

La fusée à eau

par J.P. SOULARD - L.T.P. St Louis
85000 La Roche-sur-Yon

1. INTRODUCTION

La fusée à eau n'est pas une invention récente. Sans aller chercher dans un passé lointain, par exemple le numéro 10 de la « Revue du Palais de la Découverte » de l'été 1973 comporte un article, signé L. Mouzin, qui lui est consacré.

Il s'agit de la réalisation d'une fusée hydro-pneumatique élémentaire à partir d'une bouteille en PVC pour eau minérale. Un exposé théorique, non spécifique du mode de propulsion hydro-pneumatique, accompagne les quelques indispensables données pratiques.

Le dispositif préconisé (cf figure 1) illustre parfaitement le principe de la propulsion hydro-pneumatique : la bouteille, partiellement remplie d'eau est renversée sur son bouchon qui est traversé par une valve de chambre à air de bicyclette. L'accumulation d'air comprimé à pression croissante fait « sauter » le bouchon, mais c'est l'eau qui se trouve chassée et la bouteille est propulsée par réaction.

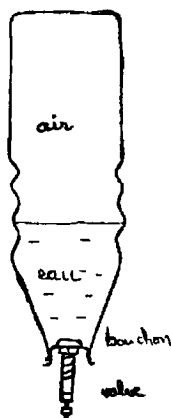


Figure 1

Malgré son grand mérite, celui de concrétiser le principe de la propulsion par réaction, ce dispositif élémentaire souffre d'infirmités sur plusieurs points :

- performances modestes,
- la bouteille en vol est loin d'avoir un comportement balistique stable,
- le départ est aléatoire : la «fusée» démarre quant lâche le bouchon, ce qui ne se produit même pas à une pression constante pour une association bouteille-bouchon donnée.

En conservant la même idée de base, j'ai pu remédier à ces défauts et réaliser un ensemble de fusées à eau dont les performances - quelque peu surprenantes - m'ont incité à élaborer une théorie, spécifique au mode de propulsion hydropneumatique, capable de rendre compte des résultats expérimentaux. Le développement qui suit expose une partie des réalisations concrètes, les bases et les résultats théoriques du calcul, ainsi que quelques exemples de mesures.

2. MATÉRIEL DE BASE... DE LANCEMENT

Réaliser une fusée de stabilité convenable tout au long de son vol peut se faire simplement. Deux bouteilles en plastique pour boisson gazeuse (genre Pepsi, Coca...) de 1,5 l, ou même 2 l, constituent le matériau de base à se procurer. L'une des deux est découpée pour fournir l'ogive et la jupe sur laquelle seront fixés trois ou quatre ailerons pour former la queue (figure 2). Les ailerons sont découpés dans du plastique plat, peu épais, suffisamment souple, ou dans une feuille d'aluminium mince. La fixation la plus efficace, et la plus rapide à réaliser, se fait par agrafage. La masse de cette fusée, vide, est d'environ 100 grammes.

Parmi les diverses solutions qui peuvent être adoptées pour retenir la fusée à eau jusqu'au moment choisi pour son départ, la figure 3 représente un dispositif dont le principe est celui de l'écrasement d'un bouchon en caoutchouc dont le diamètre normal autorise tout juste le glissement dans le goulot qui servira de tuyère d'éjection. Une fois écrasé - grâce à l'action d'un levier que l'on immobilise par un cran d'arrêt - ce bouchon se bloque dans le goulot cylindrique et résiste aux pressions habituellement pratiquées (dans les limites de la résistance de la bouteille).

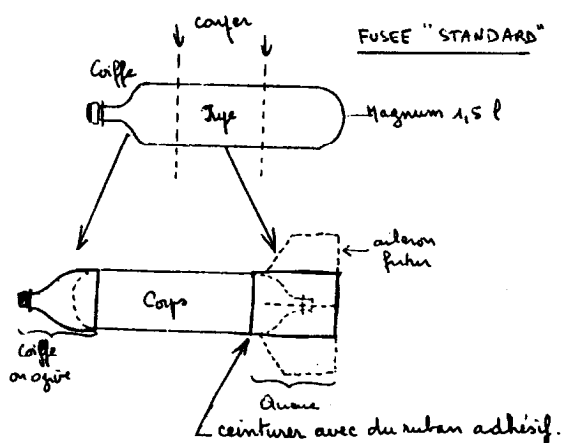


Figure 2 : Fusée «standard»

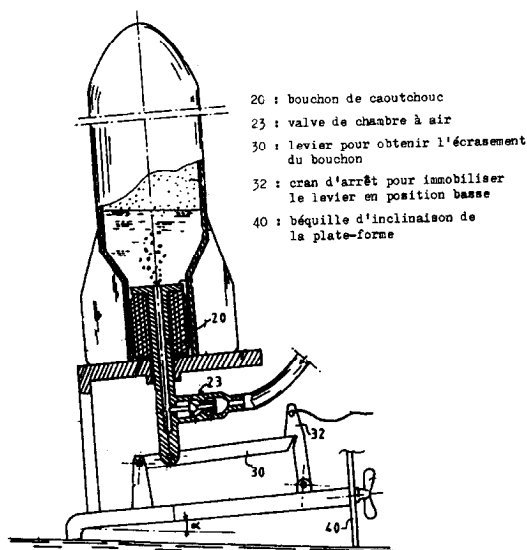


Figure 3 : Exemple de plate-forme de lancement

- 20 : bouchon de caoutchouc
- 23 : valve de chambre à air
- 30 : levier pour obtenir l'écrasement du bouchon
- 32 : cran d'arrêt pour immobiliser le levier en position basse
- 40 : béquille d'inclinaison de la plate-forme

Au terme d'un éventuel compte à rebours (ça fait plus sérieux !) la libération du cran d'arrêt entraîne la décompression du bouchon et la pression à l'intérieur acquise par gonflage fait le reste : dégagement de la tuyère par la force pressante, éjection brutale de l'eau et mouvement de la fusée par réaction.

Avec la plate-forme et la fusée ainsi faites, un bon nombre d'essais sont possibles avec une simple pompe pour pneumatique d'automobile... et un grand espace. Si ce dernier est plutôt restreint on veillera à user de faibles pressions croissantes, avec peu, voire pas d'eau du tout. Quelques expériences montreront que pour toute pression choisie (repérée sur le manomètre - pourtant souvent peu fiable - de la pompe) il existe sans doute un optimum de remplissage, entre l'absence totale d'eau et l'absence presque totale d'air, qui assure la meilleure vitesse en fin de propulsion, et donc la plus grande altitude au sommet de la trajectoire.

Les résultats observés, en vitesse et en altitude atteintes, avec ces moyens rudimentaires, surprennent même les personnes averties et sont sources d'un intérêt toujours renouvelé tant sont nombreux les prolongements possibles, les questions posées, les perfectionnements et les variantes imaginables.

3. CONSIDÉRATIONS THÉORIQUES

L'un des avantages de cette fusée éminemment réutilisable c'est d'être «physique» et non «chimique». Les calculs ne nécessitent pas la connaissance préalable d'une vitesse d'éjection de gaz à l'issue d'une combustion. Les performances sont liées à des paramètres physiques aisément accessibles pour la plupart à la mesure : masse, volume, diamètres, pression... Une exception notable : le «Cx» qu'il faudra, au moins au début, se contenter d'apprécier.

L'approche théorique, à partir de tout ou partie des relations du tableau I, peut se faire d'abord sommairement, puis, en prenant en compte des éléments auparavant écartés, de manière de plus en plus fine pour arriver à une description théorique satisfaisante quand les calculs qui en découlent rejoignent convenablement les observations et les mesures.

PRINCIPALES RELATIONS UTILISEES POUR L'ETUDE DE LA FUSEE A EAUI- Pour la propulsion due à l'eau

- | | | |
|---|---|---|
| 1 | $\Delta P = \rho \cdot \Gamma \cdot \Delta h$ | relation fondamentale de l'hydrostatique |
| 2 | $\Delta(v^2) = 2 \cdot \Gamma \cdot \Delta x$ | variante du théorème de l'énergie cinétique |
| 3 | $P \cdot v^\gamma = c^6$ | compressibilité adiabatique des gaz |
| 4 | $F = q \cdot V$ | poussée d'un réacteur avec tuyère adaptée |
| 5 | $q = \rho \cdot V \cdot S$ | débit d'un fluide |
- (ρ masse volumique, v volume, V vitesse, $\gamma=1,4$ pour l'air, Γ accélération)

II- Pour la propulsion due à l'air

- | | | |
|----|---|--|
| 6 | $F = qV - (P_s - P_a) \cdot S$ | poussée avec tuyère non adaptée |
| 7 | $a = \sqrt{\gamma \cdot \frac{R}{M} \cdot T}$ | vitesse du son dans le fluide de masse molaire M
(29 grammes pour l'air) |
| 8 | $\frac{dA}{A} + (1 - \gamma) \frac{dV}{V} = 0$ | relation de Hugoniot |
| 9 | $\frac{V^2}{2} + \frac{\gamma}{\gamma-1} \cdot \frac{P}{\rho} = C^6$ | relation de Barré de Saint-Venant |
| 10 | $\frac{T}{T_i} = \left(1 + \frac{\gamma-1}{2} M^2\right)^{-1}$ | } relations régissant les écoulements
monodimensionnels isentropiques, permet-
tant les calculs de la température
(T en K), la pression (P), la masse
volumique (ρ) dans une section de
l'écoulement en fonction des conditions
régnant dans le réservoir (indices i) |
| 11 | $\frac{P}{P_i} = \left(1 + \frac{\gamma-1}{2} M^2\right)^{-\frac{\gamma}{\gamma-1}}$ | |
| 12 | $\frac{\rho}{\rho_i} = \left(1 + \frac{\gamma-1}{2} M^2\right)^{-\frac{1}{\gamma-1}}$ | |

(M) nombre de Mach, P_s pression dans la section de sortie, P_a pression ambiante
R = 8,32 S.I.)

III- Dynamique

- | | | |
|----|--|---------------------------------------|
| 13 | $F = m \cdot \Gamma$ | relation fondamentale de la dynamique |
| 14 | $R = \frac{1}{2} C_x \cdot \rho \cdot S \cdot v^2$ | résistance de l'air |

Tableau 1

La phase la plus intéressante, et la plus subtile à étudier est celle de la propulsion, où tout se joue. Le reste du mouvement est une trajectoire balistique sans grande originalité, sinon l'importance relativement grande de la trainée atmosphérique en raison de la faible densité du vecteur vide.

CARACTERISTIQUES APPROXIMATIVES DE LA FUSEE "STANDARD"

réalisée à partir du magnum 1,5 l en P.E.T. type "Coca-Cola", "7 up"...

Masse à vide, avec ogive et queue	100 grammes
Diamètre du corps	8,5 cm
Diamètre de la tuyère	2 cm
Volume total du réservoir	1,5 l
Hauteur	40 cm
Pression supportable	jusqu'à 10 bars
Altitude atteinte	selon le Cx et la pression (jusqu'à une centaine de mètres)

Tableau 2

EXPULSION DE L'EAU

Dans un premier temps on peut ne tenir compte que de la propulsion par eau, et admettre que la pression à la sortie de la tuyère est pratiquement égale à celle de l'air - en décompression adiabatique - du réservoir.

Avec ces hypothèses on établit sans peine à partir des relations 1, 2, 4 et 5 que le débit massique vaut $q = S \times \sqrt{2} \cdot p \cdot \Delta P$ et que la poussée s'écrit $F = 2 \cdot \Delta P \cdot S$ (elle est indépendante du liquide utilisé).

Ces premiers éléments permettent de se faire une idée des performances accessibles. Prenons l'exemple de la fusée « standard » (voir tableau II). En y mettant 0,5 l et en gonflant à 6 bars, on obtient pour le départ :

$$\text{poussée } F \approx 377 \text{ N} \qquad \text{accélération } \Gamma = 628 \text{ m.s}^{-2}$$

A la fin de l'éjection de l'eau, grâce à la relation 3 on peut calculer que la pression est tombée à 3,4 bar ce qui laisse encore la poussée à 213 N alors que la masse avoisine les cent grammes, d'où une accélération assez fantastique de 2130 m.s^{-2} soit 218 fois la pesanteur.

En prenant comme valeur «moyenne» de la pression 4,5 bar le débit moyen serait de 9,4 kg/s, ce qui ferait une durée de propulsion approximativement égale à 0,053 s. En estimant l'accélération moyenne à 1000 m.s^{-2} (soit 100 «g») la vitesse finale ressort à 53 m/s environ, au terme d'une trajectoire propulsée de 2,80 m.

Une première conclusion de ce travail théorique est que la propulsion hydropneumatique est brève et violente : l'expérience ne dément pas, et les photographies (au 1/1000 s, sur film très sensible) en rendent compte.

Dans cette première approche, très sommaire mais suffisante pour établir les ordres de grandeur, plusieurs facteurs ont été négligés. Un facteur négatif : la résistance de l'air. Un facteur largement positif : l'expulsion de l'air encore comprimé restant dans le réservoir après expulsion de l'eau. Une expérience conduite sans eau montre que la contribution de l'air est appréciable. Un autre facteur positif n'intervient qu'en cas de vol réel (à ne pas prendre en compte pour des mesures au banc d'essai) : la hauteur d'eau présente dans le réservoir donne lieu à un surcroît de pression par rapport à l'air qui la surmonte. Cette surpression, conforme à la relation fondamentale de l'hydrostatique est tout à fait négligeable au repos (alors $\Gamma = g$ soit 10 m.s^{-2}), mais devient notable quand Γ vaut plusieurs dizaines de fois la pesanteur. Ainsi à 50 «g» une hauteur de 10 cm d'eau équivaut à 0,5 bar : c'est un petit appoint.

EXPULSION DE L'AIR

L'effet de l'expulsion du reste d'air comprimé est plus considérable dans le résultat final, mais son calcul est sensiblement plus difficile. Cette éjection de l'air peut être regardée, en première approximation, comme un écoulement monodimensionnel isentropique, phénomène certes banal (ex : pneu qui fuit...), mais redoutable à modéliser quand on n'a pas regardé de près la mécanique des fluides compressibles. En voici les résultats...

Tant que la pression dans le réservoir, où seul subsiste l'air comprimé, est supérieure à 1,89 bar (dans l'hypothèse où la pression atmosphérique P vaut 1 bar) l'écoulement se fait à la vitesse du son au niveau du goulot-tuyère. Cette vitesse dépend de la température au niveau du col seulement. Pour cet écoulement sonique, le débit s'écrit

$q = 0,684 \cdot \frac{P_i \times S}{\sqrt{R \times T_i/M}}$ la vitesse du son au col $a = \sqrt{334 \cdot T_i}$ et la

poussée (cf relation 6 du tableau I)

$F = 0,684 \frac{P_i S}{\sqrt{R T_i/M}} \times \sqrt{334 \cdot T_i} - \left[\frac{P_i}{(1,2)^{3,5}} - P \right] \cdot S$ cette dernière peut aussi s'écrire $F = (P_i \times 0,21 + P) \times S$ pour l'air.

Quand la pression de l'air dans le réservoir tombe à moins de 1,89 bar (si $P_{atm} = 1$ bar) l'écoulement devient subsonique au col, c'est-à-dire au goulot.

Le calcul se déroule à partir de la pression au col posée égale à 1 bar. Il en sort la vitesse de l'écoulement à partir du nombre de Mach et de la température au col.

$$M = \sqrt{5(P_i^{0,286} - 1)} \quad T_c = \frac{T_i}{1 + \frac{\gamma-1}{2} M^2} \Rightarrow v = M \cdot \sqrt{\gamma \cdot (R/M) \cdot T_c} \quad (a)$$

A partir de la relation de Saint-Venant on obtient le débit d'air en régime d'écoulement subsonique,

$$q = \rho_i \times S \times \left(\frac{P}{P_i} \right)^{\frac{1}{\gamma}} \sqrt{\frac{2\gamma}{\gamma-1} \frac{P_i}{\rho_i} \left[1 + \left(\frac{P}{P_i} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \right]}$$

et enfin la poussée (cette fois $P_s = P_a$)

$$q = 49,7 \times S \sqrt{\frac{P}{T_i} \left[\left(\frac{P_i}{P} \right)^{0,571} - \left(\frac{P_i}{P} \right)^{0,286} \right]} \quad (b)$$

et $F = q \cdot v$ à partir de (a) et (b)

Tous ces efforts pour une contribution d'environ 20% à la vitesse finale aux pressions usuelles (quelques bars)...

Ces derniers résultats permettent de rendre compte des performances observées lors du fonctionnement «à sec» de la fusée qui n'est plus que pneumatique. Ainsi pour 6 bars au départ la poussée vaut environ 70 N (modèle «standard») en l'absence de divergent à la sortie

de la tuyère. Pour une masse de 0,1 Kg, cela fait une accélération initiale de 70 «g». Le débit démarre à (hypothèse $T_i = 288$ K) à 0,45 Kg/s. Comme il y a 11 g d'air à expluser, l'opération se ferait en moins de 2,5 centièmes de seconde, d'où une vitesse finale de l'ordre de 18 m/s. Ceci pour rester délibérément sommaire...

4. RÉSULTATS CALCULÉS PAR ORDINATEUR

Les calculs «à la main», ou avec une simple calculatrice, ne permettent pas beaucoup plus de finesse dans les résultats : ils donnent seulement accès aux ordres de grandeur. Le recours à l'ordinateur s'impose pour une approche plus fine. Le principe du calcul est de diviser le temps en intervalles très courts (0,001 ou même 0,0001 s). Pendant chacun d'eux on estime que certains paramètres physiques restent constants, en particulier la masse et la poussée. Le mouvement est ainsi artificiellement décomposé en une succession de mouvements uniformément accélérés, ou même simplement uniformes. Bien entendu l'ordinateur permet de prendre en compte l'influence de la résistance de l'air.

Le tableau III présente les résultats, sous forme de courbes, en vitesse atteinte en fin de propulsion (eau puis air) selon le remplissage du modèle «standard». On observe que pour un remplissage «moyen» la vitesse finale reste voisine de la valeur maximale. Par exemple de 0,25 à 0,75 l, avec 6 bars, la vitesse se tient entre 55 et 62 m/s. La courbe est particulièrement plate aux environs de l'optimum de remplissage (0,495 l pour 6 bars, 0,46 l pour 4 bars).

L'un des intérêts de l'ordinateur est qu'il permet de prévoir et de simuler. On peut ainsi connaître l'influence sur la vitesse en fin de propulsion du diamètre de la tuyère, de la densité du liquide utilisé, de la masse à vide (donc d'une éventuelle «charge utile»)... On découvre aussi que pour toute pression donnée il existe une densité de liquide qui assure la meilleure vitesse finale.

La phase balistique du vol, de loin la plus longue en temps et espace, est facilement prévue par le travail de l'ordinateur. Il lui suffit de connaître la vitesse en fin de propulsion, l'angle de tir, éventuellement la température, et surtout le «Cx», lequel ne peut guère qu'être estimé dans un premier temps. Le tableau IV retrace une trajectoire théorique calculée par ordinateur.

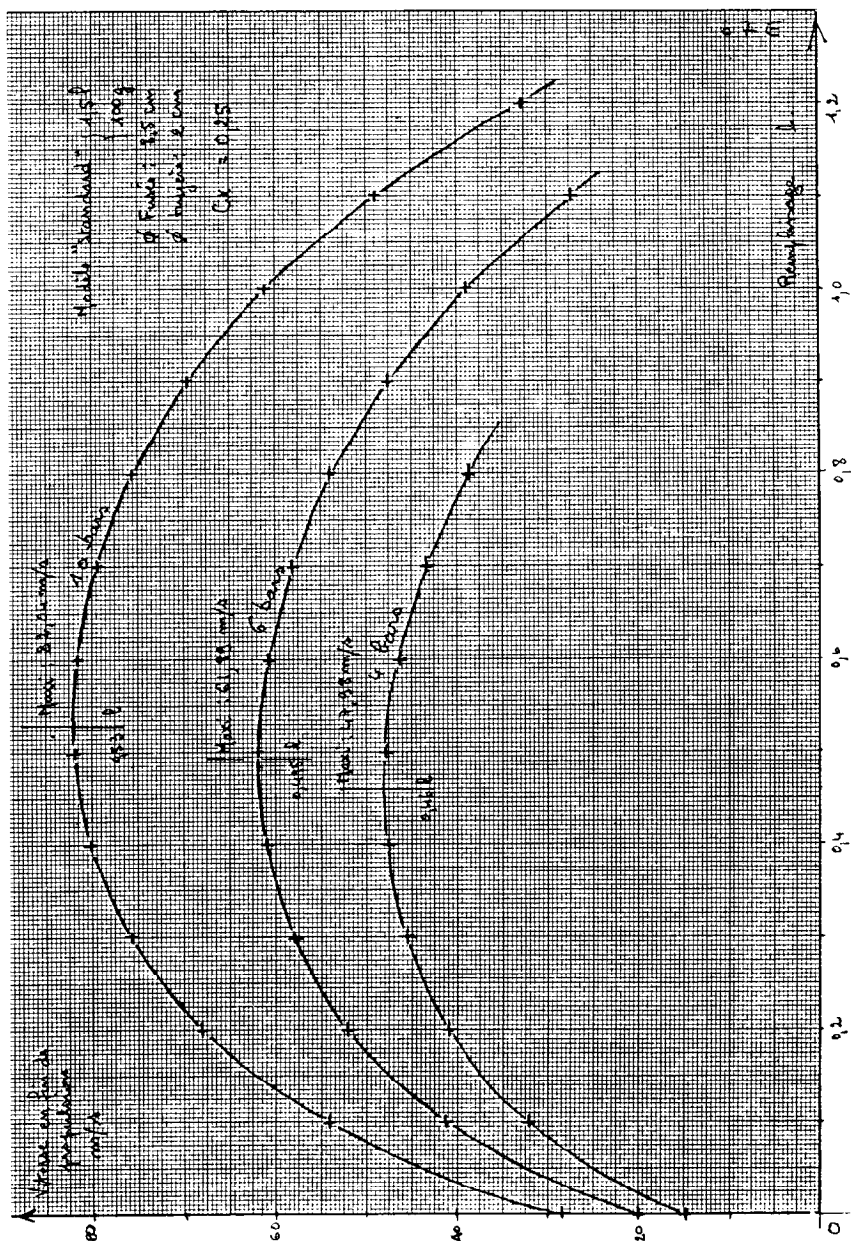


Tableau 3 : Prévisions théoriques

(calculs réalisés par un modeste
ZX 81 - 16 K)

MODELE STANDARD

PRESSION AU DEPART (EN BARS) ?
0 BARS
VOLUME DE LIQUIDE (EN L) ?
0.6 L
CX (ENTRE 0.1 ET 1...)?
0.3

Cf tableau II

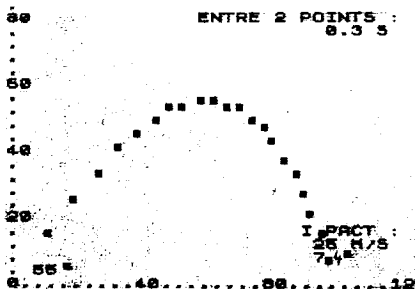
données particulières du vol

AVEC CES DONNEES ON OBTIENT :
DE LA PROPULSION : 0.1284

ATEINTE : 62.2 M/S
PARCOURS : 522 M/575
: 28.33 KG.M/S

SUITE BALISTIQUE : GOTO 450

résultats calculés par l'ordinateur
(pour la phase de propulsion seule)



trajectoire de la fusée prévue par
l'ordinateur

55° : angle de départ choisi, par
rapport à l'horizontale

ANGLE (DEGRES) / HORIZON : 55°

0.35 S	Y : 16 M	X : 10.1 M
0.5 S	Y : 23 M	X : 17.1 M
0.75 S	Y : 30.5 M	X : 23.3 M
1 S	Y : 38.7 M	X : 28 M
1.25 S	Y : 41.9 M	X : 34.2 M
1.5 S	Y : 45 M	X : 39 M
1.75 S	Y : 49.3 M	X : 43.5 M
2 S	Y : 51.9 M	X : 47.8 M
2.25 S	Y : 53.7 M	X : 52.1 M
2.5 S	Y : 54.8 M	X : 55.9 M
2.75 S	Y : 55.8 M	X : 59.6 M
3 S	Y : 56.1 M	X : 63.3 M
3.25 S	Y : 54.5 M	X : 66.9 M
3.5 S	Y : 53.8 M	X : 70.1 M
3.75 S	Y : 51.4 M	X : 73.4 M
4 S	Y : 49.1 M	X : 75.6 M
4.25 S	Y : 46.3 M	X : 79.5 M
4.5 S	Y : 42.9 M	X : 82.3 M
4.75 S	Y : 39.2 M	X : 85.1 M
5 S	Y : 35 M	X : 87.7 M
5.25 S	Y : 30.4 M	X : 90.1 M
5.5 S	Y : 25.8 M	X : 92.5 M
5.75 S	Y : 20.3 M	X : 94.7 M
6 S	Y : 14.8 M	X : 95.7 M
6.25 S	Y : 9 M	X : 98.7 M
6.5 S	Y : 2.9 M	X : 100.6 M

VITESSE A L'IMPACT : 25 M/S
ANGLE D'IMPACT : 74°

autre manière de donner les résultats :
les points fournis permettent un
tracé plus précis de la trajectoire

N.-B.

Dans ces calculs il a été tenu compte
de la vitesse acquise lors de la
phase de dégagement de la fusée (expul-
du bouchon). Le tableau III n'en tient
pas compte.

Tableau 4 : Exemple de prévisions théoriques

5. MESURES

L'intérêt des calculs s'accroît s'ils sont confrontés à des mesures. La mesure dont le résultat serait le plus convaincant quant à la validité des considérations théoriques précédentes est celle de la force de propulsion. Mais la brièveté de son existence, sa valeur relativement élevée et variable en fonction du temps rendent l'opération impossible par des moyens simples.

Il faudra donc se rabattre sur d'autres grandeurs plus accessibles à la mesure, ainsi celle de la vitesse en un point de la trajectoire, de l'impulsion, de l'altitude maximale atteinte et du temps de vol. Pour une fusée donnée (Cx, masse à vide, etc... fixés) les paramètres variables sont la quantité d'eau initiale et la pression. Pas de problème pour connaître la quantité d'eau, par contre la connaissance de la pression nécessite d'inclure un manomètre de qualité dans le dispositif de lancement. Ceux qui équipent d'origine les pompes à pied ordinaires n'ont généralement pas les qualités exigées pour des mesures valables.

La plus simple des mesures possibles est celle de la durée de vol. Un simple chronomètre suffit, depuis un poste d'observation un peu écarté. A titre d'exemple voici des mesures de la durée de la descente seule pour un tir voisin de la verticale. Elles permettent le tracé d'une courbe semblable à sa correspondante dans le tableau III (position maximum).

Fusée	Caractéristiques «standard» sauf Masse à vide: 140 g				Pression: 4 bars			Cx : inconnu	
Masse d'eau au départ (g)	0	140	280	420	560	700	840	980	1 120
Durée de la descente (s)	2,05	3,80	4,25	4,75	4,65	4,35	3,95	3,25	2,55

Un peu plus difficile est la mesure de la hauteur maximale atteinte. La mesure de la durée de la chute n'en donne qu'une idée, compte tenu de l'importance de la résistance de l'air. On peut faire appel à l'optique et à la géométrie : c'est la visée, depuis un seul point d'observation pour un vol vertical, depuis deux pour un vol oblique, qui permet de relever le ou les angles qui entreront dans le calcul avec les distances connues au sol. C'est simple... sur le papier. La difficulté naît du mouvement. Plus simplement on pourra s'inspirer de la technique suivante, qui perturbe un peu, il est vrai, le vol de la fusée : attacher à

la tuyère l'extrémité du fil de nylon d'une canne équipée pour la pêche au lancer. L'effort demandé à la fusée pour le déroulement du fil est minime. On prend soin d'arrêter ce déroulement quand la fusée atteint l'apogée de sa trajectoire, et il n'y a plus qu'à mesurer la longueur du fil revenu au sol.

La mesure de la vitesse au cours des tout premiers mètres est concevable. Un banc de mesure de laboratoire demande un guide, un dispositif d'arrêt non destructif, et des capteurs de vitesse où de temps ; le tout peut mesurer 2 à 3 mètres de long et s'utiliser en position plus ou moins inclinée. Expérience faite, il vaut mieux ne pas dépasser 3 bars pour ménager le dispositif d'arrêt. Selon la conception du banc, les entraves au mouvement de la fusée modifieront plus ou moins la vitesse : il faut s'attendre à des valeurs inférieures à celles obtenues lors d'essais « libres ». Voici un échantillon des résultats obtenus :

Conditions expérimentales : modèle standard, sauf masse à vide (65 g).

Pression : 2 bars.

Les vitesses ont été relevées en deux fois : 4 capteurs « chronociné » sur le banc - les modèles employés n'ont pas donné de résultats fiables au-delà de 25 m/s.

Masse d'eau : 300 g. Pour des raisons techniques le temps 0 ne correspond pas à l'instant du départ.

Distance du capteur à la position de départ (cm)	6	10,5	14	22,5	26,5	56,5	96,5
Vitesse de passage devant le capteur (m/s)	5,19	8,06	9,81	13,16	14,98	20,9	25,6
Temps (relatif) (s)	0,0165	0,0230	0,0264	0,0344	0,0356	0,0519	0,0688

Ces résultats sont à rapprocher de ce que fournit l'ordinateur pour les mêmes données (Cx estimé à 0,5) :

Position par rapport au départ (cm)	5,8	6,4	10	10,8	13,6	14,7	21,8	23,1	26	27,5	55,5	58
Vitesse calculée (m/s)	5,45	5,84	7,87	8,28	9,57	10	12,78	13,3	14,35	14,9	24,4	25,2

Prévisions théoriques et mesures concordent convenablement jusqu'à une trentaine de centimètres. Une bonne part de l'écart enregistré

au-delà est imputable à la conception du banc de mesure, dont la partie essentielle est un tube.

Une autre grandeur physique est importante en matière d'ergols pour fusées : l'impulsion spécifique. Celle-ci, pour une fusée à eau, dépendra de la pression initiale. La mesure que l'on peut envisager est celle de l'impulsion totale. L'idée à mettre à profit est que la brièveté de la propulsion permet d'assimiler son effet à celui d'un choc quand on lui donne à ébranler une masse importante. Le dispositif peut s'inspirer de la machine d'Atwood dont l'inertie aura comme ordre de grandeur celle d'une masse de 10 à 20 kg : la mesure de la vitesse maximale obtenue permet le calcul de l'impulsion totale fournie au cours de la propulsion.

Voici un échantillon de mesures réalisées avec un dispositif d'inertie totale équivalant à 17 kg, pour une pression initiale de 3 bars. Le paramètre variable est la quantité d'eau initiale. La vitesse maximale a été obtenue grâce à plusieurs capteurs «chronociné». Les prévisions théoriques de l'ordinateur ont été confrontées aux résultats des mesures. Toutes tiennent compte de l'effet de l'extraction du dispositif de lancement qui s'ajoute à celui de la propulsion par réaction proprement dite.

Masse d'eau (g)	0	140	280	420	560	700	840	980
Vitesse maximale (m/s)	0,48	0,67	0,80	0,93	0,99	1,06	1,00	0,97
Impulsion «mesurée» (kg. m/s)	8,16	11,39	13,60	15,81	16,83	18,02	17,00	16,49
Impulsion théorique	11,11	14,23	16,96	19,22	20,90	21,82	21,72	19,31

Placer les points théoriques et pratiques sur un même graphique fournit deux courbes sensiblement parallèles. Les écarts s'expliquent par la non prise en compte des frottements à deux niveaux : ceux du dispositif «Atwood», et ceux de la phase d'extraction du dispositif de lancement.

6. EN GUISE DE CONCLUSION

Les développements, non exhaustifs, qui précèdent, n'ont d'autre ambition que d'éveiller la curiosité des professeurs de sciences physiques, et de faire entrevoir l'intérêt pédagogique de la fusée à eau.

Objet ludique et scientifique, la fusée hydropneumatique devrait faire son trou dans les clubs scientifiques. Elle permet, d'une façon moins coûteuse, davantage d'études et de variantes techniques que les classiques «microfusées» à poudre, nettement plus petites et plus figées au plan expérimental.

De même elle pourrait prendre place, comme application concrète, dans un «P.A.E.» consacré à l'espace.

Des solutions autres que les miennes seront trouvées aux problèmes techniques posés par ceux qui voudront bien s'y intéresser, en particulier pour réaliser des fusées plus longues, ou à deux étages, ou munies d'un parachute pour la descente, ou encore au plan des mesures.

Peut-être aussi que des lecteurs auront des idées pour des expériences à embarquer, je veux dire autres que celles du genre : «résistance aux fortes accélérations des cafards et autres coléoptères».

Place à l'imagination...

7. SOURCES

J'ai puisé les éléments théoriques dans :

- Encyclopedia Universalis, articles Fluides (mécanique des) et Propergols
- Encyclopédie des Sciences Industrielles (Quillet), tome «Mécanique» 1974 (... quelques erreurs)
- Exposé de Monsieur J.C. Le Stang, du CNES, sur la «Propulsion Spatiale» au «Stage d'information sur les sciences et techniques spatiales» de St Nazaire en septembre 1977.

Je n'ai pas connaissance d'ouvrages traitant spécifiquement de la propulsion hydropneumatique. Je serais reconnaissant à ceux qui en connaissent de me le faire savoir.

Je remercie Monsieur Maurice Dubois, professeur honoraire à la Faculté des Sciences de l'Université Catholique d'Angers d'avoir bien voulu contrôler les aspects théoriques de mon travail.

Si des collègues voulaient des éléments moins succincts que ceux figurant dans cet article, je me tiens volontiers à leur disposition pour les fournir.

POST-SCRIPTUM (février 1991)

L'article précédent a été écrit en juin 1987. Beaucoup d'eau a coulé sous les ponts... et les fusées à eau depuis.

- Pour le dispositif de la figure 1, un ennui : les bouchons à vis ont pratiquement détrôné les bouchons lisses !
 - Mon ordinateur n'est plus le ZX81, mais un «P.C.» : les programmes de calcul sont disponibles sur disquette standard.
 - Pour le matériel volant ou de lancement des progrès sensibles ont été enregistrés quant à la fiabilité, notamment grâce à une électronique embarquée pour le fonctionnement du parachute. Des fusées à étages ou à «boosters» sont en cours d'amélioration. Et la première photo aérienne est pour bientôt.
 - Deux occasions pour voir de près de quoi il s'agit :
 - Exposciences 91 à la Roche-sur-Yon (11-14 avril 1991).
 - Deux jours d'échanges et d'expérimentation avec des amateurs de fusée à eau, les 26 et 27 avril à La Roche-sur-Yon.
- (Renseignements auprès de l'auteur :
Tél. : (16) 51.37.04.74 poste 12 - Télécopie : (16) 51.36.06.22).