...)



Les deux bouteilles doivent pouvoir s'emboîter l'une sur l'autre. Si ce n'est pas le cas il faut recommencer...



On badigeonne de colle mastic les parties qui seront en contact.



On emboîte les bouteilles au fur et à mesure, en prenant garde à conserver un alignement parfait. Pour cela nous avons mis au point un procédé utilisant un laser, coulé dans un bouchon on le visse sur la bouteille supérieure, ce qui permet de vérifier l'alignement

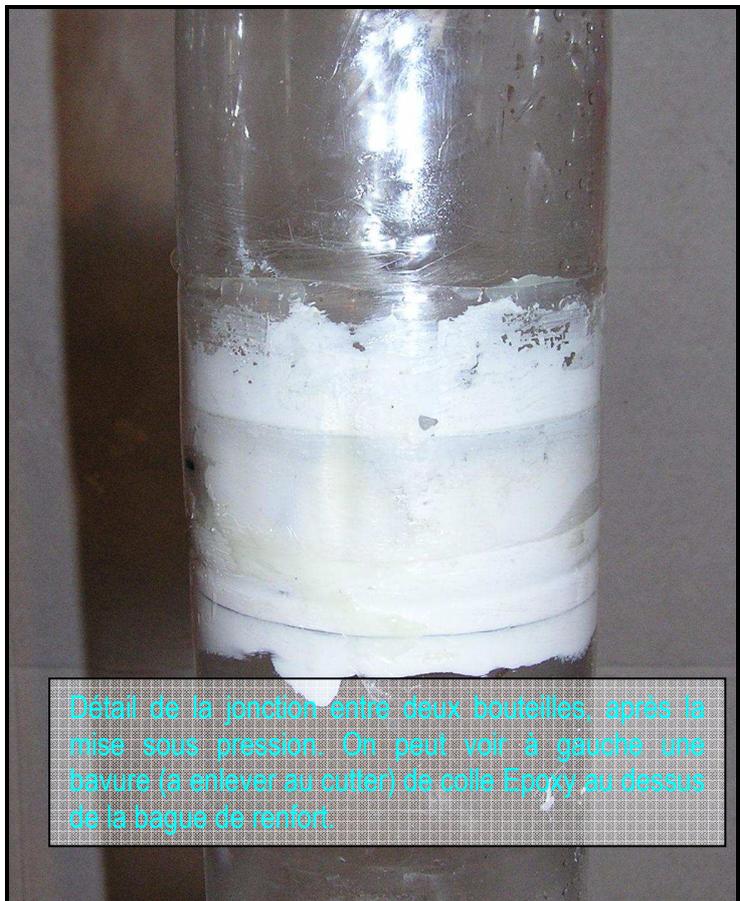


Ci contre :

Lorsque la colle a séché, on enfle en force à chaque jonction un manchon découpé dans une bouteille de même diamètre que celui du réservoir : Le réservoir prend alors une forme gondolée, on en profite pour badigeonner de colle Epoxy l'espace entre la section de la bouteille et le réservoir.

Ci-dessous :

Immédiatement après on pressurise la bouteille à une pression raisonnable (2, voire 3bars). Le réservoir va alors se dilater et prendre sa forme définitive en étirant les manchons de renfort. Après quelques jours on peut dépressuriser, on obtient alors notre réservoir définitif.



Afin de diminuer les turbulences à l'arrière de la fusée on peut lui accorder une forme en fuseau :

Nous y parvenons en emboîtant à l'arrière de la fusée une section de bouteille de type « Badois rouge ». On installe une bague de renforcement en carton sur la tuyère.



Avantages :

- Légèreté
- Solidité (Le réservoir est resté intact, même après les crashes violents de nos prototypes...)

Inconvénients :

- Difficulté de la réalisation (nous avons du faire un bon nombre d'essais avant de trouver la solution « miracle »)
- Durée de la réalisation

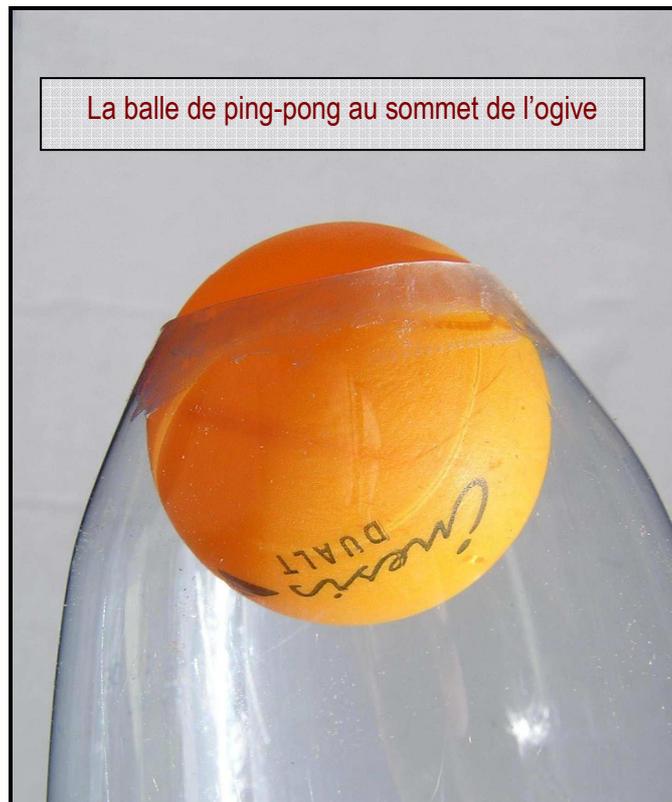
2.2.3) L'ogive

L'ogive est l'élément qui « fend » l'air que traversera la fusée. Nous décidons de lui donner une belle forme parabolique.

Matériel :

- Une bouteille de type « Carola »
- Une balle de ping-pong
- De la colle Sikaflex 11FC

Tout d'abord, on scie le goulot de la bouteille de manière à pouvoir y emboîter la balle de ping-pong. Il faut limer les rebords de la découpe afin d'avoir une forme régulière.



On découpe ensuite la balle en deux hémisphères, et on en colle une au sommet de la section de bouteille découpée auparavant.



Avantages :

- Légèreté
- Forme optimale

Inconvénient :

- Fragilité

2.2.4) Comment récupérer la fusée en bon état ?

Afin de retrouver en bon état notre fusée à la fin de son vol, une solution de récupération s'impose, pour cela on ralentit la chute de la fusée à l'aide d'un parachute, éjecté grâce à un système inédit entièrement développé par nos soins, inspiré du système utilisé par les fusées détentrices du record du monde d'altitude : par réaction chimique.

Le parachute

Constitué de toile, sa taille doit être soigneusement calculée afin d'optimiser la vitesse de la descente de la fusée (un trop grand parachute prend de la place, un trop petit ne sert à rien !). Il faut de plus ménager une cheminée au centre du parachute afin de créer un flux d'air, sans quoi le parachute oscillera durant la descente.

La surface du parachute est donnée par la formule suivante :

$$S_{parachute} = \frac{2 \cdot g \cdot m_{fusée}}{\rho_{air} \cdot Cx_{parachute} \cdot v_{chute}}$$

La masse de la fusée est bien sûr sa masse à vide, nous avons pesé 400g
G correspond à l'intensité de la pesanteur, donc sa valeur est de 9.81

On prend comme valeur de ρ_{air} 1.3g/l

On prend comme Cx du parachute 1, cette approximation s'avère correcte.

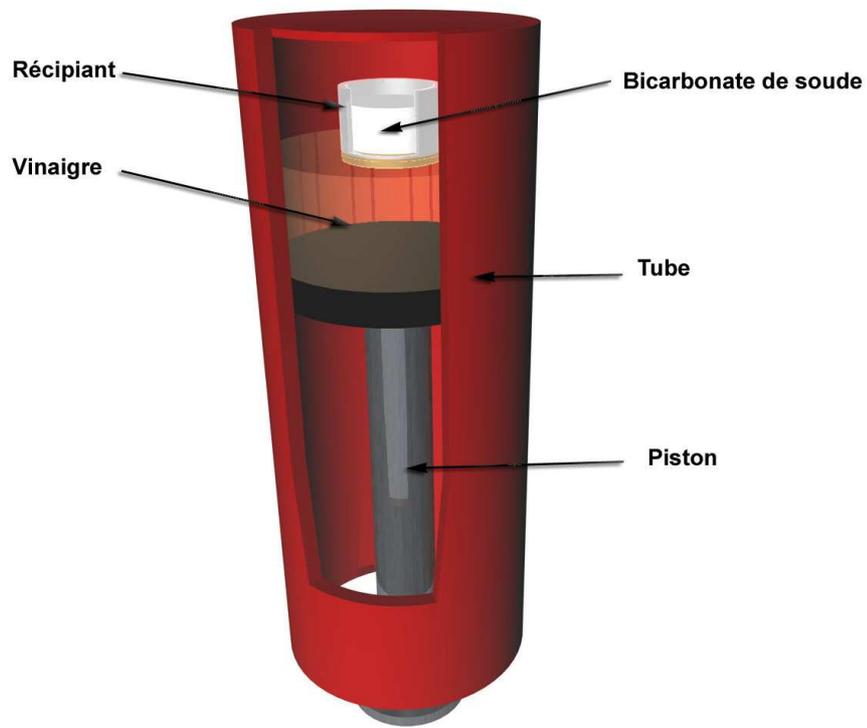
Nous estimons qu'une vitesse de chute de 10m/s est suffisante

On obtient alors $S_{parachute} = 600\text{cm}^2$ (arrondi)

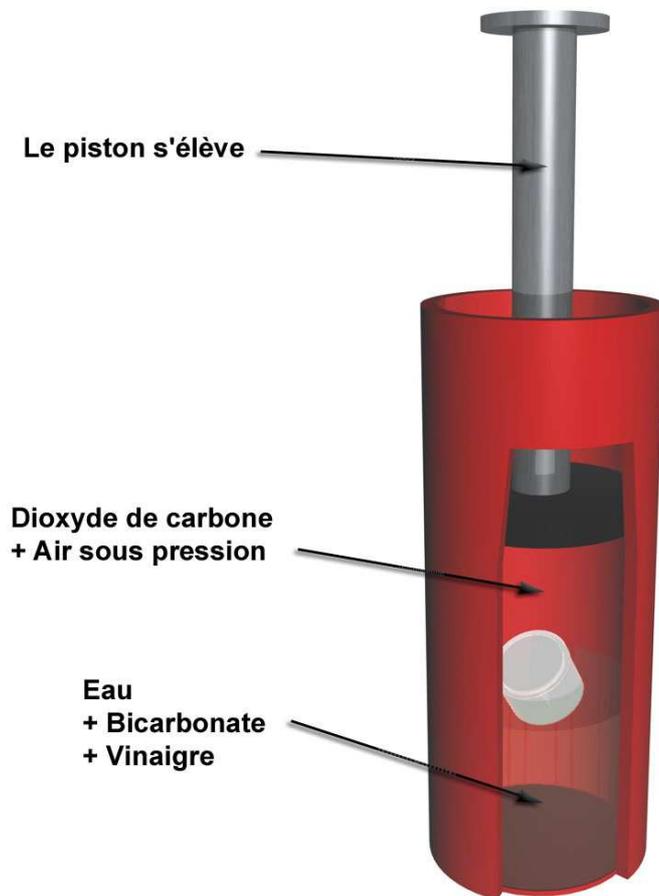
L'extracteur

Notre système d'éjection du parachute se base sur la réaction chimique entre le vinaigre et le bicarbonate de soude : lorsqu'on mélange ces deux réactifs il se produit un dégagement de CO_2 et d'eau. Si l'on effectue cette réaction en milieu confiné la pression de ce milieu augmentera.

Schématiquement, on aura alors pendant l'ascension de la fusée :



Et au début de la chute :



En s'élevant, le piston soulève un capot dans lequel est contenu le parachute : n'étant plus confiné, le parachute se déploie.

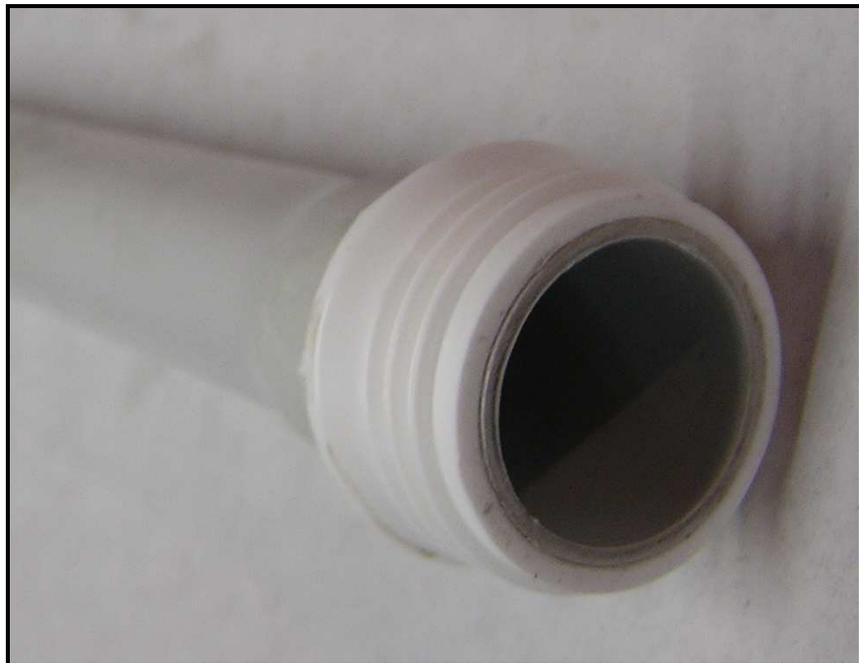
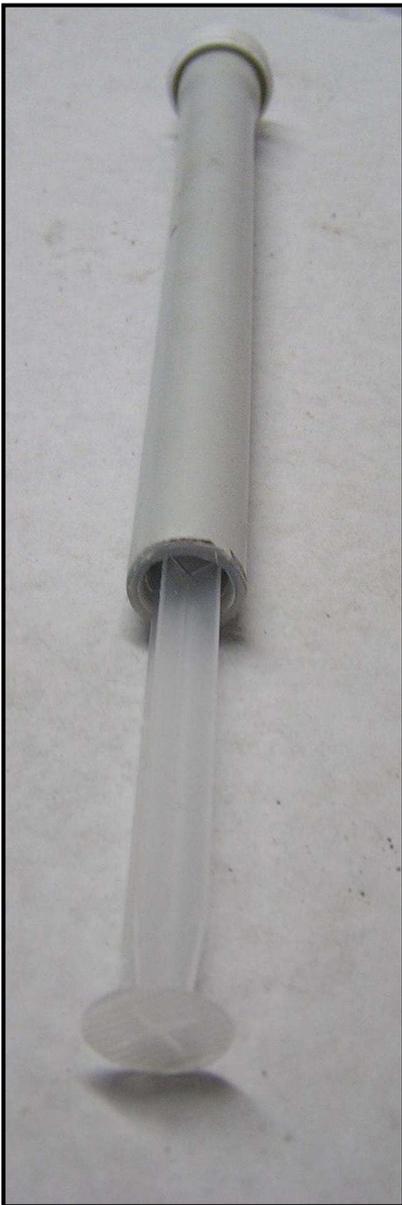
On peut alors réaliser notre extracteur :

Matériel :

- Tube en PVC
- Boîte de médicaments
- Colle Araldite
- seringue distribuée en pharmacie
- Bouchon de boîte pour granules homéopathiques
- Valve de vélo de course

On colle la seringue dans le tube en PVC à une extrémité, et le filetage de la boîte de médicaments à l'autre extrémité.

Pour faire fonctionner le système il suffit de remplir le tube de vinaigre, de déposer le bouchon rempli de bicarbonate au dessus et de visser le bouchon : lorsqu'on retourne le tube, la seringue se détend rapidement.



Ci-dessus : le filetage sur lequel on visse le bouchon de notre « extracteur »

Ci-contre : l'extracteur lorsque la seringue est « sortie »

On ajoute un système de dépressurisation : si la pression augmente trop à l'intérieur du piston l'ensemble risque de se désolidariser

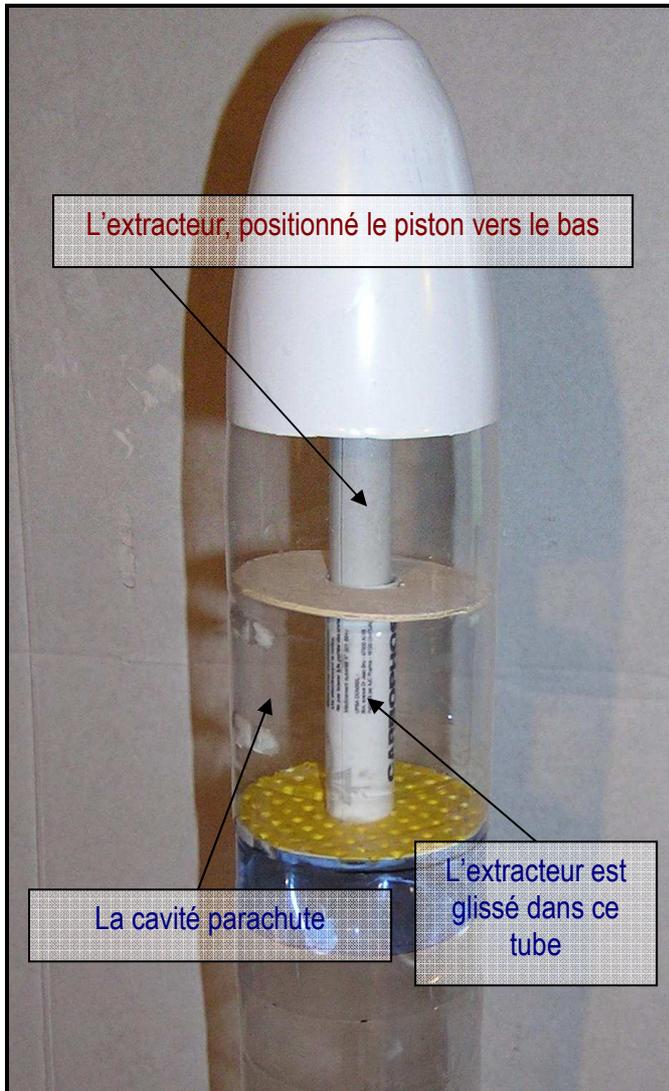


Ci contre :

Ce dispositif est vissé sur le bouchon de l'extracteur, lorsque le piston arrive en fin de course il abaisse via un fil l'élément en bleu sur la photo, qui vient appuyer sur le bouchon de la valve : le contenu du tube se dépressurise alors.



On glisse alors le piston dans l'emplacement qui lui a été assigné, pour obtenir avec l'ogive :

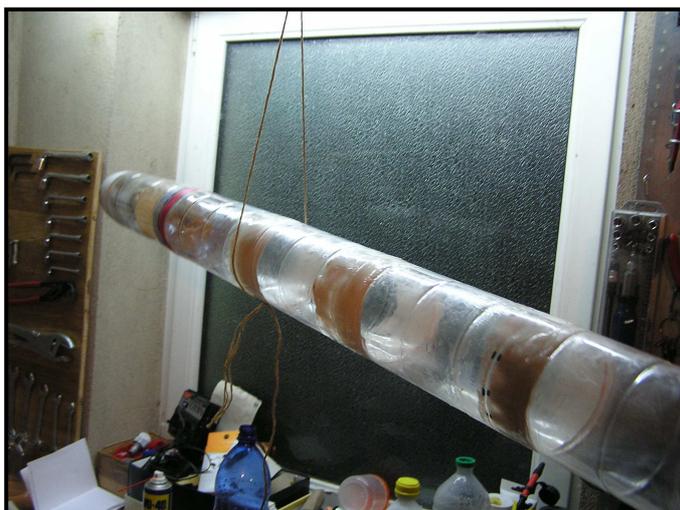


2.2.5) Les appendices aérodynamiques

Dans notre étude d'optimisation nous avons déterminé les conditions nécessaires pour assurer un vol stable à notre fusée.

Un calcul de barycentre permet de déterminer ces paramètres mais nous préférons utiliser le gratuit « Carina » qui permet de calculer précisément les dimensions requises pour nos ailerons.

Le calcul de la marge statique s'effectue en fonction du centre de gravité de la fusée, nous pouvons uniquement le déterminer lorsque la fusée est « a vide », cela suffit néanmoins car l'eau est rapidement éjectée de la fusée.



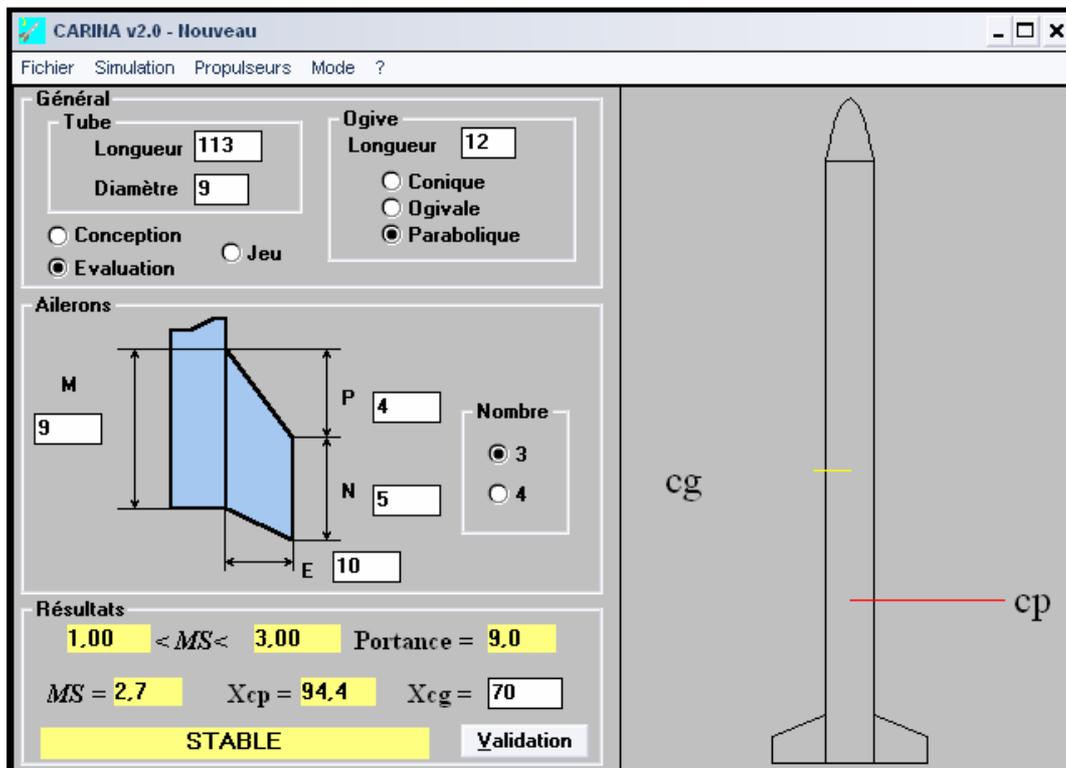
Ci contre :

Nous déterminons le centre de gravité de la fusée en la suspendant : lorsque l'on parvient à maintenir la fusée en équilibre, on note la position du point d'accroche par rapport au « sommet » de la fusée.

Nous trouvons comme valeur pour le centre de gravité : 70 cm

De plus notre fuselage a un diamètre de 9 cm pour une longueur de 113 cm, et notre ogive est de forme parabolique, longue de 12 cm

Nous pouvons maintenant déterminer les dimensions de nos ailerons. Après quelques essais nous obtenons un résultat satisfaisant :



« cg » correspond au centre de gravité

« cp » correspond au centre de portance

On doit donc réaliser trois ailerons, les plus légers possibles (rappelons qu'alourdir l'arrière recule le centre de gravité de la fusée !)

[On peut maintenant se lancer dans la construction des ailerons](#)

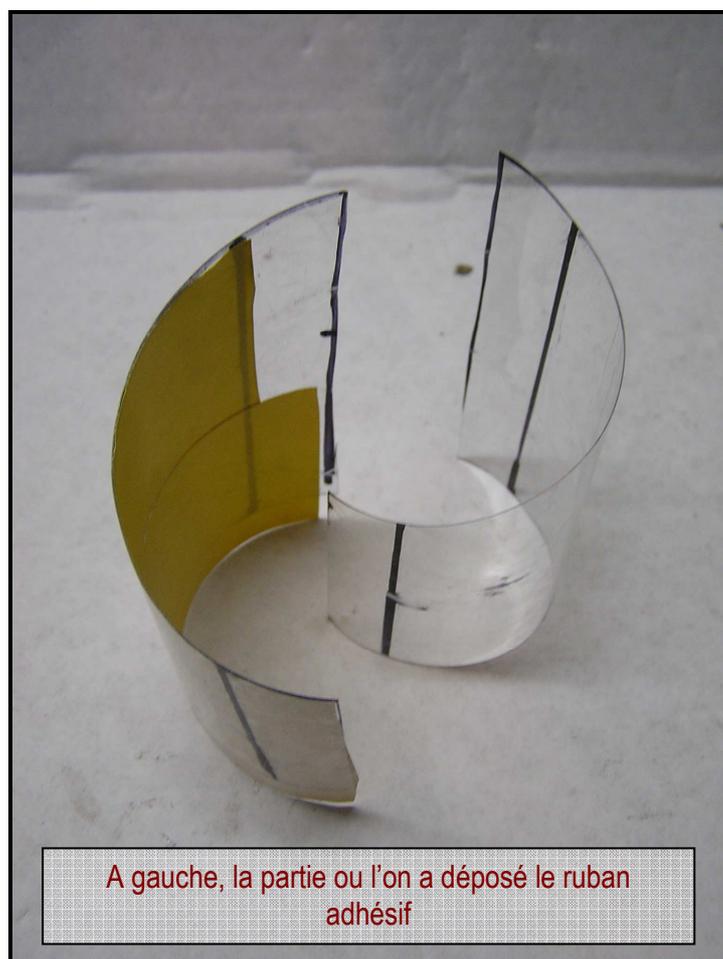
Matériel :

- Deux bouteilles de boisson gazeuse cylindriques, volume de 2L
- Ruban adhésif double face
- Ruban adhésif d'électricien

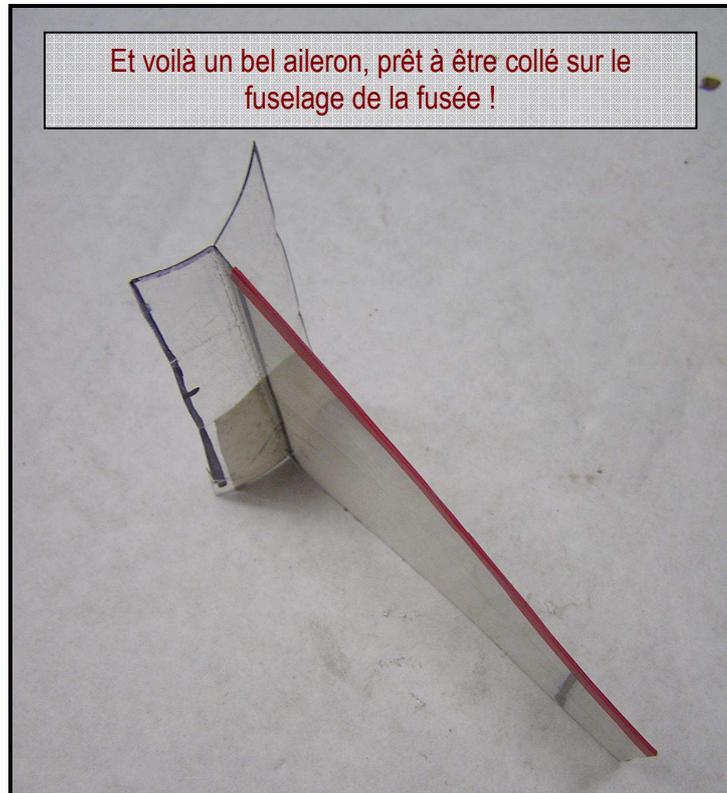
On trace tout d'abord les contours (que l'on a soigneusement calculés plus haut !) des deux ailerons sur le plastique de la bouteille. Pour plus de rigidité on trace les contours en double ce qui permettra de créer un seul aileron de deux épaisseurs. On définit aussi une surface qui permettra le collage de l'aileron sur le fuselage.



Une fois que l'on a découpé les contours de l'aileron, on applique le ruban adhésif double face sur l'une des faces de l'aileron.



On met ensuite en contact les deux parties, et on replie les surfaces qui seront en contact avec le fuselage. On dépose ensuite sur le bord d'attaque du ruban adhésif d'électricien (en rouge sur la photo) pour rigidifier un peu l'ensemble.



Et on recommence pour les deux ailerons restants...

2.2.6) [Assemblage](#)

Il ne nous reste plus qu'à assembler et à peindre les différents éléments, et nous obtenons (enfin !) notre fusée hydropneumatique prête à voler.

Tout le dispositif nécessaire au vol de notre fusé hydro-pneumatique : la base de lancement et son tuyau de connection, le déclencheur et sa rallonge, la pompe à vélo



Fiche technique de notre fusée :

Réservoir : 4,5 L

Ø tuyère : 17 mm

Ø fuselage : 9 cm

Hauteur : 1,25 m

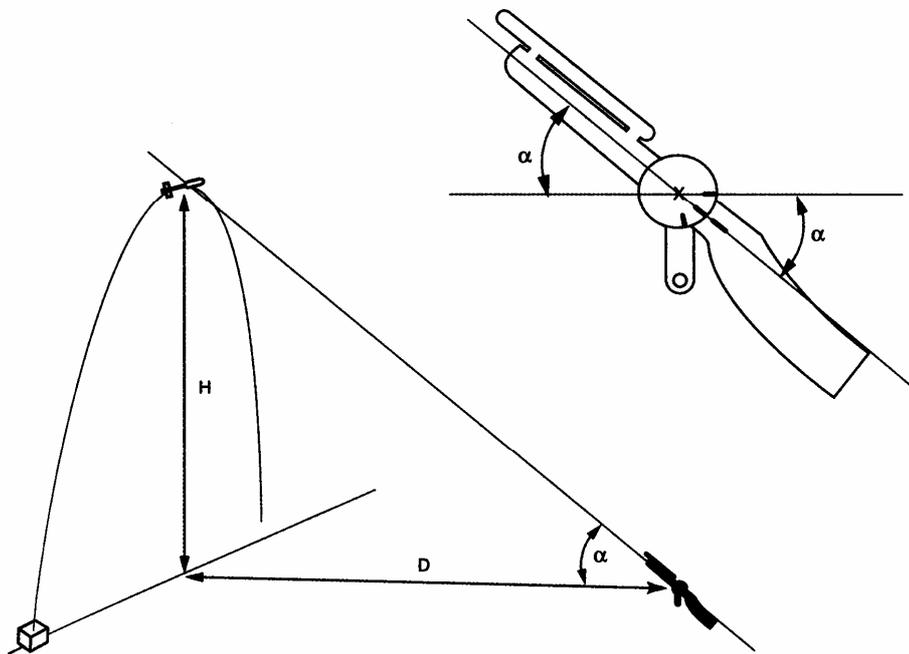
Masse à vide : 390 g

Pressurisation maximale sans danger : 8 bars

Système de récupération chimique

3) Vols d'essai

Pour déterminer l'altitude maximale du vol de la fusée, nous avons conçu un théodolite. C'est un instrument capable de mesurer un angle. La trigonométrie nous permet de déterminer l'altitude en fonction de l'angle mesuré et de la distance entre la base de lancement et le point de mesure.



Calcul permettant de trouver l'altitude H :

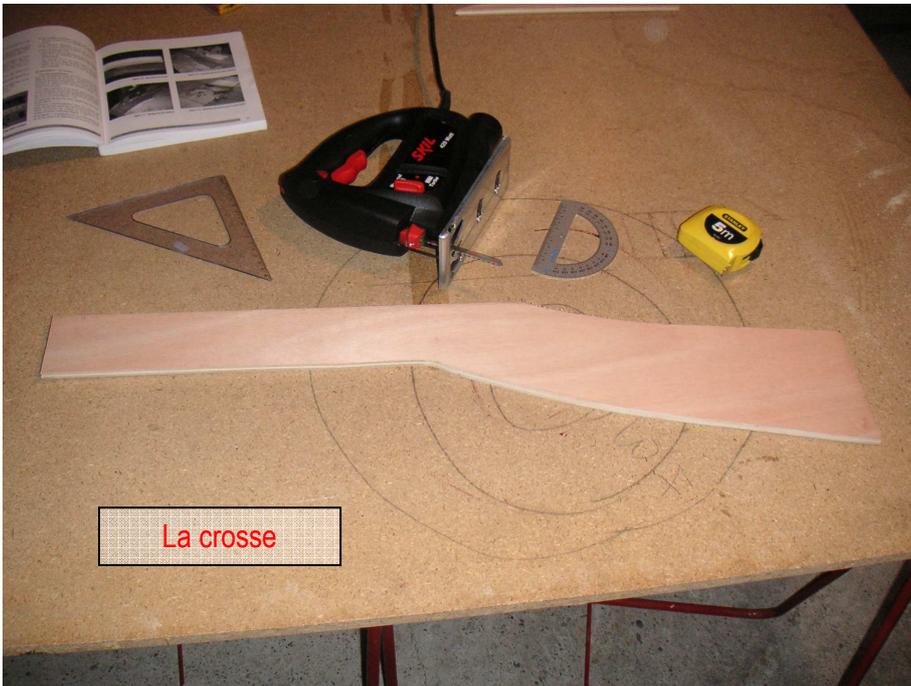
$$H = \tan\alpha * D$$

Comme la trajectoire H est rarement parfaitement verticale, il y a une marge d'erreur avec ce dispositif, la distance D optimale est d'environ 100m

Construction du théodolite

Matériel :

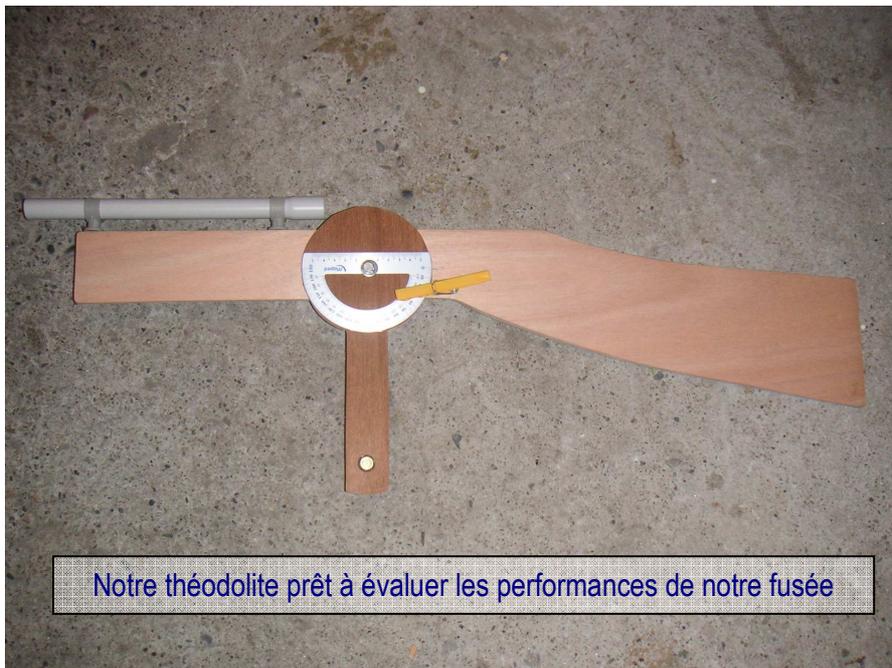
- Un rapporteur semi-circulaire de taille standard
- Une pince à linge munie d'un ressort puissant
- Du ruban adhésif double face
- Tube en PVC
- Planche de bois



Ci contre :
On découpe tout d'abord la crosse



Ci contre :
On fabrique ensuite le dispositif de mesure : on colle un rapporteur sur un élément en bois soigneusement coupé



Ci contre :
Après l'assemblage des
deux parties

Compte rendu des vols d'essais

Au cours des vols d'essais qu'a effectué notre fusée, nous nous sommes aperçus qu'effectivement notre fusée décrit une belle trajectoire jusqu'à l'apogée.

Sans empennage nous constatons qu'effectivement la trajectoire est très aléatoire !

Sans tube la fusée voit son altitude maximale diminuer (vol avec tube : nous mesurons environ 90m, avec tube nous approchons les 130m)

L'altitude maximale que semble pouvoir atteindre notre fusée est d'environ 140m : Expérimentalement nous mesurons au maximum un angle de 48° à 120m de la base de lancement, ce qui équivaut à 133m ($\Delta 3\%$). Comparer avec les résultats fournis par le simulateur est difficile car nous ne connaissons pas le C_x de notre fusée.

Après différents tests effectués à basse pression (5bars) avec le réservoir rempli à 10%, 20%, 30% puis 40%, on constate à chaque fois que l'altitude est supérieure pour les valeurs de 20% et 30%. L'imprécision des mesures nous pousse à maintenir le remplissage du réservoir à sa valeur par défaut de 1/3.

PARTIE IV.

Conclusion



Nous pouvons maintenant établir comment optimiser le vol de la fusée à eau :

- En augmentant fortement la pression
- En augmentant le volume de la fusée (pour peu qu'on y associe la tuyère idéale)
- En réduisant la masse de la fusée lorsque la condition précédente est satisfaite
- Donner des formes aérodynamiques optimales à sa fusée !

L'étude de l'aérodynamisme est fondamentale, l'amélioration des performances de fusées lorsque leur aérodynamisme est optimisé est valable pour n'importe quelle configuration !

D'après nous, qui ne pouvons que jouer sur le volume, il faut définir ce paramètre essentiel et ensuite y axer son optimisation, car sinon les possibilités sont infinies (rappelons que la modification d'un paramètre peut en influencer un autre, ce qui rend l'analyse complexe...).

C'est pour cela que le domaine d'étude sur les fusées hydropneumatiques est très riche : il n'existe pas encore à ce jour de solution miracle, il n'existe pas de plan de fusée qui puisse se targuer d'être le meilleur. Chacun peut donc apporter une solution innovante tant dans la conception sur papier des fusées que dans leur fabrication.

Car imaginer une fusée n'est pas tout, il faut la concevoir : là aussi les méthodes de fabrication peuvent sans cesse être optimisées : recherche de la rigidité, de la légèreté... Nous nous y sommes employés avec plus ou moins de brio, néanmoins nous avons pu avoir la satisfaction de voir voler notre fusée, et ainsi nous avons pu faire le lien entre des calculs demeurés très abstraits dès lors qu'ils n'étaient pas vérifiés par la pratique. Et nous avons été récompensés de notre dur labeur : la pratique semble confirmer la théorie !

Ce TPE, malgré un cheminement par moments chaotique, a été une excellente initiation à une démarche scientifique complète, dans laquelle nous avons pu nous-même établir un lien entre théorie et pratique.

VI) Annexe

1) Documents consultés

Bibliographie

Améliorez vos fusées à eau, par Yvan Lanoë

La Saga de l'espace, par Alain Dupas, édition Découvertes Gallimard.

Internet

www.techno-challenge.org

Site de la communauté francophone d' « hydrofuséistes ». Son forum une source inépuisable d'informations à propos des fusées à eau. Source de nombreux schémas

www.wikipedia.org

Encyclopédie libre sur Internet : documentation très complète sur tous les domaines concernant notre sujet.

<http://www.techno-science.net>

Une multitude d'informations sur l'aéronautique et ses lois, principes...

<http://perso.orange.fr/alain.juge/Francais/CadreFR.htm>

Le site d'Alain Juge à propos des fusées à eau, il comprend des calculs sur le principe de propulsion de la fusée ainsi que sur son vol balistique. Source de schémas

<http://perso.numericable.fr/%7efbouquetbe63/gomars>

Le site de « Bernard de GoMars », contenant des dossiers très complets à propos du comportement en vol des fusées à eau, nécessitant néanmoins un sérieux bagage théorique pour pouvoir être appréhendés. Source de schémas

<http://www.planete-sciences.org/espace/publications/argonaute/6vol.htm>

A propos de la stabilité des fusées. Explications très claires agrémentées de nombreux schémas
Source de schémas

<http://percolat.free.fr>

Site proposant un catalogue très complet des techniques actuelles de fabrication de fusées à eau.

www.gardena.com

Site de la marque Gardena, notre fournisseur en tuyaux, connecteurs et tuyères ; pour nos bases de lancement et fusées... Source de photos

http://www.uswaterrockets.com/world/world_menu.htm

Pour rêver un peu... Le site des Américains d'AntiGravity Research Corporation ; détenteurs du record du monde d'altitude des fusées à eau : plus de 600m !

Logiciels employés

Rédaction du dossier : Microsoft™ Word
Graphiques, simulations : Microsoft™ Excel
Images de synthèse : Maxon Cinema4D (version d'essai)
Montage photo : Adobe Photoshop Elements
Détermination de la marge statique : Carina v2.0

2) Remerciements

Bernard de GoMars, pour ses conseils avisés, ainsi que ses réponses didactiques à de nombreuses questions.

Serge Henne, pour ses explications quand au fonctionnement de son simulateur ainsi que ses conseils et explications.

La communauté des fuséistes du forum de Techno-Challenge, pour leurs conseils et leur sympathie

Georges Pfister ainsi que toute la famille, pour leur grande contribution à la recherche des matières premières de notre fusée...