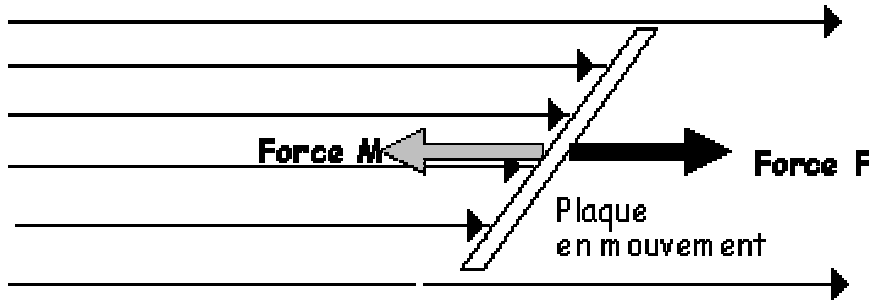


# BIA Aérodynamique

## I - Résistance de l'air

### I.1 - Résistance sur une plaque inclinée

Essayons de visualiser le comportement de l'air autour d'un objet qui se déplace (une plaque inclinée)



La plaque en mouvement pousse l'air, qui s'oppose à ce déplacement avec la force  $F$ . Pour que la plaque puisse rester en place, il faut lui appliquer la force  $M$

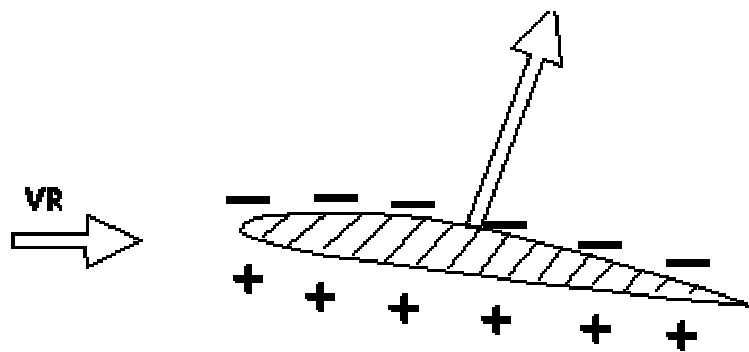
La force  $F$  est dénommée **RESULTANTE AERODYNAMIQUE**  
La force  $M$  est dénommée

**force MOTRICE**

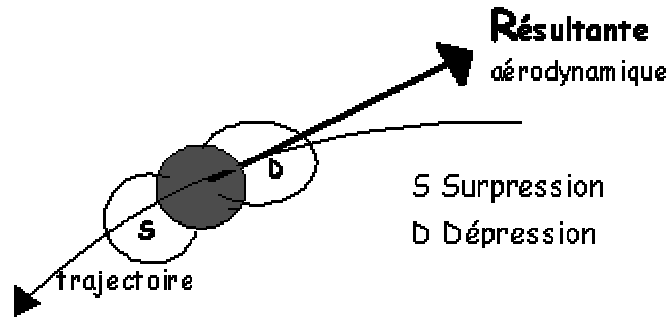
### I.2 - Répartition des pressions et dépressions

Lorsqu'un objet de forme quelconque se déplace dans l'air, il y a une surpression à l'avant et une dépression à l'arrière (l'air est ralenti à l'avant (compression) et accéléré à l'arrière (détente)). L'action conjuguée de ces différences de pression crée une force résultante qui tend à freiner l'objet sur sa trajectoire (force  $F$  du schéma précédent). Cette force est la résultante aérodynamique  $RA$  qui tend à freiner l'objet sur sa trajectoire (force  $R$ )

Un avion n'est pas un objet de forme quelconque. Il comporte une aile dont la forme en coupe (le profil) a été étudiée de telle façon que la résultante aérodynamique  $RA$  soit orientée vers le haut, presque à  $90^\circ$  de la trajectoire.



La partie supérieure de l'aile se nomme **EXTRADOS**  
La partie inférieure de l'aile se nomme **INTRADOS**  
**VR** : Vent Relatif



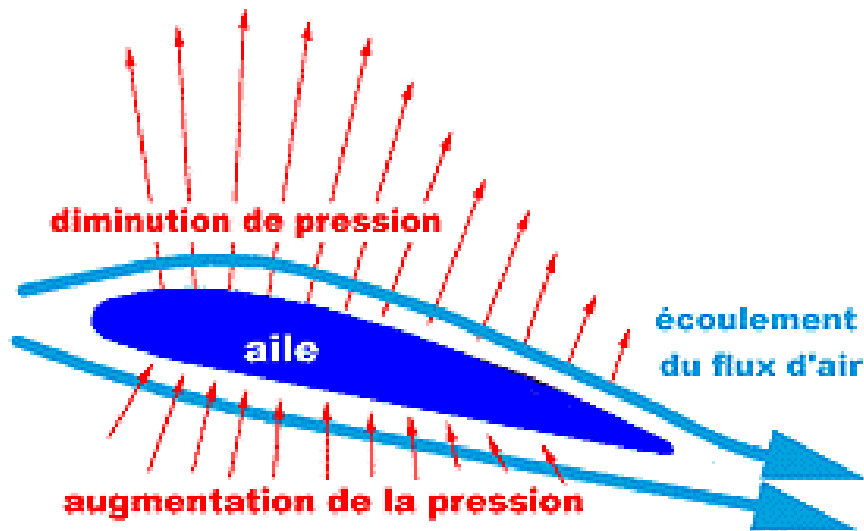
Un filet d'air voisin de la surface de l'extrados sera dévié vers le haut, de même qu'un filet d'air voisin de l'intrados sera dévié vers le bas.

Le filet d'air de l'extrados parcourt, du fait de la forme du profil, une distance supérieure à celle qu'il aurait parcourue en atmosphère non perturbée (hors de la présence de l'aile). Comme il ne peut y avoir accumulation ou disparition de l'air, le filet d'air sur l'extrados est accéléré ce qui entraîne une dépression (-).

Le phénomène inverse se produit sur l'intrados, (chemin plus court, ralentissement de l'air, compression) ce qui entraîne une surpression.

**surpression intrados + dépression extrados = résultante aérodynamique**

L'aile est à la fois aspirée et poussée vers le haut (l'aspiration est toujours supérieure à la poussée)



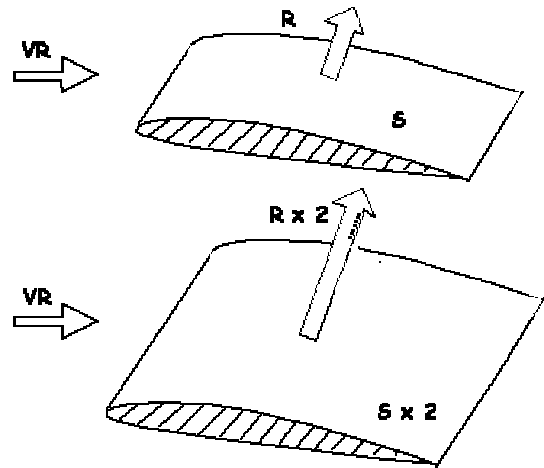
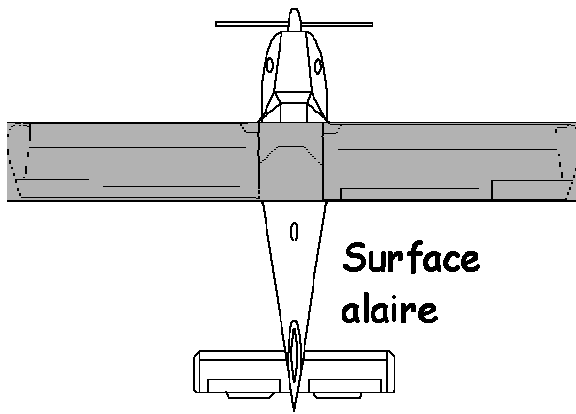
### 1.3 - Les facteurs qui influent sur la résultante aérodynamique

#### 1.3.1 - La surface alaire

L'un des premiers paramètres qui influe sur la RA est la surface totale sur laquelle sont appliquées les forces, plus la surface offerte au courant d'air est grande, plus la RA est importante

La *surface alaire* d'un avion est la surface totale de la voilure, y compris celle qui traverse le fuselage par exemple un avion TB10 possède une surface de référence de 11,90 m<sup>2</sup>

Des essais en soufflerie montre que la RA est directement proportionnelle à la surface alaire.



### I.3.2 - La vitesse de déplacement

L'intensité de la résultante aérodynamique ( $r_a$ ) augmente avec le carré de la vitesse de l'avion, la vitesse d'un avion léger est de l'ordre de 60 m / s (environ 120 nœuds.)

Vitesse x par :	Résultante x par :
2	4
3	9
4	16

### I.3.3 - La masse volumique de l'air

Plus l'air est dense, plus la résultante est grande. La masse volumique de l'air est de 1,225kg / m<sup>3</sup> au niveau de la mer et diminue avec l'altitude.

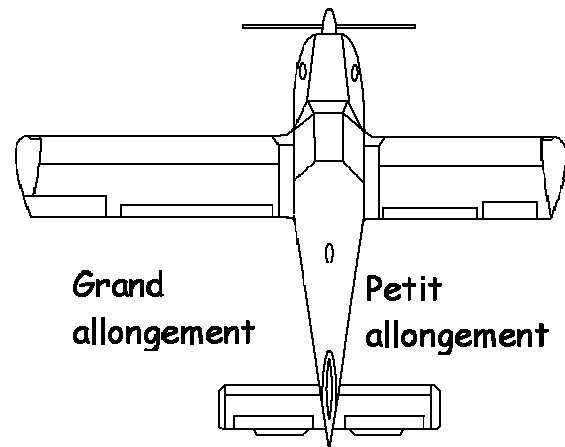
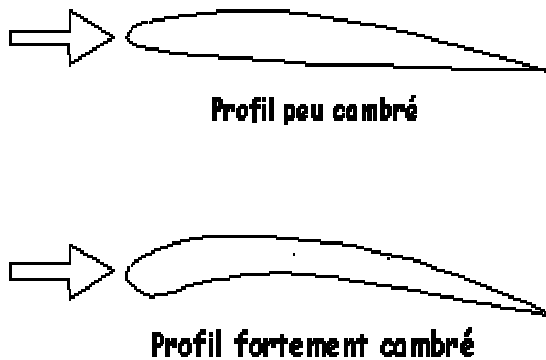
### I.3.4 - La forme de l'aile (profil et allongement )

La forme de l'aile selon son profil (en coupe ) et son allongement (rapport entre sa longueur et sa largeur ) influe également sur la résultante aérodynamique :

Un profil *fortement cambré* possède un bon rendement aux *vitesses faibles* (60 à 100 Km /h ), alors qu'un profil *peu cambré* convient mieux aux *vitesses élevées*.

Sur un grand nombre d'avions modernes, il est possible de modifier la courbure du profil en vol grâce à un système dénommé *volets de courbure*.

Un grand allongement est plus favorable aux faibles vitesses alors qu'un faible allongement convient aux vitesses fortes. Un des autres avantages du grand allongement est de diminuer les tourbillons en bout d'aile (en effet au bout de l'aile, la dépression de l'extrados et la surpression de l'intrados se rejoignent créant des tourbillons dénommés vortex ).



Afin de déterminer le meilleur compromis entre la forme de l'aile et l'allongement, il existe trois méthodes de travail :

Méthode de construction de maquette avec essais de performances

Méthode d'essais en soufflerie de l'aile seule (l'aile est fixe et le courant d'air est créé par des ventilateurs )

Méthode de calcul et de simulation de l'aile par ordinateur.

Les différents profils d'aile sont répertoriés et dénommés NACA entre autres (NASA).

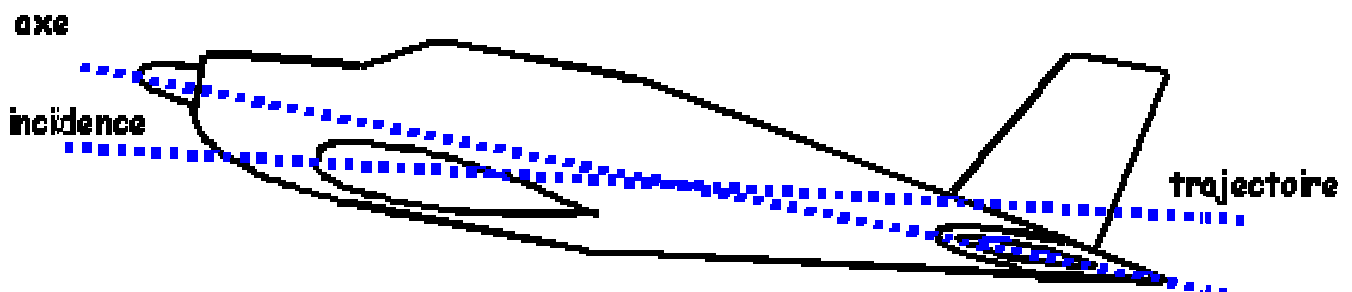
### I.3.5 - La position de l'aile par rapport au vent relatif

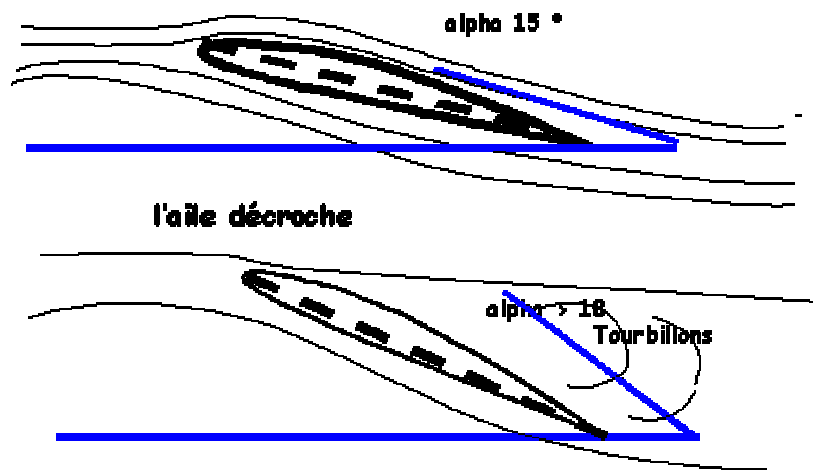
Un autre paramètre important dans l'intensité de la résultante aérodynamique est l'orientation de l'aile par rapport au vent relatif (le vent relatif est le vent ressenti à bord de l'avion du fait du déplacement de celui ci, le vent relatif souffle donc toujours suivant la trajectoire de l'avion).

Pour repérer l'orientation de l'avion (aile) par rapport au vent relatif (trajectoire), on définit un angle caractéristique : *l'incidence*.  $\alpha$

On nomme incidence l'angle  $\alpha$  (alpha) entre une référence de l'avion qui est son axe longitudinal et la direction du vent relatif. C'est aussi l'angle entre l'axe longitudinal et la trajectoire.

Lorsque l'incidence de l'aile (angle entre l'aile et la trajectoire ) augmente, l'intensité de la résultante augmente, passe par un maximum pour un angle d'incidence de l'ordre de  $15^\circ$  à  $18^\circ$  puis décroît brusquement. On dit que l'aile décroche.





### II.3.6 - L'état de surface

Les salissures de tous types provoquent un décollement des filets d'air pouvant entraîner un angle d'incidence de décrochage plus faible.

Pour lutter contre le phénomène de givrage des ailes qui intervient à haute altitude, certains avions possèdent des systèmes de réchauffage d'aile dénommé dégivrage.

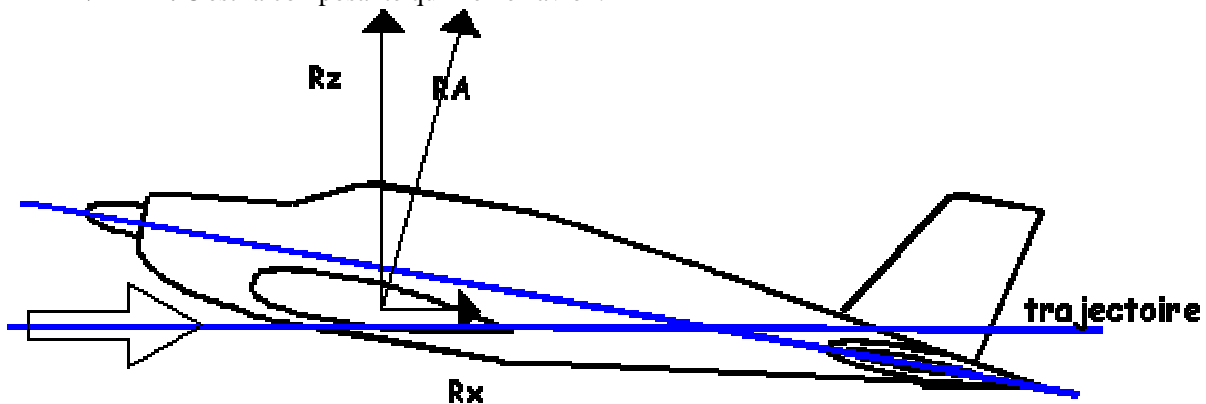
## II. - Portance, traînée, polaire, finesse, moment, incidence

La résultante aérodynamique due aux effets de pression et de dépression est un ensemble de forces qui s'exercent sur la surface utile, et qui peuvent être représentées par une force unique appliquée en un point particulier dénommé le *foyer*.

Cette force est presque perpendiculaire à la trajectoire, mais pas tout à fait, aussi peut-on la décomposer en deux forces perpendiculaires. ( deux composantes )

La première, qui est perpendiculaire à la trajectoire, (ou au vent relatif ) est la plus importante et se nomme la **PORTANCE**.  $R_z$  C'est la composante qui porte l'avion.

La seconde, la plus faible, suivant un axe parallèle à la trajectoire (ou au vent relatif ) que l'on appelle la **TRAÎNÉE**  $R_x$ . C'est la composante qui freine l'avion.



### II.1 - Les coefficients :

Le premier coefficient qui caractérise une aile est le coefficient de résultante dénommé  $C_r$

*$C_r$  est l'intensité de la résultante aérodynamique sur une aile de même profil que l'aile considérée, de surface 1 mètre carré et placée dans une veine d'air de pression dynamique 1 kg par mètre carré.*

### II.2 - Coefficients de portance et de traînée

## BIA Cours : Aérodynamique

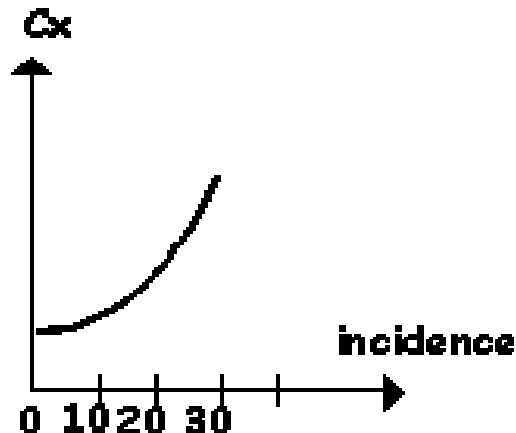
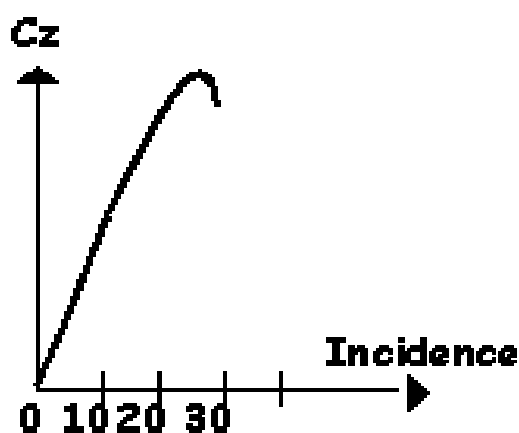
La résultante aérodynamique varie selon de nombreux paramètres (surface, vitesse du vent relatif, densité de l'air, etc. ). Elle varie également en fonction de la forme en plan de l'aile, de son profil, de son état de surface et de son incidence. On a coutume de regrouper ces derniers paramètres et de les représenter par des coefficients uniques dit coefficients aérodynamiques.

***C<sub>z</sub> coefficient de portance*** est l'intensité de la portance sur une aile de même profil que l'aile considérée, de surface 1 mètre carré et placée dans une veine d'air de pression dynamique 1 kilogramme par mètre carré.

***C<sub>x</sub> coefficient de traînée*** est l'intensité de la traînée sur une aile de même profil que l'aile considérée, de surface 1 mètre carré et placée dans une veine d'air de pression dynamique 1 kilogramme par mètre carré.

C<sub>z</sub> est en quelque sorte l'aptitude à transformer le courant d'air en portance.

C<sub>x</sub> est la caractérisation d'un défaut qui est de fabriquer de la traînée avec le même courant d'air.



### II.3 - Coefficient de moment

Afin de déterminer la position de la résultante aérodynamique sur la corde de l'aile, nous pouvons calculer (grâce au banc de soufflerie), le moment de cette force par rapport au bord d'attaque de l'aile (le bord d'attaque est la partie de l'aile qui rencontre le vent relatif en premier ), puis en construire un abaque soit en fonction de l'incidence soit en fonction du coefficient de portance.

*Rappel : un moment en un point est égal au produit de l'intensité d'une force par la longueur du bras de levier mesuré du point d'application de cette force au point considéré.*

Le moment de la résultante aérodynamique par rapport au bord d'attaque sera donc caractérisé par un coefficient **C<sub>m</sub>**.

### II.4 - Polaire d'un profil

Les expériences effectuées en soufflerie pour un profil donné, permettent de connaître les différentes valeurs des coefficients  $C_x$ ,  $C_z$  et  $C_m$ .

La représentation graphique du  $C_z$  fonction du  $C_x$  se nomme **polaire**. (  $C_z = f ( C_x )$  )

En possession de ces valeurs, il est alors possible d'établir des représentations graphiques des caractéristiques d'une aile construite avec le profil étudié.

La plus complète et la plus utilisée de ces caractéristiques est dénommée la **polaire de l'aile**.

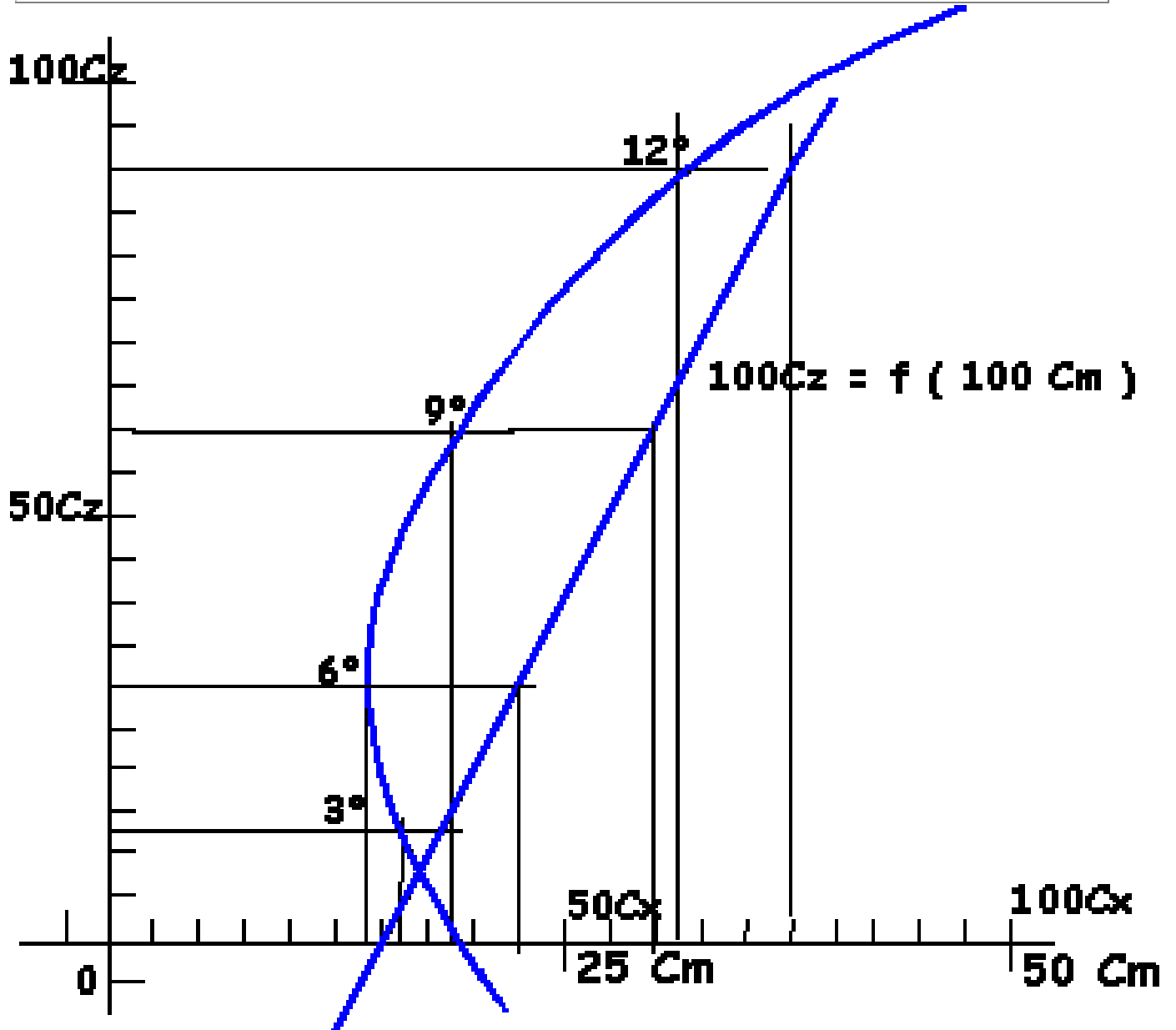
Les coefficients  $C_x$ ,  $C_z$  et  $C_m$  sont toujours des nombres de faible valeur numérique et comportent une valeur décimale. Pour supprimer les risques d'erreur, il est d'usage de multiplier par 100 les valeurs de ces coefficients ce qui ne change rien aux diagrammes.

De même,  $C_x$  étant toujours plus faible que  $C_z$  (de l'ordre de 10 à 60 ), les représentations conservant la même échelle pour  $C_x$  et  $C_z$  sont illisibles. Afin de remédier à cet inconvénient, on a pris l'habitude de multiplier par 5 ou 10 l'échelle des  $C_x$ , ce qui a pour effet de coucher les courbes vers la droite et d'améliorer les calculs graphiques.

*II.5 - Etablissement de la polaire*

Afin d'établir une polaire et de l'analyser, nous utiliserons le tableau suivant, tableau issu d'un ensemble de mesure en soufflerie sur un profil réel et tracerons la polaire induite :

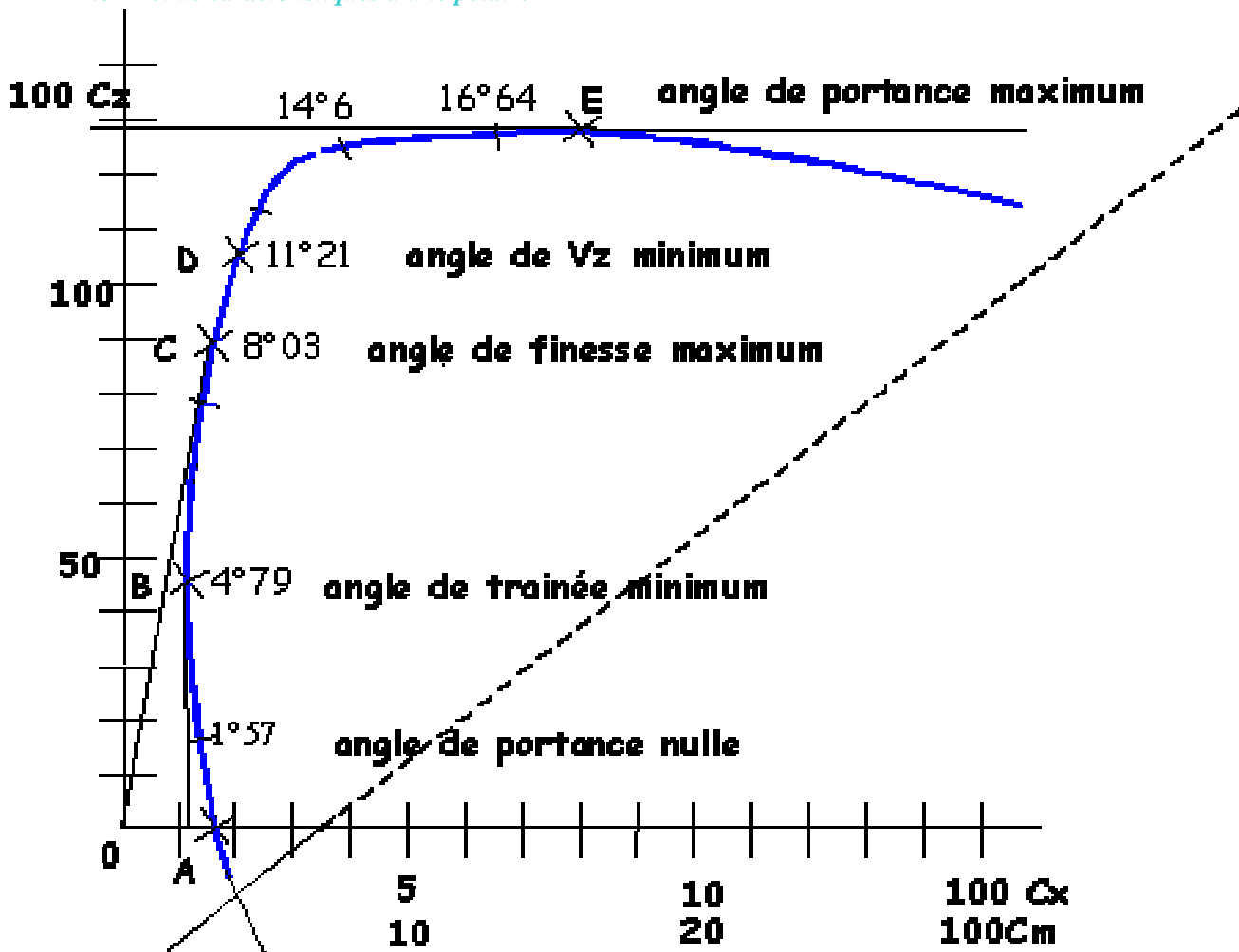
Incidence	Cz	Cx	m
12°	90	62,5	37,5
9°	60	38	30
6°	30	30	23
43°	15	31	20



Pour tracer la courbe des moments, il faut tracer la graduation des 100Cm. Cette courbe est fonction de l'échelle des Cz et est toujours désignée de la manière suivante :  $100C_z = f(100C_x)$

Cette courbe est en général (mais pas toujours) une droite.

II.6 - Points caractéristiques d'une polaire



A	<p><b>Le point de portance nulle A</b> situé à l'intersection de la polaire et de l'axe des <math>100 C_x</math> donne la valeur de l'angle d'incidence pour lequel <math>100 C_x = 0</math>. Cet angle est presque toujours négatif mais peut cependant pour certains profils atteindre des valeurs positives élevées.</p>
B	<p><b>Le point de traînée minimum B</b> pour lequel la tangente à la polaire est perpendiculaire à l'axe des <math>100 C_x</math>. Une aile calée à cette incidence permet d'obtenir la plus grande vitesse en trajectoire horizontale. (utilisé pour obtenir la vitesse maximum)</p>
C	<p><b>Le point de finesse maximum C</b>, pour lequel la tangente à la polaire passe par l'origine, correspondant à l'incidence pour laquelle le rapport <math>C_z/C_x</math> (finesse) est maximum. L'angle d'incidence correspondant à ce point est dénommé angle optimum. C'est l'angle d'incidence correspondant auquel un avion doit voler par vent nul afin d'obtenir le maximum de rayon d'action (en cas de panne moteur par exemple)</p>
E	<p><b>Le point de portance maximum E</b> pour lequel la tangente à la polaire est parallèle à l'axe des <math>100 C_x</math>. Ce point détermine la valeur de l'angle d'incidence permettant une portance maximum qui pour une vitesse donnée, permet d'emporter la charge maximum (ce point représente un intérêt pratique lorsque l'avion est lourdement chargé) <b>ATTENTION au-delà de ce point, il y a risque de décrochage aérodynamique</b></p>
D	<p><b>Le point de vitesse de descente (<math>V_z</math>) minimale D</b> n'apparaît pas directement sur la courbe. <b>L'angle de <math>V_z</math> minimale est celui pour lequel le rapport <math>C_x^2 / C_z^3</math> est minimal</b>, il est situé sur la polaire entre les points C et E généralement plus près de C que de E et se détermine par calcul ou par graphique.</p>



### II.7 - Influence de l'allongement

L'allongement d'une aile rectangulaire, représenté par la lettre grecque  $\lambda$  (lambda) est égal au quotient de l'envergure par la corde de l'aile. Pour une aile non rectangulaire, on considère la corde moyenne  $\lambda_m$  qui est égale au quotient de la surface par l'envergure..

### II.8 - Traînée totale

Si l'air ne possédait pas de viscosité, il n'y aurait pas de frottement entre l'aile et l'air, il n'y aurait que les forces de pression et de dépression. La résultante aérodynamique serait alors perpendiculaire au vent relatif dans le cas d'une aile d'allongement infini.

La traînée  $C_x$  se décompose alors en deux types distincts :

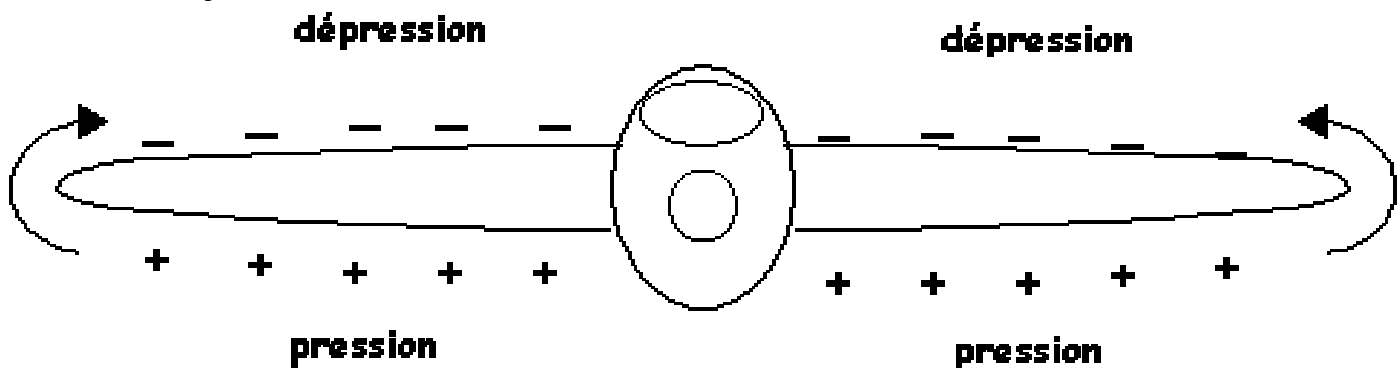
$$\text{Traînée totale} = \text{traînée de profil} + \text{traînée induite}$$
$$C_x = C_{xp} + C_{xi}$$

### II.9 - La traînée de profil

La traînée de profil  $C_{xp}$  est due à la viscosité de l'air qui fait naître des forces de frottement entre les couches d'air circulant autour de l'aile, ainsi que les forces de dépression en arrière de l'aile par suite du léger décollement des filets d'air à cet endroit.

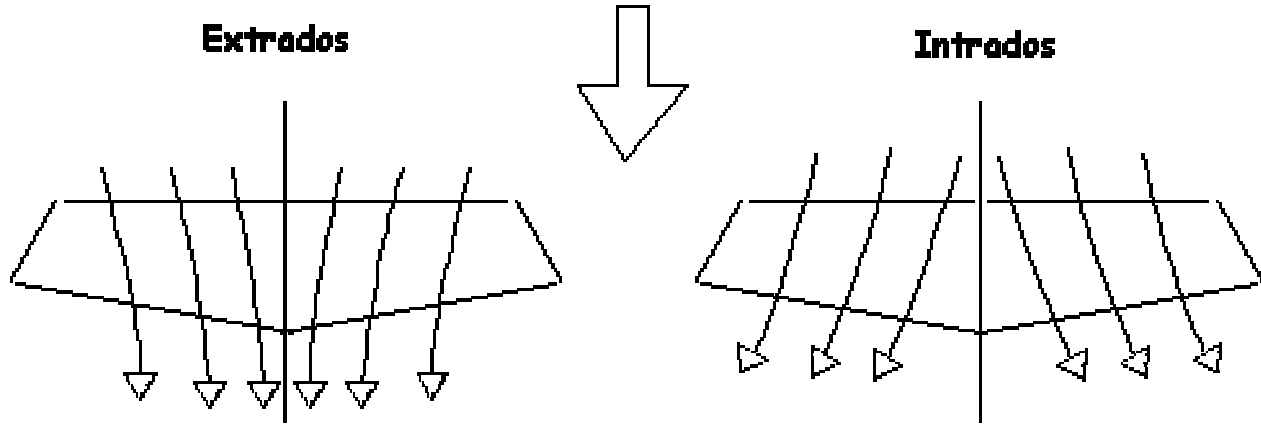
### II.10 - La traînée induite tourbillons

La traînée induite  $C_{xi}$  qui provient du fait qu'une aile ne possède pas un allongement infini. Pour une aile d'un allongement quelconque, l'extrados est soumis à des forces de dépression et l'intrados à des forces de pression.



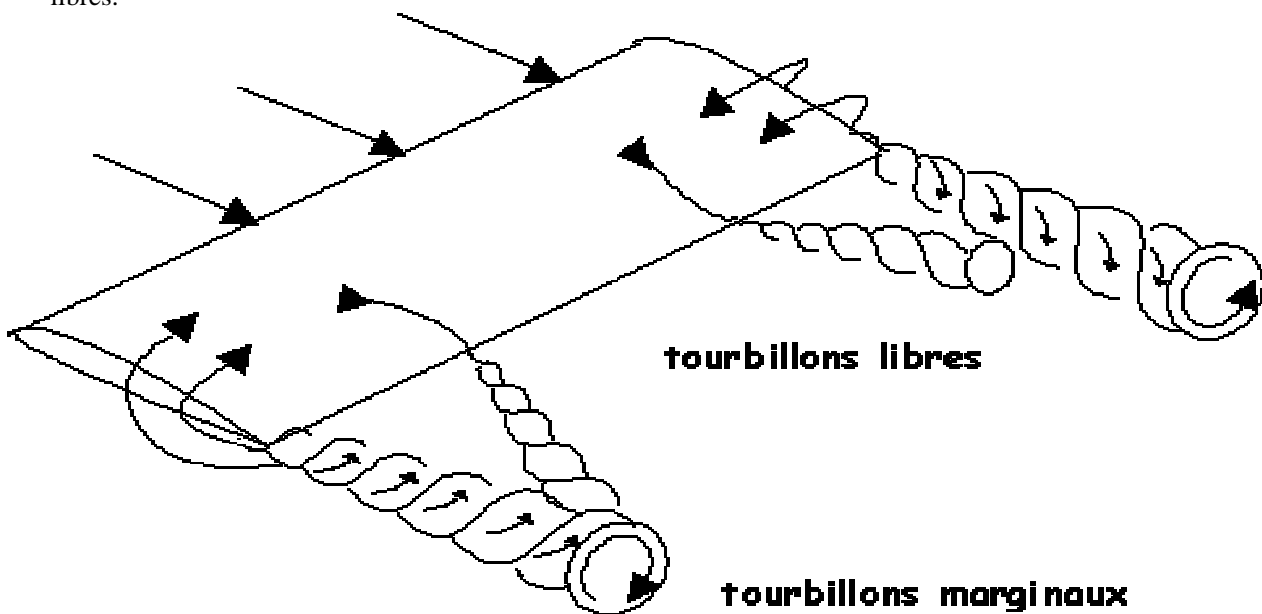
Les différentes forces positives et négatives tendent à se compenser ce qui donne naissance à un courant tourbillonnaire qui affecte les bords marginaux de l'aile

La composition de ce courant avec le courant principal perpendiculaire à l'envergure au bord d'attaque provoque une déviation des filets d'air :



Sur l'extrados, ceux ci convergent vers le plan de symétrie alors que sur l'intrados ils divergent vers les bords marginaux.

Leur rencontre donne naissance, tout le long du bord de fuite, à une nappe de tourbillons appelés tourbillons libres.



L'ensemble de ces *tourbillons libres* s'enroulent sur eux même dans un sens bien déterminé et donnent alors naissance aux *tourbillons marginaux*

Ces tourbillons marginaux sont extrêmement dangereux pour les avions qui suivent, pouvant aller jusqu'à retourner un avion léger.

Il est à noter qu'ils sont d'autant plus forts que la portance est importante (gros porteur à faible vitesse).

Pour communiquer un mouvement à une masse d'air, il faut fournir une énergie dont la valeur est en rapport direct avec la masse et l'ampleur du mouvement.

Ces tourbillons marginaux n'ayant aucune utilité (ils sont même dangereux) l'énergie ainsi utilisée est perdue et est considérée comme une traînée dite traînée induite. Cxi qui peut s'exprimer par la formule :

$$C_{xi} = C_z^2 / (\pi * \lambda)$$

### II.11 - Déflexion et angle induit

Nous pouvons constater par des expériences en soufflerie, qu'en arrière du bord de fuite et entre les tourbillons marginaux, la direction des filets d'air n'est plus parallèle au vent relatif (déflexion).

Cet écoulement est d'autant plus infléchi que l'allongement est réduit et l'angle d'incidence grand. Les tourbillons marginaux génèrent une masse d'air en rotation qui influe sur les tourbillons libres et les dirigent plus vers le bas qu'ils ne les entraînent

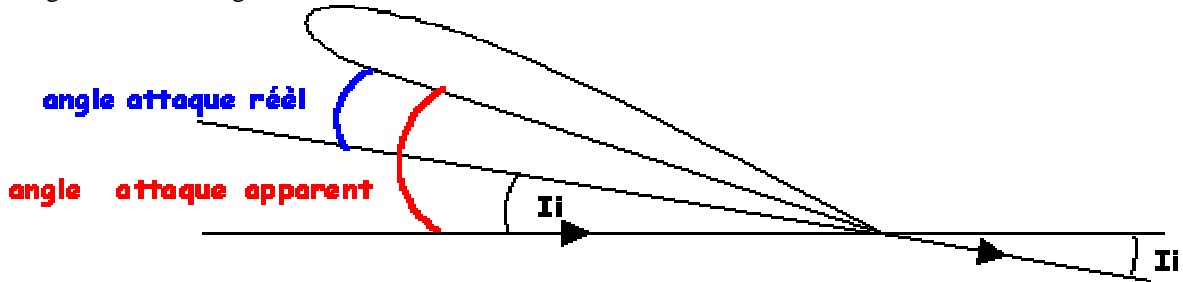
## BIA Cours : Aérodynamique

La direction des deux mouvements est d'autant plus vers le bas que les tourbillons marginaux sont rapprochés (faible allongement).

D'autre part, plus la portance est grande ( $100 C_z$ ) plus la différence de pressions intrados / extrados est grande et donc les filets d'air déviés vers le bas en arrière du bord de fuite.

Il existe alors un angle compris entre la direction des filets d'air en entrée (bord d'attaque) et la direction des filets en sortie (bord de fuite) ou la direction du vent relatif et celle du courant défléchi.

Cet angle se nomme angle induit  $I_i$ .



La figure montre que l'air attaque l'aile avec une incidence diminuée, l'angle d'incidence est diminué de l'angle induit.

L'angle d'incidence étant réduit, la portance  $C_z$  l'est également.

En augmentant l'allongement, les tourbillons marginaux s'écartent ce qui entraîne trois conséquences :

- L'angle induit diminue
- La valeur de l'angle d'incidence est augmentée
- La valeur de la portance $100C_z$ croît ce qui signifie par exemple que la portance $100C_z = 80$ pour un allongement de 8 est assurée avec une incidence légèrement inférieure à celle qui serait nécessaire pour un allongement de 5.

## III - Centre de poussée

### III.1 - Définition

C'est le point particulier non fixe où s'applique la résultante aérodynamique.

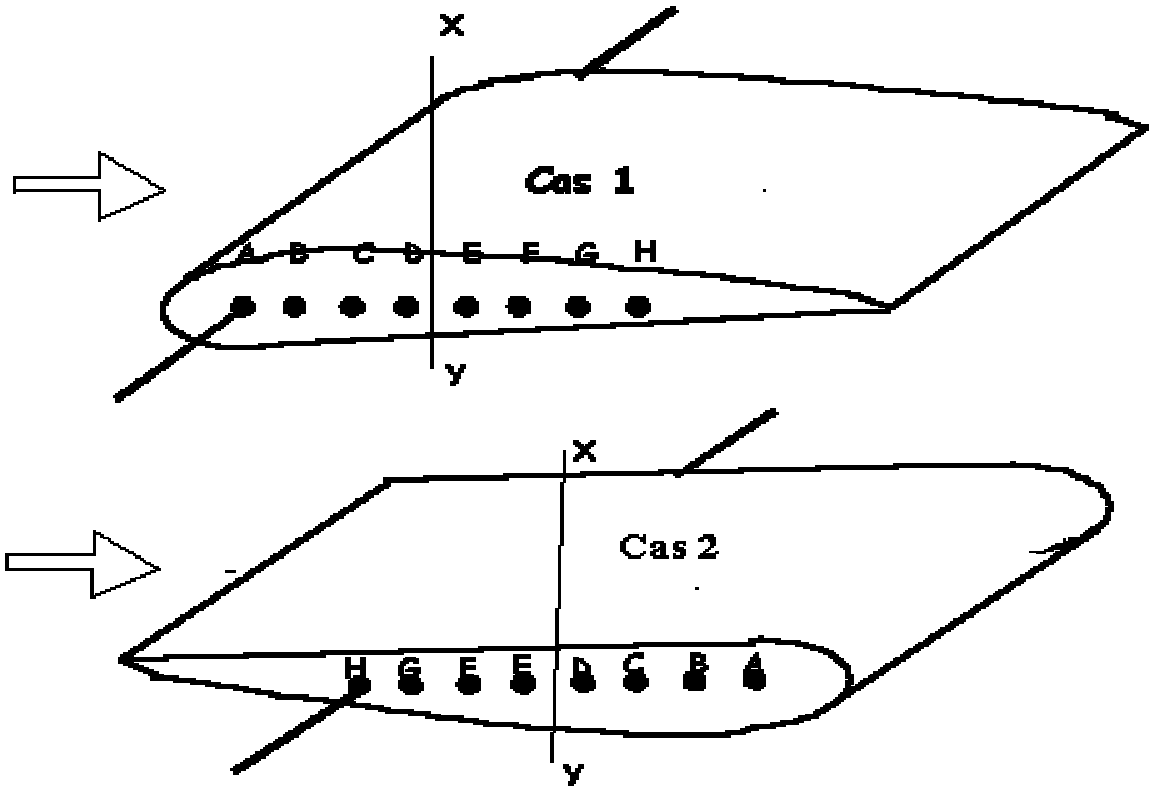
Le centre de poussée est en général placé sur la corde de profil aux environs du tiers avant du profil pour les angles d'incidence courants.

La position du centre de poussée varie selon les éléments suivants :

- Le type du profil
- L'angle d'incidence et le coefficient de moment $C_m > 0$ il avance lorsque l'angle d'incidence augmente $C_m = 0$ il est invariant $C_m < 0$ il s'éloigne du bord d'attaque lorsque l'angle d'incidence augmente
- L'allongement : quelle que soit l'incidence, si l'allongement augmente, le centre de poussée se rapproche du bord d'attaque

## IV - Foyer d'un profil

Le foyer d'un profil correspond à ce que nous pouvons définir comme "le centre de gravité aérodynamique d'un profil" ou le point de ce profil correspondant à un équilibre indifférent dans une veine d'air. (voir schéma)



Si nous prenons un profil que nous perçons suivant les axes de A à H.

Dans ces axes, les uns après les autres nous introduisons une tige métallique et présentons le profil à un courant d'air (vent relatif).

De A jusqu'à C le profil dans le courant d'air prend l'état d'équilibre du cas 1 avec un amortissement relativement rapide des oscillations.

De F à H le profil se retourne et prend l'état d'équilibre du cas 2 avec un amortissement relativement rapide des oscillations.

En D le profil prend l'état d'équilibre du cas 1 avec des oscillations très lente

En E le profil prend l'état d'équilibre du cas 2 avec des oscillations très lente.

Il existe un point situé sur l'axe X Y, point pour lequel l'état d'équilibre aérodynamique serait indifféremment le cas 1 ou le cas 2. **Ce point est le foyer.**

#### IV.1 - Position relative du centre de poussée et du foyer

*Pour un profil à  $C_m$  positif, le foyer est toujours situé en avant du centre de poussée.*

*Pour un profil à  $C_m$  positif, le moment dû à la portance est toujours piqueur.*

*Pour un profil à  $C_m$  nul, le foyer et le centre de poussée sont confondus.*

*Pour un profil à  $C_m$  nul, le moment dû à la portance est nul.*

*Pour un profil à  $C_m$  négatif, le foyer est toujours situé en arrière du centre de poussée.*

*Pour un profil à  $C_m$  positif, le moment dû à la portance est toujours cabreur.*