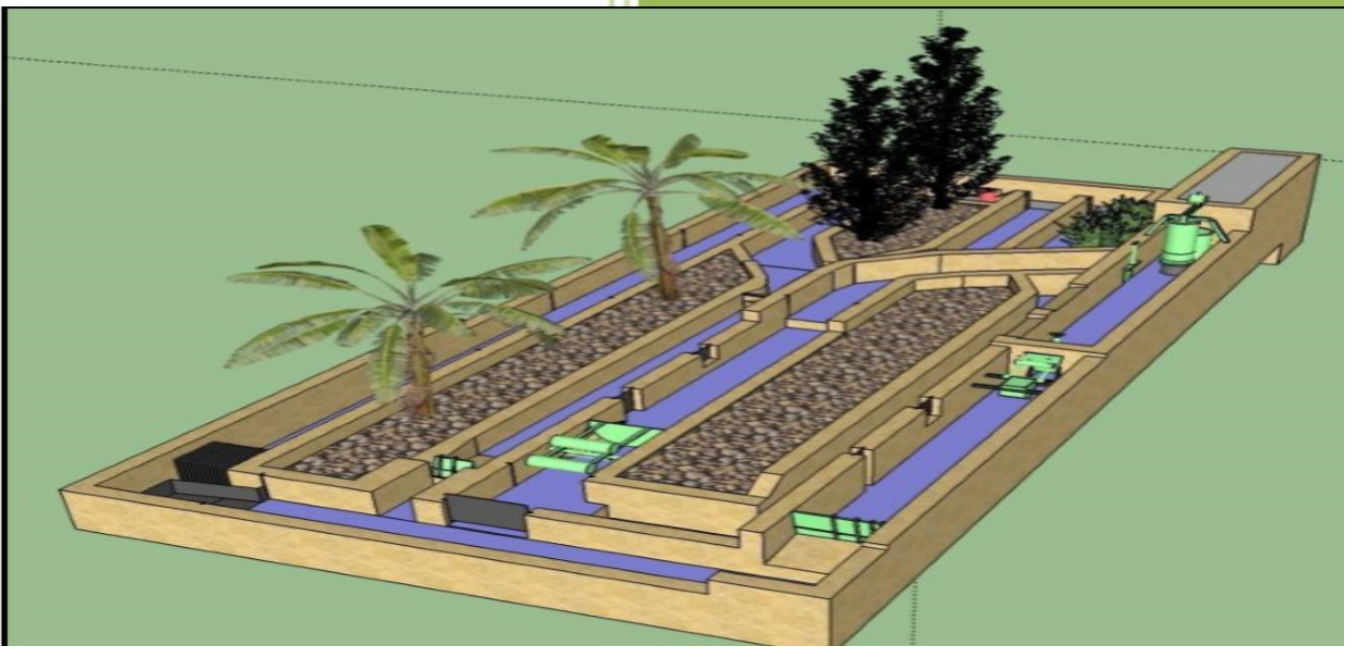


Etude de débits dans un réseau de distribution d'eau



Objectifs :

- Mesurer le débit d'eau en temps réel dans un canal à ciel ouvert.
- Étudier le temps d'établissement d'un régime permanent lors d'une modification de débit.

Plan

1- Acquisition des données

- 1.1 Présentation du canal
- 1.2 Le capteur de pression
- 1.3 Principe du programme Python

2- Mesure de débits

- 2.1 Passage de la hauteur au débit volumique
- 2.2 Étalonnage et mesures de débits en temps réel
- 2.3 .Vérification des mesures de débit

3- Étude de l'établissement d'un régime stationnaire

- 3.1 Établissement d'une formule
- 3.2 Calcul d'un ordre de grandeur du temps d'établissement
- 3.3 Résultats



1. Acquisition des données

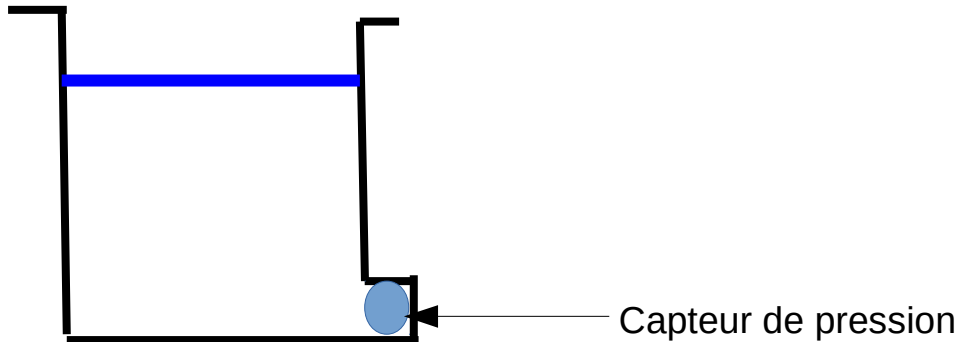
1.1. Présentation du canal

J'ai travaillé sur un canal à ciel ouvert situé à SupAgro à Montpellier capable de délivrer un débit de 60L/s. Je me suis intéressé à l'étude de la hauteur au voisinage d'un déversoir « en V ».



1.2 Présentation du capteur de pression

1.2.1 Position



Le capteur se situe en dehors de l'écoulement. On suppose que l'écoulement est unidirectionnel et que l'écoulement est stationnaire. Dans ce cas, l'application de l'équation d'Euler à une particule fluide montre que la pression est liée linéairement à la hauteur par la relation :

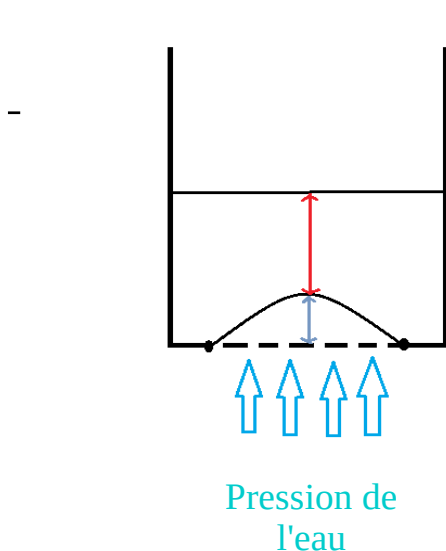
$$P = P^o + \rho gh$$

Nous vérifierons alors cette linéarité lors de l'étalonnage du capteur.

1.2.2 Fonctionnement

Le capteur de pression est un condensateur dont l'une des armatures (celle du haut sur le schéma) est fixe et la position de l'autre est variable (X). Ainsi, la capacité du condensateur est variable et nous permet de remonter à la pression. En effet, notons :

- k la constante de raideur de l'armature mobile en N/m
- S est la surface de l'armature.



$\longleftrightarrow e$ $\longleftrightarrow X$

A l'équilibre on a **$P.S=k.X$**

De plus,

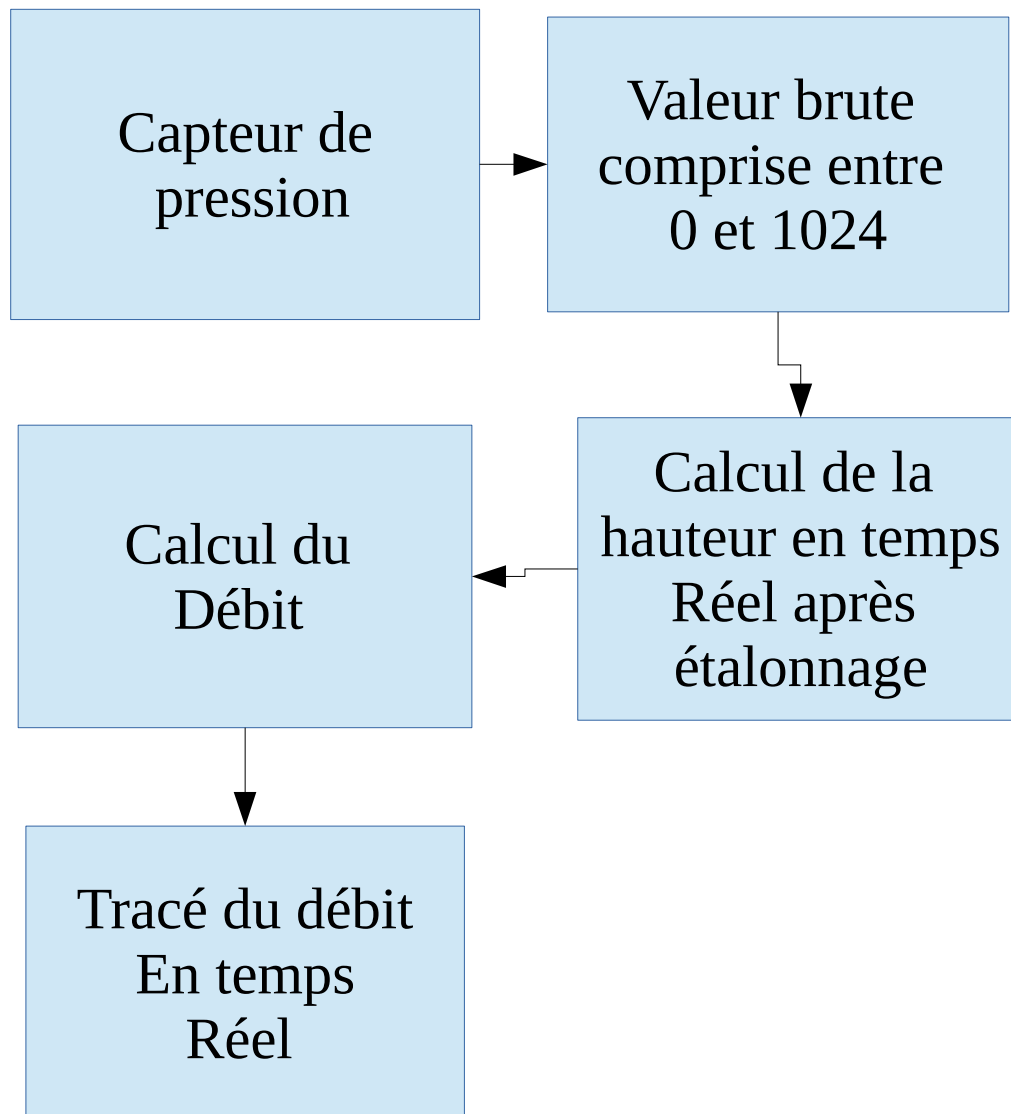
Donc, $C = \epsilon_0 \epsilon_r S \frac{1}{e}$

D'où $\frac{de}{e} + \frac{dC}{C} = 0$ soit $\frac{\Delta e}{e} \approx \frac{-\Delta C}{C}$

Et $\Delta e = -\Delta X = \frac{-S}{k} \cdot \Delta P$

On peut alors remonter à la pression en étudiant la variation de la capacité du condensateur (voir annexe)

1.3. Principe du programme Python



Avec mon contact, nous avons établi un programme qui permet de mesurer les données « brutes » en sortie des capteurs de pression en temps réel sous forme de liste et les stocke dans un tableau (fichier « .csv »). A l'aide de cette partie de code, j'ai d'abord réalisé un étalonnage pour vérifier que la relation entre les valeurs brutes entiers compris entre 0 et 1023 correspondant à la pression étaient bien liées à la hauteur par une fonction affine.

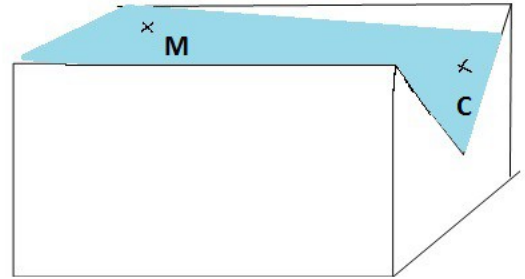
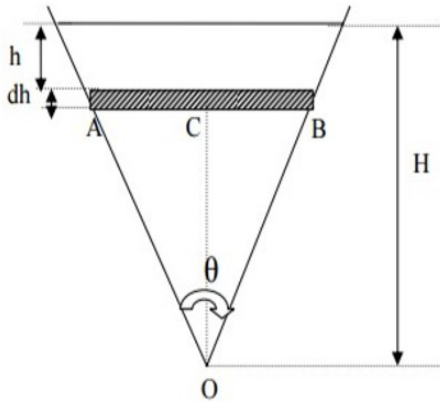
J'ai, par la suite, déterminé une relation liant la hauteur d'eau au voisinage d'un déversoir « en V » au débit volumique. J'ai alors utilisé la relation établie entre les valeurs brutes en sortie du capteur et le débit volumique pour écrire les lignes de codes permettant de tracer le débit en temps réel.

La partie suivant donne les détails de chacune des étapes.

2. Mesures de débits

2.1. Passage de la hauteur d'eau au débit volumique

2.1.1. Débit théorique



On applique la formule de Bernoulli entre M et C en supposant que l'eau est un fluide parfait et que l'écoulement est irrotationnel, incompressible et stationnaire.

On fait l'hypothèse d'un jet homocinétique en B donc $P_B = P_0$.

$$\frac{V_M^2}{2} + \frac{P_0}{\rho} + gH = \frac{V_C^2}{2} + \frac{P_0}{\rho} + g(H - h)$$

On considère que $V_M \ll V_C$ car la section en amont est petite devant la section en aval.

Il vient alors :

$$V = \sqrt{2gh}$$

La surface élémentaire est donnée par :

$$dS = AB \cdot dh = 2 \tan\left(\frac{\theta}{2}\right) \cdot (H - h) dh$$

$$\text{D'où } dQ = V(h) \cdot dS$$

$$\text{Donc } Q = \int_0^H \sqrt{2gh} \cdot 2 \tan\left(\frac{\theta}{2}\right) \cdot (H - h) dh$$

$$Q = \sqrt{2g} \cdot 2 \tan\left(\frac{\theta}{2}\right) \cdot \left[\frac{2}{3} H \cdot h^{3/2} - \frac{2}{5} h^{5/2} \right]_0^H$$

$$Q = \frac{8}{15} \tan\left(\frac{\theta}{2}\right) \sqrt{2g} \cdot H^{5/2}$$

2.1.2. Passage du débit théorique au débit réel

On définit au préalable :

le coefficient de vitesse comme étant le rapport entre la vitesse réel de l'écoulement et la vitesse théorique :

$$C_v = \frac{v_{réel}}{v_{théorique}} = \frac{\sqrt{2gH_{réel}}}{\sqrt{2gH_{théorique}}}$$

$H_{théorique}$ et $H_{réel}$ représentent les charges (théorique et réelle) de l'écoulement. Les pertes de charges font que $H_{réel}$ varie entre 0,95 et 0,99.

le coefficient de contraction comme étant le rapport la section contractée et la section réelle de l'orifice :

$$C_c = \frac{S_{contractée}}{S_{orifice}}$$

La valeur de C_c varie entre 0,61 et 0,69 suivant la forme de l'orifice, la charge du liquide au dessus de l'orifice. En général on prend une valeur autour de 0,64.

le coefficient de débit, définie comme étant le rapport entre le débit réel sortant de l'orifice et la débit théorique :

$$C_d = \frac{Q_{réel}}{Q_{théorique}} = C_v \cdot C_c$$

$C_d=0,58$ qui est la valeur usuelle pour cette vanne.

Finalement, on obtient une formule du débit réel qui ne dépend que de la hauteur d'eau H .

$$Q = \frac{8}{15} C_d \tan\left(\frac{\theta}{2}\right) \sqrt{2g} \cdot H^{\frac{5}{2}}$$

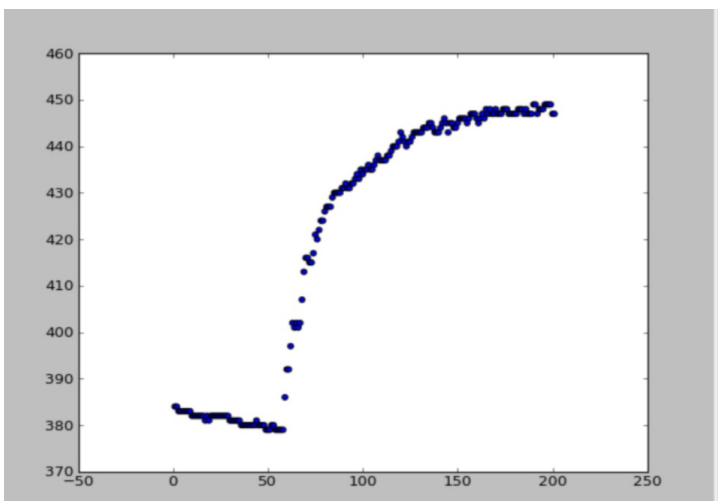
2.1.3. Code pour tracer le débit :

```
• while bLoop:
•     a+=1
•     start_time = time.time()
•     lD = GetData()
•     if lD == False:
•         bLoop=False
•     else:
•         csvOut.writerow(lD)
•         lTD.append(lD)
•         if lD[1]!="":
•
•             Q=float((8/15))*0.58*sqrt(2*9.81)*(((0.00107*float(lD[4])-0.155)-0.1)**2.5)
•
•             plt.scatter(a,Q)
•             plt.draw()
• time_sleep = float(dPrm["ts"]) - (time.time() - start_time)
•
• #print(time_sleep)
• if time_sleep > 0:
•     time.sleep(time_sleep)
•     time.sleep(1)
•
• # Fermeture du fichier de chronique
• fCsv.close()
```

« lD » = liste des données à un instant t

Formule du débit
tracé

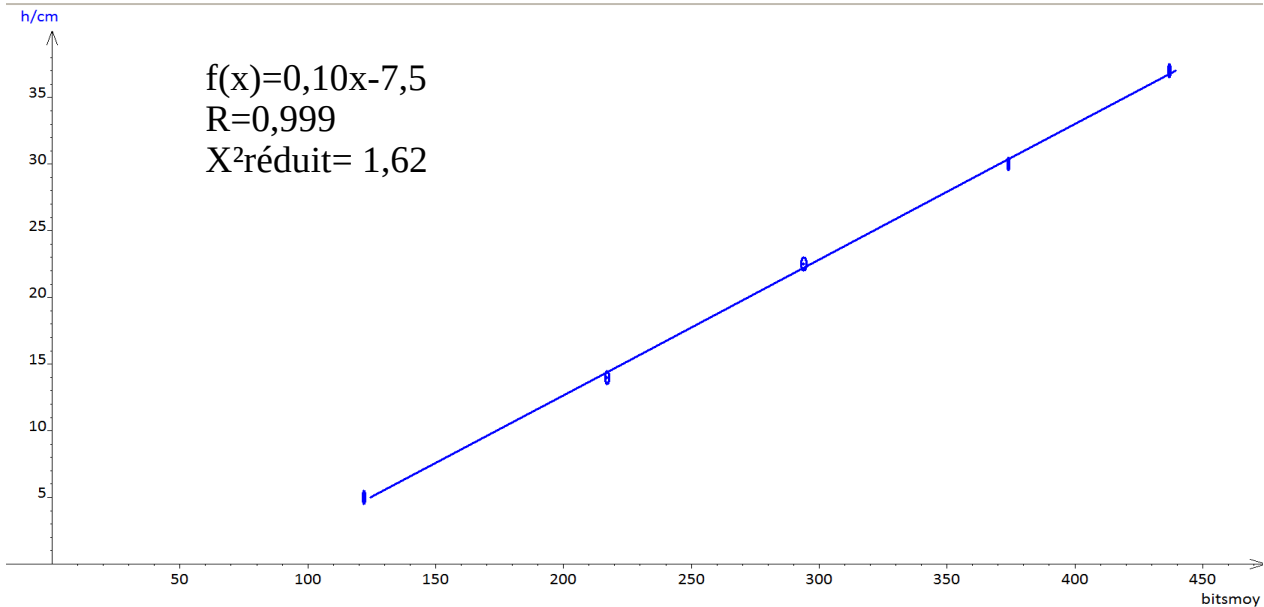
Partie du code permettant de tracer le débit en temps réel



Exemple du résultat du code

2.2. Étalonnage et mesure de débits en temps réel

On réalise plusieurs acquisitions en mesurant la hauteur d'eau à la règle et on note la valeur moyenne de la valeur brute entière obtenue. On observe que la relation entre la valeur brute et la hauteur est bien linéaire.



Hauteur en cm en fonction de la valeur brute affichée par le programme

Incertitudes :

- On propose un calcul d'incertitudes de type A sur la hauteur donnée informatiquement. Notons x la valeur brute obtenue en sortie du programme.

L'incertitude type est donnée par :

$$u_x = \frac{1}{\sqrt{N}} \cdot \sigma$$

Où N est le nombre de mesures réalisées et σ l'écart-type de la série de mesures.

- Typiquement, pour $N=40$, on trouve

$$u_x = 0,4$$

Donc $u_h = 0,1 \cdot u_x$ (car $h = a \cdot x + b$)

Finalement, $u_h = 0,04 \text{ cm}$

- Pour l'incertitude sur la mesure de la hauteur, on prend une incertitude (de type B) type de $0,5 \text{ cm}$.
- On peut alors mesurer la hauteur (et donc le débit) en temps réel de manière précise.**

2.3. Vérification des mesures de débit

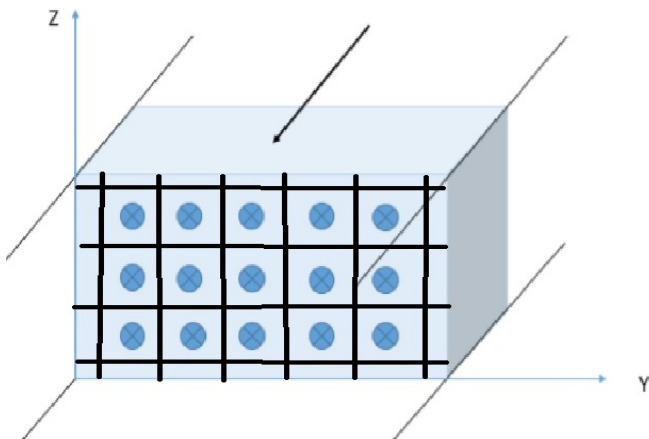
2.3.1 Mesures de vitesses

J'ai cherché à vérifier la validité de la formule en mesurant le débit directement dans le canal à l'aide d'un courantomètre électromagnétique.

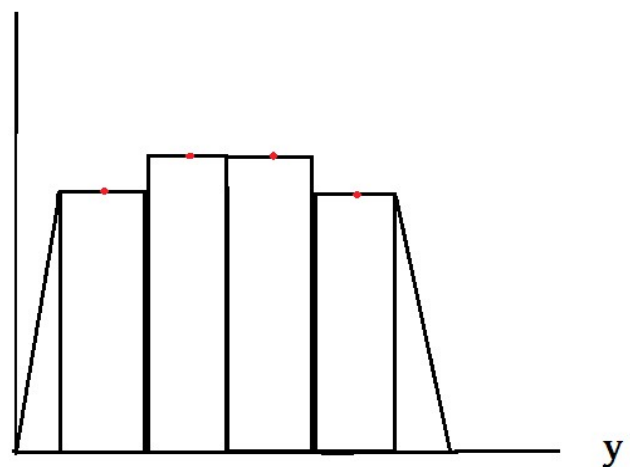


J'ai découpé la section en un quadrillage et intégré par la méthode des rectangles en considérant que la vitesse était constante sur chaque section de hauteur **8cm** et de largeur **13,4 cm**. De plus, j'ai considéré que la vitesse de l'écoulement était nulle sur les bords. Pour intégrer, j'ai considéré le profil de vitesse suivant (à altitude fixée).

Vitesse



Profil des mesures



Profil de vitesses choisi

L' eau constitue un conducteur en mouvement dans un champ $\vec{B}$ fixe .

La tension U induite aux bornes des deux électrodes est donnée par

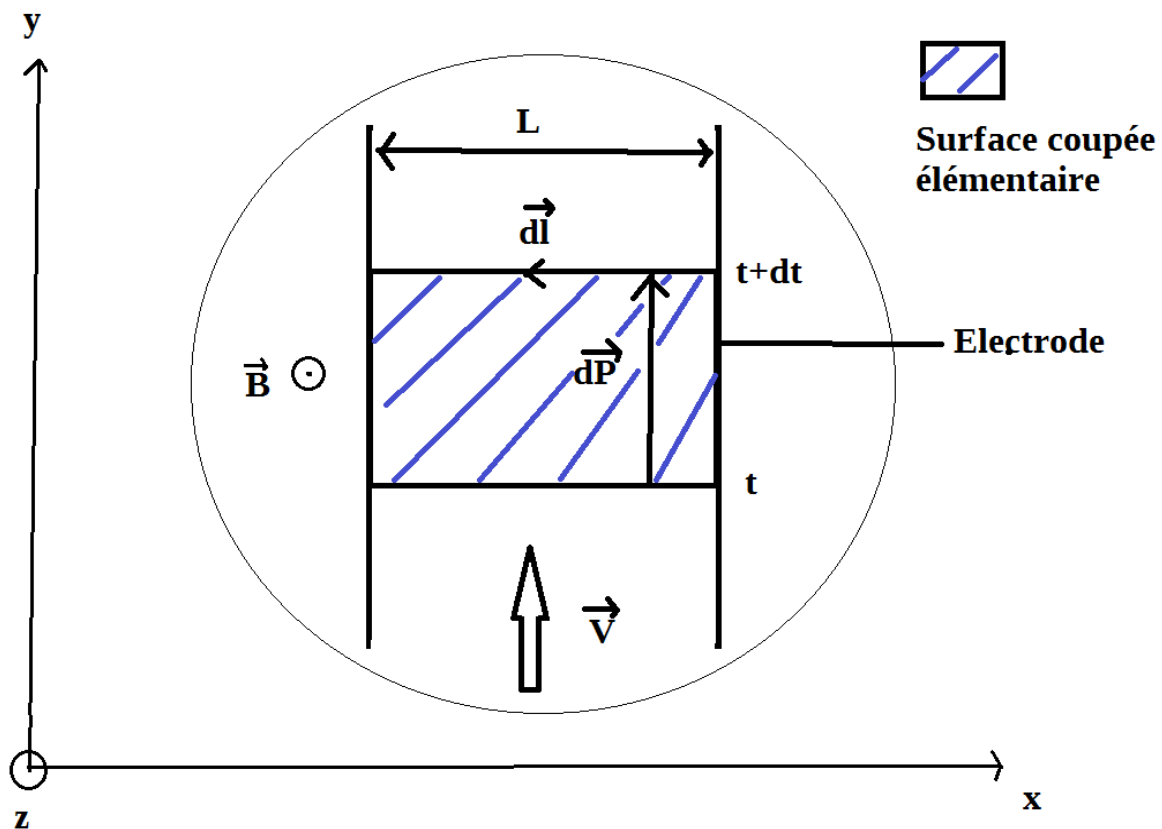
$$U = -\frac{d\Phi_c}{dt}, \text{ où } \Phi_c \text{ est le flux coupé, c'est-à-dire le flux de } \vec{B} \text{ à travers}$$

la surface élémentaire coupée engendrée par $d\vec{P}$ (déplacement élémentaire de l' eau) et $d\vec{l}$.

On a alors $d^2\Phi_c = B \cdot dP \cdot dl = B \cdot v dt \cdot dl$

Finalement , $U = -VLB$

Ainsi , un courantomètre permet de déterminer la vitesse de l' écoulement en un point .



On somme ensuite pour avoir le débit total :

$$Q = \sum_{i,j} v_{i,j} S_{i,j}$$

où $v_{i,j}$ est la vitesse dans la section $S_{i,j}$

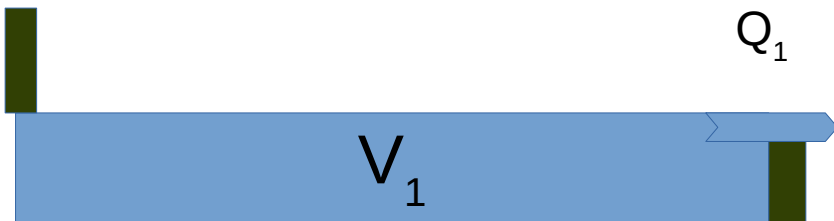
3. Étude de l'établissement d'un régime stationnaire

Une fois que j'ai pu mesurer le débit de manière précise dans un canal, je me suis intéressé aux problèmes que soulevaient le changement de débit dans un canal. Le passage d'un débit à un autre n'étant pas instantané, j'ai alors calculé puis mesuré le temps d'établissement d'un débit en régime permanent.

3.1. Établissement d'une formule

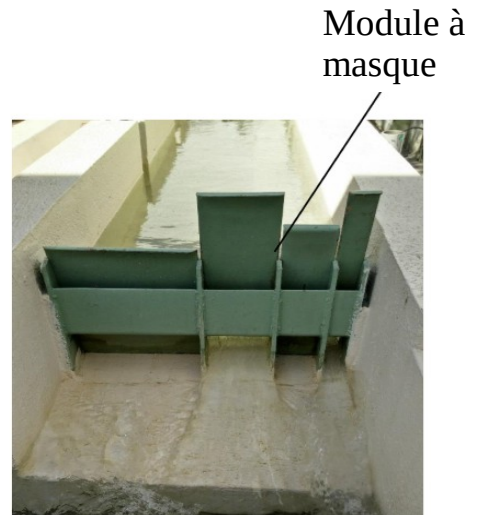
3.1.1 Premier modèle

A t=0

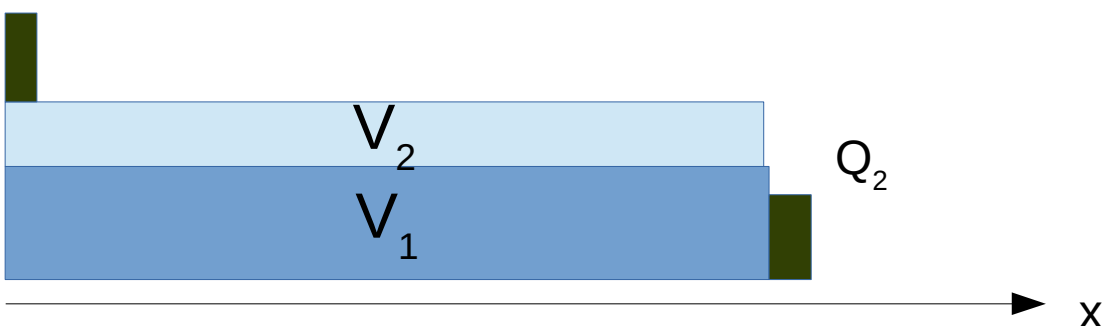


Module à
masque

Vanne
« en V »



A t= τ



Pour avoir un ordre de grandeur du temps caractéristique d'établissement d'un régime permanent, on considère que :

$$dQ = v \cdot dS = \frac{dx}{dt} \cdot dS$$

et $dx \cdot dS = dV$ volume élémentaire

$$\text{donc } dQ = \frac{dV}{dt}$$

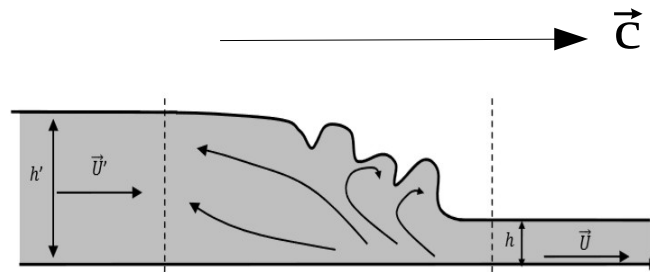
$$\text{Ainsi, } \Delta t \approx \frac{\Delta V}{\Delta Q}$$

Pendant la durée τ , le débit est passé de Q_1 à Q_2 et le volume de V_1 à $V_1 + V_2$.

Ainsi,

$$\tau = \frac{V_2}{Q_2 - Q_1}$$

3.1.2 Second modèle : le ressaut hydraulique



On considère que la levée de la vanne engendre la propagation d'un ressaut hydraulique et que lorsqu'il atteint le déversoir, le régime stationnaire est atteint.

– Par un bilan de quantité de mouvement (dans le référentiel du ressaut qui est Galiléen), on montre que :

$$U'^2 h' - U^2 h + \frac{g}{2} (h'^2 - h^2) = 0$$

– De plus, la conservation du débit volumique donne :

$$U' h' = U h$$

– Ainsi, il vient :

$$U' = \sqrt{\left(\frac{g}{2} h \left(\frac{h}{h'} + 1 \right) \right)}$$

– En considérant que U' est constante, on a

$$\tau = \frac{L}{(U' + c)} \quad \text{où } L \text{ est la longueur du canal et } c \text{ est la célérité du ressaut}$$

qui est de l'ordre de $c \approx \sqrt{gh'}$

3.2. Calcul d'un ordre de grandeur du temps d'établissement

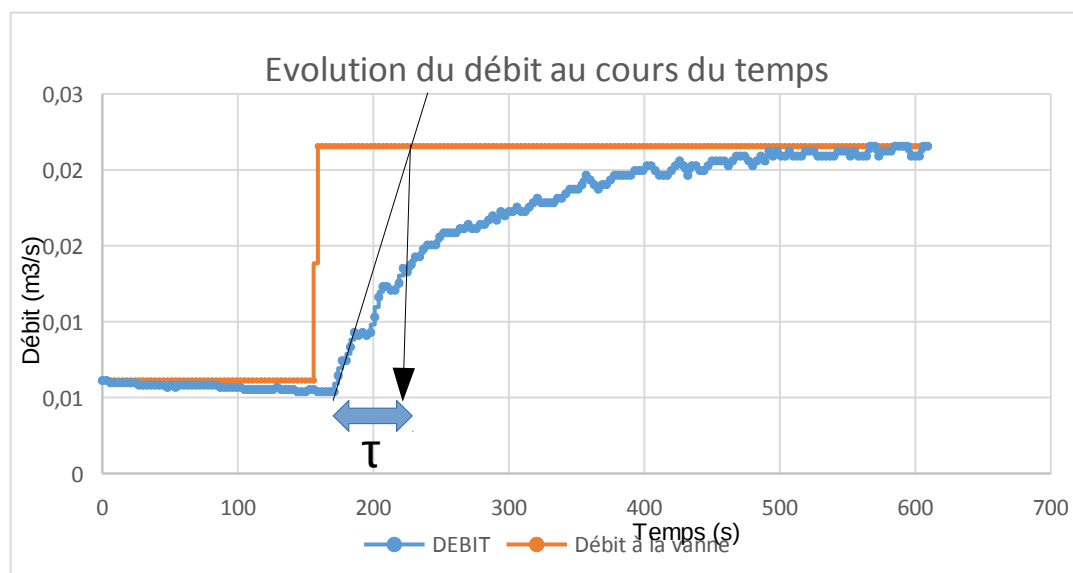
- Largeur du canal : $l=67$ cm.
- Longueur du canal : $L=17,8$ m.
- Variation de hauteur pour un passage de 5 L/s à 20L/s : 7,5 cm.
- Hauteur avant ouverture du module à masque : $h=25$ cm
- Hauteur au voisinage du déversoir lorsque le régime est établi : $h'=32,5$ cm

→ $\tau = 60$ s pour le premier modèle
→ $\tau = 5,7$ s pour le second modèle

Le temps caractéristique est nettement plus court pour le ressaut. En effet, dans ce modèle, on considère le déplacement d'une marche d'eau et que lorsque cette marche arrive au déversoir, le régime permanent est atteint. On observe lors de l'expérience que ça n'est pas le cas. On voit une onde se surface qui se propage mais le niveau de l'eau continue de monter lorsque ce paquet d'onde a atteint

3.3. Résultats

J'ai fait passer le débit de 5L/s à environ 20 L/s à l'aide d'un module à masque. La courbe d'évolution du débit en temps réel est la suivante :



On semble avoir une réponse du premier ordre, on mesure donc τ par la méthode de la tangente à l'origine. En pratique, on obtient un temps τ d'environ 50s qui est du même ordre de grandeur que le temps théorique du premier modèle.

Conclusion :

Nous avons vu qu'il est possible d'étudier l'évolution du débit d'un canal à ciel ouvert en mesurant la hauteur d'eau et en disposant d'un déversoir « en V ». On peut donc envisager de réguler le débit par ouverture et fermeture de vannes en amont dans un canal. Néanmoins, nous avons remarqué que le temps d'établissement d'un régime stationnaire est significatif (autour d'une minute pour un canal de moins de 20m de long).

On a ici l'exemple d'une vanne électro-mécanique qui pourrait être asservie. Dans ce cas, on devrait prendre en compte dans les calculs le temps d'établissement d'un régime permanent pour ne pas envoyer des commandes trop rapprochées dans le temps à la vanne.



Bibliographie

- Hydrodynamique physique, Broché. De Etienne Guyon, Jean-Pierre Hulin, Luc Petit
- http://fred.elie.free.fr/ressaut_hydraulique.pdf
- https://fr.wikiversity.org/wiki/Phénomènes_d'induction/Loi_de_Faraday, notion de « flux coupé », (mai/juin 2015)
- <http://mon.univ-montp2.fr/claroline/backends/download.php?url=L2h5ZHJvbWV0cmllLnBkZg%3D%3D&cidReset=true&cidReq=FLST403>, courantomètre électromagnétique (mai 2015)

Remerciements et remarque :

- Je tiens à remercier Gilles Belaud et David Dorchies (enseignants chercheurs dans le département « génie rural » de SupAgro à Montpellier) pour leur collaboration.
- Je tiens à signaler que mon travail a été réalisé en binôme avec un autre candidat admissible aux Écoles Normales Supérieures : Victor de Graeve.