



**PLANETE SCIENCES - Secteur Espace**

16, place Jacques Brel - 91130 RIS-ORANGIS

Tél. : 01 69 02 76 10 / Fax : 01 69 43 21 43

Site Internet : [www.planete-sciences.org/espace/](http://www.planete-sciences.org/espace/)

**LES FUSEES A EAU**

*Version 2.3  
Avril 2010*

Cahier Planète Sciences

# Sommaire

<u>Objectifs de ce document.....</u>	5
<u>Présentation général.....</u>	5
<u>Pour débuter rapidement.....</u>	6
<u>Une fusée à eau, c'est quoi ?.....</u>	6
<u>Le matériel nécessaire.....</u>	6
<u>Les matériaux nécessaires.....</u>	6
<u>Assemblage des différents éléments.....</u>	6
<u>Dispositif élémentaire pour le gonflage.....</u>	8
<u>Mise en place simple pour un lancement.....</u>	9
<u>La sécurité lors des lancements.....</u>	10
<u>Construction .....</u>	10
<u>Essais .....</u>	10
<u>Lancements .....</u>	10
<u>Organisation d'une campagne de lancements.....</u>	11
<u>La préparation.....</u>	11
<u>La chronologie.....</u>	11
<u>Pour approfondir.....</u>	12
<u>Principes régissant la fusée à eau.....</u>	12
<u>La propulsion.....</u>	12
<u>Considération sur l'aérodynamique.....</u>	14
<u>Le vol.....</u>	17
<u>La stabilité.....</u>	18
<u>L'atelier.....</u>	20
<u>Les matériaux.....</u>	21
<u>Le corps de la fusée.....</u>	21
<u>Le cône.....</u>	21
<u>Les ailerons.....</u>	21
<u>Le parachute.....</u>	21
<u>Les adhésifs.....</u>	21
<u>Construction.....</u>	22
<u>Traçage et découpe des bouteilles.....</u>	22
<u>Corps simple.....</u>	24
<u>Corps multi-bouteilles.....</u>	24
<u>Tuyère.....</u>	26
<u>Empennage.....</u>	28
<u>Cône.....</u>	34
<u>Les bases de lancement.....</u>	36
<u>Les fonctions d'une base de lancement.....</u>	36
<u>Mise en pression.....</u>	36
<u>Maintien lors de la mise en pression.....</u>	36
<u>Remplissage.....</u>	36
<u>Guidage.....</u>	36
<u>Quelques systèmes existants.....</u>	36
<u>Mise en pression.....</u>	36
<u>Maintien lors de la mise en pression.....</u>	37
<u>Remplissage.....</u>	40

<u>Guidage</u> .....	41
<u>Sécurité</u> .....	41
<u>Description de deux modèles simples de base de lancement</u> .....	41
<u>La rampe Planète Science</u> .....	42
<u>Les plans d'ensemble</u> :	42
<u>Nomenclature de la rampe</u> .....	44
<u>Les systèmes de récupération</u> .....	50
<u>Le parachute posé sur la fusée</u> .....	50
<u>Le volet aérodynamique</u> .....	51
<u>La minuterie mécanique</u> .....	54
<u>La minuterie électronique</u> .....	54
<u>Le planeur à ailes fixes</u> .....	54
<u>Le planeur à ailes déployables</u> .....	55
<u>Les parachutes</u> .....	58
<u>La mesure de l'altitude</u> .....	59
<u>Pistes pour aller encore plus loin</u> .....	62
<u>Une fusée à deux régimes de propulsion</u> .....	62
<u>Fusées multi-réservoirs</u> .....	63
<u>Fusées multi-étages</u> .....	63
<u>Maquettes</u> .....	65
<u>Charge utile</u> .....	65
<u>Les fusées amateurs en France</u> .....	66
<u>Le partenariat CNES - Planète Sciences</u> .....	66
<u>Les activités aérospatiales de jeunes</u> .....	66
<u>La microfusée</u> .....	66
<u>La minifusée</u> .....	67
<u>Les fusées expérimentales</u> .....	67
<u>Démarche expérimentale</u> .....	68
<u>Principe de la démarche</u> .....	68
<u>Bibliographie</u> .....	69
<u>Ouvrages</u> .....	69
<u>Quelques sites Internet</u> .....	69

**Ce document a été écrit par un collectif bénévole du réseau Planète Sciences**

## Objectifs de ce document

L'objectif d'un tel document est de vous aider à faire les premiers pas dans le monde insoupçonné de la fusée amateur et plus particulièrement dans le monde de la fusée à eau. Si les autres types de fusées vous sont brièvement présentés en fin de document, c'est pour vous montrer les nombreuses autres possibilités de pratique après la fusée à eau !

Et si vous vous êtes vraiment amusés à faire voler ces fusées et que les défis scientifiques et techniques vous intéressent, n'hésitez pas à contacter le secteur Espace de Planète Sciences, nous pouvons sûrement faire quelque chose pour vous !

## Présentation général

Contrairement à ses consoeurs (voir *Les fusées amateurs en France Page 66*), la masse embarquée par une fusée à eau reste modeste. La fusée à eau est cependant souvent utilisée pour son côté ludique et pratique pour la mise en place de la démarche expérimentale.

Le public est généralement le même que celui de la micro-fusée (8-12 ans). C'est une autre manière, moins contraignante puisque sans propulseur à poudre, de faire ses premiers vols et de comprendre les éléments qui l'influencent.

Les performances sont plutôt faibles (une fusée à eau montant à 30 m est déjà une belle réussite !) mais, de ce fait, il est possible de la lancer sur un demi terrain de foot sans aucun danger à la retombée !

Vous pourrez, avec l'expérience, fignoler vos engins, mais il ne faut guère plus de deux heures pour assembler les différents éléments et rendre opérationnel un véhicule simple.

Maintenant, il est toujours possible de perfectionner les engins comme nous le verrons tout au long de ce document et atteindre des performances beaucoup plus attrayantes (mais il faudra prévoir un peu plus de deux heures de travail et un terrain plus grand).

Dans quelques pays, des rassemblements sont organisés qui, chaque année, rassemblent de nombreux passionnés pour s'affronter lors de joutes ludiques et humides.

C'est le cas au Japon (Kakamigahara), aux Etats-Unis (Sciences Olympiades), ou en Grande-Bretagne (NPL). En France, un championnat de France de Fusées à eau est organisé depuis 2002, mais dans un cadre scolaire (Lycées et Collèges).

A quand un festival de l'espace « aqueux », avec miniFO, FusexO ?



Figure 1 : Décollage

## Pour débuter rapidement

### Une fusée à eau, c'est quoi ?

Brièvement, puisque tout ceci sera repris dans le chapitre « pour approfondir » page 10. On prend une bouteille de boisson gazeuse (eau minérale ou soda) que l'on remplit d'un tiers d'eau environ. Puis, par un dispositif qui sera étudié plus loin, on met cette bouteille en pression à l'aide d'une pompe à vélo. Quand on va libérer la bouteille, l'air sous pression va éjecter l'eau et ainsi propulser la bouteille. Cependant, comme lorsqu'on gonfle un ballon de baudruche et qu'on le lâche, la bouteille risque de partir un peu dans tous les sens. Pour qu'elle ait un vol plus rectiligne, on va faire comme pour les flèches d'un arc, c'est-à-dire effiler et lester l'avant puis mettre un empennage à l'arrière.

Il est d'ailleurs très intéressant de faire l'expérience de lancer une bouteille sans ailerons, puis avec ailerons. Le résultat est assez spectaculaire, surtout s'il y a un petit peu de vent.

### Le matériel nécessaire

Tout le matériel de base nécessaire à la construction d'une fusée à eau est simple à se procurer :

► Une pompe (un modèle à pied est conseillé pour le confort et, si possible, avec un manomètre) ;

► Un cutter ;

► Du ruban adhésif ;

► De la colle néoprène.

Vous aurez aussi besoin d'une valve de vélo et d'un bouchon de liège pour faire un système simple de mise sous pression.

Enfin, n'oubliez pas d'apporter toute votre imagination et de la bonne humeur ☺

### Les matériaux nécessaires

L'élément vraiment indispensable pour concevoir une fusée à eau est son réservoir principal : une bouteille en PET (PolyÉthylène Tétraphthalate) ! Ne croyez pas que la complexité du nom engendre une grande difficulté d'approvisionnement : en effet, la majeure partie des bouteilles de boissons gazeuses convient parfaitement pour construire un véhicule hydropneumatique.

Après quelques essais de vol de bouteilles dont la trajectoire ne vous aura pas convenu, vous conviendrez de la nécessité d'ajouter des ailerons et pourquoi pas une ogive qui rendront la trajectoire plus « stable <sup>1</sup> ». Les matériaux couramment utilisés pour réaliser des ailerons sont le balsa (bois léger exotique utilisé en modélisme) ou le carton fort. Pour l'ogive, le haut d'une seconde bouteille conviendra.

### Assemblage des différents éléments

De nombreuses possibilités s'offriront à vous pour fixer des ailerons sur le corps de la fusée : vous pourrez, par exemple, les découper à la forme du haut (côté bouchon) de la bouteille, coller et renforcer au ruban adhésif.

Si vous êtes pressé et que vous utilisez un pistocollé, déposez la colle chaude sur l'aileron et non pas sur la bouteille que vous aurez remplie d'eau au préalable et attendez un peu avant d'appliquer : cela évitera de faire fondre, déformer et donc de fragiliser votre réservoir principal.

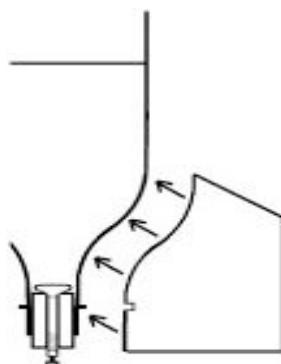


Figure 2 : Mise en place de l'empennage

<sup>1</sup> Si vous souhaitez en savoir plus sur la stabilité d'une fusée, sachez qu'une documentation technique est disponible à Planète Sciences « le vol de la fusée ».

La solution la plus confortable, car ne nécessitant pas de découpages trop pénibles, utilise deux bouteilles pour une même fusée.

La partie centrale sert de jupe pour l'arrière de la fusée et permet une fixation simple des ailerons.

La partie avant servira d'ogive et amortira le choc à l'atterrissement au cas, fort improbable, où le parachute ne s'ouvrirait pas.

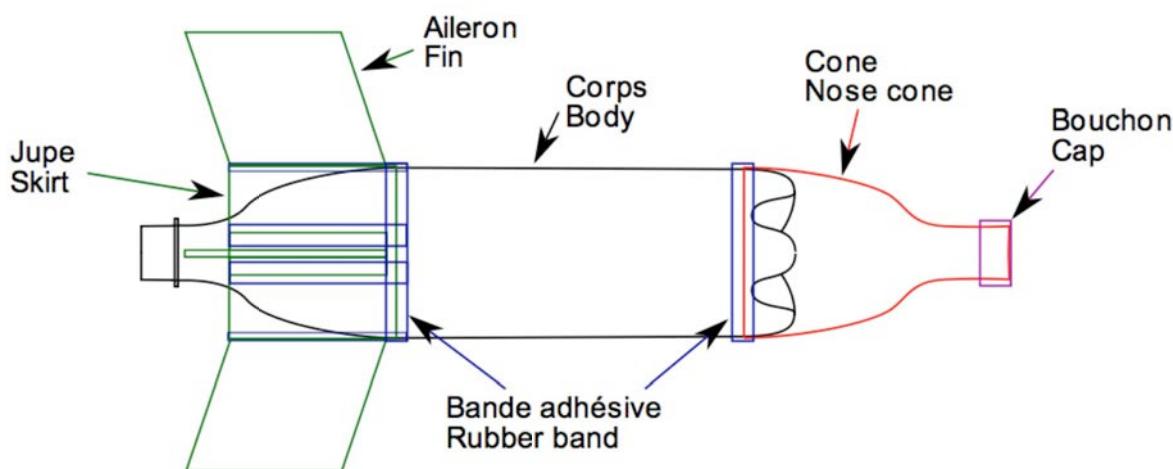
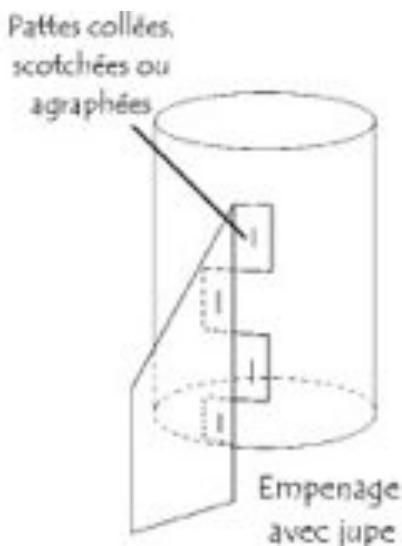


Figure 3 : Une fusée complète



Une autre technique consiste à utiliser du carton fort et de prévoir des pattes pour la fixation. Pour se prémunir d'une dégradation trop rapide des ailerons due à l'eau, une solution consiste à recouvrir les ailerons de « Rustol » (antirouille) et la tranche du carton de silicone. Si le temps vous manque, vous pouvez aussi recouvrir toute la surface des ailerons de ruban adhésif.

Figure 4 : fixation des ailerons sur la jupe

## Dispositif élémentaire pour le gonflage

Il est nécessaire maintenant de trouver un système permettant une mise sous pression. Un bouchon s'ajustant, en force, au diamètre de la bouteille et une valve que l'on insérera dans le bouchon, de manière étanche<sup>1</sup> constitueront le système le plus élémentaire.

Pour le bouchon, le liège peut convenir, mais l'idéal est de se procurer des bouchons tronconiques<sup>2</sup> en caoutchouc utilisés en chimie ; certains sont déjà percés longitudinalement.



Figure 5 :Bouchon tronconique  
avec adaptateur



Figure 6 :Bouchon en liège

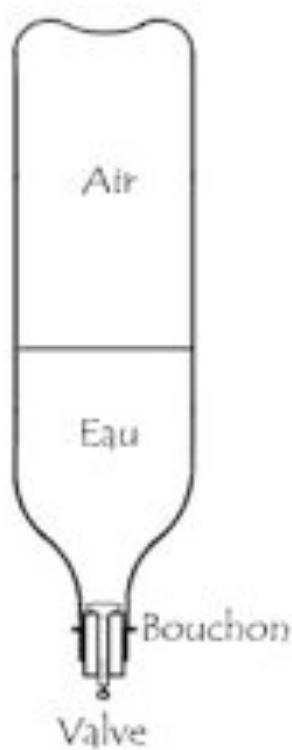


Figure 7 : Dispositif de gonflage en place dans le goulot

<sup>1</sup> Une colle à deux composants ou au néoprène convient parfaitement

<sup>2</sup> Ce type de bouchon peut se commander dans les catalogues de fournitures pour laboratoires scolaires de type Pierron

## Mise en place simple pour un lancement

Le système le plus simple consiste en la mise en place d'une tige métallique dans le sol. Une paille, coupée et collée (à l'aide d'un ruban adhésif par exemple) le long du corps permet à la fusée de rester en position proche de la verticale avant le moment fatidique et de guider la fusée pendant l'accélération jusqu'à rendre les ailerons efficaces.

Il ne vous reste plus qu'à pomper jusqu'à ce que la pression à l'intérieur de la bouteille devienne suffisante pour faire partir le bouchon : la pression est telle, que le bouchon est éjecté avec la masse d'eau contenue dans la bouteille. Le manomètre de la pompe vous permettra de vous rendre compte de la pression dans la bouteille : on atteint sans difficulté l'équivalent de 5 fois la pression atmosphérique (approximativement 5 bars) !

Il est conseillé de prendre quelques précautions si vous tentez de passer les 5 bars de pression : en effet, l'éclatement d'une bouteille peut se révéler dangereux.

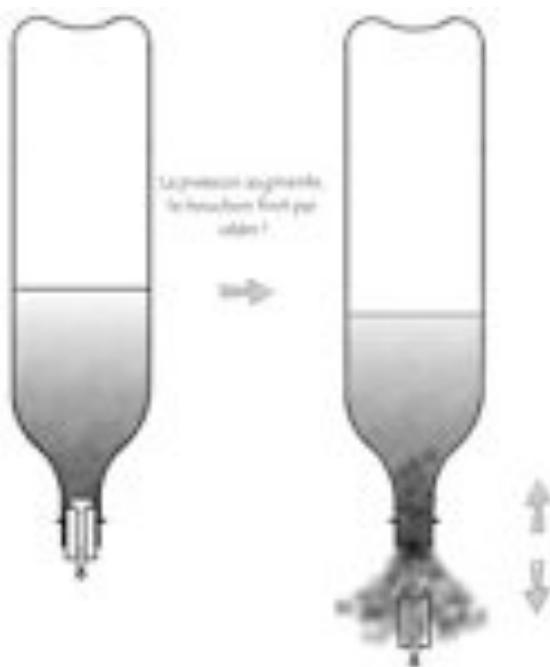


Figure 8 : Mise en pression

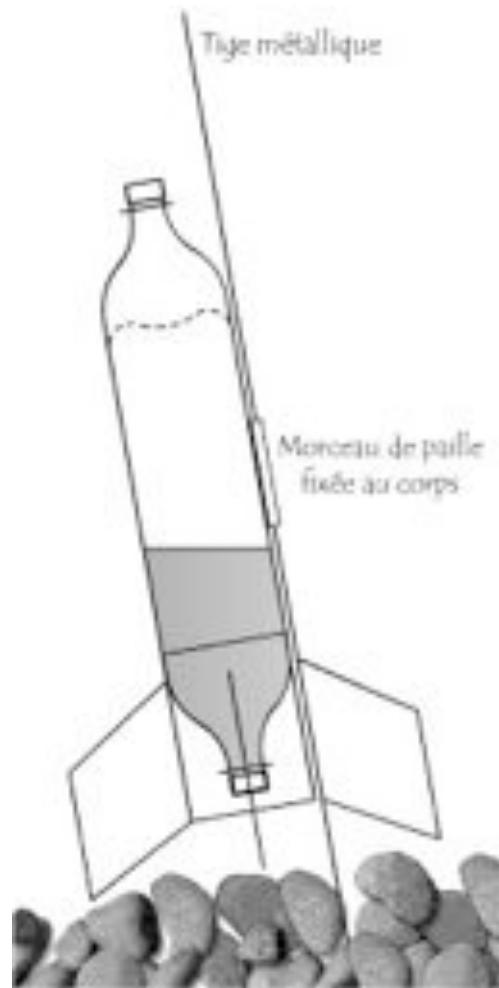


Figure 9 : Guidage élémentaire

## La sécurité lors des lancements

Comme toutes activités humaines, la pratique des fusées à eau n'est pas sans risque, et il est bon d'en connaître les principaux. C'est l'objet de ce paragraphe, sachant qu'il serait bien prétentieux d'être exhaustif. Dans tous les cas, le bon sens et la vigilance sont de rigueur.

On peut classer, arbitrairement, les risques en trois catégories : les risques liés à la construction des engins, ceux liés aux essais au sol et enfin ceux relatifs aux lancements.

### **Construction**

La construction des engins nécessite l'usage d'outils, tels les cutters, et de matériaux, principalement les colles, qui ne sont pas inoffensifs. Il est important pour éviter les accidents de travailler avec ordre et méthode en respectant les consignes de sécurité données par les fabricants.

En particulier lors de collages avec des colles polyuréthane ou cyanoacrylate, portez des gants et des lunettes de protection.

### **Essais**

Avant de lancer une fusée toute neuve, il est bon de tester sa tenue à la pression, pour ne pas avoir de mauvaise surprise lors du lancement. C'est tout spécialement nécessaire si le corps de cette fusée est composé de deux bouteilles assemblées.

Le risque majeur est évidemment l'explosion de la bouteille. Une telle explosion peut être dangereuse d'une part à cause du bruit qui peut provoquer des lésions auditives et d'autre part à cause de la projection de débris de plastique acérés.

Pour limiter les effets de telles explosions, toujours tester ses fusées remplies d'eau et rester à distance respectable de l'engin sous pression.

### **Lancements**

C'est évidemment la phase la plus dangereuse (il ne faut toutefois rien dramatiser), d'autant qu'elle a lieu souvent avec du public autour et qu'il règne une sorte d'atmosphère de fête et d'excitation, peu propice à la vigilance et à la sécurité.

Premier risque, et le plus important par les dégâts qu'il peut causer, la retombée d'une fusée sans dispositif de ralentissement (qu'il soit inexistant ou qu'il n'est pas fonctionné). Il faut savoir qu'une fusée toute simple faite avec une bouteille de 1,5 litres, munie d'ailerons et d'un cône réalisé avec la partie supérieure d'une autre bouteille atteint une altitude d'environ 50m et retombe au sol à plus de 100 Km/h. Mieux vaut ne pas se trouver dessous. Il n'est pas facile de prédire le lieu exact de retombée aussi la vigilance est de mise.

Première précaution, ne réaliser des lancements que sur des terrains suffisamment dégagés où il est possible de vérifier l'absence de personnes (ou de biens) avant d'effectuer un lancement.

Avant chaque lancement, prévenir toutes les personnes présentes pour qu'elles soient vigilantes pendant le vol de l'engin et inviter les adultes à surveiller leurs enfants. Pendant toute la durée du vol, tous les participants doivent être debout et doivent regarder la fusée.

Deuxième risque, l'explosion de la fusée pendant la mise en pression. Cela peut arriver si on n'a pas pris la précaution de la tester avant (voir paragraphe ci dessus), ou si l'engin a déjà effectué plusieurs vols avec des retours sur terre plus ou moins doux ou qu'il a été endommagé d'une quelconque autre manière (transport, stockage, réparation, etc...).

Lors de la mise en pression, se tenir suffisamment loin de l'engin, au moins 5m, et surtout éloigner tout le monde de la zone tant qu'un engin sous pression est sur le lanceur.

Troisième risque, le désordre et l'agitation. Une campagne de lancement nécessite d'amener sur le terrain pas mal de matériel (des fusées, des pompes, des bidons d'eau, des outils, un lanceur, etc.) s'il y a du désordre et de l'agitation autour, il y a risque de chute ou de blessure avec des outils.

**Aussi soyez toujours très prudents.**

SEIN DU RESEAU PLANETE SCIENCES téléchargeable à l'adresse :  
[http://www.planete-sciences.org/cgi-bin/compteur\\_telechargement\\_publications\\_espace.cgi?  
cadre\\_pratique\\_fusees\\_h2o.pdf](http://www.planete-sciences.org/cgi-bin/compteur_telechargement_publications_espace.cgi?cadre_pratique_fusees_h2o.pdf)

La lecture de ce document est plus que recommandé.

## Organisation d'une campagne de lancements

### ***La préparation***

Comme nous venons de le voir, une campagne de lancement ne doit pas laisser de place à l'improvisation.

D'abord il faut choisir un **lieu** qui doit être en rapport avec les performances envisageables de fusées qui seront lancées. Pour des fusées à base de bouteille simple gonflées à 5 bars maximum, un terrain de football (ou de rugby) suffira. Il faudra, bien entendu, obtenir au préalable l'autorisation du propriétaire du terrain (municipalité, agriculteur, particulier).

Selon la distance d'accès à ce terrain, il faudra prendre en compte toutes les contraintes de **transport** (logistique, temps, assurance).

Selon le nombre de participants à cette campagne, il faudra prévoir **l'encadrement** qu'il convient pour assurer un « service d'ordre » rigoureux, ainsi que le matériel (piquets, bande de chantier, plâtre) permettant de matérialiser les différentes zones de l'aire de lancement.

Il faut aussi penser qu'à la fin de la campagne, le terrain doit être rendu à son propriétaire dans le même état qu'à l'arrivée, donc prévoir des sacs poubelle.

Bien entendu, il faut prévoir tout le matériel nécessaire aux lancements à savoir ;

L'indispensable :

- Les fusées
- Une (ou mieux plusieurs) base(s) de lancement avec ses piquets de tente pour la fixer solidement au sol et sa ficelle de 10 m pour le largage.
- Une (ou mieux plusieurs) pompes
- De l'eau, s'il n'y en a pas sur place (bidons, bouteilles, entonnoir, dispositif de remplissage sur rampe s'il y a lieu).

Le souhaitable :

- Une caisse de réparation fusée avec cutter, ciseaux, chiffons, ruban adhésif, ailerons, bouteilles vides, lest.
- Une caisse de réparation base de lancement (Clé, tournevis, pinces, tuyaux, colliers)
- De quoi noter pour chaque lancement, l'heure, les conditions (taux de remplissage, pression, angle) et le résultat. Une planchette de contre plaqué avec du papier fixé à la planchette par une pince fera l'affaire.
- Une manche à air ou tout dispositif permettant de déterminer la direction du vent.
- Un théodolite pour évaluer l'altitude atteinte.

Le petit plus :

- Un appareil photo.
- Une caméra vidéo

### ***La chronologie***

Pour chaque lancement, la chronologie pourrait être la suivante (à adapter évidemment aux circonstances) :

- Désigner un script qui notera toutes les caractéristiques du lancement.
- Mise en place de la fusée sur la base (remplie d'eau ou non selon qu'un dispositif de remplissage sur rampe est prévu ou non)
- Verrouillage de la fusée
- Pliage du parachute et fermeture du cône (s'il y a lieu)
- Remplissage en eau (si ce n'est déjà fait), puis noter la quantité introduite.
- Prendre la photo (facultatif) et renvoyer tous les spectateurs dans la zone prévue.
- Raccorder la pompe et procéder à la mise en pression (en annonçant la pression)
- Démarrer le compte à rebours et à zéro, actionner la ficelle
- Suivre la fusée jusqu'à son arrivée au sol puis noter les résultats
- Récupérer et ranger la fusée

## Pour approfondir

### Principes régissant la fusée à eau

#### *La propulsion*

Comme son nom ne l'indique pas, le mode de propulsion de la fusée est dû à l'air contenu au départ dans le réservoir. Le principe utilise les propriétés de l'air qui sont sa compressibilité et son élasticité. L'énergie, que l'on va transférer de nos biceps, alors souvent tétanisés et exsangues après un gonflage, vers l'air contenu dans la bouteille, va servir à éjecter la masse de l'eau contenue dans la bouteille (ainsi que la masse d'air comprimé d'ailleurs).

Nous retrouvons donc bien le même principe que pour Ariane : c'est l'éjection d'un fluide qui fait avancer le véhicule. Ce même principe d'action-réaction ne diffère d'Ariane, que dans la manière d'emmageriser l'énergie.

Notre fusée, que l'on peut donc qualifier d'hydropneumatique **fonctionne aussi bien dans le vide spatial que dans l'atmosphère !**

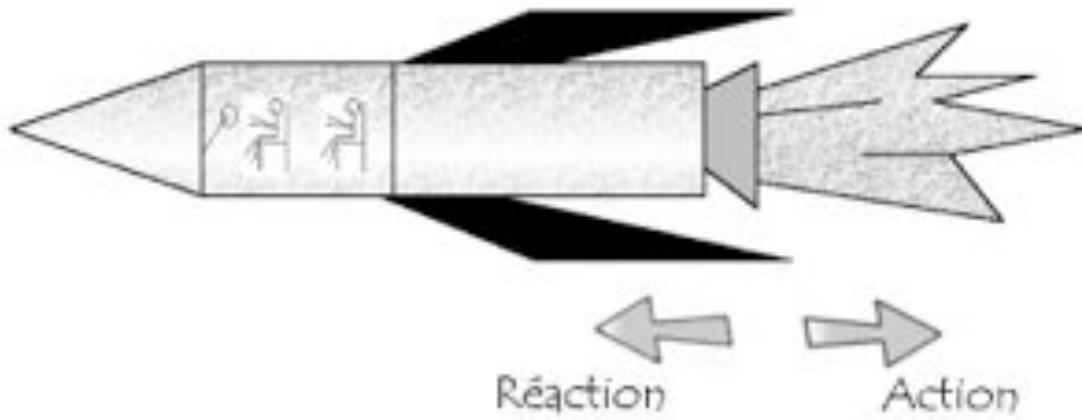


Figure 10 : Principe de l'action et de la réaction

Ce principe d'action-réaction est dénommé aussi principe de la conservation de la quantité de mouvement.

La quantité de mouvement d'un élément matériel est le produit de sa masse  $m$  par sa vitesse  $v$ , celle d'un système matériel est la somme des quantités de mouvement de chacun de ses éléments matériels.

La loi de la conservation de la quantité de mouvement dit :

**"La quantité de mouvement d'un système matériel est nulle ou demeure constante si les forces extérieures qui lui sont appliquées ont une résultante nulle".**

Ce qui se traduit, pour un système matériel composé de 2 parties de masses respectives  $m_1$  et  $m_2$ , par la formule :

$$m_1 \times V_1 + m_2 \times V_2 = 0 \text{ soit encore : } V_1 = -V_2 \times (m_2/m_1)$$

Autrement dit, si  $m_1$  est la masse de la fusée et  $m_2$  la masse d'eau éjectée (à un instant donné), la vitesse  $V_1$  de la fusée sera égale à la vitesse d'éjection de l'eau ( $V_2$ ) multipliée par le rapport des masses  $m_2/m_1$  et de sens contraire.

Donc pour connaître la vitesse de la fusée, à un instant donné, il suffit de déterminer, à cet instant, la vitesse d'éjection de l'eau, la masse  $m_2$  d'eau éjectée et la masse  $m_1$  de la fusée.

En fait, ce calcul n'est valable que dans le vide absolu et à un endroit où la fusée n'est soumise à aucune force d'attraction, ce qui est très rarement le cas d'une fusée à eau. Aussi, nous allons d'abord nous attacher à calculer la variation de vitesse de la fusée entre deux instants très rapprochés, ce qui correspond à son accélération. Ce qui nous permettra d'en déduire la force de poussée, qui, selon le principe fondamental de la dynamique (ou deuxième loi de Newton), est égale au produit de la masse de la fusée par l'accélération ( $F = m \times \gamma$ ).

Connaissant cette force de poussée, nous pourrons alors faire intervenir les autres forces auxquelles est soumise la fusée, à savoir son poids et la résistance de l'air, pour calculer ses paramètres de vol (accélération, vitesse et altitude). C'est ce qui sera étudié au chapitre « Le vol ».

Revenons donc au calcul de la poussée, qui est assez complexe et fait intervenir l'équation de Bernoulli, aussi nous ne rentrerons pas ici dans le détail du calcul<sup>1</sup>, qui permet d'arriver au résultat suivant :

## Force de poussée = 2 x Pression x Surface d'éjection

- La force de poussée s'exprime en Newtons
- La pression en Pascal (on se souviendra que 1 bar = 100 000 Pascal)
- La surface d'éjection en  $m^2$

Exemple : Une bouteille standard de 1,5 l, dont le goulot fait 21 mm de diamètre (soit une surface de 0,000346  $m^2$ ) et que l'on porte à une pression de 5 bars (donc 500 000 Pa environ) développera une poussée au départ de :

$$P = 2 \times 500\,000 \times 0,000346 = 346 \text{ N ,}$$

C'est-à-dire plus qu'un moteur de mini-fusée type Cariacou, seulement ce ne sera que pendant 5/100 de seconde environ alors qu'un moteur Cariacou poussera pendant presque 1 s soit 20 fois plus longtemps.

Le goulot de la bouteille étant ce qu'il est, on pourra donc augmenter la force de poussée en augmentant la pression, plus on « gonflera » la fusée, plus elle ira haut.

La limitation viendra du dispositif de mise en pression : avec une pompe à main ou à pied classique, il est difficile de monter au-dessus de 9 bars, pour un adulte, et 5 bars pour un enfant.

Pour information, les bouteilles de sodas sont capables de supporter des pressions allant jusqu'à 10 bars. En conséquence, il est prudent de s'en tenir à 8 bars maxi, surtout en présence de public jeune, et pour des bouteilles en parfait état.

Avec des enfants, ne jamais leur faire dépasser 5 bars (d'ailleurs, ils ont bien du mal à aller au-delà et c'est tant mieux).

Pour des raisons de commodité, il peut être envisagé d'utiliser un compresseur, mais la facilité avec laquelle on peut atteindre de trop grandes pressions avec cet outil doit faire préférer la pompe lorsque l'on fait des fusées avec des jeunes.

### Quelle est la proportion optimale d'eau et d'air ?

S'il y a beaucoup d'eau et peu d'air, la pression de celui-ci va diminuer très rapidement donc la poussée va diminuer rapidement, elle risque même de devenir plus faible que la pression atmosphérique, avant que toute l'eau ne soit évacuée. Celle-ci restera donc dans la fusée comme un poids mort. Comme par ailleurs la quantité d'eau est importante, le poids de la fusée sera élevé. Poids élevé et faible poussée, la résultante sera basse, comme l'apogée de la fusée.

Si à l'inverse, il y a peu d'eau (à la limite pas d'eau du tout) et beaucoup d'air, la poussée sera très brève puisque le volume d'eau est faible. Bien sûr il y aura la poussée due à l'éjection de l'air, mais dans ce cas la masse éjectée est faible.

Les calculs pour obtenir la proportion optimum sont très complexes, aussi il est plus facile de faire des simulations avec différents coefficients de remplissage d'eau (Voir le chapitre « Le vol » pour cela).

Selon les caractéristiques de l'engin, les résultats varient un peu, mais ils se situent au alentour de **30% à 35%**. C'est-à-dire qu'une fusée à base de bouteille de 1,5 litre devra être remplie avec 0,5 litre d'eau environ.

N'hésitez pas à faire des essais avec différents coefficients de remplissage, toutes choses égales par ailleurs, pour vous faire votre propre opinion sur la meilleure proportion d'eau.

<sup>1</sup> On se reportera pour cela sur le site <http://pagesperso-orange.fr/alain.juge/Francais/Principes.htm>

## Considération sur l'aérodynamique

Les fusées dont il est question ici évoluent dans l'atmosphère terrestre communément appelée l'air. L'air est un gaz (ou plus précisément un mélange de gaz) qui est donc compressible, expansible, élastique, visqueux et aussi pesant. Toutes ces caractéristiques ont une influence sur le déplacement des solides dans l'air.

L'aérodynamique est l'étude du comportement de l'air sur les corps en mouvement. L'écoulement de l'air le long d'un corps, que ce soit l'air qui se déplace ou le corps, peut se faire selon deux régimes :

- Le **régime laminaire**, où toutes les molécules d'air suivent des trajectoires parallèles. Toutefois, les molécules en contact avec le corps en mouvement ont une vitesse nulle par rapport à celui-ci, puis les couches (ou lames) d'air un peu plus éloignées auront une vitesse supérieure. Enfin à partir d'une certaine distance du corps en mouvement, toutes les couches d'air auront la même vitesse, la vitesse propre du flux d'air. L'ensemble des couches d'air dont la vitesse est inférieure à la vitesse du flux, constitue la **couche limite**.
- Le **régime turbulent**, où les molécules d'air suivent des trajectoires désordonnées, tout en étant entraînée dans un flux global ayant une vitesse propre.

On retrouve ces deux types d'écoulement en hydrodynamique, il existe des cours d'eau qui traversent des zones peu pentues et sans obstacles (la Seine), l'écoulement de l'eau est laminaire, puis il y a d'autres cours d'eau à plus forte pente, avec des rochers dans leur lit et où l'eau s'écoule de façon plus tourmentée (torrent), leur écoulement est en régime turbulent.

Si nous considérons maintenant un flux d'air laminaire et que l'on place dans ce flux d'air une plaque plane perpendiculairement à ce flux (Figure 11). L'expérience peut être faite avec un ventilateur et une pochette de CD par exemple.

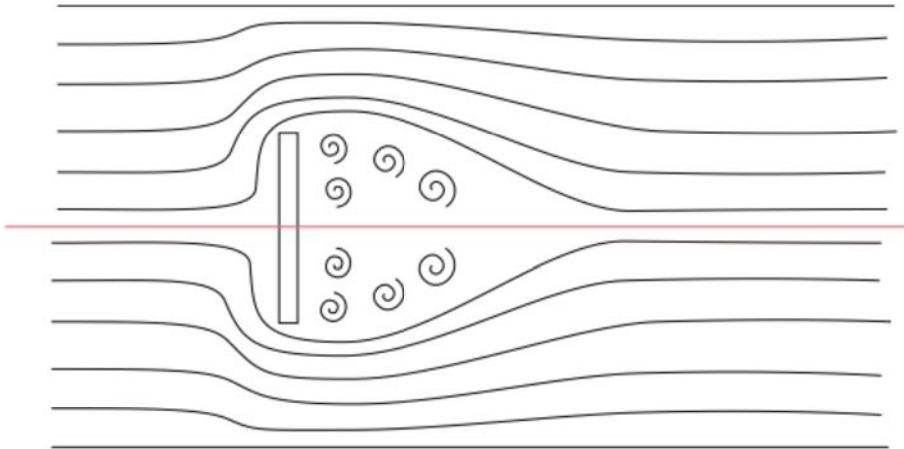


Figure 11 : écoulement de l'air autour d'un plan placé perpendiculairement au flux

Les filets d'air qui arrivent sur la plaque ne vont plus pouvoir continuer leur chemin et vont devoir contourner cette plaque. Toutefois, ces filets d'air vont exercer une pression sur la plaque, faites l'expérience : devant un ventilateur placez une pochette de CD, vous sentirez la force exercée par la pression de l'air sur la pochette.

Mais les filets d'air détournés vont avoir tendance à continuer leur chemin parallèlement au sens d'écoulement, créant ainsi un vide d'air, « une dépression », derrière la plaque. Mais « la nature ayant horreur du vide », les molécules d'air (et la plaque aussi d'ailleurs) vont être aspirées par cette dépression créant ainsi un régime turbulent derrière la plaque.

On visualiserait mieux le phénomène dans une rivière, dans une portion où l'écoulement est laminaire, si on place un caillou en travers du courant, on voit bien que l'eau vient buter sur ce caillou, créant une remontée du niveau d'eau devant, alors que derrière, se créent des tourbillons.

Si maintenant nous plaçons la pochette de CD parallèlement au flux d'air du ventilateur.



Figure 12 : écoulement de l'air autour d'un plan placé parallèlement au flux

La pochette étant mince, le flux d'air sera peu perturbé, toutefois on sent qu'une force tend à éloigner cette pochette du ventilateur. Cette force est essentiellement due au frottement de l'air sur les parois de la pochette. En effet, le fait que les couches d'air à proximité des parois de la pochette aient des vitesses différentes va créer des forces de viscosité, qui peuvent être importantes.

L'ensemble des forces dues à ces trois phénomènes (pression à l'avant, dépression à l'arrière et frottements) constitue la résistance de l'air.

Cette résistance de l'air est fonction :

- De la densité de l'air en  $\text{kg.m}^{-3}$
- De la surface S que présente le mobile face au flux d'air, appelée maître couple en  $\text{m}^2$
- Du carré de la vitesse V en  $\text{m.s}^{-1}$
- De la forme du mobile pour lequel on définit un coefficient de pénétration dans l'air  $C_x$  (sans dimension)

Ce qui se traduit par la relation :

$$R = 1/2 * \rho * C_x * S * V^2$$

R étant une force, elle est exprimée en N.

Revenons sur ce qu'il est convenu d'appeler le Maître couple. C'est la surface S que présente le mobile face au flux d'air, c'est donc la projection du corps placé dans le flux d'air sur un plan perpendiculaire au flux.

Dans les deux exemples précédents, si l'on considère qu'une pochette de CD a pour dimension 12x12x0,5 cm. Lorsqu'elle est perpendiculaire au flux d'air, son maître couple vaut  $12 \times 12 = 144 \text{ cm}^2$ , dans le deuxième cas il vaudra  $12 \times 0,5 = 6 \text{ cm}^2$ . Pour une fusée de diamètre D ayant 4 ailerons d'envergure L et d'épaisseur e, si celle-ci est parfaitement dans l'axe du flux d'air, son maître couple sera :

$$\pi * (D^2/4) + 4 * L * e$$

Précédemment, nous avons vu le cas d'une plaque disposée soit perpendiculairement au flux d'air, soit parallèlement. Mais que se passe-t-il, si la plaque fait un angle  $\alpha$  avec le flux d'air ?



Figure 13 : écoulement de l'air autour d'un plan faisant un angle  $\alpha$  par rapport au flux

Comme dans le cas de la surface perpendiculaire, il va se produire un phénomène de surpression sur la surface frappée par le flux d'air et une dépression sur la surface « à l'abri ». D'autre part la plaque est aussi soumise à une force de frottement. Cette surpression, cette dépression et cette force de frottement vont s'additionner pour constituer la résistance de l'air. A noter que la force résultante de la dépression est environ 3 fois plus importante que celle due à la surpression et que la force de frottement est généralement faible devant les deux autres.

Cette résistance de l'air s'applique de façon perpendiculaire à la plaque en un point nommé **centre de poussée**, comme celle-ci fait un angle  $\alpha$  (appelé angle d'incidence) avec le flux d'air, on peut décomposer cette force en deux autres forces, l'une dans l'axe du flux d'air et l'autre perpendiculaire.

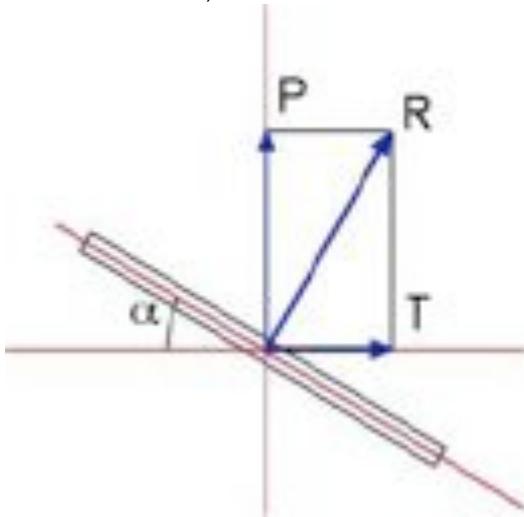


Figure 14 : Composantes des forces

La composante  $T$  dans l'axe du flux d'air s'oppose à l'avancement de la plaque, c'est **la force de traînée**. La composante  $P$  perpendiculaire au flux d'air tend à faire monter la plaque, c'est **la force de portance**.

Pour nos fusées à eau, il faudra tenir compte de ces deux forces :

- La force de traînée va s'opposer à l'avancement, aussi pour avoir des performances maximum, il faudra s'attacher à diminuer autant que possible cette traînée. Ce sera obtenu en travaillant la forme de l'engin (autrement dit le Cx) pour qu'il présente le moins possible d'aspérités génératrices de turbulences, en limitant autant que faire se peut le maître couple (éviter les ailerons d'envergure gigantesque et très épais) et enfin en évitant que la fusée prenne trop d'incidence.
- La force de Portance va permettre d'assurer la stabilité de la fusée en la ramenant parallèle au flux d'air chaque fois qu'une perturbation tentera de l'en dévier.

## Le vol

Le comportement d'une fusée à eau est en tout point semblable à une fusée pyrotechnique, aussi vous vous reporterez utilement au document Planète Sciences « Le vol de la fusée ». Les quelques lignes qui suivent donnent un aperçu de ce qui se passe lors des différentes phases du vol.

Pendant la phase de propulsion, les forces en présence sont d'une part la poussée, calculée précédemment, et qui tend à faire monter la fusée, puis d'autre part deux forces qui s'opposent à la montée : le poids de la fusée et la résistance de l'air.

La poussée étant directement proportionnelle à la pression, va être maximum au moment où la fusée va quitter la base de lancement, puis diminuer progressivement jusqu'à 0.

Le poids de la fusée est égal au produit de sa masse par l'accélération de la pesanteur  $g = 9,81 \text{ m.s}^{-2}$ . Au départ, ce poids est principalement celui de l'eau contenue dans la fusée, il va diminuer au fur et à mesure de l'éjection de l'eau.

La résistance de l'air s'accroît avec la vitesse et sera maximale en fin de propulsion.

La résultante  $F$  de ces trois forces va donner à la fusée une accélération (du moins on l'espère ☺) qui sera égale à  $\gamma = F / M$ , où  $\gamma$  est exprimée en  $\text{m.s}^{-2}$ ,  $F$  est en Newton et  $M$  (la masse totale de la fusée) en kilogramme.

Après la phase de propulsion, la fusée n'est plus soumise qu'aux deux forces qui s'opposent à son ascension, elle va donc subir une décélération égale à  $F/M$  où  $F$  est la résultante de son poids et de la résistance de l'air et  $M$  est sa masse. Le poids et la masse restent constants puisque toute l'eau a été éjectée, alors que la résistance de l'air va diminuer progressivement, tout comme la vitesse.

Elle va donc poursuivre sa montée en diminuant sa vitesse ascensionnelle jusqu'à 0, qui sera l'apogée du vol, puis la descente va s'amorcer. Si la descente se fait sans dispositif de freinage (parachute ou autre), le signe de la vitesse s'inverse et les deux forces en présence sont d'une part le poids qui entraîne la fusée vers le bas (l'accélération de la pesanteur est toujours orienté vers le centre de la terre) tandis que la résistance de l'air s'oppose toujours au déplacement.

La fusée sera alors accélérée, toujours conformément à la loi fondamentale de la dynamique :

$$\gamma = F / M$$

$F$  étant alors égale à  $M * g - R$ . Cette relation montre que si  $R = M * g$ , alors  $F$  est nulle et  $\gamma = 0$ . Ceci permet de déduire la vitesse limite de descente, qui est

$$V_{\text{limite}} = \text{racine}(M * g / 0,5 * \rho * C_x * S)$$

Compte tenu de tout ce qui précède, il est donc possible de calculer la trajectoire d'une fusée à eau. Pour cela, quelques « fuséOnautes » éminents ont mis au point des simulateurs, hélas tous en langue anglaise.

Citons les principaux :

Clifford Heath : <http://polyplex.org/rockets/>

Paul Grosse : <http://www.paul.grosse.is-a-geek.com/h2oRocketIndex.htm>

Dean Wheeler : <http://www2.et.byu.edu/~wheeler/benchtop/>

N'hésitez pas à les utiliser, ça vous donnera une bonne idée des performances potentielles de votre fusée.

## La stabilité

Pour tout ce qui concerne la stabilité de vos fusées, vous êtes invités à relire le cahier technique Planète Sciences « Le vol de la fusée ». La majeure partie des questions que vous vous poserez trouvera réponse dans cette note écrite initialement pour des micros, mini et fusées expérimentales. Toutefois, les fusées à eau présentent quelques particularités qu'il faut souligner.

La « masse propulsive » est en rapport beaucoup plus importante que pour les fusées à poudre, par exemple une fusée à eau constituée d'une bouteille de 1,5l va peser à vide environ 100 g, mais remplie avec 1/3 de volume d'eau, elle va peser 600g. Une mini-fusée avec moteur cariacou pèsera environ 1,2kg à vide pour une masse de poudre de 70g. Ceci explique en grande partie la formidable accélération des fusées à eau.

Cela signifie, aussi, que le centre de gravité de la fusée va énormément se déplacer pendant la phase de propulsion. Il va remonter, ce qui est plutôt favorable pour la stabilité, heureusement d'ailleurs puisqu'une fusée à eau au décollage, donc avec toute l'eau à l'intérieur, a son centre de gravité très bas (grossièrement c'est le centre de gravité de la masse d'eau) donc pour avoir un centre de poussée plus bas d'au moins un diamètre, cela nécessite des ailerons très grands ou/et très bas.

En pratique, pendant la phase de propulsion, qui est très courte : quelques centième de secondes, la fusée est « lourde » puisque l'eau y est encore présente, elle est donc moins sensible aux perturbations. On peut donc se permettre d'avoir une fusée peu stable au décollage. D'une part, la masse d'eau va se libérer très vite donc la durée d'instabilité sera très courte et s'il y a une perturbation au décollage, très vite la fusée retrouvera sa trajectoire, d'autre part l'accélération est énorme ce qui veut dire que la vitesse est rapidement importante donc l'effet aérodynamique des ailerons sera rapidement sensible.

Pour autant, il faut bien garder en mémoire que le décollage peut être périlleux et qu'il est donc impératif d'observer les règles élémentaires de sécurité lors des lancements. Ce fait milite aussi en faveur d'un guidage de la fusée au décollage.

Enfin, la durée de la phase de propulsion est fonction du diamètre de la tuyère, plus le diamètre est petit, plus la durée sera longue et donc la période d'instabilité grande. Plus le diamètre de tuyère sera faible, plus il sera nécessaire de concevoir un engin stable même en charge, ce qui malheureusement ne peut se faire qu'au détriment des performances.

Mais la vie est ainsi faite, tout est affaire de compromis...

Le grand principe, qui permet de déterminer si une fusée sera stable ou non, dit que :

**Le centre de gravité doit se trouver au dessus du centre latéral de poussée, d'au moins un calibre.**

**Le centre de gravité** est le point d'application du poids, il est donc facile de déterminer expérimentalement sa position pour la fusée à vide. Il suffit en effet de suspendre la fusée, à l'aide d'une ficelle passée autour de son fuselage et de rechercher le point où elle restera horizontale. La position de la ficelle indiquera celle du centre de gravité (CdG).

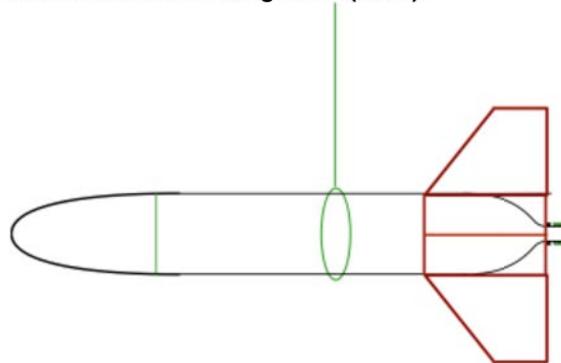


Figure 15 : Recherche du centre de gravité

Malheureusement cette technique ne permet pas de trouver le centre de gravité avec l'eau à l'intérieur puisque celle-ci se répand horizontalement. Il faudra donc le calculer, sachant que :

- si l'on appelle  $X_v$ ,  $X_e$  et  $X_g$  les distances du sommet du cône à respectivement le CdG à vide (déterminé ci-dessus), le CdG de la masse d'eau et le CdG de la fusée en charge.
- Si l'on nomme  $M_v$ ,  $M_e$  et  $M_g$  les masses respectives de la fusée à vide, de l'eau et de la fusée en charge,

On a la relation :

$$Mg * Xg = Mv * Xv + Me * Xe$$

Pour déterminer le CdG de la masse d'eau, remplir d'abord la fusée de la quantité d'eau voulue, puis mesurer la distance entre le sommet du cone et la limite air-eau (X1 sur la figure ci-dessous). Dans du carton, dessiner la silhouette de la masse d'eau et rechercher son centre de gravité à l'aide d'un règle par exemple, comme sur le dessin ci-dessous.

La distance Xe sera alors égale à X1 + X2.

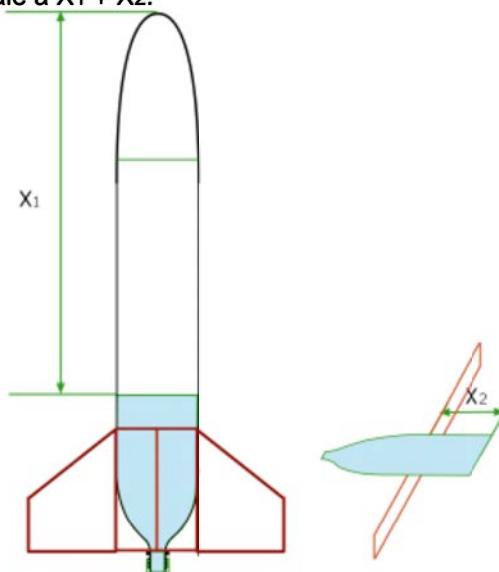


Figure 16 : Centre de gravité avec l'eau

**Le centre latéral de poussée (CLP)** est le point d'application des forces aérodynamiques. Sa détermination est moins simple que celle du CdG.

Pour des faibles valeurs d'incidence, ce centre peut être déterminé par le calcul grâce aux équations de Barrowman, c'est la méthode décrite dans le cahier technique Planète Sciences « Le vol de la fusée », donc nous n'y reviendrons pas ici.

Les logiciels TRAJEC ou Stabilito de Planète Sciences permettent de calculer très simplement ce CLP. Ils sont téléchargeables à l'adresse : <http://www.planete-sciences.org/espace/basedoc/Stabilito>

Le CLP doit donc être situé au moins un **calibre** au dessous du CDG. Le calibre est tout simplement le diamètre du corps de la fusée. Le rapport distance CLP-CdG sur Diamètre de la fusée s'appelle la marge statique et contrairement aux fusées pyrotechniques, les fusées à eau peuvent se contenter d'une marge statique de 1.

En final, il sera toujours fructueux de tester la stabilité de la fusée en réalisant un **test « en vol circulaire »**. C'est à dire que l'on attache la fusée à une ficelle au niveau de son centre de gravité, comme pour déterminer celui-ci. Donc la fusée doit être en équilibre comme sur la Figure 15, On la fait alors tourner autour de soi, comme une fronde sauf qu'ici on ne lâche jamais la ficelle. Si elle reste bien en ligne, perpendiculaire à la ficelle, pointe en avant et ailerons en arrière, la fusée est stable. Si au contraire elle tournoie dans tous les sens, ou pire si elle tourne ailerons en avant, alors la stabilité est à revoir.



Figure 17 : Test de stabilité

## Les techniques de construction

### L'atelier

L'avantage des fusées à eau réside dans le caractère bon marché de cette activité, et entre autres, l'outillage nécessaire est réduit et plutôt courant.

Avant toute chose, il faut disposer d'un plan de travail (vieille table, établi) que l'on protégera au besoin pour lui éviter les outrages des cutters, pistocollé et autres peintures. Cette protection peut être du carton fort (récupération d'emballage) ou une plaque d'isorel ou tout simplement du papier s'il s'agit de protéger contre la peinture.

Pour le reste, les outils indispensables sont : Cutters, paire de ciseaux, règle graduée, cornière de 15x15mm sur 30 à 50 cm de long, feutres indélébiles et ruban adhésif fort (type électricien ou renforcé fibre de verre).

Un outil, à faire soi-même, est extrêmement pratique pour la découpe propre des bouteilles.

Il s'agit d'une « boîte de traçage » qui est un demi parallélépipède rectangle de 30 à 40 cm de long et de 4x4 cm de côté, selon schéma ci-dessous.

Le petit côté (vert sur le dessin) peut être un peu plus haut (5 cm) pour pouvoir tracer des bouteilles de 2 litres.

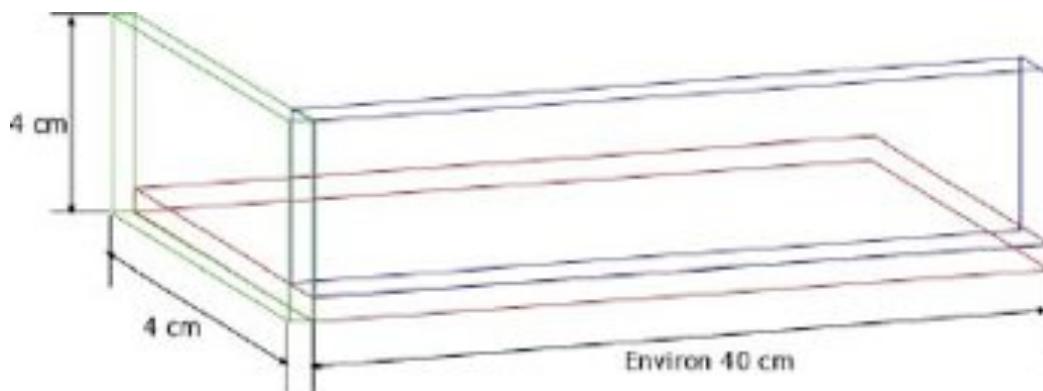


Figure 18 : Boîte de traçage

Bien entendu selon le degré de sophistication du projet, d'autres outils peuvent être nécessaires, mais déjà avec ceux qui sont cités précédemment, on couvre la majeure partie des besoins.

Le tableau ci-dessous donne une liste d'outillage pour un atelier « confortable ».

Désignation
Agrafeuse avec ses agrafes
Paire de Ciseau
Colles (en stick, universelle, néoprène, cyanolithe)
Protection de table
Cornières (protège doigts) de 25 cm
Crayons à papier + Taille-crayon + gomme
Cutters
Équerre (45° ou 60°), Rapporteur, Compas, Règle 30 cm
Étau de table
Feutres fins indélébiles
Jeu de petites pinces et de Serre-joint
Lunettes de protection
Papier de verre
Perceuse (+ clé de mandrin et si besoin son support horizontal)

## Les matériaux

Les principales caractéristiques que l'on recherchera sont, la légèreté, la résistance, la bonne tenue à l'humidité et le faible coût. Selon les parties de la fusée, les exigences peuvent varier.

### Le corps de la fusée

Bien que l'on puisse imaginer l'utilisation de matériaux divers et plus ou moins sophistiqués, les bouteilles de soda en PET constituent le matériau privilégié. Ces bouteilles sont prévues pour tenir 10 bars de pression aussi on s'en tiendra si possible à la moitié, surtout si les bouteilles en question sont un peu abîmées. Si elles ont subi des pliures ou des chocs violents ou si elles présentent des rayures trop marquées, elles doivent être éliminées pour cet usage.

### Le cône

Le cône le plus simple est réalisé à partir du sommet d'une bouteille. Mais il est vrai que l'aérodynamique de ce cône n'est pas des meilleures aussi on pourra l'améliorer en utilisant du balsa, du carton, du PET récupéré sur une bouteille.

### Les ailerons

C'est sur cette partie de la fusée que le choix est le plus large.

- Le carton est facile à « usiner » et à se procurer, mais il n'est pas très hydrofuge. Donc si on veut assurer une certaine pérennité à cet empennage, il faudra prévoir de le protéger avec de la peinture ou une plastification par exemple.
- Le balsa est tout aussi facile à usiner, mais il est plus onéreux et assez fragile.
- Le PET, à partir d'une feuille découpée dans une bouteille, que l'on plie en portefeuille puis que l'on découpe à la taille voulue. C'est un matériau quasi idéal puisqu'il est léger, bon marché, solide. Mais la réalisation n'est pas très évidente comme nous le verront plus loin.
- Les plaques alvéolaires en polypropylène sont une sorte de carton ondulé en plastique, très facile à « usiner » aussi, résistant, hydrofuge et bon marché. Mais il est un peu épais
- Recyclage de CD ROM, vous avez peut-être en stock des CD ROM inutilisés. Il est alors possible de les recycler en ailerons, mais l'usinage n'est pas très évident (tendance à s'écailler).
- Il existe encore pas mal de matériaux possibles, sans aller jusqu'aux métaux (trop lourds), on trouve des feuilles de plastiques (Nylon, PVC) ou des plaques fines de polystyrène (très léger, mais très fragile).

### Le parachute

Pour des fusées à eau, il n'est pas question d'utiliser des matériaux « hi-tech », le plus couramment utilisé est le plastique des sacs-poubelles le plus léger possible. Un autre plastique intéressant est la housse de vêtement des pressings, plus léger que les sacs poubelles.

On peut aussi utiliser des chutes de tissus légers (genre tissus pour doublure)

### Les adhésifs

Pour assembler une fusée, les colles sont indispensables. Malheureusement le PET très utilisé dans ce domaine est difficile à coller.

Parmi les adhésifs existants, on peut citer :

- Les bandes adhésives. Il en existe toute une variété, mais une des plus solides est renforcée fibre de verre avec un adhésif très puissant. On choisira des largeurs de l'ordre de 2 cm. Les rubans adhésifs pour l'électricité ou l'emballage satisfont généralement au besoin.
- Les colles néoprène que l'on étale sur les deux parties à encoller, on laisse sécher puis on presse fortement les deux pièces. Le collage est instantané.
- Les pistocolles, mais attention à la température qui déforme le PET. **NE JAMAIS METTRE DE LA COLLE À CHAUD DIRECTEMENT SUR LE RESERVOIR**, ce qui aurait pour effet de le fragiliser et donc d'entraîner un risque d'explosion.
- Les cyanoacrylates (type super glue), nécessitent une bonne préparation des surfaces à coller. D'un usage assez dangereux parce qu'elles collent très bien la peau.
- Les colles polyuréthanes (type Sykaflex 11 FC), assez chères et également dangereuses (doivent être manipulées avec des gants), elles nécessitent par ailleurs des temps de séchage longs. A utiliser essentiellement pour les assemblages de bouteilles

Éviter les rubans adhésifs de bureau qui ne collent pas assez de même que ceux de masquage pour la peinture.

En résumé, le tableau ci-dessous dresse la liste des matériaux les plus usuels.

Désignation
Bouteilles PET (boissons gazeuses)
Carton fort (vieux calendriers muraux par exemple)
Élastiques
Ficelle de boucher
Planche d'akilux (la version plastique du carton ondulé)
Plaque de dépron
Sac-poubelle fin 100L
Trombones
Rubans adhésifs
Colles
Balsa

## Construction

### Traçage et découpe des bouteilles

Que nous ayons à découper un manchon, un cône, un cul-de-bouteille ou une jupe pour ailerons, la découpe des bouteilles n'est pas aisée si l'on ne possède pas un minimum de technique.

La principale difficulté est due à la souplesse du matériau, pour y pallier, il suffit de gonfler la bouteille à 2 ou 3 bars pour qu'elle devienne rigide. Pour cela, utiliser un bouchon percé en son centre par un trou de 8 mm dans lequel on placera une valve de chambre à air de bicyclette, comme le montre le schéma ci-dessous.

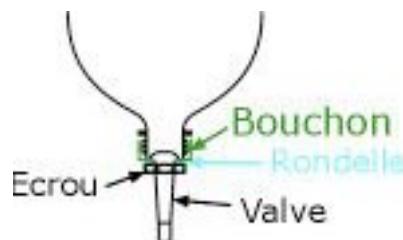


Figure 19 : Bouchon gonfleur

A ce moment-là, on peut tracer les traits guides pour le découpage. Si on veut faire plusieurs découpes sur une même bouteille, il faudra tout tracer d'abord puisqu'à la première découpe, la bouteille va se dégonfler.

Pour tracer un trait de découpe circulaire sur un plan perpendiculaire à l'axe de la bouteille, 2 méthodes (au moins) sont possibles :

- Prendre une feuille de papier A4 et l'enrouler autour de la bouteille en veillant à ce qu'elle forme un cylindre parfait. Pour cela placer le petit côté de la feuille dans l'axe de la bouteille (on s'aidera des marques dues au joint de moulage), l'un des grands côtés étant positionné à l'emplacement du trait à tracer. Enrouler la feuille de façon à ce qu'elle soit bien plaquée sur la bouteille. Lorsqu'on a fait le tour de la bouteille, les 2 bouts du grand côté de la feuille doivent être alignés. Fixer la feuille en position avec du ruban adhésif. Il suffit alors de suivre le bord de la feuille pour tracer.
- Utiliser la boîte de traçage décrite page 20. Positionner la bouteille, le goulot ou le cul contre la planche latérale. Positionner un feutre indélébile contre la bouteille à l'emplacement du trait à réaliser et en s'appuyant sur le coté de la boîte. Faire rouler la bouteille pour tracer.



Figure 20 : Traçage avec une feuille de papier



Figure 21 : Traçage avec la boîte de traçage

Pour tracer un trait parallèle à l'axe de la bouteille, utilisez une cornière comme le montre la photo ci-dessous.



Figure 22 : Traçage à l'aide d'une cornière

### **Corps simple**

Il faut entendre par corps simple, un réservoir constitué par une seule bouteille. Celle-ci devra être exempte de toute marque de pliure, de rayure ou de choc. Il existe différentes contenances, les plus courantes étant : 0,5 l, 1l (attention toutefois au diamètre du goulot), 1,25 l (bouteilles d'eau gazeuse), 1,5l (les plus courantes) et 2l.

Sur ce corps lui-même, il n'y a pas grand-chose à faire si ce n'est enlever l'étiquette. Ce n'est pas indispensable, mais ça ne peut qu'améliorer les performances (poids moindre et meilleurs Cx). Selon les marques de boissons, les colles utilisées sont parfois difficiles à enlever. D'abord enlever le maximum de papier, en l'humidifiant et sans utiliser d'outils qui risqueraient d'abîmer la bouteille, puis enlever la colle à l'aide de White Spirit. Une fois toute la colle enlevée, laver à l'eau savonneuse puis rincer la bouteille.

Il est possible aussi de reformer le cul de la bouteille pour lui donner une forme plus aérodynamique. Pour cela, mettre en pression la bouteille à environ 3 bars, chauffer le cul, avec un décapeur thermique par exemple, en répartissant bien la chauffe et en maintenant le décapeur thermique à 20 cm environ. Le plastique va se ramollir et par la pression interne, le cul de la bouteille va prendre une forme sphérique. Prévoyez quelques essais infructueux avant de réussir cette manipulation !

### **Corps multi-bouteilles**

Un corps multi-bouteilles est constitué de plusieurs bouteilles mises bout à bout pour accroître le volume d'eau et de gaz comprimé ; sans augmenter le diamètre. Il existe plusieurs possibilités de couplage, résumées dans le schéma ci-dessous.

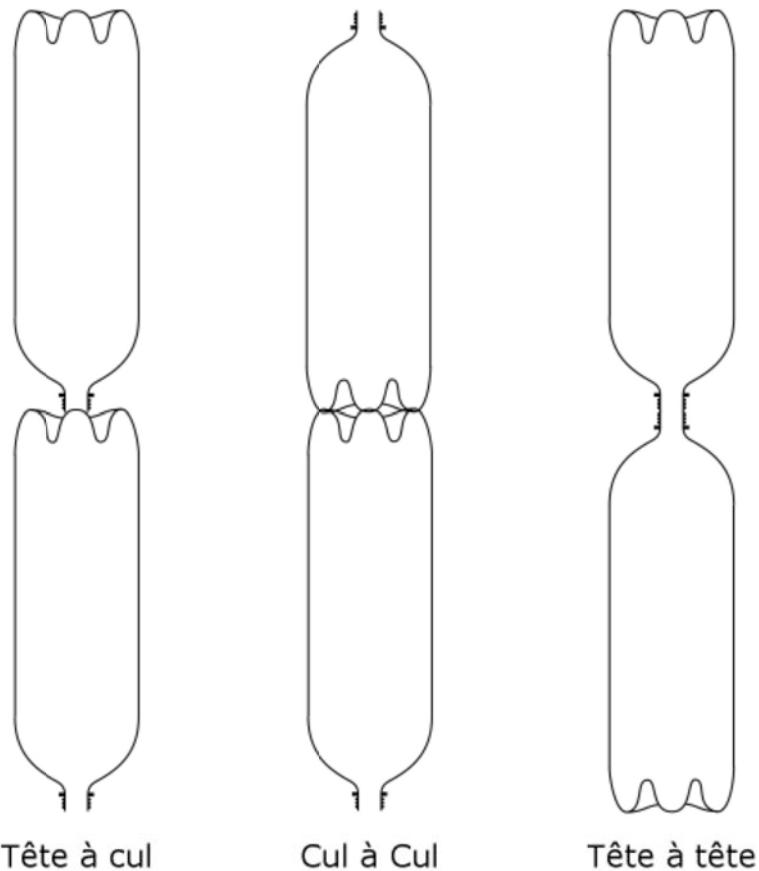


Figure 23 : Différents types d'assemblage

Le montage « tête à tête » ne se justifie qu'au-delà de 2 bouteilles, puisqu'il n'y a pas de « tuyère ». Il faut donc une troisième bouteille (au moins) raccordée « cul à cul » avec l'une des 2.

Pour chacun de ces types de montage, il faut trouver le moyen de fixer les bouteilles entre elles de façon à ce que ce soit étanche même en pression.

Pour ces trois montages, le raccordement peut se faire au moyen de tubes filetés du genre de ceux que l'on trouve pour les lampes de chevet.

Lorsqu'on utilise le cul de la bouteille, on aura intérêt à reformer celui-ci pour l'arrondir, comme indiqué ci-dessus.

Lorsqu'on utilise la tête de la bouteille, elle sera munie de son bouchon.

Il faudra alors percer au centre du cul de la bouteille ou au centre de son bouchon un trou de 10 mm.

Dans le couplage tête-à-tête, l'assemblage est facile, puisqu'il suffit de réunir 2 bouchons entre eux, on place un écrou à un bout du tube fileté, on met le joint. On enfile le tout dans le trou du premier bouchon (écrou à l'intérieur du bouchon), on met le deuxième bouchon, puis le joint et enfin l'écrou. On sert l'ensemble et on peut viser les bouteilles sur leur bouchon.

Dans le couplage Tête à cul, placer l'écrou et le joint sur le tube fileté, puis mettre l'ensemble sur un bâton de 8 mm de diamètre et de 40 cm de longueur au moins pour pouvoir mettre l'ensemble tube fileté, écrou et joint par l'intérieur de la bouteille. Placer alors la rondelle métallique puis le bouchon de la deuxième bouteille, ensuite mettre le joint et l'écrou puis serrer le tout

La réalisation du couplage Cul à cul est plus sportive. Commencer comme ci-dessus en mettant un ensemble tube fileté, joint écrou par l'intérieur de la première bouteille puis mettre une rondelle métallique et un écrou que l'on serrera bien. Remettre un écrou, une rondelle métallique puis la deuxième bouteille. Jusque là tout va bien, maintenant il va falloir mettre le joint et l'écrou à l'intérieur de la seconde bouteille. Pour cela il faudra se construire un outillage composé d'un tube (en cuivre par exemple) de 10 mm de diamètre intérieur, dans lequel on fait passer un tube ou du rond de 10 mm de diamètre extérieur. On place alors l'écrou sur le rond et on le scotch sur le tube extérieur (attention de ne pas mettre de ruban adhésif sur la face qui va serrer, sinon on n'arrivera plus à l'enlever), on pose alors le joint au-dessus de l'écrou. On introduit le tout par le goulot de la seconde bouteille et on essaie de mettre le joint et l'écrou sur le tube fileté. Ça demande un peu de patience et de dextérité, mais on y arrive. Serrer l'écrou à l'extérieur de la bouteille et retirer l'ensemble tube et rond.

Ces trois types de couplage sont résumés par les schémas ci-dessous :

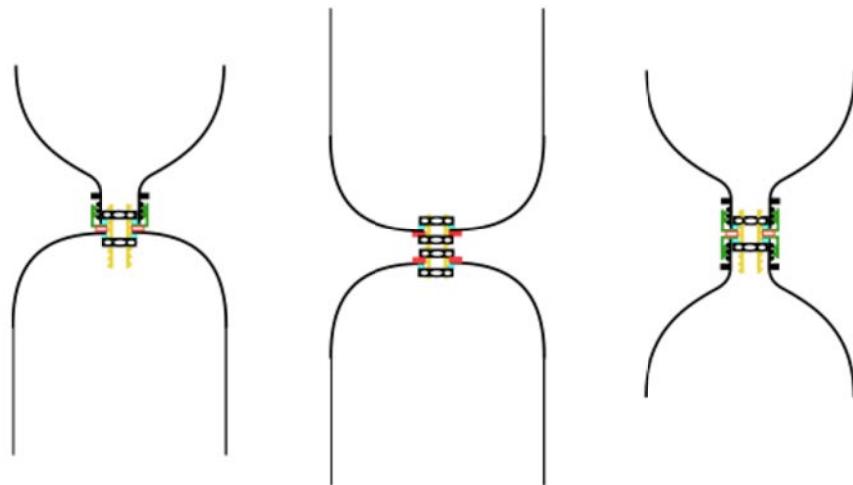


Figure 24 : Modes de couplage

Enfin pour finir l'engin, découpez dans la partie médiane d'une bouteille un cylindre que vous placerez entre les deux bouteilles pour assurer une continuité du corps de la fusée.

Ce type de couplage a le mérite d'être assez facile à réaliser et plutôt fiable dès lors que l'on met un peu de soin à le réaliser. Cependant, le fait de réunir les deux réservoirs par un orifice plus petit que le goulot de la bouteille, fait perdre de la puissance à la fusée.

Pour pallier ce problème une autre technique consiste à assembler les bouteilles cul à cul mais en enlevant ceux-ci. Mais cette technique est beaucoup plus compliquée et la réussite n'est pas toujours au rendez-vous. Les bouteilles sont assemblées par collage avec une colle polyuréthane pour le bâtiment type Sikaflex 11 FC (Il existe d'autres marques). Ce type de colle est à utiliser **impérativement** avec des gants et à l'extérieur.

Voici le déroulement des opérations :

1. Prendre 2 bouteilles identiques et enlever les culs
2. Prendre une troisième bouteille et découper dans son milieu un manchon de 8 cm de haut environ. Le fin du fin est de découper ce manchon dans une bouteille dont le diamètre est légèrement supérieur aux deux bouteilles précédentes, puisqu'il viendra recouvrir leur jonction.
3. Prendre une vieille poêle et la chauffer au minimum sur une plaque électrique. Placer la partie coupée de l'une des deux bouteilles sur la poêle en la faisant tourner. Le plastique va alors se ramollir et se recroqueviller, créant ainsi un bourrelet au bas de la bouteille. Ce bourrelet permettra d'une part d'augmenter la surface de collage entre les bouteilles et d'autre part d'éviter que la bouteille ne se plisse lorsque le manchon sera glissé par-dessus. Faire la même chose sur la deuxième bouteille.
4. Passer un petit coup de papier de verre à l'intérieur du manchon et sur la partie des bouteilles à encoller, puis bien nettoyer ces parties.
5. Enduire de colle polyuréthane (ne pas oublié de mettre des gants) la moitié intérieure du manchon et le faire glisser sur l'une des bouteilles.
6. Mettre de la colle sur le bourrelet de cette première bouteille et sur la deuxième moitié du manchon, puis enfoncez la deuxième bouteille à l'intérieur du manchon.
7. Vérifier à l'aide d'une cornière que les 2 bouteilles soient bien alignées.
8. Essuyer la colle qui a débordé et laisser sécher au moins 24h.

À vous d'imaginer d'autres techniques d'assemblage de bouteilles qui assurent étanchéité et tenue en pression et qui soient malgré tout faciles à réaliser.

Lorsqu'on a réalisé un tel assemblage de bouteilles, il est prudent de faire un test d'étanchéité et de tenue en pression. Ce serait dommage de construire une fusée complète pour se rendre compte sur l'aire de lancement que le réservoir fuit.

Pour faire ce test, remplir complètement le réservoir d'eau, le fermer avec un bouchon de gonflage et mettre une pression de 1 bar supérieure à la pression de service prévue. Si vous voulez lancer à 5 bars, testez le réservoir à 6 bars.

**Pourquoi remplir le réservoir d'eau ?** Tout simplement parce que l'eau étant incompressible, si le réservoir cède sous la pression, il n'y aura pas de déflagration. Alors que s'il n'y a que de l'air dans le réservoir, lorsque celui-ci va céder, l'air va se détendre violemment projetant des morceaux de plastiques et surtout en faisant beaucoup de bruit ce qui peut être très dommageable pour les oreilles proches.

## Tuyère

La tuyère est généralement constituée par le goulot de la bouteille. La plupart des bouteilles PET ont un goulot de diamètre 21,5 mm,

On a vu précédemment que le diamètre de la tuyère conditionnait directement la force de poussée et on peut être tenté de « régler la poussée » en jouant sur ce diamètre.

Pour augmenter la poussée, il faut donc augmenter le diamètre de cette tuyère. Ce ne sera possible qu'en choisissant une bouteille dont le goulot est plus gros (30 mm), il en existe quelques modèles.

Mais comme la poussée d'une fusée à eau est extrêmement forte par rapport à son poids et ne dure qu'un très bref instant, on cherchera donc plutôt à diminuer la poussée et la faire durer plus longtemps.

Une première solution consiste à utiliser une tuyère type « Raccord rapide de tuyau d'arrosage » dont le diamètre d'ouverture est de 9mm, ce qui, grosso modo, donnera une poussée 6 fois plus faible, mais un temps de propulsion 6 fois plus long.

Pour obtenir une tuyère de section plus réduite, outre l'usage de raccord type « Raccord rapide de tuyau d'arrosage », il faut par exemple percer un bouchon au diamètre voulu. À noter que la réalisation de la base de lancement devra être adaptée à cette tuyère.

Il faut aussi savoir que plus le diamètre est petit, plus le temps d'éjection de l'eau est long, donc plus le temps, où la fusée a un centre de gravité bas, est long. Ce qui signifie que la fusée risque d'être très instable au décollage, d'autant que l'accélération est moindre, d'où une montée en vitesse plus lente et donc une efficacité des ailerons plus tardive. En conséquence, il faudra prévoir soit de concevoir une fusée stable avec sa masse d'eau de départ (ailerons importants et le plus bas possible) soit de guider l'engin sur une longueur suffisante.

Une autre solution de tuyère consiste à faire démarrer la fusée avec toute la puissance qu'offre la pleine ouverture du goulet, puis de réduire le diamètre peu après la sortie de rampe à l'aide d'une pièce en forme de cylindre de diamètre extérieur égale au diamètre du goulet (21,5 mm) et percé en son centre le diamètre voulu.

Voici un exemple de ce qui peut être fait.

Cette coupe montre le cylindre supérieur d'un diamètre de 21,5 mm, puis un épaulement qui permet à cette pièce d'être bloquée par le bouchon (lequel est percé en son centre d'un diamètre de 20 mm).

Au centre, un trou de 5 ou 6 mm précéder une partie conique pour un meilleur écoulement de l'eau et en bas un diamètre un peu plus grand pour permettre de fixer la pièce sur un support avant le décollage, comme le montre les photos ci-dessous.

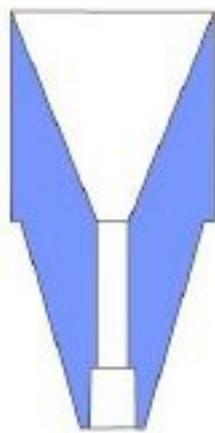


Figure 25 : Coupe d'une réduction de diamètre de tuyère



Figure 26 : Utilisation d'un réducteur de diamètre de tuyère

La photo de gauche montre la mise en place préalable du bouchon sur le tube lanceur et de la pièce réductrice de diamètre sur un tube plus long et plus fin que le tube lanceur.  
On place ensuite la fusée sur l'ensemble et on visse le bouchon. On remplit, on gonfle et on lance...

### Empennage

Le rôle de l'empennage (ensemble des ailerons) consiste à assurer la stabilité de l'engin, en faisant en sorte que le centre de poussée (CdP) soit en dessous du centre de gravité (CdG), à une distance au moins égale à environ un diamètre de l'engin.

Pour "faire descendre" le centre de poussée, on peut agir sur la surface des ailerons et leur position par rapport au centre de gravité. Plus les ailerons seront bas, moins la surface nécessaire sera importante.

Minimiser la surface des ailerons est important parce que, s'ils améliorent la stabilité de l'engin, les ailerons ont une influence néfaste sur les performances puisqu'ils augmentent le poids, le coefficient de traînée et la surface offerte à la résistance de l'air. Il faut donc bien prendre en compte toutes ces considérations pour concevoir de bons ailerons.

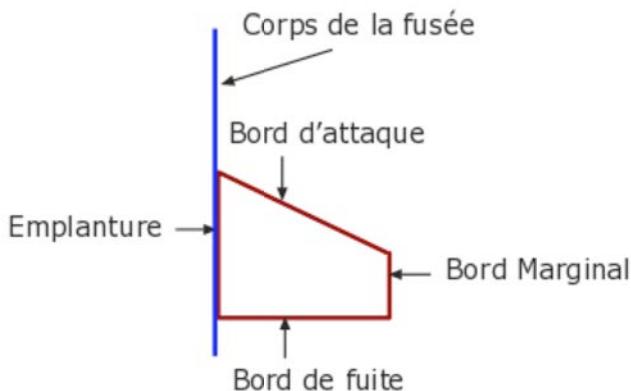


Figure 27 : Les différentes parties d'un ailerons

Une première question à régler concerne le nombre d'aileron. En pratique le choix se résume à 3 disposés à 120° ou 4 disposés à 90°.

Ensuite, quelle forme leur donner ? La figure ci-dessous donne quelques exemples de formes, mais ce n'est pas limitatif.

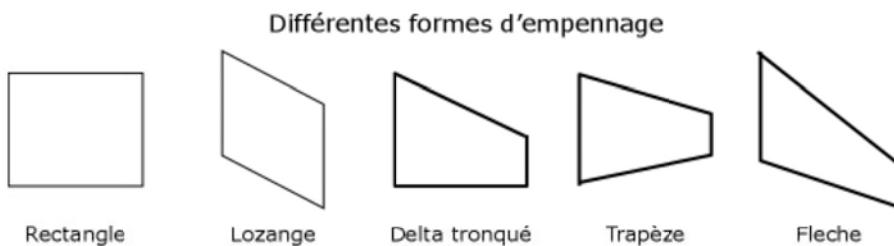


Figure 28 : Différentes formes d'empennage

Pour ce type d'engin, il ne semble pas que la forme ait une grande importance, néanmoins l'usage courant tend à privilégier la forme en delta tronqué avec une longueur d'emplanture voisine d'un diamètre et un angle entre l'emplanture et le bord d'attaque compris entre 60° et 70°.

La position des ailerons sera toujours aussi basse que possible

Comme vu précédemment, bon nombre de matériaux peuvent être utilisés pour les ailerons. Le carton fort, le balsa, l'akilux ou les plaques de matière plastiques (PVC ou Nylon) sont assez faciles à découper avec un cutter bien affûté (attention les doigts). Toujours utiliser une règle métallique (ou mieux une cornière 15x15) pour guider le cutter sans risque pour les doigts.



Figure 29 : Utilisation d'une cornière pour la découpe au cutter

Le bristol ou le PET demandent un peu plus de travail puisqu'ils doivent être replié et collé pour obtenir des ailerons rigides et plans. Pour le bristol, il s'agit de lui donner plus de rigidité et pour le PET il faut compenser d'une part son manque de rigidité et d'autre part sa courbure naturelle.

Chaque aileron est donc constitué de deux faces identiques collées entre elles. Ces deux faces seront découpées d'un seul tenant en faisant en sorte qu'elles soient réunies par le bord d'attaque (figure ci-dessous) et l'on en profitera pour rajouter 2 bandes de collage à l'emplanture.

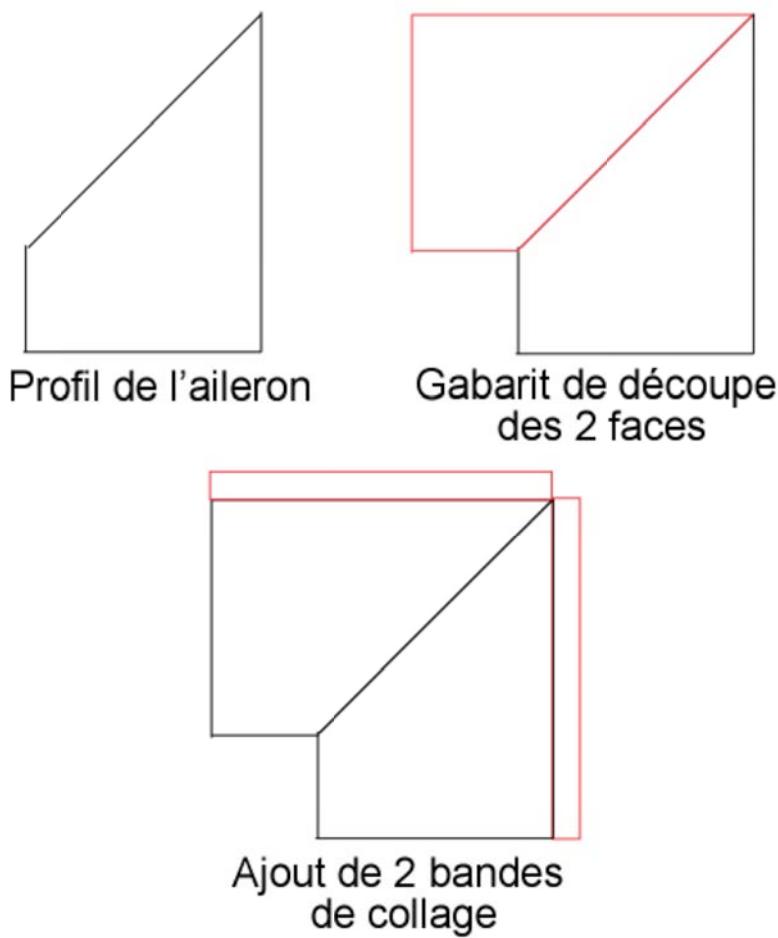


Figure 30 : Découpe d'un aileron

Une fois la découpe effectuée, il faut plier les deux parties et les coller. Pour le bristol, une colle à papier fera l'affaire, pour le PET les meilleurs résultats sont obtenus avec les colles cyanoacrylates (Super Glue...), en prenant soin de bien dégraisser les deux parties à coller et de passer un petit coup de papier de verre. Puis maintenir les deux faces serrées entre deux planchettes par un serre-joint.



Figure 31 : Pliage



Figure 32 : Collage en serrant l'aileron entre deux planches bien planes



Figure 33 : Résultat

Une fois les ailerons réalisés, il faut les coller sur le fuselage. Il est alors possible de les coller soit directement sur le réservoir soit sur une jupe qui sera elle-même assemblée au réservoir.

Les schémas ci-dessous montrent :

- À gauche un collage direct sur le réservoir, qui a l'avantage de la simplicité, mais ne permet pas de positionner les ailerons aussi bas que l'on voudrait, et selon la forme de la bouteille, la forme de l'emplanture peut être compliquée.
- À droite un collage sur jupe (en rouge). La jupe est un cylindre de PET découpé dans une autre bouteille, sur laquelle viennent se fixer les ailerons. L'emplanture est ici droite, donc facile à réaliser et le collage est relativement simple. Le positionnement des ailerons est facile, il suffit de faire une jupe plus ou moins longue (On peut même envisager un empennage exclusivement composé d'une jupe placée beaucoup plus bas que la tuyère et maintenue par trois ou quatre longerons). Inconvénients de ce type de montage : il est plus lourd et moins aérodynamique que le précédent.

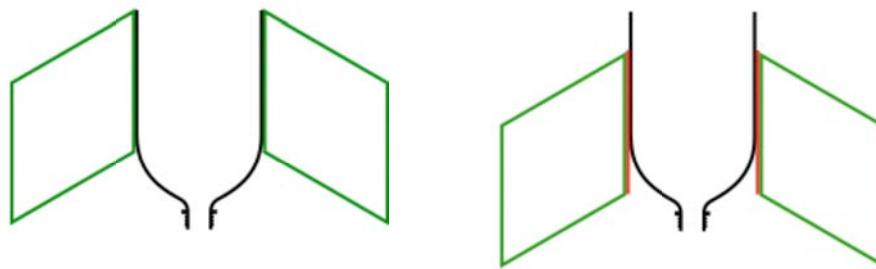


Figure 34 : Fixation des ailerons sans ou avec jupe

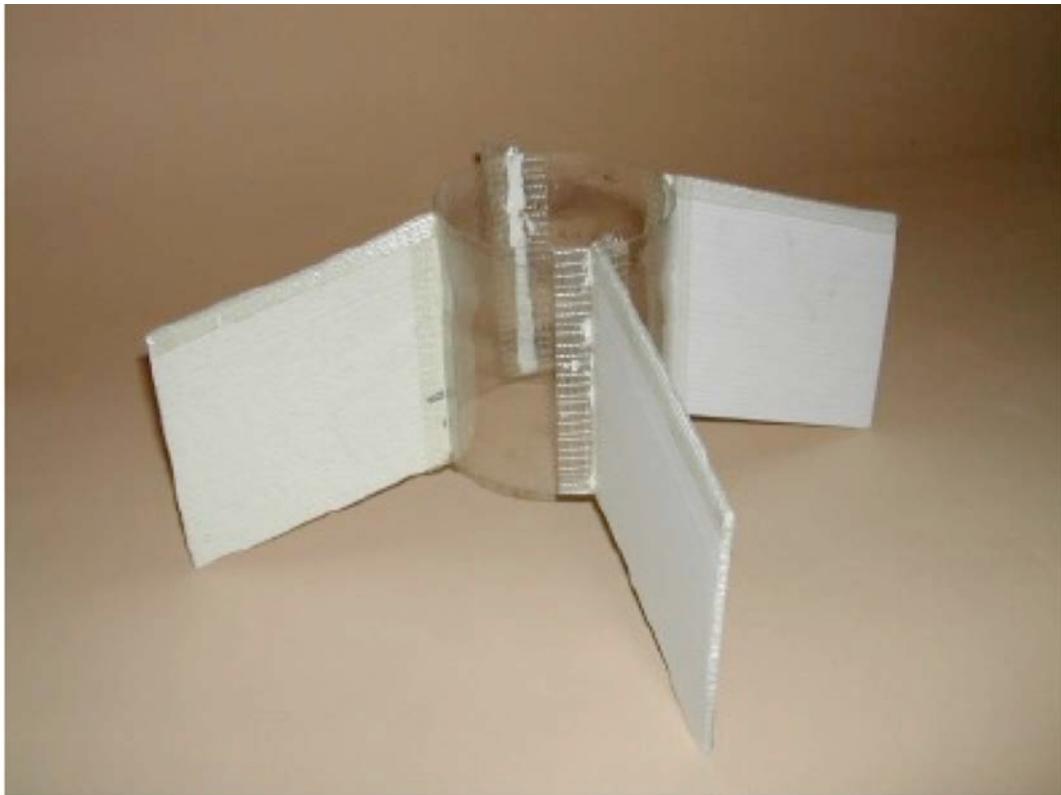


Figure 35 : Ensemble jupe + ailerons

Le collage des ailerons est assez délicat. Il faut en effet qu'ils tiennent solidement sous peine d'être arrachés au décollage, et qu'ils soient bien positionnés pour un guidage efficient.

Des ailerons bien positionnés, ça veut dire tous à la même hauteur puis répartis uniformément autour de la fusée (c'est-à-dire à 120° les uns par rapport aux autres dans le cas de 3 ailerons ou à 90° dans le cas de 4).

Pour que tous les ailerons soient à la même hauteur, il faut tracer un trait autour de la bouteille (ou de la jupe) correspondant au sommet de l'emplanture (voir méthode page 22).

Pour répartir uniformément les ailerons autour de la fusée, tracer l'emplacement du premier aileron. Sa position n'a pas vraiment d'importance, il faut cependant que son emplanture soit bien parallèle à l'axe de la fusée. On s'aidera donc d'une cornière ou d'un « plan de joint» sur la bouteille pour tracer cette première position. Pour les positions des autres ailerons, procéder comme suit :

En s'aidant d'une feuille de papier comme pour tracer une ligne de découpe, mesurer le périmètre exact de la bouteille en marquant l'endroit du recouvrement de la feuille.

Enlever le papier, puis mesurer le périmètre.

Diviser ce périmètre par 3 ou 4 selon le nombre d'ailerons et reporter sur le bord de la feuille cette valeur comme indiqué ci-dessous

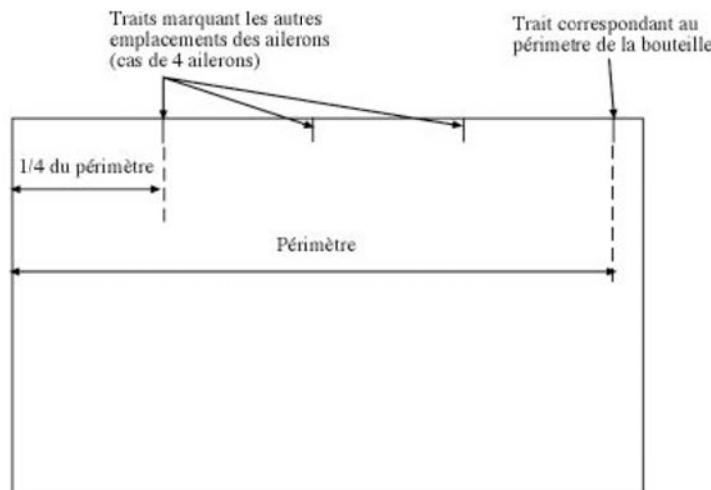


Figure 36 : Mesure de l'espace entre ailerons

Remettre ensuite la feuille en place sur la bouteille en alignant le premier bord de feuille sur le tracé de la position du premier aileron et reporter les emplacements des autres ailerons sur la bouteille. A l'aide de la cornière, compléter le trait d'emplanture pour chaque aileron.

**Maintenant, il s'agit de coller les ailerons sur la bouteille ou la jupe.**

D'abord quelle colle choisir ?

Peu de colles sont vraiment efficaces sur le PET.

Les colles polyuréthane (Sikaflex 11 FC par exemple) adhèrent assez bien, malheureusement elles ont un temps de prise assez long, nécessitant tout un montage pour maintenir les ailerons en place sur la fusée pendant le séchage. Par ailleurs, elles sont chères et peu recommandées pour la santé.

Les cyanoacrylates (genre Super – glue), si elles n'offrent pas une adhérence équivalente, ont le mérite d'avoir un temps de prise très court.

Les colles au néoprène ont un pouvoir adhésif correct et une prise rapide. Elles constituent sans doute un des meilleurs compromis.

Les colles époxy ont aussi un pouvoir adhésif correct, mais les temps de prise sont longs. Il existe depuis quelque temps des colles époxy « rapide », mais le temps de prise est quand même de quelques minutes de plus il semble que leur pouvoir adhésif ne soit pas aussi bon que les autres.

Les pistocolles, A NE JAMAIS UTILISER SUR UN RESERVOIR. La colle chaude déforme le PET et peut même faire des trous, donc à proscrire absolument sur les parties qui seront sous pression. On peut les utiliser pour coller les ailerons (s'ils ne sont pas en PET) sur une jupe, avant de placer celle-ci sur le réservoir.

Quelle que soit la colle choisie, il faudra prendre la précaution de passer un petit coup de papier de verre sur les parties à encoller et bien les dégraisser.

La méthode de maintien des ailerons pendant le collage, va dépendre de la colle bien sûr. Pour les pistocolles, les colles au néoprène et les cyanoacrylates qui ont des prises rapides, il suffira de maintenir fermement, à la main, l'aileron sur le support pendant quelques secondes. Pour les colles à prise lente, il faudra réaliser un montage pour maintenir le corps (ou la jupe) et les ailerons en place.

Ci-dessous, un montage réalisé avec des cartons d'emballage



Figure 37 : Une méthode de collage d'ailerons



Figure 38 : Une autre méthode ...

Un autre montage en bois qui ne permet de coller qu'un aileron à la fois.

### Cône

Le cône le plus simple consiste à utiliser le haut d'une bouteille. Mais la partie goulot + bouchon n'est pas très aérodynamique et on peut améliorer un peu les choses, notamment en plaçant dessus un « surcône ». Les plus hardis, se risqueront à découper le goulot, à la scie à métaux parce qu'à ce niveau là, le plastique est épais et ne peut pas se couper avec un cutter. Le goulot enlevé ou non, , il faut disposer sur le cône principal, le petit cône que l'on peut réaliser en balsa tourné sur une perceuse, ou du carton fort ou du PET. Dans ces deux derniers cas, il faut connaître le rayon  $r$  de la base et la hauteur de ce petit cône ou l'angle  $\alpha$  entre les génératrices du cône et le plan de la base. Dans ce cas, on peut calculer  $a = r/\cos(\alpha)$  ou  $=\sqrt{r^2+h^2}$ , qui sera le rayon minimum (il faut mettre quelques millimètres de plus pour coller le mini cône sur le grand cône) du secteur de cercle à découper. L'angle  $\beta$  de ce secteur sera  $\beta=360*\cos(\alpha)$  en degré (figure ci-dessous).

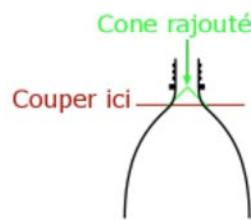
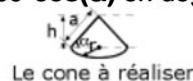


Figure 39 : Réalisation d'un cône

Une autre méthode de réalisation de cône (entier ou partiel comme ci-dessus) consiste à utiliser du

papier journal enduit de colle à tapisserie. Il faut cependant un moule si possible externe. Par exemple on peut prendre un cône réalisé comme précédemment qui sera utilisé comme moule. À l'intérieur, on passe un peu de vaseline (pour le démoulage) puis on dispose des lamelles de papier journal découpées à la main (donc irrégulières) et badigeonnées de colle à tapisserie jusqu'à couvrir toute la surface du moule. On recommence la même opération pour une deuxième couche, puis éventuellement une troisième, voire une quatrième... Mais attention à l'épaisseur et au poids. Moyennant la réalisation d'un moule, on peut ainsi réaliser des cônes de toutes formes et toutes dimensions.



Figure 40 : Différents cônes

## Les bases de lancement

### ***Les fonctions d'une base de lancement***

Les bases de lancement remplissent plusieurs fonctions dont certaines sont incontournables et d'autres seulement utiles.

#### ***Mise en pression***

Cette fonction est essentielle, il s'agit en effet de mettre le réservoir de la fusée sous pression en pouvant contrôler celle-ci et en toute sécurité.

#### ***Maintien lors de la mise en pression***

Autre fonction essentielle, puisqu'il faut bien maintenir la fusée au sol (sur la base) tant que la pression désirée n'est pas atteinte, sans que l'eau ou l'air comprimé ne s'en aille. Il s'agit aussi de pouvoir libérer la fusée, si possible à un moment choisi et en toute sécurité.

#### ***Remplissage***

Bien que non indispensable, cette fonction est cependant fort confortable. Il n'est pas très simple de mettre la fusée déjà remplie d'eau sur la base

#### ***Guidage***

Au décollage une fusée ne pourra bénéficier de l'action de ses ailerons qu'à partir d'une vitesse suffisante, il est donc prudent de la guider jusqu'à ce qu'elle atteigne cette vitesse critique. Nous avons vu au chapitre stabilité que les fusées à eau ne sont pas stables au décollage du fait de leur centre de gravité bas, même si la durée de la phase propulsion est faible, cette fonction de guidage n'est pas inutile.

Il est également intéressant de pouvoir diriger la fusée dans une direction choisie de façon à privilégier une zone d'atterrissement sécurisée.

## ***Quelques systèmes existants***

### ***Mise en pression***

On distinguera deux problèmes à résoudre dans ce cadre :

Le dispositif d'étanchéité qui évitera toute fuite entre la base et la fusée, puis le dispositif qui fournira la pression.

Quatre dispositifs d'étanchéité se rencontrent fréquemment :

- Le bouchon en liège ou mieux en caoutchouc (comme ceux que l'on trouve dans les labos de chimie), qui sont percés en leur centre pour laisser passer le tuyau de remplissage en eau ou en air comprimé.
- Le joint torique, placé dans une gorge ménagée dans le tuyau rigide d'alimentation en air ou en eau.
- Le joint caoutchouc plat, du diamètre d'un goulot de bouteille sur lequel la bouteille est maintenue fortement appuyée.
- Le bouchon de bouteille d'Orangina percé en son centre d'un trou de diamètre 20 mm, associé à un tube de lanceur de même diamètre.



Figure 41 : Étanchéité à l'aide d'un bouchon à collerette

Parmi les dispositifs capables de fournir la pression, on trouve :

- Le système le plus simple et le plus sûr est la **pompe à vélo**. On la choisira si possible à pied et munie d'un manomètre. Il sera prudent de prévoir une rallonge de tuyau de façon à mettre en pression à bonne distance.
- Il existe des petits compresseurs électriques fonctionnant en 12v qui peuvent monter théoriquement jusqu'à 10 bars. Il faudra alors prévoir une soupape de sécurité limitant la pression à une valeur plus raisonnable (5 ou 6 bars).
- Certains amateurs éminents utilisent des bonbonnes de gaz sous pression (extincteur CO2 ou bouteille de plongée) avec des détendeurs qui ramènent la pression à des valeurs compatibles avec les fusées à eau. Ce genre d'équipement ne se justifie que pour des amateurs très « éclairés ». Ils doivent être impérativement accompagnés de dispositifs de sécurité limiteur de pression. Par ailleurs le budget nécessaire est très nettement supérieur au précédentes solutions.

### **Maintien lors de la mise en pression**

Il s'agit de maintenir la fusée sur la base jusqu'à son lancement. De nombreux systèmes ont été imaginés pour cette fonction et nous ne serons probablement pas exhaustifs dans les descriptions qui suivent en allant du plus simple au plus compliqué :

- Le bouchon en liège ou en caoutchouc, déjà vu précédemment, assure à la fois l'étanchéité et la retenue, par le frottement. C'est extra simple, mais on ne peut pas garantir à quelle pression la fusée partira, ni quand
- La fourchette ou clé. Pour maîtriser le moment du départ de la fusée, on peut rajouter sur la base, 4 pitons dans lesquels coulissera un U métallique (appelé soit la fourchette soit la clé) comme ci-dessous. Ce système était décrit sur le site d'Hervé Brégent (ce site à malheureusement disparu) est très simple et peu coûteux. La figure ci-dessous est tirée de ce site.

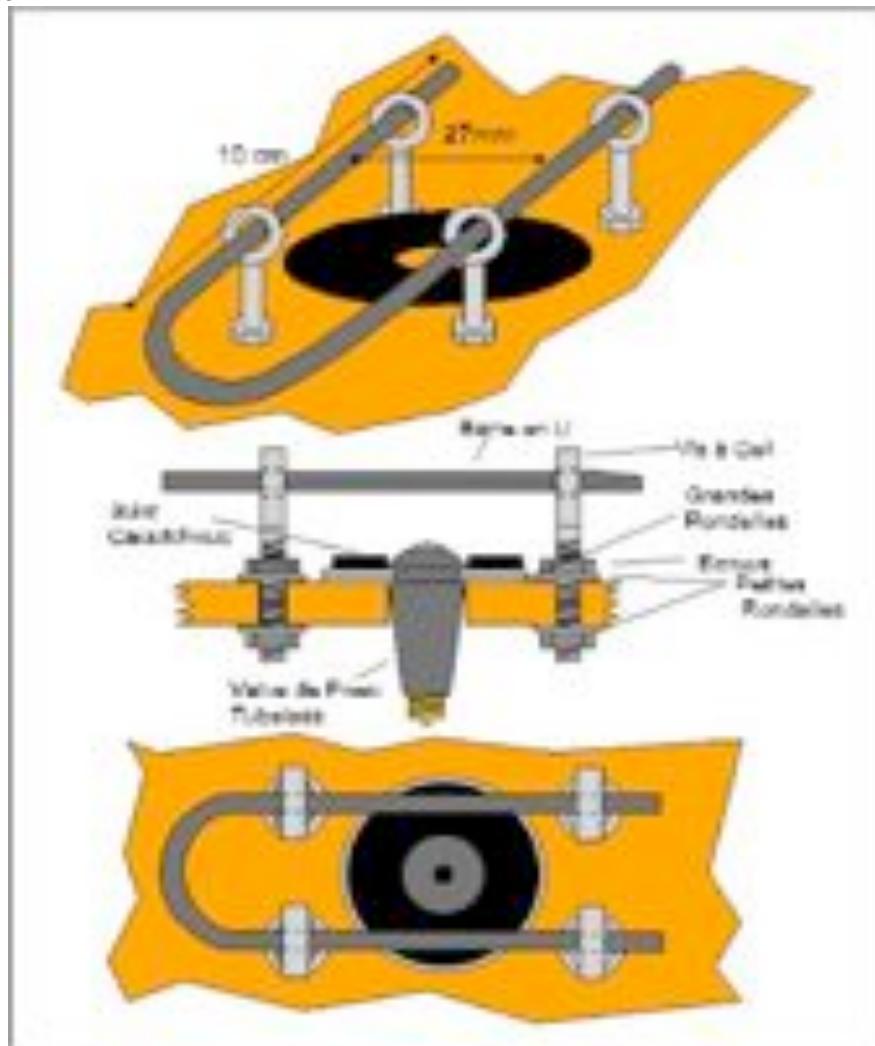


Figure 42 : Système de maintien par fourchette

- L'ergot rotatif

Sur un axe parallèle au tube du lanceur, un ergot vient se positionner sur la collerette de la bouteille. En faisant pivoter l'axe, l'ergot ne chevauche plus la collerette et libère ainsi la fusée. Dans la pratique, il sera plus prudent de mettre 2 ergots disposés de façon symétrique pour éviter que la bouteille ne se mette de travers sous l'effet des forces de pression et crée ainsi une fuite ou un départ inopportun.

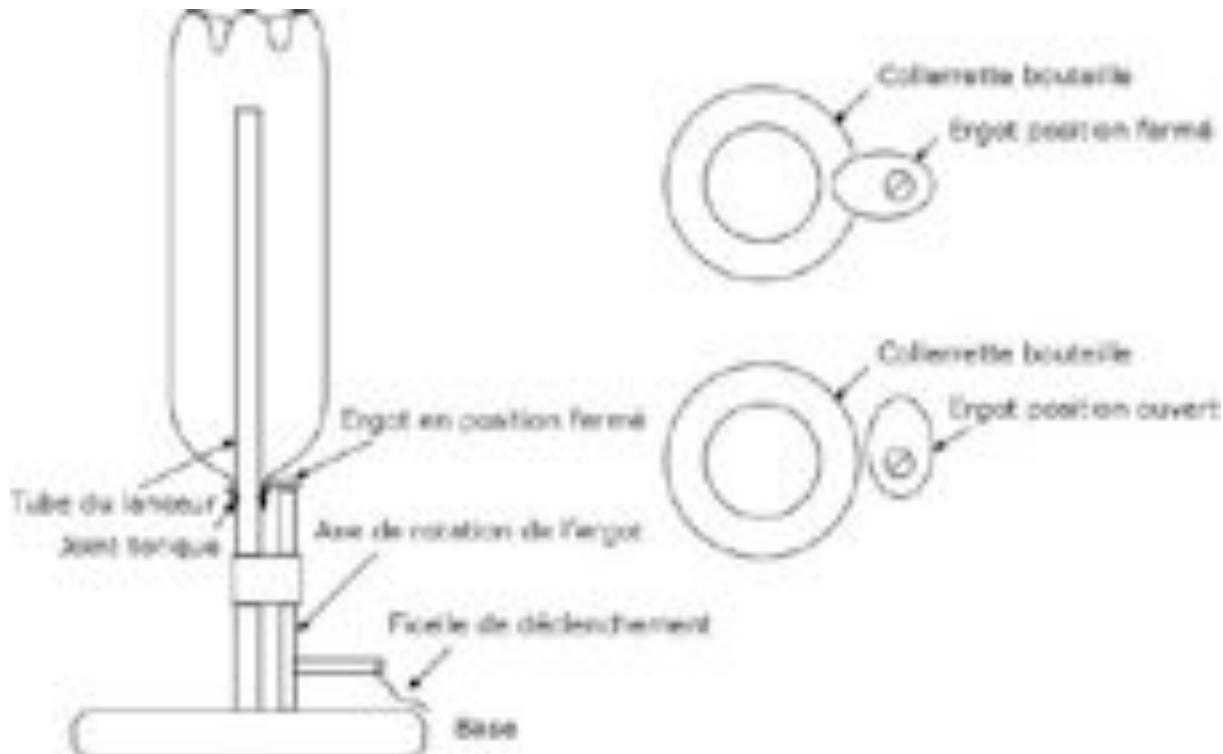


Figure 43 : Système de retenue à ergots rotatifs

- Le système « Raccord rapide de tuyau d'arrosage », comme son nom l'indique il utilise sur la fusée un embout mâle de raccord de tuyau de jardin de type « Raccord rapide de tuyau d'arrosage » qui constitue donc la tuyère, tandis que l'embout femelle est utilisé comme système de retenue.

C'est ce système qui est utilisé sur la rampe « Lanoë » ci dessous et largement décrit dans le livre « Construisez et lancez des fusées à eau » d'Ivan Lanoë Edition Dunod ISBN : 2 10 006988 8.



Figure 44 : Lanceur type Lanoë

- Le « Clark Cable Tie » dont le nom vient de son inventeur : Ian Clark (<http://www.smoke.com.au/~ic/water-rocket.html>) et du fait que son système de retenue est basé sur l'utilisation de collier Colson (cable Tie en anglais). C'est en fait le même principe que les raccords rapides de jardin type « Raccord rapide de tuyau d'arrosage ». En effet, l'étanchéité est assurée par un joint torique logé dans une rainure sur le tube guide de la base, la retenue se fait par les têtes des colliers disposés en faisceau autour de la collerette du goulot de bouteille et maintenues serrées contre la collerette par un manchon. Pour libérer la fusée, il suffit de tirer le manchon vers le bas.

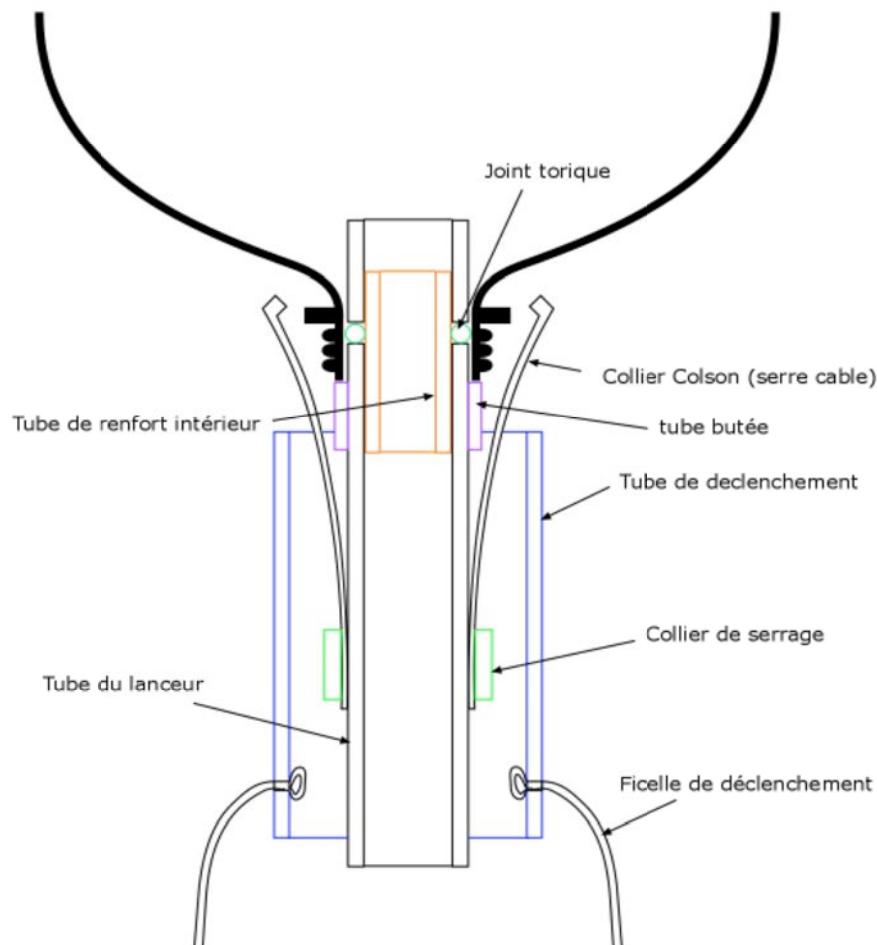


Figure 45 : Principe du Clark Cable Tie

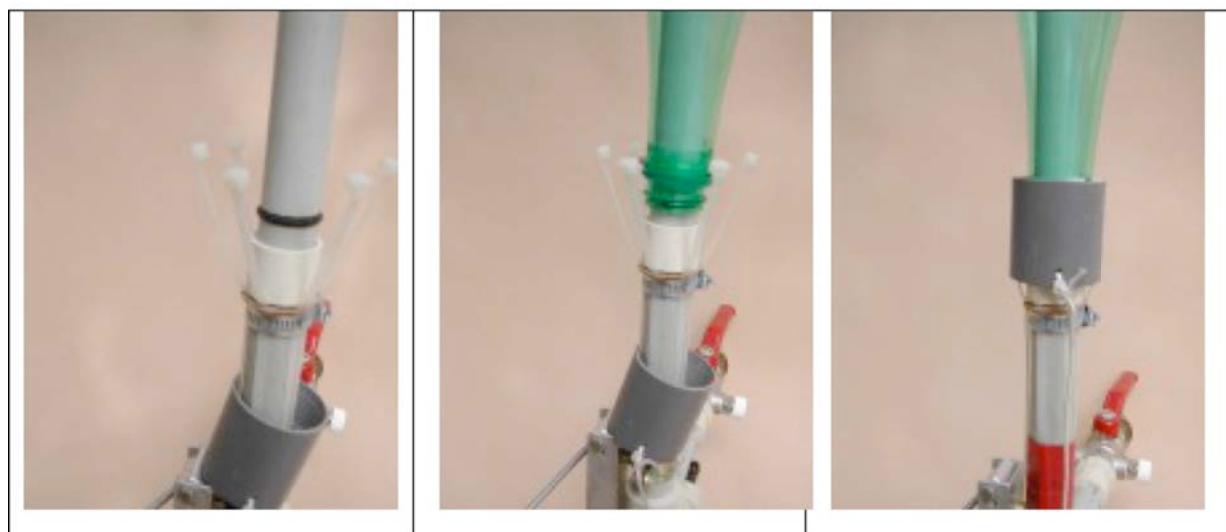


Figure 46 : Un lanceur avec Clark Cable Tie ouvert et fermé

## Remplissage

Pour mettre l'eau dans la bouteille, soit on la remplit avant de la mettre sur le lanceur et, dans ce cas, ça devient assez sportif pour mettre la fusée sur le lanceur sans perdre toute l'eau que l'on vient de mettre. Seule solution viable, c'est de mettre la fusée à l'envers (comme pour la remplir), de renverser le lanceur et le mettre sur la fusée. Puis redresser le tout et remettre en place tout le dispositif.

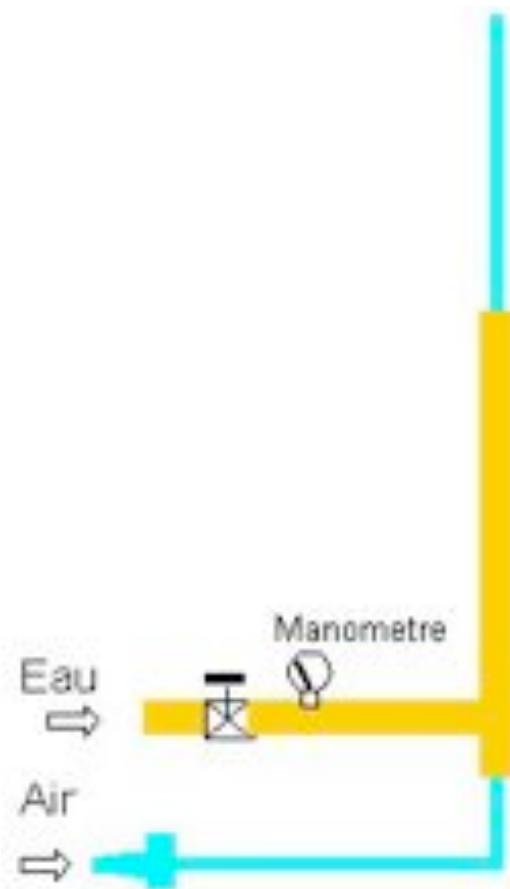
C'est un peu lourd (au propre comme au figuré), aussi la fonction de remplissage sur rampe devient vite indispensable.

Cette fonction est simple à réaliser si nous disposons d'un tuyau d'eau sous pression à proximité. En effet, l'eau distribuée l'est à une pression supérieure à 4 bars, ce qui est suffisant.

Mais si cette eau sous pression n'est pas disponible, le problème se corse un peu dans la mesure où lorsqu'on remplit la fusée d'eau, la pression de l'air augmente dans la bouteille (Le volume qui lui est alloué diminue alors que la quantité d'air est la même). Donc soit on s'arrange pour laisser l'air s'échapper (mais pas l'eau), soit on envoie de l'eau sous pression.

Pour laisser l'air s'échapper, on peut jouer sur le fait que la bouteille n'étant jamais remplie d'eau, on peut donc mettre un double tube comme le montre le schéma ci-après.

Figure 47 : Principe d'un lanceur à double tube pour remplissage sur rampe



Mais cette solution est assez compliquée à réaliser, de plus elle ne permet pas facilement de lancer des bouteilles de différents volumes.

Pour faire entrer l'eau sous pression, il suffit d'utiliser un pulvérisateur de jardin. C'est un réservoir dans lequel on met de l'eau, puis que l'on met en pression à l'aide d'une pompe à main incorporée. Un tuyau en sort au bout duquel se trouve une gâchette puis un filetage destiné normalement à visser une lance de pulvérisation. Il suffit de remplacer cette lance par un morceau de tuyau d'arrosage muni d'un côté d'un raccord à vis compatible avec celui du pulvérisateur et de l'autre un raccord rapide (type Raccord rapide de tuyau d'arrosage) pour se connecter au lanceur.



Figure 48 : Base de lancement complète avec lanceur, pompe à vélo, remplisseur d'eau

## Guidage

Le guidage peut être réalisé soit à l'extérieur, soit à l'intérieur de la fusée.

À l'intérieur de la fusée, on utilise le tube de remplissage/mise en pression que l'on réalise d'une longueur suffisante pour pénétrer sur toute la longueur de la fusée. Cette solution présente deux avantages, elle est facile à réaliser puisqu'il suffit de prévoir un tube assez long et on bénéficie de l'effet « piston » (Tant que la fusée se déplace le long du tube, on ne perd presque rien en pression interne et en eau, c'est la pression exercée sur le sommet du tube qui donne la poussée).

À l'extérieur, on peut imaginer pas mal de solution, des plus simples aux plus complexes. La plus simple étant du genre de ce qui est réalisé avec les micro-fusées, à savoir une tige métallique constitue la partie fixe sur laquelle coulissent deux petits tubes (genre paille en plastique) collés sur la fusée. C'est simple et ça peut s'adapter facilement à toutes les tailles de fusée.

On peut ensuite compliquer les choses en mettant des rails de guidage (3 ou 4), façon rampes de lancement du CNES comme celle ci-dessous.



Figure 49 : Rampe CNES pour Fusex

## Sécurité

Premier équipement de sécurité indispensable, la possibilité de fixer la base solidement au sol pour éviter qu'en tirant la ficelle de « mise à feu » la rampe ne se renverse et libère la fusée en direction du public.

Deuxième équipement souhaitable, une soupape de sécurité qui empêche la pression de monter au-delà d'un seuil défini (5 bars pour un public jeune paraît une bonne valeur).

Enfin, un dispositif de dépressurisation sur rampe est souhaitable. Ce peut être un simple robinet (par exemple celui de remplissage d'eau). En effet, il arrive que la fusée refuse de décoller, il est alors préférable de la dépressuriser avant toute autre intervention.

## Description de deux modèles simples de base de lancement

Ce n'est pas dans les pratiques habituelles de Planète Sciences de diffuser un plan tout fait pour une reproduction possible en série. Cependant, des schémas avaient le mérite d'exister et cette rampe fabriquée il y a de cela quelques années, est encore utilisée de nos jours, ce qui prouve sa résistance. Si vous êtes donc pressés, utilisez ces schémas, mais n'hésitez pas, lorsque vous aurez plus de temps à y apporter des améliorations, voire à construire votre propre base de lancement qui satisfasse tous vos besoins.

### **La rampe Planète Science**

Cette rampe utilise un bouchon de caoutchouc comme dispositif d'étanchéité et de retenue pendant la mise en pression. Il n'y a pas de remplissage en eau sur rampe, ni de guidage, mais surtout pas de dispositif de maintien sûr. Mais elle a l'avantage d'être simple, robuste et bon marché.

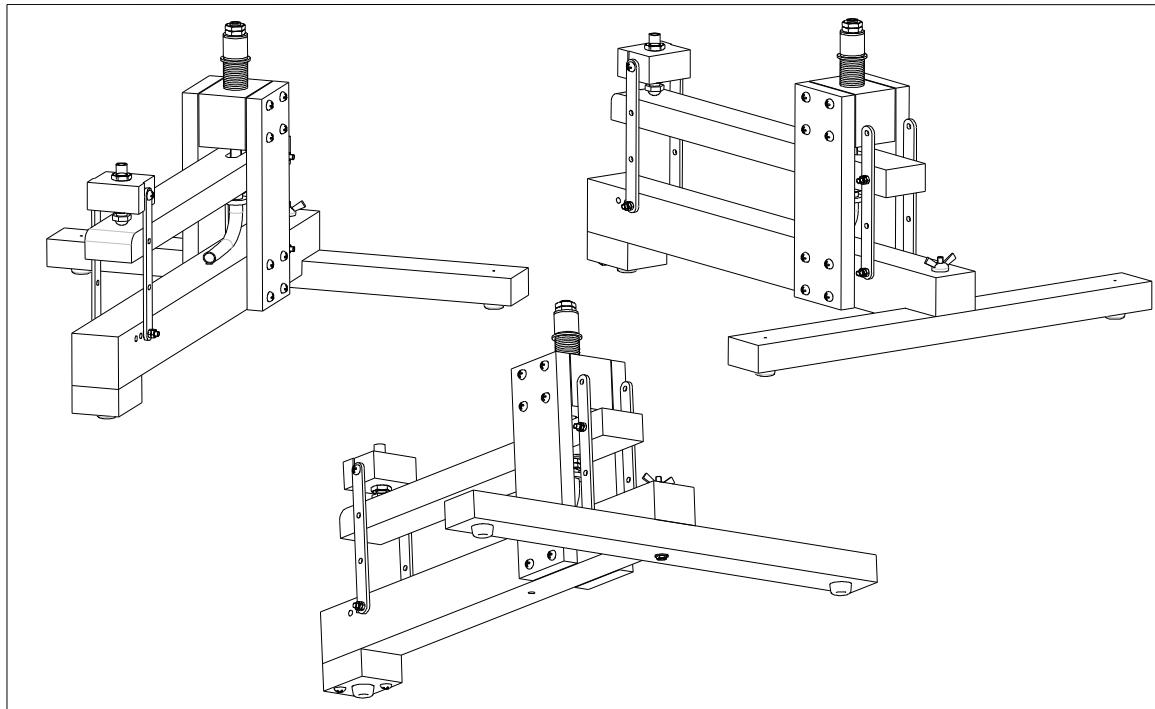


Figure 50 : la rampe Planète Sciences

#### **Les plans d'ensemble :**

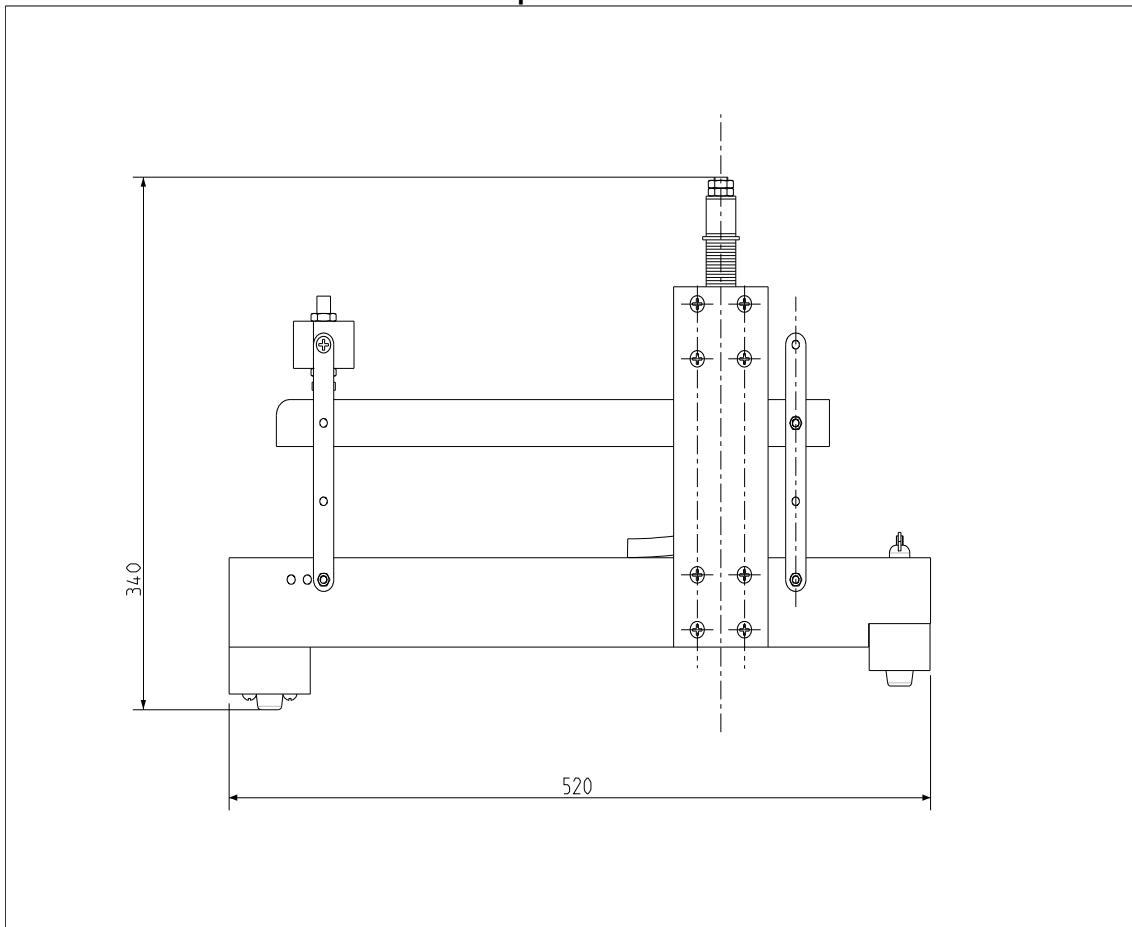


Figure 51 : Vue de profil

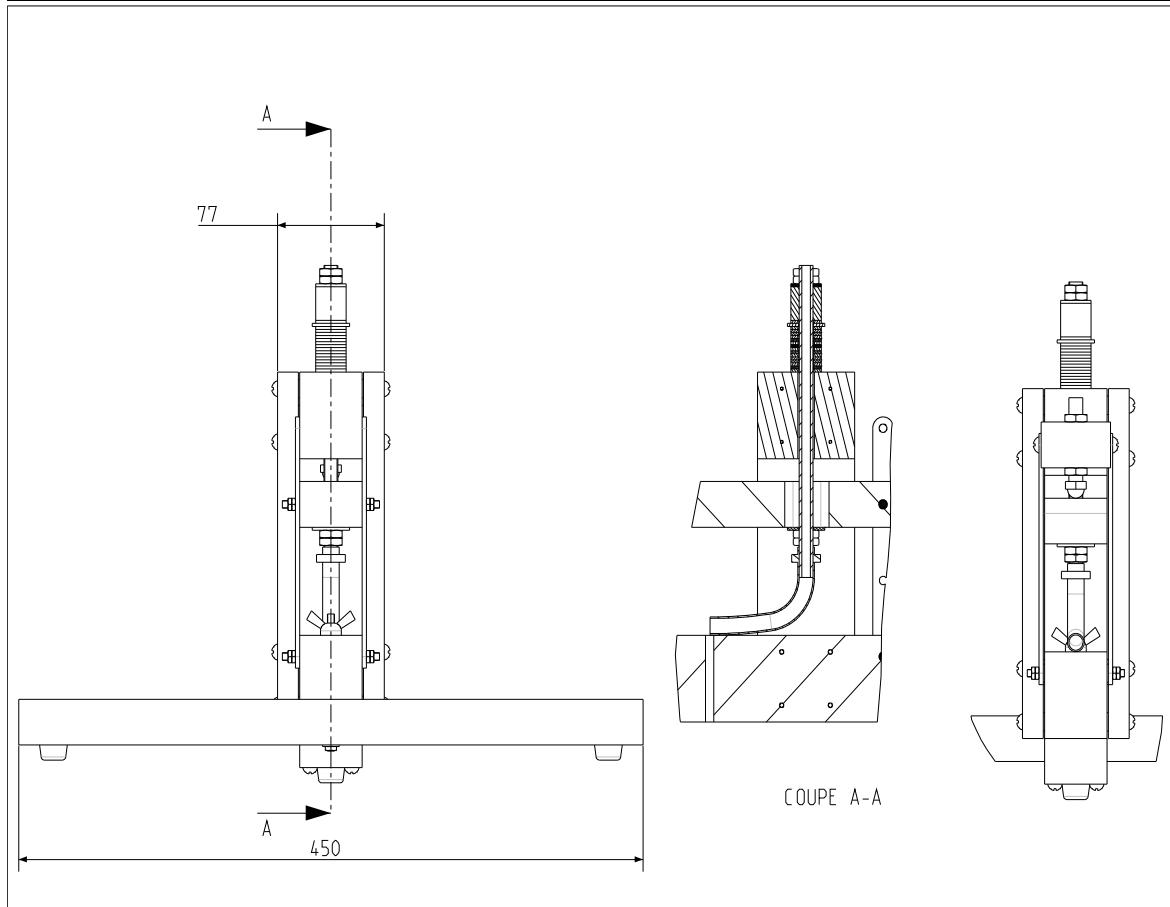


Figure 52 : Vue de face – coupe au niveau du mécanisme – Vue arrière

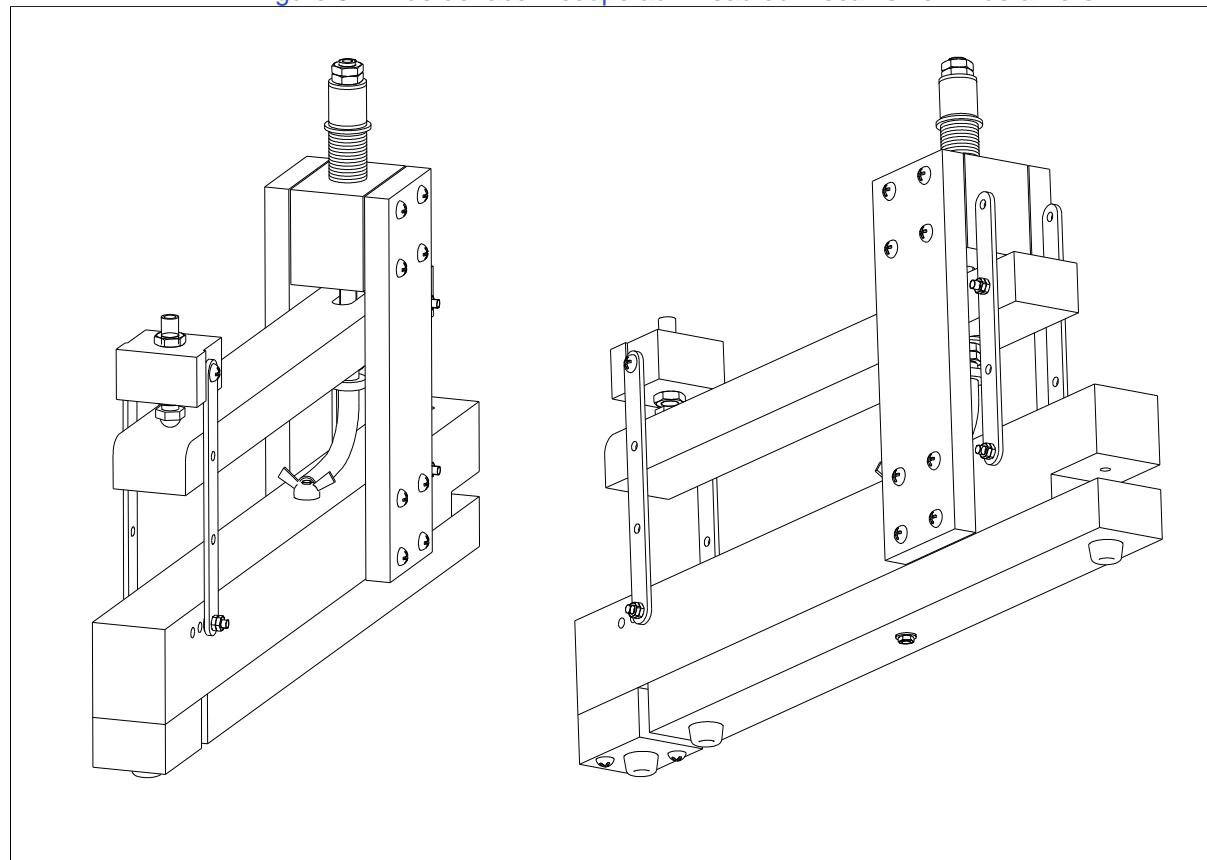


Figure 53 : Rampe repliée pour le transport

### Nomenclature de la rampe

NOM	REP	Qté	REFERENCE	OBSERVATIONS
LONGERON	1	1		TASSEAU BOIS 45x57
SOCLE ARRIERE	2	1		TASSEAU BOIS 30x45
TRAVERSE	3	1		TASSEAU BOIS 30x45
AXE DE TRAVERSE	4	1		TIGE FILETTEE M5 L75
LEVIER	5	1		TASSEAU BOIS 30x45
SOCLE DE LANCEMENT	6	1		TASSEAU BOIS 45x57
TUBE D'INJECTION	7	1		TUBULURE ACIER 10x1 L200
TUYAU D'ALIMENTATION	8	1		TUYAU D'ARROSAGE
MONTANT	9	2		CONTREPLAQUE EPAISSEUR 15
BLOQUE-LEVIER	10	1		TASSEAU BOIS 30x45
AXE DE REGLAGE	11	1		TIGE FILETTEE M10 L80
AXE DE ROTATION	12	3		TIGE FILETTEE M5 L75
ECROU A OREILLES	100	1	ECROU O M12	(OU ECROU PAPILLON)
RONDELLE PLATE 1	101	18	RONDELLE M D5	
VIS A BOIS 1	102	2	VIS A BOIS CRUCIFORME D5x60	
BUTEE	103	3		
VIS A BOIS 2	104	3	VIS A BOIS CRUCIFORME D3x20	
ECROU 1	105	13	ECROU (BAS) HM M5	
ECROU 2	106	6	ECROU (BAS) HM M10	
RONDELLE PLATE 2	107	17	RONDELLE M D10	
CAOUTCHOUC DE PREHENSION	108	1		ADAPTATEUR CAOUTCHOUC M10
RONDELLE PLATE 3	109	2	RONDELLE L D10	
SERFLEX	110	2		
VIS A BOIS 3	111	16	VIS A BOIS CRUCIFORME D5x40	
VIS A BOIS 4	112	2	VIS A BOIS CRUCIFORME D5x20	
ECROU BORGNE	113	1	ECROU BORGNE M10	
PATTE D'ASSEMBLAGE	114	4		PATTE D'ASSEMBLAGE L200

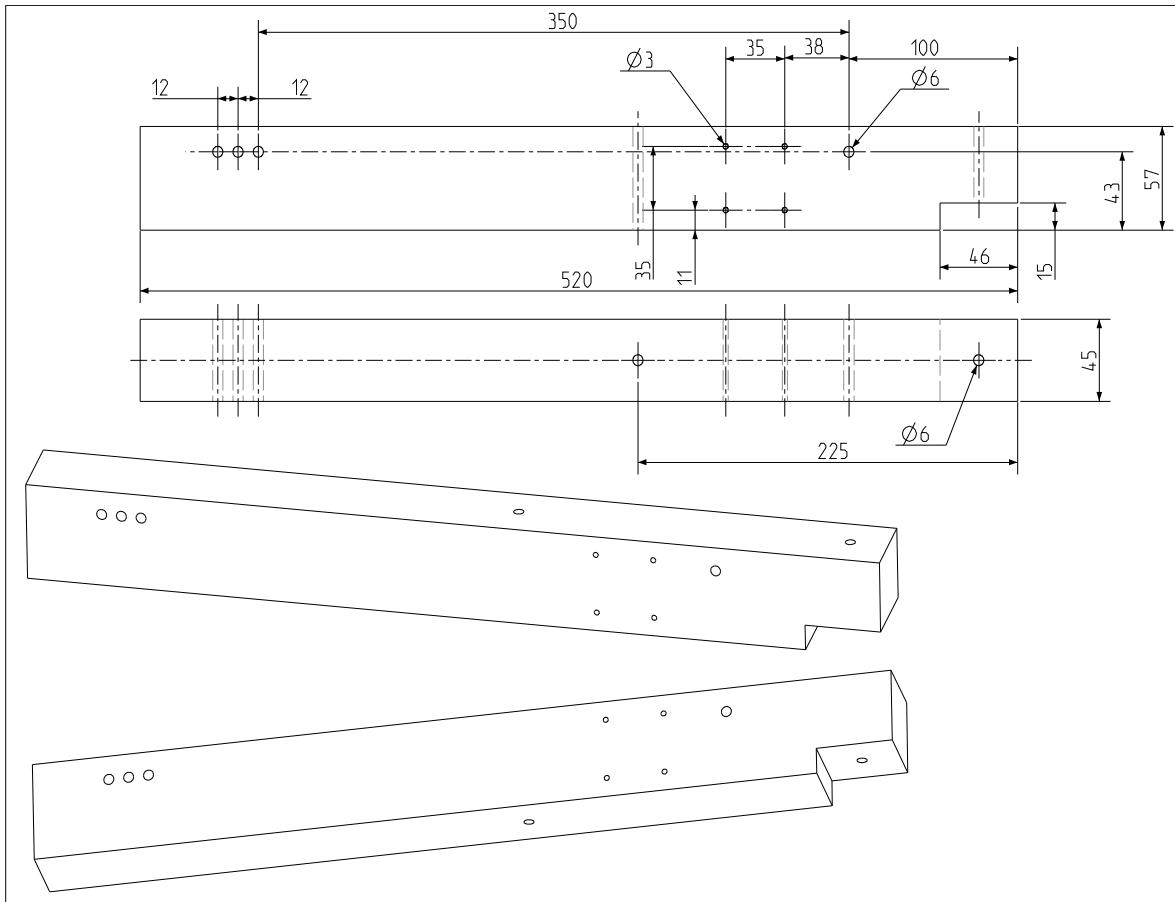


Figure 54 : Détail Longerons

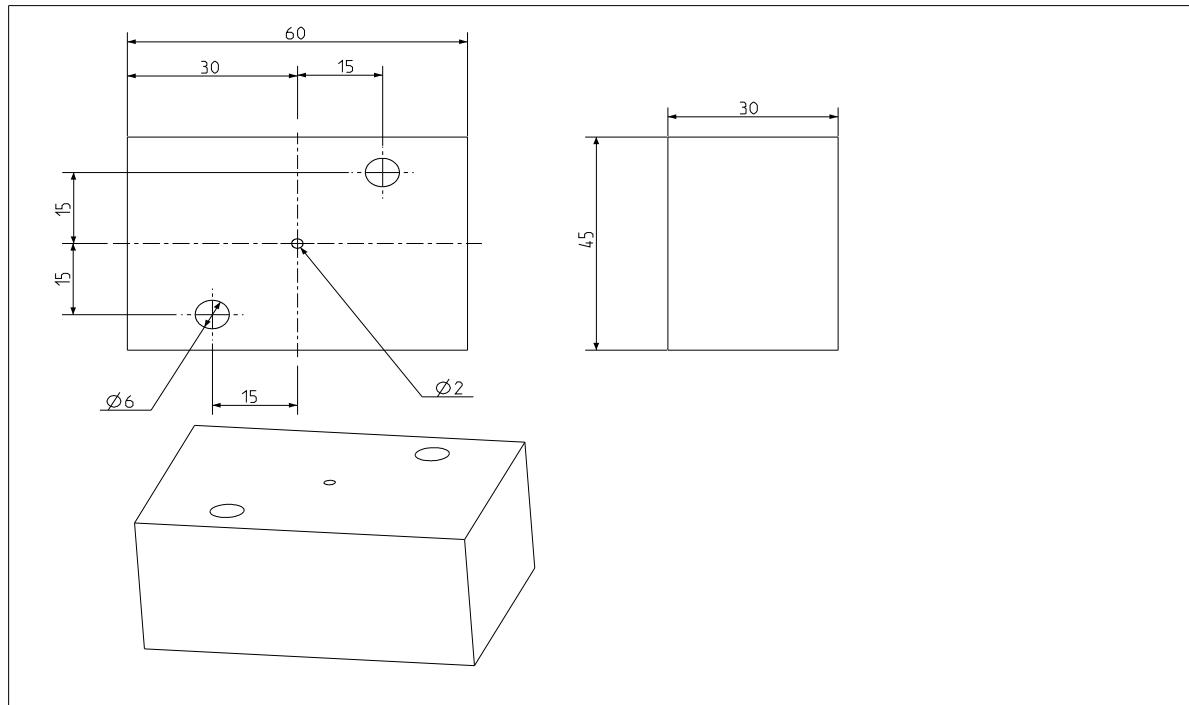


Figure 55 : Le socle arrière

Pour conclure, cette rampe n'est pas forcément très simple à réaliser, mais elle a l'avantage d'être très résistante.

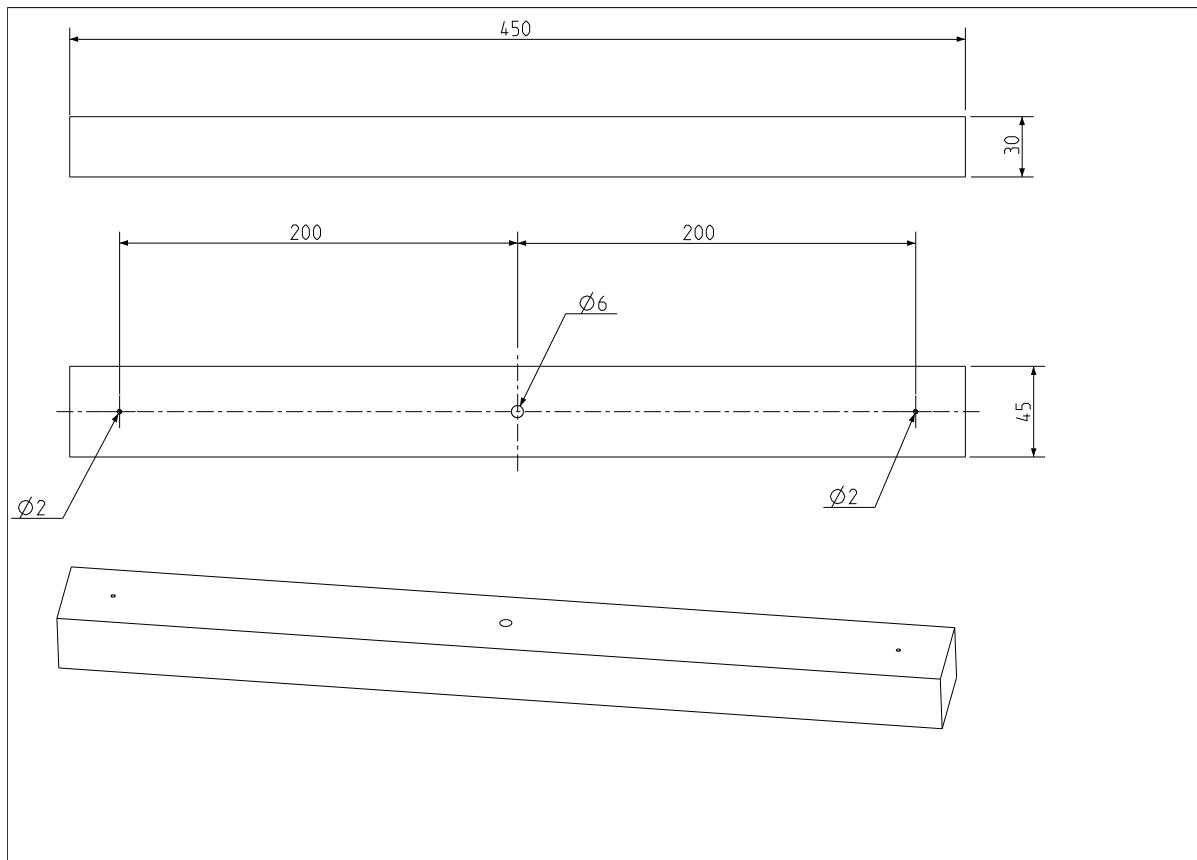


Figure 56 : Traverse

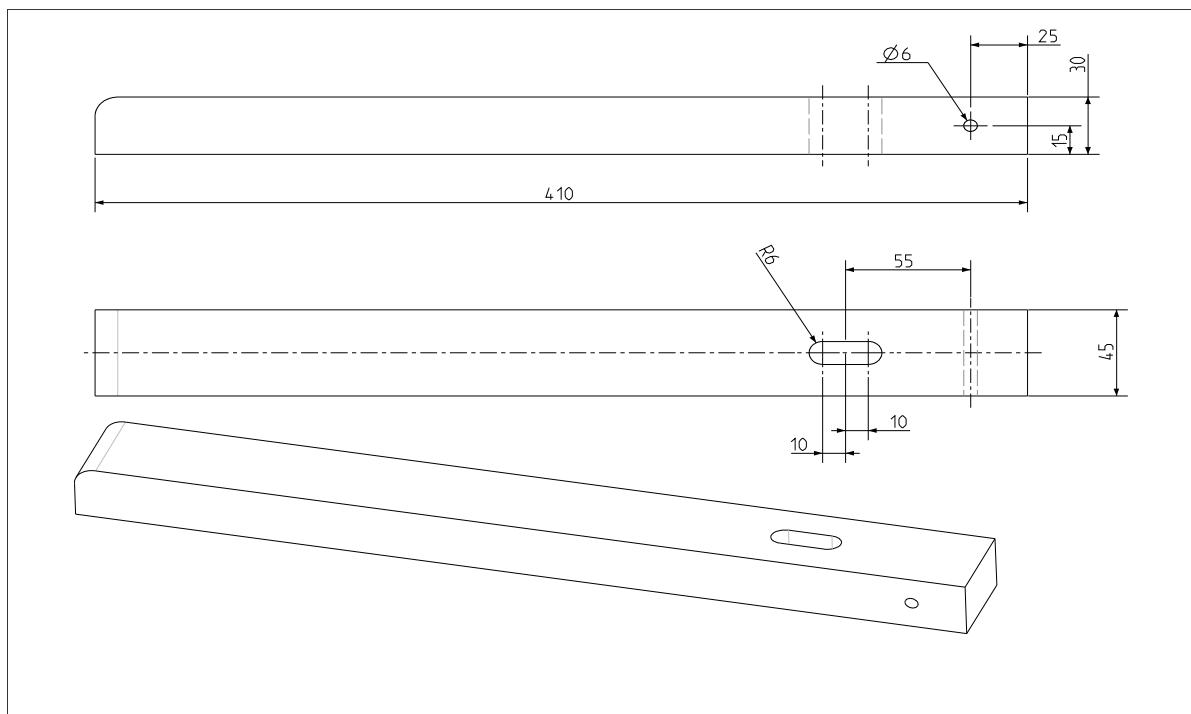


Figure 57 : Le levier

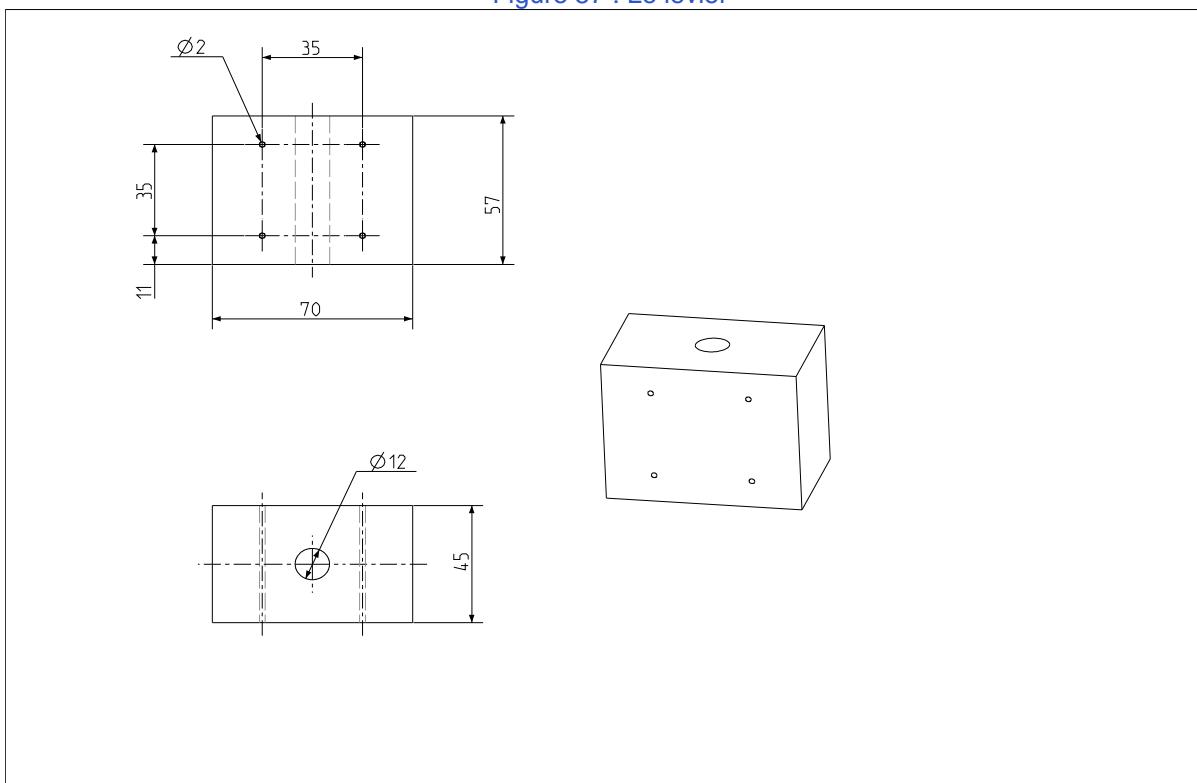


Figure 58 : Socle de lancement

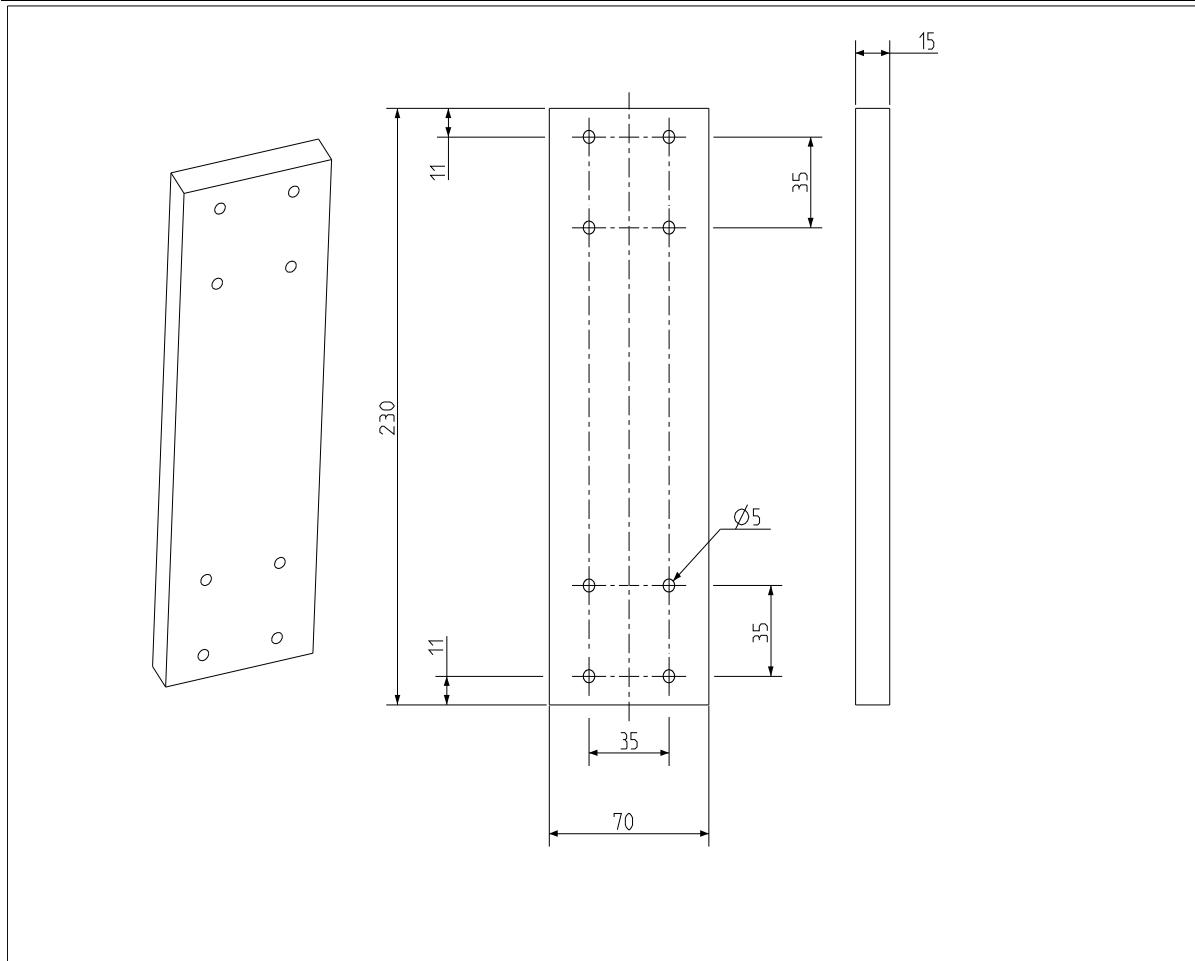


Figure 59 : Montants

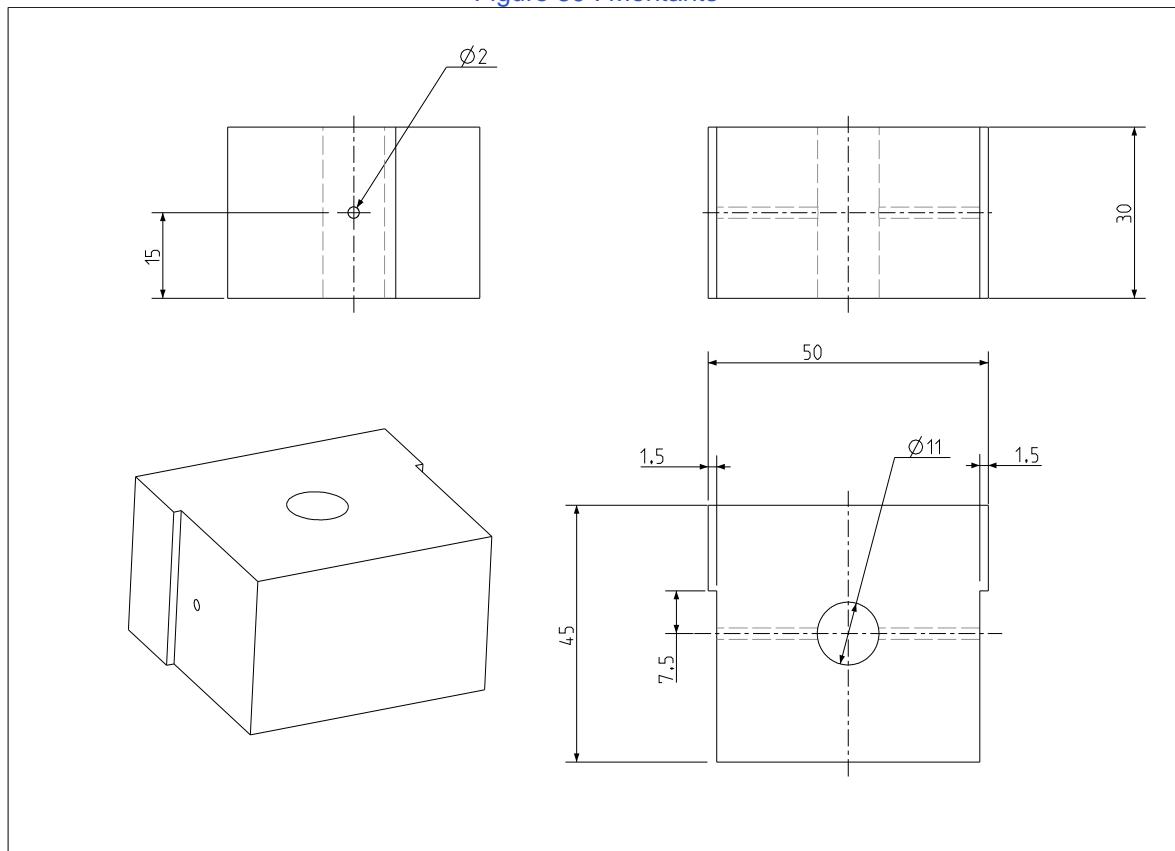


Figure 60 : Bloc levier

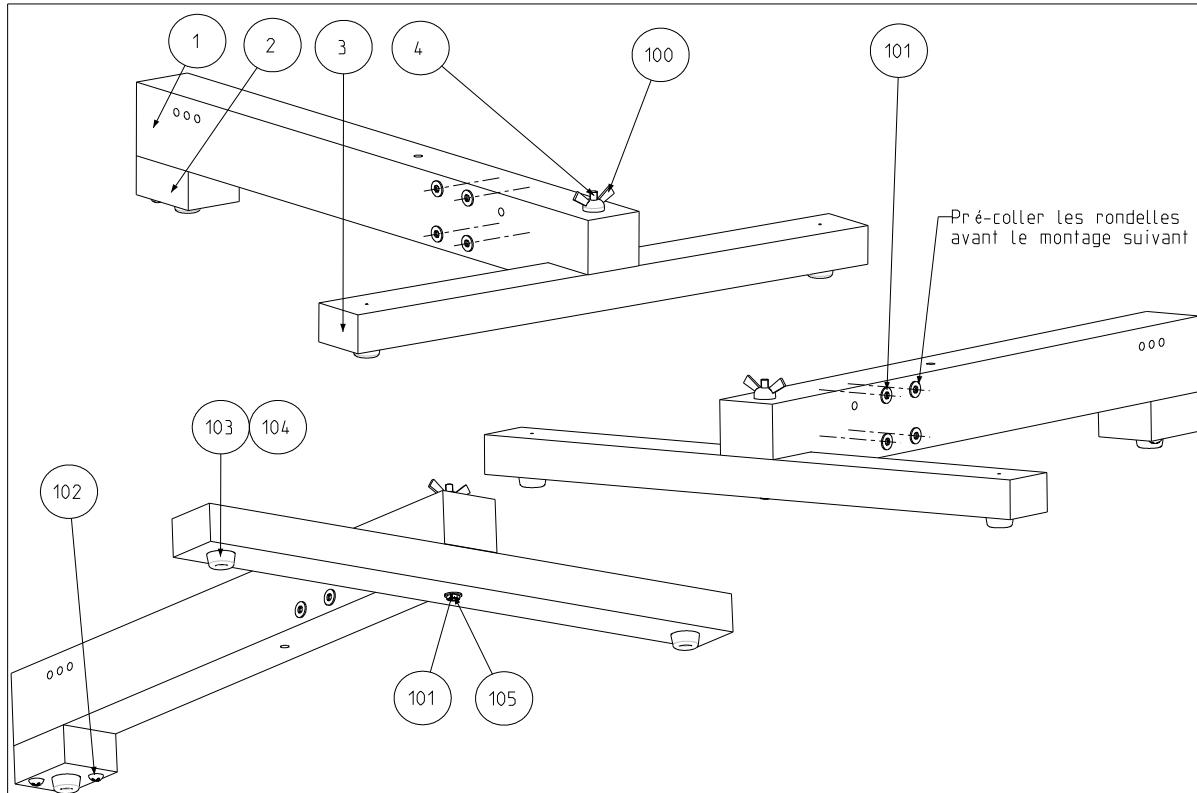


Figure 61 : Assemblage du socle

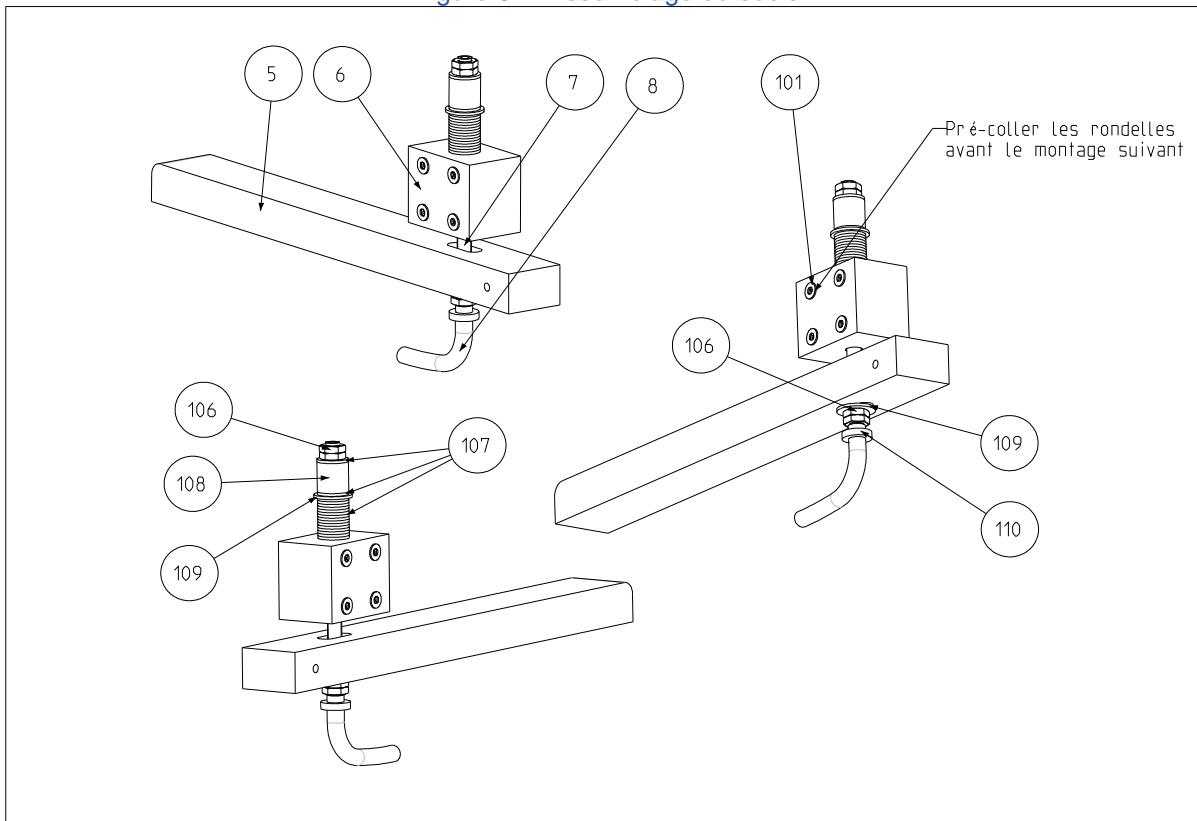


Figure 62 : Assemblage du « mécanisme »

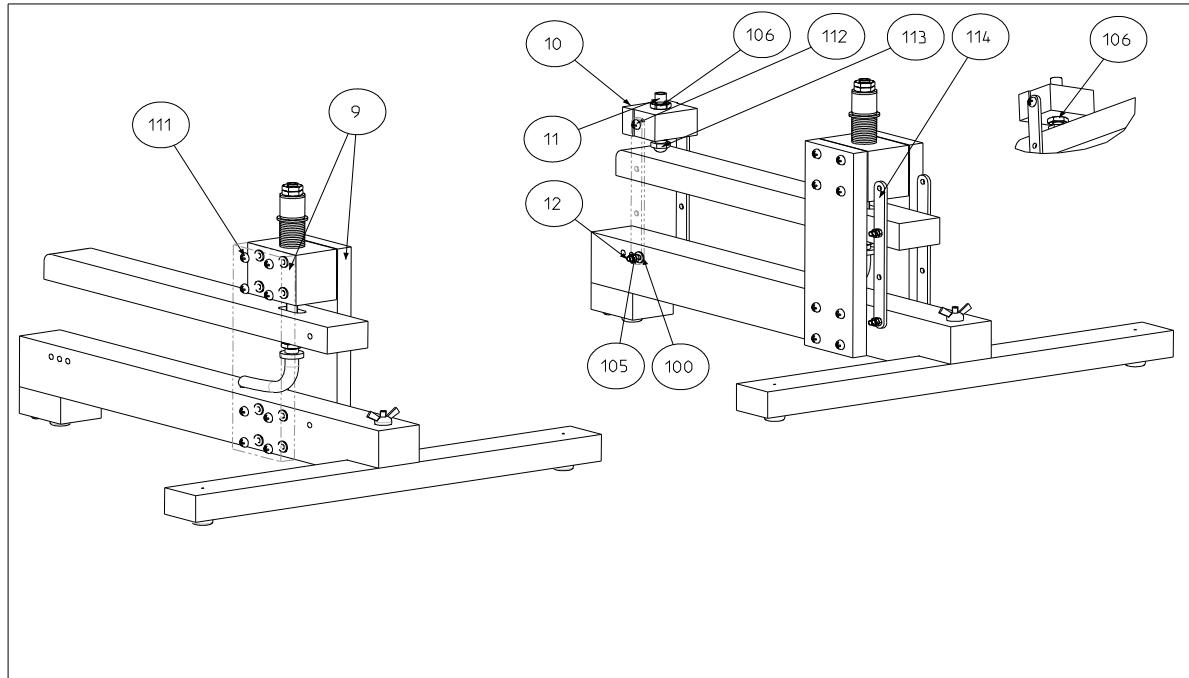


Figure 63 : Assemblage final

## Les systèmes de récupération

Lorsque vous maîtriserez la construction de fusées à eau de plus en plus performantes, vous serez vite lassé de voir vos belles réalisations détruites après leur premier vol à cause d'un retour brutal au sol. Tout naturellement vous vous lancerez dans la conception d'un système de récupération. Pour vous y aider, voici quelques pistes.

### **Le parachute posé sur le cône**

Difficile de faire plus simple, mais performance de la fusée très dégradée.



Figure 64 : Le parachute sur le cône

On peut améliorer le système en mettant un cône juste posé au-dessus du parachute. Le risque alors est que le cône ne tombe pas à culmination. À cela plusieurs raisons :

- La vitesse de la fusée à culmination est non nulle, en effet la fusée décrit une trajectoire parabolique et à la culmination elle a une direction parallèle au plan de la terre et sa vitesse n'est pas nulle, même si la composante verticale de cette vitesse l'est en effet.
- Sous l'effet de l'accélération au départ, le cône s'enfonce sur la fusée et se coince définitivement (oui définitivement parce que son arrivée au sol ne va pas arranger les choses ☺)

Pour avoir une chance de réussite, 2 précautions sont indispensables (mais hélas pas forcément suffisantes) :

- Lancer le plus verticalement possible pour que la vitesse de la fusée à l'apogée soit la plus faible possible
- Placer au sommet de la fusée, juste sous le cône, une bande de plastique qui empêchera le cône de s'enfoncer, comme le montre le schéma ci-dessous. Quand on retourne la fusée, le cône doit tomber instantanément.

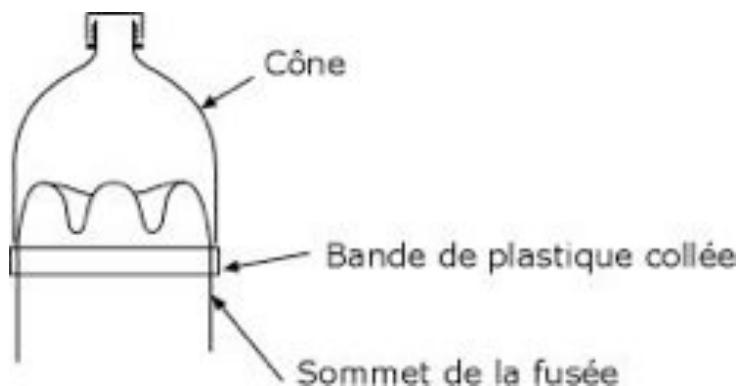


Figure 65 : Le parachute dans le cône

## Le volet aérodynamique

C'est la méthode qui semble la plus utilisée de par le monde. Elle n'est pas très compliquée à réaliser tout en étant assez fiable. Elle nécessite toutefois un peu d'expérience et pas mal de soin dans la réalisation pour avoir une fiabilité suffisante.

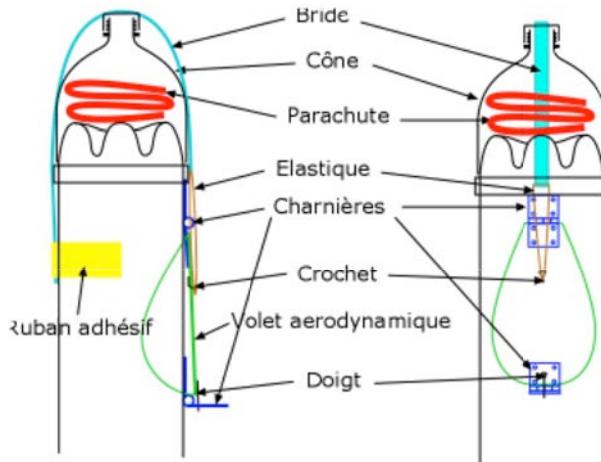


Figure 66 : Récupération par volet aérodynamique

Le principe, que l'on doit à Dave Johnson (<http://dogrocket.home.mindspring.com/WaterRockets/index.html>), est le suivant :

Le cône est maintenu en place par une bride (ficelle, petite bande de PET, ruban de cerclage, etc.), fixée d'un côté sur la fusée et de l'autre accrochée au volet aérodynamique par un élastique.

Le volet est relié au corps de la bouteille par une charnière du type de celles utilisées par les modélistes. Au milieu de ce volet, on dispose un petit crochet réalisé en fil de fer (un morceau de trombone fera l'affaire) et, en bas, on dispose un doigt (bout de trombone droit) qui va permettre de maintenir le volet fermé avant le départ.

Sous le volet, on dispose une autre charnière dans laquelle on aura percé un trou dans lequel pourra entrer le doigt du volet.

Avant le décollage, la charnière du bas maintient le volet fermé, on peut donc accrocher l'élastique de la bride. Dès le décollage, le vent va repousser la charnière basse vers le bas, libérant le doigt. Mais ce même vent va plaquer le volet aérodynamique contre la paroi de la fusée, jusqu'à ce que la vitesse soit suffisamment basse pour que la tension de l'élastique soit plus forte que la force exercée par le vent relatif. À ce moment, le volet va s'ouvrir, libérant ainsi la bride, le cône et enfin le parachute.

Il est aussi recommandé de mettre dans le cône des élastiques, comme sur la photo ci-contre, qui faciliteront son éjection.



Figure 67 : Croisillon d'élastique pour l'éjection du cône

La bride doit être fixée très solidement au corps de la fusée, une bonne idée consiste à la faire passer sous la collerette de blocage du cône et de la coller à la cyanolite, un peu de ruban adhésif renforcé ne peut pas faire de mal. L'élastique doit être bien tendu, quitte à ce que le volet s'ouvre un peu trop tôt, sinon si la vitesse de la fusée ne descend pas suffisamment bas le volet ne s'ouvrira pas.

Les charnières sont collées à la cyanolite (pensez à bien dégraisser et passer un petit coup de papier de verre), un renfort de ruban adhésif ne fera pas de mal non plus.

Le volet lui-même est découpé dans une autre bouteille.

Le crochet et le doigt sont réalisés à partir d'un trombone. Pour faciliter le collage, il faut faire un petit

triangle qui offrira plus de surface de collage. La partie triangulaire du crochet est collée derrière le volet, un petit trou dans le volet permet de faire dépasser le crochet à l'extérieur. Le doigt est collé à l'extérieur du volet.

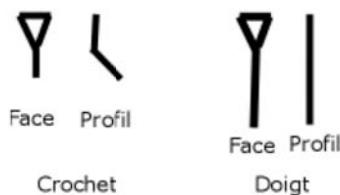


Figure 68 : Crochet et doigt

Pour le collage, disposer le crochet (ou le doigt) sur un morceau de ruban adhésif, déposer la cyanolite sur le triangle puis appliquer sur le volet. Cette méthode évite de se mettre de la colle sur les doigts.

Une autre méthode de retenue du volet avant décollage consiste à utiliser un T inversé en PET dont la tête vient s'accrocher dans une encoche du volet comme ci-dessous. Lors du départ, le vent relatif va plaquer le volet contre la bouteille et libérer ainsi le volet. Cette solution est à la fois plus économique et plus simple à réaliser que la précédente pour un taux de réussite souvent supérieur.

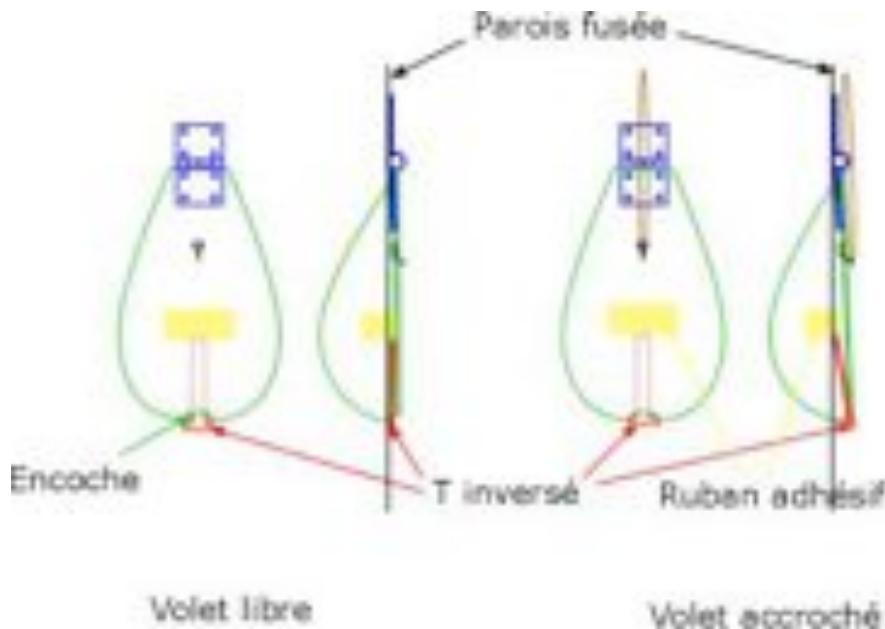


Figure 69 : Détail du volet et de son accrochage par T inversé



Une réalisation, volet fermé avec une charnière.  
On remarque le crochet et le doigt en une seule  
pièce.



Même engin mais volet libéré.

[Figure 70 : Volet aérodynamique avec verrouillage par charnière](#)

On voit sur cette photo que le volet est légèrement décollé de la fusée, mais le T inversé (à rayure rouge) l'empêche de s'ouvrir davantage.

[Figure 71 : Verrouillage du volet par T inversé](#)



### ***La minuterie mécanique***

Très utilisée sur les fusées construites avec les tubes polycarbonate de protection des tubes néon aux USA. La minuterie est réalisée à partir d'un moteur à ressort, récupéré sur les petits jouets animés (de marque TOMY entre autres).

Le principe général consiste à maintenir en position un cône ou une « catapulte » à l'aide d'un élastique tendu, comme dans le cas du volet aérodynamique. L'élastique est maintenu en tension par une ficelle qui est accrochée à un ergot perpendiculaire à l'axe du moteur. On remonte alors le moteur pour enruler la ficelle sur l'axe de rotation, puis on bloque les pignons du moteur avec un morceau de plastique ou une queue de sert câble, qui sera arraché au décollage pour démarrer la rotation du moteur. Quand celui-ci aura déroulé toute la ficelle, celle-ci sera libérée de même que le cône ou la catapulte. Pour limiter la tension de la ficelle, donc le couple sur l'axe du moteur, on peut mettre des chicanes sur le parcours de la ficelle.



Figure 72 : Catapulte maintenue par minuterie mécanique  
(Photos extraites du site de Clifford Heath : <http://cjh.polyplex.org/rockets/>)

### ***La minuterie électronique***

Peu utilisée parce que le dispositif global est lourd. Il faut en effet emporter une source d'énergie électrique, pas seulement pour la minuterie en elle-même, mais surtout pour le dispositif de déclenchement. Ce dernier peut être un électroaimant (très lourd), un moteur électrique, un fil chauffant qui coupe un fil nylon ou un servomoteur de modélisme (le plus facile).

### ***Le planeur à ailes fixes***

Le principe est très simple puisqu'il suffit de mettre des ailes à la fusée. La réalisation l'est sans doute moins si l'on ne veut pas que les ailes restent au sol lors du décollage. On se souvient en effet que les accélérations des fusées à eau sont énormes.

Dave Johnson décrit sa réalisation sur son site :

<http://dogrocket.home.mindspring.com/WaterRockets/index.html>

### Le planeur à ailes déployables

Pour éviter les risques d'arrachage des ailes au décollage, l'idée consiste à replier les ailes lors de l'ascension et de les déployer à l'apogée pour une descente en vol plané.

L'aile peut être du type deltaplane, c'est à dire une structure en tube d'aluminium et une voilure souple.

Ci-dessous, un exemple de réalisation qui ne demande qu'à être perfectionné.



Figure 73 : Planeur à ailes déployables

Les ailes déployables sont constituées d'un bord d'attaque fait en tube d'aluminium de 6mm de diamètre articulé à la base du cône. L'aile elle même est constituée d'une feuille de plastique (house que mettent les pressings sur les vêtements), collée d'un coté sur le corps de la fusée et de l'autre sur le tube d'alu. Sur ce tube le collage ne se fait pas entre le plastique et l'alu, mais le plastique fait le tour du tube et est collé sur lui même (le plastique fait un fourreau dans lequel le tube est glissé). Un volet plastique est ensuite collé au ras du bord d'attaque sur la feuille plastique. Ce volet sert à protéger et maintenir pliée l'aile lors du vol ascensionnel. Il est maintenu fermé avant le décollage par un T inversé (voir Figure 69). Il joue le rôle du volet aérodynamique vu précédemment.

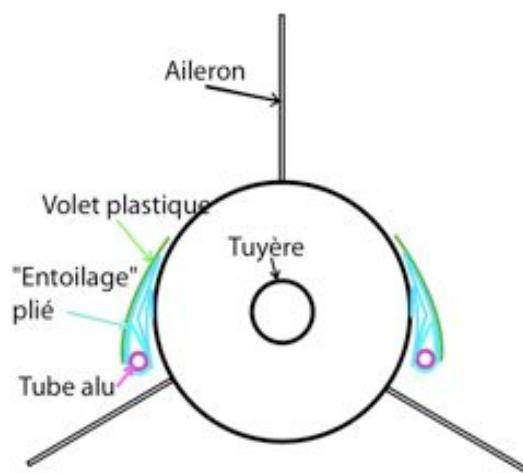


Figure 74 : Vue arrière du planeur, ailes repliées

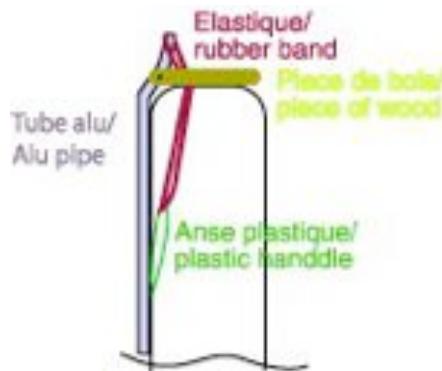


Figure 75 : Schéma explicatif de la photo ci-dessous, qui montre le système de déploiement des ailes



Figure 76 : Photo du système de déploiement des ailes

Ces explications sont disponibles sur la page :  
<http://pagesperso-orange.fr/alain.juge/Francais/Planeur.htm>

### L'hélicoptère

Autre idée intéressante, la récupération façon hélicoptère. Comme précédemment, les pales sont maintenues pliées pendant le vol ascensionnel, puis dépliées à l'apogée. Au départ, chaque pale est maintenue repliée par une charnière (comme pour le volet aerodynamique). Au décollage les pales sont plaquées contre le corps de la fusée par le vent relatif et dès que la vitesse est suffisamment basse, les pales se déplient.

Ces pales sont montées sur un haut de bouteille, lui-même fixé sur un axe qui traverse une petite bouteille et tourne librement dans celle-ci. Donc l'ensemble pales, système d'articulation des pales, haut de grande bouteille peut tourner librement par rapport au corps de la fusée, si bien qu'une fois les pales dépliées, la mise en rotation des pales ralentit la descente de l'ensemble.

Les illustrations ci-dessous sont issues du site (hélas disparu) de Hervé Brégent :

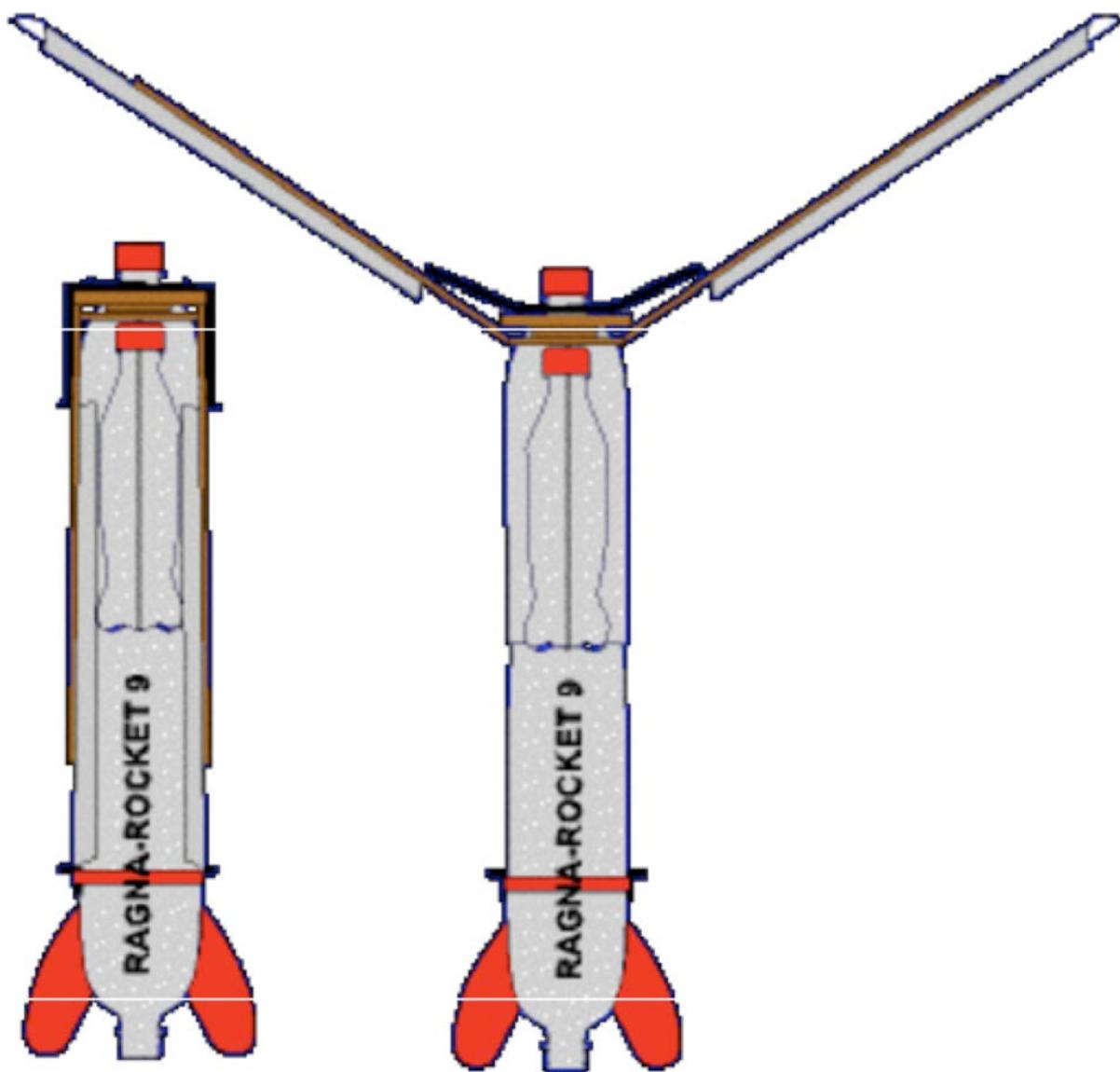


Figure 77 : Récupération "hélicoptère"

## Les parachutes

Pour cette partie, vous vous reporterez utilement au document Planète Sciences dénommé fort judicieusement : Parachute.

Cependant ce document étant axé sur les parachutes de fusées expérimentales, beaucoup plus grosses et lourdes que les fusées à eau, quelques compléments sont nécessaires ici.

La confection du parachute est simple. Prendre une feuille de plastique léger, genre housse de vêtement des magasins de dégraissage, au pire un sac poubelle. Découper un carré de côté égal au diamètre du parachute, le plier selon sa diagonale puis entre le sommet du triangle rectangle obtenu et le milieu O de son hypoténuse. Ce dernier point étant le futur sommet du parachute, replier encore la feuille de plastique 3 ou 4 fois entre ce sommet et le milieu du côté opposé. On obtient un triangle dont on coupe la base de telle sorte que les deux grands cotés soient égaux au rayon du parachute (selon le trait AB de la figure ci-contre). On coupe également le sommet du triangle ce qui permet de faire un trou au sommet du parachute (indispensable sinon le parachute est instable). On déplie la voilure du parachute.

Pour les suspentes, on coupe 4 longueurs de 3 fois le diamètre du parachute, soit dans du fil de pêche, soit dans du fil à coudre un peu fort, soit dans de la petite ficelle (à attacher la viande par exemple). Chacune de ces longueurs est pliée en deux, ce qui nous fait 8 extrémités, qu'il ne reste plus qu'à attacher sur la voilure. Pour cela, faire sur cette voilure les huit marques où seront faites les attaches. Coller à ces endroits du ruban adhésif renforcé, de chaque côté du point d'attache. Faire un petit trou au milieu, passer la ficelle et l'attacher.

Une fois les huit extrémités attachées sur la voilure, réunir les autres extrémités à l'aide d'un bout de ficelle ou d'un anneau. Il ne reste plus qu'à l'attacher à la fusée.

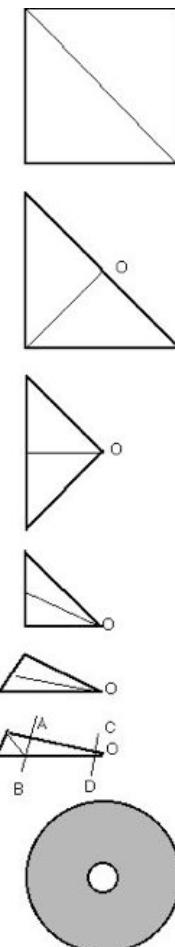


Figure 78 : Réalisation d'un parachute

## Calcul de la taille du parachute

La fusée suspendue au bout de son parachute est soumise à 2 forces, son poids et la résistance de l'air. Son poids est connu, c'est le produit de sa masse à vide par l'accélération de la pesanteur soit :  $P = m * g$ . La résistance de l'air qui est surtout celle du parachute est donnée par la relation  $R = 0,5 * \rho * Cd * S * v^2$ , vue au chapitre « Considération sur l'aérodynamique ».

Ces deux forces s'équilibrent, on a donc  $m * g = 0,5 * \rho * Cd * S * v^2$ . Pour un parachute on peut considérer le produit  $0,5 * \rho * Cd = 0,9$  donc si l'on veut une vitesse de descente donnée (généralement on prend une vitesse comprise entre 5 et 10 m.s<sup>-1</sup>), on en déduit la surface du parachute qui sera donc :

$$S = m * g / 0,9 * v^2 \text{ soit encore } S = 10,8 * m / v^2$$

Par exemple pour une fusée de masse 100 g (donc 0,1 kg) que l'on souhaite voir descendre à 7 m.s<sup>-1</sup>, on aura  $S = 0,1 * 9,81 / 0,9 * 49 = 0,022 \text{ m}^2$  soit un diamètre de 17 cm.

Notez que si on se fixe 7 m.s<sup>-1</sup>, comme vitesse de descente, le calcul de S est alors

$$S = 0,22 * m \text{ ou } D = \text{racine}(0,28 * m)$$

Ce qui permet de tracer la courbe ci-dessous :

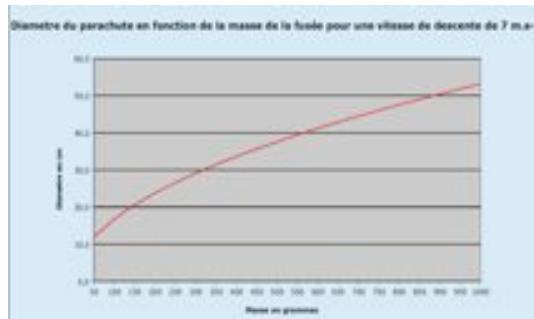


Figure 79 : Diamètre du parachute en fonction de la masse et d'une vitesse de descente de 7 m.s<sup>-1</sup>

## La mesure de l'altitude

Lorsque vous saurez réaliser des fusées performantes et récupérables, le désir de connaître l'altitude atteinte avec le plus de précision possible se fera sentir.

Pour cela, plusieurs méthodes sont possibles et comme toujours rien n'est parfait...

Commençons par le plus simple, même s'il n'offre pas une grande précision de mesure.



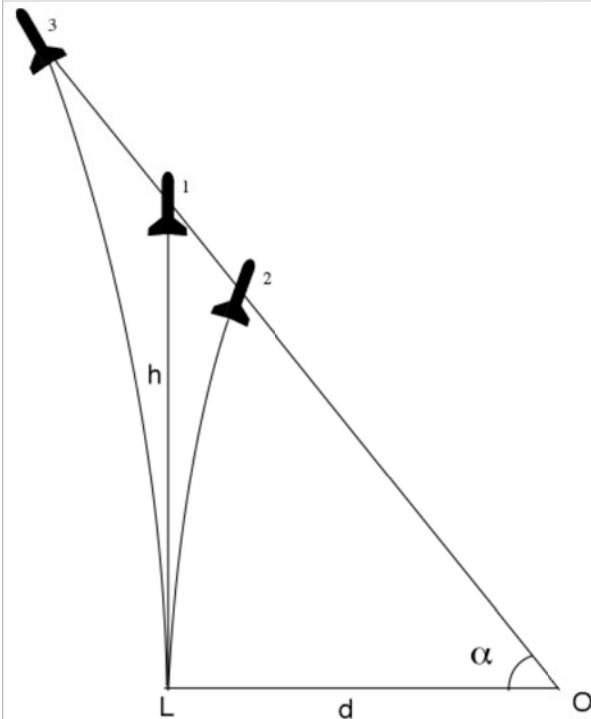
Figure 80 : Théodolite très simplifié

L'instrument ci-dessus se compose d'un morceau de manche à balai, d'un rapporteur et d'un fil à plomb. Il permet de mesurer un angle dans un plan vertical. Si on incline le manche à balai, le fil à plomb reste vertical tandis que le rapporteur se déplace indiquant ainsi l'angle que fait le manche à balai avec l'horizontale.

C'est un théodolite simplifié. Un observateur O se place à une distance  $d$  du lanceur L puis suit la fusée lors de son ascension, jusqu'à son apogée. Là il mesure l'angle  $\alpha$  entre l'horizontale et la ligne qui joint cet observateur à l'apogée. Connaissant la distance  $d$  à laquelle l'observateur se trouve du lanceur, on en déduit la hauteur  $h$  par la relation  $h = d * \text{tg}(\alpha)$ .

Plus l'angle est voisin de  $45^\circ$ , meilleur est la précision, aussi il faut se placer à une distance voisine de la hauteur espérée (calculée grâce aux simulations). Pour une fusée simple (une seule bouteille) et une pression entre 5 et 6 bars, une distance de 50m semble appropriée.

Mais cette méthode a des limites. D'abord la visée est plus ou moins précise, de même que l'estimation de l'apogée. Ensuite le blocage du fil à plomb ne va pas dans le sens de la précision.



Enfin et surtout, si on considère la figure ci-contre, on se rend vite compte que si la fusée n'a pas une trajectoire dans un plan perpendiculaire à l'axe Lanceur-Observateur (cas des fusées 2 et 3) le calcul est complètement erroné.

Cette méthode suppose en effet que la trajectoire de la fusée soit parfaitement verticale, ce qui est rarement le cas.

Pour pallier ce problème, on peut utiliser deux observateurs, tel que l'angle  $\alpha$  formé par les lignes Observateur 1 – Lanceur et Observateur 2 – Lanceur soit de  $45^\circ$  environ. Les calculs se compliquent alors un peu, mais avec un bon tableur ou une calculette programmable, on en vient vite à bout.

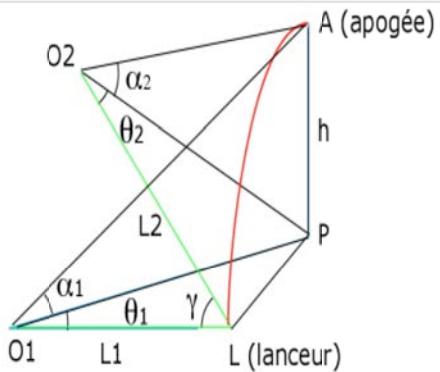
Figure 81 : Limites de la trigonométrie simple

Sur la figure ci-contre, le point L représente la position du lanceur

Les points O<sub>1</sub> et O<sub>2</sub> correspondent aux positions des 2 observateurs, distants respectivement de L<sub>1</sub> et L<sub>2</sub> du lanceur.

Le point A situe l'apogée de la fusée, tandis que le point P est la projection au sol du point A.

Figure 82 : Mesure à 2 observateurs



$\theta$

On calcule d'abord les coordonnées du point P par les formules :

$$X_p = (L_1 * \tan(\theta_1) - L_2 * \cos(\gamma) * \tan(\theta_2 - \gamma) - L_2 * \sin(\gamma)) / (\tan(\theta_2 - \alpha) - \tan(\theta_1))$$

$$Y_p = \tan(\theta_1) * X_p + \tan(\theta_1) * L_1$$

A partir des coordonnées de P, on peut calculer la hauteur h soit avec l'angle  $\alpha \rightarrow 1$ , soit avec l'angle  $\alpha \rightarrow 2$ . L'idéal est de faire le calcul avec les deux, le résultat devrait être identique, aux incertitudes de mesures près...

L'altitude h est donnée par l'une des formules suivantes :

$$h = (Y_p / \sin(\theta_1)) * \tan(\alpha_1)$$

ou

$$h = (Y_p - (L_2 * \sin(\gamma)) * \tan(\alpha_2)) / \sin(\gamma - \theta_2)$$

Vous avez intérêt à rentrer ces formules dans un tableur ou dans une calculette programmable pour avoir un résultat rapide.

Vous pouvez aussi noter soigneusement les différents angles puis faire une construction géométrique à l'échelle 1/1000 ème par exemple (1cm = 10m).

On recherche les coordonnées de P en traçant d'abord les droites LO<sub>1</sub> et LO<sub>2</sub>, puis, connaissant les angles  $\theta_1$  et  $\theta_2$ , les droites O<sub>1</sub>P et O<sub>2</sub>P.

Sur une autre figure, on retrace O<sub>1</sub>P et sa perpendiculaire en P, puis connaissant l'angle  $\alpha_1$ , on trace la droite O<sub>1</sub>A. Pour contrôle, on trace O<sub>2</sub>P et sa perpendiculaire en P et connaissant l'angle  $\alpha_2$  on trace O<sub>2</sub>A. Dans les deux cas de figure, la hauteur PA doit être la même (aux erreurs de mesure près et aux incertitudes de construction près).

Le théodolite simplifié en photo ci-dessus peut être amélioré, d'abord pour faciliter la visée et ensuite en réalisant un système de blocage de la mesure de l'angle plus efficient.

Le livre d'Ivan Lanoë et Michel Mollo : Améliorez vos fusées à eau – Edition Dunod, décrit très en détail la réalisation d'un tel outil de mesure.

Le fusil trigonométrique ci-dessous permet en plus le support d'une caméra vidéo.



Figure 83 : Fusil trigonométrique

D'autres méthodes de mesure existent comme par exemple :

- l'utilisation d'un altimètre avec enregistrement des données en interne (EEPROM par exemple) ou retransmission au sol (c'est l'idéal, mais c'est assez onéreux)

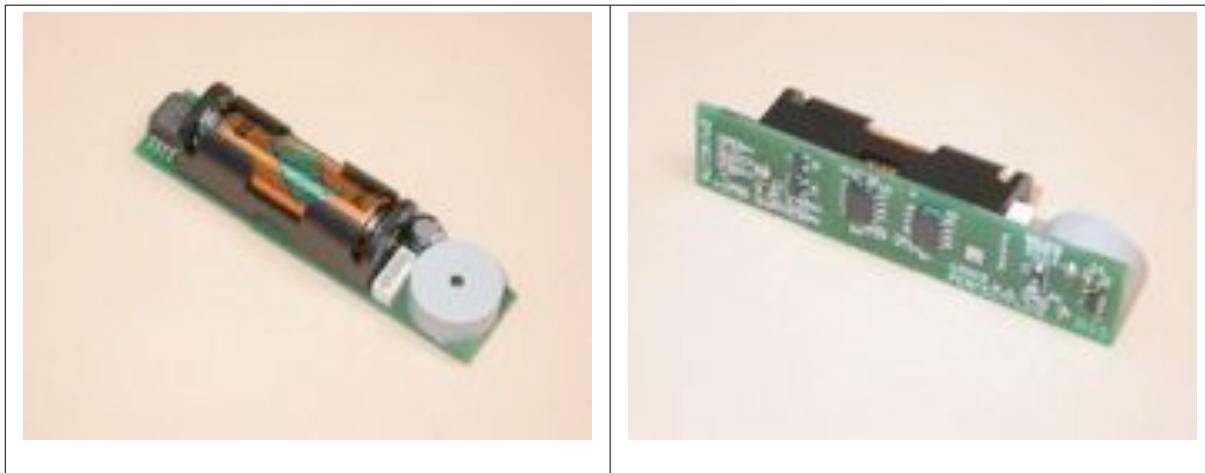


Figure 84 - Un altimètre du commerce

- L'ouvrage cité ci-dessus (améliorez vos fusées à eau) décrit également la réalisation d'un altimètre.
- Le largage à l'apogée d'un objet "calibré" à vitesse de descente constante, qu'il faut chronométrer pour obtenir l'altitude.
- et sans doute d'autres encore... (notamment à partir de films vidéo), alors faites travailler votre génie inventif !

## Pistes pour aller encore plus loin

### Une fusée à deux régimes de propulsion

Lorsque l'on s'intéresse à la propulsion des fusées, on constate que les courbes de poussées des moteurs sont souvent similaires et que le début du vol nécessite toujours une forte poussée afin que le véhicule acquiert très vite de la vitesse pour s'affranchir de l'influence des paramètres extérieurs comme, par exemple, le vent météo.

Le montage présenté vous permettra justement d'obtenir une forte poussée au début du vol et ensuite d'avoir une poussée plus faible (mais qui durera plus longtemps que si vous aviez un seul diamètre d'ouverture).

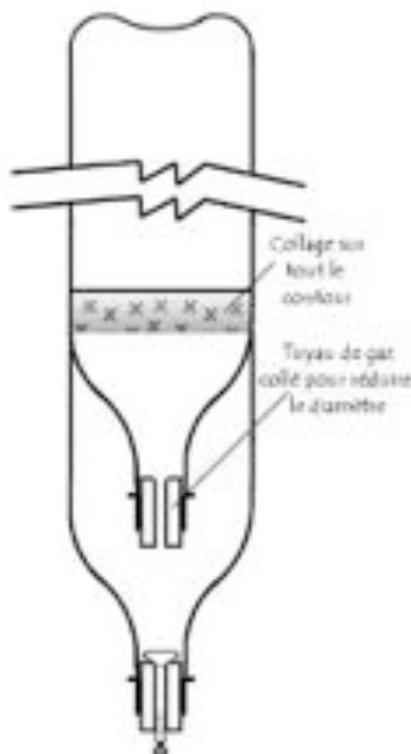


Schéma de principe

Figure 85 : Fusée à deux régimes de propulsion - Principe

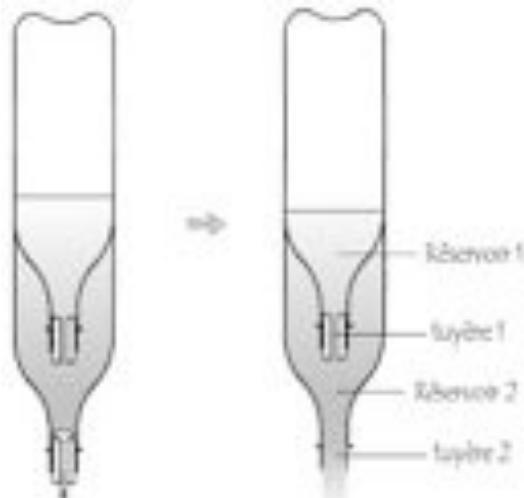


Figure 86 : Fusée à deux régime de propulsion – Fonctionnement

Pendant une même durée, il passe plus d'eau (donc plus de masse) par la tuyère 2 que par la tuyère 1 : la force de propulsion engendrée par l'éjection de la masse d'eau au travers de la tuyère 2 est donc plus importante que par la tuyère 1. Si initialement, le réservoir 1 et le réservoir 2 contenaient la même quantité d'eau, on imagine facilement que le réservoir 2 sera vidé avant le 1. Sur la fin de propulsion, la force engendrée est due à l'éjection d'eau par la tuyère 1 : cette force est donc moins importante qu'au début du vol.

## Fusées multi-réservoirs

Après la maîtrise de la stabilité du vol, vous aurez sans doute envie de développer un lanceur plus puissant : la solution ?... L'embarquement de plusieurs réservoirs vous tentera alors sans doute.

Le problème se résumera alors à la mise en route simultanée des « moteurs ».

La photo montre un lanceur avec trois réservoirs : un système électronique sépare les boosters à culmination et ouvre ainsi les parachutes.



Figure 87 : Fusée multi-réservoirs

## Fusées multi-étages

Le système de séparation des étages décrit ci-dessous est calqué sur celui de Bruce Berggren. La tuyère du 2ème étage est un tube rigide de 8 mm de diamètre et environ 6 cm de long. Il est fixé sur un bouchon soit par collage, soit en filetant ce tube pour pouvoir mettre un écrou de chaque côté du bouchon. Cette tuyère est emmanchée dans un tube plastique souple (Vinyl) de 8 mm de diamètre intérieur. Ce tube Vinyl est fixé sur le bouchon supérieur du premier étage, alors que l'autre extrémité est fermée par une valve qui laisse passer l'air dans le sens premier vers 2ème étage.

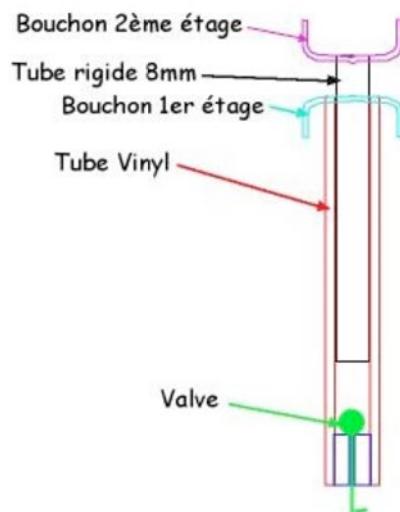


Figure 88 : Système de séparation d'une fusée multi-étages

Lorsque les deux étages sont en place et que l'on met en pression le premier étage, la valve laisse passer l'air pour remplir aussi le deuxième étage. La pression est donc la même à l'extérieur du tube vinyl qu'à l'intérieur. Les forces de frottement entre les deux tubes sont suffisantes pour maintenir les deux étages ensemble. Pendant la phase propulsion du premier étage, la pression diminue dans le réservoir du bas, donc à l'extérieur du tube vinyl alors qu'à l'intérieur, la pression est toujours celle du départ puisque la valve ne laisse pas passer l'air de haut en bas.

Le tube vinyl va alors commencer à « gonfler » sous l'effet de la différence de pression et donc les

forces de frottement vont diminuer. Lorsque la force générée par la pression du deuxième étages sur la valve sera supérieure aux forces de frottement des tubes, alors le deuxième étages sera libéré. Le diamètre de 6 mm pour la tuyère permet d'avoir une poussée relativement faible, mais plus longue par rapport au premier étage. Comme la vitesse de la fusée est déjà importante, l'efficacité des ailerons est bonne, ce qui permet d'avoir une bonne stabilité, pendant toute la phase de propulsion de ce deuxième étage, malgré un centre de gravité bas.

Les points importants sont :

- d'une part le réglage de la force de frottement des deux tubes, il faut qu'elle soit assez grande pour que la séparation ne se fasse pas prématurément, mais pas trop forte pour que le deuxième étage soit libéré à temps.
- D'autre part la stabilité du deuxième étage en charge (avec l'eau).



Figure 89 : Vue sur le système de séparation d'une fusée bi-étages

## Maquettes

Dans un autre domaine, il est tout à fait possible de réaliser des maquettes volantes ou non de fusées existantes, comme la reproduction d'Ariane vu précédemment Figure 87 ou bien des œuvres d'art comme celle ci-dessous.

A chacun de trouver son bonheur, les limites ne sont fixées que par votre imagination et ... la sécurité.



Figure 90 : Trophée du concours de fusée à eau 2000 ayant eu lieu pendant le Festival européen de l'espace à Millau

## Charge utile

Lorsqu'un propulseur est au point et que sa récupération est maîtrisée, l'évolution naturelle consiste à embarquer des expériences scientifiques. Nous avons vu précédemment qu'un des premiers besoins était de pouvoir mesurer l'altitude. Mais, très vite, on va éprouver le désir de tout connaître des paramètres de vol : accélération, vitesse, inclinaison, température, pression, etc...

Nous ne traiterons pas ce sujet dans ce fascicule, il faudrait y consacrer tout un ouvrage entier, cependant il faut se souvenir que les contraintes des fusées à eau dans ce domaine sont un peu différentes de celles des fusées à poudre.

D'abord, une fusée à eau pèse à vide entre 50 et 200 g, donc tout ajout de poids en charge utile sera assez sensiblement préjudiciable aux performances. 50 g d'électronique dans une fusée de 100 g n'aura pas le même impact que dans une fusée de 10 kg.

Le faible poids des fusées à eau fait que les accélérations peuvent être colossales, 100 ou 200 g, ce qui constraint à des charges utiles compactes et solides, même si le fait de rajouter du poids diminue les performances.

Le poids étant l'ennemi N°1, on ne pourra pas mettre des sources d'énergie trop lourdes donc probablement pas très puissantes, ce qui peut limiter les ambitions.

Enfin, comme son nom l'indique, une fusée à eau fonctionne avec de l'eau, ce que n'apprécie pas forcement l'électronique.

Enfin, sachez que l'ouvrage d'Ivan Lanoë et Michel Mollo : Améliorez vos fusées à eau aux Editions Dunod, traite largement de ce point.

Voilà, armé de ces éléments, c'est maintenant à vous de jouer, mais en toute sécurité.

## Les fusées amateurs en France

### Le partenariat CNES - Planète Sciences

Le lancement de fusée utilisant un propulseur à poudre **est réglementé** en France.

Dès sa création, le Centre National d'Études Spatiales (CNES) a été chargé par le Ministère de l'Intérieur de mettre à la disposition des clubs spatiaux de jeunes des propulseurs présentant toutes les garanties de sécurité. Le CNES a alors confié à l'Association Nationale Sciences Techniques Jeunesse (ex-ANSTJ aujourd'hui Planète Sciences) la coordination de ces clubs. Planète Sciences répond aux demandes et assure le suivi d'une activité qui s'est largement développée depuis.

L'objectif de Planète Sciences est de favoriser la pratique des sciences et des techniques pour le plus grand nombre de jeunes en prônant l'utilisation de la démarche expérimentale en équipe. Avec le soutien technique et financier du CNES, elle fédère aujourd'hui environ 100 Clubs de jeunes en France, intervient dans plus de 140 établissements scolaires chaque année. Ainsi, plus de 50.000 jeunes bénéficient de nos activités tous les ans.

Différents vecteurs existent, correspondant à toutes les tranches d'âge et à toutes les sensibilités : micro-fusées, mini-fusées, fusées expérimentales, ballons expérimentaux, parallèlement à ces activités structurées, la fusée à eau peut être pratiquée de manière complètement autonome.

Pour mieux comprendre la fusée à eau et adapter chaque fusée à la tranche d'âge qui lui convient, il semble nécessaire de connaître tous les types de fusées existants en France. En voici, ci-dessous, une présentation succincte.

### Les activités aérospatiales de jeunes

#### *La microfusée*

La microfusée est simple par les matériaux qui sont nécessaires à sa construction : balsa, tube de carton, sac en plastique et ficelle. Elle pèse quelques dizaines de grammes et peut monter jusqu'à 100 m d'altitude.

Pouvant être construite et lancée en une demi journée, sa relative simplicité de mise en œuvre permet d'initier les jeunes dès huit ans à la démarche expérimentale.



Figure 91 : La microfusée - Construction et lancement

Après une formation de 25 heures, les animateurs obtiennent un agrément leur conférant la possibilité d'encadrer cette activité avec des jeunes. Les animateurs bénéficient de la couverture d'assurance du CNES lors de leurs lancements.

### ***La minifusée***

La minifusée est une fusée qui permet de découvrir les principes de base de la conception et de la réalisation de systèmes embarqués pour des adolescents à partir de 12 ans.

L'expérience principale est le système de récupération. Son déclenchement doit s'effectuer de façon automatique, au bout d'un temps déterminé avant le lancement par un calcul de trajectoire.

Une minifusée est fabriquée à partir de différents matériaux (bois, métal, plastique...) et comprend des systèmes électriques ou électroniques, voire pyrotechniques. Sa masse est limitée à 2,5 kg.



**Figure 92 : Une Minifusée**

La construction doit respecter un cahier des charges spécifique permettant de garantir la sécurité du lancement.

Les minifusées sont propulsées par des moteurs Cariacou ou Wapiti fournis par le CNES et mis en oeuvre par des personnes spécifiquement formées. Elles peuvent atteindre 600 mètres d'altitude.

### ***Les fusées expérimentales***

Comme son nom l'indique, la fusée expérimentale ("fusex" pour les habitués) est un vecteur embarquant une ou plusieurs expériences scientifiques ou technologiques. Les domaines d'études sont très variés, allant de l'analyse des conditions de vol (vitesse, vibrations, phases de vol, ...) à celle de l'environnement extérieur (température, pression, photos...).

D'une masse comprise entre 6 et 13 kg, les fusées expérimentales atteignent des altitudes variant entre 800 et 1800 mètres.



**Figure 93 : Mise sur rampe d'une fusée expérimentale**

Proposée à partir de 15 ans lors de séjours de vacances, la fusée expérimentale touche des jeunes de 15 à 25 ans regroupés majoritairement dans des Clubs d'établissements d'enseignement supérieur.

La conception et la construction d'une fusée expérimentale durent généralement un ou deux ans. Elles requièrent de nombreuses compétences (mécanique, électronique, aérodynamique, informatique...) et nécessitent une répartition réfléchie des tâches (en fonction des compétences), au sein d'une équipe.

Chaque année, un grand rassemblement de jeunes passionnés d'espace est organisé sur un terrain militaire (pour des raisons évidentes d'espace). C'est le Festival européen de l'espace. Plus de 300 jeunes venus de France et d'Europe viennent lancer leur fusée expérimentale mais aussi des projets de mini-fusées ou de ballons expérimentaux.

## Démarche expérimentale

### **Principe de la démarche**

La démarche expérimentale est un moyen important pour que le jeune accède à l'autonomie, à la réflexion et développe l'esprit d'initiative...

La fusée à eau est un vrai champ d'expérimentation sans les contraintes d'un propulseur à poudre. La démarche expérimentale se décline par le passage en différentes étapes dans le but de répondre à une question ou de proposer une solution à un problème. Un moyen mnémotechnique est souvent utilisé pour se souvenir des différentes étapes, parfois avec quelques variantes. C'est ce qu'on appelle la méthode OHERIC.

Observations

Hypothèse

Expérimentations

Résultats

Interprétations

Conclusions

#### Exemple appliqué à la fusée dans le cadre d'une animation :

O. l'animateur met sous pression une bouteille simple et la fait partir : le vol est plutôt erratique mais les jeunes ont pu se faire une idée du principe ;

H. les jeunes émettent plusieurs hypothèses :

- « Comment faire pour que la fusée vole droit ? »

- « Puisque l'eau semble importante, pourquoi ne pas remplir la fusée entièrement ? »

....

E. on essaie successivement, par groupe, avec des ailerons, en remplitant complètement la bouteille... ;

R. pour chaque expérimentation, on établit le résultat ;

I. on interprète le résultat, s'il y a lieu ;

C. enfin, on tire les conclusions et si ce ne sont pas celles que l'on attendait, il sera nécessaire de dérouler de nouveau la démarche à partir d'autres hypothèses.

Le rôle de l'animateur est donc de guider les jeunes pour que toutes les étapes soient passées en revue (de manière la plus naturelle possible évidemment : il n'est pas question de dire à chaque instant « attention, on arrive au H de OHERIC !). De plus, il n'est pas toujours nécessaire de passer par toutes les étapes car elles sont parfois inutiles.

De nombreux paramètres peuvent donc être testés : quantité d'eau, pression dans la bouteille, diamètre de la tuyère, position des ailerons, nombres d'aileron, position du centre de gravité, rugosité du réservoir...

A vous de jouer et surtout d'expérimenter...

## Bibliographie

### Ouvrages

Espace Information n°50 – avril 1992 (page 22, « *La fusée à eau* ») ;  
Espace Information n°46 – octobre 1990 (« L'action – réaction ») ;  
« *La fusée à eau* » par Jean-Paul Soulard du lycée Technique Privé Saint-Louis de la Roche sur Yon ;  
« Construisez et lancez des fusées à eau » d'Ivan Lanoë Édition Dunod (ISBN : 2 10 006988 8).  
« Améliorez vos fusées à eau » d'Ivan Lanoë et Michel Mollo Édition Dunod (ISBN : 2 10 048346 3).  
« La rampe Shadock » par André Le Coroller.

### Quelques sites Internet...

<a href="http://www.planete-sciences.org/">www.planete-sciences.org/</a>	Français
<a href="http://pagesperso-orange.fr/alain.juge/">http://pagesperso-orange.fr/alain.juge/</a>	Français
<a href="http://perso.numericable.fr/fbouquetbe63/gomars/">http://perso.numericable.fr/fbouquetbe63/gomars/</a>	Français
<a href="http://www.techno-challenge.org/index_Association_Loi_1901.htm">http://www.techno-challenge.org/index_Association_Loi_1901.htm</a>	Français
<a href="http://www.teaser.fr/~mzirnheld/japon/divers/fuseo.htm">www.teaser.fr/~mzirnheld/japon/divers/fuseo.htm</a>	Français
<a href="http://www.chez.com/ericabgrall/fusee/plande.htm">www.chez.com/ericabgrall/fusee/plande.htm</a>	Français
<a href="http://cjh.polyplex.org/rockets/">http://cjh.polyplex.org/rockets/</a>	Anglais
<a href="http://www.h2orocket.com/">www.h2orocket.com/</a>	Anglais
<a href="http://dogrocket.home.mindspring.com/WaterRockets/index.html">http://dogrocket.home.mindspring.com/WaterRockets/index.html</a>	Anglais
<a href="http://www.et.byu.edu/~wheeler/benchtop/">http://www.et.byu.edu/~wheeler/benchtop/</a>	Anglais