DOSSIER TECHNIQUE

VÉLOCIMÈTRE LASER DOPPLER

Comporte les documents suivants :

- L'effet Doppler – Vélocimétrie Doppler : page 2
- Vld.htm (http://www-rocq.inria.fr/who/Marc.Thiriet/Glosr/Meca/Flu/VLD.html) : page 3 et page 4
- Vélocimètre ISL : cadre 3
- Schéma structurel carte électronique : cadre 4
- Typons : cadre 5 et cadre 6
- Schéma d'implantation carte électronique : cadre 7
- Brochage du câble de liaison série : cadre 8
- Vitesse de rotation moteur : cadre 9
- Mesure de fréquences Doppler (acquisition bouffées) : cadre 10

VÉLOCIMÉTRIE LASER À EFFET DOPPLER

1. L'effet Doppler

L'effet Doppler modifie la fréquence de la lumière reçue ou émise par tout objet en mouvement. La fréquence diffusée est alors légèrement différente de la fréquence incidente. Il est impossible de mesurer directement la fréquence diffusée, on est conduit à utiliser une technique d'hétérodynage (ou de battement de deux fréquences).

C'est cette fréquence de battement qui est la fréquence Doppler.

Dans la situation représentée *cadre 1*, les particules traversent les deux faisceaux, dans le plan de la figure, perpendiculairement à z'z. Les deux faisceaux dont les directions font les angles β et $-\beta$ avec la direction du mouvement, seront vus par une particule en mouvement avec des fréquences modifiées. Ainsi la fréquence du faisceau 1 reçu par la cible est : $\frac{c - v_1}{\lambda}$ un peu inférieure à c/λ de la lumière incidente. Elle est de $\frac{c + v_2}{\lambda}$ pour celle venant du faisceau 2 (ici on a $v_1 = v_2 = v\cos\beta$).

Ces deux radiations, sont ensuite diffusées par les particules (*cadre 2*).

Reçus par un récepteur, placé sur l'axe z'z, les signaux combinés créeront un battement. La fréquence de battement, ou fréquence Doppler, est proportionnelle à la vitesse des particules diffusantes :

$$\nu = \frac{2v\cos\beta}{\lambda}$$

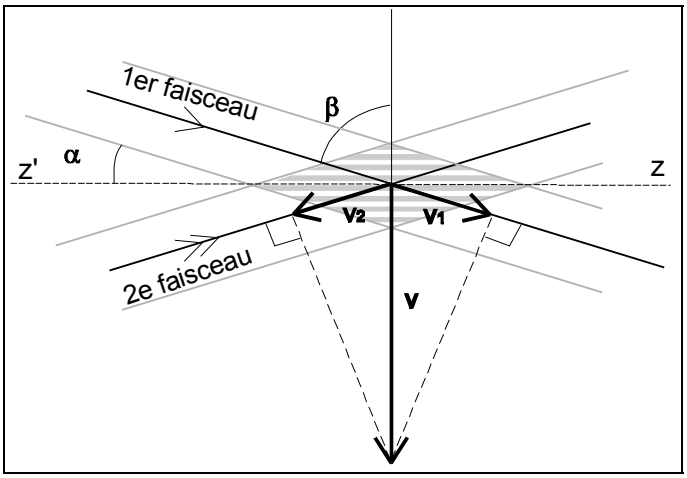
En pratique, on peut considérer que les faisceaux concourants dans le volume de mesure interfèrent et forment un réseau de franges planes et parallèles d'interfrange :

$$i = \frac{\lambda}{2\sin\alpha} = \frac{\lambda}{2\cos\beta}$$

Quand une particule diffusante de vitesse $\vec{v}$ parcourt le volume de mesure le nombre de franges traversées par seconde est sa fréquence de diffusion :

$$\frac{v}{i} = \frac{2v\cos\beta}{\lambda} = \nu$$

Elle est assimilable à la fréquence Doppler.



cadre 1 : Schéma de principe.

2. Vélocimétrie Doppler

Cette technique repose sur l'exploitation de l'effet Doppler. Elle mesure le décalage en fréquence de la lumière émise par une particule entraînée par un solide ou un fluide, éclairée par une lumière monochromatique afin de déterminer la vitesse du solide ou du fluide.

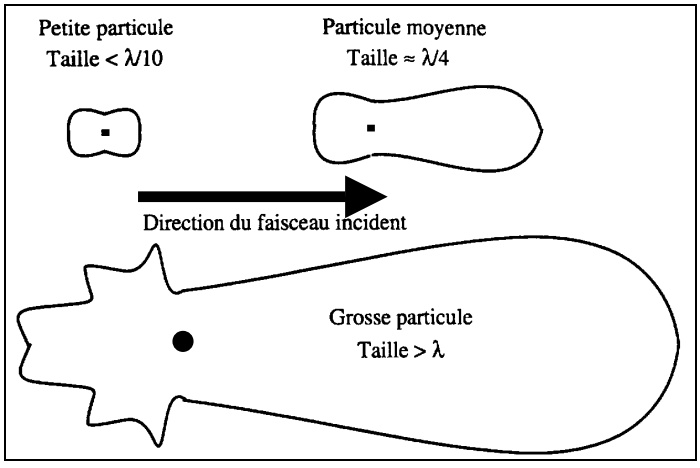
Elle n'a pu se développer que depuis l'apparition du laser principalement dans la détermination des vitesses d'écoulement de fluides.

Le laser permet en effet :

- la cohérence temporelle nécessaire pour détecter des variations relatives de fréquences optiques faibles et pour l'obtention d'un réseau de franges;
- d'obtenir une forte énergie lumineuse dans un très petit volume permettant ainsi d'effectuer des mesures ponctuelles et de recueillir la lumière diffusée par les particules microscopiques supposées suivre parfaitement l'écoulement ou le mouvement;
- de ne pas perturber l'écoulement par l'apport d'une sonde matérielle (méthode sans contact).

La détection de la fréquence Doppler peut s'effectuer par deux méthodes:

- la méthode du faisceau de référence délicate à mettre en œuvre;
- la méthode des franges (ou différentielle). C'est cette méthode qui est adoptée dans ce TP.



cadre 2 : Diagramme de diffusion des particules.

Vld.htm

La vélocimétrie laser-Doppler (VLD) est une technique de mesure optique non-invasive. Contrairement aux méthodes de mesure par film chaud, elle ne perturbe pas l'écoulement.

La gamme de vitesse qui peut être mesurée par cette technique est très large, en règle de 0,1mm/s à 100 m/s pour la gamme de faibles valeurs, de 0,1 m/s à 10 km/s pour la gamme des valeurs élevées de la vitesse.

La précision dans le temps et l'espace est bonne. Les fluctuations de vitesse peuvent en effet être mesurées. Cette technique est donc adaptée aux écoulements instationnaires et instables. Un très grand nombre de points de mesure peut être obtenu selon la direction longitudinale et dans la section droite, à condition que la taille de cette section soit suffisante. En effet, le volume de mesure de la vitesse n'est pas négligeable, en particulier dans la direction normale au vecteur vitesse et contenue dans le plan des faisceaux lumineux. Cette taille dépend des propriétés du dispositif optique de mesure. Le plus souvent, le volume ellipsoïdal de mesure a pour dimensions 90 µm X 90 µm X 900 µm. Un des inconvénients de cette méthode est son coût. Pour cette raison, les composantes de la vitesse sont successivement mesurées bien qu'elles puissent l'être simultanément, à l'aide d'un appareillage adapté.

type de faisceau laser (puissance, longueur d'onde (λ))	pour laser He-Ne $5\,mW,\ 632,8\,nm$
écart initial entre les faisceaux (mm)	$s \sim 20-50$
distance focale de la lentille convergente (mm)	$f \sim 10-50$
intensité lumineuse sur l'axe du faisceau (profil d'intensité gaussien)	I_{max}
diamètre du faisceau (mm) diamètre au foyer (mm)	$D_{e^{-1}} \leftrightarrow I_{max}/e,\ D_{e^{-2}} \leftrightarrow I_{max}/e^2$ $\sim 1,1\,mm$ $d_{e^{-2}} = \dfrac{4f\lambda}{\pi D_{e^{-2}}}$
angle d'intersection des faisceaux	$\theta = \theta(n)$
distance interfrange	$d_f = \lambda/(2\sin(\theta/2))$
nombre de franges	$N_f \sim (10/\pi) f_D \tan(\theta/2)/D_{e^{-1}}$
fréquence Doppler	$f_D = f_{dif} - f_{inc} = u/d_f = 2u\sin(\theta/2)/\lambda$
taille effective du volume ellipsoïdal de mesure (région où l'amplitude du signal Doppler $> 1/e^2$ de l'intensité maximum)	
longueur de l'axe transversal de l'ellipsoïde (μm) longueur de l'axe normal au plan des faisceaux longueur de l'axe longitudinal (selon la direction de la vitesse)	$a = d_{e^{-2}}/\sin(\theta/2)$ $b = d_{e^{-2}}$ $c = d_{e^{-2}}/\cos(\theta/2)$
nombre de franges	$N_f = c/d_f$
distance focale de la lentille réceptrice	
diamètre de l'orifice du photomultiplicateur	$\sim 0,2\,mm$
facteur de calibration ($m.s^{-1}.MHz^{-1}$)	$\lambda/2\sin(\theta/2)$

La méthode consiste à mesurer la fréquence de la lumière diffusée par les petites particules en suspension dans le fluide en écoulement. Le volume de mesure est défini par la région d'interférence de deux ondes lumineuses incidentes, formées à partir d'un faisceau laser. Après passage dans un séparateur de faisceaux, les ondes sont parallèles et coplanaires. L'une d'elle subit un décalage en fréquence dans une cellule de Bragg afin de pouvoir suivre les variations en module et en sens de la vitesse. Les faisceaux interfèrent ensuite en une position donnée par la distance focale de la lentille convergente du dispositif émetteur.

Les caractéristiques de la lentille sont sélectionnées selon (1) la taille de la conduite-test, (2) la gamme de vitesses à mesurer et (3) la réponse en fréquence de l'unité de traitement du signal, en sachant que la taille du volume de mesure augmente avec la distance focale.

L'onde incidente est une onde monochromatique, plane, polarisée linéairement selon le vecteur unitaire $\hat{p}_{inc}$, de longueur d'onde λ_{inc}, de pulsation ω_{inc}, de vecteur d'onde $\underline{k}$ $(2\pi/\lambda_{inc})$, de champ électrique $\mathbf{E}_{inc}$ et de champ magnétique $\mathbf{B}$, perpendiculaire au premier. Pour une onde plane, la relation entre $\mathbf{B}$ et $\mathbf{E}$ est simple et seul $\mathbf{E}$ est retenu dans le traitement de l'onde.

Lorsque deux ondes lumineuses interférent, l'intensité résultante est :

$$I = (\underline{E}_1 + \underline{E}_2) \cdot (\underline{E}_1^* + \underline{E}_2^*) = 2I_{inc}\Big(1 + \cos[4\pi x_1 \sin(\theta/2)/\lambda]\hat{p}_1 \cdot \hat{p}_2\Big),$$

où θ est l'angle d'intersection des deux faisceaux, x_1 est la direction de la composante de la vitesse locale mesurée, x_2 la direction donnée par la bissectrice de l'angle θ. L'intensité I est maximale, formant des franges d'interférence, lorsque $x \sin(\theta/2)/\lambda = 1/2$. L'écart entre les franges d_f est donc égal à $\lambda/(2sin(\theta/2))$. Cette distance dépend de l'angle d'intersection des faisceaux et donc des indices de réfraction du fluide et de la paroi. Le nombre de franges d'interférence dépend de la distance initiale entre les deux faisceaux incidents.

La particule éclairée par l'onde monochromatique diffuse de la lumière dans toutes les directions, avec une intensité variable selon la direction. La fréquence de l'onde diffusée est décalée par rapport à celle de l'onde incidente par un facteur f_D qui résulte de l'effet Doppler : $f_{dif} = f_{inc} + f_D$. La fréquence Doppler est donnée par le rapport entre la vitesse et l'écart entre les franges d'interférence : $f_D = u/d_f$. La lentille du système de réception de l'information fait converger la lumière diffusée vers l'orifice d'un photomultiplicateur. Le signal recueilli par ce dernier est ensuite transmis à une unité de traitement qui fournit une tension proportionnelle à la vitesse de la particule.

Erreurs de mesure

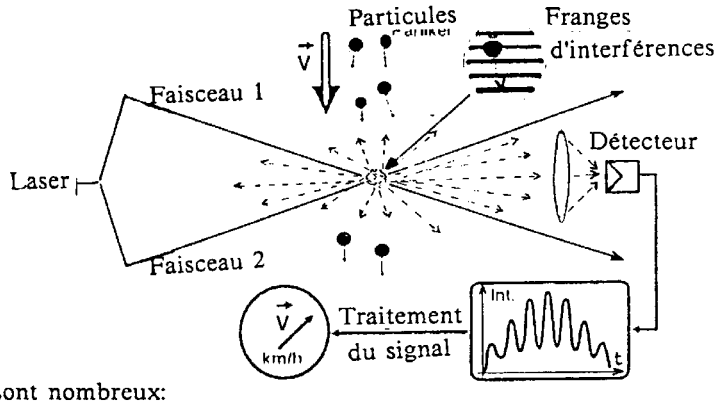
La position du volume d'exploration n'est connue qu'avec une certaine erreur. Elle correspond à l'erreur de la mesure de la distance parcourue par le faisceau optique entre la sortie du système d'optique d'émission et la paroi externe du tronçon de conduit test, le calcul de la position du volume de mesure faisant appel à cette quantité.

Les fluctuations de la vitesse dues au banc hydraulique et le bruit induit par l'unité de traitement du signal introduisent une erreur supplémentaire. En raison de la durée extrêmement prolongée des expériences, les conditions de similitude ne seront remplies que si le liquide est maintenu à température constante.

Il faut rappeler que la mesure est pratiquée dans un volume dont la taille, qui dépend des caractéristiques du dispositif d'émission n'est pas négligeable. En particulier la dimension transversale est telle qu'un profil de vitesse ne peut être obtenu qu'avec un certain degré d'imprécision.

ANEMOMETRIE LASER DOPPLER

Le principe de l'anémométrie Laser Doppler pour la mesure de la vitesse d'un écoulement est bien connu:
La lumière diffusée par des particules infinitésimales (qq μm) en mouvement franchissant une zone d'interférences est analysée pour déterminer la vitesse des particules, et donc du support qui les transporte.



Les avantages sont nombreux:

- Absence de capteur dans l'écoulement: utilisable en milieux chauds, corrosifs.
- Utilisable pour les liquides, les gaz, les surfaces en mouvement.
- Grande directivité
- Grande précision (de l'ordre du 1/1000è)
- Large domaine de mesure (du mm/s au supersonique)
- Mesure directe.

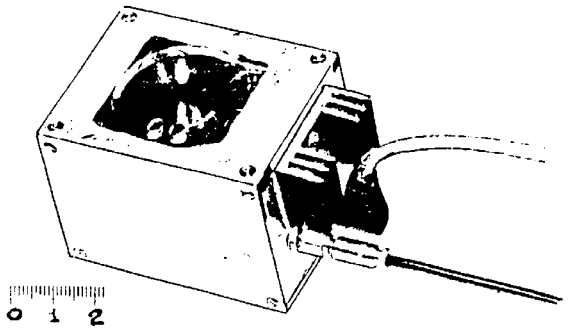
L'utilisation industrielle d'une installation classique de LDA est freinée par la mise en oeuvre relativement délicate des appareils.

ANEMOMETRE LASER DOPPLER MINIATURISE DE L'ISL

Il s'agit d'un anémomètre conçu pour une mise en oeuvre simplifiée.
L'utilisation de diodes laser et d'un détecteur semi-conducteur ont permis de réaliser la tête de mesure compacte ci-dessous comprenant l'émetteur, le récepteur et le prétraitement du signal.

Caractéristiques de ce montage:

- Tension : 12 V
- Puissance : 3 W
- Diode laser : 45 mW à 830 nm
- Distance de mesure : env 10 cm
- Interfranges : 15 μm
- Nombre de franges : 10
- Gamme de vitesses : de 5 m/s à 500 m/s
- Dimensions : env 5 X 5 X 5 cm^3



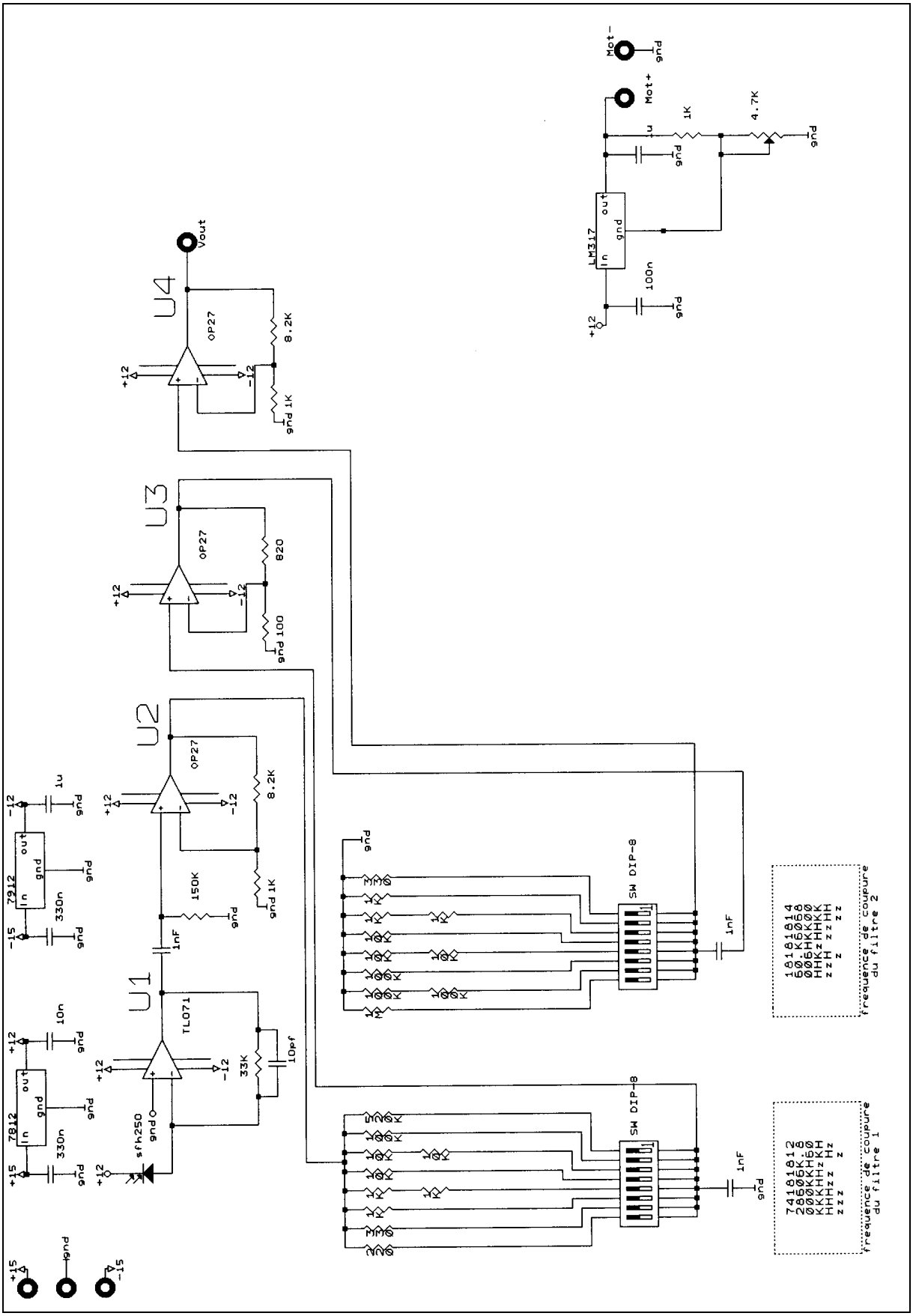
Le développement de ce module, intégrant un traitement du signal miniaturisé, introduit le concept de capteur intelligent.
Une chaîne de mesure également miniaturisée prenant en compte les avantages du capteur intelligent et utilisant des méthodes nouvelles de calcul a également été mise au point.

Institut Franco-Allemand de recherches de Saint-Louis
BP34
F-68301 SAINT-LOUIS CEDEX

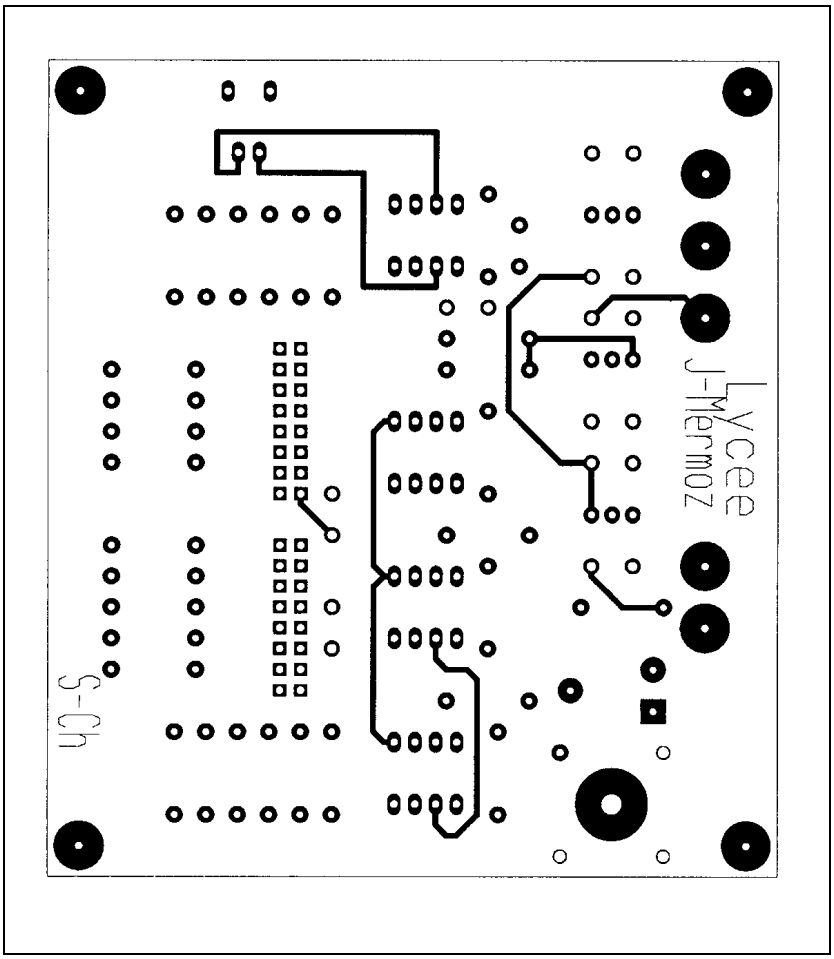
Contact pour le système ci-dessus:
M. DAMP
Tél: 89 69 51 66

ISL **Octobre 1993**

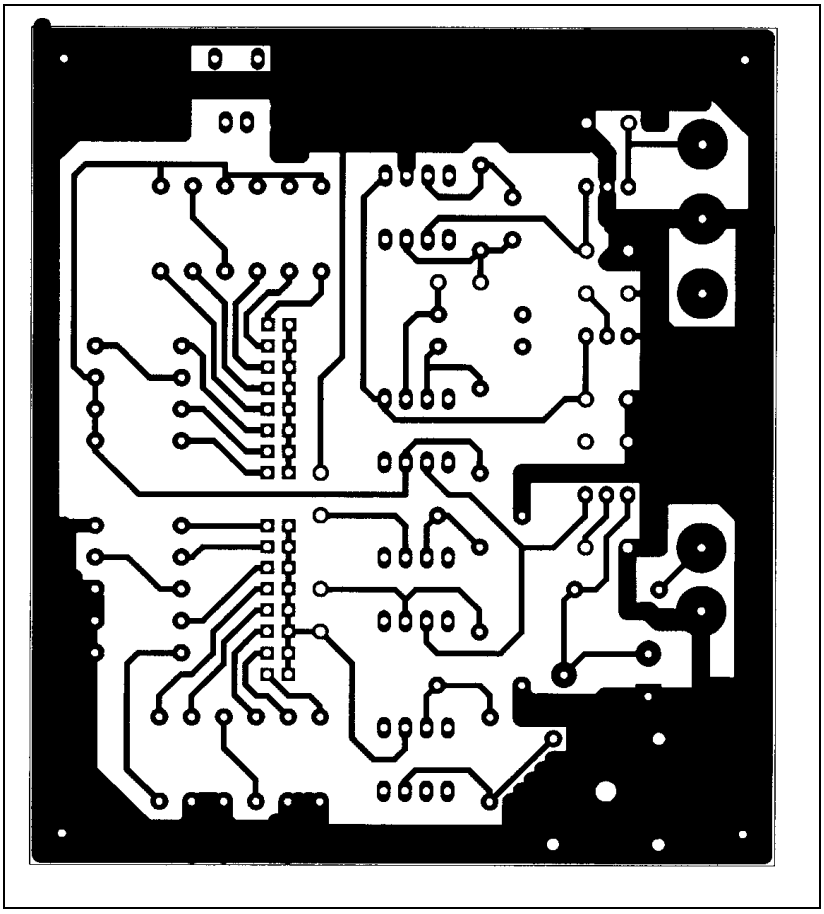
cadre 3 : Vélocimètre ISL.



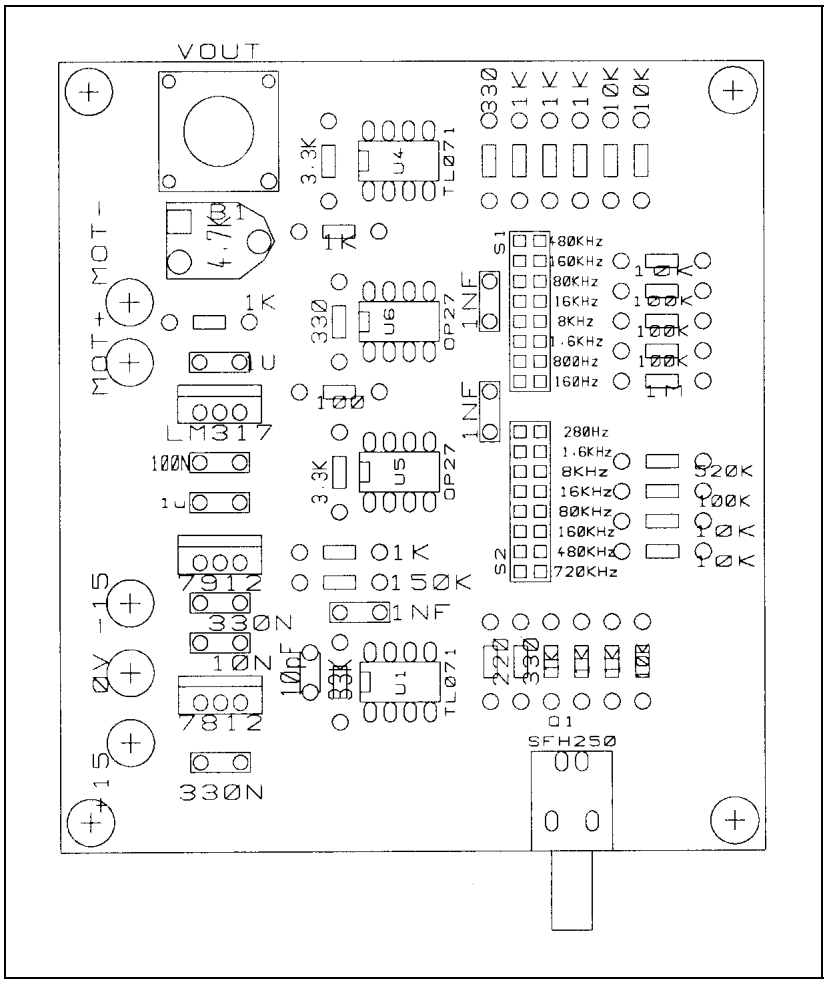
cadre 4 : Schéma structurel de la carte électronique.



cadre 5 : Typon côté composants.



cadre 6 : Typon côté cuivre.



cadre 7 : Schéma d'implantation de la carte électronique.

8 --- 4 4 --- 8 1 --- 7 7 --- 1 2 --- 3 3 --- 2	De chaque côté : faire un pont entre 1 et 6.

cadre 8 : Brochage du câble de liaison série oscilloscope - PC (en 9 broches).

Vitesse de rotation moteur : N = 0,45 tour.s^{-1}.

cadre 9.

- Ouvrir le logiciel *Tektro* permettant de faire l'acquisition du signal par le micro-ordinateur.
- Par Oscilloscope/Acquisition, acquérir et tracer le graphe U = f(t). Evaluer la durée Δt de la bouffée (cliquer sur le bouton gauche de la souris).
- Sous Analyse/Vélocimétrie, tracer le graphe FFT = f(Fréq.). Faire Options/Zoom, encadrant le pic gauche à l'aide d'un rectangle à la souris.
- Repérer et noter la fréquence ν (FFT) du maximum.
- Sauvegarder le graphe sous *velo.tek*.
- Sous Analyse/Vélocimétrie, cliquer sur le bouton Vélocimétrie. Cette commande permet le calcul de la vitesse v des particules ainsi que de la longueur ΔL de la bouffée.

cadre 10 : Procédure d'acquisition des bouffées.