



Lycée Suger de Saint-Denis

La Physique au bout du fil



Travail présenté par :

Sabrina Ben Yahya ET Sammy Fergoug

Élèves de Première S

Encadré par :

Mohamed EL Abed

professeur de Physique

Résumé :

Lorsqu'on fait passer un courant dans un fil conducteur, celui s'échauffe (c'est l'effet Joule) et sa température augmente. Si ce fil est ensuite soumis à un courant d'air (ni chaud ni froid), sa température diminue. La température finit par atteindre une valeur d'équilibre qui dépend de la vitesse du courant d'air. Ainsi, la mesure de cette température est une mesure indirecte de la vitesse.

Dans les ouvrages de référence, la méthode dite d'anémométrie à fil chaud repose sur la mesure de la tension aux bornes du fil car la résistance de celui-ci est censée varier avec la température. Nous avons, pour notre projet, choisi un fil dont la résistance ne varie pas sur le domaine de températures exploré (de 20° C à 200°C) pour voir s'il est quand même possible d'estimer correctement la vitesse par un moyen très simple.

Remerciements



Nous tenons à remercier :

- Messieurs Richard Colombo et Frédéric Bossuyt de la société Micrelec de nous avoir prêté le module d'acquisition OrphyLab.
- Monsieur Sébastien Portal de la société National Instrument pour ses précieux conseils.
- Monsieur Wladimir Toutain du groupe de formation des Maîtres à l'université Denis Diderot pour son accueil et pour avoir mis à notre disposition le matériel qui nous a permis de mettre au point nos expériences.
- Messieurs Pierre Slangen (Mines d'Alès) et Jean Michel Desse (Onera)pour leurs conseils techniques en matière de visualisation d'écoulements de gaz.

Présentations

Nous sommes deux élèves de Première S du Lycée Suger de Saint Denis. Dès le début de l'année, notre professeur de Physique nous a parlé des olympiades de la Physique mais sans idée précise de projet.

L'idée de participer à une compétition nous a motivés et dans le cadre de l'accompagnement personnalisé, nous avons mené une recherche. Nous avons commencé par une étude des Lasers puis par l'étude de la « bougie balançoire » mais l'interprétation du phénomène faisait appel à la théorie du Chaos incompréhensible à notre niveau ; Nous avons donc renoncé.

Début octobre, notre professeur nous raconte sa visite au salon Mesure Expo à Paris et notamment sa rencontre avec un fabricant d'anémomètres ; c'est ainsi que s'est imposée l'idée du projet car nous avons été séduits par la simplicité du dispositif expérimental et l'élégance de la méthode de mesure.

Nous étions trois à travailler sur ce projet jusqu'à ce que notre camarade Anissa nous abandonne pour un autre projet fascinée qu'elle était par la beauté des LEDs. Au fur et à mesure de nos recherches nous avons découvert qu'il existait plusieurs méthodes de mesure de vitesse mais c'est l'anémomètre à fil chaud a retenu notre attention.

En suivant le fil nous avons découvert que les échanges thermiques recèlent une richesse physique insoupçonnée.

Plan

Introduction

1. Bilan de puissance

2. Hypothèses physiques

3. Relation fondamentale de l'anémométrie : Loi de King

4. Montage

4.1 Vue d'ensemble

4.2 Schéma général

4.3 Choix des capteurs

a. thermomètre

b. Anémomètre

5. Le protocole expérimental :

5.1 Tâtonnements

5.2 Le réchauffement Sisyphe

5.3 Mesure de la température d'équilibre en fonction de la vitesse du jet d'air

6. Exploitation des résultats : modélisation

7. Limites de la méthode

Conclusion

Introduction

Anémomètre, terme du XVIII^e siècle, composé du préfixe « anémo » (en grec « *νεμος* », « *anemos* », en français « vent ») et du suffixe « mètre » (« mesure »), est un appareil permettant de mesurer la vitesse ou la pression du vent.



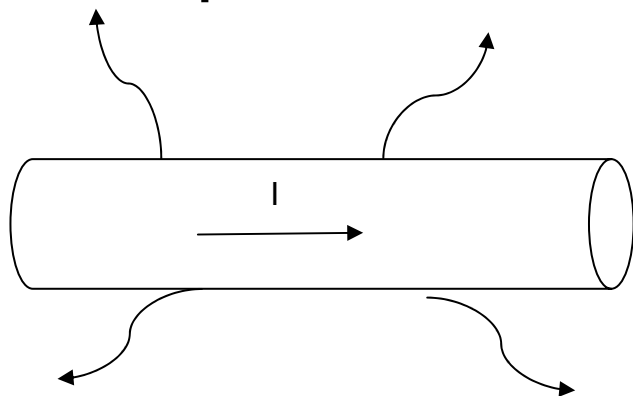
Anémomètre à coupelles

Nous nous intéressons dans ce projet à la possibilité de mesurer la vitesse du vent en étudiant les échanges thermiques d'un fil chauffé par un courant électrique et refroidi par un courant d'air.

Les techniques que l'on trouve dans la littérature font appel à un système électronique très sensible, appelé pont de Wheatstone, qui nous a semblé difficile à réaliser.

Nous avons adopté une technique plus simple à notre niveau moyennant quelques hypothèses dont nous avons vérifié la validité à posteriori.

1. Bilan de puissance



On considère un fil de longueur l et de diamètre d ($l \gg d$). On fait circuler dans ce fil de résistance R un courant d'intensité I .

La variation d'énergie du fil par unité de temps dE/dt est due à deux termes: La puissance reçue par effet Joule et La puissance cédée à l'air ambiant P_a , ce qui s'écrit :

$$dE/dt = P_J - P_a$$

Le fil atteint rapidement l'équilibre avec une température T_{eq} supérieure à la température ambiante T_0 et donnée par le bilan de puissance : $P_J = P_a$

Examinons chacun de ces termes séparément :

1. La puissance reçue par effet Joule

Celle-ci s'écrit $P_J = RI^2$

2. La puissance cédée à l'air ambiant

Le fil chauffé peut céder de l'énergie par :

- Conduction vers l'air ; Processus qui fait intervenir la conductivité thermique k_a de l'air (en $Wm^{-1}K^{-1}$) : $k_a l (T_{eq} - T_0)$ représente la puissance cédée à l'air par conduction
- Conduction vers les supports du fil ; Processus qui fait intervenir la conductivité thermique k_f du fil.
- Convection due au mouvement de l'air.
- Rayonnement thermique.

2. Hypothèses physiques

Notre fil est constitué d'un alliage de Nickel et de chrome ($T_{\text{fusion}} = 1400^\circ\text{C}$) de longueur 900 mm et de diamètre 0.5 mm ; Sa résistance électrique vaut 2.2Ω et reste constante sur le domaine de température exploré comme on peut le vérifier avec les indications fixes de l'alimentation stabilisée.

Dans les conditions de l'expérience ($I=1 \text{ A}$ à 2.5A) la température peut atteindre 75°C et on n'observe pas de rayonnement (le fil commence à rougeoier à partir de $I=3.5 \text{ A}$). On peut donc le négliger devant les autres transferts thermiques.

L'échange thermique entre deux corps est d'autant plus important que la surface de contact entre ces deux corps est importante. La longueur du fil étant grande devant son diamètre, il s'ensuit que la surface latérale du fil en contact avec l'air est beaucoup plus grande que la surface en contact avec les supports du fil ; On négligera donc la conduction vers les supports.

Compte tenu de ces hypothèses, La puissance cédée à l'air s'écrit :

$$P_a = h(T_{\text{eq}} - T_0) \mathcal{A}$$

Où

- \mathcal{A} est l'aire de la surface latérale du fil : $\mathcal{A} = \pi d l$
- T_{eq} est la température d'équilibre du fil en Kelvin (K)
- T_0 est la température de l'air ambiant en Kelvin (K)
- h le coefficient de transfert (unités : $\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$)

Les physiciens des fluides ont l'habitude de travailler avec des grandeurs sans dimensions appelés nombres.

Ainsi la combinaison : hd/k_a où k est la conductivité thermique de l'air est un nombre sans dimensions appelé nombre de Nusselt.

$$Nu = hd/k_a$$

En multipliant numérateur et dénominateur par la même quantité

$l(T_{eq}-T_0)$ on voit que N_u représente le rapport de la puissance transférée totale à la puissance transférée par conduction uniquement.

En remplaçant dans l'expression de P_a , il vient :

$$P_a = \pi l k_a (T_{eq}-T_0) N_u$$

Le bilan de puissance s'écrit alors :

$$RI^2 = \pi l k_a (T_{eq}-T_0) N_u$$

Application numérique : Ordre de grandeur du nombre de Nusselt dans les conditions de l'expérience.

Avec $I=1$ A, $R=2.2$ Ω , $l=20$ cm, $k_a=0.02$ $Wm^{-1}K^{-1}$, $T_{eq}-T_0=30$ °C

On obtient N_u de l'ordre de 5 : le transfert par conduction ne représente que 1/5 du transfert total. Autrement dit le transfert par convection est 4 fois plus efficace que le transfert par conduction. Les hypothèses de départ sont donc bien vérifiées.

3. Relation fondamentale de l'anémométrie : Loi de King

La question est maintenant de faire apparaître la vitesse U de l'air dans ces équations.

Introduisons un deuxième nombre sans dimensions : le nombre de Reynolds

$$Re = Ud/v_a$$

Où v_a est la viscosité de l'air ($v_a=15 \cdot 10^{-6}$ $m^2 s^{-1}$, $v_{miel}=4280 \cdot 10^{-6}$ $m^2 s^{-1}$).

Le nombre de Reynolds permet de comparer les forces d'inerties aux forces visqueuses.

La loi de King (1914) affirme que

$$N_u = a + b(Re)^{0.5}$$

Où a et b sont des constantes.

A l'équilibre on peut donc écrire :

$$RI^2 = \pi l k_a (T_{eq} - T_0) (a + b(R_e)^{0.5})$$

Ou encore :

$$T_{eq} = T_0 + RI^2 / (A + BU^{0.5})$$

Nous allons donc mesurer la température d'équilibre du fil pour différentes vitesses et voir si l'on peut modéliser la courbe obtenue en utilisant la loi de King.

4. Le montage

4.1 Vue d'ensemble



Le montage est constitué par :

Un sèche-cheveux à « souffle froid » (c'est-à-dire à température ambiante)

Une résistance chauffante de bouilloire

Une alimentation stabilisée

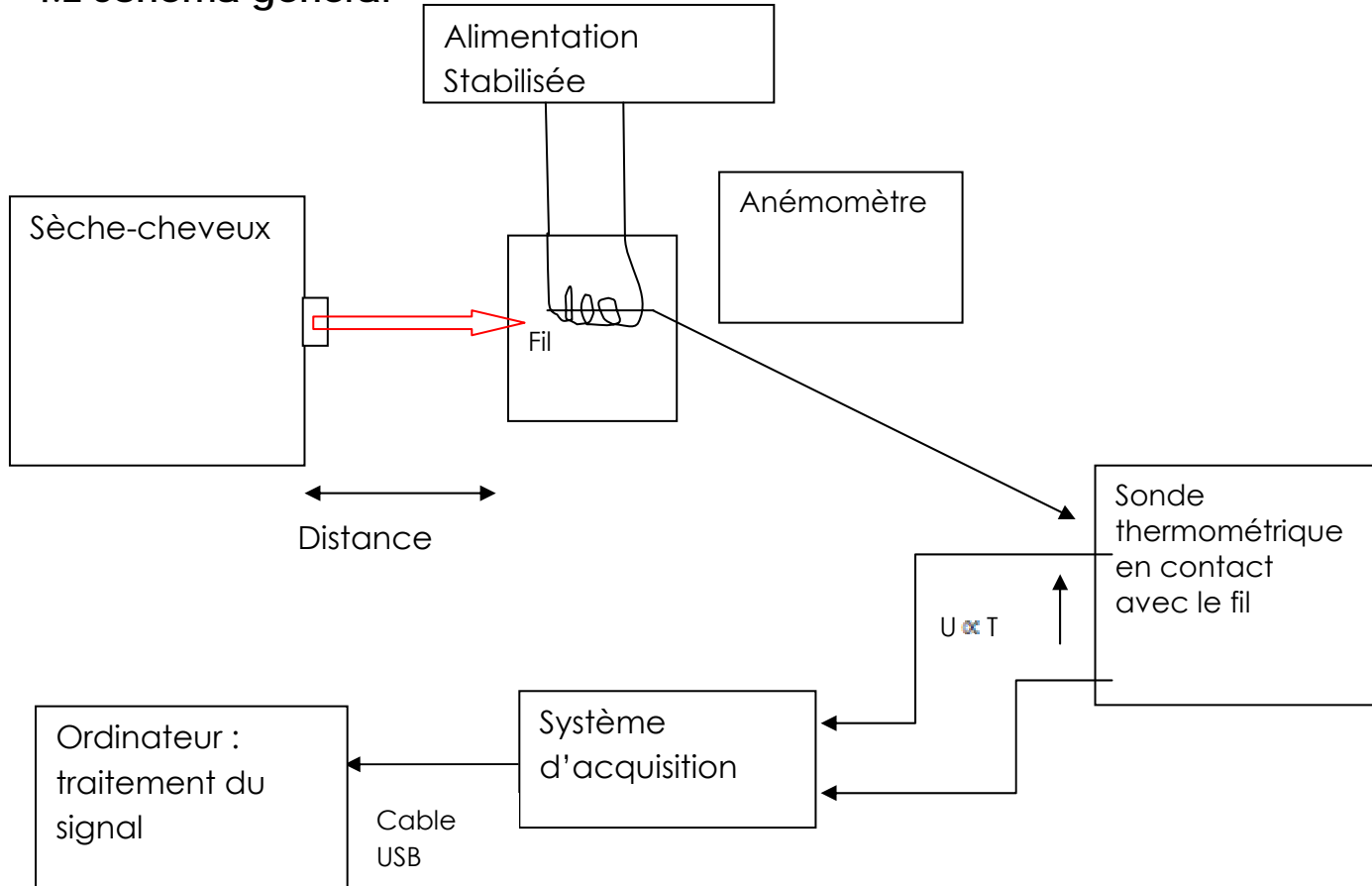
Une sonde thermométrique Pt 100

Un anémomètre à hélice

Un boîtier d'acquisition OrphyLab

Un ordinateur qui pilote l'acquisition et effectue le traitement du signal (Logiciel Regressi)

4.2 Schéma général



4.3 Choix des capteurs

a) Le thermomètre

Nous disposons au Lycée de thermomètre à sonde pt100 (voir Notice en annexe) qui permet de faire des mesures de -50°C à 110°C . Le principal intérêt de cette sonde est qu'elle peut être reliée à l'ordinateur pour faire des acquisitions. La sonde doit préalablement être étalonnée à l'aide de deux points de mesures.

b) L'anémomètre

Une recherche sur internet a permis de recenser les magasins qui vendent des anémomètres à Paris : il s'agit des magasins qui distribuent du matériel de voile. Nous avons trouvé le notre au magasin « Au vieux campeur » dans le 5^{ème}.

5. Protocole expérimental et résultats des mesures

5.1 Tâtonnements

Nous avons commencé par faire des essais avec un sèche-cheveux qui se trouvait au laboratoire mais celui-ci chauffait ce qui faussait la mesure. Nous avons ensuite acheté un radiateur mais avec souffle d'air froid ; Celui-ci ne produisait pas un courant d'air uniforme ; Nous avons alors eu l'idée de construire une conduite pour canaliser le flux mais celui devenait faible dès que l'on s'éloignait de 1 m et la géométrie ne facilitait pas lecture de l'anémomètre. Nous avons ensuite acheté un sèche-cheveux puissant et possédant une fonction « souffle froid ».

Nous avons pu alors procéder à des mesures reproductibles.

L'anémomètre et le thermomètre doivent être très proche du fil si on veut des mesure précise. Nous disposons au laboratoire du Lycée de résistances chauffantes montées sur support ; Nous avons donc naturellement pensé à les utiliser.

5.2 Le réchauffement Sisyphe¹

Nous avons voulu savoir dans un premier temps comment variait la vitesse de refroidissement avec la vitesse du jet d'air ; Nous avons pour cela opéré de la manière suivante :

0. Régler les paramètres de l'acquisition à durée totale : 33min 20s, et échantillonnage : 1 point par seconde

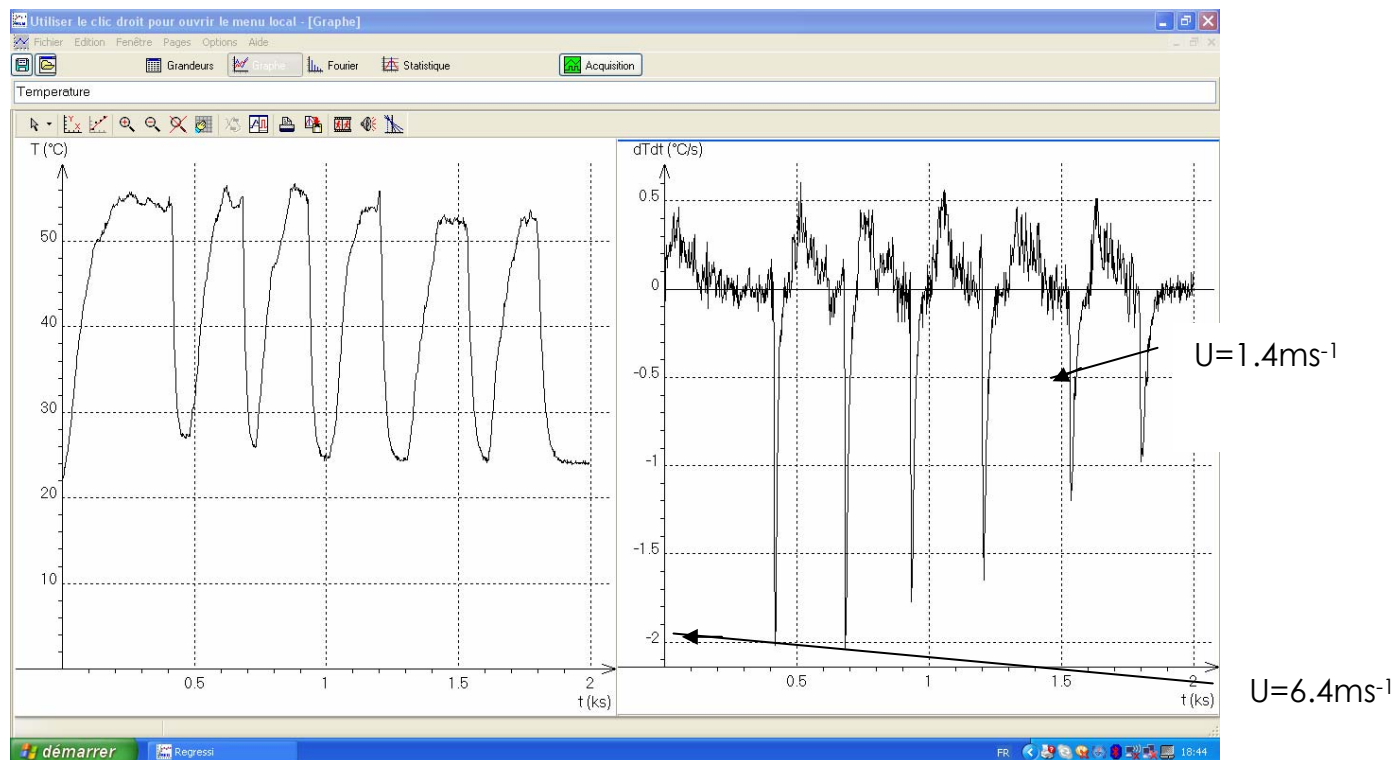
1. Régler à l'aide de l'alimentation stabilisée l'intensité du courant à 1 A : la température monte.

2. Dès que la température se stabilise, allumer le sèche-cheveux qui se trouve au plus près du fil : la température tombe rapidement.

¹ Par analogie avec la situation du héros de la mythologie grecque condamné à pousser éternellement un rocher vers le sommet d'une montagne, rocher qui retombe dans la vallée aussitôt le sommet atteint. (Voir aussi *Le refroidissement Sisyphe*)

3. Dès que la température se stabilise, éteindre le sèche cheveu et attendre que la température retourne à la valeur d'équilibre avant refroidissement.
4. Eloigner le sèche cheveu et l'allumer : constater que le refroidissement est moins rapide.
5. Faire subir au fil plusieurs cycles.

Le résultat est donné dans le graphique suivant :



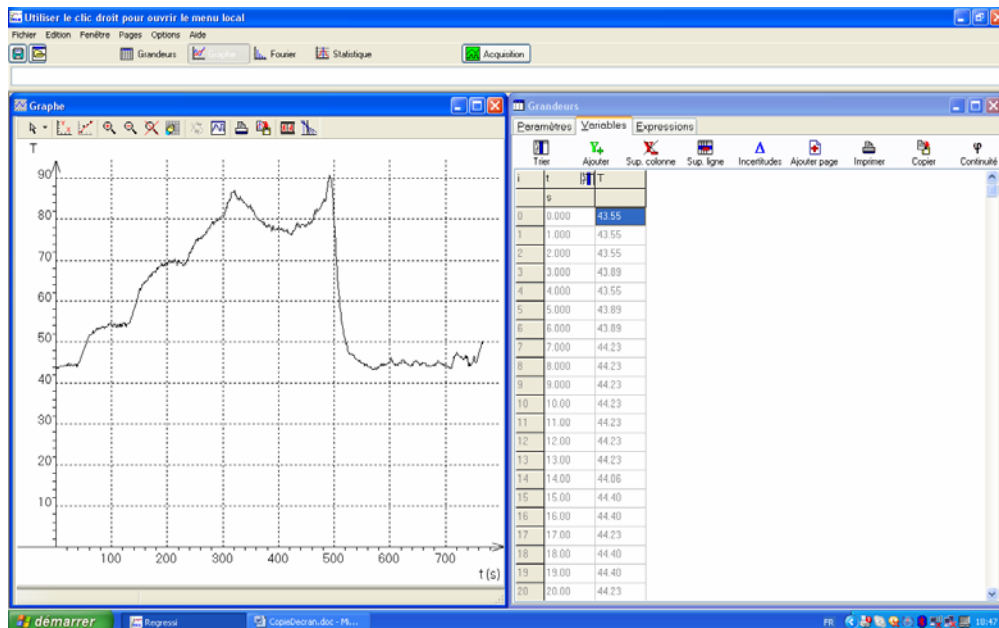
La courbe de droite représente la dérivée de la température en fonction du temps. On observe des pics qui représentent la valeur de la vitesse de refroidissement.

On remarque bien que la profondeur de ces pics est d'autant plus petite que la vitesse du jet d'air est petite.

5.3 Mesure de la température d'équilibre en fonction de la vitesse du jet d'air

Dans cette série de mesures, nous avons réglé l'intensité du courant à 2.5 A afin que la température d'équilibre (en l'absence de refroidissement) soit située autour de 90°C. Nous avons commencé les mesures avec le sèche-cheveu proche du fil puis en l'éloignant progressivement. Nous avons attendu à chaque fois l'établissement d'un équilibre (palier de

température). L'acquisition a duré 16 min. Les résultats apparaissent dans le graphique suivant :



La dernière mesure a été réalisée en rapprochant au maximum le sèche-cheveux du fil. Nous avons extrait de cette courbe le tableau suivant :

U [ms ⁻¹]	T [°C]
5.2	44.3
3.5	44.5
1.9	53.8
1.2	69.2
0.9	77.1

Erreurs absolues :

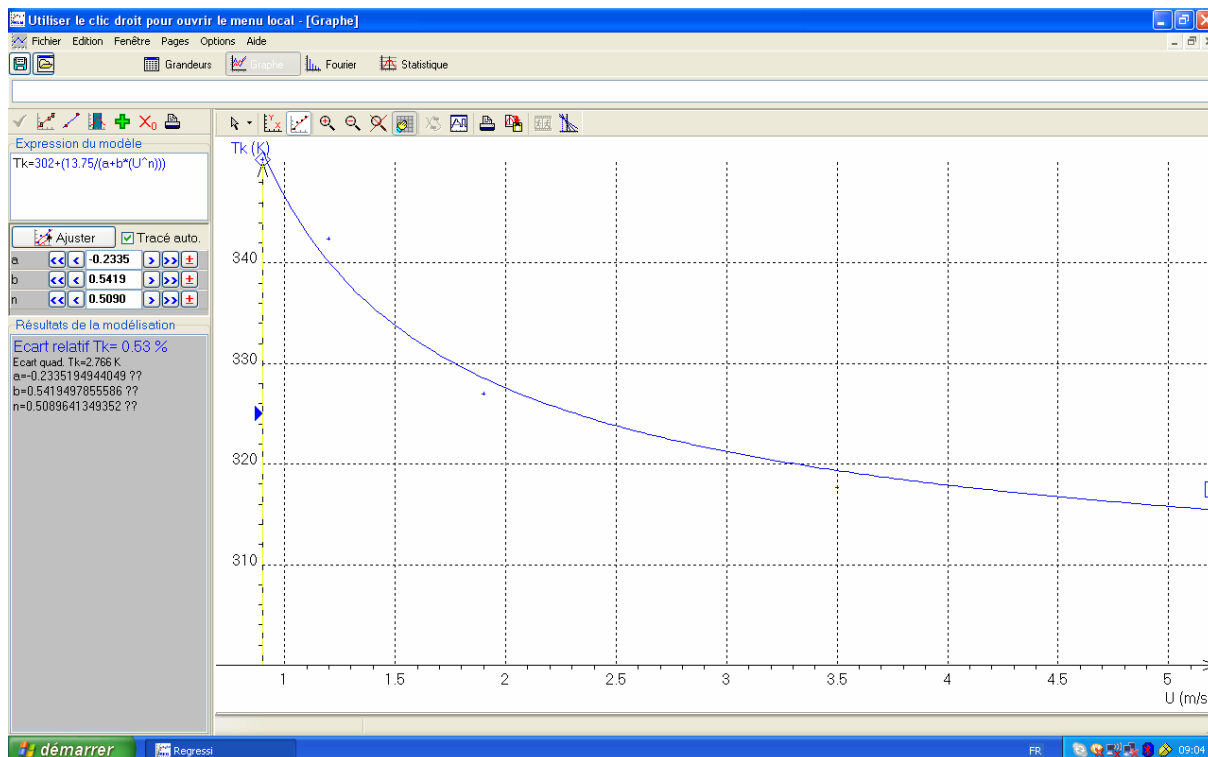
$$\Delta T = 0.1^\circ\text{C} \text{ et } \Delta U = 0.1 \text{ m/s}$$

6. Exploitation des résultats : modélisation à l'aide du logiciel Regressi

Modélisons la variation de T_{eq} en fonction de U par la relation:

$$T_{eq} = T_0 + RI^2 / (A + BU^n)$$

Où A et B et n sont les paramètres de la modélisation



On trouve :

$$A = -0.2335 \text{ SI}$$

$$B = 0.5419 \text{ SI}$$

et $n = 0.509$ avec écart relatif de 0.53%.

Nous retrouvons bien l'exposant 0.5 de la loi de King, ce qui est assez satisfaisant !

On en déduit la formule qui permet de calculer la vitesse du jet connaissant la température d'équilibre du fil:

$$U = (1/B^2) * ([RI^2 / (T_{eq} - T_0)] - A)^2$$

7. Limites de la méthode

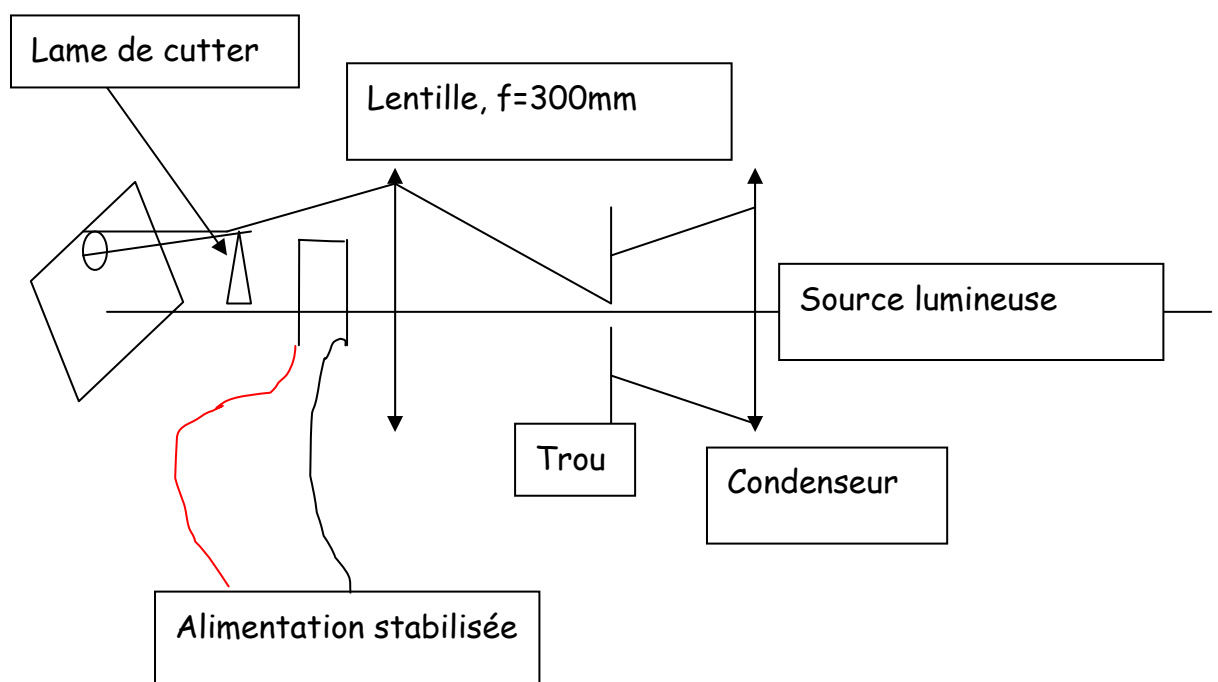
La loi de King n'est valable que pour les écoulements laminaires autour de fils cylindriques. Le fil que nous avons utilisé jusqu'à présent était entortillé (voir la couverture); Suite aux recommandations du jury nous en avons extrait un fil droit ($L=33\text{ mm}$, $R=0.6\Omega$) et nous avons voulu voir si l'écoulement de l'air autour du fil était laminaire ou turbulent. Les valeurs du nombre de Reynolds $Re=Ud/v_a$ de notre géométrie se situent entre 30 et 173 mais il est difficile à ce stade de conclure. Il nous fallait visualiser l'écoulement...

Après avoir consulté par téléphone des spécialistes de mécanique des fluides notre professeur nous a conseillé de mettre en oeuvre une méthode de visualisation optique appelée strioscopie schlieren.

La strioscopie est une technique de visualisation optique reposant sur la déviation d'un faisceau lumineux en présence d'un gradient de densité dans le champ observé.

Explications : Le fil chauffé modifie la densité de l'air (l'air chaud est moins dense que l'air ambiant) et la modification de la densité de l'air modifie à son tour l'indice de réfraction de l'air (Loi de Gladstone). Les rayons lumineux s'incurvent. Une lame de cutter placée à l'endroit où se forme l'image du fil permet d'intercepter une partie du faisceau et de faire ressortir les rayons perturbés par la variation d'indice.

Montage :



Résultats



A basse vitesse on peut voir que les lignes d'écoulement de l'air sont à peu près droites et parallèles entre elles mais à grande vitesse ce n'est plus le cas. Il y a eu une transition laminaire-turbulent.

La formule permettant de calculer la vitesse n'est plus valable : il faudra procéder à un nouvel ajustement selon une autre loi empirique.

Conclusion :

La méthode employée donne de bons résultats pour les faibles vitesses et est indépendante du fil pourvu que sa longueur soit grande devant son diamètre et que sa résistance ne varie pas pendant la durée de l'expérience. Nous envisageons de faire des essais en plein air.

Ce projet nous a conduit à travers trois grands domaines de la physique : la Thermique, la mécanique des fluides et l'optique. En nous intéressant à un simple fil nous avons donc appris beaucoup de Physique ;

Celle-ci était réellement *au bout du fil*.

Références

1. Méthodes expérimentales en mécanique des fluides, F.Moissy, Université Paris Sud Orsay, 2004 <http://www.fast.u-psud.fr/~moisy/teaching/memf.pdf>
2. <http://fr.wikipedia.org/wiki/An%C3%A9mom%C3%A8tre>
3. http://www.aerospacelab-journal.org/sites/www.aerospacelab-journal.org/files/AL1-09_1.pdf
4. <http://www.mines-ales.fr/~cmgd/ILOA/ILOA.html#Eschli>