

Vélocimétrie laser à effet Doppler

par Laurence PONCET
Lycée A. de Tocqueville - 50100 Cherbourg

1. PRINCIPE

La vélocimétrie laser à effet Doppler est basée sur le décalage de la fréquence de la lumière diffusée par toute particule en mouvement éclairée par un faisceau de lumière monochromatique et cohérente. Le décalage de fréquence, induit par l'effet Doppler, est proportionnel à la vitesse de la particule et dépend de la direction de réception. Ce décalage étant très faible, il n'est pas mesurable directement. On utilise les battements de deux fréquences.

Une photodiode, capteur sensible à l'intensité lumineuse, donc à l'amplitude de l'onde lumineuse, reçoit à la fois la lumière émise par le laser et celle émise par une particule diffusante.

L'intensité de la lumière reçue par le capteur, varie avec une fréquence égale à la différence des fréquences des deux ondes lumineuses reçues et par conséquent proportionnelle à la vitesse.

Après une conversion courant-tension et une amplification, le signal est observé sur un oscilloscope à mémoire.

2. DISPOSITIFS EXPÉRIMENTAUX

Milieux transparent

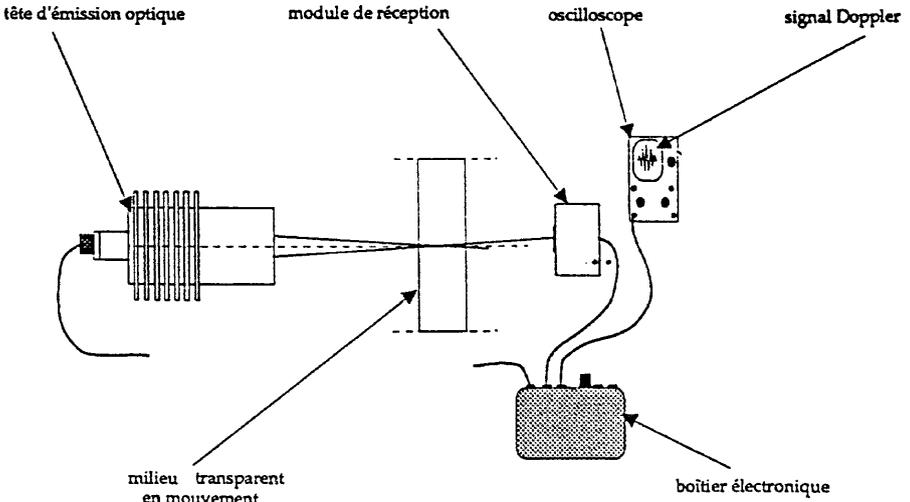


Figure 1

Milieux opaque

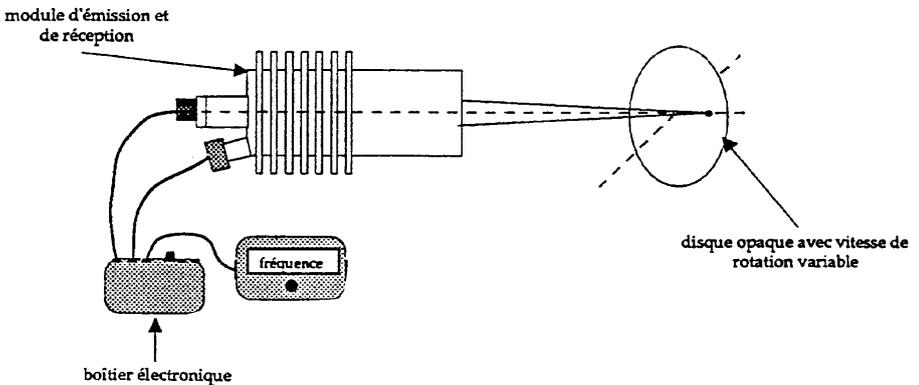


Figure 2

3. RELATION ENTRE VITESSE ET FRÉQUENCE DU SIGNAL

3.1. Cas d'un milieu transparent

La relation entre vitesse et fréquence du signal peut être simplement établie en considérant les phénomènes d'interférences.

L'intersection de deux faisceaux provenant de la même source de lumière cohérente et monochromatique, crée un réseau de franges d'interférence.

Toute particule traversant les franges n'est que périodiquement éclairée, elle va donc diffuser la lumière de façon périodique. La fréquence de diffusion est directement proportionnelle à la vitesse de la particule. Le coefficient de proportionnalité dépendant de :

- la géométrie des faisceaux,
- la longueur d'onde de la source laser.

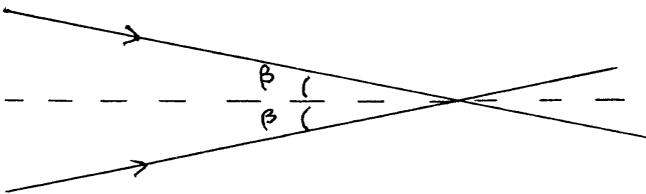


Figure 3 : Interfrange $i = \lambda/2 \sin \beta$ $\lambda = 675.10^{-9}$ m.

Fréquence du signal $f = v/i$ (v = composante de la vitesse de la particule sur un axe perpendiculaire à l'axe du laser).

On a alors la relation $v = f \lambda/2 \sin \beta$.

3.2. Cas d'un milieu opaque

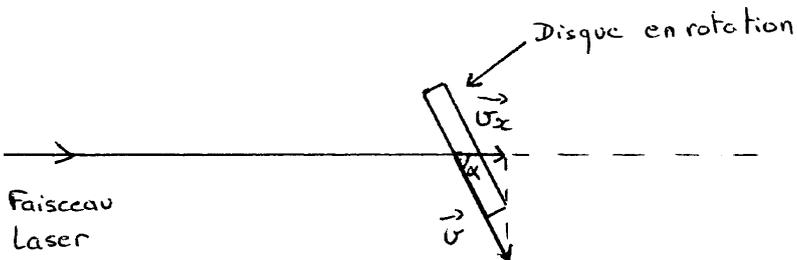


Figure 4

La différence de fréquence entre la lumière émise par le laser et celle émise par l'objet diffusant en rotation est donnée par la relation.

$$\Delta F = 2v_x/\lambda$$

$$v_x = v \cos \alpha$$

La lumière diffusée par le solide en rotation est en partie renvoyée dans la cavité du laser lui-même et module la lumière émise par le laser à une fréquence f égale à la différence de fréquence ΔF .

La lumière ainsi modulée se réfléchit sur la lentille (une lame de verre à face parallèle est superposée à la lentille de façon à augmenter la quantité de lumière réfléchie).

La vitesse au point de convergence du faisceau laser est donnée par la relation :

$$v = f \cdot \lambda/2 \cos \alpha$$

4. EXEMPLES DE MANIPULATIONS

4.1. Mouvement d'un solide - Mesure de la vitesse de rotation

4.1.1. Mouvement de rotation d'un disque transparent

Réaliser deux faisceaux laser grâce à la séparatrice.

Placer le module récepteur de façon qu'un des faisceaux pénètre dans la fenêtre du module.

Placer le disque perpendiculairement à l'axe des faisceaux.

Faire converger les deux faisceaux en un point du disque. Le disque est bien positionné lorsque l'on obtient des signaux d'amplitude de l'ordre de deux volts. Si le signal est de mauvaise qualité régler l'alignement de l'émetteur et du récepteur.

But de la manipulation

Vérifier la proportionnalité entre vitesse de rotation et fréquence du signal.

La vitesse de rotation est déterminée en mesurant le temps mis pour effectuer un nombre de tours donné.

Résultats obtenus (voir annexe 1, tableau 1)

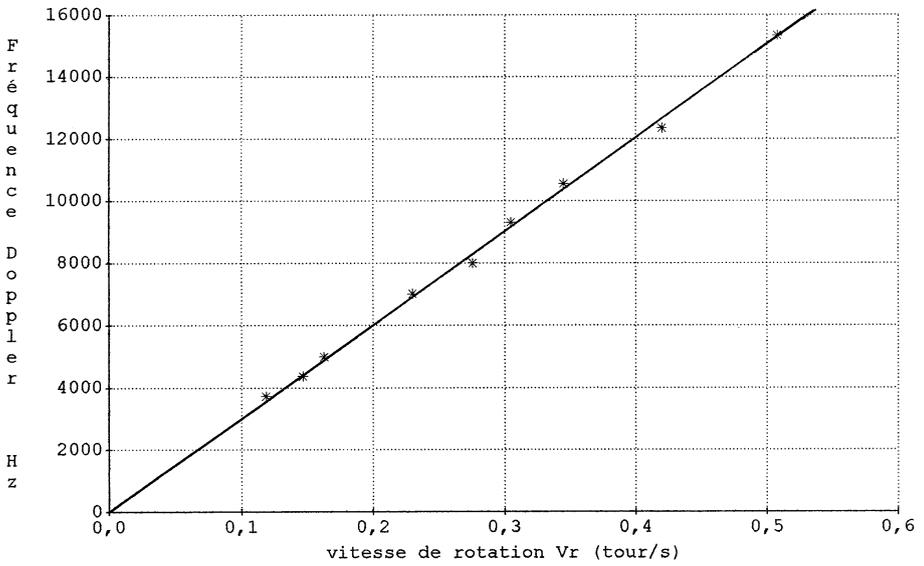


Figure 5

On a la relation $f = K \cdot V_r$ (V_r : vitesse de rotation du disque).

Avec $K = 30,1 \cdot 10^3$.

Détermination de la valeur de K théorique

Le point de convergence des faisceaux se trouve à 3,3 cm du centre du disque : $R = 3,3$ cm.

Mesure de l'angle β (les angles étant petits on peut écrire $\beta = \sin \beta = \tan \beta$).

Placer un banc d'optique dans l'axe du laser, sur lequel est fixé un écran blanc.

Déterminer la position du point de convergence des faisceaux laser $X = 0$.

Déplacer l'écran de quelques dizaines de centimètre. Repérer la position de l'écran : X. Mesurer la distance entre les centres des deux taches lumineuses observées : a.

Résultats obtenus :

$$X = 30 \text{ cm}$$

$$a = 2,9 \text{ cm}$$

$$\sin \beta = 0,048$$

D'après la théorie on a :

$$v = f \lambda / 2 \sin \beta \quad \text{avec} \quad v = 2 \pi R V r$$

doù
$$f = (4 \pi R \sin \beta / \lambda) V r$$

Avec
$$4 \pi R \sin \beta / \lambda = 29,5 \cdot 10^3$$

Soit une précision de l'ordre de 2 % pour la mesure.

4.1.2. Mouvement de rotation d'un disque opaque

Placer la lame de verre à faces parallèles contre la face plane de la lentille.

Retirer la séparatrice.

Faire converger le faisceau laser sur la surface du disque opaque. L'axe de rotation du disque ne doit pas être parallèle à l'axe du faisceau laser. En effet dans ce cas la composante axiale de la vitesse v_x est nulle.

Le signal observé sur l'écran de l'oscilloscope est continu.

Dans ce cas les fréquences mesurées sont de l'ordre de plusieurs dizaines de kHz. La vitesse de rotation du disque ne doit pas être trop élevée, car il devient impossible de mesurer la fréquence avec une oscilloscope courant.

Remarque : La fréquence du signal peut être mesurée à l'aide d'un fréquencemètre.

But de la manipulation

Vérifier la proportionnalité entre vitesse de rotation et fréquence du signal.

Résultats (voir tableau 2, Annexe 1)

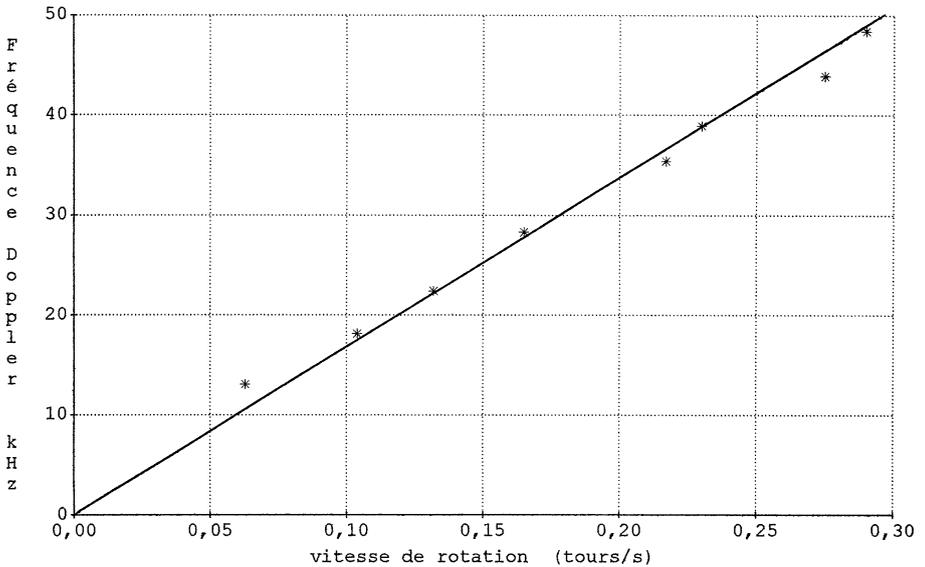


Figure 6

4.2. Application à la mécanique des fluides

4.2.1. Utilisation en débitmètre

But

Vérifier la proportionnalité entre la fréquence du signal Doppler et le débit à l'intérieur d'un tube transparent dans lequel circule un liquide transparent.

Réaliser deux faisceaux laser grâce à la séparatrice.

Déplacer l'ensemble (bloc d'émission + module de réception) de façon que le point de convergence des deux faisceaux laser se trouve à peu près sur l'axe du tube où circule l'eau.

L'amplitude des signaux observés doit être d'au moins un volt.

Régler le débit (sélecteur de débit sur la pompe).

Le débit est mesuré par dépotage. On mesure le temps nécessaire à l'écoulement de 600 ml, en prenant soin d'ajouter de l'eau dans le réservoir pour que la pompe ne se désamorçe pas. Au cours de cette opération, vérifier que le débit reste constant. En effet, il varie beaucoup en fonction de la hauteur du tuyau de sortie de l'eau.

Pour chaque valeur du débit (quatre valeurs différentes possibles) effectuer une dizaine de mesures. On prendra soin de placer le tuyau de sortie de l'eau à la même hauteur que pendant la mesure du débit par dépotage et de conserver un niveau d'eau constant dans le réservoir.

Sélecteur de débit	Temps d'écoulement (s)	Débit (ml/s)	Fréquence moyenne (Hz)
1	32,3	18,6	6370
2	25,0	24,0	7626
3	22,4	26,8	9076
5	19,5	30,8	10165

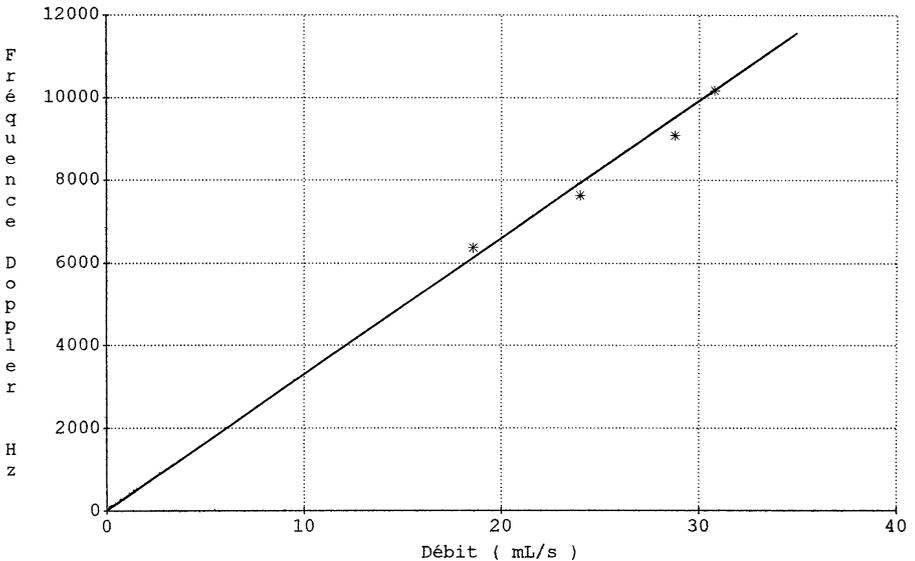


Figure 7

Remarque : Il existe des débitmètres basés sur l'effet Doppler utilisant des ultrasons, ils sont particulièrement utilisés pour les liquides comportant de grosses particules en suspension. Le vélocimètre utilisant des ondes lumineuses fonctionne avec des liquides ou des gaz transparents très peu chargés en particules diffusantes.

4.2.2. Profils de vitesses

a - Expérience

Positionner le sélecteur de débit sur la position 5.

Après un réglage initial identique à l'étude précédente, déplacer l'ensemble (bloc d'émission + module de réception) jusqu'à une position à partir de laquelle on n'observe plus de signal Doppler.

Faire dix mesures (minimum) de la fréquence du signal.

Déplacer le dispositif de 2 mm en 2 mm. A chaque position effectuer dix mesures de fréquences.

Résultats obtenus - voir tableau 3 (mélange eau + sucre de canne 50 % en volume) - voir tableau 4 (eau).

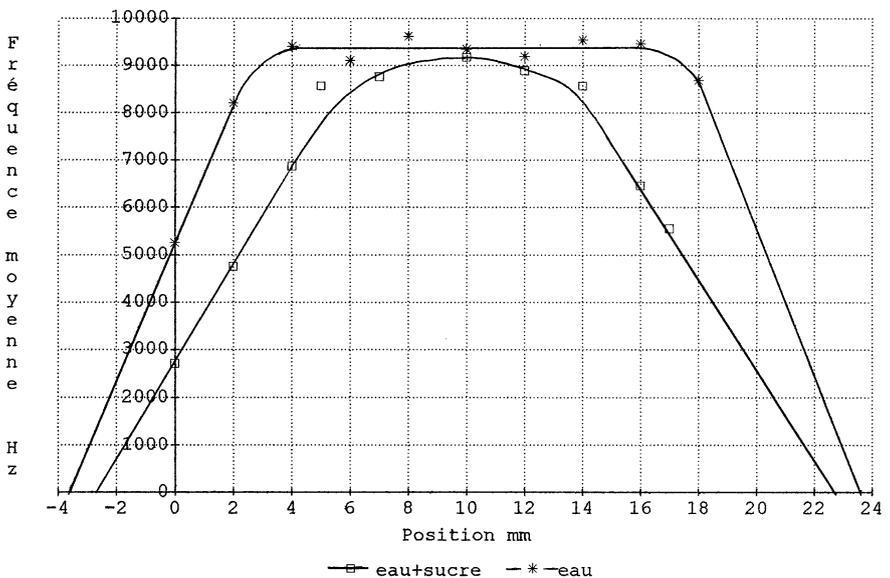


Figure 8

b - Exploitation des mesures

Longueur d'onde du laser = $675 \cdot 10^{-9}$ m.

Calcul du débit à partir du profil des vitesses

Au cours d'un écoulement permanent d'un fluide on a la relation :

$$Q = S V_{\text{moy}}$$

Avec : Q - Débit volumique,

S - Section du tube,

V_{moy} - Vitesse moyenne sur la section du tube.

On a établi en 3.1. la relation entre vitesse et fréquence du signal Doppler :

$$V = f \lambda / 2 \sin \beta$$

On peut donc écrire que :

$$V_{\text{moy}} = f_{\text{moy}} \lambda / 2 \sin \beta$$

Avec : f_{moy} - Fréquence moyenne du signal Doppler sur la section du tube.

Donc :
$$Q = S \cdot f_{\text{moy}} \lambda / 2 \sin \beta$$

A l'aide du profil des vitesses tracé pour l'eau précédemment on peut calculer f_{moy} .

$$f_{\text{moy}} = 7384 \text{ Hz} \quad f_{\text{moy}} = \int f \cdot dx / \int dx$$

Calcul de S

La vitesse des particules est nulle au niveau des parois du tube.

L'observation du profil des vitesses nous permet de déterminer le diamètre du tube, soit :

$$d = 27 \text{ mm}$$

(pour un diamètre réel de 28 mm)

$$S = \pi d^2 / 4$$

Mesure de l'angle β

Placer un banc d'optique dans l'axe du laser, sur lequel est fixé un écran blanc.

Déterminer la position du point de convergence des faisceaux laser $X = 0$.

Déplacer l'écran de quelques dizaines de centimètre. Repérer la position de l'écran : X. Mesurer la distance entre les centres des deux taches lumineuses observées : a.

Résultats : $X = 44,0 \text{ cm}$

$a = 3,9 \text{ cm}$

Soit : $\sin \beta = 0,0443$

Calcul du débit Q

$$Q = 3,2 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$$

La valeur mesurée par dépotage est de $3,1 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$.

Type d'écoulement

Calcul du nombre de Reynolds :

$$Re = V_{\text{moy}} d / \nu$$

Eau : $V_{\text{moy}} = f_{\text{moy}} \lambda / 2 \sin \beta$

$$d = 27 \text{ mm}$$

$$\nu = 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s} \quad \text{à } 20^\circ\text{C}$$

Soit

$$Re = 1,5 \cdot 10^3$$

Mélange eau + sucre de canne (50 % en volume) :

$$V_{\text{moy}} = f_{\text{moy}} \lambda / 2 \sin \beta$$

$$f_{\text{moy}} = 5615 \text{ Hz}$$

$$\nu = \mu / \rho$$

$$\mu = 5,48 \cdot 10^{-3} \text{ Pa}\cdot\text{s}$$

(mesuré avec un viscosimètre à capillaire type Baumé)

$$\rho = 1150 \text{ kg/m}^3$$

(mesuré à l'aide d'un densimètre).

Soit :

$\text{Re} = 2,4 \cdot 10^2$

CONCLUSION

En observant le diagramme de Colebrook en annexe, on remarque que l'on se situe à la limite d'un écoulement laminaire dans le cas de l'eau, ce qui explique l'allure aplatie du profil des vitesses dans la partie centrale du tube. En ce qui concerne le mélange (sucre de canne + eau) l'écoulement est certainement laminaire, le profil des vitesses est parabolique.

ANNEXES

- 1 - Tableaux de mesures.
- 2 - Diagramme de Colebrook.
- 3 - Exemples de signaux observés sur l'écran de l'oscilloscope.

Le matériel utilisé est commercialisé par :

V.D.L. - 4-6, avenue Louis Lumière - 50100 CHERBOURG.

Annexe 1

Tableaux de mesures

Nombre de tours	2	3	4	4	5	6	8	10	10
Temps s	16,8	20,4	24,6	17,4	18,1	19,7	23,2	23,8	19,7
Vitesse de rotation tour/s	0,119	0,147	0,163	0,230	0,276	0,305	0,345	0,420	0,508
Fréquence n° 1 Hz	3921	4464	5102	7273	8000	9434	10204	12329	15385
Fréquence n° 2 Hz	3636	4167	5128	6897	8000	9375	10256	11765	15385
Fréquence n° 3 Hz	3636	4651	4839	6897	8511	8696	10412	12500	15789
Fréquence n° 4 Hz	3846	4348	5000	7500	7843	9434	10909	12821	15789
Fréquence n° 5 Hz	3658	3846	5000	6452	7895	9615	11111	12121	15094
Fréquence n° 6 Hz	3658	4717	4878	7018	7692	9259	10416	12500	14492
Fréquence moyenne Hz	3726	4366	4991	7006	7990	9302	10551	12339	15322

Tableau 1 : Mouvement de rotation d'un disque transparent.

Vitesse de rotation tour/s	0,063	0,132	0,217	0,275	0,104	0,165	0,230	0,290
Fréquence n° 1 Hz	12,9	23,2	35,3	43,3	18,0	28,3	38,8	48,2
Fréquence n° 2 Hz	12,4	21,9	35,5	43,5	18,5	28,2	39,1	48,8
Fréquence n° 3 Hz	13,5	22,6	35,7	44,1	17,9	28,4	39,4	49,0
Fréquence n° 4 Hz	13,6	22,2	34,9	43,8	18,1	28,3	38,8	48,1
Fréquence n° 5 Hz	12,3	22,8	35,2	44,6	17,9	27,9	38,6	48,5
Fréquence n° 6 Hz	13,0	21,7	35,5	44,2	18,0	28,4	38,4	47,9
Fréquence moyenne Hz	13,0	22,4	35,4	43,9	18,1	28,3	38,9	48,4

Tableau 2 : Mouvement de rotation d'un disque opaque.

Position mm	0	2	4	5	7	10	12	14	16	17	18
Fréquence n° 1 Hz	2459	5556	6250	7692	9091	9091	8824	8824	7317	4545	
Fréquence n° 2 Hz	2326	3922	6061	8065	8571	9091	8889	8000	6250	6000	
Fréquence n° 3 Hz	2174	4412	7813	9211	7692	9231	8889	8333	6349	4839	
Fréquence n° 4 Hz	2326	5263	8333	8000	9434	9231	9091	8000	6522	4651	
Fréquence n° 5 Hz	2222	4615	7576	8621	8889	9091	8571	8000	5769	6452	
Fréquence n° 6 Hz	2174	4918	6452	8824	8333	9524	8621	9091	5357	5085	
Fréquence n° 7 Hz	3409	2381	5882	9091	8511	9375	8696	8571	6667	6061	
Fréquence n° 8 Hz	4167	6061	7143	9091	9091	9091	9677	8621	6522	5970	
Fréquence n° 9 Hz	3191	5882	6944	8696	8571	8889	9091	8824	6667	6000	
Fréquence n° 10 Hz	2632	4478	6250	8333	9375	9091	8511	9375	7143	5882	
Fréquence moyenne Hz	2708	4749	6870	8562	8756	9170	8886	8564	6456	5548	

Tableau 3 : Mélange eau + sucre de canne 50 % en volume.

Position mm	0	2	4	6	8	10	12	14	16	17	18
Fréquence n° 1 Hz	5556	8163	8475	10526	9524	10256	10526	9524	10714		9375
Fréquence n° 2 Hz	5263	7407	7317	9091	10811	9091	9091	9677	8333		7692
Fréquence n° 3 Hz	5172	9302	8333	9756	7500	8108	10000	8824	12121		10000
Fréquence n° 4 Hz	4256	7547	10870	9756	9677	8824	8475	10000	9615		8824
Fréquence n° 5 Hz	6250	11111	10000	9756	10256	9302	9091	9375	8000		7407
Fréquence n° 6 Hz	3448	6818	9091	8333	10345	10811	9091	8571	9091		9091
Fréquence n° 7 Hz	5357	8333	10256	8333	10256	9677	10000	7895	9524		9677
Fréquence n° 8 Hz	4545	5769	10417	9524	9091	10256	7895	10169	8824		8696
Fréquence n° 9 Hz	5556	8333	10000	7895	9375	8929	8929	10811	9677		7407
Fréquence n° 10 Hz	7143	9259	9302	8065	9302	8197	8772	10526	8696		
Fréquence moyenne Hz	5255	8204	9406	9104	9614	9345	9187	9537	9460		8686

Tableau 4 : Eau.

Annexe 2

Diagramme de Colebrook

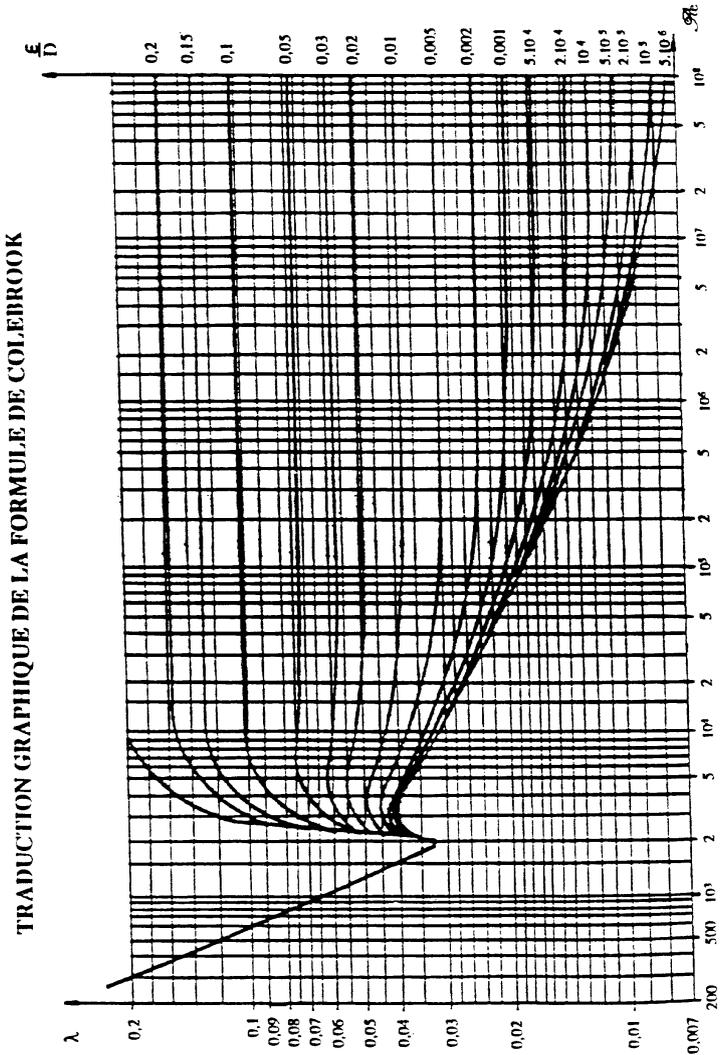


Figure 9 : Traduction graphique de la formule de Colebrook.

Annexe 3

Exemples de signaux observés sur l'écran de l'oscilloscope

