

Groupe N° 34 - Le vol d'un boomerang

Elèves : BONNEAU Alexandre , LAURET Alexis , RENAUD-CHAN Christopher

Professeur encadrant : Salah Belazreg

Sommaire :

Introduction.

I) Présentation du boomerang

II) Forces aérodynamiques

A/ Portance

1- Présentation du matériel

a) Le tube de Pitot

b) Le manomètre différentiel

c) La soufflerie

2- Réalisation de la courbe d'étalonnage

3-Expérimentation :

B/ Trainée

III) Effet gyroscopique

A/ Déséquilibre des forces de portance.

B/ Le retour du boomerang.

C/ Pourquoi le boomerang arrive-t-il à plat?

Conclusion

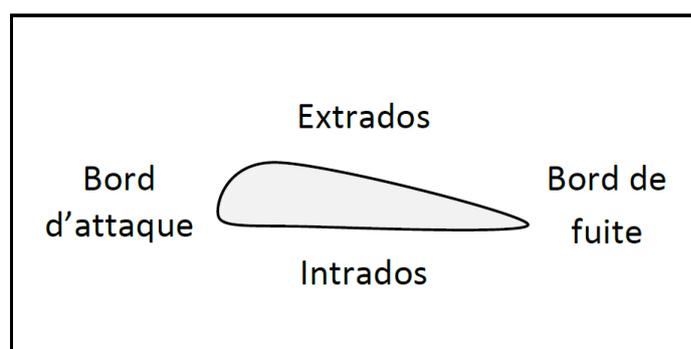
Introduction :

Le boomerang est un objet bien connu qui a la particularité de revenir à son point de départ en décrivant une trajectoire en "goutte d'eau" lorsqu'il est lancé correctement. Il a été découvert par les Européens au 18ème siècle en Australie, où les tribus aborigènes l'utilisaient lors de jeux d'adresse ou d'exercices. L'invention du boomerang date de plus de 20 000 ans et n'est pas spécifique à ce continent, dont les habitants ont néanmoins été les seuls à conserver le savoir-faire de la fabrication des boomerangs au cours des millénaires. L'explication scientifique de la trajectoire insolite suivie par le boomerang ne fut donnée qu'en 1973, par Félix Hess, dans une thèse de plus de 500 pages. On tentera, par cette étude, d'expliquer de manière bien plus modeste ce phénomène qui reste pour la plupart bien peu naturel, et qui nous étonne encore.

I) Présentation du boomerang :

Le boomerang est un projectile, souvent en bois, dont il existe aujourd'hui plusieurs sortes qui se différencient surtout par le nombre de pales, pouvant aller de 2 (le plus classique), à 4 pales. Contrairement aux bipales, les quadripales et les tripales ont leurs centres de gravité situés au centre du boomerang, ce qui rend leurs lancers plus faciles et leurs trajectoires plus stables, le bipale requérant une vitesse de rotation plus importante au moment du lancer.

Les pales du boomerang présentent le même profil qu'une aile d'avion : elles possèdent un bord d'attaque, arrondi, qui fait face au vent relatif de la pale avançant, et un bord de fuite qui s'affine. Les deux faces de la pale extrados et intrados sont différentes, le premier étant bombé et présentant plus de surface que l'autre qui est plat.



Lors du lancer d'un boomerang, le lanceur doit imprimer une rotation au boomerang pour que celui-ci prenne la trajectoire voulue : le boomerang décrit une trajectoire en forme de goutte d'eau en prenant de l'altitude et redescendant vers son point de départ. On peut expliquer cela grâce à l'étude des forces aérodynamiques et aux propriétés gyroscopiques du boomerang.

II) Forces aérodynamiques

A/ Portance

Si l'on ne tient compte que du poids du boomerang et de la poussée initiale, le boomerang devrait uniquement perdre de l'altitude. Au contraire celui-ci prend dans un premier temps de l'altitude avant de redescendre. Pour expliquer cette montée, il est nécessaire de prendre en compte une autre force qui intervient lors du vol. Cette force, que l'on appelle portance, peut facilement être mise en évidence en soumettant certains profils à un vent créé par une soufflerie, et en mesurant la différence de poids grâce à une balance. On remarque, pour certains profils, comme ceux des boomerangs, qu'une force de même direction mais de sens opposé au poids est exercée lorsqu'un vent relatif souffle parallèlement au profil. Cette force est nommée portance : c'est la composante verticale de la force exercée par le flux d'air sur l'objet, et son vecteur est orthogonal à la vitesse de l'objet par rapport à l'air. Il existe plusieurs explications sur l'origine de cette force, la plus simple étant l'application du théorème de Bernoulli, qui s'écrit ainsi :

$$\frac{v^2}{2 \cdot g} + z + \frac{p}{\rho \cdot g} = \text{constante}$$

Avec v vitesse d'écoulement du fluide en un point, en m.s^{-1}

g : accélération de la pesanteur en m.s^{-2}

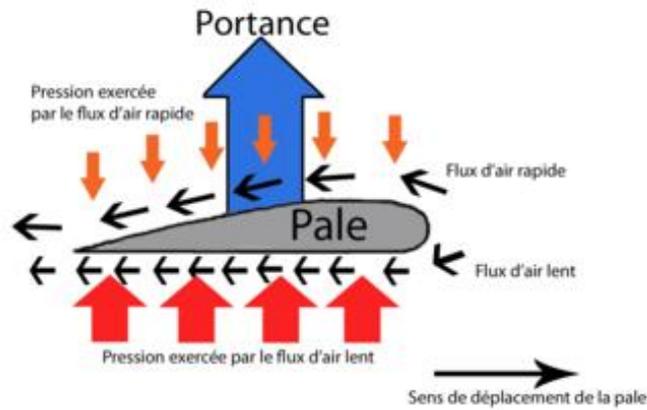
z : altitude en m

p : pression en un point, en Pa ou N.m^{-2}

ρ : masse volumique de l'air en kg.m^{-3}

L'accélération de pesanteur sera, dans notre étude, considérée constante. En négligeant la compressibilité de l'air, relativement faible, on considère que ρ est constant également. Le théorème de Bernoulli permet de déduire facilement qu'une augmentation de la vitesse d'écoulement induit une diminution de la pression, et réciproquement.

Le profil qui nous intéresse est asymétrique, et, dans le référentiel du boomerang, l'air parcourt plus de distance au niveau de l'extrados qu'au niveau de l'intrados, ce qui suppose une vitesse d'écoulement de l'air plus importante sur la ligne de courant de l'extrados. On en déduit, grâce au théorème de Bernoulli, que l'intrados subit une pression plus importante que l'extrados, et qu'il existe donc une force naissant de ce déséquilibre, qui s'exerce de l'intrados vers l'extrados, perpendiculairement au vecteur vitesse. Cette force, la portance, explique la prise d'altitude du boomerang lors de son lancer.



Pour mettre en évidence la force de portance, nous avons utilisé la soufflerie du lycée. Nous avons tout en premier une courbe d'étalonnage permettant d'utiliser cette dernière, mais tout d'abord nous allons vous présenter le matériel.

1- Présentation du matériel

b) Le tube de Pitot

Le tube de Pitot permet la détermination de la vitesse locale grâce à la mesure d'une différence entre la pression statique P_s et la pression totale P_t . La relation de Bernoulli permet de relier ces variables :

$$\Delta P = \frac{\rho}{2} V^2$$

Avec ρ : la masse volumique du fluide (ici de l'air $\rho = 1,29 \text{ kg.m}^{-3}$)

V : vitesse de l'air par rapport à la sonde (m.s^{-1})

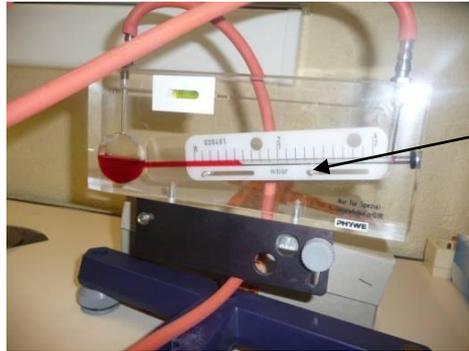
ΔP : différence de pression (Pa)

On en déduit alors la vitesse du fluide par rapport à la sonde de Pitot :

$$V = \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho}}$$

b) Le manomètre différentiel

Le manomètre est directement gradué en ΔP . Il permet de mesurer la différence de pression ΔP . Le principe est d'utiliser le « poids d'une colonne de liquide » (ici de l'eau colorée) sur laquelle on applique les deux pressions respectivement sur la partie supérieure et inférieure. Nous avons le choix entre deux échelles : nous choisissons l'échelle 2mbar puis nous y relierons le tube de Pitot. Pour convertir les mbar en Pascal, nous multiplions la valeur en mbar par 100, car $1\text{bar} = 10^5\text{ Pa}$.



Manomètre différentiel

c) La soufflerie

Une soufflerie est une installation servant à simuler les conditions aérodynamiques d'un déplacement dans l'air. On considère en effet que l'action de l'air sur un objet en déplacement est équivalente à celle du vent généré dans la soufflerie sur l'objet. On y effectue des mesures très précises, ce qui est souvent impossible dans les conditions réelles de déplacement.



Soufflerie

Alimentation à tension variable

Voltmètre

La soufflerie utilisée est un modèle pédagogique très simple. Elle est constituée d'un ventilateur réalisant un débit d'air. Les différents profils à tester sont positionnés en aval de la soufflerie. Il est nécessaire de prendre certaines précautions expérimentales.

Afin de garantir une bonne homogénéité du flux d'air autour du profil, il faut vérifier à l'aide du tube de Pitot les valeurs de vitesses dans la zone où sera positionné le profil. En rapprochant et éloignant le tube de Pitot de la soufflerie, on détermine approximativement la zone dans laquelle la vitesse du vent est constante : on la nommera la zone de travail. Cette zone est située à environ 20cm de la sortie du ventilateur. Il faut aussi que le profil que l'on étudie soit dans l'axe de la soufflerie : il convient donc de placer les objets étudiés dans cette zone pour les situer dans un vent uniforme.

2- Réalisation de la courbe d'étalonnage

La vitesse de rotation du ventilateur est liée à sa tension d'alimentation

Afin de réaliser une courbe d'étalonnage on prend différentes mesures. Tout d'abord on règle la tension grâce à l'alimentation à tension variable, puis grâce au voltmètre on relève précisément la tension. Dans un second temps on relève la pression en mbar avec le manomètre différentiel. Il faut maintenant faire varier la tension pour obtenir les différents points de la courbe d'étalonnage. Cependant, sur la courbe d'étalonnage, la pression n'apparaît pas. On convertit donc la pression en pascal puis les pascals en vitesse grâce aux formules suivantes :

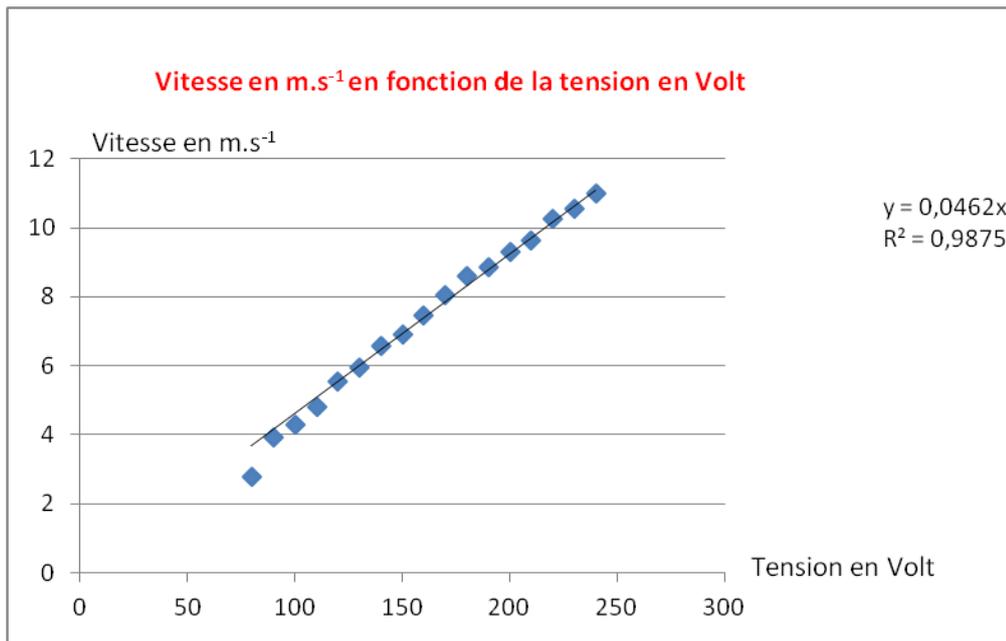
$$1\text{Pa} = 10^{-2} \text{ mbar}$$

$$V = \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho}}$$

Nous avons organisé les mesures expérimentales dans le tableau suivant :

Tension en volt V	Pression en mbar	Pression en Pa	Vitesse en m.s ⁻¹
80	0,05	5	2,784
90	0,1	10	3,937
100	0,12	12	4,313
110	0,15	15	4,822
120	0,2	20	5,568
130	0,23	23	5,972
140	0,28	28	6,589
150	0,31	31	6,933
160	0,36	36	7,471
170	0,42	42	8,069
180	0,48	48	8,627
190	0,51	51	8,892
200	0,56	56	9,318
210	0,6	60	9,645
220	0,68	68	10,268
230	0,72	72	10,565
240	0,78	78	10,997

Puis à partir des mesures précédentes nous avons réalisé la courbe d'étalonnage suivante :



Interprétation :

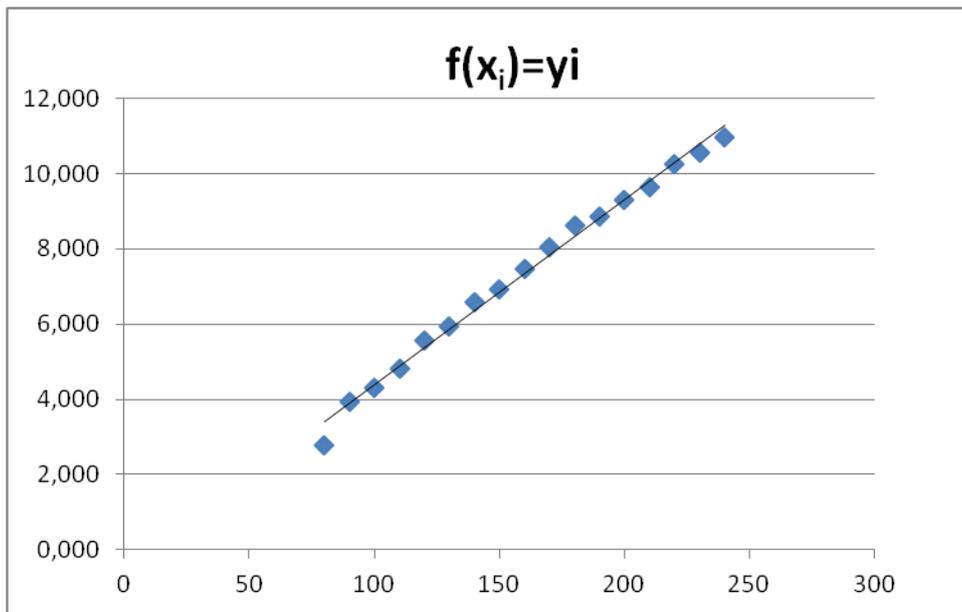
Nous observons un nuage de points qui s'alignent selon une droite qui passe par l'origine. On en déduit que la vitesse d'air générée par la soufflerie est proportionnelle à la tension donnée par l'alimentation. Ceci peut s'expliquer physiquement : la vitesse de rotation du ventilateur est proportionnelle à la tension et la vitesse de l'air est proportionnelle à la vitesse de rotation des pales.

Méthode des Moindres Carrés :

Nous choisissons de faire passer la droite par l'origine du repère. Cependant nous nous sommes demandé comment choisir au mieux la courbe d'étalonnage.

Sur notre graphique nous avons donc la tension en abscisse (que nous noterons x_i) et la vitesse en ordonnée (que nous noterons y_i) telles que :

Tension en V	Vitesse en m.s ⁻¹
$x_1 = 80$	$y_1 = 2.784$
$x_2 = 90$	$y_2 = 3.937$
...	...
x_i	y_i
...	...
$x_{17} = 240$	$y_{17} = 10.997$



Ceci nous permet de tracer un nuage de points :

On remarque que l'ensemble des points décrit une courbe proche d'une droite passant par l'origine, équation du type : $y = ax$.

Nous avons deux possibilités :

- 1^{ère} possibilité

On trace les points sur un graphique puis on essaie de faire passer au mieux la droite puis nous calculons son coefficient directeur.

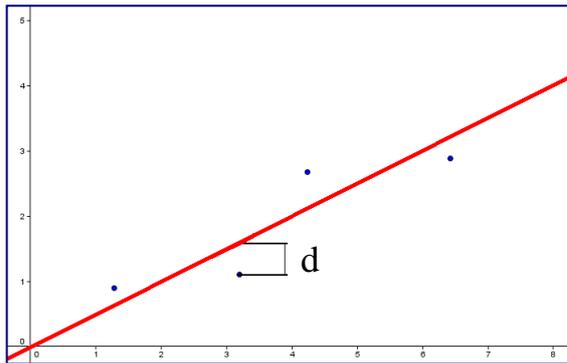
L'avantage de cette méthode est qu'elle est rapide et qu'elle demande peu de matériel mais elle est malheureusement peu précise.

- 2^{nde} possibilité

Nous essayons de faire mieux en recherchant quel est le coefficient directeur de la droite qui minimise les erreurs commises entre le nuage de points de mesure et la droite d'étalonnage.

Prenons une droite $y = a x$

Nous essayons de définir une fonction qui représente l'erreur commise. Pour chaque point de mesure on calcule l'erreur commise entre le point mesuré et la valeur obtenue avec la droite d'étalonnage (grandeur d sur la figure ci-dessous).



Cette erreur est minimale lorsque d est minimale ; si d est égale à 0 il n'y a pas d'erreur donc par exemple pour le point 3 on peut écrire :

$d = y_3 - ax_3$ (y_3 est la valeur mesurée et ax_3 la valeur de y obtenue avec la droite d'étalonnage)

On utilisera donc $d^2 = (y_3 - ax_3)^2$ de façon à avoir un indicateur toujours positif.

Nous allons donc construire une fonction erreur "totale".

On fait la somme des "erreurs" en chaque point

$$E = (y_1 - ax_1)^2 + (y_2 - ax_2)^2 + \dots + (y_i - ax_i)^2 + \dots + (y_{17} - ax_{17})^2$$

$$E = \sum_{i=1}^{17} (y_i - ax_i)^2$$

Si $E=0$ on a trouvé la solution exacte (qui est impossible si les points ne sont pas alignés). L'idée est de rechercher la valeur de a qui rend E minimale d'où le nom de la méthode. On cherche la valeur « moindre » d'une somme de carrés. E est une fonction de a de degré deux qui rend E minimale, on recherche la dérivée de E : E'

$$E'(a) = (y_1 - ax_1)^2 + (y_2 - ax_2)^2 + \dots + (y_i - ax_i)^2 + \dots + (y_{17} - ax_{17})^2$$

$$E'(a) = (y_1 - 2ax_1y_1 + a^2x_1^2) + (y_2 - 2ax_2y_2 + a^2x_2^2) + \dots + (y_i - 2ax_iy_i + a^2x_i^2) + \dots + (y_{17} - 2ax_{17}y_{17} + a^2x_{17}^2)$$

$$E'(a) = (2x_1^2a - 2x_1y_1) + (2x_2^2a - 2x_2y_2) + \dots + (2x_i^2a - 2x_iy_i) + \dots + (2x_{17}^2a - 2x_{17}y_{17})$$

$$E'(a) = 2a \sum_{i=1}^{17} x_i^2 - 2 \sum_{i=1}^{17} x_i y_i$$

$$\text{Si } E'(a) = 0$$

$$\Rightarrow 2a \sum_{i=1}^{17} x_i^2 - 2 \sum_{i=1}^{17} x_i y_i = 0$$

$$\Rightarrow 2a = 2 \frac{\sum_{i=1}^{17} x_i y_i}{\sum_{i=1}^{17} x_i^2} \quad \text{et par suite :} \quad a = \frac{\sum_{i=1}^{17} x_i y_i}{\sum_{i=1}^{17} x_i^2}$$

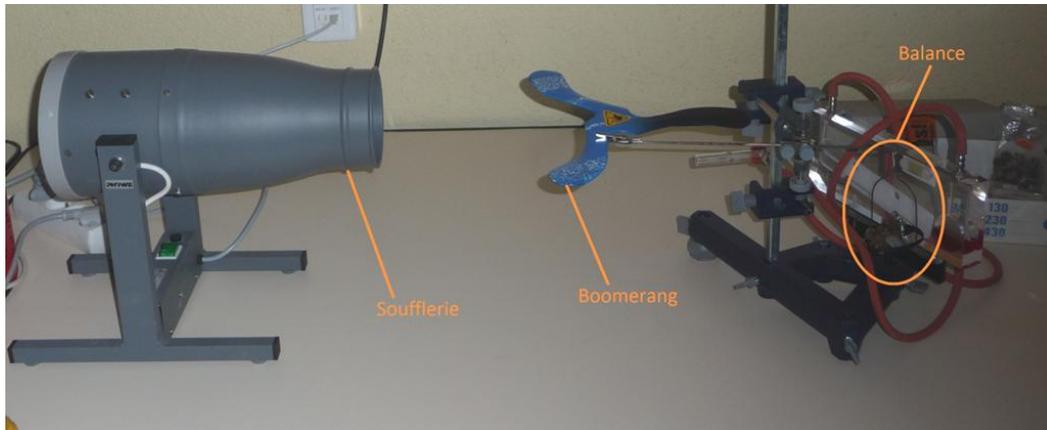
Ensuite nous avons réalisé ce calcul sur un tableur Excel en faisant une colonne $X_i Y_i$ (produit des abscisses et des ordonnées) une colonne X_i^2 (carré de l'abscisse), nous avons fait la somme de toutes les cellules pour chaque colonne puis avons divisé l'une par l'autre ces deux sommes.

Tension en volt V	Vitesse en m.s ⁻¹	x _i y _i	x _i ²
80	2,784	222,7384186	6400
90	3,937	354,3746539	8100
100	4,313	431,3310928	10000
110	4,822	530,4671044	12100
120	5,568	668,2152557	14400
130	5,972	776,2961155	16900
140	6,589	922,4167785	19600
150	6,933	1039,901605	22500
160	7,471	1195,339788	25600
170	8,069	1371,809194	28900
180	8,627	1552,791934	32400
190	8,892	1689,502473	36100
200	9,318	1863,563312	40000
210	9,645	2025,419853	44100
220	10,268	2258,901427	48400
230	10,565	2430,044501	52900
240	10,997	2639,238791	57600
Somme		21972,3523	476000
a = (X _i Y _i /X _i ²)		0,046	

Nous trouvons une droite d'équation $y = 0,046.x$ très proche de celle calculée automatiquement par Excel (la même à trois chiffres significatifs). Ceci est normal car Excel doit utiliser une méthode assez proche.

3-Expérimentation :

On fixe le boomerang sur une balance de Roberval et on équilibre le système (après étalonnage de la soufflerie) :



Ainsi on obtient :

-Sans vent : $P_1 \cdot d_1 = P_2 \cdot d_2 = m \cdot g \cdot d_2$

-Avec vent : $(P_1 - P_0) \cdot d_1 = P_2' \cdot d_2 = m' \cdot g \cdot d_2$

En faisant la différence des deux équilibres on peut déterminer la force de Portance P_0

$P_0 \cdot d_1 = (P_2 - P_2') \cdot d_2 = \delta m \cdot g \cdot d_2$ avec $\delta m = m - m'$

Donc $P_0 = \delta m \cdot g \cdot (d_2 / d_1)$

Avec P_1 , P_2 et P_2' respectivement le poids du boomerang et des masses en Newton;

d_1 et d_2 respectivement la distance du centre de rotation de la balance avec le boomerang et avec les masses, en m;

m et m' masses en kg;

g accélération de la pesanteur en $m \cdot s^{-2}$

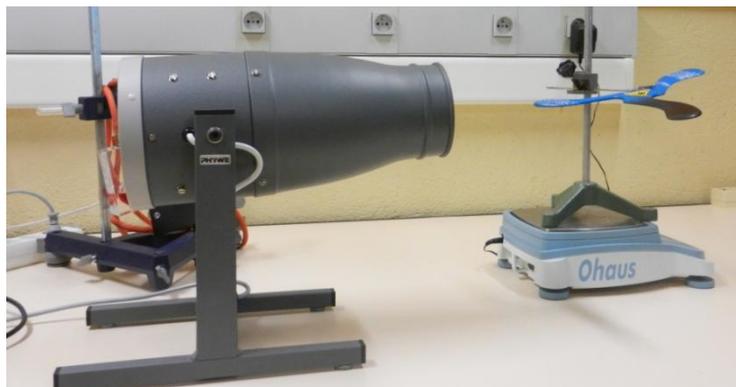
Mais compte tenu de la difficulté de la manipulation (l'équilibre est difficilement atteignable), on préfère la méthode suivante :

On place une potence sur laquelle on a fixé le boomerang à 20 cm de la soufflerie et on place cette potence sur une balance électronique de précision. De cette manière on obtient ce système :

Sans vent : $P_1 = m \cdot g$

Avec vent : $(P_1 - P_0) = m' \cdot g$

Donc $P_0 = \delta m \cdot g$



Voici les résultats obtenus de la mesure de la portance d'une pale pour son bord d'attaque et son bord de fuite :

U en volt	$1/v^2$ en (s ² .m ⁻²)	$2/\rho$ en (kg ⁻¹ .m ³)	Δm att (en kg)	Fz att (en kg.m.s ⁻²)	S*Cz att (en m ²)
100	2,165E-01	1,550E+00	1,110E-03	1,089E-02	3,654E-03
110	1,968E-01	1,550E+00	1,470E-03	1,442E-02	4,399E-03
120	1,804E-01	1,550E+00	1,840E-03	1,805E-02	5,048E-03
130	1,665E-01	1,550E+00	2,210E-03	2,168E-02	5,596E-03
140	1,546E-01	1,550E+00	2,640E-03	2,590E-02	6,208E-03
150	1,443E-01	1,550E+00	3,090E-03	3,031E-02	6,782E-03
160	1,353E-01	1,550E+00	3,450E-03	3,384E-02	7,098E-03
170	1,273E-01	1,550E+00	3,890E-03	3,816E-02	7,533E-03
180	1,203E-01	1,550E+00	4,460E-03	4,375E-02	8,157E-03
190	1,139E-01	1,550E+00	4,830E-03	4,738E-02	8,369E-03
200	1,082E-01	1,550E+00	5,250E-03	5,150E-02	8,642E-03
				Moyenne SxCz att	6,499E-03

Δm fuite (en kg)	Fz fuite (en kg.m.s ⁻²)	S*Cz fuite (en m ²)
8,900E-04	8,731E-03	2,930E-03
1,160E-03	1,138E-02	3,472E-03
1,360E-03	1,334E-02	3,731E-03
1,840E-03	1,805E-02	4,660E-03
2,270E-03	2,227E-02	5,338E-03
2,490E-03	2,443E-02	5,465E-03
2,830E-03	2,776E-02	5,823E-03
3,240E-03	3,178E-02	6,274E-03
3,540E-03	3,473E-02	6,474E-03
4,020E-03	3,944E-02	6,965E-03
4,380E-03	4,297E-02	7,210E-03
	Moyenne SxCz fuite	5,304E-03

À partir de ces résultats nous avons calculé le coefficient S×Cz du bord d'attaque et du bord de fuite.

Nous observons que chaque S×Cz calculé augmente en fonction de la vitesse de l'écoulement de l'air ce qui nous incite à augmenter l'échantillon des mesures. En effet, nous avons observé que lors des mesures le boomerang tremblait de plus en plus.

D'autre part, le boomerang est lancé de manière à ce que le plan du boomerang fasse un angle d'environ 20° avec la verticale.

On suppose que l'angle d'incidence des pales (angle que fait le plan du boomerang avec le vecteur vitesse de celui-ci), est quasiment nul. Le vecteur de la force de portance F_z n'est donc pas perpendiculaire au sol, et ne compense donc pas directement le poids du boomerang. L'extrados étant placé au-dessus lors du lancer, l'angle que fait le vecteur \vec{F}_z avec la verticale est égal à $90 - 20 = 70^\circ$. On note $\vec{F}_z(y)$ de norme $F_z(y)$ la composante verticale de \vec{F}_z , colinéaire au vecteur poids et de sens opposé. On a donc $\cos(70) = \frac{F_z(y)}{F_z}$, d'où :

$$F_z(y) = \cos(70) \cdot F_z \approx 0,63 F_z$$

On peut, d'une façon approchée, calculer F_z grâce à la formule :

$$F_z = \frac{1}{2} \rho S V^2 C_z$$

Avec ρ : masse volumique du fluide (ici, l'air) en kg.m^{-3}

S : aire caractéristique de l'obstacle en m^2

V : vitesse relative du fluide par rapport au mobile, en m.s^{-1}

C_z : coefficient de portance, nombre sans unité qui dépend de la position et de la forme du mobile.

La portance est donc proportionnelle au carré de la vitesse du boomerang, ce que nous exploiterons plus tard.

B/ Trainée

Par rapport au plan du boomerang, l'air exerce deux forces, la portance et la trainée, qui sont en réalité les composantes verticales et horizontales de la résultante des forces pressantes exercées sur le boomerang. Le vecteur de trainée est colinéaire et de sens opposé au vecteur vitesse de la pale. Cette force est due à une différence de pression entre l'avant et l'arrière de la pale (l'avant étant le bord d'attaque pour la pale "avançant", mais le bord de fuite pour la pale "reculant"), et aux forces de frottements entre l'air et le boomerang.

Son expression est la suivante :

$$F_x = \frac{1}{2} C_x \rho S V^2$$

Avec ρ : masse volumique du fluide (air ici) en kg.m^{-3} .

S : surface du projeté orthogonal du mobile sur un plan perpendiculaire au vecteur vitesse.

V : vitesse relative du fluide par rapport au mobile, en m.s^{-1}

C_x : coefficient de trainée, nombre sans unité qui dépend de la position et de la forme du mobile.

À partir de cette formule et de la relation $m \cdot a = F_x$ (a : accélération du boomerang suivant la direction x , m la masse du boomerang, F_x : la trainée qui s'oppose au mouvement).

On peut en déduire la vitesse relative de l'air par rapport au temps en négligeant les autres forces qui agissent sur le boomerang.

L'équation différentielle régissant le mouvement du centre d'inertie du boomerang et du type :

$$m \frac{dv}{dt} = K v^2, \quad K = - S C_x \rho / 2$$

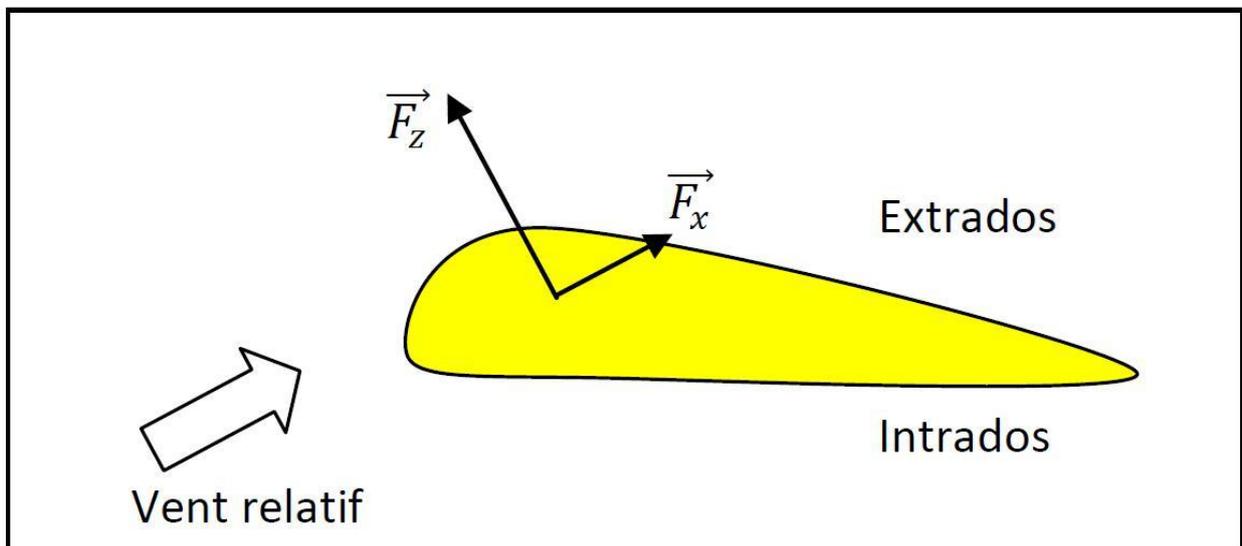
Les solutions de l'équation différentielle précédente sont de la forme :

$$v(t) = \frac{1}{\frac{C_x \cdot S \cdot \rho}{2m} \cdot t + \frac{1}{v(0)}}, \quad \text{avec } v(0) \text{ la vitesse de départ donnée au boomerang.}$$

La vitesse diminue donc au cours du temps, ce qui a pour effet de faire diminuer F_x au cours du temps et justifie le caractère hyperbolique de la courbe représentative de cette fonction.

La vitesse diminuant, la portance proportionnelle au carré de celle-ci diminue alors en conséquence. Le boomerang commence à décélérer verticalement au moment où, sous l'effet de la trainée, la vitesse d'écoulement diminue assez pour que $F_z(y) < P$. Vient alors un moment où le vecteur vitesse verticale change de sens et que le boomerang commence à redescendre.

On peut représenter les forces de trainée et de portance dans un schéma récapitulatif :



III) L'effet gyroscopique.

A/ Déséquilibre des forces de portance.

Lors du lancer du boomerang, le lanceur imprime une vitesse au centre de gravité du boomerang et une vitesse de rotation de celui-ci. On peut alors considérer le boomerang comme un objet gyroscopique.

Intéressons nous à la vitesse relative des pâles par rapport à l'air. On cherche à calculer la vitesse horizontale des pales en un point M par rapport à l'air, en considérant uniquement la rotation du boomerang.

Le vecteur position d'un point d'un cercle s'exprime de la sorte :

$$\overrightarrow{OM} = \cos(\theta).r.\overrightarrow{u}_x + \sin(\theta).r.\overrightarrow{u}_y$$

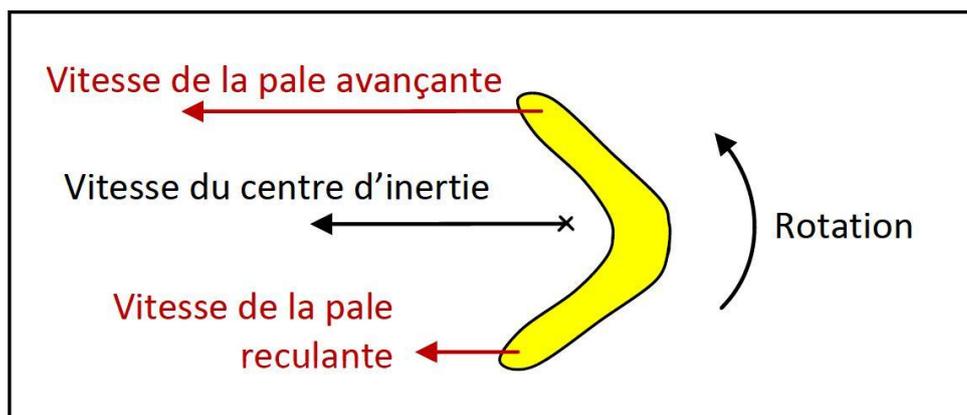
On a alors sa composante verticale,

$$\overrightarrow{OM}_h = \cos(\theta).r.\overrightarrow{u}_x = \cos(\omega.t + \frac{\pi}{2}).r.\overrightarrow{u}_x \quad (\text{On a } \theta(t_0) = \frac{\pi}{2})$$

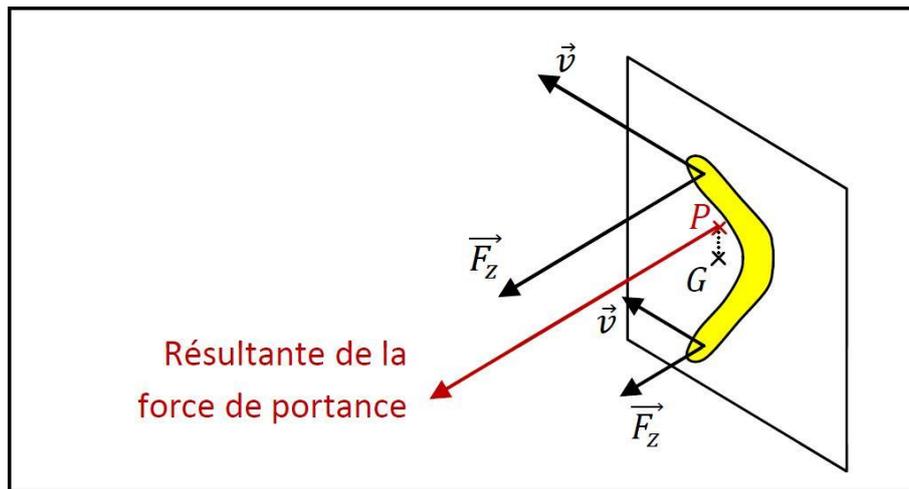
La dérivée de ce vecteur par rapport au temps est la vitesse horizontale que nous cherchons, elle est donnée par :

$$\frac{\delta \overrightarrow{OM}_h}{\delta t} = -\omega.\sin(\omega.t + \frac{\pi}{2}).r.\overrightarrow{u}_x$$
$$\overrightarrow{Vh} = -\omega.\sin(\omega.t + \frac{\pi}{2}).r.\overrightarrow{u}_x$$
$$(\theta = \omega.t)$$

Ainsi la vitesse des pales dépend de leur position par rapport à l'axe de rotation. Sur le demi-cercle supérieur la vitesse des pales est plus grande que la vitesse des pales sur le demi-cercle inférieur. C'est le phénomène des pales "avançante" et "reculante".



Or comme on l'a vu précédemment, la force de portance résulte de l'écoulement de l'air, et est proportionnelle au carré de la vitesse relative à l'air. Ainsi la force de portance des pales du demi-cercle supérieur est plus grande que la force de portance des pales du demi-cercle inférieur. La résultante des forces de portance ne s'applique donc pas sur le centre de gravité.



Il se crée ainsi un moment qui aurait logiquement tendance à faire pivoter le plan de rotation du boomerang par rapport à un axe l'horizontal. Or ce n'est pas ce qu'on observe : en effet, le boomerang pivote autour d'un axe vertical pour revenir à son lanceur. Comment l'expliquer ?

B/ Le retour du boomerang.

Le plan de rotation du boomerang pivote graduellement sur un axe vertical et non sur un axe l'horizontal, ce qui est dû au phénomène de la précession gyroscopique. Nous allons faire l'analogie entre le boomerang et une roue de vélo pour décrire les propriétés d'un gyroscope et expliquer le fameux retour du boomerang.

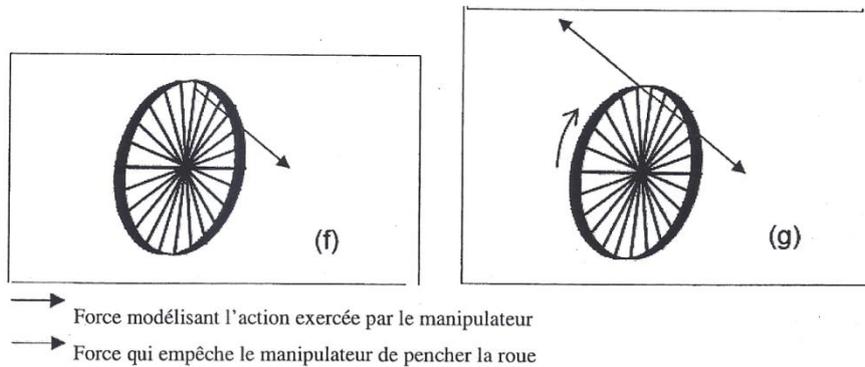
On prend tout d'abord la roue de vélo au niveau de l'axe et on tente de modifier le plan de la roue en le faisant tourner selon un axe horizontal.



Lorsque la roue n'est pas en rotation le manipulateur n'aura aucun mal à faire pivoter la roue.

Maintenant, faisons tourner la roue sur elle-même et tentons de modifier le plan de rotation de la roue.

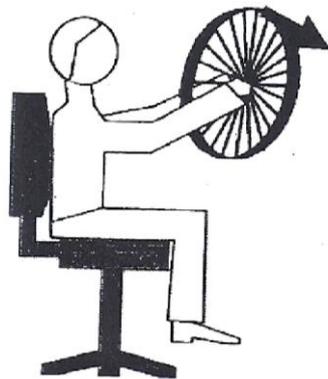
Le manipulateur a maintenant plus de mal à faire pivoter la roue. Une autre force vient s'appliquer sur la roue pour s'opposer à la force qui fait pivoter la roue. On appelle ce phénomène la stabilité gyroscopique.



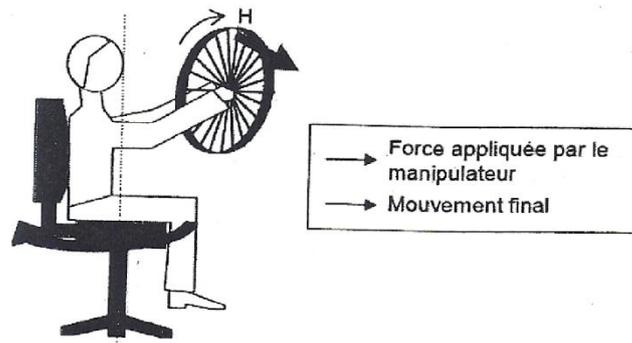
Nous avons montré précédemment que la résultante des forces de portance ne s'applique pas sur le centre d'inertie. Or le boomerang est en rotation sur lui-même et se comporte donc comme un gyroscope. Ainsi, la stabilité gyroscopique s'oppose au déséquilibre issu des forces de portance et empêche le boomerang de se retourner.

Néanmoins, ces propriétés gyroscopique entraînent un second effet que nous allons maintenant mettre en évidence. Le manipulateur se place sur une plaque tournante pour donner 3 degrés de liberté au système. On recommence l'expérience avec la roue de vélo.

Lorsque la roue est immobile quand on le penche rien ne se produit.

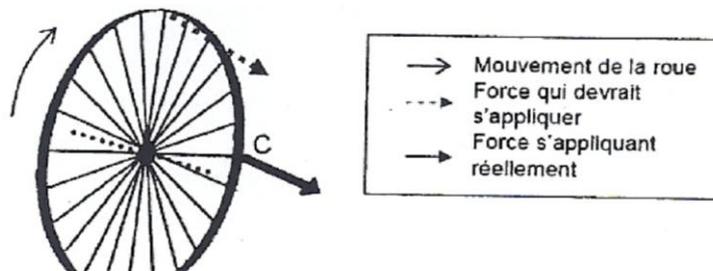


Dans un second temps, on met la roue en rotation et le manipulateur exerce une force pour faire pencher la roue. On observe que la plaque tourne. Comme si une force s'applique sur l'ensemble du système qui est colinéaire à la stabilité gyroscopique.



On mène alors une troisième expérience : le manipulateur tient la roue mise en rotation et une autre personne fait pivoter la plaque tournante. On observe que la roue se penche naturellement malgré l'opposition du manipulateur.

Analysons ce qui se déroule lors de la deuxième expérience : lorsque le manipulateur penche la roue, il applique une force plus importante sur la partie supérieure de la roue en inclinant celle-ci. Or on observe que le manipulateur tourne sur-lui-même, comme si une force venait s'appliquer sur la roue un quart de tour plus loin.



De même, lorsque leur manipulateur est en rotation il crée une force plus importante au bout de la roue qui s'applique sur le point du cercle se situant un quart-tour plus loin et aura tendance à coucher le plan de rotation de la roue. Cette force qui s'applique sur un point du cercle se situant un quart de tour après est due au phénomène de la précession gyroscopique.

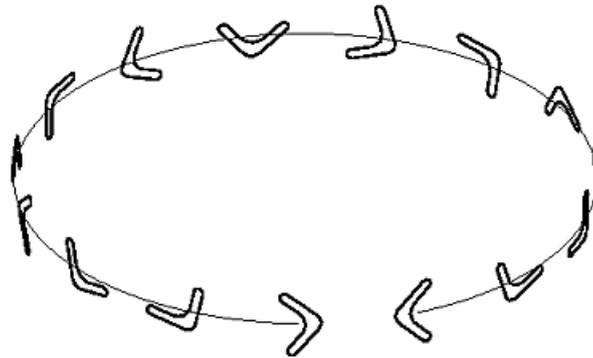
Lorsque l'on applique une action mécanique à un gyroscope il se crée un moment perpendiculaire à cette dernière. Cela correspond à la définition de l'effet gyroscopique :

"Tendance qu'a un corps animé d'un mouvement de rotation rapide autour d'un axe à s'opposer à tout effort destiné à modifier la direction de son axe de rotation." Or nous savons qu'il existe un déséquilibre dû à la différence de portance entre les deux pales, force qui devrait amener le boomerang à se "retourner".

De plus, le boomerang ayant les propriétés d'un gyroscope, la force générée par la portance est accompagnée d'un moment orthogonal à cette dernière. Le boomerang subit donc une force qui au lieu de le faire pivoter autour d'un axe horizontal, le fait pivoter autour d'un axe vertical.

Ce mouvement de rotation supplémentaire modifie sa trajectoire, son axe de rotation et donc sa portance.

L'instant d'après il subit toujours cette différence de portance dans une direction légèrement différente, l'effet gyroscopique la modifie, et il pivote de nouveau : il finit donc par parcourir une trajectoire quasi circulaire et par revenir à son point de départ.



C/ Pourquoi le boomerang arrive-t-il à l'horizontal?

Lorsque le bord d'attaque du boomerang fend l'air il crée des turbulences derrière lui et ces turbulences vont modifier la portance de la pale se situant derrière. Lorsque la pale est située à l'arrière du boomerang, elle traverse les turbulences causées par le passage de la pale qui la précède. La vitesse relative de l'air par rapport à la pale est alors globalement plus faible que celle relative à la pale située à l'avant du boomerang. S'en suit donc un déséquilibre entre la résultante des forces de portances exercées à l'arrière et à l'avant (en effet, la portance est proportionnelle à la vitesse au carré de la vitesse relative d'écoulement de l'air). La force de portance étant plus forte à l'avant, le point d'application de la résultante de toutes les forces de portance est encore décalée, cette fois vers l'avant du boomerang. Comme on l'a vu précédemment, la force qui devrait faire pivoter le boomerang autour d'un axe vertical entraîne la rotation du boomerang autour d'un axe horizontale en raison de la précession gyroscopique : elle s'applique un quart de tour plus tard. Ainsi, le boomerang se couche progressivement tout au long de son vol jusqu'à atteindre une position horizontale.

Conclusion :

Lors de ces olympiades nous avons travaillé sur le vol du boomerang, objet qui nous intriguait. Nous avons tous d'abord déterminé les deux disciplines qui permettent d'expliquer cette trajectoire : la mécanique des fluides (entre autre l'aérodynamique) et puis l'étude du gyroscope. Nous avons effectué des recherches sur ces deux domaines puis rassemblé tous les éléments qui permettaient cette étude. Nous nous sommes ensuite mis aux expérimentations : dans un premier temps sur le gyroscope, compréhension et mise en évidence de l'effet gyroscopique. Dans un second temps sur l'aérodynamisme avec la mise en évidence de la traînée et de la portance. Enfin nous avons mis en relation ces deux domaines pour comprendre la trajectoire de cet objet. Nous espérons bientôt pouvoir modéliser informatiquement la trajectoire du boomerang et peut être pouvoir déterminer sa position par rapport à l'observateur en fonction du temps.

Bibliographie :

<http://fr.wikipedia.org/wiki/Gyroscope>

<http://fr.wikipedia.org/wiki/Tra%C3%AEn%C3%A9e>

[http://fr.wikipedia.org/wiki/Portance_\(m%C3%A9canique_des_fluides\)](http://fr.wikipedia.org/wiki/Portance_(m%C3%A9canique_des_fluides))

<http://franceboomerang.fr/IMG/pdf/Boomerang.pdf>

<http://franceboomerang.fr/>

TPE sur l'aérodynamique de Boutin Jean, del Marmol Louis et Bonneau Alexandre