

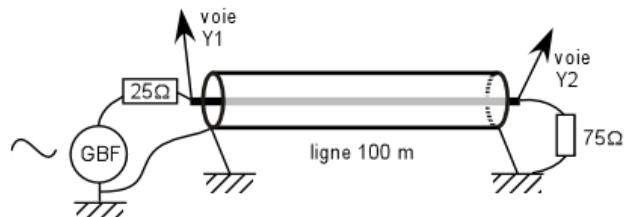
## TP 1 : ONDES ELECTROMAGNETIQUES DANS UNE LIGNE COAXIALE

Soit une ligne coaxiale de longueur 100 m et d'impédance caractéristique  $Z_c = 75 \Omega$

### I) Mesure de la célérité $c$ et de l'atténuation :

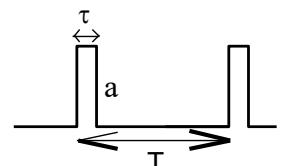
#### 1°) Régime purement sinusoïdal

- En utilisant des fils les plus courts possibles, réaliser le montage ci-contre, les résistances de 25 et 75  $\Omega$  étant respectivement une résistance sur cavalier et une boîte de résistances. Le génér. BF (de résistance interne 50  $\Omega$ ) doit délivrer une tension purement sinusoïdale, d'amplitude à choisir vous-même, et de fréquence 0,5 MHz.
- Pourquoi avoir placé une résistance de 25  $\Omega$  à l'entrée et une de 75  $\Omega$  à la sortie ?
- À quoi est dû le décalage temporel entre les deux sinusoïdes ?
- Trouver une méthode pour mesurer la célérité  $c$  de l'onde qui se propage et la mettre en œuvre.
- Recommencer pour une fréquence de 2 MHz. Pourquoi cette célérité pourrait-elle varier avec la fréquence : quel serait le phénomène mis en évidence ?
- On note  $a'$  et  $a''$  respectivement les amplitudes des sinusoïdes en tête de ligne et en bout de ligne.
- Pour une fréquence de 0,5 MHz, estimer l'ordre de grandeur du rapport  $a''/a'$ . Puis en prenant 20 fois le log, en déduire l'ordre de grandeur des pertes en ligne **en dB/m** à cette fréquence.



#### 2°) Régime impulsional

- Garder le montage précédent mais remplacer la sinusoïde issue du GBF par une impulsion périodisée, comme le montre la figure ci-contre avec, en ordre de grandeur  $\tau \approx 0,4 \mu s$ ,  $T \approx 2 \mu s$ , un niveau bas à 0V et un niveau haut à  $a = 8V$  (utiliser l'offset et symmetry duty). Il faut pour cela brancher le GBF directement sur l'oscilloscope, et choisir une grande fréquence. Pour  $\tau$ , on est vraiment aux limites de l'appareil.
- A l'aide de ce signal, mesurer la vitesse de propagation de l'impulsion dans la ligne. Faire le lien avec les mesures de  $c$  effectuées au 1°).
- Comment expliquer la différence de forme et d'amplitude de l'impulsion entre l'entrée et la sortie de la ligne ?



### II) Réflexion en bout de ligne :

#### 1°) Circuit ouvert :

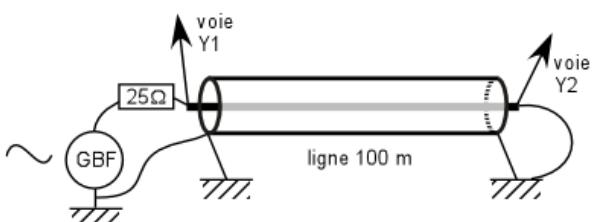
- Reprendre le montage précédent, mais retirer la résistance de bout de ligne. Observer les 2 voies de l'oscilloscope et en reproduire l'allure. Interpréter quantitativement en utilisant le coefficient de réflexion en tension calculé en cours.

#### 2°) Court-circuit :

- Recommencer en mettant un fil en fin de ligne (bout de ligne en court-circuit, le plus court possible).

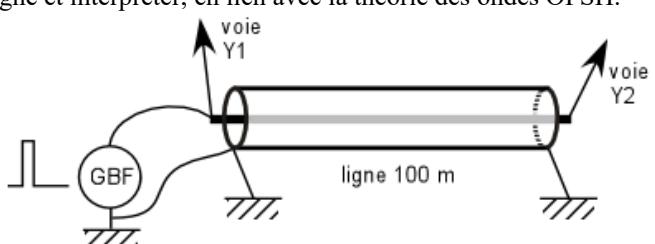
### III) Ondes planes stationnaires harmoniques :

- Réaliser le montage ci-contre, avec un GBF en mode **purement sinusoïdal** (donc sans offset !).
- Le long câble est en court-circuit en sortie. Comme l'impédance terminale est nulle, que vaut le coefficient de réflexion en tension ?
- Quel est le déphasage entre l'onde incidente et l'onde réfléchie à l'extrémité du câble ?  
Dans ces conditions, le câble est le siège d'une onde stationnaire présentant un nœud de tension en sortie. Pour quelles fréquences peut-on prévoir que le câble présente un état de court-circuit en entrée ? Chercher à vérifier cette propriété expérimentalement.
- Pourquoi la tension d'entrée ne s'annule-t-elle pas mais présente plutôt des minima d'amplitude ?
- Recommencer l'étude avec une extrémité de ligne en circuit ouvert (en retirant le fil du bout) : chercher les fréquences rendant l'amplitude de la tension maximale ou minimale en entrée de ligne et interpréter, en lien avec la théorie des ondes OPSH.



### IV) Réflexions multiples en mode impulsional :

- Réaliser le montage ci-contre en mode impulsional (il n'y a plus la résistance de 25  $\Omega$ ). Observer les signaux des 2 voies et interpréter quantitativement en utilisant le coefficient de réflexion calculé en cours.
- Reprendre avec un court-circuit en bout de ligne.



Préliminaire : l'effet Döppler ; approche qualitative

Un tennisman s'entraîne au service face à un mur : il frappe une balle toutes les  $T=10$  secondes, c'est-à-dire aux instants  $t_n = nT$ . Chaque balle se déplace à vitesse constante  $c$  en ligne droite et vient frapper le mur d'en face, situé à une distance  $d$  du joueur aux instants  $t'_n = nT+d/c$ . Le mur reçoit donc une balle toutes les  $T'=T=10$  secondes car toutes les balles ont la même distance à parcourir.

Si le tennisman monte sur un wagonnet se déplaçant à vitesse constante  $v$  en direction du mur (distance joueur-mur =  $d$  à  $t=0$ ), et qu'il continue à frapper les balles aux instants  $t_n = nT$ , l'intervalle de temps  $T''$  entre deux chocs sur le mur devient inférieur à  $T$ .

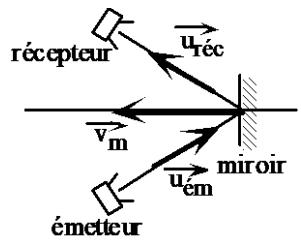
Si le chariot s'éloignait du mur, l'intervalle de temps deviendrait  $T''' > T$ .

Ainsi, si un mobile en mouvement selon un axe  $Ox$  émet une onde de fréquence  $f$  se propageant selon cet axe également, un observateur fixe sur l'axe  $Ox$  perçoit l'onde avec une fréquence  $f'' = f/(1-v/c)$  si le mobile vient vers lui ; et une fréquence  $f''' = f/(1+v/c)$  s'il s'éloigne.

**Application aux ondes ultrasonores :**

On dispose d'un **émetteur fixe**, d'un **récepteur fixe** également, et d'un miroir est mobile (vitesse  $v_m$ ). Celui-ci réfléchit les ondes ultrasonores vers le récepteur (exactement comme cela se fait le long des routes avec les radars de la gendarmerie, mais les gendarmes utilisent des ondes électromagnétiques ...). On montre que pour une fréquence émise  $f_{ém}$ , et des vecteurs unitaires de propagation  $\vec{u}_{ém}$  et  $\vec{u}_{rec}$ , la fréquence de l'onde reçue est :

$$f_{rec} = f_{ém} \left( 1 + \frac{\vec{v}_m \cdot (\vec{u}_{rec} - \vec{u}_{ém})}{c_{son}} \right)$$

**I) ETUDE DU MATERIEL :**

Vous disposez d'émetteurs et de récepteurs à ultrasons fonctionnant à 40 kHz. Ils se présentent sous la forme de petits haut-parleurs et de petits micros montés sur des potences. Le boîtier de l'émetteur comprend un dispositif servant à fabriquer le signal électrique à 40 kHz, ainsi qu'un système permettant de moduler l'émission (salves). Ce boîtier doit être alimenté en tension continue : en 12 V d'après ce qui est écrit sur le boîtier. En fait, une alimentation {0 ; +15V} convient. **MAIS NE PAS UTILISER +15 et -15**, seulement 0 et +15 !!

- Brancher l'alimentation 15V (ou 12V) sur le boîtier émetteur.

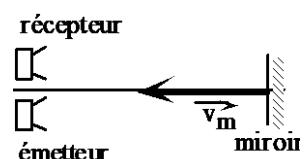
**II) MESURE DIRECTE DES FREQUENCES :**

Vous disposez d'une petite voiture radiocommandée (Little vroom vroom ou autre) sur laquelle est fixé une plaque verticale servant de miroir vis-à-vis des ultrasons. En principe un(e) élève de PSI est capable de la faire fonctionner et de maîtriser son déplacement sur la paillasse.

- Disposer l'émetteur et le récepteur côté-à-côte, et face au miroir, comme le montre la figure.

Pour cette configuration, quel est le lien entre  $\vec{u}_{rec}$  et  $\vec{u}_{ém}$  ? Simplifier la formule encadrée plus haut.

- La voiture étant à l'arrêt et en bout de piste, observer **sur un fréquencemètre** (boîtier noir avec affichage digital à chiffres rouges) le signal recueilli sur le récepteur (mode émission continue). Relever la fréquence reçue  $f$ .
- Faire avancer la voiture et observer alors la fréquence du signal au fréquencemètre. Attention, ça ne dure pas longtemps. Evaluer la fréquence reçue  $f_1$ , grâce au fréquencemètre ou à l'oscilloscope. Théoriquement, doit-elle être inférieure ou supérieure à  $f$  ? Est-ce le cas ?
- Reprendre la démarche lorsque la voiture va en marche arrière et s'éloigne de l'ensemble émetteur-récepteur. Attention de ne pas faire sortir la voiture de la planche ! Evaluer la fréquence reçue  $f_2$ .



Théoriquement, doit-elle être inférieure ou supérieure à  $f$  ? Est-ce le cas ?

- Ces mesures de fréquences vous semblent elles assez précises pour déterminer la vitesse de la voiture de façon fiable ?

**III) CHANGEMENT DE FREQUENCE :**

Dans les mesures du II), la détermination de la vitesse se faisait en mesurant 2 fréquences ( $f$  et  $f_1$  ou  $f$  et  $f_2$ ) puis en en faisant la différence ( $f_1 - f$  ou  $f - f_2$ ). Ces 2 fréquences étant très proches, l'incertitude sur la différence était grande.

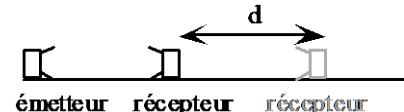
Le mode opératoire était mauvais.

Il faut trouver le moyen de mesurer directement ( $f_1 - f$  ou  $f - f_2$ ) plutôt que  $f$  puis  $f_1$  ou que  $f$  puis  $f_2$ .

Une méthode consiste à utiliser un multiplicateur analogique :

- Si  $s(t)$  est le signal émis (signal prélevé sur le boîtier d'émission, entre la borne "test" et la borne "masse") et  $s_1(t)$  le signal reçu, proposer une méthode pour obtenir au moyen d'un multiplicateur et d'un filtre, un signal de fréquence  $|f_1 - f|$ .
- Réaliser le montage correspondant, l'émetteur et le récepteur restant disposés sur la paillasse côté à côté comme précédemment.
- Observer à l'oscilloscope la tension à la sortie du filtre lorsque la voiture est à l'arrêt. Que se passe-t-il si on change la position d'arrêt de la voiture ? Interpréter.
- Faire faire un trajet aller à la voiture et enregistrer avec l'oscilloscope à mémoire (ou avec le micro-ordinateur) la tension à la sortie du filtre (pour ces expériences, le fréquencemètre n'est plus adapté).
- En déduire la vitesse de la voiture, grâce à la formule encadrée donnée au début.
- La méthode convient-elle aussi en marche arrière ? Commenter.

#### IV) MESURE DE LA CÉLERITE DU SON :



- 1ère méthode : placer l'émetteur (en mode continu) et le récepteur face-à-face le long du bord de la planche. Observer les 2 sur les 2 voies de l'oscilloscope (sans le mode mémoire), en synchronisant sur la voie de l'émetteur. Placer le récepteur dans une position telle que les 2 signaux soient en phase. Puis reculer le récepteur sans toucher à l'émetteur jusqu'à ce que 10 périodes aient défilé à l'écran. Mesurer la distance parcourue par le récepteur. En déduire la longueur d'onde des ondes ultrasonores utilisées, puis la célérité  $c$ , connaissant la fréquence des ondes, qui a déjà été mesurée plus haut.

- 2ème méthode : placer en face de l'émetteur 2 récepteurs côté à côté. L'émetteur est ici en mode salves rapides avec un faible rapport cyclique. Observer les signaux des 2 récepteurs en même temps à l'oscilloscope. Puis reculer un des 2 récepteurs d'une dizaine de centimètres et mesurer à l'oscilloscope le retard temporel  $d\bar{u}$  à la propagation. En déduire une nouvelle estimation de  $c_{\text{son}}$ .

#### V) MESURE DIRECTE DE LA VITESSE DE LA VOITURE:

En faisant décrire à la voiture un parcours chronométré suffisamment long, mesurer sa vitesse puis comparer aux mesures par effet Döppler.

### TP 3 : OSCILLATEUR QUASI-SINUSOIDAL A RÉSISTANCE NÉGATIVE

On s'intéresse dans ce TP à un montage capable de générer des signaux quasiment sinusoïdaux

Principe: Soit une chaîne électronique ouverte comprenant un amplificateur de gain  $A$ , indépendant de la fréquence, et un système linéaire de gain  $B(\omega)$  dépendant de la fréquence.

S'il existe une pulsation  $\omega_0$  telle que  $A \cdot B(\omega_0) = 1$ , alors on peut fermer la chaîne et l'oscillation s'entretient d'elle-même à la pulsation  $\omega_0$ . En effet, on retrouve alors à la sortie un signal  $s$  identique au signal d'entrée (même amplitude que  $e$  et en phase avec lui). En pratique, la condition d'oscillation est  $A \cdot B > 1$ , et l'amplitude des oscillations est limitée par la non linéarité (saturation) de l'amplificateur. Plus  $A \cdot B$  est proche de 1 et plus les oscillations sont de forme sinusoïdale.

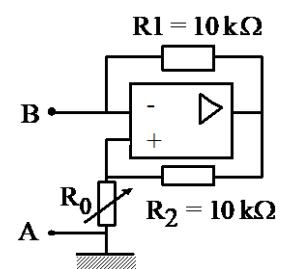
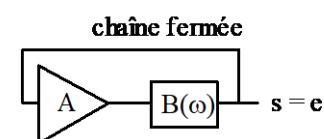
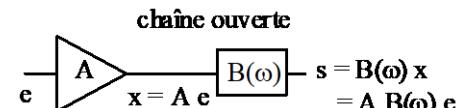
#### 1°) Réalisation d'une résistance négative :

- Montrer par le calcul que le montage ci-contre, vu des bornes A et B, est équivalent à une résistance négative dont on donnera l'expression en fonction des résistances  $R_0$ ,  $R_1$  et  $R_2$ .

On admettra que l'AO fonctionne en régime linéaire.

On prendra pour  $R_0$  une boîte de résistances.

- Vérifier à l'ohmmètre, en prenant quelques centaines d'ohms pour la résistance  $R_0$ , que l'on a bien réalisé une résistance négative ayant la valeur attendue (remarquer que l'appareil indique bien un signe moins devant la valeur numérique).

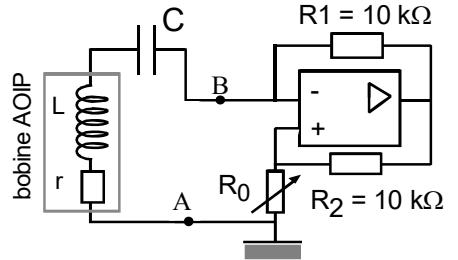


**Ne pas démonter la résistance négative pour la suite du TP**

2°) Oscillateur :

On s'intéresse au montage ci-contre. On note  $r$  la résistance interne de la bobine AOIP.  $C$  est une boîte de condensateurs réglée sur  $200 \text{ nF}$  et  $R_0$  est une boîte de résistances.

- Compte tenu de l'ensemble des résistances présentes, quelle est la valeur  $R_{\text{om}}$  de  $R_0$  permettant d'obtenir des oscillations sinusoïdales ? A quelle fréquence ce circuit doit-il alors osciller ?
- Prendre  $R_0$  légèrement supérieure à  $R_{\text{om}}$ . Vérifier qu'alors la période est la période propre du circuit ( $L$ ,  $C$ ), et que la tension entre A et B est quasi-sinusoïdale (observer sa décomposition en série de Fourier à l'aide de l'ordinateur (logiciel Synchronie ou Latis Pro) ou de l'oscilloscope en mode analyseur de spectre).
- Augmenter  $R_0$  et observer de nouveau la décomposition en série de Fourier du signal. Que deviennent la fréquence des oscillations et la forme du signal ? Vérifier ces modifications sur le signal lui-même.
- D'où vient l'énergie permettant à cet oscillateur de fonctionner ?
- Observer l'établissement des oscillations à l'aide de la mémoire de l'ordinateur ou de l'oscilloscope : donner à  $R_0$  une valeur juste supérieure à celle permettant les oscillations. Mettre un fil en parallèle avec  $R_0$  puis le retirer pour lancer le démarrage. L'enregistrement doit démarrer automatiquement dès que le signal naît. Représenter (ou imprimer) le passage des oscillations d'une amplitude pratiquement nulle à leur amplitude maximale.

3°) Portrait de phase (sur l'ordinateur) :

On cherche enfin à visualiser des trajectoires de phase d'un oscillateur désamorti. On utilisera donc le circuit  $R_{\text{totale}}$ ,  $L$ ,  $C$  dans lequel la résistance totale  $R_{\text{totale}}$  du circuit sera négative. On rappelle qu'une trajectoire de phase s'obtient en traçant la dérivée par rapport au temps d'une grandeur physique en fonction de la grandeur elle-même.

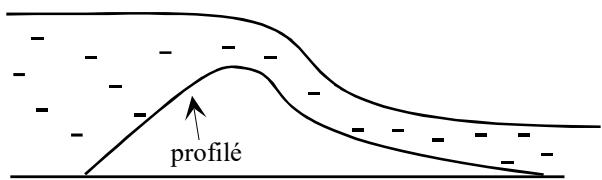
- A partir de l'enregistrement précédent, définir une nouvelle variable en dérivant par rapport au temps la tension enregistrée.
- Afficher alors la trajectoire de phase. Observer l'influence de la valeur de  $R_0$ .

**TP 4 CANAL A SURFACE LIBRE****I-REGIMES D'ECOULEMENT DANS UN CANAL****1-Etude théorique**

On considère un canal possédant une section rectangulaire de largeur  $\ell$ , où la hauteur d'eau est  $h$ .

On appelle  $v$  la vitesse d'écoulement du fluide, supposée uniforme sur cette section droite. En présence d'obstacles (comme le profilé),  $h$  pourra prendre différentes valeurs dans différentes zones du canal.

On néglige la viscosité.



- ❖ En utilisant le théorème de Bernoulli sur une ligne de courant bien choisie, montrer que la quantité  $h + v^2/2g$  est une constante le long du canal que l'on notera  $H$ . Elle représente d'une certaine façon la « charge ».
- C'est-à-dire que si, avant le profilé, la hauteur d'eau est  $h_1$  et la vitesse  $v_1$ , et si ces quantités deviennent  $h_2$  et  $v_2$  après le profilé, alors  $h_1 + \frac{v_1^2}{2g} = h_2 + \frac{v_2^2}{2g} = H$ .

- ❖ Montrer que le débit volumique est la fonction de  $h$  :  $q_v(h) = \ell h \sqrt{2g(H-h)}$ .
- ❖ Représenter la courbe du débit  $q_v(h)$  en fonction de la hauteur  $h$ , pour une valeur fixée de  $H$ . Pour quelle valeur de  $h$  le débit passe-t-il par un maximum ? Quel est alors le débit ?
- ❖ Montrer qu'à débit donné, inférieur à celui du maximum, il y a deux régimes : un régime “ fluvial ” et un régime “ torrentiel ”. Lequel est le fluvial, lequel est le torrentiel ?

On suppose que la largeur  $\ell$  du canal diminue localement et passe de  $\ell$  à  $\ell + d\ell$  (avec  $d\ell < 0$ ).

Sachant que  $H$  garde la même valeur, montrer que dans la zone de largeur rétrécie, la hauteur d'eau  $h$  augmente en régime torrentiel, et diminue en régime fluvial.

## 2-Etude expérimentale

Faire fonctionner le circulateur (celui-ci permet d'imposer 3 débits différents). Prendre le gros débit.

- ❖ Le canal étant libre de tout obstacle, le régime est fluvial. Placer deux plaques en plexiglas contre les parois du canal (une de chaque côté, en vis-à-vis), pour réduire localement la largeur du canal : le niveau d'eau entre les plaques est-il plus haut ? plus bas ? expliquer.
- ❖ Placer le profilé en plastique souple et visualiser les deux régimes d'écoulement en amont et en aval du profilé. Placer ensuite les 2 plaques (comme ci-dessus) dans la zone où l'écoulement est torrentiel. Le niveau entre les plaques monte-t-il ? descend-il ?
- ❖ Le canal étant libre de tout obstacle, donner une impulsion à la sortie en fermant et rouvrant rapidement le volet. La vague parvient-elle à remonter le canal ?
- ❖ Recommencer après avoir ajouté le profilé pour être en régime torrentiel. La vague parvient-elle à remonter le canal ?

## II-MESURE D'UN DEBIT VOLUMIQUE

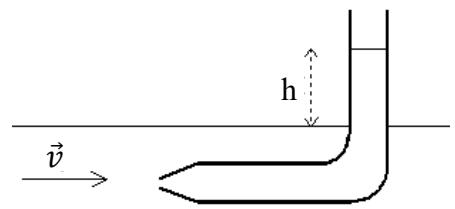
Faire fonctionner le circulateur, et préciser pour chaque mesure quel était le débit utilisé : faible, moyen ou fort.

On testera les méthodes suivantes pour 2 débits du circulateur

1°) 1<sup>re</sup> méthode : Tuyau coudé :

Placer un tube de verre coudé dans le fluide (cf ci-contre).

- ❖ Etablir le lien entre  $v$  et  $h$ . Attention, la relation de Bernoulli ne peut s'appliquer que le long d'une ligne de courant, et cette ligne de courant doit être plausible.
- ❖ Mesurer la vitesse du fluide et en déduire le débit volumique en  $\text{m}^3/\text{s}$ .

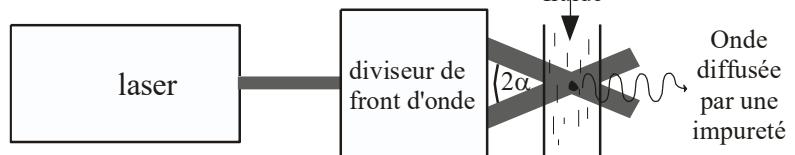


2°) 2<sup>me</sup> méthode : Vélocimètre laser Doppler.

### a)-Montage :

On dispose d'un laser, de longueur d'onde  $\lambda$ , suivi d'un dispositif (diviseur de front d'onde)

qui en sépare le faisceau en 2, les 2 sous-faisceaux venant ensuite se couper en faisant entre eux un angle  $2\alpha$ . On s'arrange pour que les 2 faisceaux se croisent dans le fluide, à l'endroit où on souhaite mesurer la vitesse d'écoulement. Les impuretés (poussière, etc...) qui traversent cette zone d'intersection des faisceaux envoient des ondes lumineuses portant l'information de leur vitesse de déplacement.



Ces ondes lumineuses sont récupérées par une fibre optique qui les envoie dans un boitier qui :

- amplifie le signal lumineux ;
- le convertit en tension électrique ;
- filtre ce signal électrique avec un filtre passe-bande dont les fréquences de coupure basse et hautes sont réglables au moyen de micro-switchs.

### b)-Interprétation à l'aide d'interférences :

Avec le diviseur de front d'onde, on forme 2 sous-faisceaux cohérents. A l'intersection, on a donc dans le référentiel du canal, des franges d'interférences. On montre que l'interfrange est donné par  $i = \lambda/(2\sin\alpha)$ .

L'impureté qui traverse ces franges diffuse donc de la lumière de façon fluctuante, à une fréquence  $f$  correspondant au rythme de passage à travers les franges brillantes et sombres. La fréquence du clignotement est donc liée à l'interfrange  $i$  à la vitesse des particules, c'est-à-dire la vitesse  $v$  de l'écoulement.

- ❖ Exprimer  $v$  en fonction de  $f$ ,  $\lambda$  et  $\alpha$ .

### c)-Interprétation à l'aide de l'effet DOPPLER :

On se place cette fois dans le référentiel de l'impureté en translation rectiligne uniforme par rapport au canal.

Elle reçoit des 2 faisceaux des ondes de fréquences  $f_{r1}$  et  $f_{r2}$  légèrement différentes de la fréquence d'émission  $f_{ém}$ .

$$\text{On a, en raison de l'effet DOPPLER : } f_{r1} = f_{ém} \left( 1 + \frac{v \sin \alpha}{c} \right) \quad \text{et} \quad f_{r2} = f_{ém} \left( 1 - \frac{v \sin \alpha}{c} \right).$$

Les petites particules réémettent ces 2 ondes de fréquence très proche, ce qui donne un phénomène de battement. Un capteur lumineux placé sur le bord du canal reçoit donc des signaux lumineux modulés lentement à la fréquence correspondant à la différence :  $f = f_{r1} - f_{r2}$ .

◇ Exprimer  $v$  en fonction de  $f$ ,  $\lambda$  et  $\alpha$  et comparer à la formule du b).

#### d)-Mesure :

L'ensemble laser + diviseur de front d'onde + capteur à fibre optique est placé sur la table du canal. Vérifier que les 2 faisceaux se croisent dans la partie centrale du canal.

La fibre optique est reliée au boîtier d'électronique, et ce dernier à un oscilloscope numérique à mémoire.

- ◇ Compte tenu de l'ordre de grandeur de la vitesse d'écoulement dans le canal déjà évalué avec la première méthode, régler (avec les micro-switchs) les fréquences basse et haute du filtre passe-bande intégré au boîtier d'électronique. Ce filtre permet d'éliminer les bruits basse et haute fréquence.
- ◇ Avec l'oscilloscope, enregistrer la tension issue du boîtier, en choisissant bien la base de temps. Il faut faire un certain nombre d'acquisitions avant de tomber sur LA poussière qui diffuse bien et qui passe dans l'intersection des 2 faisceaux au bon moment. On obtient alors un signal qui ressemble à une sinusoïde limitée dans le temps. Il ne reste qu'à en mesurer la fréquence pour avoir  $v$ .

On donne :  $\alpha = 0.0625 \text{ rd}$

$\lambda_0 = 675 \text{ nm (dans le vide)}$ .

### III-PROPAGATION D'UNE DISCONTINUITÉ A LA SURFACE D'UN CANAL

#### 1-Etude théorique

L'obturateur à volets permet de fermer complètement le canal. Une

vague remonte alors le canal à la vitesse  $u$ . Le schéma de principe est représenté ci-contre.

On pose :  $\vec{v} = v \vec{u}_x$  et  $\vec{u} = -u \vec{u}_x$  ( $u$  et  $v$  positifs)

On étudie dans le référentiel du laboratoire le système fermé  $\Sigma^*$  constitué d'une quantité de fluide englobant le front d'onde.

- ◇ En traduisant la conservation de la masse de  $\Sigma^*$  entre  $t$  et  $t + dt$ , démontrer que  $v$  et  $u$  sont liés par la relation :

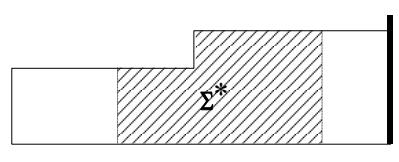
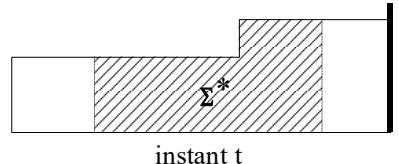
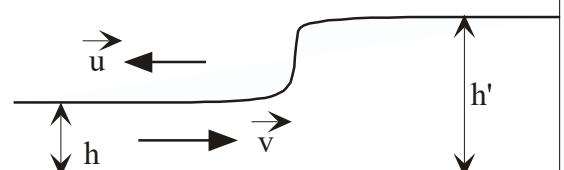
$$vh = (h' - h)u$$

- ◇ Montrer grâce à un changement de référentiel si nécessaire, que la dépendance en  $z$  de la pression est similaire à celle de la statique des fluides sur la face de gauche de  $\Sigma^*$ . On admettra qu'il en est de même sur la face de droite.

- ◇ En appliquant le théorème de la résultante dynamique à  $\Sigma^*$ , démontrer que :

$$h(v + u)v = g(h'^2 - h^2)/2$$

- ◇ En déduire la vitesse de propagation de la vague :  $u = \sqrt{\frac{gh(h+h')}{2h'}}$



#### 2-Etude expérimentale

Supprimer les obstacles dans le canal, fermer l'obturateur à volets : une vague se propage alors dans le canal.

Vérifier expérimentalement que la vitesse du fluide est nulle à droite de la vague.

Mesurer la vitesse  $u$  de la vague (chronomètre). Mesurer  $h$  et  $h'$  puis calculer  $u$  grâce à la formule théorique.

Comparer.

Pour illustrer ceci, vous trouverez facilement sur internet quelques photos de "mascarets" : le mascaret est une vague qui remonte certains fleuves lors du passage de la marée descendante à la marée montante en mer, les jours de grande marée.

## TP5 : mesure d'un coefficient de portance en soufflerie



Le but de ce TP est d'étudier le comportement d'un tronçon d'aile d'avion en fonction de l'angle d'incidence, puis d'estimer sommairement les coefficients de portance  $C_z$  et de trainée  $C_x$  de ce tronçon d'aile, pour différentes incidences.

A chaque fois que vous devez répondre à une question, ou bien réaliser une action expérimentale, le symbole  $\diamond$  apparaît en tête de ligne.

### I) SOUFFLERIE ET MATERIEL ANNEXE

La soufflerie du lycée Victor Hugo est une soufflerie de type Eiffel. C'est plus ou moins une réplique de la soufflerie EOLIA de Poitiers, laquelle a été réalisée par l'AAAF, avec l'aide de EADS, DASSAULT et l'ENSMA. Celle du lycée V Hugo a été construite en 2012. C'est une soufflerie aspirante : le moteur à hélice est placé tout à l'arrière ; l'air, aspiré par l'hélice, entre par le convergent blanc, passe dans le tunnel en plexiglas, puis arrive à l'hélice et ressort.

L'équipement de cette soufflerie a été considérablement amélioré entre 2020 et 2022, grâce à la section BTS du lycée V Hugo, et à l'énorme travail de conception et de mise au point de François SCHNEIDER et Fred MORENO : les étudiants de BTS SNEC ont réalisé le projet de conception d'une maquette d'aile d'avion équipée de capteurs de pression et de jauge de contraintes, avec motorisation de l'inclinaison de l'aile, et affichage des pressions et des forces sur une tablette. Puis ils ont réalisé une régulation de la vitesse du flux d'air, grâce à un système bouclé (avec rétroaction).

La commande de l'angle d'incidence, et la récupération des informations de pression peuvent se faire à distance, dans une autre pièce, grâce à une liaison wi-fi.

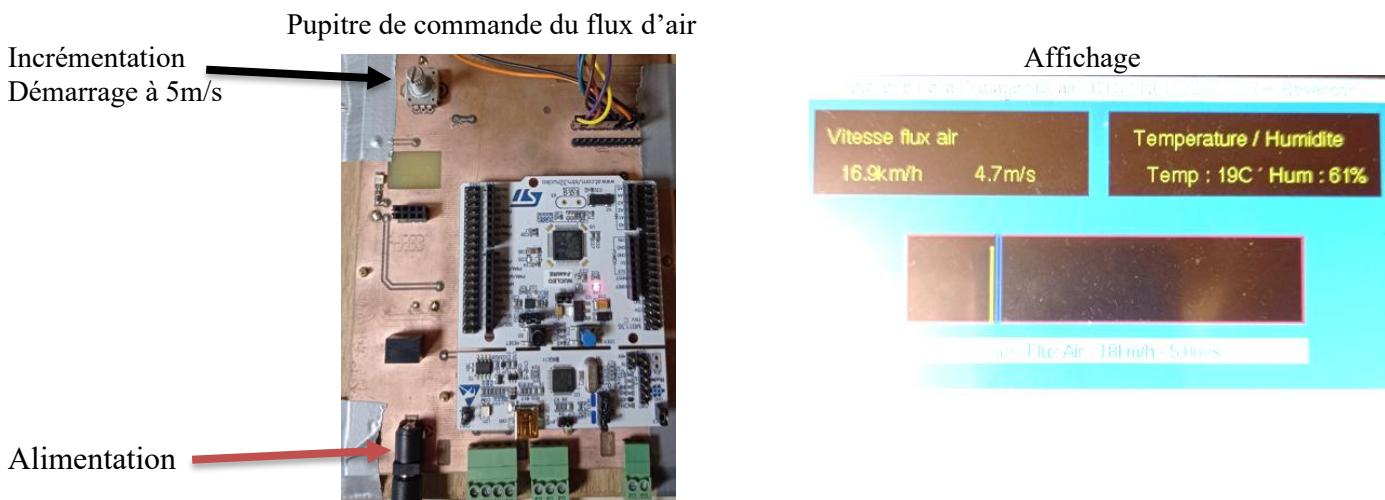
Pour rendre l'écoulement le plus laminaire possible, une structure de type « nid d'abeille » est placée à l'entrée de la soufflerie.

#### Sécurité :

- Ne jamais se placer devant le « convergent » (partie blanche par laquelle l'air entre dans la soufflerie) pendant le fonctionnement du moteur de la soufflerie ;
- Utiliser les casques pour vous protéger du fort bruit de la soufflerie ;
- Ne jamais démonter la grille se situant à l'arrière de la soufflerie.

#### Contrôle de la vitesse du flux d'air (quand ce sera nécessaire) :

Dans toute la suite, on notera  $v_\infty$  cette vitesse.





Après avoir choisi une consigne de vitesse de flux d'air, attendre quelques secondes que la mesure (en jaune) soit dans le rectangle (bleu) de la consigne, comme ci-contre



La mesure de la vitesse du flux d'air se fait au moyen d'une sonde à fil chaud. Son principe est de faire passer un courant dans un fil, qui se trouve à la fois échauffé par ce courant, et refroidi par l'écoulement de fluide (ici l'air). Sa température est directement liée à la vitesse de l'écoulement.

Le moteur qui entraîne l'hélice de la soufflerie est un moteur brushless triphasé, à aimants permanents. Il est alimenté par un onduleur triphasé, lui-même alimenté par une source de tension continue. Le système de régulation de la vitesse du flux d'air fonctionne de la façon suivante : on fixe une valeur de consigne (rectangle bleu), on mesure la vitesse de l'écoulement (trait vertical jaune). Compte tenu de ces deux informations, on fixe la fréquence des tensions appliquées aux 3 phases du moteur brushless : si le flux est trop lent, on augmente la fréquence des tensions.

## II) DESCRIPTION DE LA MAQUETTE D'AILE D'AVION (voir Figure 1 ci-dessous)

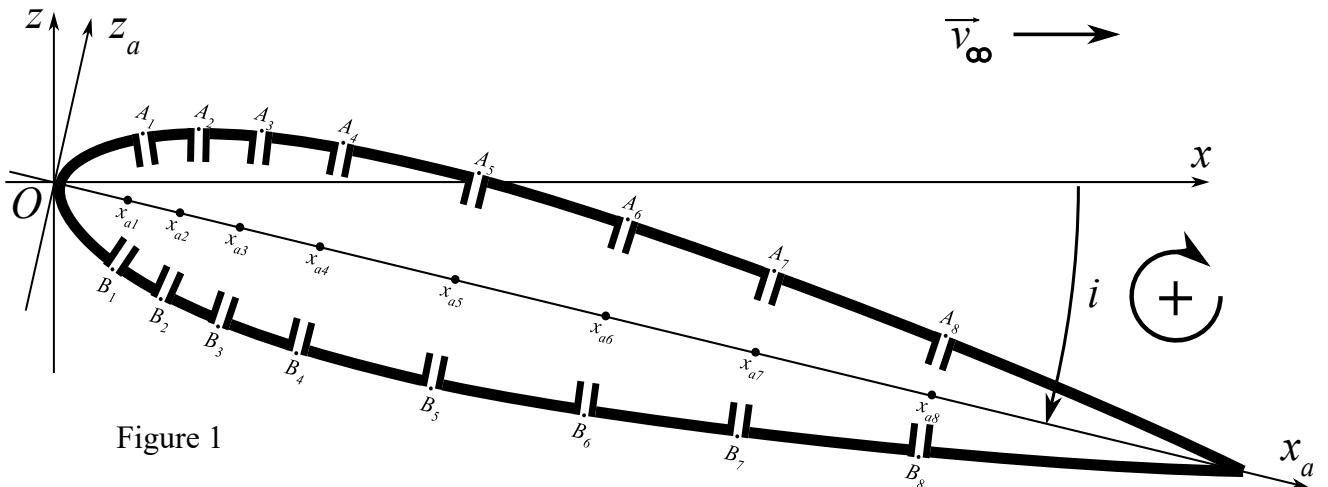
Le tronçon d'aile correspond à un profil NACA 0017. C'est un profil **symétrique** : l'extrados et l'intrados ont exactement la même forme. L'envergure du tronçon d'aile est  $\ell_{env} = 21 \text{ cm}$ . Et la corde  $\ell = 34 \text{ cm}$ .

8 capteurs différentiels de pression mesurent la différence de pression ( $P_{A_k} - P_{B_k}$ ) entre des points de l'extrados (de  $A_1$  à  $A_8$ ) et leurs homologues de l'intrados (de  $B_1$  à  $B_8$ ). Les points de mesure  $A_k$  et  $B_k$  sont situés à la même distance du bord d'attaque (voir schéma ci-dessous).

Les informations de pression sont amenées depuis les petits trous jusqu'aux capteurs par des tuyaux souples transparents.

L'axe  $Ox$  est celui selon lequel s'écoule l'air dans la soufflerie. L'axe  $Oz$  est vertical ascendant.

Comme indiqué au I), on note  $\vec{v}_\infty = v_\infty \vec{u}_x$  la vitesse de l'écoulement dans le tunnel en plexiglas, là où il n'est pas perturbé par l'aile. Sa mesure est assurée par l'anémomètre à fil chaud.



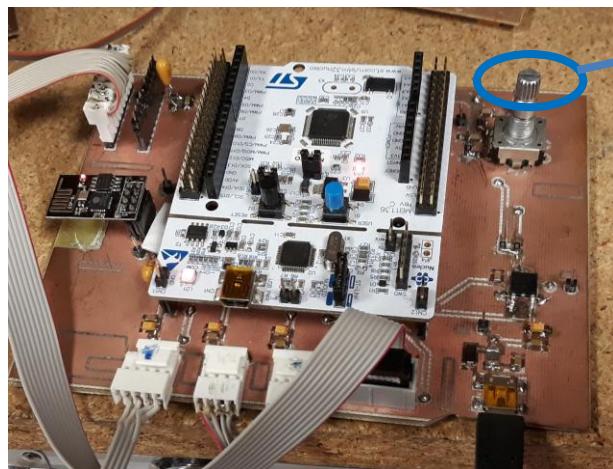
La variation de l'angle d'incidence  $i$  se fait grâce à un petit moteur caché dans le tube en PVC gris. Il se commande au moyen du **bouton 1** de la platine.

Attention, pour faire tourner l'aile dans le sens horaire ( $i > 0$ ), il faut tourner le bouton dans le sens anti-horaire.

Le tronçon d'aile servant à ce TP est également équipé de flancs latéraux (planches fines de surface nettement plus grande que celle de la section de l'aile).

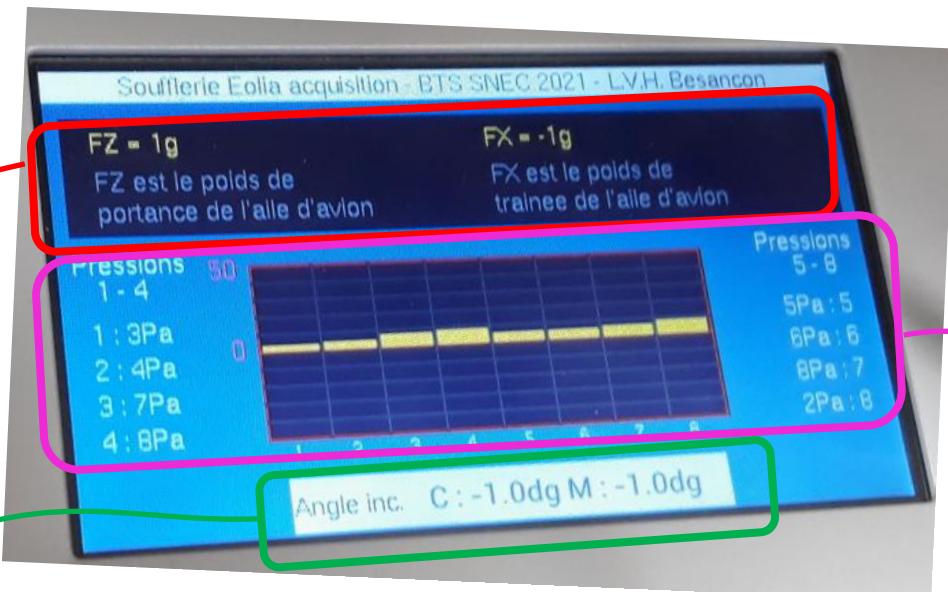
- ❖ Pour quelle raison a-t-on ajouté ces flancs ?

Notons enfin que le tronçon d'aile est équipé de « penons », comme les voiles des bateaux à voile de compétition. Ce sont des petits bouts de fils de laine, dont une extrémité est scotchée sur le dessus de l'aile (ou fixée sur la voile d'un bateau). Ils permettent de détecter la forme des lignes de courant au niveau de la paroi, afin de détecter un décollement éventuel de la couche limite.



Bouton 1

### III) AFFICHAGES SUR LA TABLETTE DEDIEE A LA MAQUETTE



Le cadre du haut contient les informations mesurées, l'une grâce à une balance électronique verte, l'autre grâce à une jauge de contrainte, située sous la balance verte. Notons au passage que la balance contient, elle aussi une jauge de contrainte, mais on ne la voit pas.

- FZ correspond à la force avec laquelle l'aile appuie sur la jauge de contrainte ; elle est donnée en équivalent-masse, en grammes
- FX correspond à la force de traînée, mais est donnée en équivalent-masse, en grammes
- ❖ Comment fait-on pour convertir en Newton les valeurs indiquées en grammes, ?

Le cadre du bas indique l'angle d'incidence.

- « C » donne la valeur de la consigne, c'est-à-dire l'angle d'incidence désiré ;
- « M » donne la valeur de l'angle d'incidence mesuré, grâce à un capteur angulaire.

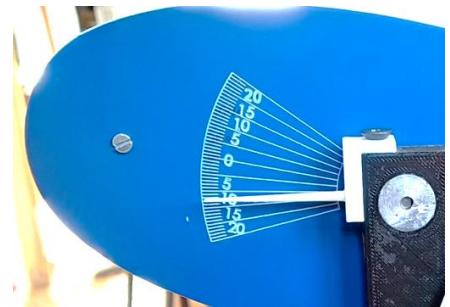
La partie centrale de l'écran donne les différences de pression :

- À gauche, on peut lire les valeurs de  $(P_{A_k} - P_{B_k})$ , pour  $k \in \{1,2,3,4\}$
- À droite, on peut lire les valeurs de  $(P_{A_k} - P_{B_k})$ , pour  $k \in \{5,6,7,8\}$

- Au milieu, tous les ( $P_{A_k} - P_{B_k}$ ) sont rassemblés de façon graphique (bargraphe jaune)
- ◊ Rappeler la définition des forces de portance  $\vec{F}_{por}$  et de trainée  $\vec{F}_{tr}$  s'exerçant sur une aile d'avion.
- ◊ La balance verte mesure l'équivalent en masse (qu'on notera  $m_1$ ) d'une force verticale descendante. La jauge de contrainte mesure l'équivalent en masse (qu'on notera  $m_2$ ) d'une autre force verticale descendante. Le calculateur intégré au boîtier de mesure convertit  $m_1$  et  $m_2$  en FZ et FX.  
En observant bien le positionnement de la balance, de la jauge de contrainte, et en analysant le rôle de l'équerre bleue, expliquer par un raisonnement théorique comment le calculateur détermine FZ et FX, à partir de  $m_1$  et  $m_2$ , et des dimensions de l'équerre bleue.
- ◊ Comment déterminer, dans la base ( $\vec{x}, \vec{z}$ ), les forces de portance  $\vec{F}_{por}$  et de trainée  $\vec{F}_{tr}$ , en fonction de FZ et FX (qui sont des équivalents en masse) ?

#### IV) ETUDE QUALITATIVE

- \* Démarrer la soufflerie et régler la vitesse à  $v_{\infty 1} = 6 \text{ m/s}$ .
- \* Au moyen du **bouton 1**, régler l'incidence de l'aile à  $i = 0^\circ$  en plaçant l'aiguille en face de la graduation angulaire « 0 ».
- \* Appuyer alors sur le **bouton 1**, pour réinitialiser  $i$  et FZ.
- \* Puis faire croître lentement l'angle d'incidence  $i$ , pour l'amener à  $5^\circ$ .
- ◊ Les points de l'extrados sont-ils à des pressions supérieures ou inférieures à leurs homologues de l'intrados ?
- ◊ En conséquence, pour cet angle d'incidence, a-t-on une force de portance vers le haut ou vers le bas ?
- ◊ La différence de pression est-elle plus marquée près du bord d'attaque ou près du bord de fuite ?
- ◊ Le centre de poussée (point d'application de  $\vec{F}_{por}$  et  $\vec{F}_{tr}$ ) de l'aile est-il, par conséquent, au milieu de la corde, ou bien entre le bord d'attaque et le milieu, ou bien entre le milieu et le bord de fuite ?
- ◊ Augmenter lentement l'angle d'incidence et observer les mouvements des « penons » : Pourquoi se mettent-ils parfois à tournoyer ? Dans quel sens ? Pourquoi ce sens ? Ces penons permettent-ils de mettre en évidence le phénomène de décrochage ? expliquer
- \* Revenir à  $i = 0^\circ$ , puis appuyer sur le **bouton 1**, pour réinitialiser  $i$  et FZ.
- ◊ Reprendre les questions précédentes mais pour des angles d'incidence  $i$  négatifs, et donc en commençant à  $i = -5^\circ$ , puis en rendant  $i$  de plus en plus négatif.



#### V) MESURE DES COEFFICIENTS DE PORTANCE ET DE TRAINEE

##### 1°) Nombre de Reynolds

- ◊ Quelle est la formule littérale donnant le nombre de Reynolds pour les écoulements autour d'une aile d'avion, pour une vitesse  $v_{\infty}$  donnée ?

##### 2°) Mesures préliminaires

Dans l'état actuel de la maquette, il y a un risque d'erreur de mesure de la composante FZ donnée par l'une des deux jauge de contraintes. Pour corriger cela, on procédera avec un essai préliminaire :

- ◊ Régler l'incidence de l'aile pour qu'elle soit horizontale (graduation 0) ;
- ◊ En l'absence d'écoulement, appuyer sur le bouton 1 pour faire un « reset » complet ;

NE PLUS APPUYER SUR LE BOUTON 1 PAR LA SUITE dans cet essai préliminaire.

- ◊ Donner à  $v_{\infty}$  des valeurs de 6 à 10 m/s, par pas de 2, et remplir un tableau, en relevant les valeurs de  $v_{\infty}$  et les indications de FZ (en grammes) correspondantes.

Le plateau sur lequel repose la maquette peut générer une force de portance en plus de celle due à l'aile. C'est cette force qui est mesurée par la jauge de contrainte lorsque l'angle d'incidence est nul.

**Dans la suite du TP, pour chaque valeur de  $v_\infty$  utilisée, il faudra retirer de la valeur de FZ indiquée, celle provenant du tableau ci-dessus.**

### 3°) Relevés expérimentaux

- ◊ On prend pour l'air  $\eta = 2.10^{-5}$  Pl. Evaluer la valeur du nombre de Reynolds pour  $v_{\infty 1} = 6 \text{ m/s}$ .
- ◊ Régler l'incidence de l'aile pour qu'elle soit horizontale (graduation 0) ;
- ◊ En l'absence d'écoulement, appuyer sur le bouton 1 pour faire un « reset » complet ;  
NE PLUS APPUYER SUR LE BOUTON 1 PAR LA SUITE tant que la soufflerie n'est pas arrêtée.
- ◊ Régler la vitesse de la soufflerie à  $v_{\infty 1} = 6 \text{ m/s}$ .
- ◊ Régler l'incidence de l'aile à  $i = +3^\circ$ ;
- ◊ Relever les valeurs de FX et FZ, et en déduire celles de  $F_{por}$  et  $F_{tr}$  (en N), en tenant compte du  $2^\circ$ ).
- ◊ Recommencer en incrémentant l'angle d'incidence de  $3^\circ$  à chaque fois, jusqu'à  $21^\circ$ .

Reprendre toutes ces étapes pour  $v_{\infty 2} = 8 \text{ m/s}$  puis  $v_{\infty 3} = 10 \text{ m/s}$ .

### 4°) Exploitation des mesures

Pour chacune des 3 valeurs de  $v_\infty$ , et en utilisant un tableur :

- ◊ Calculer  $C_x$  et  $C_z$  pour chaque valeur de l'angle d'incidence  $i$  ;
- ◊ Tracer  $C_x$  et  $C_z$  en fonction de  $i$  ;
- ◊ Tracer la « polaire », c'est-à-dire  $C_z$  en fonction de  $C_x$ .
- ◊ On rappelle que la finesse aérodynamique est le rapport  $C_z/C_x$ . Déduire du tableau de valeurs la finesse maximale du profil, et l'angle d'incidence pour lequel elle est obtenue.
- ◊ Sans refaire de mesures, pourrait-on connaître  $C_x$  et  $C_z$  pour des valeurs négatives de l'angle d'incidence ?