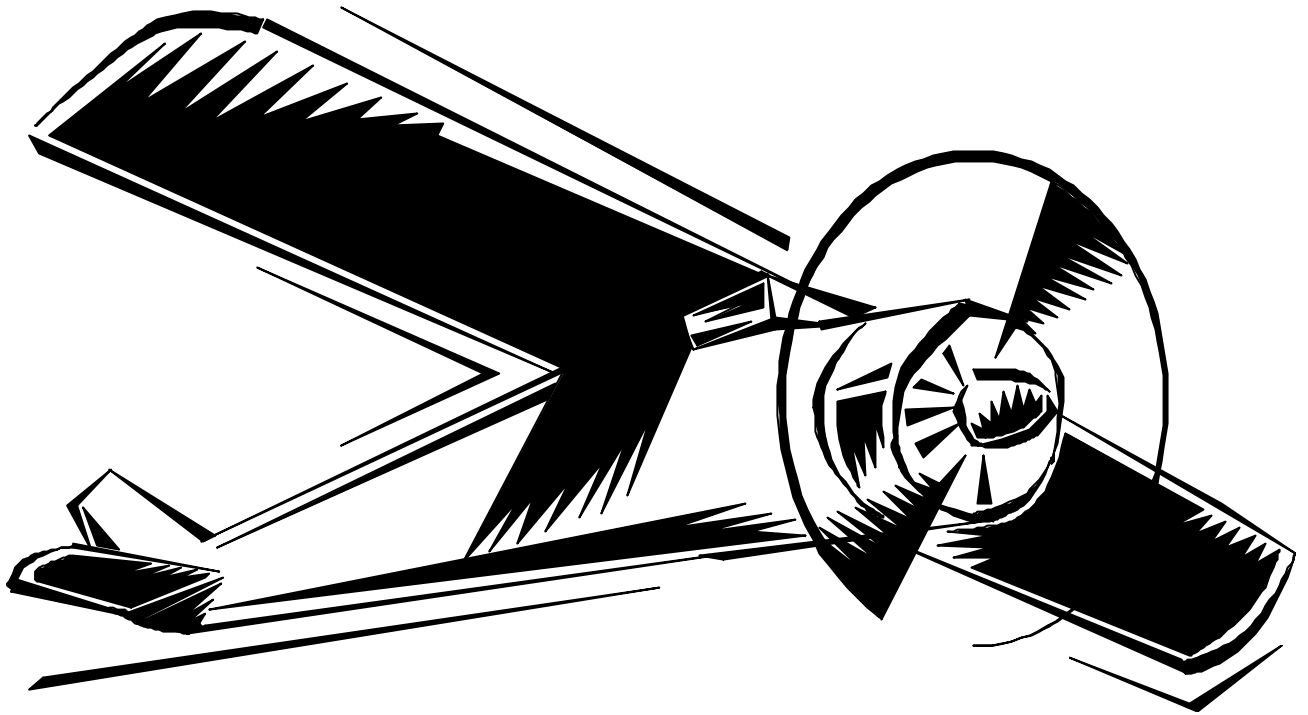


Olympiades de la Physique 2005



AILLES  
ET  
FORCES  
AERODYNAMIQUES

Par Conti Maxime  
Leclerc Francis  
Vuillaume Thomas

## Sommaire

|   |    |
|---|----|
| <b><u>Introduction</u></b>                                    | 2  |
| <b><u>I. Un peu d'Aéronautique...</u></b>                     | 3  |
| 1. <u>L'Aéronautique et ses Forces...</u>                     | 3  |
| 2. <u>L'Aéronautique et son « Jargon »...</u>                 | 3  |
| <b><u>II. Mesure des forces de portance et de traînée</u></b> | 5  |
| 1. <u>La portance</u>   | 5  |
| a) <u>Protocole expérimental</u>                              | 5  |
| b) <u>Résultats</u>   | 7  |
| 2. <u>La traînée</u>  | 7  |
| a) <u>Protocole expérimental</u>                              | 8  |
| b) <u>Résultats</u>   | 10 |
| 3. <u>Comparaison des deux ailes</u>                          | 11 |
| <b><u>III. Mesure de la pression</u></b>                      | 13 |
| 1. <u>Protocole</u>   | 13 |
| a) <u>Mise en place du protocole</u>                          | 13 |
| b) <u>Démonstration des formules liées au manomètre</u>       | 15 |
| 2. <u>Comment passe-t-on de pression à force ?</u>            | 17 |
| a) <u>Principe</u>  | 17 |
| b) <u>Explications des Calculs</u>                            | 18 |
| 3. <u>Résultats</u>   | 20 |
| 4. <u>Comment peut-on valider notre hypothèse ?</u>           | 23 |
| a) <u>Comparaison des valeurs des parties II et III</u>       | 23 |
| b) <u>Vérification expérimentale des mesures</u>              | 25 |
| c) <u>Bilan</u>   | 26 |
| <b><u>Conclusion</u></b>                                      | 27 |
| <b><u>Bibliographie - Remerciements</u></b>                   | 28 |

## **Introduction**

De tout temps, les oiseaux, « ces rois de l'azur », capables d'évoluer dans les airs, fascinent les hommes. Qu'il s'agisse de personnages fictifs comme Icare ou bien réels, comme Léonard de Vinci, nombreux sont ceux qui ont voulu les imiter.

Au XIX<sup>ème</sup>, alors que les expéditions des siècles passés ont permis de découvrir un grand nombre de « nouveaux mondes », alors que la science moderne et les révolutions techniques rendent possibles de nouvelles expériences, « voler » semble être à la portée de l'homme.

Les ingénieurs, à l'instar de Clément Ader, ainsi que de nombreux anonymes contribuent à la création des premiers aéronefs. Les travaux de ces différents ingénieurs inspireront les frères WRIGHT, qui le 17 décembre 1903, effectueront le premier vol soutenu (trois cent mètres parcourus en l'espace d'une minute). Mais le Père de l'Aéronautique reste, sans conteste, Otto LILIENTHAL, qui fut le premier à mettre en évidence l'intérêt d'une aile courbe.

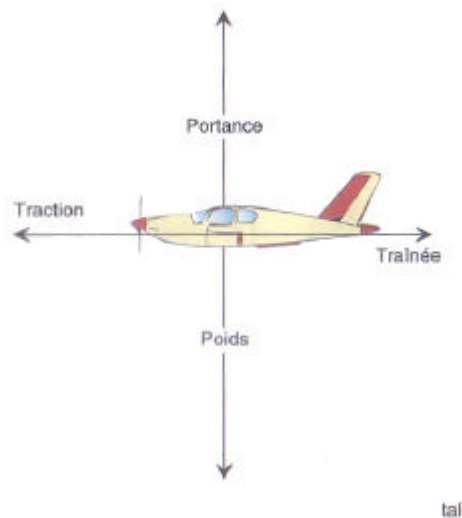
Nous sommes alors à même de nous demander ce qu'apporte la courbure de l'aile. Pour répondre à cette problématique, nous nous intéresserons tout d'abord aux différences qui apparaissent entre une aile plate et une aile courbe, puis nous verrons alors de quelle manière la pression influe sur la portance et la traînée.

# I. Un peu d'Aéronautique...

## 1. L'Aéronautique et ses Forces...

Une aile placée dans un flux d'air s'élève et est freinée. Deux forces agissent :

- Une force de sustentation verticale qui s'oppose au poids. Son nom est la *portance*, elle permet à l'aile et donc à l'avion de voler.
- Une force « frein » ayant pour direction l'horizontale. Elle est opposée au mouvement et à la traction du moteur. Il s'agit de la *traînée*.

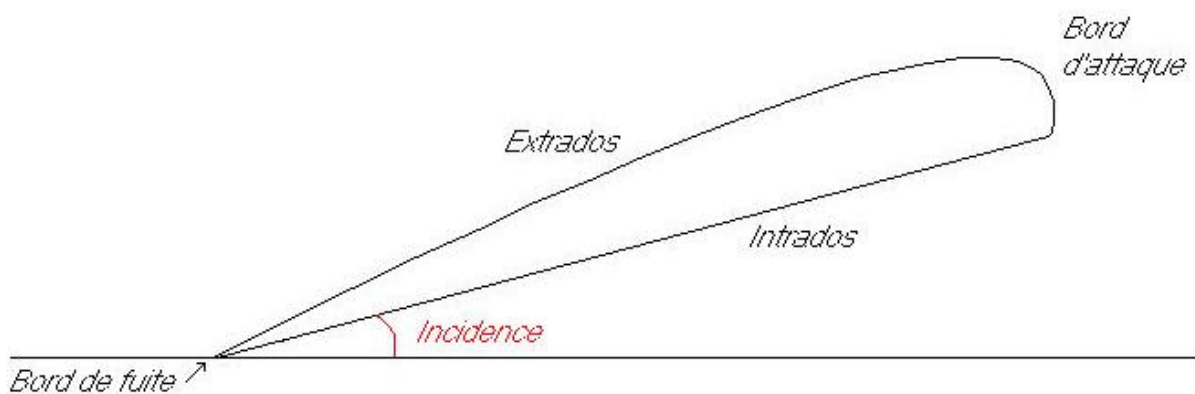


## 2. L'Aéronautique et son « Jargon »...

L'incidence est l'angle formé par le dessous du profil et l'horizontale.

L'extrados est le dessus de l'aile alors que l'intrados, le dessous.

Le bord d'attaque est situé à l'avant de l'aile et le bord de fuite, à l'arrière.

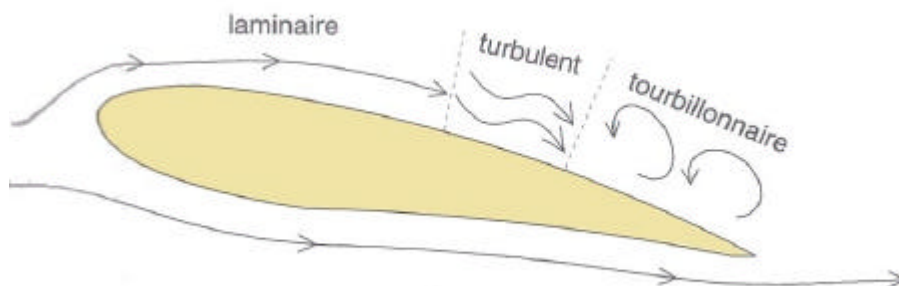


L'écoulement de l'air sur une surface peut être de trois sortes :

L'écoulement laminaire : Les particules d'air suivent toutes des trajectoires rectilignes, parallèles entre elles. On peut imaginer que l'air est constitué de lames superposées, glissant parfaitement les unes sur les autres.

L'écoulement turbulent : Les particules d'air suivent des trajectoires quasiment parallèles entre elles, mais qui ne sont plus rectilignes. Cependant elles vont toutes globalement dans la même direction et à une même vitesse.

L'écoulement tourbillonnaire : L'ensemble de l'écoulement est très désordonné et bien que l'air se déplace globalement dans la même direction, certaines particules peuvent remonter le courant et former ainsi des tourbillons.



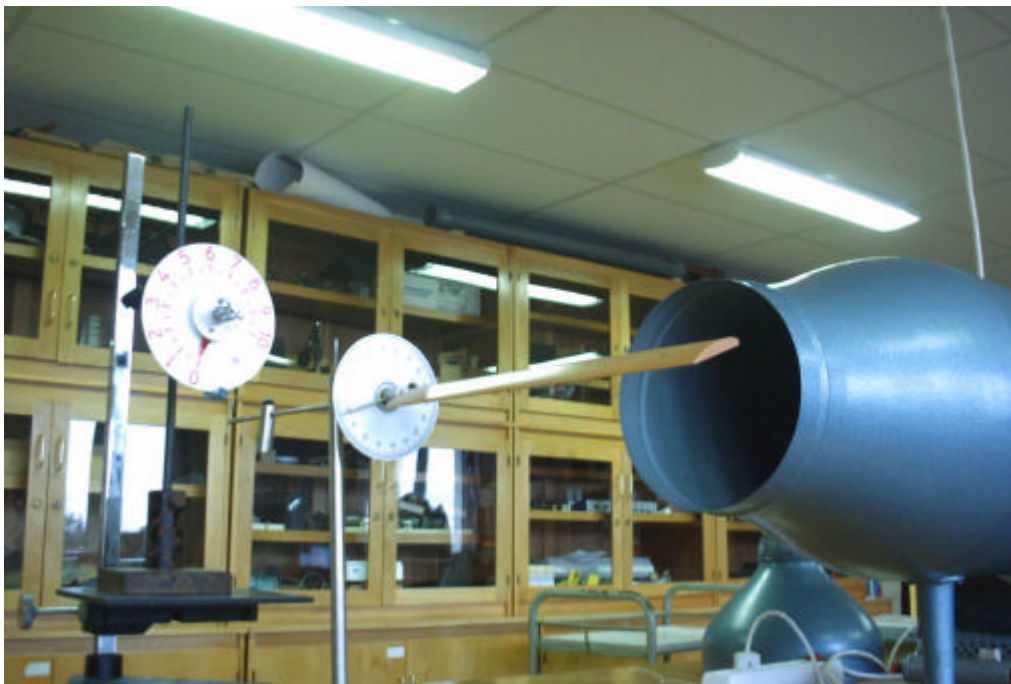
## II. Mesure des forces de portance et de traînée sur deux profils

L'aile (et par conséquent l'avion) vole grâce à la portance et est freinée par la traînée. Nous allons mesurer ces deux forces sur un profil plat et un profil courbe, pour ensuite les comparer.

### 1. La portance

#### a) Protocole expérimental

Nous plaçons chacun de nos profils sur une balance que nous équilibrons grâce à un contrepoids.



La présence de cette balance implique l'existence d'un couple, dont les deux forces ont même direction, même valeur mais sens opposé. Pour connaître l'intensité de la portance, nous mesurons, à l'aide d'un dynamomètre, la valeur de la force « réciproque » qui apparaît de l'autre côté.

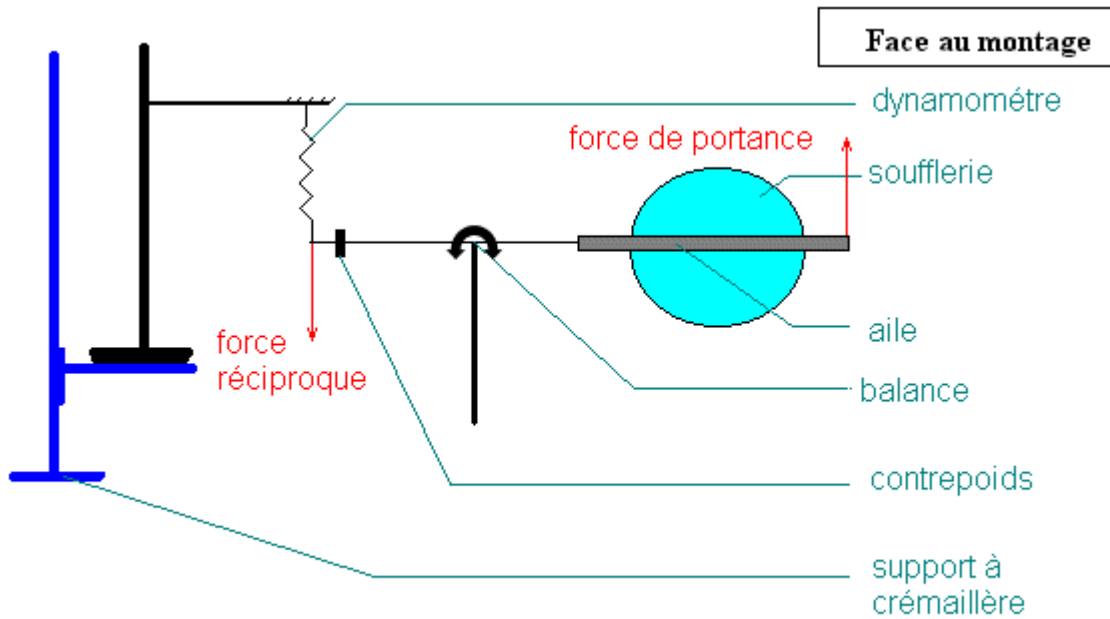
Afin d'obtenir une certaine précision dans nos mesures, il nous a fallu poser quelques paramètres qui restent inchangés tout au long de l'expérience :

- distance du bord d'attaque à la soufflerie = 15 cm
- vitesse de la soufflerie =  $10\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$

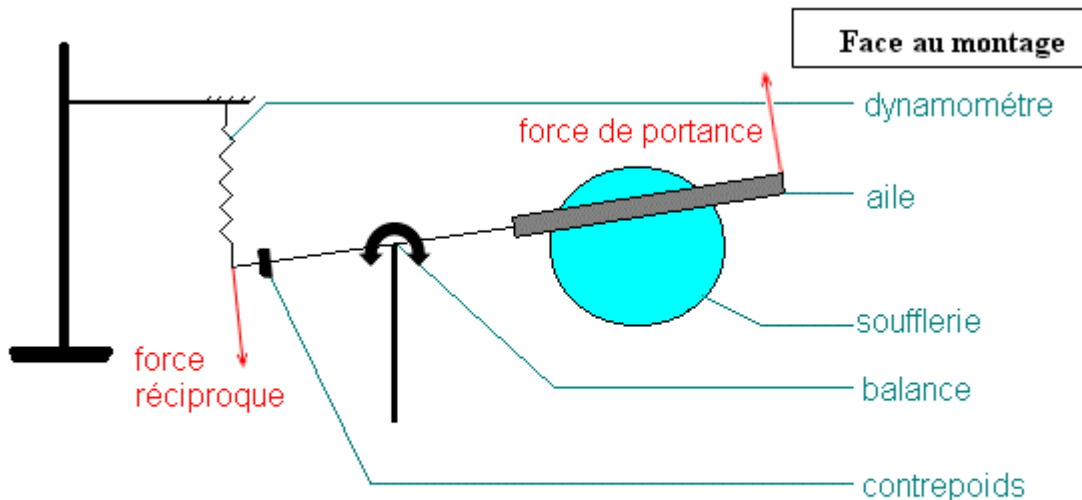
Ainsi nous ne faisons varier que l'incidence entre chaque mesure.

Enfin, pour modéliser l'écoulement de l'air, nous plaçons des fils de laine, sur chacun des deux profils.

Voici le schéma de notre expérience :



Ce protocole est né de l'ensemble des réponses trouvées aux problèmes rencontrés. En effet, nous n'avons pas immédiatement pensé à ajouter un support à crémaillère, sous le dynamomètre. L'aile, soumise à la portance, s'élevait et sortait du flux d'air. De plus la force réciproque n'avait plus pour direction la verticale, ce qui avait pour conséquence de fausser les mesures. Le support à crémaillère permet de maintenir l'aile droite dans le flux d'air.

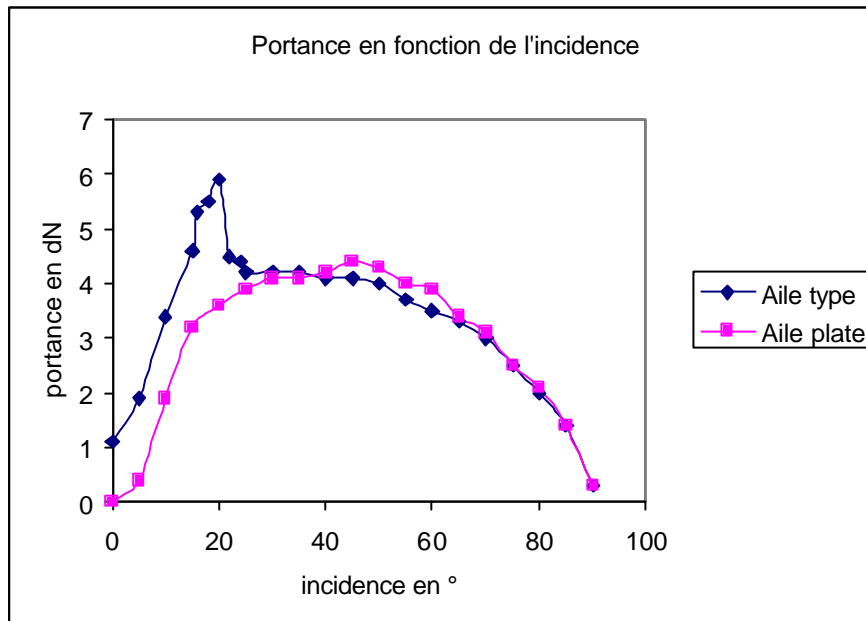


Pour qu'il y ait le moins d'erreur possible, nous avons réalisé les expériences trois fois. Nous ne récapitulons ici que les moyennes.

## b) Résultats

| Incidence (°)   | 0   | 5   | 10  | 15  | 16  | 18  | 20  | 22  | 24 | 25  | 30  | 35  |
|-----------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|----|-----|-----|-----|
| Aile type (dN)  | 1,1 | 1,9 | 3,4 | 4,6 | 5,3 | 5,5 | 5,9 | 4,5 | 4  | 4,2 | 4,2 | 4,2 |
| Aile plate (dN) | 0   | 0,4 | 1,9 | 3,2 |     |     | 3,6 |     |    | 3,9 | 4,1 | 4,1 |

| 40  | 45  | 50  | 55  | 60  | 65  | 70  | 75 | 80  | 85  | 90  |
|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|----|-----|-----|-----|
| 4,1 | 4,1 | 4   | 3,7 | 3,5 | 3,3 | 3   | 3  | 2   | 1,4 | 0,3 |
| 4,2 | 4,4 | 4,3 | 4   | 3,9 | 3,4 | 3,1 | 3  | 2,1 | 1,4 | 0,3 |



On observe sur ce graphique que la portance des deux profils est semblable après trente degrés d'incidence. Cependant auparavant, la force de sustentation offerte par le profil type est supérieure à celle du profil plat. Se dégage donc un avantage de l'aile courbe, à savoir une plus forte portance pour les incidences inférieures à trente degrés.

On observe également une chute importante de la portance sur le profil courbe à vingt degrés. Pour les angles égaux ou supérieurs à cette incidence, les fils de laine se décollent et sont très agités, alors qu'auparavant, ils épousaient la forme du profil. L'écoulement de l'air, d'abord laminaire, devient tourbillonnaire.

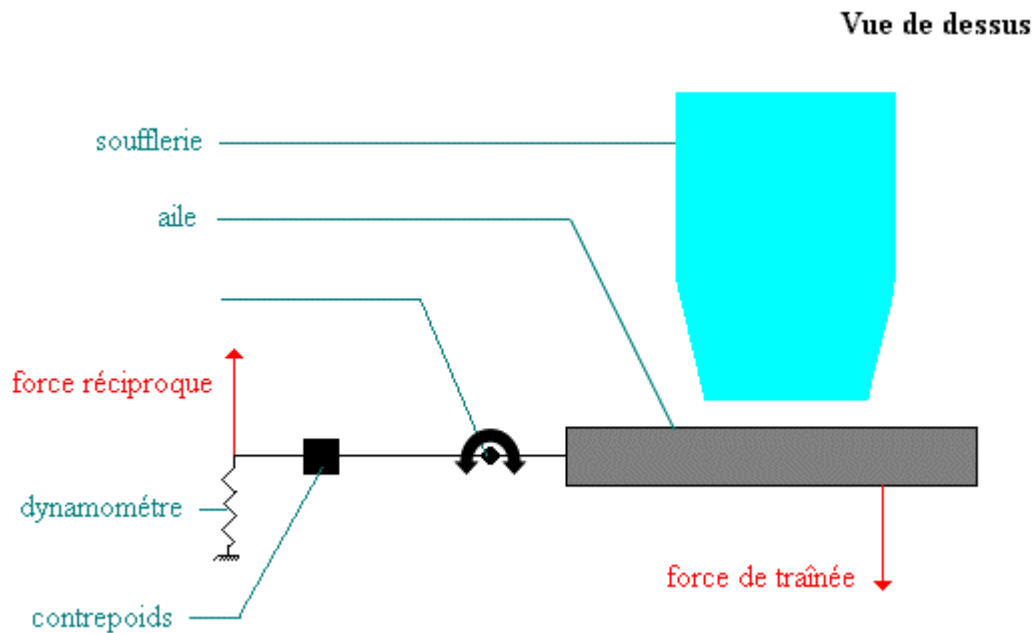
De la même manière sur le profil plat, après vingt degrés d'incidence, l'écoulement devient tourbillonnaire.



## 2. La traînée

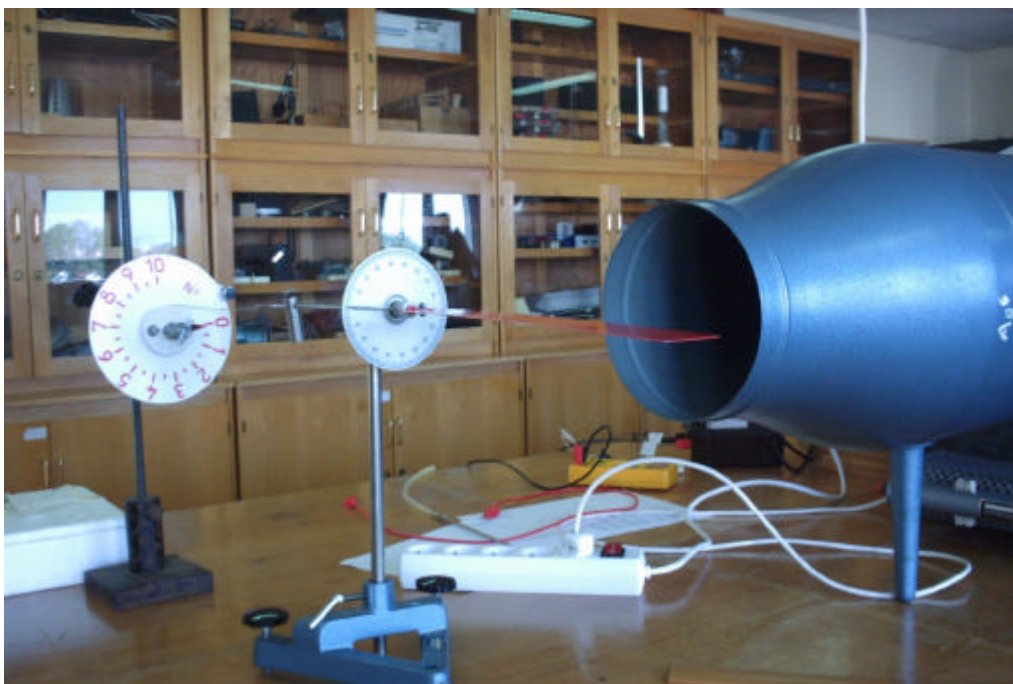
### a) Protocole expérimental

Nous cherchons à mesurer la traînée de nos deux profils. Nous utilisons le même matériel que dans la première manipulation, mais modifions l'axe de rotation de l'aile sur la balance.



De même que pour les mesures de portance, les problèmes rencontrés nous ont permis d'améliorer l'expérience. Avec la portance, l'aile montait, ici en raison de la traînée, l'aile tourne. Pour que les mesures soient justes et que l'aile soit droite dans le flux d'air, nous déplaçons le dynamomètre afin de compenser la rotation.

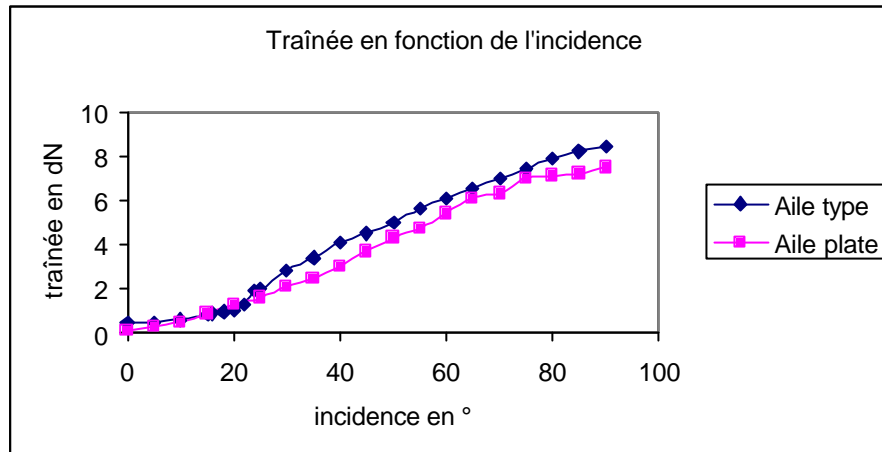
Ici encore, les résultats sont les moyennes des différentes mesures réalisées.



## b) Résultats

| Incidence (°)   | 0   | 5   | 10  | 15  | 16  | 18 | 20  | 22  | 24 | 25  | 30  | 35  |
|-----------------|-----|-----|-----|-----|-----|----|-----|-----|----|-----|-----|-----|
| Aile type (dN)  | 0,5 | 0,5 | 0,6 | 0,8 | 0,9 | 1  | 1   | 1,3 | 2  | 2   | 2,8 | 3,4 |
| Aile plate (dN) | 0,1 | 0,3 | 0,5 | 0,9 |     |    | 1,3 |     |    | 1,6 | 2,1 | 2,5 |

| 40  | 45  | 50  | 55  | 60  | 65  | 70  | 75 | 80  | 85  | 90  |
|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|----|-----|-----|-----|
| 4,1 | 4,5 | 5   | 5,6 | 6,1 | 6,5 | 7   | 7  | 7,9 | 8,2 | 8,4 |
| 3   | 3,7 | 4,3 | 4,7 | 5,4 | 6,1 | 6,3 | 7  | 7,1 | 7,2 | 7,5 |



La traînée est semblable sur les deux profils. Aucune aile ne semble être plus avantageuse de ce point de vue là. Cependant, pour les deux profils la traînée est relativement faible pour les premières incidences.

Confrontons maintenant nos différentes observations et nos mesures de portance et de traînée.

### 3. Comparaison des deux ailes

On sait que la portance permet à l'avion de s'élever dans les airs tandis que la traînée, au contraire, gêne le vol en freinant l'avion.

Or d'après la première manipulation, la portance de l'aile courbe est nettement supérieure à celle du profil plat pour les premières incidences. De plus avec la seconde manipulation, on voit que la traînée, à ces incidences, est relativement faible pour les deux profils.

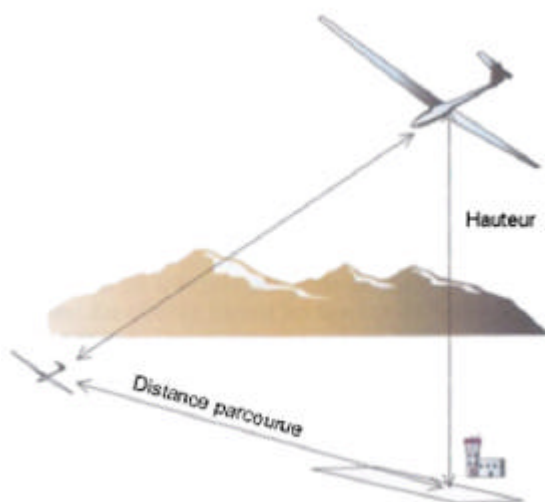
L'aile courbe semble donc apporter le meilleur compromis entre une forte portance et une faible traînée.

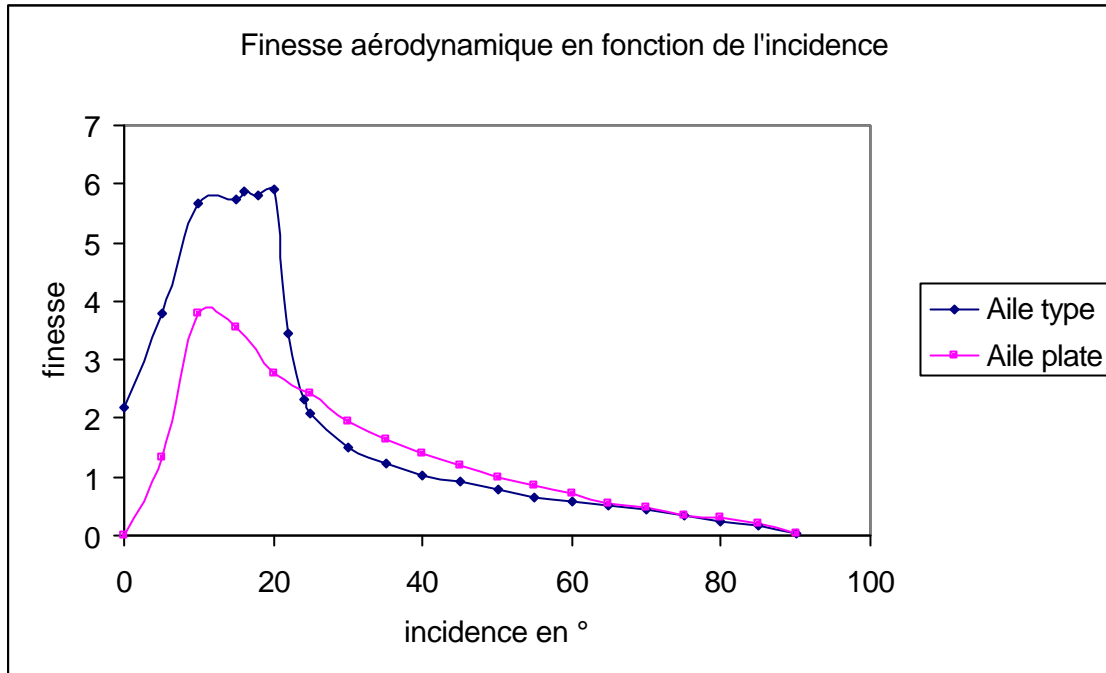
Une notion aéronautique permet d'exprimer ce compromis.

Il s'agit de la  *finesse aérodynamique*.

Elle se calcule pour chaque incidence en divisant la portance par la traînée. Concrètement elle correspond au rapport de la distance parcourue sur la hauteur perdue.

Plus elle est grande, meilleures sont les caractéristiques de vol (l'avion parcourt une plus grande distance en partant de la même altitude).





On observe que pour les vingt-cinq premières incidences, la finesse du profil type est nettement supérieure à celle de l'aile plate.

Il se dégage donc de ces observations l'avantage de l'aile courbe sur l'aile plate, à savoir de meilleures caractéristiques de vol aux incidences comprises entre zéro et vingt degrés.

Cet ensemble d'incidence est appelé *domaine de vol*.

En effet, un avion de tourisme ne volera jamais à des angles situés hors de cette fourchette, ce qui se comprend aisément si l'on se réfère à nos mesures (la portance y est faible et la traînée importante).

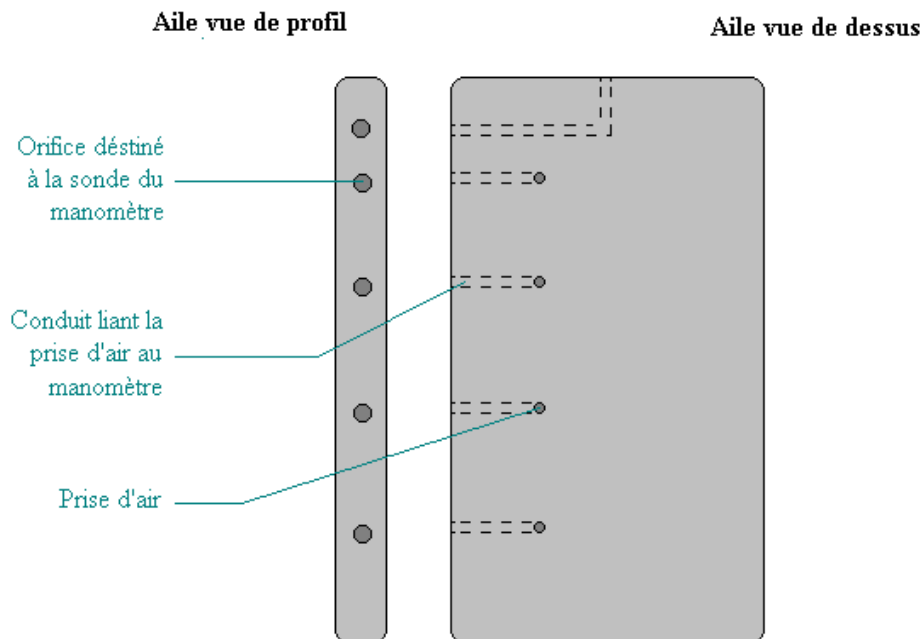
Désormais nous allons nous intéresser aux pressions qui existent sur un profil courbe, et essayer de mettre en évidence une relation entre pression, traînée et portance.

### III. Mesure de la pression

#### 1. Protocole

##### a) Mise en place du protocole

Pour connaître la pression qui règne sur l'aile, nous disposons d'un profil courbe. Sur chacune de ses faces, des trous sont perforés et sont liés à des orifices placés sur la tranche.



Pour mesurer la pression, le profil à étudier est placé dans le courant d'air de la soufflerie. Nous faisons alors varier l'incidence et mesurons, pour chaque point et chaque angle la pression, en plaçant la sonde du manomètre dans les orifices de la tranche.

Le manomètre que nous avons tout d'abord utilisé était un capteur de pression différentiel. Nous y branchions un voltmètre et les mesures de tension, multipliées par une constante, nous donnaient des pressions. Cependant, les fluctuations dues au montage et au générateur étaient trop importantes pour permettre une mesure précise de la pression.

C'est pourquoi nous nous sommes procuré un tube en U rempli de liquide. Cet appareil de mesure traduit la variation de pression en une variation de hauteur du liquide.



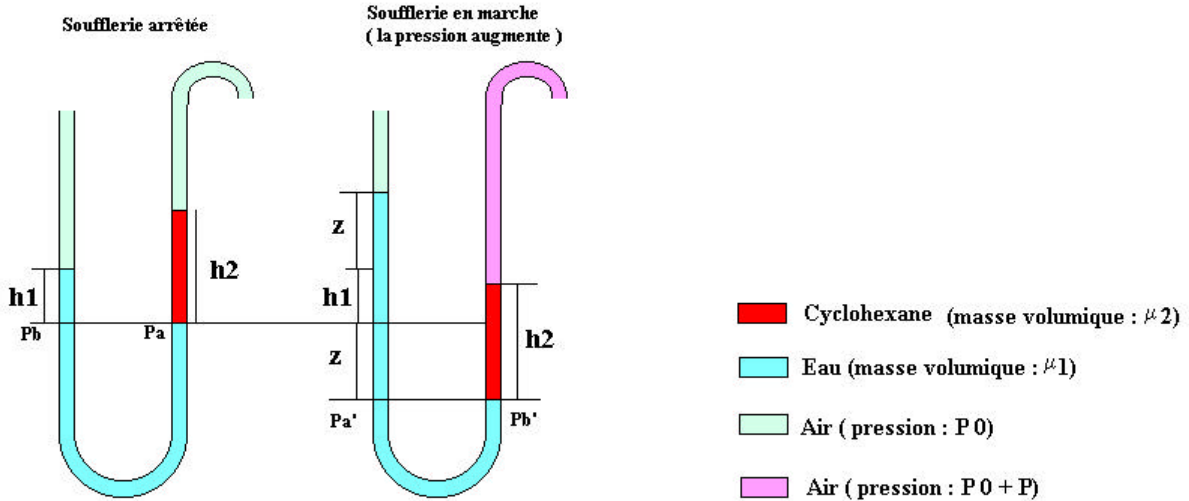
Protocole expérimental



Tube en U

b) Démonstration des formules liées au manomètre

Mesure de la pression



La pression est le rapport d'une force sur une surface.

$$P = \frac{F}{S}$$

P : la pression en Pa  
 F : la force en N  
 S : la surface en m<sup>2</sup>

Lorsque la soufflerie est éteinte, les pressions en a et en b sont égales.

D'où :

$$\begin{aligned}
 P_a &= P_b \\
 P_0 + P_1 &= P_0 + P_2 \\
 (h_1 \mu_1 g) &= (h_2 \mu_2 g) \\
 h_1 \mu_1 &= h_2 \mu_2 \\
 h_1 &= \frac{(h_2 \mu_2)}{\mu_1} \quad (1)
 \end{aligned}$$

Avec P1 et P2 la pression due au poids du liquide, situé au-dessus de a et de b.  
 Et avec P0, la pression de l'air.

Lorsque la soufflerie est en marche, les pressions a' et b' sont égales

D'où :

$$\begin{aligned}
 Pa' &= Pb' \\
 P_0 + P_1' &= P + P_0 + P_2 \\
 P &= P_1' - P_2 \\
 &= (h_1 + 2z) \mu_1 g - h_2 \mu_2 g \\
 &= h_1 \mu_1 g + 2z \mu_1 g - h_2 \mu_2 g
 \end{aligned}$$

Avec P, la variation de pression qui apparaît.

Avec z la variation de hauteur qui apparaît.

Et avec P' 1 la pression due au liquide en a'.

D'après (1), on peut dire que

$$\begin{aligned}
 P &= h_2 \mu_2 g + 2z \mu_1 g - h_2 \mu_2 g \\
 &= 2z \mu_1 g
 \end{aligned}$$

La variation de hauteur z peut donc être traduite en une variation de pression P. Il nous faut maintenant convertir cette variation de pression en une force.

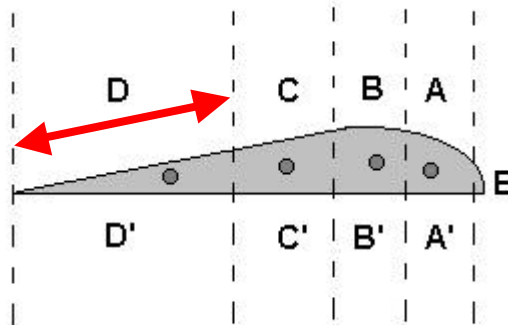


## 2. Comment passe-t-on de pression à force ?

### a) Principe

Pour chaque incidence nous obtenons neuf valeurs de pressions, une pour chaque orifice (A, A', B, B', C, C', D, D', E). Or la présence d'une pression implique l'existence d'une force. En effet la pression est le rapport de la force sur la surface.

Nous découpons le profil en neuf surfaces et admettons que la pression qui s'applique sur l'une d'elle, est égale à la pression mesurée dans l'orifice contenu par cette surface. Par exemple la pression qui s'applique sur la surface rouge est égale à la pression mesurée en D.



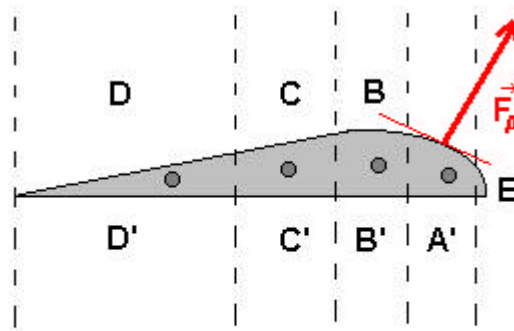
Nos neuf pressions nous permettent alors d'obtenir neuf vecteurs force.

Leur valeur  $F$  est donnée par la relation  $F = P \cdot S$  avec  $P$  représentant la pression et  $S$  la surface.

Le point d'application est le centre de la surface.

La direction est la normale à la tangente à l'aile.

Le sens dépend de la pression.



Ici, on considère que la pression est négative,  
 $F$  est donc dirigée vers le haut.

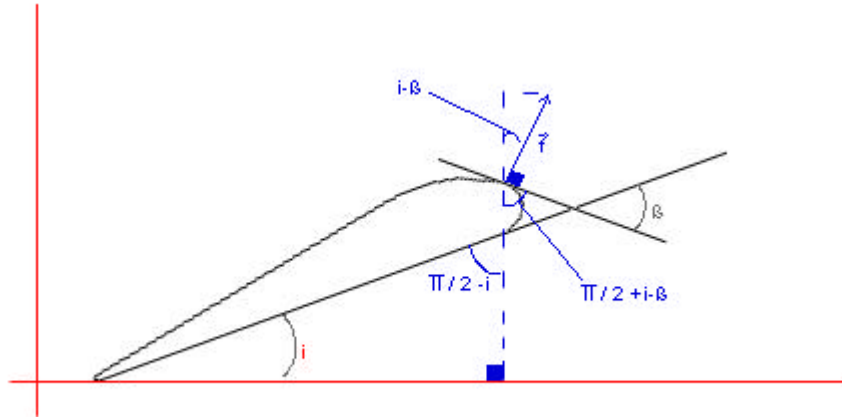
Pour chaque incidence nous obtenons donc neuf vecteurs qu'il suffit d'additionner pour avoir la force résultante des pressions. Cependant les additionner un à un graphiquement serait trop fastidieux, c'est pourquoi nous travaillons avec leurs coordonnées.

## b) Explication des calculs

Nous distinguons deux cas :

### **Cas 1 :**

La tangente à l'aile possède une pente négative. Il s'agit des tangentes aux points A et B.



> Sur ce schéma, on peut voir que  $f$  se décompose en :

- une force horizontale  $f_x = -\sin(i - \beta) * f$
- une force verticale  $f_y = \cos(i - \beta) * f$

*Remarque :* On considère la pression négative. Si elle était positive les coordonnées de  $f$  seraient les opposées de celles-ci.

> Le point E est un cas particulier. En effet  $\beta = 90^\circ$ .  $f$  se décompose en :

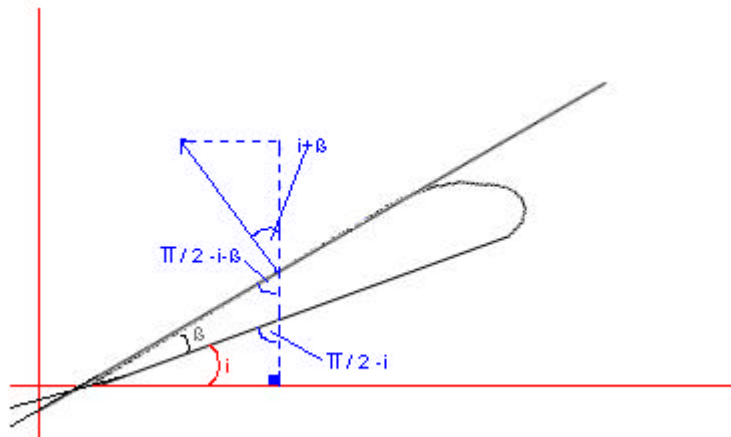
- une force horizontale  $f_x = \cos i * f$
- une force verticale  $f_y = \sin i * f$

Ici encore on considère la pression comme négative. Si elle était positive,  $f$  se décomposerait en :

- une force horizontale  $f_x = -\cos i * f$
- une force verticale  $f_y = -\sin i * f$

## Cas 2 :

La tangente à l'aile possède une pente positive. Il s'agit des tangentes aux points C et D.



> f se décompose en :

- une force horizontale  $f_x = -\sin(i + \beta) * f$
- une force verticale  $f_y = \cos(i + \beta) * f$

La pression est une fois encore considérée comme négative.

> Les points A', B', C', D' sont des cas particuliers. En effet l'angle  $\beta$  est nul et de plus la force est orientée vers le haut lorsque la pression est positive alors que pour les points de l'extrados, la force est orientée vers le haut lorsque la pression est négative.

La force due à la pression sous l'intrados se décompose donc en :

- une composante horizontale,  $f_x = -\sin i * f$  si la pression est positive  
 $f_x = \sin i * f$  si elle est négative
- une composante verticale,  $f_y = \cos i * f$  si la pression est positive  
 $f_y = -\sin i * f$  si elle est négative

### 3. Résultats

Les tableaux suivants récapitulent l'ensemble des données :

- la hauteur  $z$  lue sur le manomètre pour chaque point et pour chaque incidence
- la pression mesurée grâce à  $z$  et à la formule démontrée précédemment
- la force en chaque point et pour chaque incidence, ainsi que les coordonnées du vecteur force
- la force totale et les coordonnées de son vecteur pour chaque incidence

| incidence |     |         |         |                           |                 |               |           |           | force associée en N |               | force totale en N |  |
|-----------|-----|---------|---------|---------------------------|-----------------|---------------|-----------|-----------|---------------------|---------------|-------------------|--|
| 0°        | pts | z en cm | P en Pa | surface en m <sup>2</sup> | angle tan degré | angle tan rad | X         | Y         | X                   | Y             |                   |  |
| 0         | E   | 0,2     | 39,2    | 5,0E-04                   |                 |               | -1,96E-02 | 0,00E+00  | <b>-0,0283</b>      | <b>0,1417</b> |                   |  |
| rad       | A   | -0,15   | -29,4   | 3,0E-03                   | 167             | 2,915         | 1,98E-02  | 8,59E-02  |                     |               |                   |  |
|           | B   | -0,2    | -39,2   | 3,0E-03                   | 177             | 3,089         | 6,15E-03  | 1,17E-01  |                     |               |                   |  |
|           | C   | -0,1    | -19,6   | 5,0E-03                   | 5               | 0,087         | -8,54E-03 | 9,76E-02  |                     |               |                   |  |
|           | D   | -0,1    | -19,6   | 7,0E-03                   | 11              | 0,192         | -2,62E-02 | 1,35E-01  |                     |               |                   |  |
|           | A'  | 0       | 0       | 3,0E-03                   | 0               | 0,000         | 0,00E+00  | 0,00E+00  |                     |               |                   |  |
|           | B'  | -0,1    | -19,6   | 3,0E-03                   | 0               | 0,000         | 0,00E+00  | -5,88E-02 |                     |               |                   |  |
|           | C'  | -0,1    | -19,6   | 5,0E-03                   | 0               | 0,000         | 0,00E+00  | -9,80E-02 |                     |               |                   |  |
|           | D'  | -0,1    | -19,6   | 7,0E-03                   | 0               | 0,000         | 0,00E+00  | -1,37E-01 |                     |               |                   |  |

| 5°     |     |         |         |                           |                 |               |           |           | force associée en N |               | force totale en N |  |
|--------|-----|---------|---------|---------------------------|-----------------|---------------|-----------|-----------|---------------------|---------------|-------------------|--|
| 0,0873 | pts | z en cm | P en Pa | surface en m <sup>2</sup> | angle tan degré | angle tan rad | X         | Y         | X                   | Y             |                   |  |
| 0,0873 | E   | 0,3     | 58,8    | 5,0E-04                   |                 |               | -2,93E-02 | -2,56E-03 | <b>-0,0420</b>      | <b>0,2052</b> |                   |  |
| rad    | A   | -0,08   | -15,7   | 3,0E-03                   | 167             | 2,915         | 6,55E-03  | 4,66E-02  |                     |               |                   |  |
|        | B   | -0,11   | -21,6   | 3,0E-03                   | 177             | 3,089         | -2,26E-03 | 6,46E-02  |                     |               |                   |  |
|        | C   | -0,1    | -19,6   | 5,0E-03                   | 5               | 0,087         | -1,70E-02 | 9,65E-02  |                     |               |                   |  |
|        | D   | 0       | 0       | 7,0E-03                   | 11              | 0,192         | 0,00E+00  | 0,00E+00  |                     |               |                   |  |
|        | A'  | 0       | 0       | 3,0E-03                   | 0               | 0,000         | 0,00E+00  | 0,00E+00  |                     |               |                   |  |
|        | B'  | 0       | 0       | 3,0E-03                   | 0               | 0,000         | 0,00E+00  | 0,00E+00  |                     |               |                   |  |
|        | C'  | 0       | 0       | 5,0E-03                   | 0               | 0,000         | 0,00E+00  | 0,00E+00  |                     |               |                   |  |
|        | D'  | 0       | 0       | 7,0E-03                   | 0               | 0,000         | 0,00E+00  | 0,00E+00  |                     |               |                   |  |

| 10°    |     |         |         |                           |                 |               |           |           | force associée en N |               | force totale en N |  |
|--------|-----|---------|---------|---------------------------|-----------------|---------------|-----------|-----------|---------------------|---------------|-------------------|--|
| 0,1745 | pts | z en cm | P en Pa | surface en m <sup>2</sup> | angle tan degré | angle tan rad | X         | Y         | X                   | Y             |                   |  |
| 0,1745 | E   | 0,3     | 58,8    | 5,0E-04                   |                 |               | -2,90E-02 | -5,11E-03 | <b>-0,1077</b>      | <b>0,5537</b> |                   |  |
| rad    | A   | -0,2    | -39,2   | 3,0E-03                   | 167             | 2,915         | 6,15E-03  | 1,17E-01  |                     |               |                   |  |
|        | B   | -0,2    | -39,2   | 3,0E-03                   | 177             | 3,089         | -1,43E-02 | 1,17E-01  |                     |               |                   |  |
|        | C   | 0       | 0       | 5,0E-03                   | 5               | 0,087         | 0,00E+00  | 0,00E+00  |                     |               |                   |  |
|        | D   | -0,05   | -9,8    | 7,0E-03                   | 11              | 0,192         | -2,46E-02 | 6,40E-02  |                     |               |                   |  |
|        | A'  | 0,15    | 29,4    | 3,0E-03                   | 0               | 0,000         | -1,53E-02 | 8,69E-02  |                     |               |                   |  |
|        | B'  | 0,1     | 19,6    | 3,0E-03                   | 0               | 0,000         | -1,02E-02 | 5,79E-02  |                     |               |                   |  |
|        | C'  | 0,05    | 9,8     | 5,0E-03                   | 0               | 0,000         | -8,51E-03 | 4,83E-02  |                     |               |                   |  |
|        | D'  | 0,05    | 9,8     | 7,0E-03                   | 0               | 0,000         | -1,19E-02 | 6,76E-02  |                     |               |                   |  |

| 15°    |     |         |         |                           |                 |               |           |           | force associée en N |               | force totale en N |  |
|--------|-----|---------|---------|---------------------------|-----------------|---------------|-----------|-----------|---------------------|---------------|-------------------|--|
| 0,2618 | pts | z en cm | P en Pa | surface en m <sup>2</sup> | angle tan degré | angle tan rad | X         | Y         | X                   | Y             |                   |  |
| 0,2618 | E   | 0,3     | 58,8    | 5,0E-04                   |                 |               | -2,84E-02 | -7,61E-03 | <b>-0,2180</b>      | <b>0,7678</b> |                   |  |
| rad    | A   | -0,25   | -49     | 3,0E-03                   | 167             | 2,915         | -5,13E-03 | 1,47E-01  |                     |               |                   |  |
|        | B   | -0,2    | -39,2   | 3,0E-03                   | 177             | 3,089         | -2,45E-02 | 1,15E-01  |                     |               |                   |  |
|        | C   | -0,1    | -19,6   | 5,0E-03                   | 5               | 0,087         | -3,35E-02 | 9,21E-02  |                     |               |                   |  |
|        | D   | -0,05   | -9,8    | 7,0E-03                   | 11              | 0,192         | -3,01E-02 | 6,17E-02  |                     |               |                   |  |
|        | A'  | 0,2     | 39,2    | 3,0E-03                   | 0               | 0,000         | -3,04E-02 | 1,14E-01  |                     |               |                   |  |
|        | B'  | 0,15    | 29,4    | 3,0E-03                   | 0               | 0,000         | -2,28E-02 | 8,52E-02  |                     |               |                   |  |
|        | C'  | 0,1     | 19,6    | 5,0E-03                   | 0               | 0,000         | -2,54E-02 | 9,47E-02  |                     |               |                   |  |
|        | D'  | 0,05    | 9,8     | 7,0E-03                   | 0               | 0,000         | -1,78E-02 | 6,63E-02  |                     |               |                   |  |

|        |     |         |         |                           |                 |               | force associée en N |           | force totale en N |        |
|--------|-----|---------|---------|---------------------------|-----------------|---------------|---------------------|-----------|-------------------|--------|
| 20°    | pts | z en cm | P en Pa | surface en m <sup>2</sup> | angle tan degré | angle tan rad | X                   | Y         | X                 | Y      |
| 0,3491 | E   | 0,2     | 39,2    | 5,0E-04                   |                 |               | -1,84E-02           | -6,70E-03 | -0,3530           | 0,9881 |
| rad    | A   | -0,4    | -78,4   | 3,0E-03                   | 167             | 2,915         | -2,87E-02           | 2,33E-01  |                   |        |
|        | B   | -0,25   | -49     | 3,0E-03                   | 177             | 3,089         | -4,30E-02           | 1,41E-01  |                   |        |
|        | C   | -0,1    | -19,6   | 5,0E-03                   | 5               | 0,087         | -4,14E-02           | 8,88E-02  |                   |        |
|        | D   | -0,1    | -19,6   | 7,0E-03                   | 11              | 0,192         | -7,07E-02           | 1,18E-01  |                   |        |
|        | A'  | 0,2     | 39,2    | 3,0E-03                   | 0               | 0,000         | -4,02E-02           | 1,11E-01  |                   |        |
|        | B'  | 0,15    | 29,4    | 3,0E-03                   | 0               | 0,000         | -3,02E-02           | 8,29E-02  |                   |        |
|        | C'  | 0,1     | 19,6    | 5,0E-03                   | 0               | 0,000         | -3,35E-02           | 9,21E-02  |                   |        |
|        | D'  | 0,1     | 19,6    | 7,0E-03                   | 0               | 0,000         | -4,69E-02           | 1,29E-01  |                   |        |

|        |     |         |         |                           |                 |               | force associée en N |          | force totale en N |        |
|--------|-----|---------|---------|---------------------------|-----------------|---------------|---------------------|----------|-------------------|--------|
| 25°    | pts | z en cm | P en Pa | surface en m <sup>2</sup> | angle tan degré | angle tan rad | X                   | Y        | X                 | Y      |
| 0,4363 | E   | 0       | 0       | 5,0E-04                   |                 |               | 0,00E+00            | 0,00E+00 | -0,4874           | 1,1450 |
| rad    | A   | -0,5    | -98     | 3,0E-03                   | 167             | 2,915         | -6,11E-02           | 2,88E-01 |                   |        |
|        | B   | -0,35   | -68,6   | 3,0E-03                   | 177             | 3,089         | -7,71E-02           | 1,91E-01 |                   |        |
|        | C   | -0,1    | -19,6   | 5,0E-03                   | 5               | 0,087         | -4,90E-02           | 8,49E-02 |                   |        |
|        | D   | -0,1    | -19,6   | 7,0E-03                   | 11              | 0,192         | -8,06E-02           | 1,11E-01 |                   |        |
|        | A'  | 0,2     | 39,2    | 3,0E-03                   | 0               | 0,000         | -4,97E-02           | 1,07E-01 |                   |        |
|        | B'  | 0,2     | 39,2    | 3,0E-03                   | 0               | 0,000         | -4,97E-02           | 1,07E-01 |                   |        |
|        | C'  | 0,15    | 29,4    | 5,0E-03                   | 0               | 0,000         | -6,21E-02           | 1,33E-01 |                   |        |
|        | D'  | 0,1     | 19,6    | 7,0E-03                   | 0               | 0,000         | -5,80E-02           | 1,24E-01 |                   |        |

|        |     |         |         |                           |                 |               | force associée en N |          | force totale en N |        |
|--------|-----|---------|---------|---------------------------|-----------------|---------------|---------------------|----------|-------------------|--------|
| 30°    | pts | z en cm | P en Pa | surface en m <sup>2</sup> | angle tan degré | angle tan rad | X                   | Y        | X                 | Y      |
| 0,5236 | E   | -0,35   | -68,6   | 5,0E-04                   |                 |               | 2,97E-02            | 1,72E-02 | -0,5936           | 1,1609 |
| rad    | A   | -0,5    | -98     | 3,0E-03                   | 167             | 2,915         | -8,60E-02           | 2,81E-01 |                   |        |
|        | B   | -0,3    | -58,8   | 3,0E-03                   | 177             | 3,089         | -8,01E-02           | 1,57E-01 |                   |        |
|        | C   | -0,2    | -39,2   | 5,0E-03                   | 5               | 0,087         | -1,12E-01           | 1,61E-01 |                   |        |
|        | D   | -0,1    | -19,6   | 7,0E-03                   | 11              | 0,192         | -9,00E-02           | 1,04E-01 |                   |        |
|        | A'  | 0,3     | 58,8    | 3,0E-03                   | 0               | 0,000         | -8,82E-02           | 1,53E-01 |                   |        |
|        | B'  | 0,2     | 39,2    | 3,0E-03                   | 0               | 0,000         | -5,88E-02           | 1,02E-01 |                   |        |
|        | C'  | 0,15    | 29,4    | 5,0E-03                   | 0               | 0,000         | -7,35E-02           | 1,27E-01 |                   |        |
|        | D'  | 0,05    | 9,8     | 7,0E-03                   | 0               | 0,000         | -3,43E-02           | 5,94E-02 |                   |        |

|        |     |         |         |                           |                 |               | force associée en N |          | force totale en N |        |
|--------|-----|---------|---------|---------------------------|-----------------|---------------|---------------------|----------|-------------------|--------|
| 35°    | pts | z en cm | P en Pa | surface en m <sup>2</sup> | angle tan degré | angle tan rad | X                   | Y        | X                 | Y      |
| 0,6109 | E   | -0,1    | -19,6   | 5,0E-04                   |                 |               | 8,03E-03            | 5,62E-03 | -0,7198           | 1,0203 |
| rad    | A   | -0,15   | -29,4   | 3,0E-03                   | 167             | 2,915         | -3,30E-02           | 8,18E-02 |                   |        |
|        | B   | -0,3    | -58,8   | 3,0E-03                   | 177             | 3,089         | -9,35E-02           | 1,50E-01 |                   |        |
|        | C   | -0,2    | -39,2   | 5,0E-03                   | 5               | 0,087         | -1,26E-01           | 1,50E-01 |                   |        |
|        | D   | -0,1    | -19,6   | 7,0E-03                   | 11              | 0,192         | -9,87E-02           | 9,53E-02 |                   |        |
|        | A'  | 0,3     | 58,8    | 3,0E-03                   | 0               | 0,000         | -1,01E-01           | 1,44E-01 |                   |        |
|        | B'  | 0,25    | 49      | 3,0E-03                   | 0               | 0,000         | -8,43E-02           | 1,20E-01 |                   |        |
|        | C'  | 0,2     | 39,2    | 5,0E-03                   | 0               | 0,000         | -1,12E-01           | 1,61E-01 |                   |        |
|        | D'  | 0,1     | 19,6    | 7,0E-03                   | 0               | 0,000         | -7,87E-02           | 1,12E-01 |                   |        |

|        |     |         |         |                           |                 |               | force associée en N |          | force totale en N |        |
|--------|-----|---------|---------|---------------------------|-----------------|---------------|---------------------|----------|-------------------|--------|
| 40°    | pts | z en cm | P en Pa | surface en m <sup>2</sup> | angle tan degré | angle tan rad | X                   | Y        | X                 | Y      |
| 0,6981 | E   | -0,2    | -39,2   | 5,0E-04                   |                 |               | 1,50E-02            | 1,26E-02 | -0,7185           | 0,8887 |
| rad    | A   | -0,15   | -29,4   | 3,0E-03                   | 167             | 2,915         | -4,00E-02           | 7,86E-02 |                   |        |
|        | B   | -0,1    | -19,6   | 3,0E-03                   | 177             | 3,089         | -3,54E-02           | 4,70E-02 |                   |        |
|        | C   | -0,1    | -19,6   | 5,0E-03                   | 5               | 0,087         | -6,93E-02           | 6,93E-02 |                   |        |
|        | D   | -0,05   | -9,8    | 7,0E-03                   | 11              | 0,192         | -5,33E-02           | 4,32E-02 |                   |        |
|        | A'  | 0,35    | 68,6    | 3,0E-03                   | 0               | 0,000         | -1,32E-01           | 1,58E-01 |                   |        |
|        | B'  | 0,3     | 58,8    | 3,0E-03                   | 0               | 0,000         | -1,13E-01           | 1,35E-01 |                   |        |
|        | C'  | 0,25    | 49      | 5,0E-03                   | 0               | 0,000         | -1,57E-01           | 1,88E-01 |                   |        |
|        | D'  | 0,15    | 29,4    | 7,0E-03                   | 0               | 0,000         | -1,32E-01           | 1,58E-01 |                   |        |

## Tableau bilan

| incidence en degré | force totale en N |             |
|--------------------|-------------------|-------------|
|                    | horizontale X     | verticale Y |
| 0                  | -0,028            | 0,142       |
| 5                  | -0,042            | 0,205       |
| 10                 | -0,108            | 0,554       |
| 15                 | -0,218            | 0,768       |
| 20                 | -0,353            | 0,988       |
| 25                 | -0,487            | 1,145       |
| 30                 | -0,594            | 1,161       |
| 35                 | -0,720            | 1,020       |
| 40                 | -0,718            | 0,889       |

Ce tableau récapitule les coordonnées du vecteur force, obtenu à partir des pressions. Pour chaque incidence, cette force peut se décomposer en une force verticale dirigée vers le haut et une force horizontale opposée au mouvement.

Autrement dit les coordonnées des vecteurs force peuvent être assimilées à une force frein, et une force de sustentation. On peut penser qu'il s'agit de la traînée et de la portance.

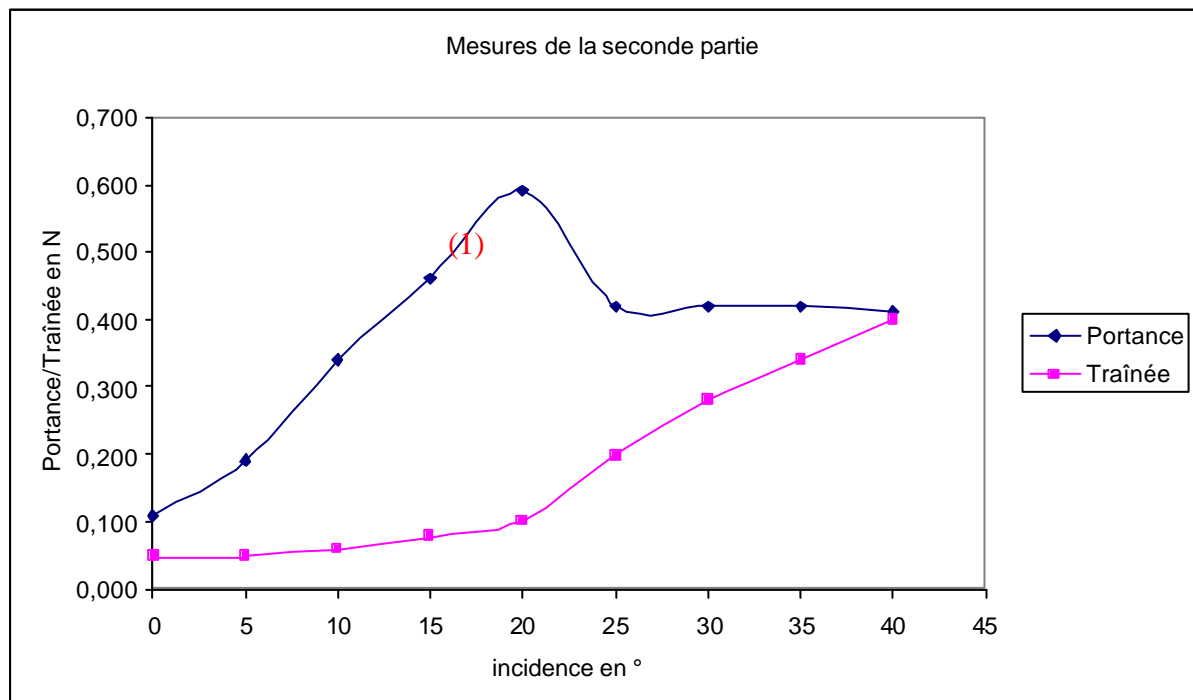
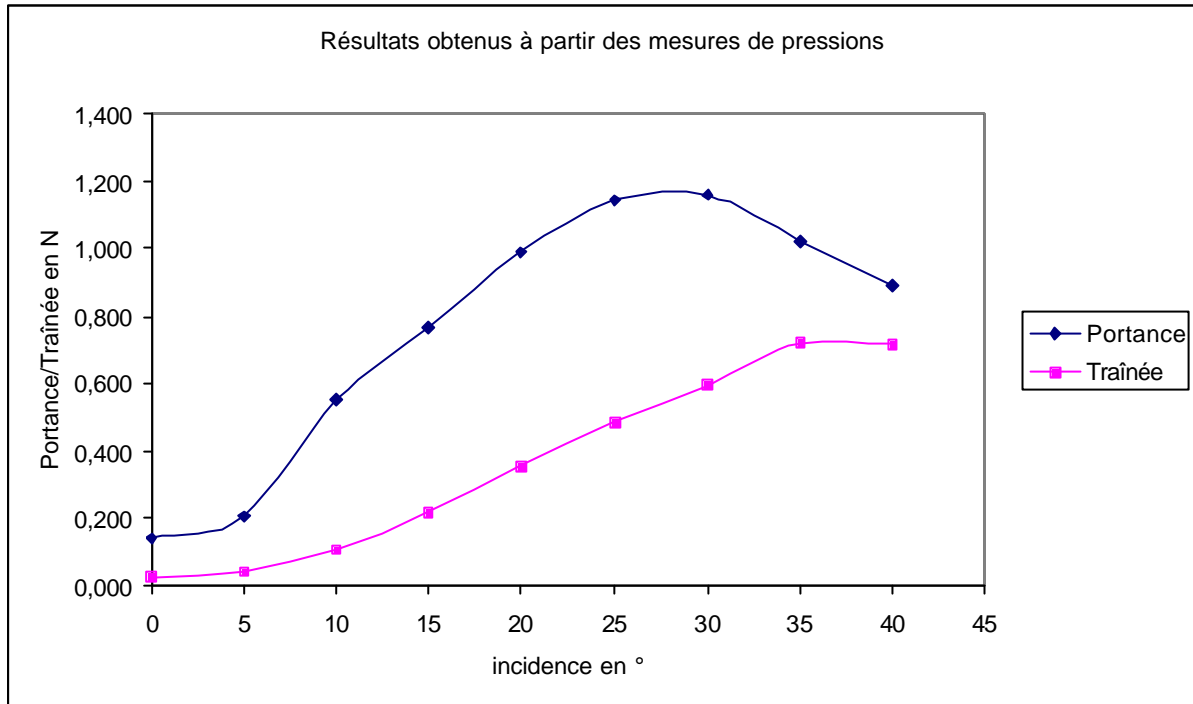
Nous sommes alors à même de nous demander si cette hypothèse est juste.

#### 4. Comment peut-on valider notre hypothèse ?

##### a) Comparaison des valeurs des parties II et III

Pour vérifier notre hypothèse (*est-ce que les forces obtenues grâce aux pressions sont la portance et la traînée ?*), nous avons tout d'abord pensé à comparer les valeurs obtenues à partir des pressions avec les valeurs de portance et de traînée de la seconde partie.

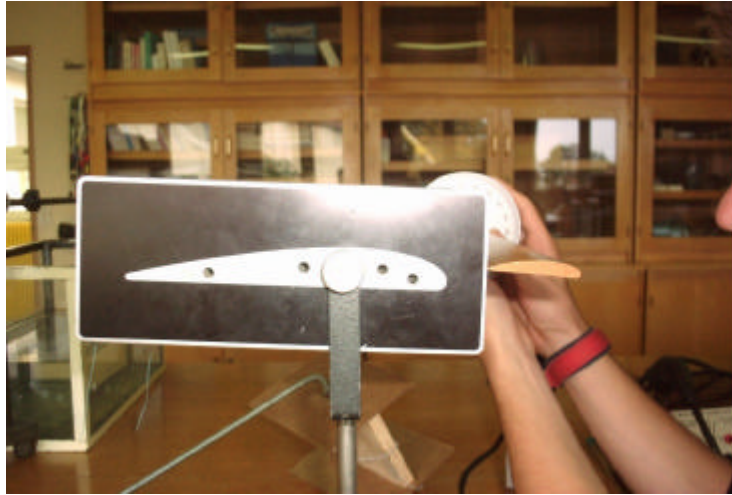
Pour cela, nous réalisons les graphiques suivants.



Les courbes présentent les mêmes tendances. La traînée augmente sans jamais diminuer. La portance quant à elle, augmente d'abord puis diminue ensuite.

Cependant, on voit apparaître quelques différences. Le changement de variation ne survient pas à la même incidence pour la portance. De plus, nous n'observons pas sur le premier graphique la chute (1) comme sur le second.

Ces différences peuvent s'expliquer par la différence de taille des profils :



Notre hypothèse n'étant pas validée par ces observations, nous avons décidé de réaliser des vérifications expérimentales.



## b) Vérification expérimentale des mesures

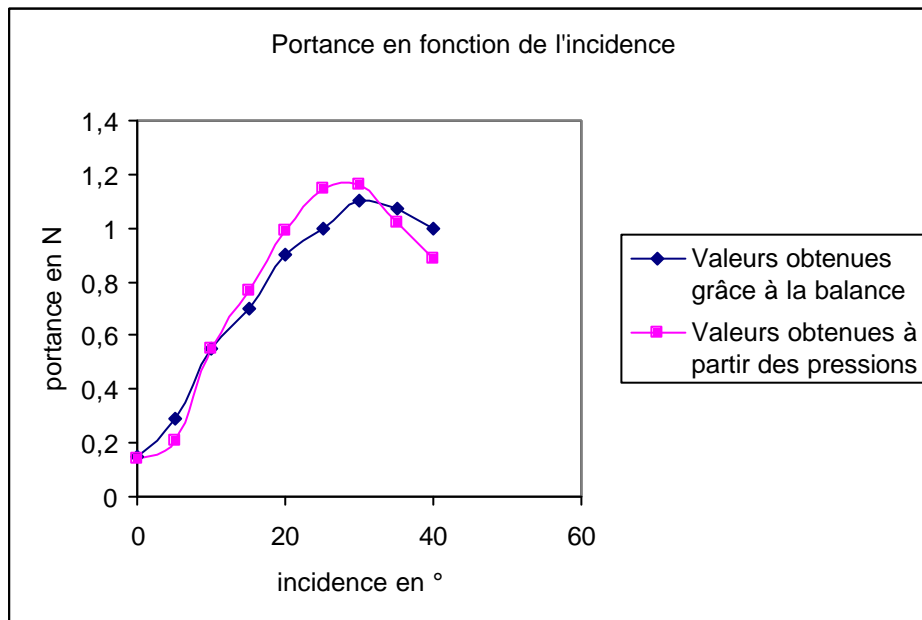
Pour vérifier nos calculs et valider notre hypothèse, il suffit de mesurer d'une autre manière la portance et la traînée, sur le profil utilisé dans nos mesures de pressions.

Pour mesurer ces forces, nous reprenons le protocole de la seconde partie (II.1 et II.2) : c'est-à-dire que nous utilisons la balance et mesurons la valeur des forces réciproques.

Cependant, nous avons légèrement modifié le montage, de manière à ce qu'il soit adapté au profil des pressions, plus lourd et plus grand.

### ✍ La portance

Avec les valeurs obtenues, nous réalisons le graphique représentant la portance en fonction de l'incidence, sur lequel nous superposons les valeurs obtenues à partir des pressions.



Les deux courbes se superposent. Autrement dit les valeurs obtenues grâce aux deux méthodes différentes sont égales. Ceci tend donc à prouver, que notre hypothèse est vraie, hypothèse selon laquelle la composante verticale de la résultante de pression est la portance.



### c) Bilan

#### Hypothèse :

force liée à la pression = traînée (horizontale) + portance (verticale)      *relation vectorielle*

#### Expériences :

Nos mesures et nos calculs nous montrent que les variations de pressions engendrent une force verticale qui est bien la portance.

Par contre, ces mêmes variations de pressions engendrent une force horizontale qui n'est qu'une partie de la traînée. En effet, l'autre partie est due aux frottements de l'air qui eux aussi freinent l'avion.

#### Conclusion :

L'hypothèse est partiellement juste.

La portance est directement liée aux variations de pression sur l'aile.

La traînée dépend elle aussi de ces variations, mais pas seulement : il y a aussi les forces de frottements de l'air qui entrent en jeu.

## **Conclusion**

Nous nous sommes posé cette question : que peut apporter la courbure de l'aile ?

Pour répondre, nous avons montré qu'une aile courbe offrait une meilleure portance et, en règle générale, de meilleures caractéristiques de vol qu'une aile plate.

Ensuite, nous nous sommes demandé quel paramètre allait être modifié grâce à cette courbure.

L'intérêt de la courbure de l'aile semble résider dans le fait qu'elle induit d'importantes variations de pression. Ces variations provoquent une force orientée vers le haut et dont la composante verticale constitue la portance.

La courbure de l'aile permet d'obtenir de meilleures variations de pression donc une meilleure portance.

Les variations de pression s'expliquent de la manière suivante :

L'air circulant sur l'extrados a un plus grand chemin à parcourir que l'air parcourant l'intrados. Il va donc plus vite. Ceci se traduit par une dépression sur l'extrados (en effet tout fluide accéléré crée une dépression). L'intrados quant à lui est le siège d'une surpression.

## **Bibliographie**

Initiation à l'aéronautique (troisième édition), Cépaduès éditions

Dictionnaire de Physique et de Chimie, Nathan

## **Remerciements**

M. LHOMME Laurent, professeur responsable du groupe

M. JUSSIAUX Jean-Michel, professeur de sciences physiques

M. MYOTTE Jean, agent de laboratoire