

Camille DELTOMBE
Romain CASSIM
Guillaume BOUVIGNIES



Encadré par M. Wallyn

Ça coule, Ça flotte...

Lycée Jean Perrin, Lambersart



Olympiades de Physique 2009 - 2010



Introduction :

Nous sommes trois élèves du lycée Jean Perrin de Lambersart. Nous avons décidé de participer aux olympiades de physique afin d'approfondir le TPE que nous avons commencé en classe de première.

Notre avions réalisé un premier dispositif permettant d'étudier l'évolution de la pluviométrie au cours du temps. Il s'agissait donc de construire une sorte de pluviomètre automatisé. Le principe est de placer dans une zone non abritée, une petite cuve de forme cylindrique sur laquelle sont placées verticalement à intervalle de distance fixe plusieurs électrodes, qui récupère les eaux de pluie. L'ensemble est relié à un ordinateur qui enregistre et analyse toutes les données. Le principe repose sur le caractère conducteur de l'eau. Les deux principaux défauts de cet appareil sont :

- il ne permet pas une mesure continue du volume d'eau recueilli : il fonctionne par paliers. En effet, lorsque le volume d'eau contenu dans le cylindre est tel que la surface de l'eau est située entre deux électrodes, c'est l'électrode inférieure immergée qui assure le passage du courant et délivre un signal électrique aboutissant à la mesure d'un volume d'eau ;
- il ne fonctionne qu'avec un liquide conducteur de l'électricité.

Notre objectif était donc d'améliorer ce "pluviomètre" en palliant à ces deux principaux défauts. Notre deuxième dispositif a pour but de mesurer de manière continue le niveau de n'importe quel liquide (conducteur de l'électricité ou non) présent dans une cuve. Il repose sur la poussée d'Archimède exercée par le liquide sur un capteur constitué de jauges de contrainte via un plongeur. Il permet de mesurer automatiquement et de manière continue la quantité de liquide présente dans la cuve, le liquide n'étant pas nécessairement conducteur.

Ce dernier dispositif constitue donc l'amélioration de notre projet initial et cela justifie notre présence aux olympiades de physique.

I/ Dispositif de mesure par palier

A. Principe du dispositif

B. Améliorer la précision : Comment choisir R ?

C. Principe du siphon

II/ Capteur à jauges de contrainte

A. Principe du dispositif

B. Principe de la manipulation et des jauges de contrainte

C. Amplification

III/ Traitement informatique

A. Présentation de la puce informatique

B. Analyse des données du dispositif par palier

C. Analyse des données du dispositif à jauges de contrainte

I/ Dispositif par palier

A. Principe du dispositif

Notre première idée a été de baser notre dispositif sur la propriété conductrice de l'eau. En plaçant deux séries d'électrodes de part et d'autre d'une cuve et en y associant un montage électrique, nous voulions de mesurer une valeur de tension qui varierait en fonction de la hauteur d'eau présente dans la cuve.

Voici comment se présente notre dispositif :

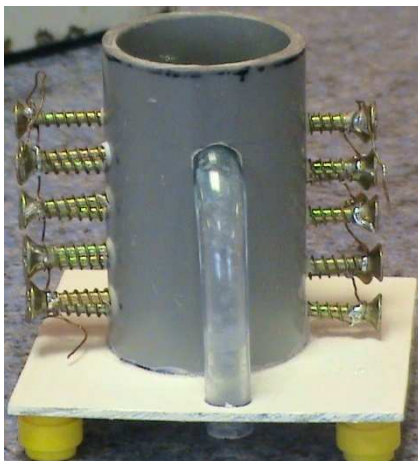
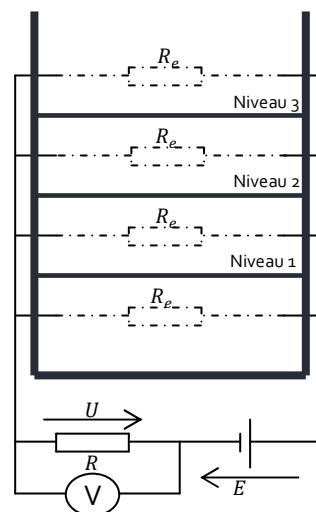


Photo n°1 : La cuve



L'eau étant conductrice, elle a été modélisée sur le schéma par une résistance R_e . Nous mesurons la tension aux bornes de la résistance R et en déduisons la hauteur d'eau présente dans la cuve.

Comment évolue la tension lorsque le volume d'eau augmente? Place aux calculs théoriques. Appelons par la variable n le niveau d'eau dans la cuve. Au niveau 1, lorsque les deux premières électrodes sont immergées, $n = 1$, lorsque les deux électrodes au dessus sont immergées, $n = 2$, et ainsi de suite...

$$\text{Calculons la résistance équivalente du montage en fonction de } n : R_{eq} = R + \frac{R_e}{n} = \frac{n \cdot R + R_e}{n}$$

$$\text{Selon la loi d'ohm en convention récepteur : } E = R_{eq} \cdot I \Leftrightarrow I = \frac{E}{R_{eq}} = \frac{n \cdot E}{n \cdot R + R_e}$$

$$\text{Donc, aux bornes de } R, \text{ on aura } U = R \cdot I = \frac{n \cdot R \cdot E}{n \cdot R + R_e}$$

B. Améliorer La précision : Comment choisir R ?

Pour avoir un maximum de précision, il faut choisir R intelligemment. Comment choisir R ??

Pour des raisons informatiques que Romain vous présentera juste après, nous voulons que la variation de tension d'un niveau à l'autre soit maximale, autrement dit que la pente de la fonction $U(n) = \frac{n \cdot R \cdot E}{n \cdot R + R_e}$ soit maximale en chaque point. Nous supposons pour cette étude que $U(n)$ est une fonction continue et dérivable sur \mathbb{R} ($n \in \mathbb{R}$). Nous calculons donc la dérivé de $U(n)$ par rapport à n .

$$\frac{dU}{dn} = \frac{E \cdot R \cdot R_e}{(nR + R_e)^2}$$

Nous cherchons à présent à trouver R pour que $\frac{dU}{dn}$ soit maximale. Nous dérivons donc $\frac{dU}{dn}$ cette fois par rapport à R .

$$\frac{d\left(\frac{dU}{dn}\right)}{dR} = \frac{E \cdot (R_e - R \cdot n) \cdot R_e}{(R \cdot n + R_e)^3}$$

$$E > 0 ; R_e > 0 ; (R \cdot n + R_e)^3 > 0 ;$$

$$\text{Signe de } (R_e - R \cdot n) : (R_e - R \cdot n) > 0 \Leftrightarrow R < \frac{R_e}{n}$$

R	0	$\frac{R_e}{n}$
$\frac{d\left(\frac{dU}{dn}\right)}{dR}$	+	-
$\frac{dU}{dn}$		

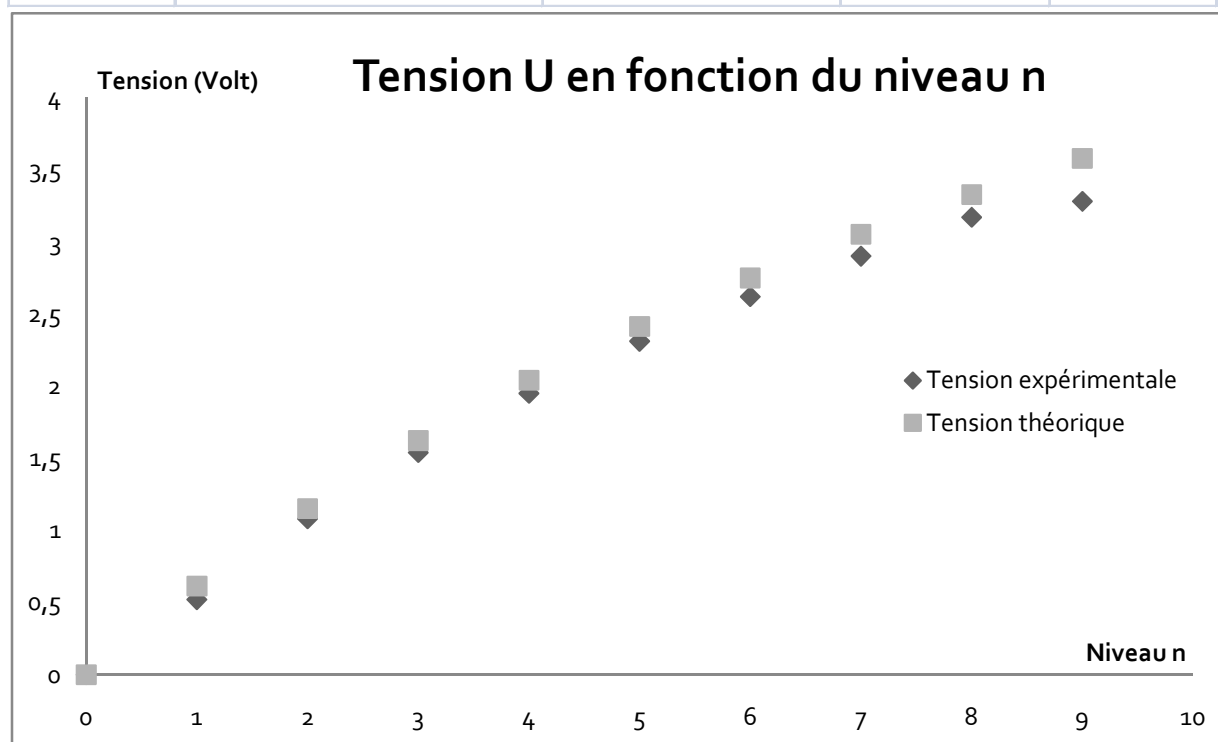
Donc, la pente est maximale pour un n donné si l'on choisit R tel que $R = \frac{R_e}{n}$.

La fonction $U(n)$, au vu de sa dérivée, est strictement croissante et sa pente diminue plus n est grand. Nous allons donc choisir R pour que, quand n atteint sa valeur maximale, $U(n)$ ait une pente maximale.

Notre cuve comporte 9 niveaux, et nous voulons conserver une pente maximale jusqu'au niveau 9. De plus, nous avons mesuré dans notre cuve, entre deux électrodes, $R_e = 3,0K\Omega$. Nous avons pris une résistance $R = 220\Omega$

L'objectif est donc atteint, nous récupérons aux bornes de R une tension qui varie en fonction de la hauteur d'eau dans la cuve. Cependant, il faut reconnaître que ce système présente quelques défauts. Dans un premiers temps, le principe de faire jouer la résistance du liquide dans un circuit électrique ne peut fonctionner que si le liquide est conducteur. Ce dispositif est alors réservé uniquement au liquide conducteur. Ensuite, le système d'électrode nous permet de faire une mesure par palier. La mesure n'est pas continue et donc imprécise. Entre deux niveaux, on ignore où se trouve le niveau d'eau. Nous corrigerons ces défauts dans le dispositif suivant.

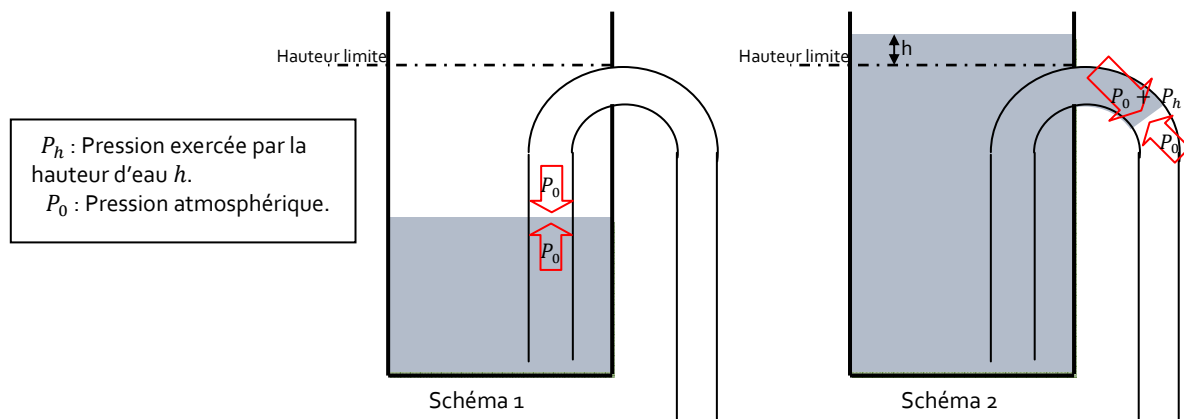
Niveau	Tension expérimentale (V)	Tension théorique (V)		
0	0	0,00E+00	R (en ohm) =	220
1	0,52	6,15E-01	Re (en ohm) =	3,00E+03
2	1,08	1,15E+00	E (en volt) =	9
3	1,54	1,62E+00		
4	1,95	2,04E+00		
5	2,31	2,41E+00		
6	2,62	2,75E+00		
7	2,9	3,05E+00		
8	3,17	3,33E+00		
9	3,28	3,58E+00		



C. Principe du siphon

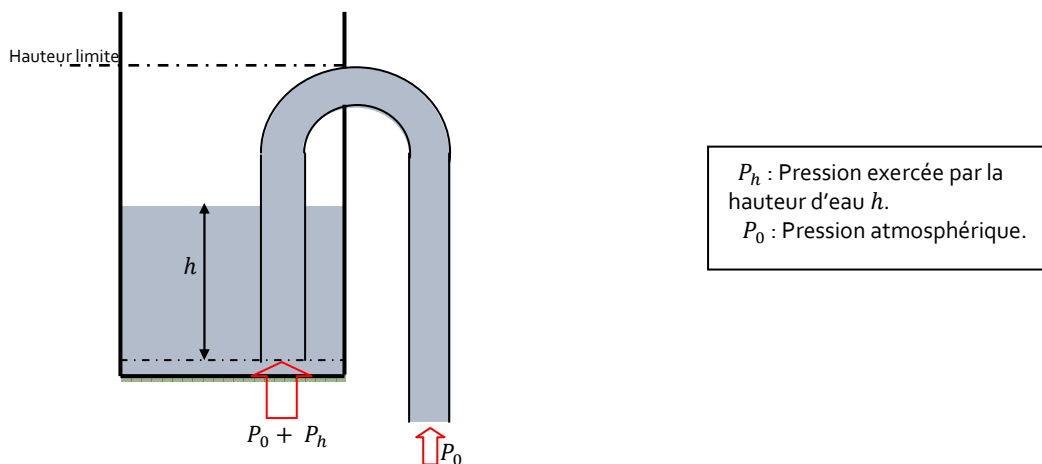
Afin que la cuve se vidange automatiquement, nous avons mis en place un siphon. Un siphon est un système très simple permettant, une fois une certaine hauteur d'eau atteinte, de vider entièrement la cuve. Nous allons expliquer son fonctionnement.

Tant que la hauteur d'eau dans la cuve est inférieure au haut du tuyau du siphon (schéma 1), la pression dans le tuyau coté air est égale à la pression atmosphérique, de même que la pression dans le tuyau coté eau. Il y a égalité des pressions, rien ne se passe. Lorsque le niveau d'eau dans la cuve dépasse le haut du tuyau du siphon (schéma 2), la pression dans le tuyau coté air est toujours égale à la pression atmosphérique, mais la pression dans le tuyau coté eau est à présent égale à la pression atmosphérique à laquelle s'ajoute la pression exercée par la hauteur d'eau superflu. La pression dans le tuyau coté eau est plus grande que celle coté air, il y a un déséquilibre de pression, le siphon est amorcé, la cuve commence à se vider.



Pourquoi le siphon n'arrête-t-il pas de fonctionner lorsque le niveau d'eau dans la cuve est redevenu inférieur à la hauteur d'eau limite?

Lorsque le siphon est amorcé, l'eau envahit la totalité du tuyau. Pour comprendre pourquoi le siphon ne s'arrête pas de fonctionner une fois que l'eau est redescendue en dessous de la hauteur limite, il faut comparer les pressions à l'entrée et la sortie du siphon.



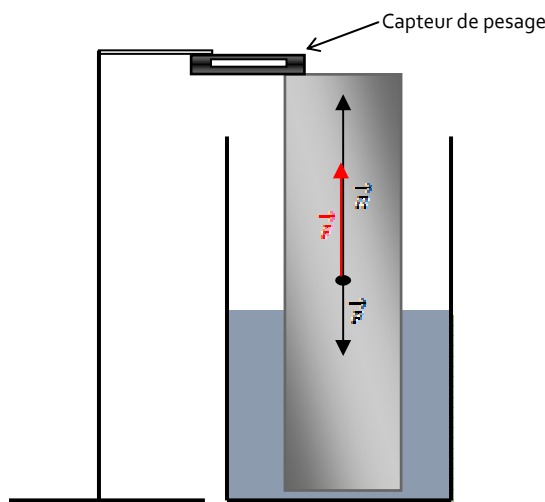
A la sortie du tuyau, la pression exercée sur l'eau qui sort du tuyau est la pression atmosphérique (P_0). Mais à l'entrée du tuyau, la pression qui s'exerce sur l'eau qui entre dans le

tuyau est la pression atmosphérique à laquelle s'ajoute la pression exercée par la hauteur d'eau restante dans la cuve ($P_0 + P_h$). Tant que la hauteur h est non nulle, on a bien $P_0 < P_0 + P_h$. Donc tant qu'il y a de l'eau au dessus de l'entrée du tuyau dans la cuve, la différence de pression entre l'entrée du tuyau est la sortie est supérieure à 0, et donc la cuve continue de se vider. Elle continuera de se vider jusqu'à ce que h s'annule.

II/ Capteur à jauges de contrainte

A. Principe du dispositif

Le deuxième dispositif est celui constitué d'un capteur de force et d'un plongeur. La mesure des niveaux de fluides non conducteurs d'électricité repose sur l'une des propriétés hydrostatiques des liquides: la poussée d'Archimède.



\vec{P} : Le poids du plongeur.

$$||\vec{P}|| = m \cdot g$$

\vec{N} : La poussée d'Archimède exercée par le liquide sur le plongeur.

$$||\vec{N}|| = \rho \cdot V \cdot g$$

\vec{F} : La résultante des deux forces :

$$\vec{F} = \vec{P} + \vec{N}$$

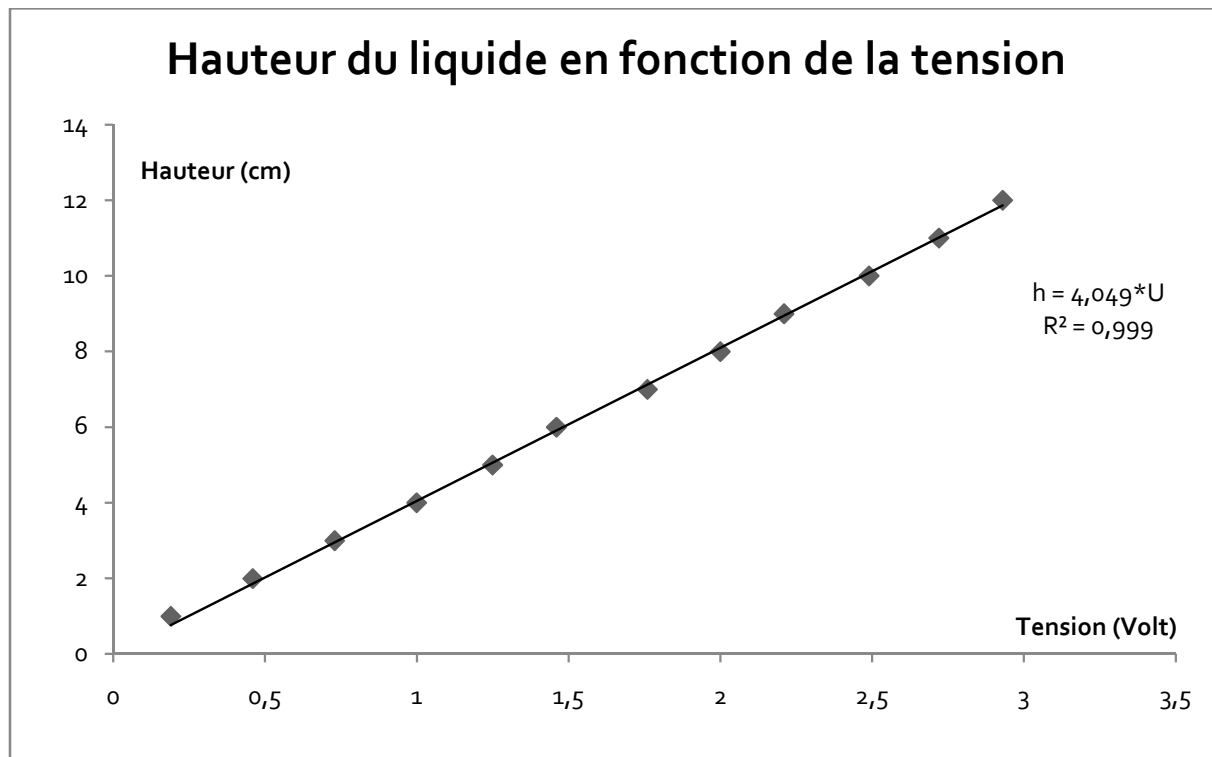


La poussée d'Archimède, $||\vec{N}|| = \rho \cdot V \cdot g$, s'exerçant sur le volume immergé du plongeur est égale au produit de la masse volumique du liquide ρ (en $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$), du volume immergé du plongeur V (en m^3) et de la constante de gravitation ($9,8 \text{ N} \cdot \text{kg}^{-1}$). Lors d'une mesure avec un liquide donné, la masse volumique du liquide ρ et la constante de gravitation g sont des constantes. L'intensité de la poussée d'Archimède dépend donc uniquement du volume immergé du flotteur. De plus, le poids du plongeur, exprimé par le vecteur \vec{P} , est aussi une constante. Si on désigne par \vec{F} la force résultante de la poussée d'Archimède et du poids du plongeur ($\vec{F} = \vec{P} + \vec{N}$), \vec{F} dépend uniquement du volume immergé du plongeur V .

Photo n°2 : Le plongeur et le capteur de pesage

Le plongeur est fixé au capteur de pesage. Il est placé de manière à être proche du fond de la cuve sans le toucher. Lorsque la hauteur de liquide dans la cuve augmente, le volume immergé du plongeur augmente également. Comme on a vu que la poussée d'Archimède dépend uniquement du volume immergé du plongeur, l'intensité de cette force va donc varier en fonction de la hauteur de liquide présent dans la cuve. La force détectée par le capteur est transformée en tension électrique, amplifiée par un amplificateur différentiel puis par un amplificateur opérationnel et transmise à l'ordinateur. Celui-ci est chargé, après quelques calculs, de déterminer la hauteur de liquide présent dans la cuve.

hauteur (cm)	Tension (V)
0	0
1	0,19
2	0,46
3	0,73
4	1
5	1,25
6	1,46
7	1,76
8	2
9	2,21
10	2,49
11	2,72
12	2,93



B. Présentation du capteur et des jauges de contrainte

Le capteur que nous utilisons pour notre dispositif est le capteur de pesage AQ5. (Voir ses caractéristiques en annexe 1). Il permet de détecter une masse allant de 0kg à 5kg. Le capteur est constitué d'une partie métallique « flexible » sur laquelle sont collées des jauges de contrainte ayant pour but de rendre compte de la déformation de la pièce métallique. Nous allons expliquer son fonctionnement.



Photo n°3 : Capteur de pesage AQ5

Jauges de
contrainte sous la
couche de colle



Photo n°4 : Les jauges de contrainte sous une couche de colle placées sur la partie métallique

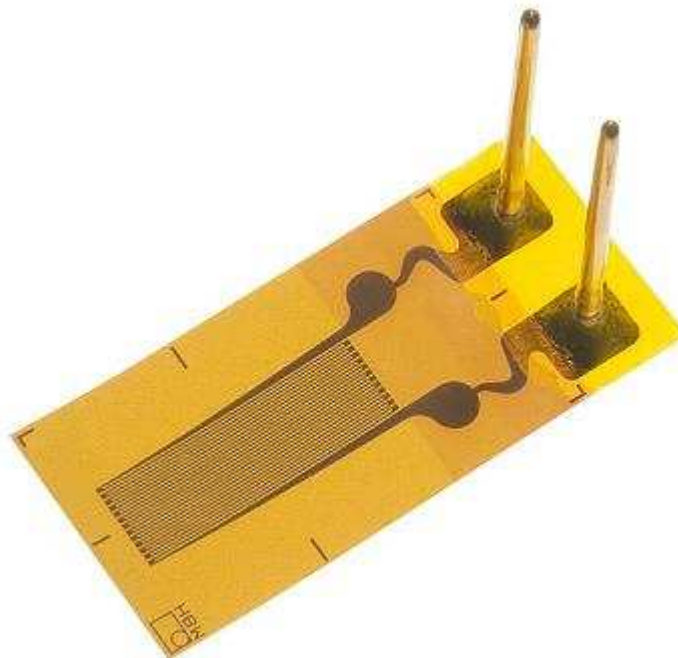


Photo n°5 : Jauge de contrainte

Une jauge de contrainte (voir photo ci-contre) repose sur le principe d'extensibilité d'un fil résistif de section constante. En agissant par traction ou compression sur ce fil très fin, celui-ci devient plus ou moins long par rapport à son état de repos (son état initial, où la déformation est nulle). On mesure alors cette variation de résistance entre l'état au repos et l'état sous contrainte. Comme la variation de résistance électrique due à la déformation d'un seul fil est très faible, le fil est disposé en « lacet » de manière à ce que la déformation affecte en même temps plusieurs tronçons du fil.

Les jauges constituées d'un fil très fin déposé en lignes parallèles sur un substrat et noyées dans une enveloppe de protection, sont collées directement sur le corps d'épreuve dont elles suivent la déformation. La détection de la variation relative de la résistance nécessite un appareillage complémentaire spécifique (pont de Wheatstone le plus souvent).

Application théorique :

La variation relative de la résistance $\Delta R/R$ est égale à son allongement relatif $\Delta l/l$.

La formule $R = \rho \cdot \frac{l}{S}$ nous donne la relation entre la résistance R (en Ω), la longueur du fil l (en m), la section du fil S (en m^2) et une constante dépendant du matériau dont est composé le fil, la résistivité ρ (en $\Omega \cdot m$).

Le passage au logarithme népérien de la relation précédente nous donne :

$$\ln(R) = \ln(\rho) + \ln(l) - \ln(S)$$

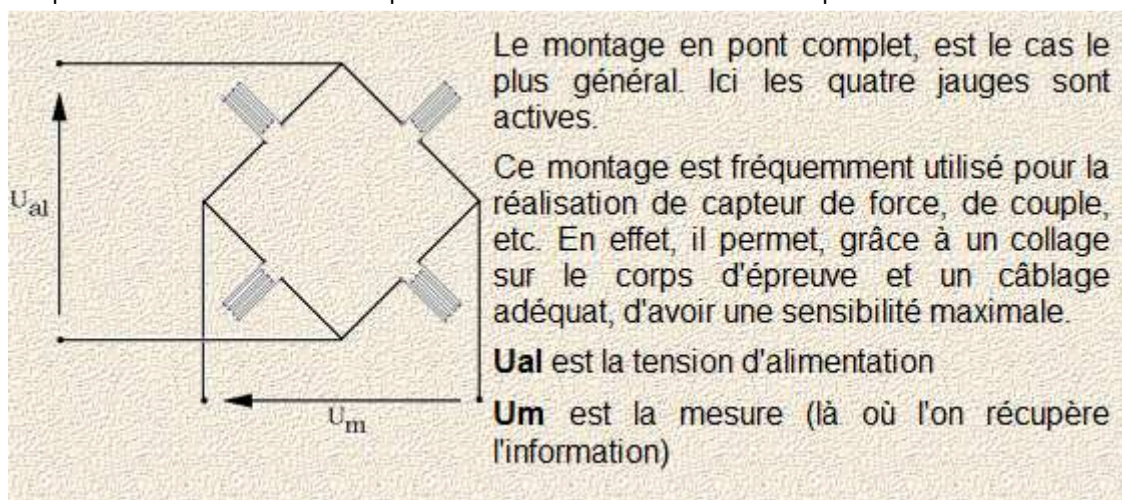
Dans l'objectif d'un calcul d'erreur, la relation précédente s'écrit :

$$\ln(R) = \ln(\rho) + \ln(l) + \ln(S)$$

En différenciant l'égalité précédente et en considérant que la section du fil demeure inchangée (ainsi que la résistivité du matériau), on obtient:

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta l}{l}$$

L'ordre de grandeur du rapport $\frac{\Delta l}{l}$ est de quelques centaines de micromètre par mètre (mesure effectuée à l'IUT dans le département « mesures physiques » avec Monsieur Didier Jacquinet) ce qui signifie qu'un mètre de matériau sur lequel est collée une jauge de contrainte subit une déformation d'une centaine de micromètres au plus. Cette faible valeur du rapport $\frac{\Delta l}{l}$ implique donc une faible variation de la résistance (ΔR) et oblige donc l'expérimentateur à réaliser un pont de Wheatstone et une amplification efficace et conséquente de la tension à la sortie de ce pont.

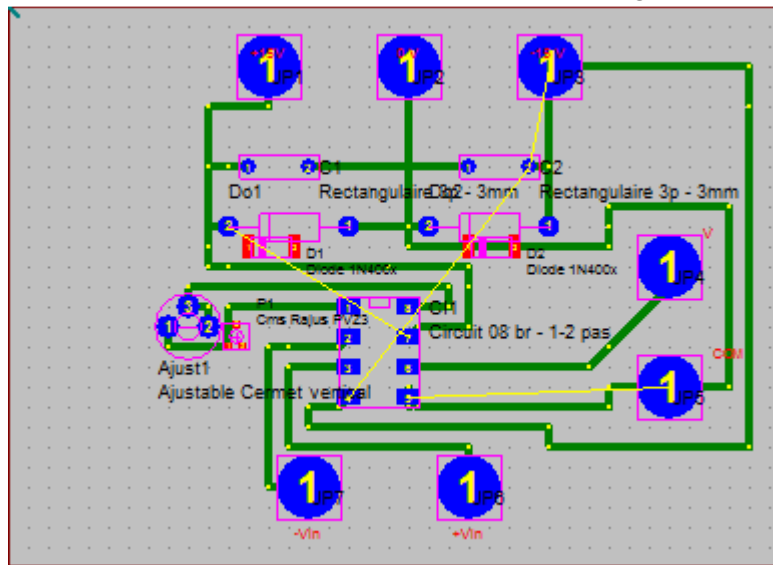


C. Amplification

L'amplification a été effectuée à l'aide d'un amplificateur d'instrumentation, idéal lorsque la tension délivrée par le capteur est très faible. Il s'agit de l'amplificateur de différence AD 620 (voir ses caractéristiques en annexe 2).

Le circuit électrique permettant l'amplification du signal de sortie du capteur devait permettre :

- d'alimenter l'amplificateur à l'aide d'une tension (+15 V/0 V/-15 V),
- de recueillir la tension de sortie du capteur à jauge de contrainte,
- de régler l'amplification à l'aide d'un potentiomètre avec bouton,
- de protéger l'amplificateur différentiel d'une alimentation inversée,
- et enfin de disposer de deux bornes permettant de recueillir le signal amplifié.



La carte obtenue est celle qui figure ci-dessous :

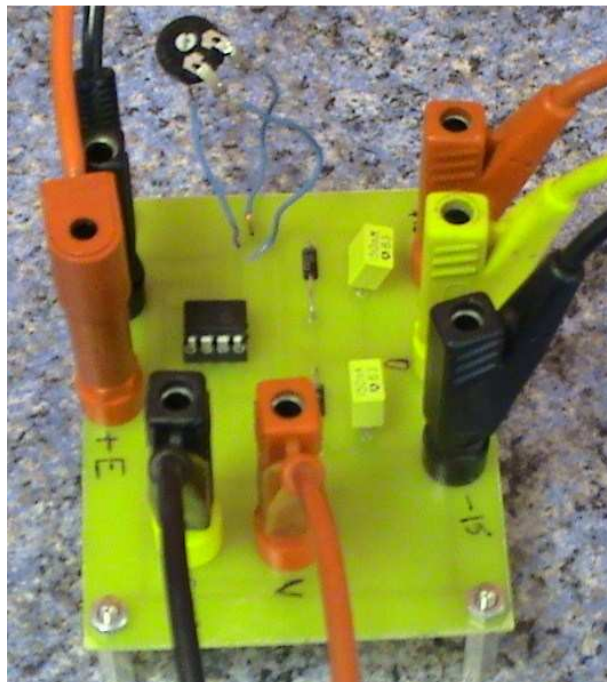


Photo n°6 : Carte de l'amplification différentielle

L'amplification effectuée est insuffisante et on adjoint un deuxième étage d'amplification à l'aide d'un amplificateur opérationnel permettant de réaliser un montage amplificateur non inverseur de gain réglable compris entre 1 et 10. Ce gain peut en effet être réglé à l'aide d'un potentiomètre de 10 k Ω .

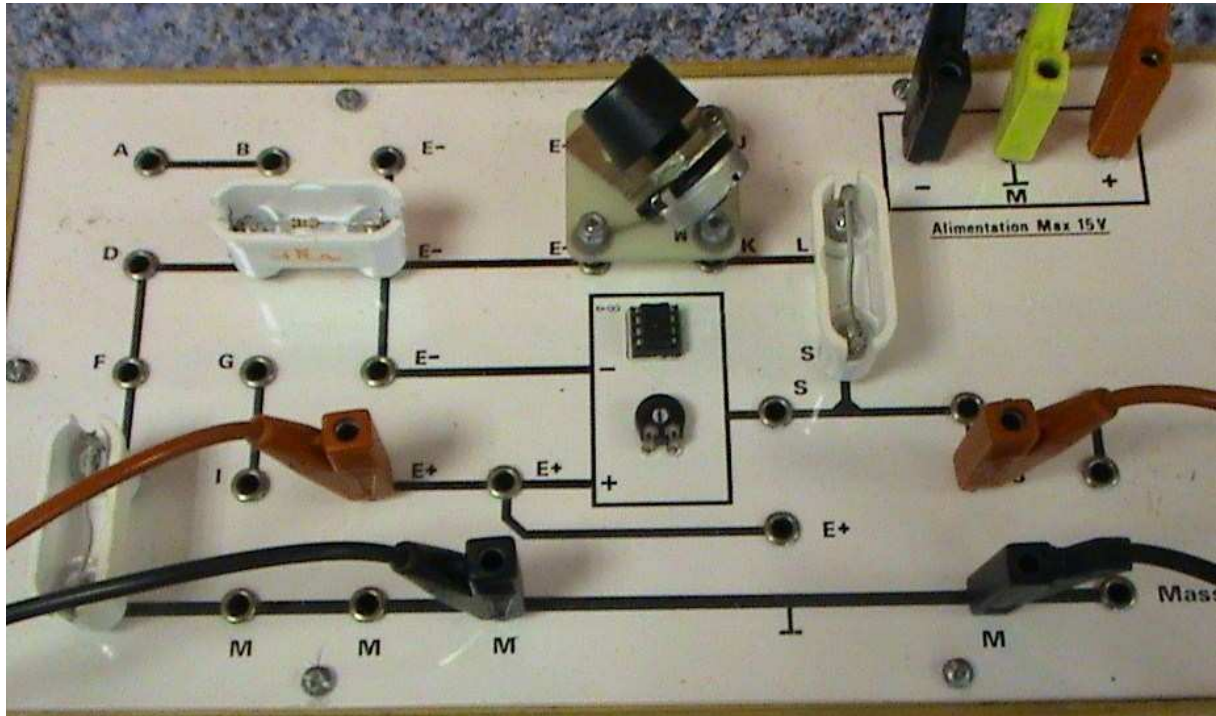


Photo n°7 : Montage amplificateur non inverseur de gain réglable

III/ Traitement informatique

A. Présentation de La puce informatique

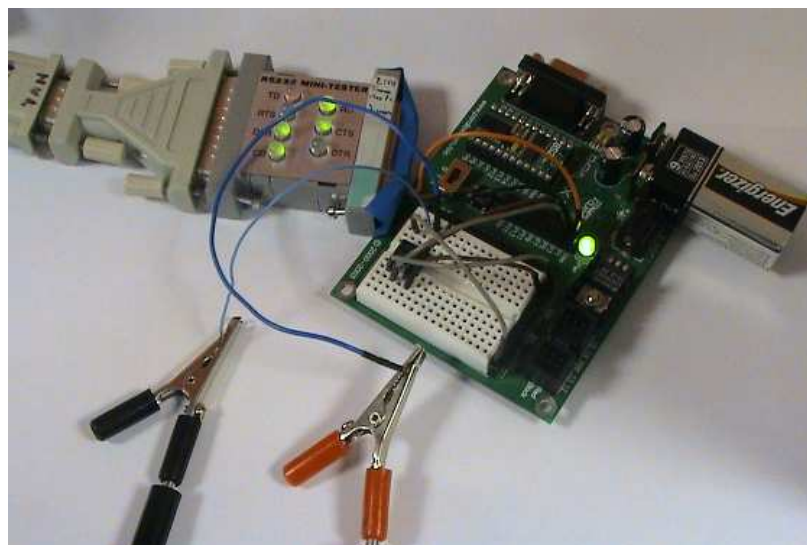
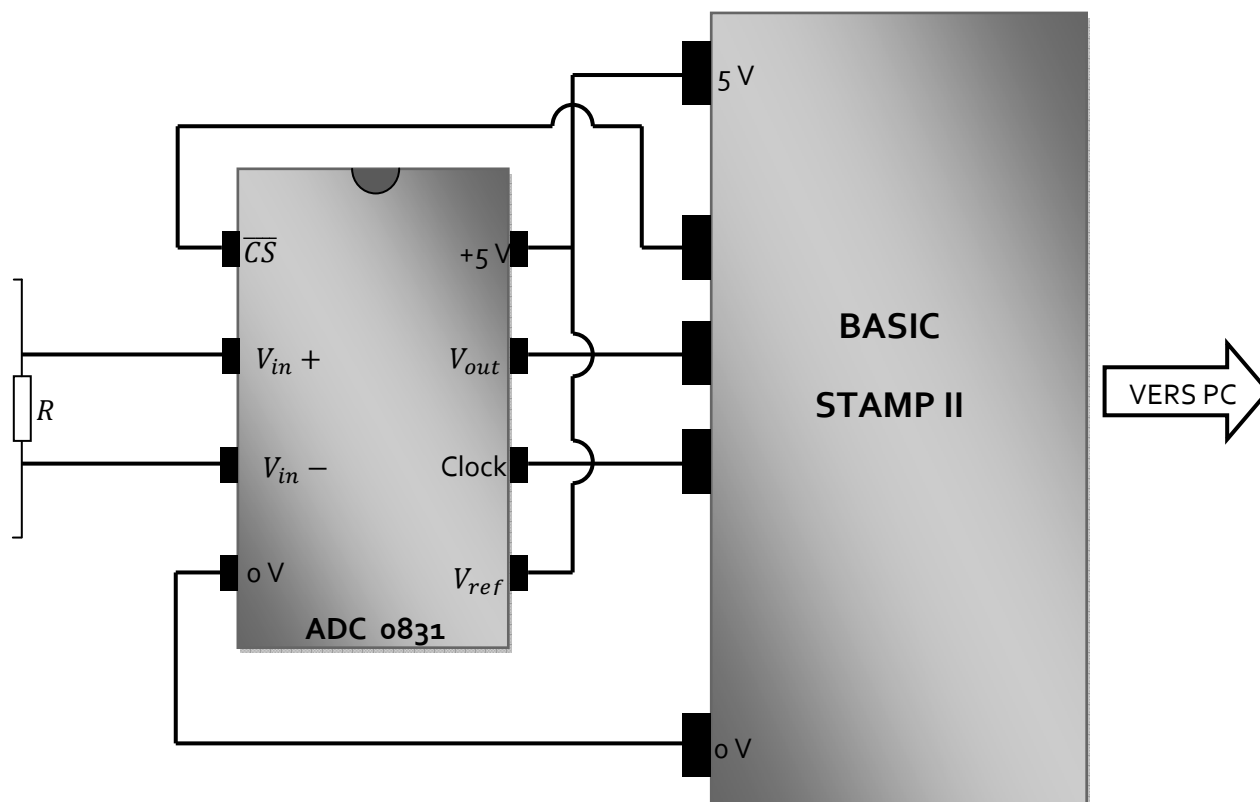


Photo n°8 : Puce informatique « Basic stamp »

La puce informatique est un *BASIC STAMP II*. C'est une puce qui est programmable. Nous l'avons programmé pour qu'elle joue le rôle de voltmètre et qu'elle envoie les données sur un ordinateur. Pour qu'elle remplisse ses fonctions de voltmètre, nous avons couplé le Basic Stamp à un convertisseur analogique numérique (un ADC 0831). Le Basic Stamp en lui-même ne joue pas le rôle de voltmètre, mais il commande l'ADC afin que ce dernier recueille la valeur de tension à la sortie des deux dispositifs. C'est pourquoi nous n'allons pas entrer dans les détails du Basic Stamp mais nous allons plutôt présenter l'ADC.

Schéma du dispositif informatique :



Présentation de l'ADC 0831 :

L'ADC 0831 est un petit composant électronique à plusieurs pattes. Il est complètement dépendant du Basic Stamp. Nous allons expliquer rapidement son fonctionnement. Sur ce schéma, l'ADC prend la tension aux bornes de la résistance R .

- Les pattes V_{in+} et V_{in-} sont les pattes d'entrée du signal analogique. Le signal analogique est ensuite converti dans l'ADC et ressort sous forme numérique sur la patte V_{out} .
- L'ADC est alimenté en $+5V - 0V$ par le Basic Stamp. La patte V_{ref} est la tension de référence. C'est une tension limite qui fixe la plus haute tension que l'ADC pourra convertir. En l'occurrence, nous avons connecté la patte V_{ref} à la tension d'alimentation $5V$. Ainsi, l'ADC ne pourra pas mesurer une tension supérieure à $5V$ entre les deux pattes V_{in+} et V_{in-} .
- La patte \overline{CS} est en réalité l'interrupteur de l'ADC. Lorsque le Basic Stamp veut que l'ADC fasse une mesure de tension, il envoie un signal via la patte \overline{CS} . En recevant ce signal sur sa patte \overline{CS} , l'ADC commence une mesure de tension, la convertit, et l'envoie au Basic Stamp.

- La patte Clock permet de synchroniser les deux puces. Lors d'une conversion, un signal de fréquence 100 MHz transite via la patte Clock. Cela permet de synchroniser l'envoi et la réception des données.

Une fois que le Basic Stamp a reçu le signal numérique envoyé par l'ADC, il est chargé de l'envoyer à l'ordinateur via la liaison série. Des programmes sur l'ordinateur permettent de récupérer la valeur de tension et de l'analyser.

B. Analyse des données du dispositif par palier

Le programme réalise une série de 1000 mesures de tensions qu'il va trier par la suite: il repère d'abord les valeurs non cohérentes qu'il supprime (exemple : $1.98.10^{-4}$ est trop petite) et calcule la moyenne des valeurs restantes. Il connaît ainsi la valeur de tension aux bornes de la résistance R (voir schéma de la partie 1)

Il doit enfin retrouver le volume d'eau présent dans la cuve. Comme les courbes du volume en fonction de la tension n'étaient pas des droites, les calculs à partir d'une fonction auraient été imprécis.

Nous avons donc préféré que le programme détermine s'il y a eu changement de niveau ou non, ce qui est plus fiable (mesure par paliers).

Entre deux niveaux, la différence de tension est d'au moins 0,3 V, le fond de la cuve étant le niveau 0. Le programme garde donc en mémoire la valeur de tension de la dernière fois qu'un niveau a été franchi.

Il soustrait ensuite cette valeur à celle qui vient d'être mesurée et analyse le résultat. Si le résultat de cette soustraction est supérieur à 0,3, il en déduit qu'il y a eu changement de niveau.

Le programme peut donc calculer, sachant si un niveau a été passé ou non d'une part, et les dimensions de la cuve d'autre part, le volume d'eau présent dans celle-ci.

C. Analyse des données du dispositif à jauges de contrainte

Avec ce système, il existe une relation de proportionnalité entre la tension et la hauteur de liquide présent dans la cuve. Le programme, en ayant récupéré la valeur de tension à la sortie des amplificateurs, peut donc très facilement calculer la hauteur de liquide présent dans la cuve.

Or, un problème se pose : comme le capteur à jauges de contrainte peut se déformer dans les deux sens, il nous arrivait sous certaines conditions de récupérer des valeurs de tensions négatives. Or, le convertisseur analogique-numérique ne prend en charge que les valeurs positives.

Le problème des tensions négatives se pose lorsque la cuve est vide ou peu remplie car la poussée d'Archimède est inférieure au poids du plongeur. Pour résoudre ce problème, nous avons branché en série un générateur de tension continue réglable. Ainsi, avant d'introduire le liquide dans la cuve, il nous est possible de régler la valeur de tension récupérée à zéro volt.

Une fois les réglages effectués, une tension exploitable est recueillie par l'ordinateur. Celui-ci fait la moyenne de 1000 mesures de tension à la sortie de l'amplificateur opérationnel. Un étalonnage nous a permis de connaître la relation de proportionnalité existant entre la tension et la hauteur de liquide présent dans la cuve. En exploitant cette relation, le programme peut en déduire la hauteur de liquide dans la cuve.

Conclusion :

Nous avons donc trouvé un système fiable capable de déterminer la hauteur d'un liquide présent dans une cuve de façon automatique. Cependant, d'autres systèmes remplissant les mêmes fonctions existent. Nous pouvons par exemple citer un dispositif s'appuyant sur un capteur de pression. En effet, plus la hauteur de liquide dans une cuve est élevée, plus la pression au fond de la cuve est élevée. De même, nous pouvons aussi penser à un dispositif à ultra son. En plaçant un émetteur d'ultra son ainsi qu'un récepteur en haut d'une cuve, et en calculant la durée nécessaire à une salve pour faire un aller-retour, il devient très facile de calculer la quantité de liquide dans la cuve.

Annexes :

Annexe n°1 : Caractéristiques du capteur de pesage AQ5,

Annexe n°2 : Caractéristiques de l'amplificateur de différence AD 620.

Sources :

Site de Monsieur Fortier dont l'adresse est <http://francis.fortier.free.fr>.

Remerciements :

A Monsieur Claisse, proviseur du lycée Jean Perrin,

A Monsieur Jacquinot, enseignant à l'IUT de mesures physiques de Lille,

A Maxime Barge, adjoint technique principal de laboratoire au lycée Jean Perrin.