



LEA GRITON

VICTOR KOUOI

CLARA SCHISCHLIK

VOYAGE D'UNE NAVETTE SPATIALE



**ECOLE ALSACIENNE
PARIS**

Professeurs de Physique : Brigitte Piveteau et Rodolphe de Tourris

SOMMAIRE :

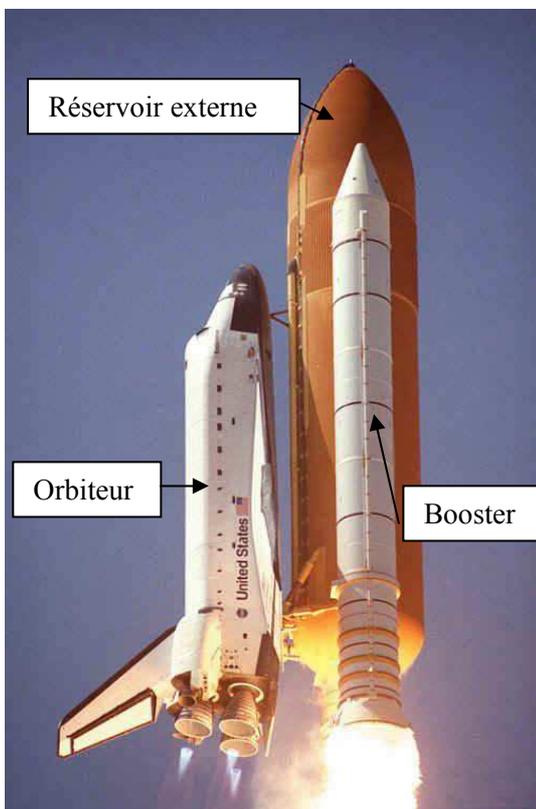
Introduction.....	p. 3
I. Propulsion de la navette : Principe de la troisième loi de Newton, dite de « l'action et de la réaction ».....	p. 4
1. <u>Dispositif expérimental</u>	
2. <u>Protocole d'exploitation des fichiers vidéo</u>	
3. <u>Résultats expérimentaux</u>	
4. <u>Equation théorique du mouvement</u>	
5. <u>Comparaison des résultats expérimentaux et de la théorie</u>	
6. <u>Comparaison de nos expériences avec les fusées</u>	
II. Rentrée dans l'atmosphère (à compléter).....	p. 14
III. Atterrissage et utilité des ailes Delta.....	p. 15
1. <u>Présentation des forces qui s'exercent sur un avion :</u>	
2. <u>Vocabulaire spécifique de l'aile d'un avion</u>	
3. <u>Origine et expression de la portance</u>	
4. <u>Variation du coefficient de portance</u>	
5. <u>Caractéristiques de l'aile delta</u>	
Conclusion.....	p. 18

Introduction :

L'année dernière, nous avons assisté aux à la finale des Olympiades de physique au Palais de la Découverte à Paris. Nous avons eu envie d'y participer nous aussi, afin de prolonger nos TPE respectifs. C'est ainsi que nous avons commencé des recherches. Nous nous sommes mis d'accord pour profiter de cette expérience pour travailler sur un thème lié à l'Année mondiale de l'astronomie. C'est ainsi que, en mettant en commun nos centres d'intérêts, nous avons décidé de nous intéresser au déroulement du voyage d'une navette spatiale.

Le concept de la navette spatiale américaine est sans doute, du point de vue technologique, la seule innovation vraiment marquante depuis la construction des premières fusées en 1944. La navette Spatiale américaine est, par définition, un véhicule spatial réutilisable, dont la mission consiste en grande partie à approvisionner en modules la Station Spatiale Internationale (ISS), et ce afin de pourvoir à son assemblage. La navette sert également à réparer les satellites défectueux. Son pas de tir est situé à Cap Canaveral. La navette spatiale américaine est composée de trois parties principales :

- Deux Boosters à propergol solide, qui délivrent 80% de la poussée au décollage ;
- Le réservoir externe, qui alimente en propergol le moteur principal durant le lancement ;
- L'orbiteur, qui accueille les membres d'équipage et est équipé pour l'arrimage à la Station Spatiale Internationale.

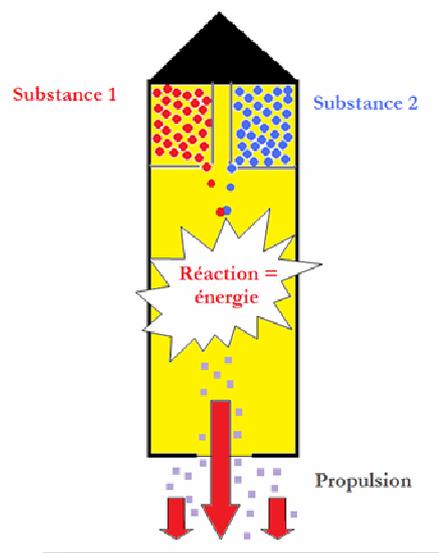


Peut-on simuler de façon simple quelques principes physiques mis en œuvre lors du vol de la navette spatiale ?

Nous allons étudier ainsi le déroulement de ce voyage en trois étapes. Dans un premier temps nous allons nous intéresser à la phase de décollage et au principe de propulsion des lanceurs. La deuxième partie sera consacrée à la rentrée dans l'atmosphère de la navette après avoir terminé ses missions en orbite. Et enfin dans une troisième partie nous allons comparer la navette avec le Concorde pour comprendre l'utilité des ailes Delta.

1 : Propulsion de la navette : Principe de la troisième loi de Newton, dite de « l'action et de la réaction ».

Pour être envoyée dans l'espace, une navette spatiale utilise un lanceur qui fonctionne sur le même principe de propulsion que les autres fusées (comme les fusées Ariane par exemple) : le principe de la propulsion par réaction. On peut en effet fabriquer un moteur à partir d'une source d'énergie et d'une source de masse : la source d'énergie sert à éjecter la masse à grande vitesse ; par réaction, l'éjection de masse engendre une force propulsive qui permet à l'appareil de décoller. Dans les fusées actuelles, les deux sources sont internes car on utilise principalement la propulsion chimique : deux substances chimiques stockées dans la fusée réagissent et c'est l'énergie dégagée par la ou les réactions chimiques qui est exploitée pour expulser le gaz produit.



Nous avons voulu étudier le principe d'action et de réaction à l'origine de ce système de propulsion. Ce principe est une conséquence de la troisième loi de Newton selon laquelle lorsqu'un corps A exerce une force \vec{F}_{AB} sur un corps B, le corps B exerce au même instant une force de même direction mais de sens opposé \vec{F}_{BA} sur le corps A.

1. Dispositif expérimental

Nous avons construit des bateaux "à réaction". Un bateau est constitué d'un béccher plastique gradué entouré de flotteurs en polystyrène. La taille et la disposition des flotteurs sont trouvées par tâtonnements. Il faut que le gobelet, une fois rempli d'eau, flotte. De fait, après plusieurs essais, nous avons réussi à fabriquer 3 bateaux de taille et de masse sensiblement identiques.

Le gobelet est percé à sa base puis rempli d'un liquide coloré (le plus souvent il s'agit d'eau colorée mais nous avons aussi utilisé d'autres liquides comme l'alcool).

Ainsi, lorsqu'on place le bateau dans un bac rempli d'eau, l'écoulement du liquide contenu dans le bateau provoque le déplacement du bateau dans la direction opposée à celle de l'éjection du liquide coloré.

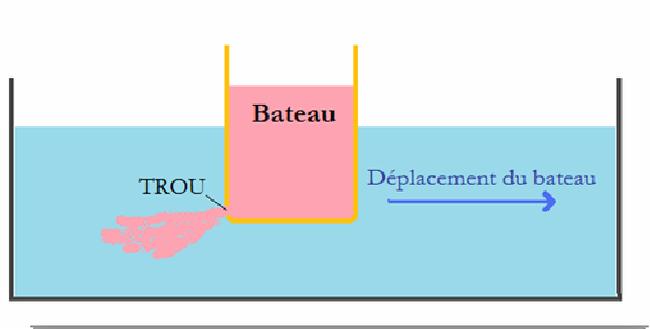


Schéma réalisé avec Paint : fonctionnement du bateau

Chaque gobelet est marqué d'un point rouge dont on suivra le mouvement.

Pour chaque bateau, le protocole de l'expérience est le même:

- on prépare un fichier Cinéris et une webcam de façon à capturer la vidéo du déplacement du bateau et à pouvoir l'exploiter.
- on remplit le bécber-bateau d'un grand volume d'eau colorée par du permanganate de potassium. On attend quelques secondes que les vagues produites par le plongement du bateau disparaissent, puis on lance la vidéo. Lorsque le volume d'eau colorée atteint un repère préalablement défini sur le bécber, on lâche délicatement le bateau. Celui-ci avance jusqu'au bord opposé du bac.

Toutes les vidéos ont été réalisées à la fréquence de 5 Hz (5 images par seconde).

Au cours de notre travail, nous nous sommes rendus compte que nous devons aussi connaître le débit massique de l'eau colorée. Pour connaître ce paramètre, nous avons fait l'hypothèse que le débit était le même que si le bateau ne flottait pas (voir paragraphe 4 de cette partie). Le bécber posé sur un support élévateur était rempli d'eau et sa vidange était filmée. Cette vidéo nous permettait ainsi de suivre l'évolution de la quantité de liquide dans le bécber.



Bécber en train de se vider

2. Protocole d'exploitation des fichiers vidéo

2.1 Exploitation des vidéos des bateaux qui avancent

Cette exploitation a été réalisée en utilisant les logiciels Cineris et Excel.

Dans un premier temps, il faut sélectionner dans la vidéo réalisée, les images exploitables. Ensuite, avec le logiciel Cineris, nous pointons, image par image, la position du "point rouge" du bateau. Nous obtenons un tableau des coordonnées (X,Y) de ce point au cours du temps. Pour plus de facilité, nous exportons ces valeurs vers un fichier Excel, logiciel que nous maîtrisons davantage.

Dans le logiciel Excel, nous pouvons, pour chaque position i du bateau, calculer sa vitesse V en utilisant les formules suivantes:

$$V_X(t_i) = \frac{X(t_{i+1}) - X(t_{i-1})}{t_{i+1} - t_{i-1}}$$

$$V_Y(t_i) = \frac{Y(t_{i+1}) - Y(t_{i-1})}{t_{i+1} - t_{i-1}}$$

$$V = \sqrt{V_X^2 + V_Y^2}$$

Bien évidemment, ces formules ne peuvent être appliquées pour les première et dernière positions du bateau.

On pourrait envisager d'obtenir de manière identique, l'accélération du bateau en appliquant les formules:

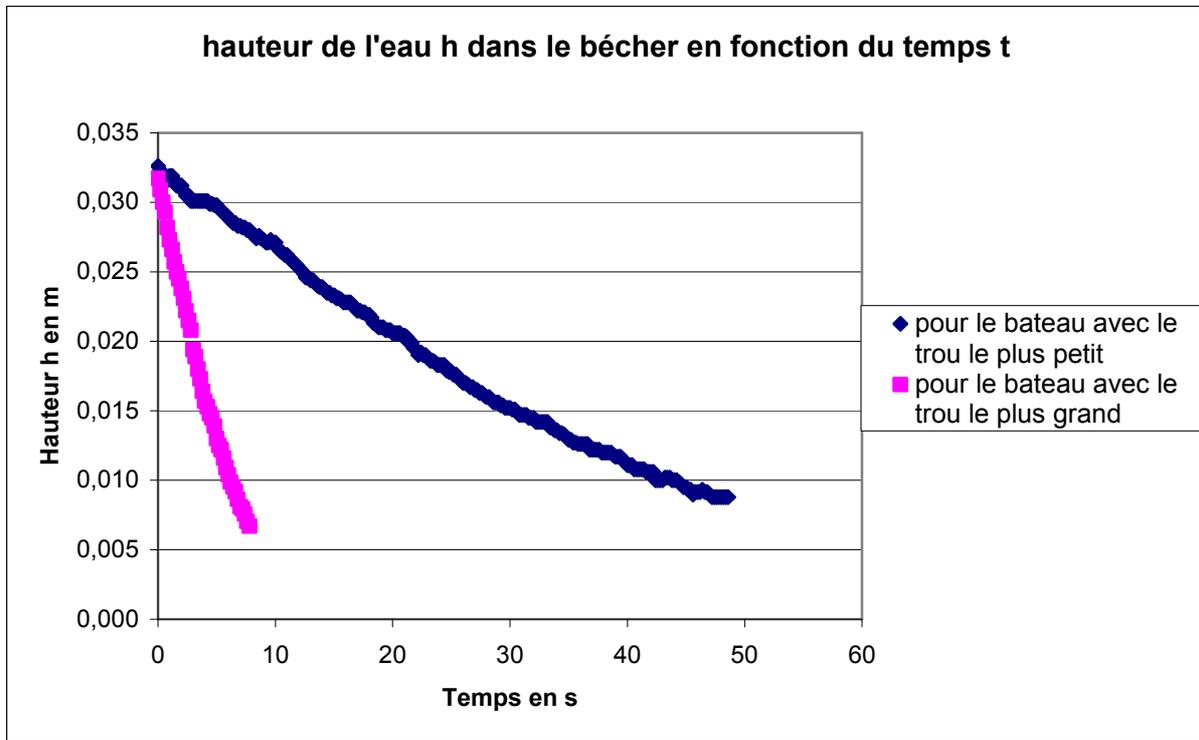
$$A_X(t_i) = \frac{V_X(t_{i+1}) - V_X(t_{i-1})}{t_{i+1} - t_{i-1}}$$

$$A_Y(t_i) = \frac{V_Y(t_{i+1}) - V_Y(t_{i-1})}{t_{i+1} - t_{i-1}}$$

Cependant, un tel traitement des valeurs des vitesses ne donne en général aucun résultat satisfaisant pour l'accélération. En effet, comme on le verra par la suite, les courbes d'évolution de la vitesse au cours du temps sont très "bruitées".

2.2 Exploitation des vidéos des vidanges des bateaux

Les logiciels utilisés sont les mêmes que dans le paragraphe précédent. Avec le logiciel Cineris, nous pointons, image par image, la position de la surface libre du liquide dans le béccher. Nous obtenons ainsi simplement une courbe $h(t)$ où h représente la hauteur du liquide dans le béccher (voir graphe page suivante).



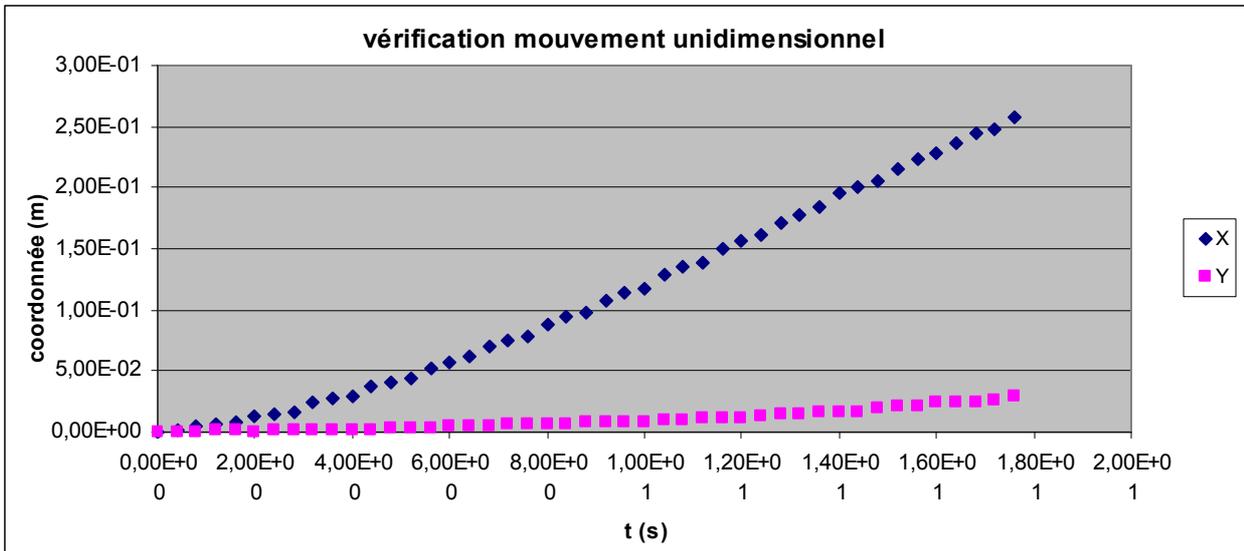
3. Résultats expérimentaux

Nous avons étudié 3 bateaux différents fonctionnant à l'eau (le liquide qui remplit le b cher est de l'eau colorée avec un peu de permanganate de potassium); ces trois bateaux diff rent par le diamètre du trou d'éjection du liquide.

Nous avons aussi essayé de faire marcher un bateau au cyclohexane. Ce liquide nous paraissait intéressant car de viscosité proche de celle de l'eau mais de densité différente. Malheureusement, les résultats concernant ce bateau ne sont pas exploitables car le cyclohexane réagit chimiquement avec le polystyrène et les flotteurs se d sagr geaient au fur et à mesure de l'avancée du bateau. Nous sommes actuellement en train d'étudier des bateaux fonctionnant à l'alcool.

3.1 Nature du mouvement

Nous vérifions d'abord que le mouvement du bateau s'effectue dans un sens opposé à la vitesse d'éjection du liquide. Les courbes suivantes montrent l'évolution des coordonnées (X,Y) du point repère du bateau le plus lent avec le temps.

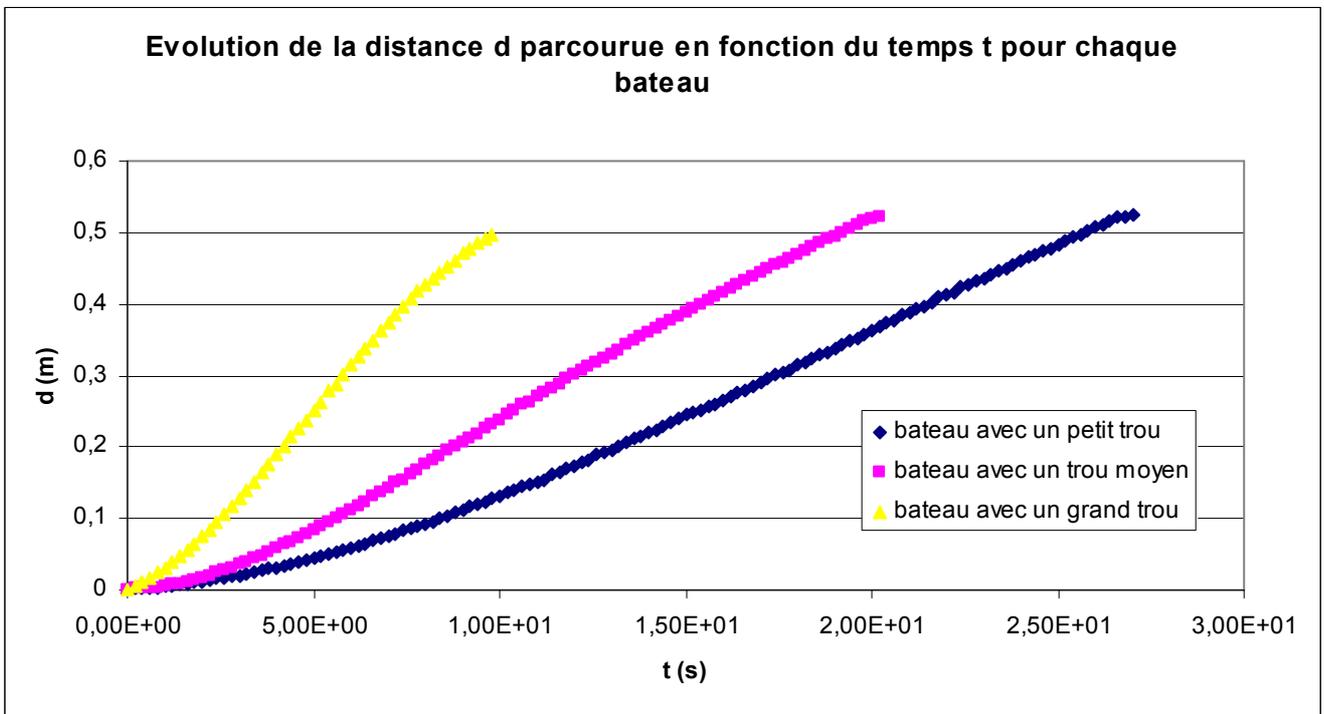


Les résultats sont identiques pour tous les bateaux fonctionnant à l'eau.

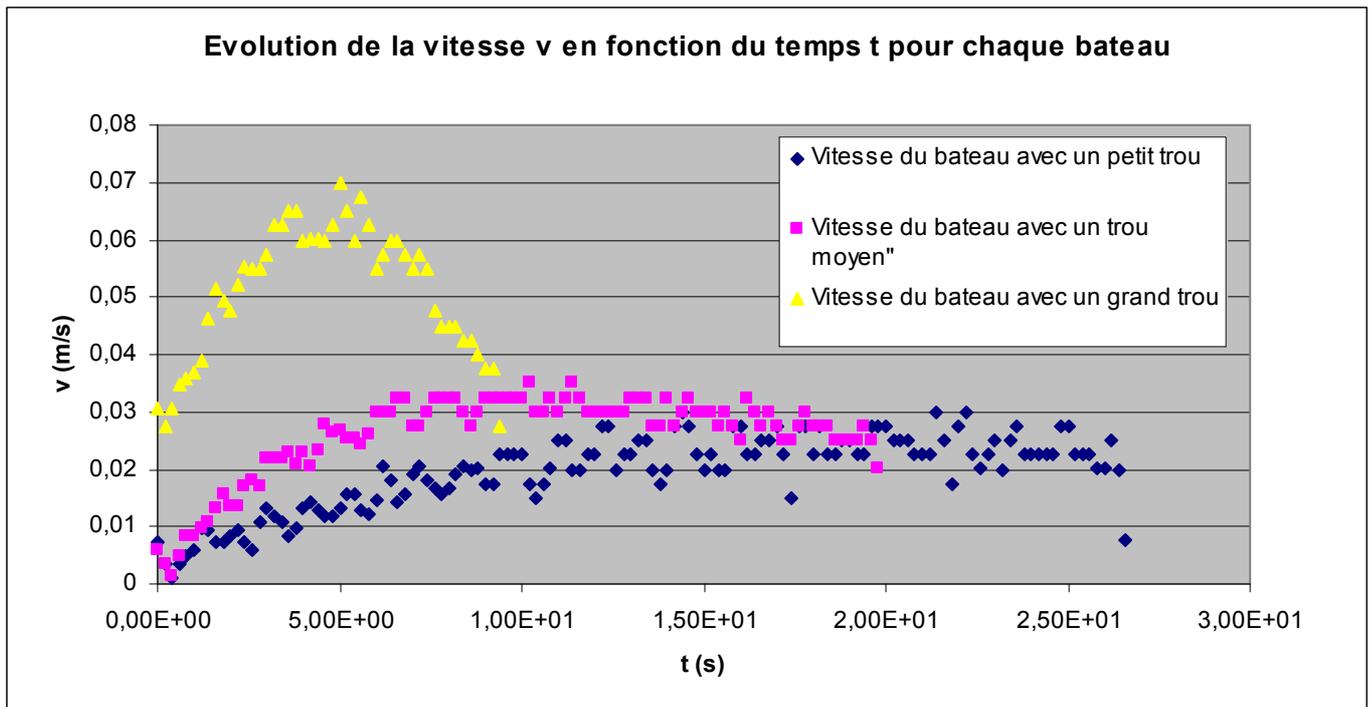
Il est évident que le mouvement suivant l'axe Y est négligeable par rapport à celui suivant l'axe X. Ainsi, pour étudier l'évolution de la vitesse du bateau, on peut se contenter d'étudier $V_X(t)$.

3.2. Distance parcourue par les bateaux et évolution de la vitesse

Les courbes d'évolution de la distance parcourue sont les suivantes:



Les courbes d'évolution de la vitesse sont les suivantes :



Commentaires de ces courbes :

L'étude des courbes des distances en fonction du temps montre que :

- Un bateau parcourt une même distance en un temps d'autant plus court que le trou d'éjection de l'eau est grand. Par exemple, le bateau avec le plus grand trou (courbe jaune) parcourt 50 cm en environ 10 s, tandis que le bateau avec le trou de taille intermédiaire (en rose) parcourt la même distance en 20 s, et celui avec le plus petit trou (en bleu) en 26 s.
- Les courbes s'arrêtent quand le bateau a parcouru environ 50 cm : c'est en effet la longueur de la bassine dans laquelle nous avons réalisé les expériences.

Ensuite, l'étude de la vitesse en fonction du temps nous permet de déterminer une phase d'accélération, puis une phase de mouvement rectiligne uniforme, plus ou moins courte selon le bateau. En effet, pour le bateau avec un grand trou, cette phase est très courte, tandis que pour le bateau avec un petit trou cette phase dure plus d'une dizaine de secondes. On remarque que pour le bateau avec un gros trou la vitesse chute : on l'explique par le fait qu'il n'y a plus d'eau dans le bateau au bout d'un certain temps.

3.3. Influence de la densité du liquide éjecté (à venir)

4. Equation théorique du mouvement

4.1 Equation générale du mouvement d'un solide de masse variable

Cette équation se trouve facilement dans les ouvrages de mécanique. Elle est délicate à établir car il faut définir avec soin le système que l'on étudie; En règle générale, le système étudié comprend le solide et l'espèce éjectée (eau, ou gaz par exemple). Si l'on considère que ce système est isolé ou pseudo-isolé alors la conservation de la quantité de mouvement fournit la relation suivante:

$$M \frac{dv}{dt} = \alpha v_0$$

où M désigne la masse du solide à l'instant t, v la vitesse du solide dans la direction de la vitesse d'éjection de l'eau ou du gaz, α le débit massique de l'eau ou du gaz, et v_0 la vitesse d'éjection de l'eau ou du gaz **par rapport au solide**.

La masse M varie en fonction du temps: $M(t) = M_0 - \alpha t$ (M_0 désigne la masse du bateau au moment du départ). Ce qui donne l'équation suivante:

$$(M_0 - \alpha t) \frac{dv}{dt} = \alpha v_0 \quad (1)$$

4.2 Equation du mouvement dans le cas du bateau à réaction

Dans notre cas, nous pouvons exprimer le débit massique et la vitesse v_0 .

Notre bateau est un cylindre (de section S) rempli d'une hauteur H de liquide, qui s'écoule par un orifice d'aire s. Notons h la hauteur de la surface libre du liquide par rapport à l'orifice d'éjection. La pression s'exerçant sur le liquide contenu dans le bécber est la pression atmosphérique P_A . La pression au niveau de l'orifice est égale en toute rigueur à $P_A + p$ où p désigne la pression due à la hauteur de l'eau dans le bac. Néanmoins, au cours de toutes nos expériences, l'orifice d'éjection se trouve à quelques centimètres sous la surface de l'eau du bac. La surpression p est donc égale à quelques centaines de Pascal (100 Pa pour 1 cm) ce qui représente une surpression de l'ordre de $10^{-3} P_A$. L'eau colorée coule donc sous l'effet de la gravité sans être poussée par une différence de pression. L'équation de Bernoulli fournit l'expression de la vitesse d'écoulement du liquide par rapport au bateau:

$$v_0 = \sqrt{\frac{2ghS^2}{(S^2 - s^2)}}$$

Nous pouvons simplifier cette expression en négligeant s^2 devant S^2 . En effet, le diamètre D du cylindre est de 7,4 cm alors que le diamètre d de l'orifice d'éjection ne dépasse pas 7 mm. Soit:

$$\frac{S^2}{s^2} = \frac{D^4}{d^4} \approx \frac{1}{10^{-4}} \approx 10^4 .$$

Nous retrouvons alors le résultat bien connu: $v_0 = \sqrt{2gh}$.

D'autre part le débit massique ρ est relié à la variation de hauteur de liquide dans le bécber. Lorsque cette hauteur diminue d'une quantité dh, alors un volume Sdh est éjecté du bécber.

Si on notant ρ_{liq} , la masse volumique du liquide qui remplit le b cher, ce volume correspond à une masse dm éjectée telle que: $dm = \rho_{\text{liq}}Sdh$.

L'équation (1) devient donc:

$$(M_0 - \rho_{\text{liq}}S \left| \frac{dh}{dt} \right| t) \frac{dv}{dt} = \rho_{\text{liq}}S \left| \frac{dh}{dt} \right| \sqrt{2gh} \quad (2)$$

Expression dans laquelle h est fonction du temps t .

Nous pouvons aller plus loin: le niveau du liquide descend à la vitesse de :

$$\frac{dh}{dt} = -\sqrt{\frac{2ghs^2}{S^2 - s^2}} \quad (3)$$

Dans cette expression, nous pouvons remplacer $S^2 - s^2$ (puisque $\frac{S^2}{s^2} \geq 10^4$) par S^2 et il vient donc:

$$\frac{dh}{dt} = -\sqrt{\frac{2ghs^2}{S^2}} \quad (4)$$

$$\frac{dh}{dt} = -\frac{s}{S} \sqrt{2g} \sqrt{h}$$

$$\frac{dh}{\sqrt{h}} = -\frac{s}{S} dt \sqrt{2g}$$

Ce qui donne par intégration:

$$2\sqrt{h} = -\frac{s}{S} t \sqrt{2g} + \text{constante}$$

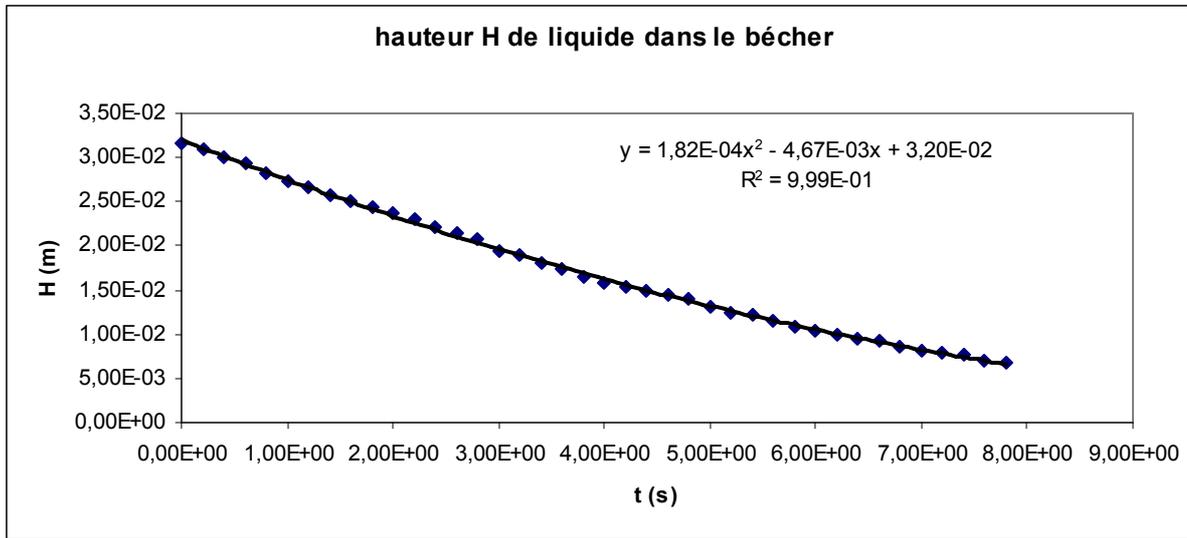
$$\sqrt{h} = -\frac{st}{2S} \sqrt{2g} + \sqrt{h_0}$$

où h_0 désigne la hauteur de liquide par rapport à l'orifice d'éjection à la date $t = 0$.

On obtient donc: $h(t) = at^2 - bt + c$ avec:

$$a = \frac{gs^2}{2S^2}, \quad b = \frac{s}{S} \sqrt{2gh_0} \quad \text{et} \quad c = h_0.$$

Les orifices d'éjection étant très faibles il est difficile de calculer avec précision l'aire s . Mais nous avons film  les vidanges des b chers et nous disposons des courbes $h(t)$ pour chaque b cher. La modélisation de ces courbes par une fonction polynomiale du deuxième degré est excellente. Pour exemple, nous montrons ci-dessous le résultat pour le bateau au plus gros trou :



A partir de l'équation de la courbe de tendance, nous pouvons ainsi obtenir la valeur du rapport $\frac{s}{S}$, puis les coefficients a, b et c pour chaque bateau.

Les résultats sont les suivants:

Bateau	$\frac{s}{S}$	a (m.s ⁻²)	b (m.s ⁻¹)	c (m)
petit orifice	$9,0 \cdot 10^{-4}$	$4,0 \cdot 10^{-6}$	$7,5 \cdot 10^{-4}$	$3,5 \cdot 10^{-2}$
moyen orifice				$3,4 \cdot 10^{-2}$
gros orifice	$6,1 \cdot 10^{-3}$	$1,8 \cdot 10^{-4}$	$5,1 \cdot 10^{-3}$	$3,5 \cdot 10^{-2}$

Données du bateau avec le trou moyen en cours de traitement.

Connaissant l'expression de h(t), nous allons pouvoir obtenir une expression définitive de $\frac{dv}{dt}$. Repartons des expressions (2) et (4):

$$(M_0 - \rho_{liq} S \left| \frac{dh}{dt} \right| t) \frac{dv}{dt} = \rho_{liq} S \left| \frac{dh}{dt} \right| \sqrt{2gh}$$

$$\frac{dh}{dt} = -\sqrt{\frac{2ghs^2}{S^2}}$$

$$(M_0 - \rho_{liq} S t \sqrt{\frac{2ghs^2}{S^2}}) \frac{dv}{dt} = \rho_{liq} S \sqrt{\frac{2ghs^2}{S^2}} \sqrt{2gh}$$

$$(M_0 - \rho_{liq} s t \sqrt{2gh}) \frac{dv}{dt} = \rho_{liq} s (2gh)$$

$$\frac{dv}{dt} = \frac{2\rho_{liq} sgh}{(M_0 - \rho_{liq} s t \sqrt{2gh})}$$

avec $h(t) = at^2 - bt + c$

L'expression précédente est difficile à intégrer. Dans un premier temps, nous pouvons tracer le graphe $\frac{dv}{dt}$ en fonction de t pour les différents bateaux (avec le logiciel Excel). Pour tous les bateaux, les fonctions $\frac{dv}{dt}$ sont décroissantes. On peut chercher à modéliser cette fonction avec une fonction polynomiale. Par intégration, cela permet d'obtenir une bonne approximation de $v(t)$. Les courbes $v(t)$ sont croissantes et montrent toutes un palier. Même si cela est vraiment très peu rigoureux, on peut intégrer de nouveau cette approximation de $v(t)$ pour obtenir la distance théorique parcourue par le bateau.

5. Comparaison des résultats expérimentaux et de la théorie

L'accord numérique entre la théorie et l'expérience est très mauvais. Ainsi, pour le bateau le plus rapide, la théorie donne une vitesse limite de l'ordre de 0,5 m/s alors que la vitesse de notre bateau ne dépasse pas 0,06 m/s. Les frottements fluides sont particulièrement importants au cours de l'expérience et ne sont absolument pas pris en compte dans la théorie. De même, les distances parcourues par nos bateaux n'ont rien de commun avec celles prévues par la théorie.

Cependant, il existe quelques similitudes entre nos expériences et la théorie:

- a) plus l'orifice d'éjection est gros, donc plus le débit massique est élevé, plus la vitesse limite atteinte est importante;
- b) plus l'orifice d'éjection a un faible diamètre, plus la distance parcourue par le bateau est importante.

En résumé, lorsque le débit massique diminue, le bateau va plus loin mais plus lentement.

En ce qui concerne la comparaison entre les bateaux à eau et les bateaux à alcool, nous rencontrons encore quelques difficultés d'interprétation.

6. Comparaison de nos expériences avec les fusées

Un lanceur est généralement composé d'un ou plusieurs moteurs disposés sur un ou plusieurs étages; du ou des combustibles ainsi que d'un système électronique de contrôle. La charge utile (les éléments qu'il transporte, par exemple un satellite) est toujours placée en tête sous une coiffe.

Pour les lanceurs, l'augmentation ΔV de la vitesse donnée par un étage de propulsion est:

$$\Delta V = V_e \ln(M_i/M_f)$$

avec V_e : vitesse d'éjection du gaz brûlé, M_i la masse initiale à l'allumage de l'étage et M_f la masse en fin de combustion.

Pourquoi n'avons-nous pas retrouvé cette formule pour nos bateaux? Simplement parce que cette formule n'est valable que si la vitesse d'éjection des gaz est constante, ainsi que le débit massique, ce qui n'est pas le cas pour nos bateaux. Pour cela, il faudrait que nous remplissions constamment les bateaux de façon à ce que la hauteur h d'eau dans le béccher soit constante au cours du temps.

II. Rentrée dans l'atmosphère (à compléter)

Une fois dans l'espace, la navette se trouve en orbite, à une altitude de 250km et se déplace à une vitesse d'environ 30000km.h^{-1} . C'est cette vitesse qui permet à la navette de rester en orbite et de ne pas retomber sur Terre. Pour rentrer dans l'atmosphère, la navette doit quitter cette orbite. On sait que c'est la vitesse orbitale qui la maintient à une altitude constante. Donc la navette doit perdre de la vitesse pour redescendre sur Terre. En effet, la perte de vitesse provoque la perte d'altitude.

Pour cela, la navette se retourne à 180° et se déplace à reculons. Ainsi lorsque ces réacteurs sont activés, la navette s'oppose à son sens de circulation. Il y a donc une baisse de la vitesse de la navette. A ce moment-là, la navette se décroche de la trajectoire de l'orbite, et commence à descendre vers l'atmosphère. C'est le début de la rentrée dans l'atmosphère. Au moment de la rentrée atmosphérique, la navette doit se placer avec un certain angle, que l'on appelle angle d'entrée. Comment détermine-t-on cet angle ?

- 1) Un angle trop aigu provoque une relativement faible résistance de la part de l'atmosphère. Cependant s'il est trop faible, il y a risque d'un effet de ricochet, qui aurait comme conséquence d'envoyer la navette aux confins de l'espace.
- 2) En revanche si l'angle est trop grand, la résistance de l'atmosphère sur le fuselage serait très importante, et par conséquent l'énergie transformée en chaleur détruirait la navette. De plus une rentrée avec un tel angle décuplerait sa vitesse après qu'elle ait eu traversé la couche atmosphérique. La navette serait alors trop rapide pour pouvoir s'arrêter à temps.
- 3) Il faut donc trouver un juste milieu. L'angle d'entrée est d'environ 40° par rapport à l'horizontal.

En pénétrant dans l'atmosphère, la navette subit une forte résistance, cela la ralentit considérablement, et sa vitesse passe de 30000km.h^{-1} à 300km.h^{-1} en moins d'une heure.

Pour étudier cette rentrée dans l'atmosphère et l'effet de ricochet, nous avons prévu une série d'expériences sur le phénomène de ricochet en comparant la navette rentrant dans l'atmosphère à un galet pénétrant dans l'eau.

III. Atterrissage et utilité des ailes Delta

Dans l'atmosphère, même si la navette ralentit de manière rapide, le ralentissement se fait progressivement, et n'est pas instantané. C'est pourquoi, une fois dans l'atmosphère, la navette se déplace toujours à des vitesses supersoniques ($>1000 \text{ km.h}^{-1}$).

C'est là qu'interviennent les ailes de la navette. On va voir ici que seules les ailes delta permettent des vols à de telles vitesses (vitesses supersoniques).

Pour étudier cette partie finale du voyage de la navette, nous avons étudié les ailes du Concorde, qui ressemblaient beaucoup à celles de la navette : et pour cause, cet avion devait lui aussi affronter des vitesses extrêmes.

1. Présentation des forces qui s'exercent sur un avion :

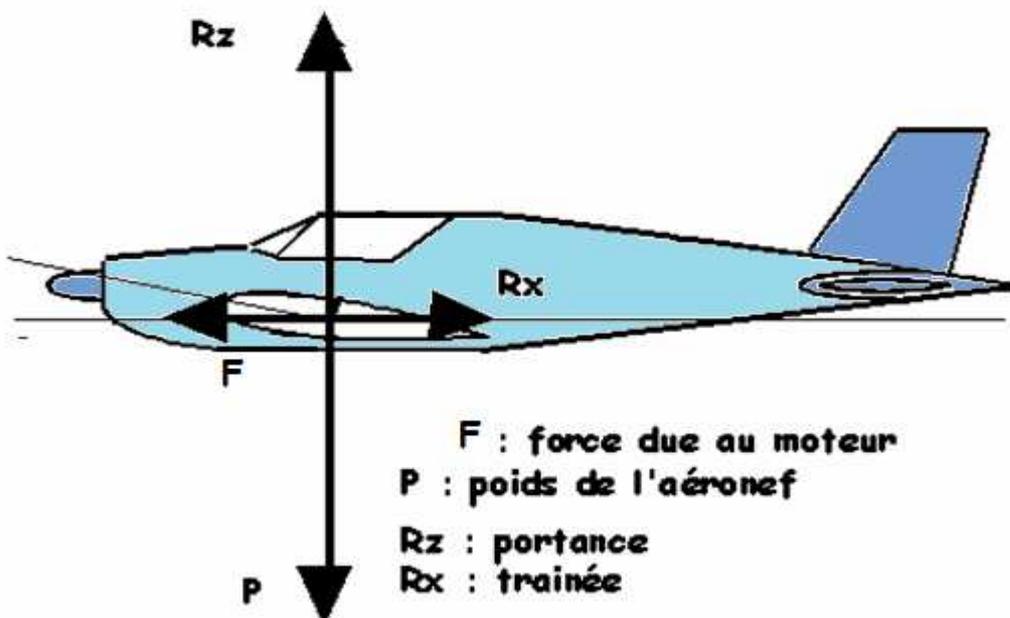
Premièrement, bien qu'équipé d'un moteur, un avion ne peut voler que s'il se déplace par rapport à l'air ambiant.

Ce sont ces déplacements d'air qui permettent à l'avion de décoller et de se maintenir en vol.

Un avion est soumis à quatre forces pendant le vol :

- La force la plus importante est sans aucun doute la portance.
- La poussée est la force qui permet à l'avion d'avancer dans l'air. Ce sont les gaz qui sortent des réacteurs qui propulsent l'avion vers l'avant (voir première partie sur la propulsion)
- La traînée est une force de sens opposée à la poussée (vers l'arrière de l'appareil). Cette force est due aux frottements de l'air sur le fuselage de l'avion. La traînée dépend donc de la forme du fuselage et de l'aile.
- Le poids. Comme tous les objets, l'avion est attiré vers la terre. La masse de l'avion dépend du modèle mais aussi du nombre de passagers, de la masse des bagages et de l'essence embarquée.

Pour que l'avion vole il faut que la portance soit supérieure au poids. La portance et la traînée sont des forces aérodynamiques qui apparaissent du seul fait que l'avion se déplace.



2. Vocabulaire spécifique de l'aile d'un avion : (source : dassault-aviation.com)

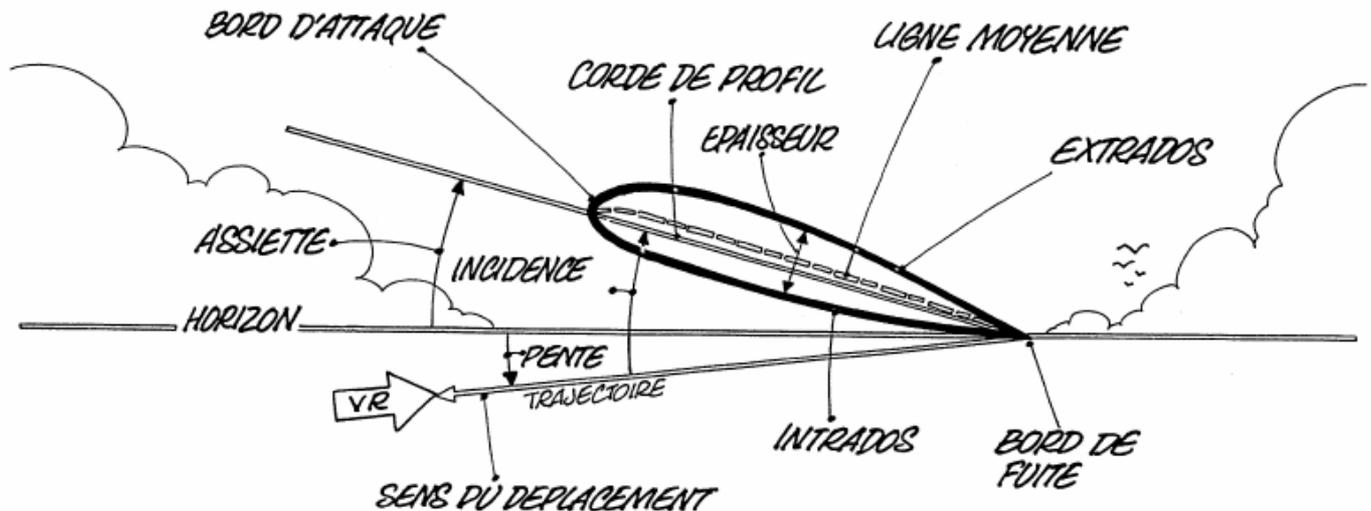


Schéma de la coupe d'une aile.

3. Origine et expression de la portance.

En vol, l'avion se déplace dans l'air ambiant; on peut aussi dire que l'air ambiant s'écoule autour de l'avion et, en particulier, de part et d'autre de ses ailes. Ce qui importe c'est le mouvement relatif de l'avion par rapport à l'air. Pour des raisons pas toujours bien comprises, l'air passant au-dessus se déplace plus vite que celui passant au-dessous. Cette différence de vitesse d'écoulement de part et d'autre de l'aile est à l'origine d'une différence de pression.

La partie inférieure de l'aile (intrados) est soumise à une pression supérieure à la partie supérieure de l'aile (extrados). L'aile est donc soumise à une force \vec{F} dirigée vers le haut et de norme $F = \Delta P S$, où S désigne la surface de l'aile et ΔP la différence de pression. C'est la force de portance.

On peut montrer que la valeur de la force de portance est égale à $F = \frac{1}{2} \rho S v^2 C_p$

où C_p est le coefficient de portance. C_p n'a pas d'unités, ρ la masse volumique de l'air ambiant, v la vitesse de l'avion par rapport à l'air et S la surface de l'aile.

4. Variation du coefficient de portance

Le coefficient de portance C_p varie avec le profil de l'aile et, pour une aile donnée, avec l'angle d'incidence (ou angle d'attaque) de l'aile. Quand l'incidence de l'aile augmente, le coefficient de portance augmente. Quand l'incidence diminue, le coefficient de portance diminue et peut même devenir négatif. Toutefois, l'augmentation du coefficient de portance avec l'angle d'incidence a une limite. Si l'angle d'incidence devient trop élevé, le coefficient de portance chute. Ce régime est appelé le décrochage. Pour des ailes conventionnelles, l'angle d'incidence limite est aux environs de 18° .

D'un point de vue aérodynamique, le décrochage correspond à une modification de l'écoulement de l'air au-dessus de l'aile. Avant le décrochage, l'écoulement est dit laminaire: les courants d'air glissent parallèlement à la surface de l'aile, en épousant son profil.

Au moment du décrochage, l'écoulement de l'air au-dessus de l'aile devient turbulent: les courants d'air s'écartent fortement de la surface de l'aile. Les remous et tourbillons formés par l'air ont un caractère aléatoire et sont répartis au hasard, ce qui entraîne une brusque diminution de la portance.

Une aile conventionnelle ne peut donc atteindre une vitesse élevée sans risque de décrochage.

5. Caractéristiques de l'aile delta

Une aile delta est une aile en forme de triangle isocèle. Une aile delta a deux caractéristiques importantes et intéressantes.

1°) Une aile delta ne connaît pas de décrochage comme les ailes conventionnelles. Cependant dès que son angle d'attaque atteint 3° , l'aile delta forme un tourbillon, ou vortex, à son extrémité. Et au fur et à mesure que l'angle d'attaque augmente, les tourbillons s'agrandissent pour atteindre l'intérieur de l'aile et donc le fuselage. On peut parler alors d'une sorte de décrochage, sauf que, contrairement aux ailes conventionnelles, les tourbillons formés sur les ailes delta sont réguliers, ce qui évite à l'aile de décrocher et permet même d'augmenter la portance.

On peut donc dire que les ailes delta connaissent un décrochage dès que l'angle d'attaque atteint 3° . En revanche elles ne décrochent pas comme le font les ailes conventionnelles. La transition entre l'écoulement laminaire et le vortex est progressif, et non soudain comme pour l'aile conventionnelle, ainsi la portance est assurée. De plus, en présence d'un vortex sur l'aile, la portance augmente plus rapidement qu'avec un écoulement laminaire.

2°) Une aile delta est très rigide, malgré sa très faible épaisseur.

Pour atteindre des vitesses supersoniques, les ailes des avions doivent avoir une épaisseur très faible. Lorsqu'elles atteignent de grandes vitesses, les ailes sont soumises à des forces très importantes (la portance varie en v^2). Ces ailes doivent alors être suffisamment résistantes pour ne pas se disloquer. Les ailes « conventionnelles » ne permettent pas d'atteindre ces vitesses : en réduisant leur épaisseur, elles ne seraient pas assez résistantes. Les ailes delta, de par leur forme particulière, sont solidaires du fuselage. Cette configuration leur donne une plus grande rigidité.



Un Concorde (à gauche) et un avion de ligne (à droite)

CONCLUSION :

Nous sommes ainsi parvenus à simuler la propulsion d'une navette spatiale et le fonctionnement de ses ailes Delta, bien que cette représentation ne soit que très schématique et souffre encore de nombreuses imperfections.

Dans les semaines à venir, nous allons essayer de perfectionner ces modèles. Nous avons également l'intention de renforcer nos contacts avec des ingénieurs aéronautiques afin de mieux nous rendre compte des conditions réelles du voyage de la navette.

Nous aimons beaucoup préparer les Olympiades. Ce travail nous permet en effet de nous rendre compte qu'avec ce que nous apprenons en sciences physiques en Terminale nous sommes déjà capables d'aborder des problèmes concrets et de les comprendre en partie. Cela nous conforte dans nos désirs de poursuivre des études de physique, et plus particulièrement dans le domaine spatial. Malgré les difficultés rencontrées, nous avons pris goût à ce travail de recherche, de mise au point d'expériences, de protocoles, et d'analyses des résultats. Cette bonne atmosphère nous motive pour surmonter les difficultés que nous rencontrerons tout au long de nos études.