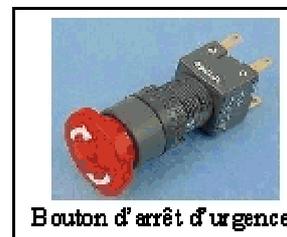


Projet de Physique P6-3
STPI/P6-3/2009 – 20

LES CAPTEURS



Etudiants :

Jérémie MARTINEZ

Camille RENVOISÉ

Marie SWIATEK

Amira TAKHTOUKH

Enseignant-responsable du projet :

François GUILLOTIN

Date de remise du rapport : **20/06/09**

Référence du projet : **STPI/P6-3/2009 – 20**

Intitulé du projet : **Les capteurs température, humidité, débit, pression, position...**

Type de projet : **expérimental, bibliographique**

Objectifs du projet (10 lignes maxi) :

Réaliser un tour d'horizon des capteurs.

Mesurer un niveau d'eau dans une cuve opaque à l'aide de différents capteurs.

Table des matières

1. Introduction.....	5
2. Méthodologie / Organisation du travail	5
3. Travail réalisé et résultats.....	6
3.1. Tour d’horizon des capteurs.....	6
Potentiomètres mécaniques - rotatifs et linéaires	9
3.2. Différentes méthodes de mesure de niveau de liquide.....	17
3.2.1. Capteur de niveau capacitif	17
3.2.2. Capteur de pression.....	22
3.2.3. Capteur à ultrason	26
3.2.4. Flotteur.....	28
4. Conclusions et perspectives.....	31
5. Bibliographie.....	32

1. INTRODUCTION

Les capteurs sont présents dans de nombreux domaines de la vie courante comme dans le domaine médical ou automobile par exemple.

Un capteur est un dispositif d'acquisition d'une grandeur physique (température, luminosité, débit, etc). Pour être utilisable, cette grandeur physique est souvent convertie en une grandeur électrique normalisée (4 à 20 mA pour les sorties de courant, 0 à 5V pour les sorties en tension).

Son utilité est de permettre la transmission des informations mesurées à distance, l'enregistrement des mesures en continu, le traitement du signal par ordinateur, etc.

Les capteurs sont séparés en deux catégories : les capteurs actifs et les capteurs passifs,

Les premiers fonctionnent en générateurs, Ils utilisent l'énergie fournie par le phénomène physique étudié et le convertissent en énergie électrique. Ce sont les capteurs qui utilisent la thermoélectricité, l'effet voltaïque, l'effet Hall et la piézoélectricité.

Les capteurs passifs doivent eux être intégrés dans un circuit électrique. Chaque position de la partie mobile du capteur correspond à une impédance. Cette partie mobile se déplace ou se déforme sous l'influence des forces (de pression par exemple) qui s'appliquent directement ou indirectement sur le capteur.

Enfin, il faut savoir qu'un capteur est différent d'un instrument de mesure puisqu'il s'agit seulement d'une interface entre le processus physique et l'information qui peut être manipulée. Un capteur n'affiche ni ne stocke donc pas forcément les données mesurées.

Notre sujet s'intitule « Les capteurs » et est dirigé par M. Guillotin.

Nous avons décidé de séparer notre étude en deux parties. La première consiste en un tour d'horizon de différents capteurs que nous avons sélectionnés afin de couvrir plusieurs types de capteurs existants. Dans cette partie, nous avons brièvement expliqué le fonctionnement de chaque capteur mais nous avons surtout insisté sur les applications concrètes de ces capteurs.

La seconde partie a une dimension plus expérimentale. En effet, nous avons choisi de nous intéresser à une situation concrète utilisant des capteurs. Notre étude consiste à mesurer le niveau d'eau dans une cuve opaque à l'aide de quatre capteurs différents : capteur capacitif, capteur de pression, flotteur et capteur à ultrasons. Pour cela nous avons donc créé des courbes d'étalonnage pour chaque capteur.

Au préalable, nous avons dû fabriquer le capteur capacitif et le flotteur.

2. METHODOLOGIE / ORGANISATION DU TRAVAIL

Notre groupe se compose de quatre élèves. Durant notre heure et demie de projet, nous avons essayé de former des sous-groupes de deux afin d'être plus efficace. De plus, l'heure et demie étant trop juste, nous avons réalisé la majeure partie des recherches chez nous, afin de consacrer ce temps à la mise en place de nos expériences et de nos conceptions. Les recherches concernant notre tour d'horizon des capteurs, ont été naturellement divisées en 4 et dans notre deuxième partie, puisque nous avons réalisé quatre capteurs afin de mesurer notre niveau, chacun d'entre nous a fait



les recherches concernant l'un de ces capteurs chez soi. Par la suite, il a été nécessaire de se voir en dehors des cours réservés à cet effet, afin de peaufiner la réalisation de notre dossier et de préparer notre soutenance.

3. TRAVAIL REALISE ET RESULTATS

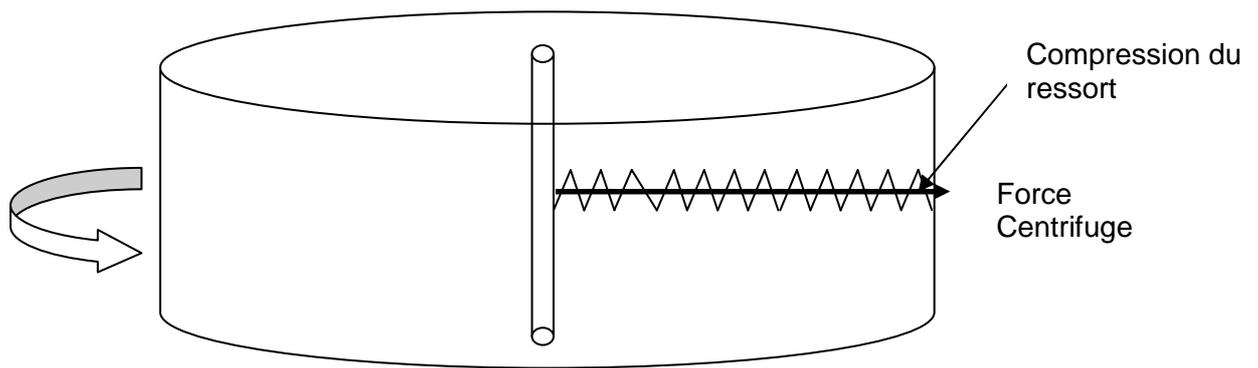
3.1. Tour d'horizon des capteurs

- **Tachymètres**

Le tachymètre est un instrument servant à quantifier en nombre de tours par unité de temps le mouvement de pièces en rotation. Le tachymètre peut être mécanique et sert alors à stabiliser automatiquement la vitesse de rotation à une valeur déterminée.



Il existe trois types principalement de tachymètres, en effet ce sont les plus efficaces. Le premier type est le tachymètre mécanique, il est soit à force centrifugée, c'est-à-dire que la force centrifuge, appuie sur un ressort dont l'écrasement est fonction de la vitesse de rotation.



Il peut être aussi chronométrique, cependant ce système est actuellement peu employé, en effet il est très difficile à régler. Le second type de tachymètres est électromagnétique. Ils fonctionnent de la façon suivante : ils comportent un aimant entraîné par un flexible tournant à l'intérieur d'un tambour relié à l'aiguille. La rotation de l'aimant produit des courants magnétiques, basés sur la propriété des courants de Foucault.

Rappel : on appelle courants de Foucault les courants électriques créés dans une masse conductrice, soit par la variation au cours du temps d'un champ magnétique extérieur traversant ce milieu, soit par un déplacement de cette masse dans un champ magnétique constant.

Ceux-ci entraînent le tambour et l'aiguille d'une certaine quantité proportionnelle au nombre de tours effectués par l'aimant, et nous permettent donc de connaître la vitesse. Enfin, le dernier type est dit électrique. Les tachymètres électriques sont employés principalement lorsque la distance de transmission interdit un procédé mécanique. Ils sont constitués par un petit alternateur entraîné par l'arbre à cames. Cet alternateur produit alors un courant envoyé vers un voltmètre gradué en



tours / minutes.

Le modèle de tachymètre le plus simpliste est le compte-tours qui est un tachymètre mécanique. On le trouve couramment dans l'industrie et les transports, où il permet un contrôle et une surveillance des machines rotatives.

De nos jours, beaucoup d'automobiles et de motocyclettes en sont équipés : ils indiquent au conducteur la vitesse de rotation du vilebrequin. Dans une voiture, on le trouve très souvent juste derrière le volant, parfois au centre du tableau de bord, en tout cas bien visible du conducteur ou du pilote... Le conducteur se sert des indications du compte-tours pour changer de rapport de boîte de vitesses au moment le plus opportun, en évitant de mettre le moteur en sous ou surrégime. Même les hélicoptères en sont équipés afin de gérer au mieux la vitesse des hélices.

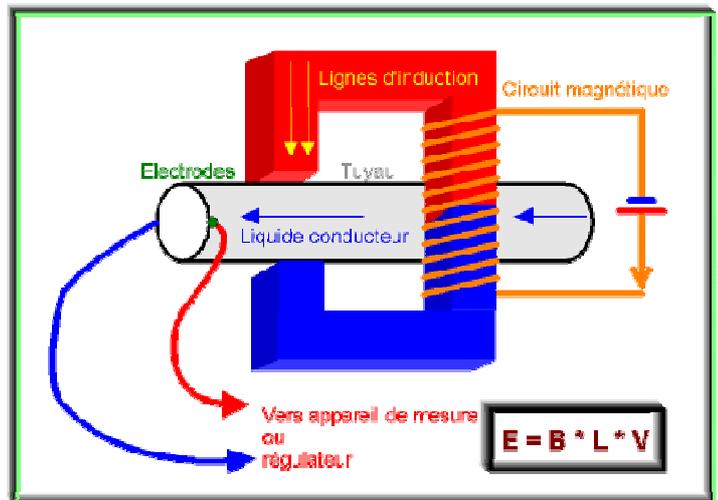
En horlogerie, on appelle tachymètre le cadran gradué permettant de déterminer une vitesse moyenne à partir du temps mis à parcourir une distance donnée (en général 1000 mètres), sur certaines montres.

• **Débitmètres**

Certains sont basés sur la mesure de la vitesse du fluide, on utilisera dans ce cas un tube de Pitot, un débitmètre à turbine, un débitmètre à ultrasons, un débitmètre ionique. On peut également utiliser la mesure de la perte de pression ou pression différentielle entre un repère amont et un repère aval, ceci à l'aide d'une plaque à orifice, d'une tuyère, d'un débitmètre électromagnétique, d'un débitmètre à effet vortex, ou d'un débitmètre à diaphragme. Nous allons traiter du débitmètre électromagnétique et du débitmètre ultrasonique plus précisément.

Le principe de mesure d'un débitmètre électromagnétique repose sur la loi d'induction de Faraday. Tout conducteur coupant les lignes d'inductions d'un champ magnétique à une certaine vitesse est soumis à une force électromotrice. Et c'est le liquide électriquement conducteur qui représente le conducteur en déplacement. La tension est induite par le champ magnétique et l'amplitude obtenue est proportionnelle à la vitesse d'écoulement du liquide conducteur.

$$E = B \times L \times V$$

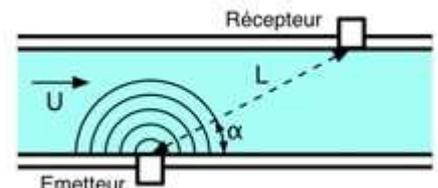


- E : Force électromotrice induite en Volts
- B : Induction magnétique en Tesla
- L : Écartement des électrodes (longueur du conducteur en m)
- V : Vitesse d'écoulement moyenne en m/s

Le débitmètre ultrasonique fonctionne de la façon suivante : un émetteur ultrasonique émet des trains d'ondes. La mesure du temps mis par le signal pour parcourir la distance L entre l'émetteur et le récepteur nous permet de connaître la vitesse du fluide. Le temps mis par l'onde ultrasonore pour aller de l'émetteur vers le récepteur est :

$$t = \frac{L}{c + U \times \cos\alpha}$$

- t : temps
- c : vitesse de propagation du son dans le fluide
- U : vitesse du fluide;
- α : angle entre U et la direction définie par le couple émetteur / récepteur.



$$U = \frac{L - tc}{t \times \cos\alpha}$$

En mesurant le temps entre l'émission et la réception, et grâce à la formule obtenue, on obtient facilement la vitesse du fluide.

On peut ajouter que la plupart du temps, on mesure un volume mais il peut arriver grâce à certains capteurs de pouvoir le mesurer massiquement.

• Capteurs d'humidité

Nous devons tout d'abord définir ce qu'est l'humidité. L'humidité est la présence d'eau dans l'air. Elle peut être définie de deux façons principalement. La première étant l'humidité relative, on la définit de la façon suivante :



$$\varphi = \frac{P(vap)}{P(sat)} \times 100$$

- P(vap) : Pression partielle de vapeur d'eau contenue dans l'air
- P(sat) : Pression de vapeur saturante
- φ humidité en pourcentage %

La seconde est l'humidité absolue :

$$\rho = \frac{m(vap)}{Vol}$$

- m(vap) : masse de vapeur d'eau
- Vol : Volume unitaire d'air
- ρ humidité en g/m³

Il est cependant possible de mesurer grâce à des capteurs que l'humidité relative. La méthode la plus antique est celle dite de « l'hygromètre à cheveu ». En effet, on utilise la propriété du crin de cheval ou de cheveu humain de s'allonger ou se raccourcir proportionnellement lorsque le taux d'humidité varie. L'allongement du cheveu est de l'ordre de 2% maximum. Pour informations, les cheveux blonds sont plus sensibles à l'humidité... Cependant il est peu fiable car sensible à de nombreux autres paramètres que l'humidité. On lui préfère donc des hygromètres tels que celui à condensation ou celui capacitif.

Le principe de l'hygromètre capacitif est basé sur la variation de capacité aux bornes de deux films polyamides métallisés. Le diélectrique large de quelques microns permet de piéger les molécules d'eau suspendues dans l'air modifiant de la sorte la capacité résiduelle du capteur, et donc grâce à la mesure de cette capacité, il est possible de connaître le taux d'humidité.

Le système de mesure est constitué d'un hygromètre relié à une sonde. La sonde mesure la capacité, le condensateur est pourvu d'un matériau diélectrique en plastique ou en polymère. Une humidité accrue fait dilater le matériau diélectrique, ce qui cause l'éloignement des plaques et provoque une variation conséquente de la géométrie du condensateur ainsi qu'une réduction de sa capacité. Par conséquent, les variations de capacité modifient la fréquence dans le système électronique de l'instrument, ce qui entraîne une modulation de fréquence qui est en fonction de l'humidité relative. On peut donc en fonction de la fréquence mesurée trouver l'humidité relative.

• Capteurs électrochimiques

- Potentiomètres



-Potentiomètres mécaniques - rotatifs et linéaires

Un capteur potentiométrique peut être associé ou adapté à un système **mécanique** en mouvement et donner une information de **torsion**, de rotation ou de courte distance. Plusieurs types différents de potentiomètres existent alors, chacun adapté à une captation précise. Un potentiomètre rotatif est un capteur de **rotation**, de **position**, de **déplacement angulaire**. Ses possibilités en interactivité et en événementiel sont très variées : capteur mécanique, il se fixe sur un gond de **porte** et donne des informations d'ouverture et de fermeture de la porte (donc par extension, des entrées et des passages par cette porte), il peut servir à contrôler des effets vidéo ou musicaux. Le potentiomètre peut aussi devenir un **bouton** à tourner ou être relié à un objet que le spectateur bouge... Il est aussi utile à l'asservissement de moteur, afin de connaître la position de l'axe du moteur.

- Potentiomètres souples

Contrairement aux potentiomètres mécaniques, ces capteurs ont l'épaisseur d'une feuille. Ces capteurs sont appréciés par des musiciens se créant des interfaces personnalisées, mais également par des performers ou des comédiens qui les utilisent en spectacle.

- *Capteurs ampérométriques*

Un capteur ampérométrique est un appareil de mesure de l'intensité d'un courant électrique dans un circuit. L'unité de mesure de l'intensité est l'ampère (A).

On distingue plusieurs types d'ampèremètres:

Ampèremètres analogiques

Ils sont de plus en plus remplacés par des ampèremètres numériques. Pourtant, en pratique, l'observation de leur aiguille peut fournir des informations sur les variations du courant mesuré que l'affichage numérique ne donne que difficilement.

Il en existe plusieurs types :

- x L'ampèremètre magnéto-électrique.
- x L'ampèremètre ferromagnétique.
- x L'ampèremètre thermique

Ampèremètre numérique

C'est en fait un voltmètre numérique mesurant la tension produite par le courant à mesurer dans une résistance (appelée shunt). La valeur du shunt dépend du calibre utilisé. En application de la Loi d'Ohm, La tension U mesurée est convertie, en fonction de la valeur de résistance connue R du shunt, en une valeur A correspondant au courant.

Ampèremètres spéciaux

- x La pince ampérométrique AC
- x La pince ampérométrique à capteur à effet Hall.
- x Les ampèremètres à fibre optique.

- *Capteur Conductimétrique*

Un conductimètre, ou conductivimètre, est un appareil permettant de mesurer une propriété de conductivité.

Il existe des conductimètres spécifiques à certaines applications :

- * mesure de la conductivité électrique d'une solution. Cet appareil est composé d'un générateur basse fréquence (courant alternatif), d'un ampèremètre et d'un voltmètre.
- * mesure de la conductivité thermique.



La mesure de conductivité électrique peut aussi permettre de mesurer de l'humidité d'un matériau ou de végétaux. L'appareil spécifique est alors appelé humidimètre.

- **Capteurs d'accélération, vibration, choc:**

Un **accéléromètre** est un capteur qui, fixé à un mobile ou tout autre objet, permet de mesurer l'accélération de ce dernier. Le principe de tous les accéléromètres est basé sur la loi fondamentale de la dynamique $F = m \cdot a$. Plus précisément, il consiste en l'égalité entre la force d'inertie de la masse sismique du capteur et une force de rappel appliquée à cette masse. On distingue deux grandes familles d'accéléromètres : les accéléromètres non asservis et les accéléromètres à asservissement.

- **Accéléromètres non asservis**

Accéléromètres piézoélectriques

Certains cristaux et certaines céramiques ont la propriété de se charger électriquement lorsqu'elles sont soumises à une déformation. Inversement, elles se déforment si on les charge électriquement, le phénomène est réversible. Le cristal se charge sur deux faces en regard avec des charges opposées lorsqu'on le soumet à une force exercée entre ces deux faces. Une métallisation des faces permet de recueillir une tension électrique qui pourra être utilisée dans un circuit.

Accéléromètre piézorésistif

Le principe de fonctionnement d'un capteur piézorésistif est basé sur la flexion d'une poutre instrumentée avec des jauges de contraintes positionnées pour mesurer de la traction compression.

- **Accéléromètres à asservissement**

Pour les accéléromètres à asservissement, l'accélération est mesurée à la sortie d'une boucle à contre-réaction (asservissement) comportant un correcteur. Un capteur à détection de déplacement (type non asservis) permet la mesure de l'accélération immédiate. Elle est la valeur d'entrée de notre boucle d'asservissement. En sortie de cette boucle, l'accélération est obtenue par la lecture de l'énergie nécessaire à la force de rappel permettant le retour de la masse sismique à sa position initiale.

Il existe plusieurs types de ces capteurs à asservissement :

- x à détection capacitive
- x à détection inductive
- x à détection optique

La force de rappel de tels capteurs d'accélération peut être de type électromagnétique ou électrostatique.

- **Capteurs de position et de déplacement**

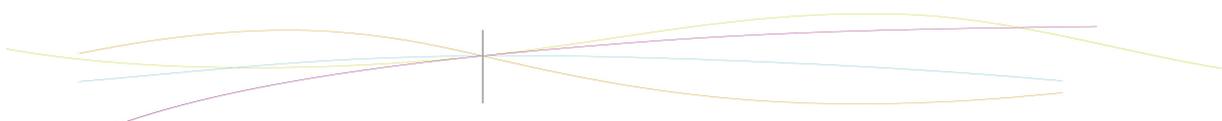
- **Principes de mesure**

- x Capteurs absolus : le capteur fournit un signal qui est fonction de la position de l'une de ses parties liée à l'objet mobile.

ex : potentiomètre résistif, inductance à noyaux mobile, condensateur à armature mobile, codeurs digitaux absolus, ...

- x Capteurs incrémentaux : le capteur délivre une impulsion à chaque déplacement élémentaire. La position et les déplacements sont déterminés par comptage des impulsions émises, ou décomptage selon le sens du déplacement.

- x Capteurs de proximité : Ils sont caractérisés par l'absence de liaison mécanique avec l'objet



dont ils mesurent la distance ou le déplacement.

- Potentiomètre résistif

Selon la forme géométrique de la résistance fixe et donc du mouvement du curseur, on distingue :

- x le potentiomètre de déplacement rectiligne.
- x le potentiomètre de déplacement circulaire.

Avantages : simplicité, peu coûteux, angle de mesure 10° à 360°, la sortie est indépendant R => stable par rapport à la température.

Inconvénients : charge mécanique, usure par frottements, influence de la source, influence de l'appareil de mesure. Solution : amplificateur suiveur pour garantir la validité de l'utilisation du diviseur de tension.

- **Capteurs digitaux**

Codeurs absolus

Le capteur fournit une sortie numérique (sous forme de mot binaire ou d'impulsions d'horloge)

Principe: une règle ou un disque est divisée en N bandes chacune contenant l'information binaire sur la position.

Résolution du capteur : *linéaire : L/N où L longueur de la règle.

*Angulaire : $360^\circ / N$.

Matérialisation des états binaires:

- x surface magnétique ou ferromagnétique.
- x surface opaque ou translucide.

Codeurs optiques absolus

Principe: émission et réception de faisceaux lumineux traversant un disque ou une règle qui contient le code binaire correspondant à la position.

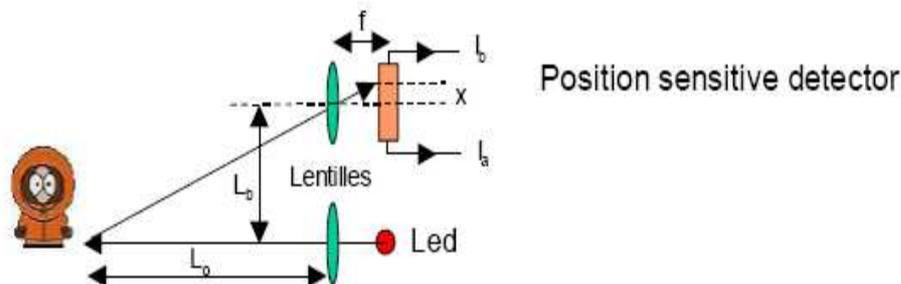
Avantages: mesure absolue (pas besoin de référence) - mise en œuvre aisée avec un PC.

Inconvénients: coûteux, nécessite la mise en place sur l'élément mobile.

- Capteurs optiques de position

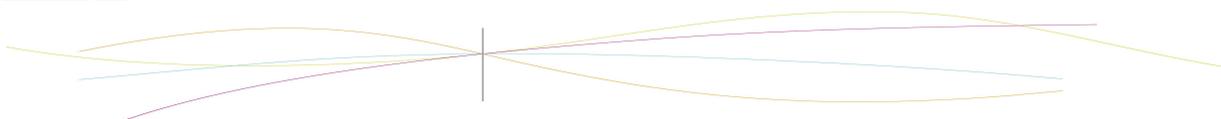
Principe: émission et réception d'un faisceau optique et mesure de distance suivant un principe de triangulation optique.

La lumière réfléchie est focalisée sur la surface du capteur PSD (position sensitive detector). Le capteur délivre alors un courant I_a et I_b proportionnel à la distance x du point d'impact du faisceau au milieu du capteur.



Caractéristiques métrologiques: étendue de mesure : jusqu'à 50 cm -résolution : jusqu'à 0.01 µm.

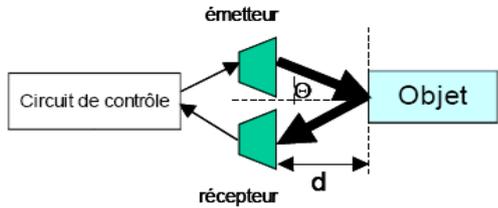
Avantages: très bonne résolution.



Inconvénients: dépend de la réflectivité du matériau ciblé.

- Capteurs ultrasonores

Principe : Émission et réception d'une onde acoustique. La distance entre l'émetteur et l'obstacle est



$$d = \frac{T v \cos \theta}{2}$$

v : vitesse de l'onde dans le milieu
 T : temps entre l'émission et la réception de l'onde

donnée par le temps de vol de l'onde acoustique.

• **Capteurs de déformation**

Les contraintes produisent des déformations sur le milieu où elles sont appliquées. Les capteurs de déformation nous permettent de calculer ces contraintes à partir des déformations mesurées en des zones judicieusement choisies.

- Jauges résistives métalliques

Les jauges résistives sont des capteurs passifs traduisant en variation de résistance leur propre déformation qui est en principe égale à celle de la structure à l'endroit où elles sont collées. Le domaine des déformations mesurables avec une précision pouvant atteindre 0,1% s'étend environ de 10⁻³ % à quelques %. La limite inférieure est fixée par le bruit de fond de la jauge et des circuits associés, la limite supérieure est celle imposée par l'élasticité de la jauge et de la colle de fixation.

- Jauges résistives semi-conductrices ou piézorésistances:

Il y a deux présentations différentes des jauges semi-conductrices qui sont la conséquence de leur mode de fabrication : les jauges découpées et les jauges diffusées.

Jauges découpées: Elles sont formées d'un brin unique découpé mécaniquement ou photo-chimiquement dans un monocristal de silicium dopé. Le brin est parallèle à la diagonale du cube cristallin pour le silicium P et au côté du cube pour le silicium N.

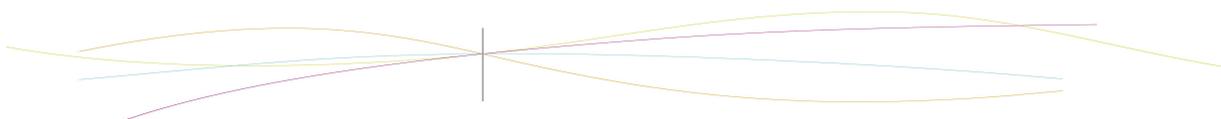
Ordre de grandeur des dimensions:

- x longueur: de quelques 10⁻¹ mm à quelques mm.
- x épaisseur: quelques 10⁻² mm.

Jauges diffusées: La résistance de jauge est réalisée par diffusion d'impuretés dans une partie d'un substrat de silicium monocristallin déjà dopé.

- Extensomètre à corde vibrante

Le capteur à corde vibrante permet de déterminer la tension de la corde en mesurant sa fréquence de résonance. Sa longueur initiale est déterminée lors de sa fabrication. A partir de la tension de la corde, on déduit son allongement. Ce principe physique permet donc de mesurer la déformation de la structure sur laquelle est fixé le capteur en ses deux extrémités. La mesure de la fréquence de résonance est obtenue par l'intermédiaire d'une bobine électromagnétique. C'est cette même bobine qui sera utilisée pour exciter la corde via une impulsion électrique et permettre ainsi la mesure. Souvent le capteur inclus une deuxième corde vibrante non-liée à la structure afin de tenir compte de l'influence de la température sur la mesure.



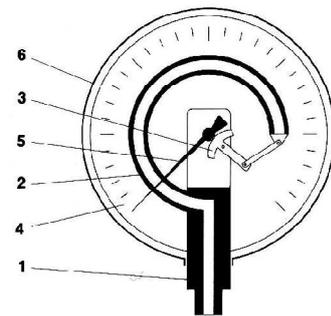
- **Capteurs de pression de fluides**

Il existe de très nombreuses sortes de capteurs en fonction de la mesure à effectuer ainsi que de l'ordre de grandeur de la pression mesurée. La pression d'un fluide, qu'il soit liquide ou gazeux, est un paramètre important à connaître dans le monde industriel, et a de nombreuses applications telles que la thermodynamique ou encore l'acoustique en passant par la biophysique. Certains capteurs sont complexes et ne peuvent pas être expliqués en détail dans ce dossier. C'est pourquoi nous avons sélectionné les plus couramment utilisés et qui ne requièrent pas de longues pages de développement.

- Le manomètre de Bourdon



Le manomètre de Bourdon mesure une pression effective, car la pression de référence est la pression extérieure, c'est-à-dire la pression atmosphérique. De manière générale, le tube est rempli d'un liquide non corrosif tel que l'huile, car la détérioration du tube pourrait causer la raideur

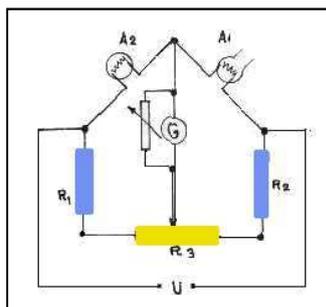


mécanique du tube et donc fausser la mesure. Le principe est simple : lorsque la pression au sein du fluide augmente, l'extrémité du tube se soulève (élément de mesure : 2), entraînant l'élément mécanique (3) vers le haut. La partie dentée de 3 s'abaisse alors, permettant à l'aiguille de monter. Il est à noter que ce capteur n'est pas efficace pour les fluides visqueux ou cristallisants. Il est important de noter que ce principe de fonctionnement est le même pour le baromètre ou encore d'autres objets mesurant la pression : il s'agit effectivement que la pression provoque la déformation d'une membrane, et que celle-ci indique alors l'importance de la variation occasionnée. De plus, des capteurs peuvent être électroniques si un matériau piézoélectrique est inséré dans le système de mesure.

- **Capteurs de mesure de vide**

On parle de jauge à vide lorsque l'on désigne les capteurs destinés à mesurer des pressions de gaz inférieures à la pression atmosphérique normale (≈ 1013 hPa). De manière générale, les professionnels intéressés par les mesures de vide sont ceux pour qui des particules gazeuses pourraient être gênantes par exemple en interférant avec un faisceau de particules (nucléaire) ou en entrant en collision avec une surface dont une pureté maximale est nécessaire (micro-électronique). Tout comme pour les capteurs de pression, il en existe différentes sortes en fonction de leur précision et de leur gamme de mesure.

- Le manomètre de Pirani



Cet appareil n'est fonctionnel que dans les vides dits primaires, c'est-à-dire qu'il reste suffisamment de molécules par cm^3 pour que les chocs soient nombreux. Ainsi, on utilisera pour mesurer la pression des méthodes basées sur des variations de transferts thermiques. C'est en effet le mode de fonctionnement du manomètre de Pirani (1906), dont les travaux ont donné nom au manomètre qui porte son nom et qui est un des plus utilisés actuellement dans la mesure de vide médiocre (jusqu'à environ 10^{-3} Pa). Le principe est le suivant : en appliquant une tension connue à un fil conducteur dans une enceinte vide, on peut mesurer la

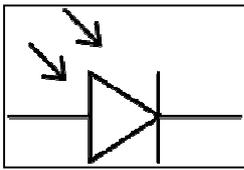
Schéma d'une jauge de Pirani



variation de courant qui indique alors la présence de molécules permettant le transfert thermique par effet Joule. La méthode équivalente est de maintenir constante la résistance du fil pour mesurer l'énergie nécessaire à ce maintien. Ces remarques sont appliquées dans le schéma de montage représenté. Ici, A2 est un filament résistif maintenu dans une ampoule scellée en très bon vide, A1 est un fil identique à A2 mais placé dans le vide à mesurer. Le montage en pont de Wheatstone permet d'augmenter la sensibilité et de corriger les dérives de zéro dues principalement à la température ambiante. Pour cette gamme de vide, il existe également d'autres appareils tels que les manomètres à thermocouples, mais nous n'en parlerons pas dans ce dossier. Cependant, des informations peuvent être trouvées sur internet à l'adresse indiquée en annexe.

- **Capteurs optiques**

- Les photodiodes



Symbole de la photodiode

Une photodiode est un composant semi-conducteur ayant la capacité de détecter un rayonnement du domaine optique et de le transformer en signal électrique, qui est un message simplifié et généralement codé. Un rayonnement est un transfert d'énergie sous forme d'ondes ou de particules. Ce composant appartient du domaine physique de l'optoélectronique. Le fonctionnement est le suivant : lorsqu'un flux lumineux « tombe » sur un semi-conducteur, les photons (particules élémentaires médiatrices de l'interaction électromagnétique) sont absorbés par le matériau seulement si l'énergie du photon est supérieure à celle qui « retient » l'électron à ce matériau. Lors de l'absorption du photon, deux phénomènes peuvent se produire :

- La photoémission : c'est la sortie de l'électron hors du matériau photosensible. L'électron ne peut sortir que s'il est excité près de la surface.
- La photoconductivité : l'électron est libéré à l'intérieur du matériau. Les électrons ainsi libérés contribuent à la conductivité électrique du matériau.

Il faut noter que la photodiode peut générer soit une tension (lorsqu'il n'y a pas de polarisation : mode photovoltaïque), soit un courant (polarisation inverse par une alimentation externe : mode photoampérique).

Les photodiodes sont très utilisées de nos jours. En effet, c'est le capteur photosensible du luxmètre, ainsi que l'élément de base des capteurs qui constituent la zone photosensible des caméscopes et des caméras de TV. On le trouve également dans des capteurs de position.



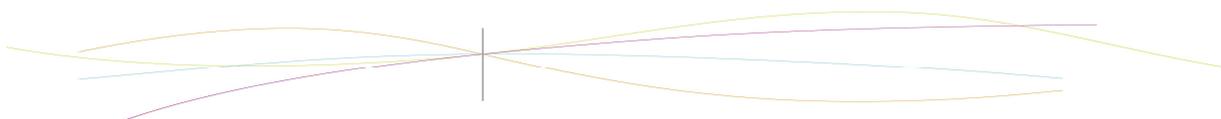
- **Thermocouple**

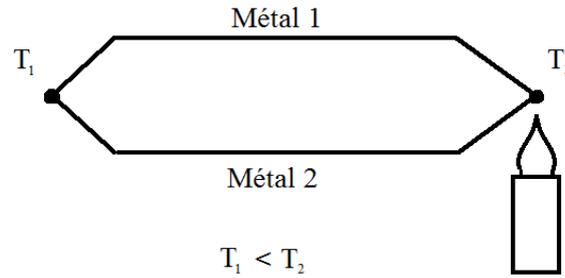
Le thermocouple est un capteur de température actif.

Le principe du thermocouple est basé sur l'effet Seebeck. Ce phénomène se produit lorsque deux métaux sont soudés et que les deux points de soudure sont à une température différente. Il apparaît alors une force électromotrice (f.e.m.) entre les deux points de soudure.

Ainsi, la différence de température est déduite de la mesure d'une tension. À l'aide de tables, on trouve la température à partir de la force électromotrice.

Il existe de nombreuses combinaisons de métaux, qui produisent chacun une f.e.m. différente. Il y a donc une table pour chaque couple de métaux utilisés. Les combinaisons de matériaux constituent des « types » de thermocouple.





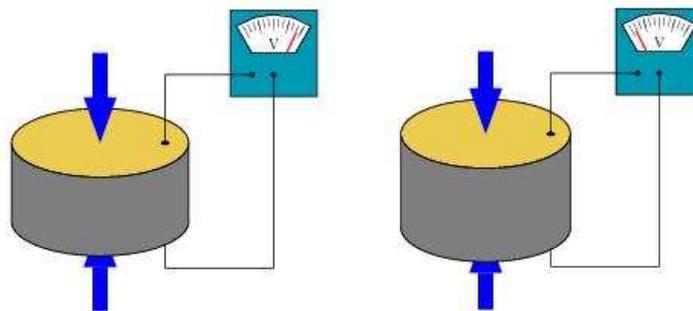
Ici, la soudure à la température T_1 est appelée soudure froide, et celle à la température T_2 est appelée soudure chaude.

Il faut noter que le thermocouple mesure une différence de température, c'est-à-dire qu'il permet de déterminer la température T_2 par rapport à la température T_1 .

Le thermocouple est une méthode très utilisée dans l'industrie, principalement pour son faible coût et son bon rapport qualité/prix. De plus, certains couples acceptent de très grandes gammes de température.

- **Capteur piézoélectrique**

Le capteur piézoélectrique est un capteur de force. Il fait partie des capteurs actifs. La piézoélectricité (du grec *piezein* [presser, appuyer]) correspond à une propriété qu'ont certains corps à créer du courant sous l'action d'une contrainte mécanique, Réciproquement, ces matériaux se déforiment lorsqu'on leur applique un champ électrique. Un matériau piézoélectrique possède forcément ces deux caractéristiques car elles sont indissociables. Le premier phénomène est appelé « effet piézoélectrique direct »; le second « effet piézoélectrique inverse ».



Principe de fonctionnement d'un matériau piézoélectrique

Il existe de nombreux matériaux possédant cette caractéristique. Le quartz par exemple, largement utilisé dans les montres permet de faire fonctionner le mécanisme d'horloge. Dans le domaine industriel, ce sont les PZT -qui sont des céramiques synthétiques composées de Titane et de Zirconate de Plomb- qui sont les plus utilisés.

C'est l'effet direct qui est utilisé pour réaliser les capteurs. Par exemple, pour un capteur de pression, la pression exercée par un fluide par exemple produit une tension électrique qui déforme le capteur.

L'effet inverse permet de fabriquer des actionneurs (injecteurs à commande piézoélectrique en automobile, nano manipulateur...).



- **Détecteur à ionisation**



Ce détecteur est notamment utilisé pour détecter les rayonnements nucléaires, c'est donc un capteur actif. Le principe de ce capteur consiste à faire passer des particules chargées (contenant ions et électrons) dans une chambre d'ionisation -dont le milieu est composé d'un solide, d'un liquide ou plus généralement d'un gaz- afin de séparer les ions et les électrons qui composent les particules. Un champ électrique E est nécessaire pour récupérer les ions et les électrons avant qu'ils ne se recombinent en atomes. Ce champ électrique les sépare et les fait se diriger vers chacune des électrodes. En dérivant vers les électrodes, les charges produisent un courant qui est détecté par un amplificateur qui produit alors un signal électrique.

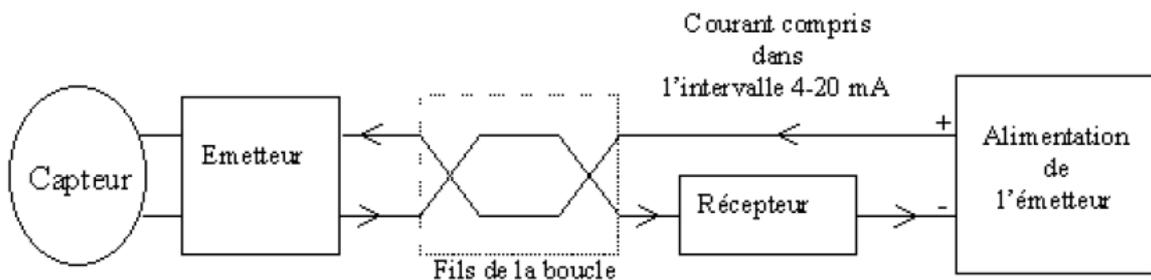
Le nombre moyen de paires d'électron-ion produit dans un passage d'une particule chargée est donné par la formule de Bethe-Bloch : $N = -\frac{(dE/dx)}{W} \times d$ où d est l'épaisseur du détecteur, E le champ électrique et W l'énergie moyenne pour créer une paire d'électron-ion. Dans les gaz, $W \approx 30 \text{ eV}$.

Le principe est utilisé dans plusieurs domaines comme la physique des particules, la spectrométrie de fluorescence X, la cristallographie et la radiographie. Le détecteur à ionisation est aussi utilisé dans le milieu médical notamment pour la radiothérapie et l'imagerie médicale (IRM). Ce capteur peut aussi être utilisé pour effectuer des mesures d'énergie ou pour connaître le temps de vol d'une particule.

- **Boucle Courant 4/20ma**

Pour tous les capteurs expliqués précédemment, une fois l'information capté il faut pouvoir la transmettre à un ordinateur, à toutes choses permettant de l'exploiter en clair. Pour cela, les tensions ne suffisent pas. En effet, les ingénieurs ont eu de grandes difficultés à trouver un signal électrique qui pouvait être transmis sur des fils sans introduire des erreurs. L'utilisation d'une simple variation de tension n'était pas assez fiable, car un changement dans la longueur et la résistance des fils avait pour conséquence de modifier la valeur mesurée. La tension est le modèle utilisé dans les labos scolaires par exemple. L'industrie a donc mis au point cette boucle de Courant 4/20ma. Son but est de transmettre un signal analogique sur une grande distance sans perte ou modification de ce signal.

Pour réaliser la boucle 4-20 mA, il faut au moins 4 éléments : l'émetteur, l'alimentation de la boucle, les fils de la boucle et le récepteur. Ces 4 éléments sont connectés ensemble pour former une boucle.



La principale caractéristique de cette méthode réside dans l'émetteur. En effet, l'émetteur est composé d'un capteur qui va mesurer les grandeurs physiques comme la température, la pression... et d'un émetteur de courant 4-20 mA.

L'émetteur convertit la valeur mesurée par le capteur en un courant compris dans l'intervalle 4-20 mA. On a un courant de 4 mA pour la première valeur de l'échelle de mesure du capteur et 20 mA pour la dernière mesure du capteur (exemple: si on a un capteur qui doit mesurer une température de -40°C à 50 °C, 4mA correspondra à -40° C et 20mA à 50°C). Si on lit 0 mA la boucle ne fonctionne plus ou il y a une erreur dans la boucle. Cette méthode permet de repérer un dysfonctionnement très rapidement.

L'industrie utilise essentiellement cette méthode.

3.2. Différentes méthodes de mesure de niveau de liquide

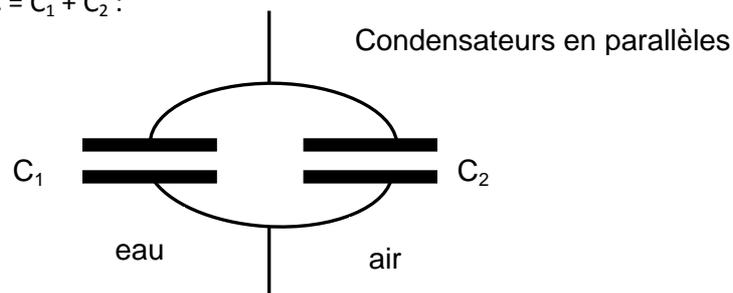
3.2.1. *Capteur de niveau capacitif*

Un capteur capacitif est dit de « proximité », c'est-à-dire qu'il est caractérisé par l'absence de liaison mécanique entre le dispositif de mesure et l'objet cible. L'interaction entre ces derniers est réalisée par l'intermédiaire d'un champ (magnétique, électrique, électromagnétique). Leurs principaux avantages sont que ce type de capteurs ne s'use très peu voire pas.

- **Principe du capteur**

Le principe de ce capteur capacitif de niveau est le suivant : En plongeant notre sonde ou condensateur dans l'eau, nous allons faire varier sa capacité en fonction de la hauteur d'eau. En effet, la capacité dans l'eau est plus forte que celle dans l'air.

Condensateur de capacité $C = C_1 + C_2$:

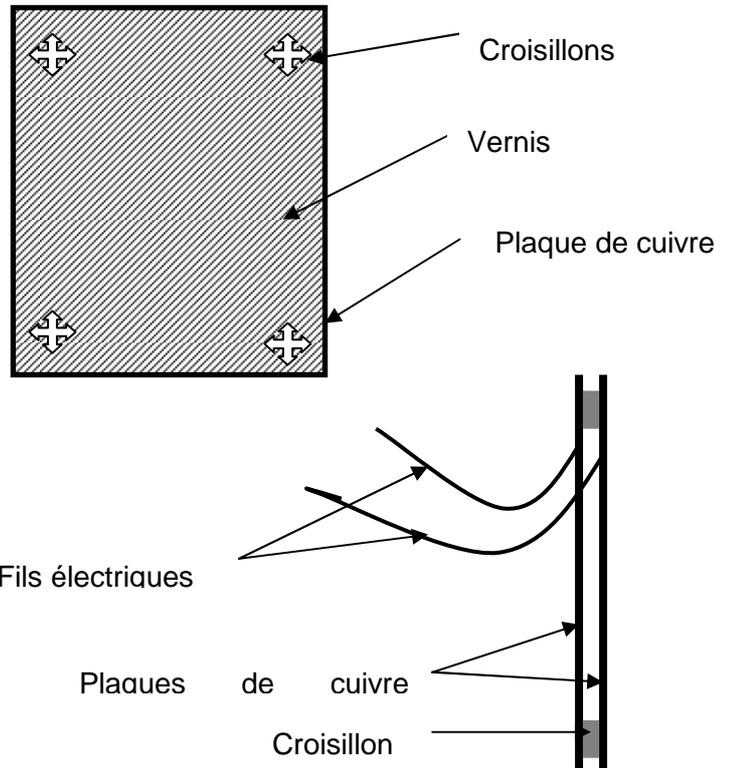


On utilise ensuite un montage qui permet de faire osciller notre sonde. Cependant l'augmentation du niveau d'eau entraîne un changement de capacité comme expliqué ci-dessus. Ce changement de capacité entraîne une modulation de la fréquence du système. La modulation de cette fréquence permet donc de déterminer la hauteur d'eau de notre cuve. Nous observerons donc à l'oscilloscope notre fréquence et sa valeur nous donnera notre hauteur d'eau.

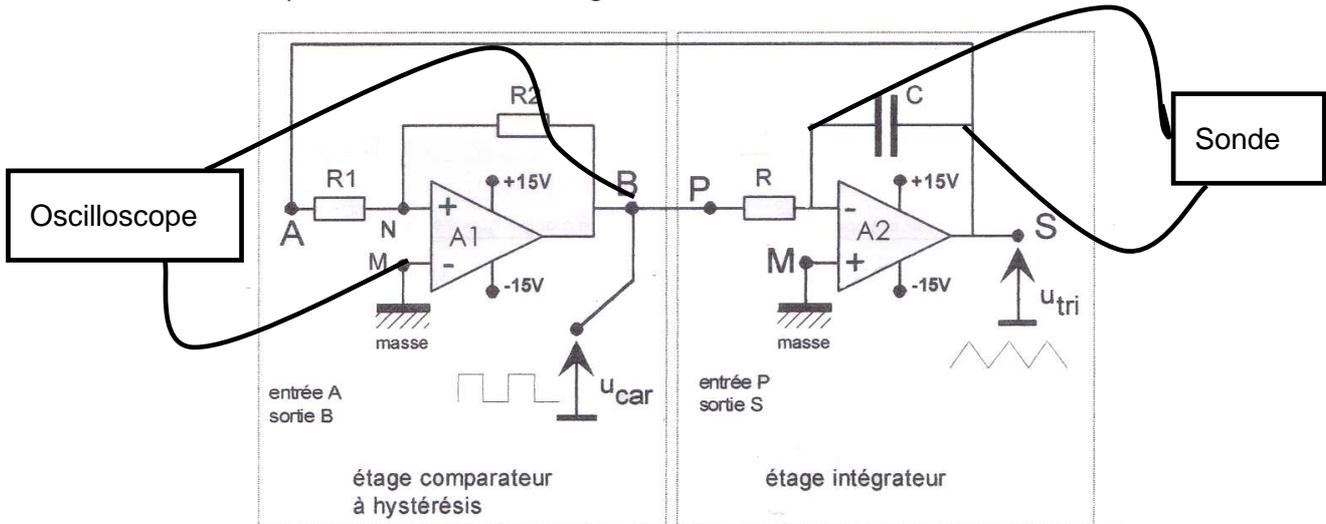


• Montage

Nous avons dû tout d'abord créer notre «sonde». Nous nous sommes servis de deux plaques de cuivre pour constituer notre sonde afin de créer une sorte de deuxième condensateur. La première étape a été d'isoler chaque plaque, on a pour cela utilisé du vernis, ensuite nous avons collé des croisillons qui servent à l'origine pour les carrelages. Puis nous avons collé la deuxième par dessus ces croisillons nous laissant ainsi 4mm d'écart. On soude les fils électriques que l'on aura auparavant dénudés sur l'extérieur des deux plaques de cuivres. La sonde est prête.

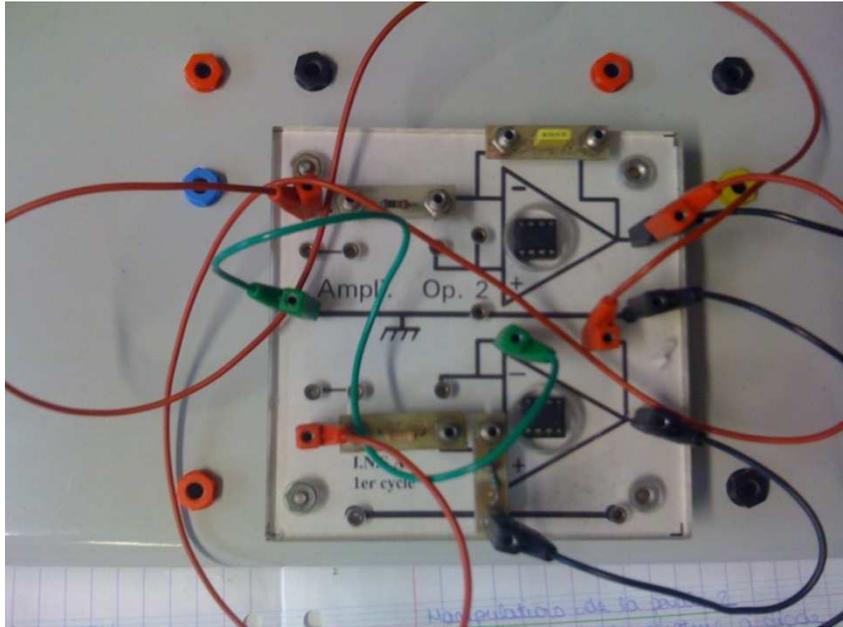


Cherchons maintenant à l'exploiter. Nous avons utilisé un montage vu en P6-1 dans le TP «Oscillateur à relaxation et capteur de température» puisque nous cherchons à faire osciller notre sonde afin de pouvoir déterminer notre hauteur d'eau. Un oscillateur à relaxation est construit à partir d'un élément pouvant accumuler de l'énergie. Pendant la première période il accumule, pendant la deuxième période il restitue de l'énergie. Un circuit à seuil permet de distinguer deux phases de fonctionnement. Notre circuit aura un étage intégrateur où un condensateur fera l'accumulation. Il y aura un deuxième étage qui est un comparateur à hystérésis pour faire basculer l'ensemble d'une phase à l'autre. Le montage est le suivant :



On utilise cependant des résistances et un condensateur plus appropriés à notre problème, c'est-à-dire que $R = 10\text{k}\Omega$ au lieu de 100k ; $R_1 = 10\text{k}\Omega$ (inchangée) ; $R_2 = 39\text{k}\Omega$ au lieu de 20 ; et enfin $C = 3,3\text{ nF}$ au lieu de 10nF . En effet, afin d'augmenter la fréquence on baisse R , on augmente R_2 , on baisse C . On l'augmente car sinon on ne pourrait pas observer d'évolution réelle de la fréquence.





Ci-contre la photo de notre montage

- **Procédure**

La procédure est très simple, on plonge notre sonde dans une cuve d'eau (nous avons utilisé une poubelle vide pour cela), en s'assurant que notre sonde ne touche pas les bords. Ensuite on rajoute de l'eau afin d'atteindre des niveaux différents de deux centimètres et on relève les valeurs de fréquence. On a ensuite réalisé notre modélisation sur Synchronie. Grâce à la régression linéaire obtenue, on peut donc calculer le niveau d'eau atteint grâce à la fréquence observée.

- **Etude Théorique**

Fréquence du montage

Réalisons maintenant le calcul théorique. Au niveau de l'étage comparateur à hystérésis, d'après le théorème de Millman on a :

$$U(NM) = \frac{\frac{U(AM)}{R1} + \frac{U(BM)}{R2}}{\frac{1}{R1} + \frac{1}{R2}} \quad \Rightarrow \quad U(NM) = \frac{\frac{U(AM)}{R1} + \frac{U(BM)}{R2}}{\frac{(R1 + R2)}{R1 \times R2}}$$

Et donc :

$$U(NM) = \frac{R2}{R1 + R2} \times U(AM) + \frac{R1}{R1 + R2} \times U(BM)$$

On cherche donc maintenant à calculer les seuils. On sait qu' $U(AM)$ est la tension d'entrée et $U(BM)$ la tension de sortie. On remplace donc $U(AM)$ par $\delta+$ et $U(BM)$ par $-V_{sat}$:

$$U(NM) = \frac{R2}{R1 + R2} \times \delta+ - \frac{R1}{R1 + R2} \times V_{sat}$$

Donc :

$$\delta+ = \left(\frac{R1}{R1 + R2} \times V_{sat} \right) \times \frac{R1 + R2}{R2} \quad \Rightarrow \quad \delta+ = V_{sat} \times \frac{R1}{R2}$$



Grâce à l'équation entrée-sortie de l'intégrateur, on sait que :

$$-\frac{\tau(\delta- - \delta+)}{\frac{T}{2}} = +V_{sat}$$

Et donc en remplaçant $\delta+$ et $\delta-$:

$$\frac{(2 \times R1 \times V_{sat} \times \tau)}{R2} \times \left(\frac{2}{T}\right) = V_{sat}$$

Or $\tau=RC$ et $1/T$ à f , d'où on obtient que :

$$f = \frac{R2}{4 \times R1 \times R \times C}$$

Calcul de la capacité de la sonde

Par définition, on sait que la capacité pour un condensateur plan est telle que :

$$C = \frac{\epsilon_r \times \epsilon_0 \times S}{e}$$

Avec :

C = capacité en Farad

ϵ_r = perméabilité de la substance

ϵ_0 = perméabilité du vide

e = épaisseur entre les deux plaques

De plus, lorsque des condensateurs sont placés en parallèles leurs capacités s'ajoutent. On a donc ici $C = C1 + C2 + C'$ avec $C' = 10$ nF qui correspond au condensateur placé dans le circuit. En utilisant la formule du dessus, on obtient :

$$C = C' + \frac{\epsilon_{r1} \times \epsilon_0 \times l \times heau}{e} + \frac{\epsilon_{r2} \times \epsilon_0 \times l \times (H - heau)}{e}$$

Où $heau$ est la hauteur d'eau, H la hauteur de notre cuve, ϵ_{r1} la permittivité de l'eau (≈ 80) et ϵ_{r2} celle de l'air (≈ 1).

En combinant nos deux expressions on obtient que :

$$C = \frac{R2}{4 \times R1 \times R2 \times f} = C' + \frac{\epsilon_{r1} \times \epsilon_0 \times l \times heau}{e} + \frac{\epsilon_{r2} \times \epsilon_0 \times l \times (H - heau)}{e}$$

Et donc (Après calculs) que :

$$heau = R2 \times \frac{e}{4 \times R1 \times R \times \epsilon_0 \times l \times f \times (\epsilon_{r1} - \epsilon_{r2})} - \frac{C' \times e + \epsilon_{r2} \times H}{(\epsilon_{r1} - \epsilon_{r2})}$$

Donc au final, on trouve que la hauteur d'eau est inversement proportionnelle à la fréquence.



Donc $h = A/f + B$ avec :

$$A = 4 \times 10^{-3} \times \frac{39000}{4 \times 10000 \times 10000 \times 8,85418782 \times 10^{-12} \times 0,02 \times (80 - 1)}$$

$$A = 27877,8$$

$$B = \frac{10 \times 10^{-9} \times 4 \times 0,001 + 80 \times 0,03}{80 - 1}$$

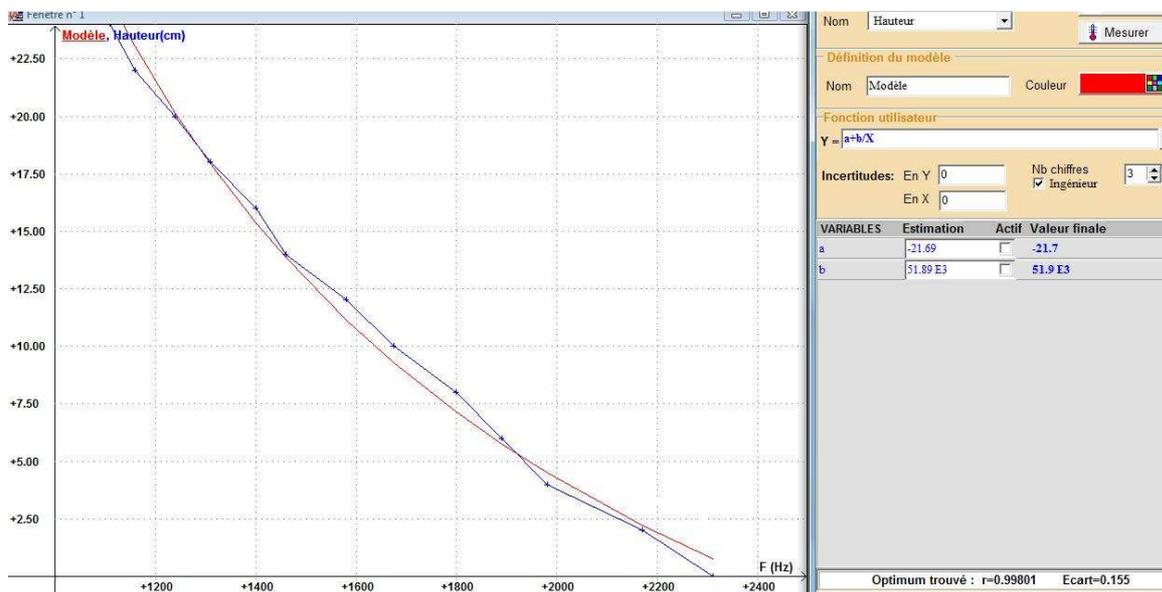
$$B = 0,03$$

- **Résultat de l'étude**

Après la prise de mesure, on obtient le tableau suivant :

Hauteur en cm	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24
Fréquence en kHz	2,16	2,06	1,98	1,89	1,8	1,72	1,65	1,5	1,4	1,31	1,24	1,16	1,11

Comparons à nos résultats. Grâce au logiciel Synchronie, nous traçons la courbe puis nous réalisons une régression hyperbolique ($y=a/x + b$) en accord avec la théorie qu'on devrait obtenir qui nous donne :



On obtient donc $B = -21,7$ et $A = 51900$. Notre régression est bonne comme le montre le coefficient de corrélation $r = 0,998$. En comparant avec nos calculs théoriques, on obtient un écart relatif pour A de :

$$e = \frac{|51900 - 27877,8|}{51900} \times 100 = 46,3\%$$



Et pour B :

$$e = \frac{|0,03 - (-21,7)|}{-21,7} \times 100 = 100\%$$

- **Explication de l'erreur**

Grosse erreur? En effet, ceci vient tout simplement du fait que tout ceci est expérimentale et qu'en plus nous n'avons pas pris en compte la permittivité du vernis car elle est impossible à obtenir (ou trop difficile à calculer). De plus, il est possible que notre condensateur soit mal isolé avec ce vernis mais aussi que la variation de capacité et donc de fréquence dépendent aussi de la température de l'eau et de beaucoup d'autres variables.

On obtient donc un A presque doublé par rapport à la théorie. Le A variant beaucoup, il induit forcément une erreur très conséquente au niveau du B, il faut cependant replacer dans le contexte car le A est d'un ordre de grandeur 4 voire 6 fois plus grand que le B. L'écart entre le B théorique et celui expérimentale n'est donc pas si grand, malgré un écart relatif de presque 100%

Finalement l'important est que l'on obtient des résultats en accord avec la théorie au niveau de la forme (inversement proportionnel). Notre capteur nous permet tout de même de trouver la hauteur d'eau en fonction de la fréquence. Nous avons pour cela réalisé un test.

- **Test**

Nous avons mis une hauteur d'eau inconnue, nous observons une fréquence 1,386 kHz, en suivant notre régression précédente, nous obtenons une hauteur de 15,74 cm. Comparons maintenant avec la hauteur réelle qui est de : 15cm

L'écart relatif est de :

$$e = \frac{|15,74 - 15|}{15,74} \times 100 = 4,7\%$$

Il est donc très satisfaisant. Pour conclure, même si les valeurs expérimentales sont en accord sur la forme mais pas au niveau des valeurs, il est possible de trouver notre hauteur d'eau grâce à notre capteur capacitif.

3.2.2. Capteur de pression

- **Présentation du capteur utilisé :**

Nous avons utilisé un capteur de pression fabriqué au laboratoire lors des années précédentes.

Pour comprendre son fonctionnement, nous avons démonté le boîtier de l'appareil afin de connaître le modèle du capteur utilisé. C'est un MPX2200 AP produit par Motorola.

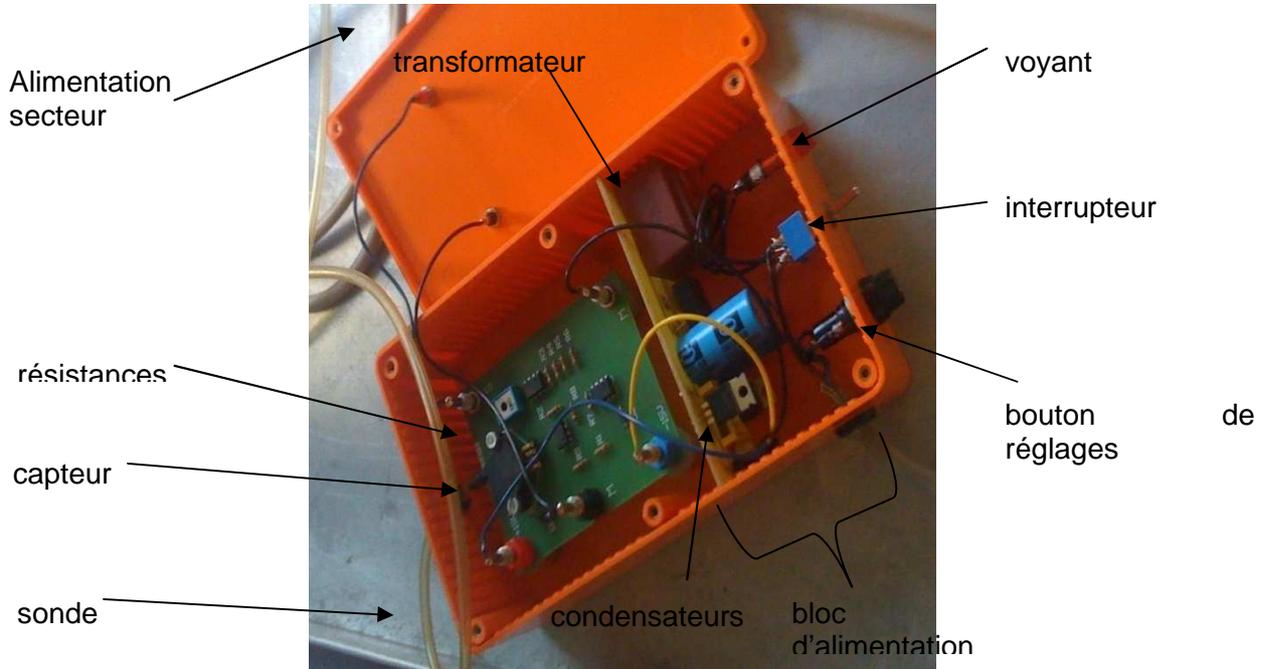
Nous avons pu télécharger la fiche technique du capteur sur Internet (cf Bibliographie).



Alimentation

Le potentiel nominal d'alimentation du capteur est de 10V mais il peut aller jusqu'à 16V.

Le boîtier du capteur étant directement branché sur secteur (220V), un transformateur est nécessaire afin de convertir cette tension en +15V et -15V.



Mesure de pression absolue

Le capteur utilisé mesure une pression absolue située entre 0 et 2 bars. En effet, grâce à un gel de silicone isolant, une partie du capteur est en contact avec l'environnement alors que l'autre ne contient que du vide.

Sensibilité

Dans la rubrique "Caractéristiques de fonctionnement" nous avons pu observer que le capteur est sensible à 0,2mV/kPa ce qui est très sensible.

Nous avons effectué une expérience rapide avec ce capteur afin d'observer l'allure de la courbe et nous avons observé une variation de tension de l'ordre de 30mV pour 3kPa ce qui correspond à 10mV/kPa. On peut donc en conclure que malgré la faible variation de pression, les valeurs que l'on obtient sont largement dans la gamme de mesure de notre capteur.

Compensation de température

Un dispositif interne de compensation de la température est présent dans le capteur, il permet d'atténuer les variations de température entre 0 et 85°C.

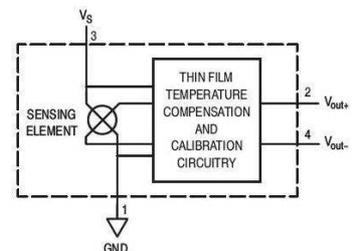


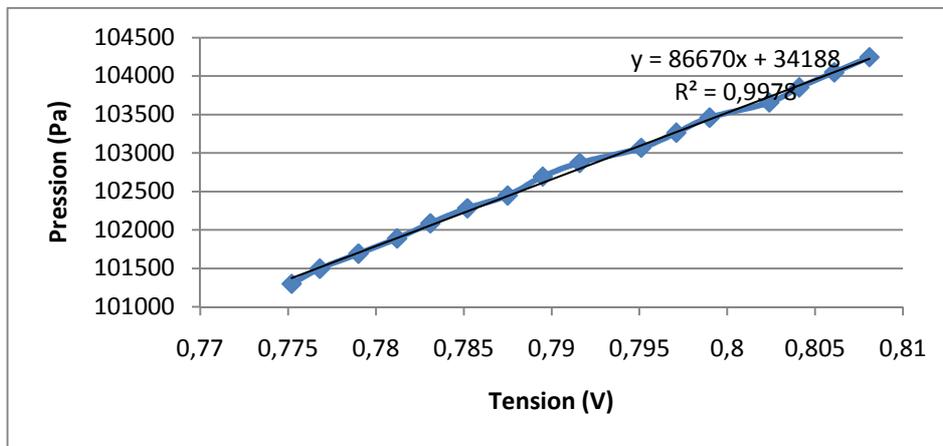
Figure 1. Temperature Compensated Pressure Sensor Schematic

Fonctionnement

Ce capteur est piézoélectrique. Cela signifie que si on lui applique une variation de pression, il fournit une tension. Inversement, si on lui inflige une tension, le volume du piézoélectrique varie. La

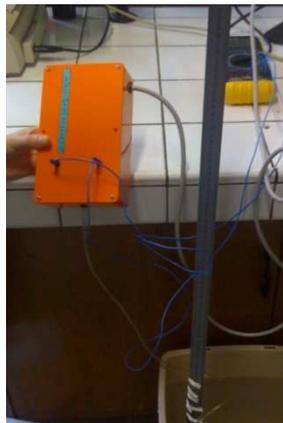


tension augmente lorsque la pression augmente, comme nous pouvons le constater sur le graphique suivant :



Le capteur est constitué d'un diaphragme en silicone et d'un réseau de résistances intégré dans une puce. Celle-ci est réglée via un laser pour une zone précise, la calibration des seuils et pour la compensation de la température.

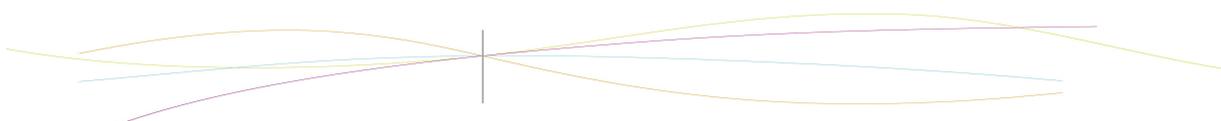
- **Schéma du montage :**



- **Procédure :**

La cuve étant déjà remplie d'eau pour l'expérience précédente, et pour des raisons d'économie d'eau, nous avons réalisé notre manipulation en plongeant la sonde dans l'eau et non en remplissant la cuve.

- o Fixer le tuyau de caoutchouc qui tient lieu de sonde sur un réglet.
- o Repérer d'un morceau de ruban adhésif tous les 2cm (de 0 à 30cm) afin que la lecture dans l'eau soit facilitée.
- o Ajuster le niveau de l'eau dans la cuve à 31cm environ. Lors de la première mesure, il faut s'assurer que l'eau se trouve au niveau du premier morceau d'adhésif, c'est-à-dire à 30cm de profondeur. Le fait de mettre environ 1cm d'eau en plus permet d'éviter que l'entrée de la sonde touche le fond de la cuve.
- o Brancher le capteur de pression à une prise d'alimentation.
- o Brancher un voltmètre aux bornes du capteur.
- o Allumer les deux appareils.



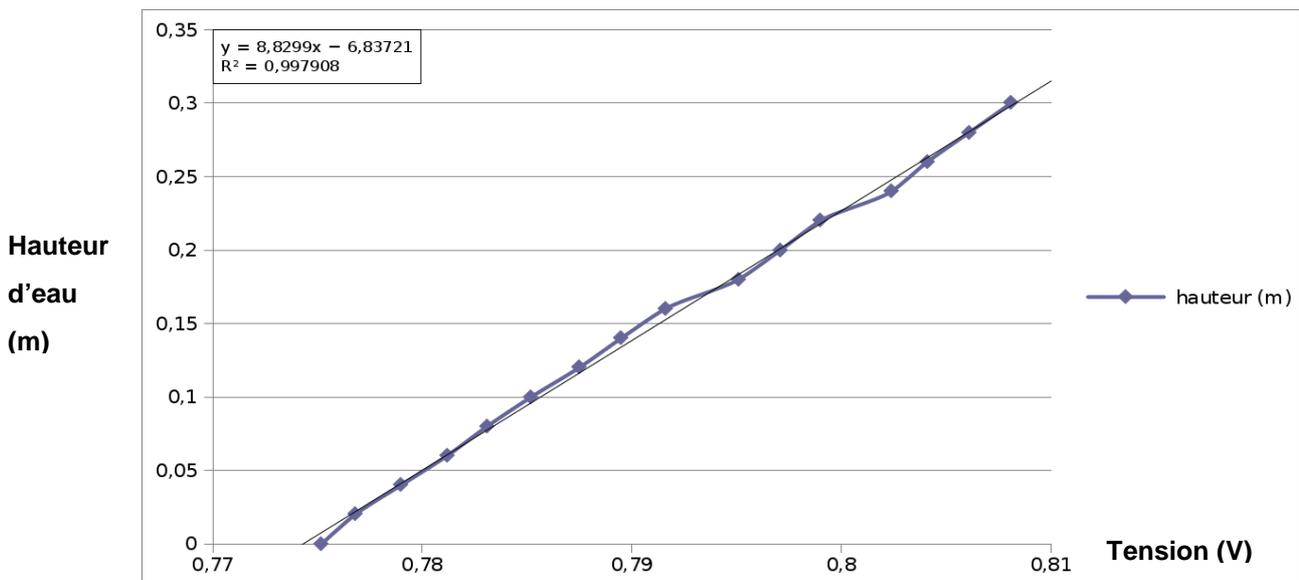
o Utiliser le capteur de pression en remontant la sonde tous les 2cm et relever les mesures sur le voltmètre à chaque palier.

o Entrer les valeurs au fur et à mesure sur Synchronie et tracer $h = f(U)$.

Attention : les valeurs étant prises en remontant la sonde, il faut inverser l'ordre des valeurs obtenues afin d'obtenir une variation de la hauteur d'eau au-dessus de la sonde croissante. Le 0cm du réglet correspond en fait à 30cm d'eau au-dessus de la sonde. Pour connaître la hauteur d'eau dans la cuve, il faut connaître la cote exacte de l'entrée de la sonde. Il est possible de placer l'entrée du tuyau à une distance négligeable du fond de la cuve ; dans ce cas-là, la hauteur d'eau dans la cuve correspond à la hauteur d'eau au-dessus de la sonde.

o Modéliser la courbe en utilisant un modèle affine.

• **Valeurs expérimentales :**



Allure de la courbe

On s'aperçoit que la courbe est une droite affine, la tension est donc proportionnelle à la hauteur d'eau dans la cuve. Ceci est confirmé par la fiche technique du capteur de pression : la tension en sortie est directement proportionnelle à la pression appliquée.

Erreurs de mesure

Les deux valeurs qui s'écartent de la modélisation sont dues à des erreurs de manipulation car la lecture du niveau de l'eau n'est pas facile malgré les marques de repérage (gouttelettes d'eau sur le réglet et réverbération de l'eau sur le métal du réglet).

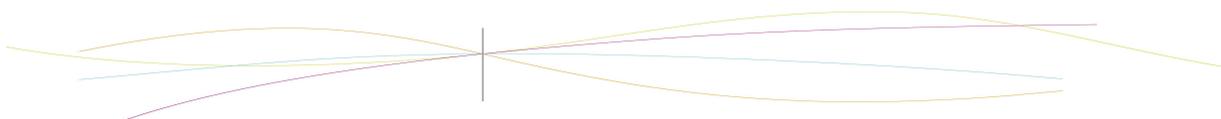
De plus, le capteur de pression n'est pas à 0V lorsque l'on est à $h = 0$ car la sonde est toujours soumise à la pression atmosphérique puisque la cuve est une enceinte ouverte.

Utilité de la courbe obtenue

Cette courbe nous sert en fait de courbe d'étalonnage.

En lisant sur le voltmètre n'importe quelle valeur comprise entre 0,77V et 0,81V et grâce à la courbe d'étalonnage obtenue, il est possible de connaître la hauteur d'eau dans la cuve.

Cette hauteur (en m) est plutôt proche de la réalité puisque le coefficient de corrélation $R^2 = 0,997908$ est bon.



On obtient donc la hauteur d'eau dans la cuve en fonction de la tension lue sur le voltmètre par l'équation :

$$(E) h = 8,8299 \times U - 683,721$$

avec $a = 8,8299\text{m/V}$ le coefficient directeur de la droite

et $b = -6,83721\text{m}$ l'ordonnée à l'origine

Par exemple, si on lit une tension de 0,7867V, cela signifie qu'il y a :

$$8,8299 \times 0,7867 - 6,83721 = 0,109\text{m} = 10,9\text{cm}$$

Possibilité de retrouver la pression absolue en fonction de la hauteur d'eau dans la cuve

Il suffit pour cela d'utiliser la loi de l'hydrostatique.

$$P(\text{Pa}) = \rho(\text{kg/m}^3) \times g(\text{m/s}^2) \times h(\text{m})$$

avec la constante de pesanteur $g = 9,81 \text{ m/s}^2$

On obtient ainsi la pression absolue qui s'applique au système en fonction de la hauteur d'eau mesurée à l'aide du voltmètre.

En effet, l'eau est considérée comme étant un système purement thermique, c'est-à-dire indilatable et incompressible. Sa masse volumique à la température de la pièce est connue grâce au tableau : <http://www.econologie.com/masse-volumique-de-l'eau-et-temperature-articles-4032.html> (cf. Bibliographie).

Si on lit une tension de 0,7867V ce qui correspond à 10,9cm, notre système est soumis à une pression effective de :

$$P_e = 1000 \times 9,81 \times 0,109 = 1\,069,3 \text{ Pa}$$

$$P = P_e + P_{atm} = 1\,069,3 + 101\,300 = 102\,369,3 \text{ Pa} = 1,024 \text{ bar}$$

3.2.3. Capteur à ultrason

- **Présentation du capteur utilisé**

Nous nous sommes servis d'un mesureur de distance électronique présent à l'INSA, fabriqué par l'entreprise POLAROID. Ce capteur est capable de mesurer des distances jusqu'à 13.72m, avec une limite inférieure de 0.61cm. Cet appareil a un risque d'erreur inférieur à 1%. Il additionne automatiquement sa propre longueur, c'est-à-dire que la distance mesurée est celle du bas du capteur (la partie qui n'a pas le senseur) à l'autre surface. Ce capteur fonctionne comme tout type de capteur de distance ultrasonique, à savoir il se met tout d'abord en mode émetteur pour envoyer un train d'onde ; puis se met en mode récepteur afin de capter l'écho, tout en mesurant le temps mis par l'onde pour se réfléchir à la surface dont on veut connaître l'éloignement (ici la surface de l'eau). La distance peut ainsi être mesurée par la formule : $v=2d/ t$ (l'onde effectue un aller-retour). En effet, la vitesse de l'onde ultrasonore est connue, elle est de 330 m/s. Grâce au temps capté de l'aller-retour du train d'onde en secondes, il est possible d'obtenir la distance d en mètres. Malheureusement, il n'y avait pas de fiche technique dans la boîte de l'appareil, et nous n'avons pas pu en trouver sur internet. Il nous sera donc impossible de décrire précisément comment le temps est calculé et stocké, et d'expliquer le fonctionnement du circuit imprimé interne. Par ailleurs, nous



avons voulu essayer de programmer sur synchronie des trains d’onde pour pouvoir nous-mêmes créer notre capteur. Cependant, nous n’avons pas réussi à réaliser cela car nous n’avons pas su programmer synchronie de cette manière.

- **Procédure**

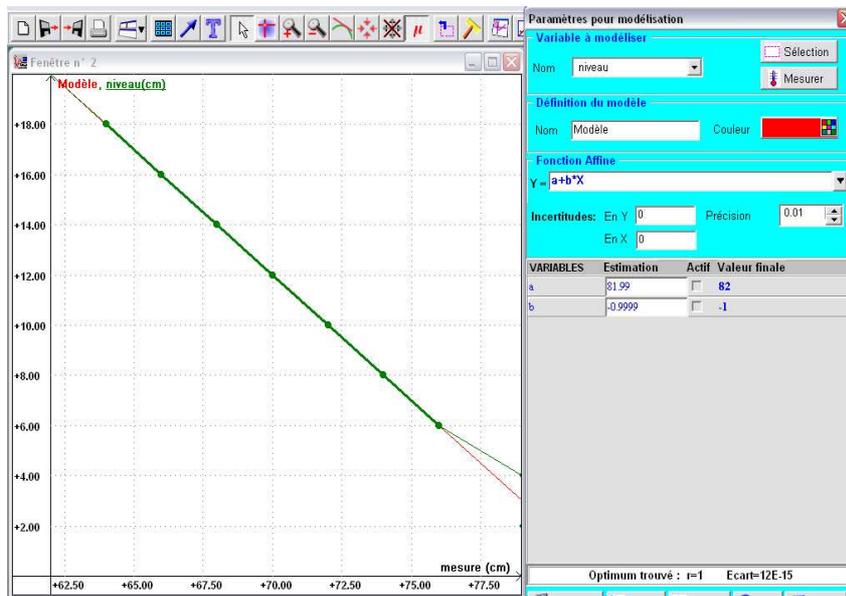
Comme nous pouvons le voir sur la photo, nous avons fixé à l’aide de bande adhésive le capteur au dessus de la poubelle, et placé dans celle-ci un bâton de bois marqué tous les 2cm pour servir de point de repère pour remplir la poubelle. Cependant, nous avons eu des problèmes pour positionner le capteur : en effet, si nous l’éloignons trop de la poubelle, l’onde se répercutait sur les bords et le capteur nous indiquait toujours la même distance. Lorsque nous rapprochions le capteur, nous ne pouvions pas remplir la poubelle jusqu’en haut à cause du retour trop rapide du train d’onde (le capteur ne peut pas mesurer des distances inférieures à 61cm). Pour pallier à cet effet, nous avons installé des « œillères » en carton, mais malheureusement ce dispositif n’a pas été efficace. Une fois le matériel installé, nous avons procédé de la manière suivante : nous avons mesuré la distance initiale, puis commencé à remplir la poubelle d’une profondeur de 2cm, repris une mesure, la placer dans Synchronie, et recommencé cette opération tous les 2cm, jusqu’à arriver aux limites de réception de notre capteur.



- **Valeurs expérimentales :**

Nous pouvons nous apercevoir que la courbe suivante est affine. En effet, il paraît évident que pour un ajout de 2cm d’eau, le capteur affichera 2cm de moins dans la distance mesurée par le capteur.

Cependant nous pouvons observer une marge d’erreur dans les premières mesures (les dernières sur le graphe), qui peuvent s’expliquer par le fait que le l’onde pouvait de réfléchir sur les bords de la poubelle, ou encore que l’eau n’était pas stable et renvoyait les trains d’onde par des chemins indirects.



- **Avantages et inconvénients**

L'utilisation d'un tel capteur a pour avantage de permettre une mesure directe de la distance, avec en général une précision satisfaisante. De plus, cet appareil permet également de mesurer des niveaux de solides, et pas uniquement de liquide, et peut donc par exemple s'appliquer dans un silo à grains. En outre, l'absence de contact entre le capteur et le liquide permet de prendre des mesures dans des conditions extrêmes telles que des très hautes températures ou les liquides très corrosif (verres ou métaux en fusion par exemple). Cependant, son utilisation est limitée notamment par la « zone morte », c'est-à-dire la distance pour laquelle le capteur ne peut pas faire la mesure car l'objet à mesurer est trop proche. Néanmoins, il existe des méthodes permettant de pallier à cet effet : il suffit en effet d'incliner le capteur afin d'essayer de voir à quelle distance se situe le mesurande en fonction de l'angle d'inclinaison. Un autre inconvénient est celui que la surface du mesurande doit avoir des propriétés physiques et/ou chimiques telles que l'onde sonore puisse être réfléchi, sans quoi cela engendrerait des défauts de mesure. Toujours avec le principe de la réflexion d'onde, il existe des capteurs à ondes électromagnétiques qui utilisent le principe du radar.

3.2.4. Flotteur

- **Mode expérimental**

Un fil en polyamide est maintenu tendu par un contrepoids guidé par une poulie et une résistance sensible aux mouvements du flotteur (poids posé sur une portion en polystyrène suspendu à l'autre extrémité du fil). À l'ajout de l'eau, le flotteur flotte à la surface, simultanément, la résistance augmente proportionnellement à la hauteur de l'eau (voir Fig.1).

Afin, de pouvoir récupérer une tension à la sortie, on réalise un montage lié à un circuit -comme nous l'avons déjà rencontré en TP (capteur de position angulaire)-.

Ce circuit est composé de 2 étages. Le premier permet de convertir la résistance en une tension, le second lui applique alors une correction affine.

On monte le premier étage. En variant x (la hauteur de l'eau) entre 0 et 26cm. On obtient $U_0 = ax + b$

(a = -0,0667 et b = 0,18)

Figure 1



Pour déterminer les valeurs des résistances réglables dont on se sert dans le second montage, on effectue une série de calculs: $U_s = [1 + (R_a/R_1)] * U - (R_a/R_1) * U_0$

On calcule R_a et U sachant qu'on veut $U_s = 0V$ quand $x = 0cm$ et $U_s = 1,8V$ quand $x = 30cm$

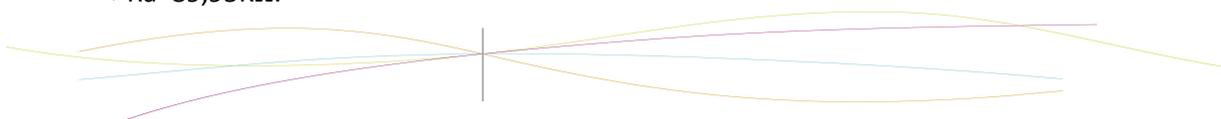
soit $dU_s/dx = (U_{smax} - U_{smin}) / (x_{max} - x_{min}) = 1,8/30 = 0,06$

$$U_s = [1 + (R_a/R_1)] * U - (R_a/R_1) * (ax + b)$$

$$dU_s/dx = -(R_a/R_1) * a = 0,06 \quad \text{avec } a = -0,0667 \text{ et } R_1 = 100k\Omega$$

$$R_a = -0,06 * 100000 / -0,0667$$

$$\Rightarrow R_a = 89,95k\Omega.$$

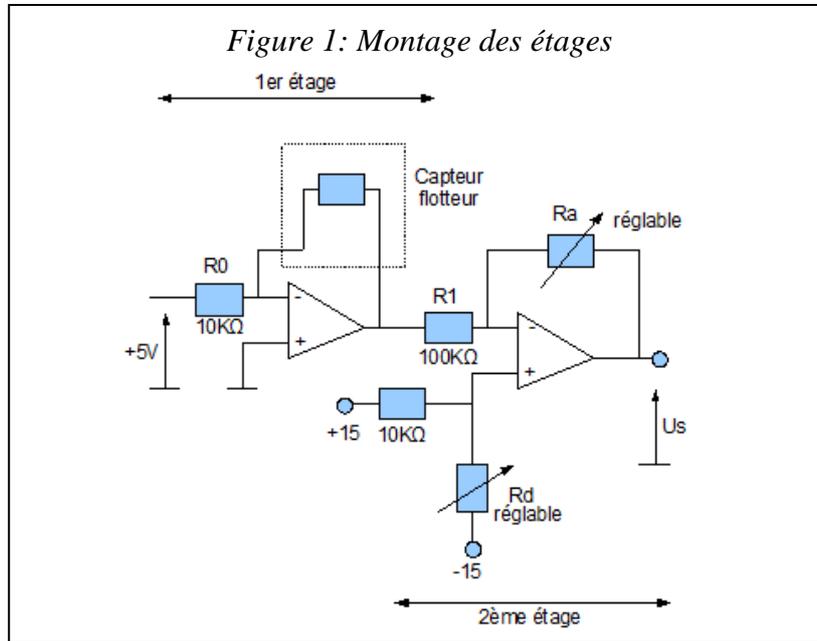


On cherche maintenant u:

$$U_s = [1 + (R_a/R_1)] * U - (R_a/R_1) * (ax + b), \text{ pour } U_s = 0 \text{ et } x = 0, [1 + (R_a/R_1)] * U = (R_a/R_1) * b$$

donc $U = [R_a / (R_a + R_1)] * b$ avec $R_a = 89,95k\Omega$, $R_1 = 100k\Omega$ et $b = 0,18$

$$\Rightarrow U = 0,085V.$$

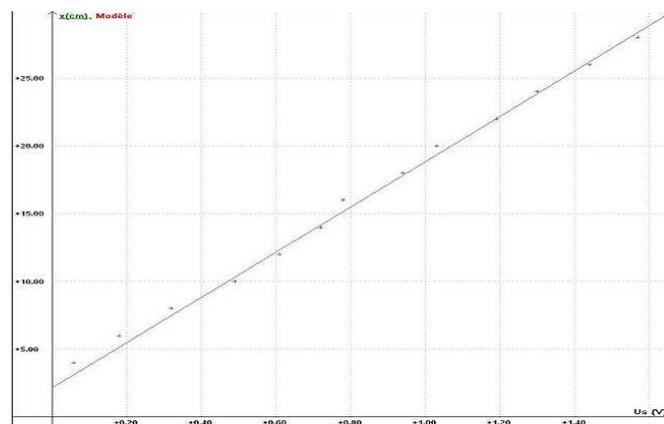


On relie la sortie du 1er étage à l'entrée du second (voir fig2). Hors circuit on calibre

$R_a(\text{exp}) = 89,96k\Omega$ puis on l'intègre dans le circuit.

On branche ensuite un voltmètre pour obtenir U en variant R_d , on trouve $R_d = 9,45k\Omega$ pour $U_{\text{exp}} = 0,083V$

Enfin, on trace x en fonction de U_s . Pour cela, on branche le voltmètre à la sortie, et on fait varier x de 0 à 30 cm (voir Fig.3)



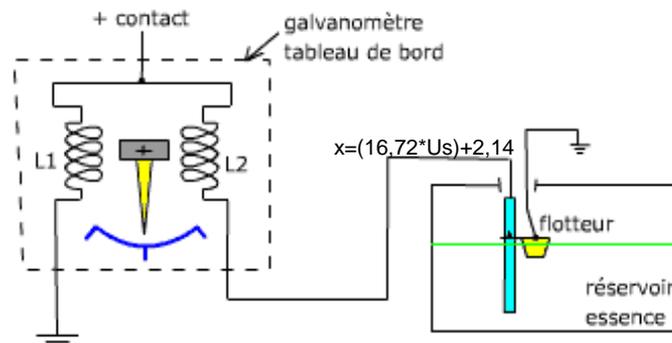
• **Conclusion**

A l'aide de ce mode expérimental -et grâce à une régression linéaire-, on pourrait désormais obtenir la variation du niveau de l'eau en mesurant la tension au bornes du circuit lié au flotteur.



- **Application industrielle: La jauge électrique d'essence**

Voici le schéma de principe du fonctionnement de cette jauge :



Sur le tube plongeant dans le réservoir d'essence, il y a un flotteur (en jaune). Ce flotteur est en contact électrique avec une barre conductrice (en bleu), et ce contact part ensuite à la masse. Cette barre conductrice est reliée tout en haut au galvanomètre de la jauge du tableau de bord (c'est le fil relié en sortie de la bobine L2 du galvanomètre, l'entrée de cette bobine étant au "+" contact). Plus le courant passant dans L2 est important, plus l'aiguille (en jaune) partira sur la droite (réservoir plein), grâce à l'attraction du support en gris de l'aiguille.

Or, lorsque le flotteur est en haut (réservoir plein), le chemin à parcourir par l'électricité dans la barre conductrice bleue du réservoir est court, la résistance électrique est faible, un fort courant circule, donnant l'aiguille à droite (cette barre conductrice bleue se comporte donc comme un potentiomètre ou résistance variable). Plus le flotteur est bas, plus le chemin électrique est long, donc la résistance grande, et plus le courant diminue, l'aiguille dévie de plus en plus vers la gauche (plus attirée par la bobine L1 qui elle est toujours parcourue par un courant d'égal intensité), indiquant un réservoir se vidant.

- **Caractéristiques du flotteur**

- × Gamme de mesure: de 10 mm à plusieurs mètres (30m).
- × précision: 0,5 à 5% de l'étendue de mesure.
- × problème d'étanchéité à l'usage des liquides corrosifs sous haute pression ou haute température, ce qui nécessite l'association du flotteur à d'autres appareils pour une étanchéité parfaite.
- × Convient mal aux liquides très visqueux susceptibles d'adhérer aux parois du flotteur, modifiant ainsi son poids et par conséquent sa profondeur d'immersion.

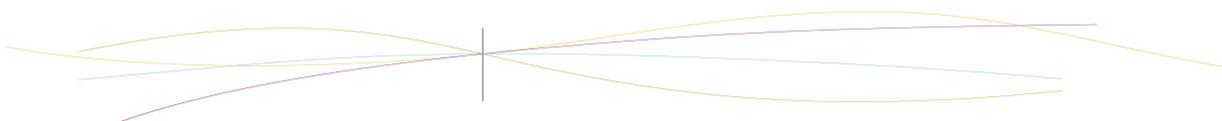


4. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

La première chose est que nous sommes plutôt contents du travail réalisé puisque l'ensemble des mesures faites dans la détection d'un niveau de liquide sont effectives. En effet, pour chacun de nos capteurs, il est possible d'obtenir la hauteur de liquide grâce la simple mesure d'une pression, d'une fréquence, d'une tension ou encore d'une résistance. Ce projet nous aura aussi permis d'aller profondément dans le sujet grâce à notre tour d'horizon des capteurs. Mais nous aura aussi donné un aspect pratique de la mesure et de l'utilisation de différents capteurs dans notre seconde partie. Nous avons aussi remarqué que les capteurs étaient vraiment partout dans la vie courante, chose que nous n'imaginions pas avant de commencer ce projet.

Ce projet ne nous aura pas apporté que des connaissances évidentes d'un point de vue physique. Elle nous aura permis d'expérimenter le travail en groupe, même si nous l'avions déjà rencontré dans le cursus INSA, cela n'avait jamais été réalisé dans un domaine réellement scientifique.

Les perspectives de ce projet n'ont pas de limite, en effet, au vu de ce que nous avons découvert sur les capteurs, il en existe de nombreux types que nous n'avons pas pu étudier évidemment, de plus il s'en crée de nouveaux jour après jour. Il est donc toujours possible d'étudier de nouveaux capteurs qui permettent de résoudre d'autres problèmes. Par conséquent, il serait intéressant pour les projets des années futures de proposer une étude d'un type particulier de capteur pour vraiment entrer en profondeur et comprendre la logique du système de mesures physiques.



5. BIBLIOGRAPHIE

1. Les documents sur support papier

- **Les livres**

X Georges Asch et collaborateurs. Les capteurs en instrumentation industrielle 5e édition, 2001.

- **Les cours et les travaux pratiques**

X François Guillotin. TP sur: le capteur de position angulaire/oscillateur de relaxation - INSA de ROUEN UV P6-1, 2007.

X Gwenaëlle TOULMINET. Cours sur les capteurs - INSA de ROUEN département ASI, 2002-2003.

2. Les ressources multimédia

- **Les sites internet**

X <http://fr.wikipedia.org>

X http://www.wontu.fr/DOCS/kit_de_survie_niveau.pdf

X http://philippe.berger2.free.fr/automatique/cours/cpt/les_capteurs.htm

X <http://www.vaucanson.org/actions/ballonsonde/experiences.html>

X <http://www.stielec.ac-aix-marseille.fr/cours/dereumaux/mesureniveau.htm>

X <http://gatt.club.fr/index.html>

X <http://home.nordnet.fr/dmorieux/tachymetre0001.htm>

X <http://www.oodoc.com/1911-les-capteurs-de-detection-des-gaz.php>

X <http://www.scan-data.com/app-1115.pdf>

X http://meteosat.pessac.free.fr/elect/boucle_courant.html

X <http://www.interface-z.com>

X <http://eurserveur.insa-lyon.fr>

X <http://arnaud.meunier.chez-alice.fr>

X www.selectronic.fr/includes_selectronic/pdf/Motorola/MPX_2200.pdf

X <http://www.techno-science.net/?onglet=glossaire&definition=3690>

X <http://www.interface-z.com/conseils/tableau-capteur.htm>

X <http://www.stielec.ac-aix-marseille.fr/cours/dereumaux/mesureniveau.htm>

X http://pagesperso-orange.fr/michel.hubin/physique/couche/chap_v4.htm

X <http://www.techno-science.net/?onglet=glossaire&definition=3713>

X http://jmfriedt.free.fr/saw_encl.pdf

X ww3.ac-poitiers.fr/sc_phys/prog/mpi/stages/Tp_cours/19clair.doc

X <http://www.abcelectronique.com/divers/dossiers/photodetecteurs/chap4.phtml>

X <http://mdesigner.free.fr/index.php?2006/04/30/40-les-microphones-principe-et-fonctionnement>

X <http://microphone-divers.audiodofanzine.com/apprendre/dossiers/index,idossier,34.html>

X <http://ddata.over-blog.com/xxxyyy/0/01/20/39/p--ma-11-fr.pdf>

X <http://www.econologie.com/masse-volumique-de-l-eau-et-temperature-articles-4032.html>.

