

HYDRODYNAMIQUE

-4 - DONNEES DE BASE

4.1 - Régimes d'écoulement - Nombre de Reynolds**4.1.1 Écoulement à surface libre :**

La surface libre est l'interface entre l'air et l'eau. La pression y est égale le plus souvent à la pression atmosphérique.

Les écoulements dans les canaux naturels (rivière) et artificiels (irrigation, assainissement) sont, dans la plupart des cas, des écoulements à surface libre.

4.1.2 Écoulement en charge :

Le régime d'un écoulement se caractérise par la fluctuation temporelle des vitesses et des pressions au sein de la veine liquide.

Les écoulements en charge, sont ceux dans lesquels l'eau remplit complètement la canalisation, c'est le cas notamment des réseaux d'eau potable,

4.1.3 Nombre de Reynolds

(Uniquement pour les fluides newtoniens):

Un écoulement newtonien est caractérisé par son nombre de Reynolds :

$$Re = \frac{V D}{\nu} \text{ ou } Re = \frac{V D \rho}{\mu}$$

Re : nombre de Reynolds (sans dimension)

V : vitesse de l'écoulement (m/s)

D : diamètre hydraulique (m)

ν : viscosité cinématique du fluide (m²/s)

μ : coefficient de viscosité dynamique Pa.s

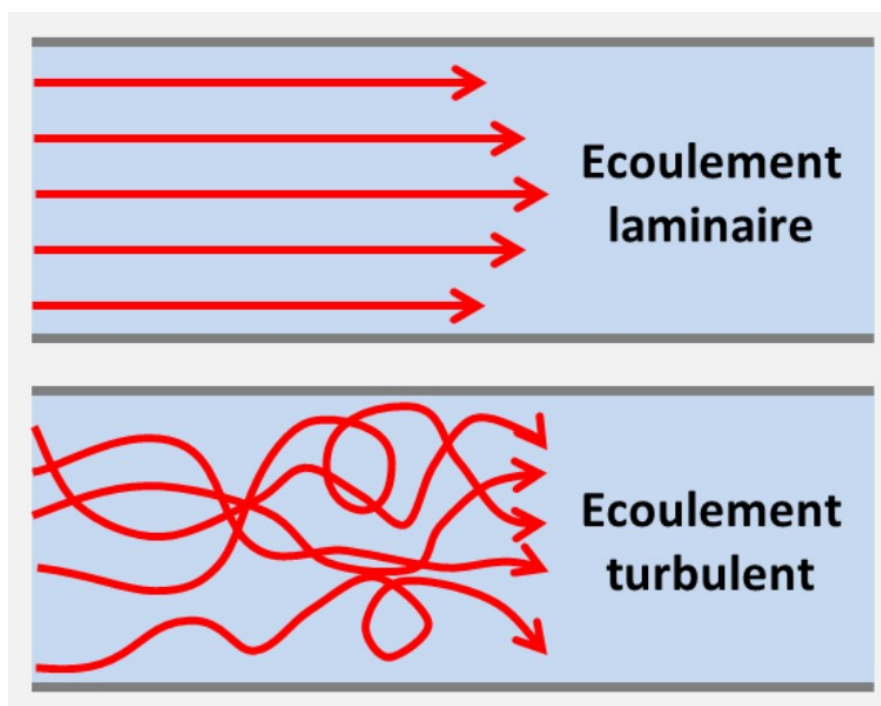
ρ : masse volumique du fluide kg/m³

Ce nombre permet de déterminer si le régime d'écoulement est laminaire ou turbulent :

- $Re < 2\,000$: régime laminaire $\Rightarrow$ les filets fluides sont des lignes régulières, sensiblement parallèles entre elles
- $2\,000 < Re < 4\,000$: régime instable, appelé régime transitoire.
- $Re > 4\,000$: régime turbulent $\Rightarrow$ les filets fluides s'enroulent et s'enchevêtrent sur eux-mêmes

Dans la plupart de nos applications, les écoulements en eau sont turbulents, et ceux-ci font l'objet d'une subdivision en 2 types :

- Régime turbulent lisse ($Re < 100\,000$)
- Régime turbulent rugueux ($Re > 100\,000$)



4.2 - Classification physique des fluides

Les fluides peuvent être classés en :

- fluides parfaits (sans frottement)
- fluides réels (avec frottements)
- fluides incompressibles (liquides)
- fluides compressibles (gaz)

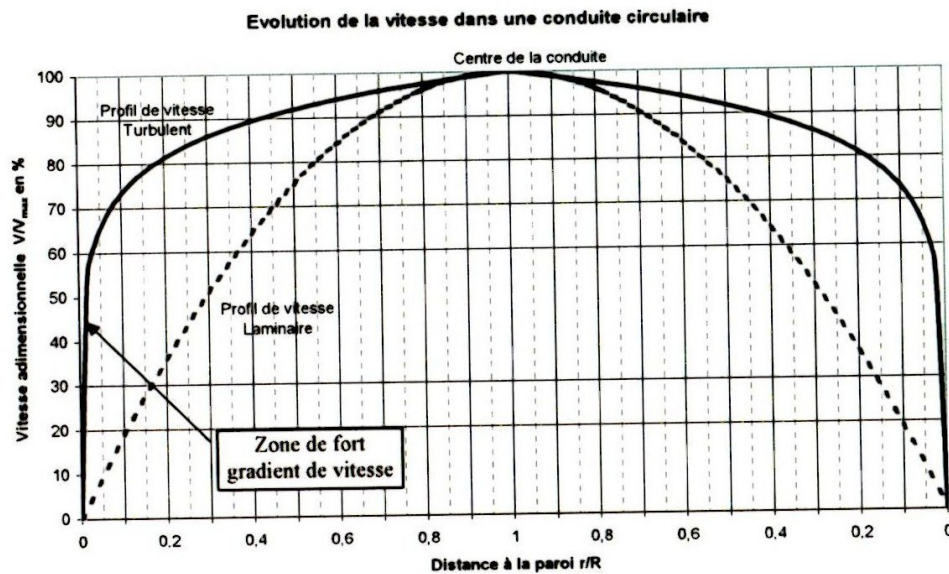
4.3 Ecoulement permanent

L'écoulement d'un fluide est dit permanent si le champ des vitesses des particules fluides est constant dans le temps. Notons cependant que cela ne veut pas dire que le champ des vitesses est uniforme dans l'espace.

L'écoulement permanent d'un fluide parfait incompressible est le seul évoqué par la suite. Un écoulement non permanent conduirait à considérer les effets d'inertie des masses fluides.

4.4 Notion de vitesse

En fonction du régime d'écoulement (laminaire ou turbulent) les forces dans l'écoulement sont différentes. Cela a pour effet, sur une section donnée, une distribution de la vitesse non linéaire dont le profil est variable suivant le type d'écoulement.



Pour la suite du cours, nous utiliserons la notion de vitesse moyenne dans une section définie comme suit :

$$v = \frac{Q}{S}$$

- v : vitesse moyenne (m/s)
- Q : débit volumique (m³/s)
- S : section (m²)

4.5 Notion de débit

4.3.1 Débit volumique q_v :

C'est le volume de fluide par unité de temps qui traverse une section droite S quelconque de la conduite avec une vitesse moyenne v :

$$q_v = S \cdot v$$

	- $\Delta t = (t_1 - t_0)$ - Volume : $V_{ol} = S \cdot d$ - $q_v = V_{ol} / \Delta t$ - $V = d / \Delta t \Rightarrow d = V \cdot \Delta t$ - $q_v = S \cdot d / \Delta t$ - $q_v = S \cdot V \cdot \Delta t / \Delta t$ $\Rightarrow q_v = S \cdot V$
--	--

4.3.2 Débit massique q_m :

C'est la masse de fluide, de masse volumique ρ , par unité de temps qui traverse une section droite S quelconque de la conduite avec une vitesse moyenne v :

$$q_m = \rho.S.v$$

4.3.3 Relation entre débit volumique et débit massique :

A partir des relations précédentes on peut déduire facilement la relation entre le débit massique et le débit volumique :

$$q_m = \rho. q_v$$

4.6 Principes fondamentaux

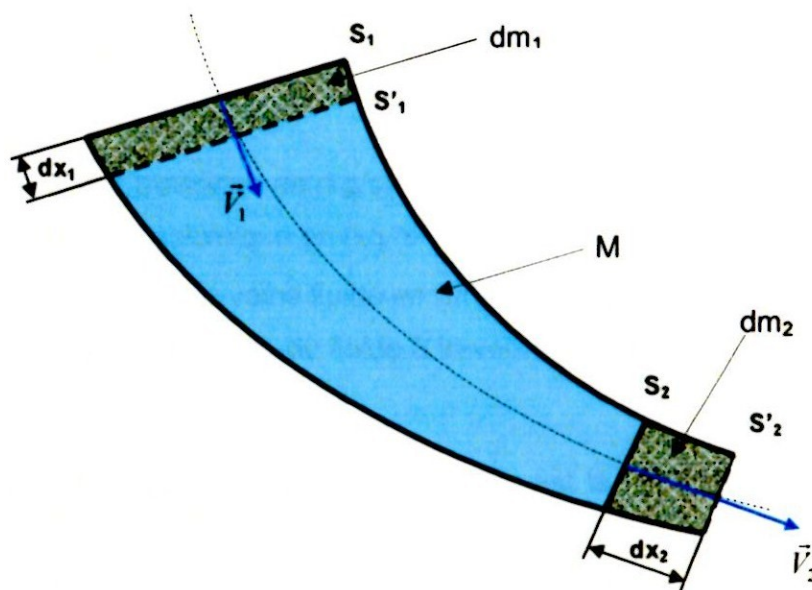
L'écoulement des fluides est un phénomène complexe. Les équations fondamentales qui régissent la dynamique des fluides incompressibles parfaits sont :

- l'équation de **continuité** (conservation de la masse),
- le théorème de **Bernoulli** (conservation de l'énergie),
- le théorème d'**Euler** (conservation de la quantité de mouvement) à partir duquel sont établis les équations donnant la force dynamique exercée par les fluides en mouvement (exemple les jets d'eau).

-5- EQUATION DE CONTINUITÉ

5.1 Principe

Considérons une veine d'un fluide incompressible de masse volumique ρ animée d'un écoulement permanent.



La quantité de matière dm_1 qui passe par la section S_1 dans l'intervalle de temps dt , se retrouve intégralement en dm_2 à la section S_2 dans le même intervalle de temps dt , le fluide étant incompressible et la masse volumique ρ ne variant pas, donc :

$$dm_1 = dm_2 \quad \Rightarrow \quad S_1 \cdot dx_1 \cdot \rho = S_2 \cdot dx_2 \cdot \rho \quad \Rightarrow \quad S_1 \cdot dx_1 = S_2 \cdot dx_2$$

En divisant les 2 membres par dt , on obtient donc :

$$S_1 \cdot V_1 = S_2 \cdot V_2$$

Car :

- $dx_1/dt = V_1$
- $dx_2/dt = V_2$

-6- THEOREME DE BERNOULLI

6.1 Principe

L'équation de Bernoulli exprime que, tout le long d'un filet liquide incompressible en mouvement permanent, l'énergie totale par unité de poids du liquide reste constante.

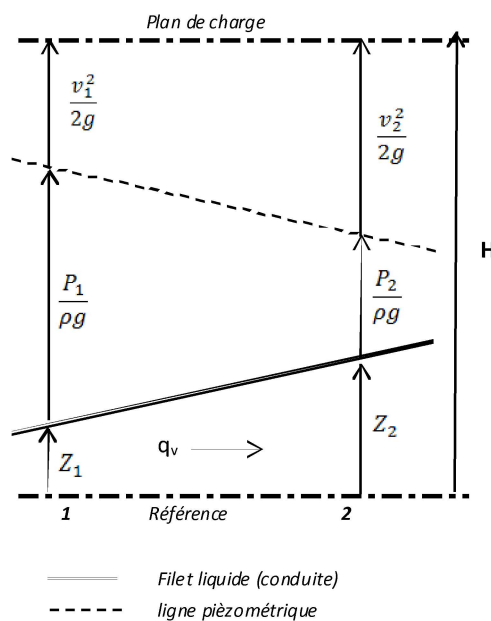
Section	1	2
Energie potentielle	mgZ_1	mgZ_2
Energie de pression	$mg (p_1/\rho g)$	$mg (p_2/\rho g)$
Energie cinétique	$\frac{1}{2} mv_1^2$	$\frac{1}{2} mv_2^2$

Bernoulli permet d'écrire (pour un fluide parfait) :

$$mgZ_1 + mg \frac{p_1}{\rho g} + \frac{mv_1^2}{2} = mgZ_2 + mg \frac{p_2}{\rho g} + \frac{mv_2^2}{2}$$

En divisant par mg , on obtient l'équation de Bernoulli :

$$Z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g} = Z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{v_2^2}{2g} = H = Cte$$



6.2 Equation de Bernoulli avec échange d'énergie

Lorsqu'un fluide traverse une machine hydraulique (turbine ou pompe), il échange de l'énergie avec cette machine sous forme de travail $W = mgH_{\text{ext}}$ générant une puissance P .

- si $P (H_{\text{ext}}) > 0$: l'énergie reçue par le fluide est positive (pompe)
- si $P (H_{\text{ext}}) < 0$: l'énergie reçue par le fluide est négative (turbine)

Pour un échange d'énergie $W = mgH_{\text{ext}}$ entre les sections 1 et 2, on peut écrire :

$$mgZ_1 + mg \frac{p_1}{\rho g} + \frac{mv_1^2}{2} + mgH_{\text{ext}} = mgZ_2 + mg \frac{p_2}{\rho g} + \frac{mv_2^2}{2}$$

D'où, en divisant par mg :

$$Z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g} + H_{\text{ext}} = Z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{v_2^2}{2g}$$

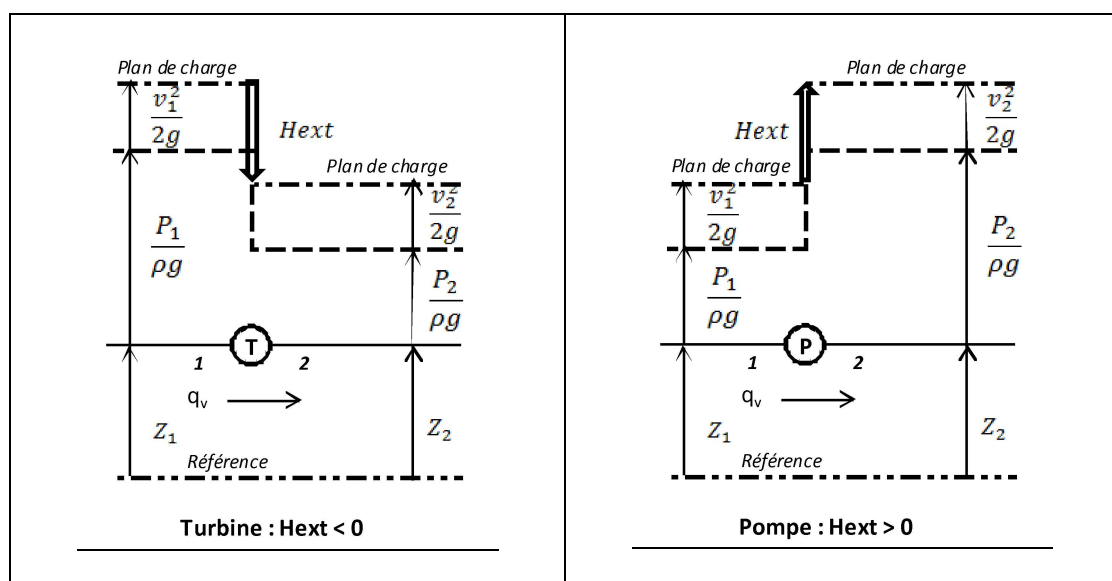
Pour mémoire :

- $P = W / t$
- $W = V_{\text{volume}} \rho g H_{\text{ext}} = m g H_{\text{ext}}$ (avec $m = V_{\text{volume}} \rho$)
- $P = q_v \rho g H_{\text{ext}}$ (avec $q_v = V_{\text{volume}} / t$)

Autre forme d'écriture de l'équation faisant intervenir la puissance de la machine hydraulique (pompe ou turbine) :

$$z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g} + \frac{P}{Q\rho g} = z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{v_2^2}{2g} + pdc$$

Interprétation géométrique



6.3 Equation de Bernoulli pour un fluide réel

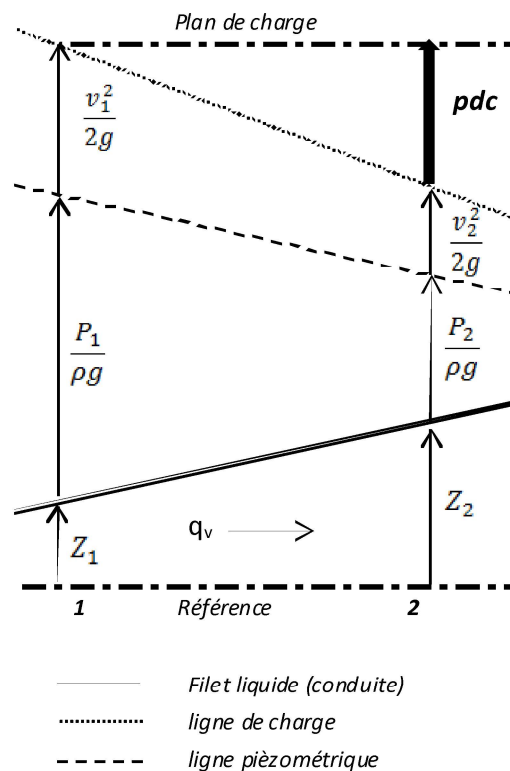
Dans le cas d'un fluide réel et en régime permanent, d'autres forces interviennent, notamment les forces dues au frottement, qui font apparaître une dissipation de l'énergie mécanique en énergie thermique.

Le long d'une ligne de courant, l'énergie mécanique diminue du fait de l'augmentation de l'énergie thermique ; on appelle ce phénomène la perte de charge (**pd**) due aux frottements dans un liquide.

Après intégration entre deux points sur la même ligne de courant l'équation de Bernoulli s'écrit :

$$z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{v_2^2}{2g} + pdc$$

Interprétation géométrique



6.4 Equation de Bernoulli pour un fluide réel : cas du pompage

L'insertion d'une pompe de puissance $P = q_v \cdot \rho \cdot g \cdot H_{ext}$ ($P > 0$) sur un circuit hydraulique entre les sections (1) et (2) de perte de charge totale pd_c s'écrit :

$$z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g} + H_{ext} = z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{v_2^2}{2g} + pd_c$$

Qui peut s'écrire :

$$H_{ext} = (z_2 - z_1) + \frac{(p_2 - p_1)}{\rho g} + \frac{(v_2^2 - v_1^2)}{2g} + pd_c$$

Nota : en pompage, H_{ext} s'appelle la **Hauteur Energétique Totale (HET)**

Simplification de l'expression

En hydraulique urbaine pratique (cas courants), il est loisible de formuler les hypothèses suivantes :

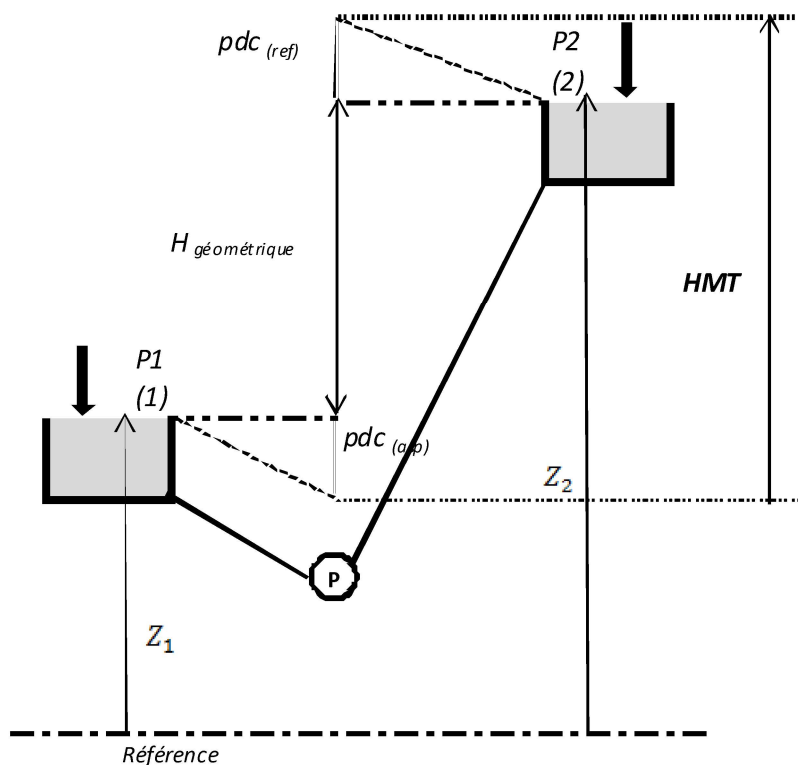
- Le circuit hydraulique est fini (un départ, un circuit hydraulique, une arrivée)
- Les points de départ et d'arrivée sont constitués par des plans d'eau à surface libre (soumis à la pression atmosphérique) : rivières, puits, réservoirs, ...
- Les vitesses d'écoulements (1 à 2 m/s) sont suffisamment faibles pour que les termes d'expression $(v^2/2g)$ soient négligeables (quelques cm) au vue des autres grandeurs de l'expression

En prenant comme section d'origine le plan d'eau de départ (1) et comme section de restitution le plan d'eau d'arrivée (2) on peut alors écrire :

- $(Z_2 - Z_1)$: différence d'altitude des plans d'eau de départ et d'arrivée $\Rightarrow H_{géométrique}$
- $P_2 = P_1 = P_{atmosphérique} \Rightarrow (P_2 - P_1)/\rho g = 0$
- $(v_2^2 - v_1^2)/2g$ négligeable $\Rightarrow = 0$
- $pd_c = pd_{c\text{aspiration}}$ (circuit amont pompe) + $pd_{c\text{refoulement}}$ (circuit aval pompe) = perte de charge totale du circuit hydraulique (et de ses équipements)
- H_{ext} s'appelle dans ces conditions la **Hauteur Manométrique Totale (HMT)**

L'expression s'écrit alors :

$$HMT = H_{géométrique} + pd_c$$

Interprétation géométriquePoints d'attention :

- Dans certaines utilisations (industrielles), il peut exister des pressions autres que la pression atmosphérique sur les plans d'eau de départ et/ou d'arrivée (enceintes sous pression) : dans ce cas il y a lieu d'appliquer l'expression générale
- De même, si les vitesses d'écoulement sont importantes ($v > 5 \text{ m/s}$), il faut prendre en compte les termes en $v^2/2g$
- Il arrive que le point d'arrivée impose une pression de restitution (***Pr***) pour pouvoir faire fonctionner un équipement (filtre, arrosage,...), dans ces conditions l'expression s'écrit :

$$HMT = H_{\text{géométrique}} + p_{dc} + \frac{p_r}{\rho g}$$

-7- THEOREME D'EULER

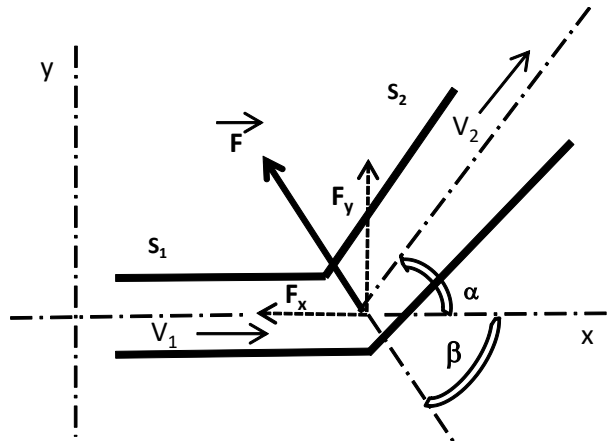
Le théorème d'Euler permet de déterminer les efforts exercés par un fluide en mouvement sur les objets qui les environnent.

Le théorème d'Euler résulte de l'application du théorème de la quantité de mouvement à un fluide :

$$\sum \vec{F}_{ext} = \rho q_v (\vec{v}_2 - \vec{v}_1)$$

Avec : $\rho \cdot q_v = q_m$

Application : poussée dynamique sur un coude



- $F_x = \rho q_v (V_2 \cos \alpha - V_1)$
- $F_y = \rho q_v V_2 \sin \alpha$
- $F = (F_x^2 + F_y^2)^{0,5}$
- $\tan \beta = F_y / F_x$

Si $S_1 = S_2$ et $V_1 = V_2 = V$ on obtient

- $F_x = \rho q_v V (\cos \alpha - 1)$
- $F_y = \rho q_v V \sin \alpha$
- $F = (F_x^2 + F_y^2)^{0,5}$
- $\tan \beta = F_y / F_x$

Nota :

- La force **R** à reprendre (butée) est égale à **F** et de sens opposé
- Il faut rajouter la poussée due à la pression dans le coude

Pour un coude d'angle α de même section S , transitant un débit q_v de masse volumique ρ sous une pression p , on montre que la poussée résultante est définie comme suit :

$$P_{\text{résultante}} = P_{\text{statique}} + R_{\text{dynamique}}$$

Soit :

$P_{\text{résultante}} = 2 (\rho q_v + p S) \sin (\alpha/2)$
--

Avec :

- Poussée statique : $P_{\text{statique}} = 2 p S \sin (\alpha/2)$
- Poussée dynamique : $P_{\text{dynamique}} = 2 \rho q_v \sin (\alpha/2)$

Application :

- DN 400 : $S = 0,125 \text{ m}^2$
 - Eau potable : $\rho = 1\,000 \text{ kg/m}^3$
 - Pression : $p = 10^5 \text{ Pa}$
 - Débit : $q_v = 0,125 \text{ m}^3/\text{s}$
 - Déviation : $\alpha = 45^\circ$
-
- $P_{\text{statique}} = 2 p S \sin (\alpha/2) = 9\,567 \text{ N}$
 - $R_{\text{dynamique}} = 2 \rho q_v \sin (\alpha/2) = 95,67 \text{ N}$

$$\Rightarrow P_{\text{résultante}} = 9\,567 + 95,67 = 9\,663 \text{ N (soit environ 1 t)}$$

En pratique, dans les réseaux urbains où la vitesse est faible (1 à 2 m/s), on observe, en général que la poussée due à la pression est prépondérante à la poussée dynamique due à l'écoulement.

-8- PERTES DE CHARGE

8.1 Généralités

On appelle fluide parfait un fluide pour lequel la viscosité dynamique est nulle. Ce modèle physique ne correspond pas à la réalité mais constitue un cas limite pouvant parfois être utilisé pour une première approche.

Tous les liquides ont en fait une certaine viscosité; lors du déplacement des liquides des frottements apparaissent entre les différentes couches de liquide ou contre les parois de la canalisation ou d'un accident. Ces frottements entraînent donc une production de chaleur correspondant à une perte d'énergie pour le liquide $\Rightarrow$ On parle de **pertes de charge**.

Pour une canalisation cette perte d'énergie se caractérise par une diminution de la pression (charge) dans le sens de l'écoulement.

Les pertes de charge sont un élément fondamental de l'écoulement des liquides car elles apparaissent pour tous les liquides. Elles se classent en deux types :

- les pertes de charge dues aux simples frottements décrits plus haut: ce sont les pertes de charge générales dues à la seule présence d'une canalisation rectiligne sans accident, on les nomme **pertes de charges linéaires**.
- les pertes de charge provoquées par la présence d'accidents sur la canalisation: rétrécissement, élargissement, vanne, coude, clapet, filtre, débitmètre, échangeur... Ces accidents provoquent également des pertes d'énergie sous forme de frottements à cause des tourbillons créés par ces obstacles. On les nomme **pertes de charges locales ou singulières**.

8.2 Calcul des pertes de charges linéaires

Expérimentalement on constate que les pertes de charge générales dépendent des éléments suivants:

- **longueur de la canalisation**: la perte de charge est logiquement directement proportionnelle à la longueur de la canalisation: elle augmente quand la longueur de canalisation augmente.
- **viscosité du liquide**: plus le liquide est visqueux, plus les frottements donc la perte de charge augmente.
- **diamètre intérieur**: quand le diamètre diminue, la perte de charge augmente considérablement. Le liquide a plus de difficultés à s'écouler donc les frottements augmentent pour un débit identique.
- **débit**: plus le débit augmente, plus les forces de frottements augmentent pour un diamètre identique.

- **rugosité de la canalisation:** la rugosité correspond à la notion habituelle de présence plus ou moins importante d'aspérités sur une surface. On constate ici que lorsque la rugosité d'une canalisation augmente les frottements seront plus nombreux donc la perte de charge augmentera. La perte de charge est donc fonction du matériau de la canalisation.

La perte de charge j par unité de longueur se traduit par une expression empirique du type :

$$J = \lambda \frac{U^2}{2 g D}$$

Soit pour une conduite de longueur L :

$$\Delta h = \lambda \frac{L}{D} \frac{U^2}{2 g} \quad \text{ou} \quad \Delta h = \lambda \frac{L}{D} \frac{q_v^2}{2 g S^2}$$

- L : longueur de la conduite
- U : vitesse moyenne de l'écoulement = q_v/S
- D : diamètre du tuyau
- λ : coefficient de pdc (sans dimension)

Nota :

- λ est fonction du nombre de Reynolds et de la rugosité de la paroi du tuyau.
- la rugosité absolue ϵ correspond à la hauteur géométrique moyenne des aspérités d'une canalisation.
- Pour les pertes de charge le facteur déterminant est la rugosité relative ϵ/D .
- On donne les valeurs indicatives suivantes de rugosité absolue en mm :

Acier : 0,045
 Fonte : 0,26
 Fer galvanisé : 0,15
 Béton : 0,3 à 3
 Verre, plastique, cuivre, inox : 0,0015

Il y a lieu de noter que pour des conduites corrodées, la rugosité peut être considérablement augmentée

Il existe un nombre important de formules de calcul des pdc du fait que leur détermination est expérimentale et du nombre de matériaux constituant les canalisations

Dans la suite du cours, nous n'indiqueront que les formules les plus utilisées dans la pratique.

Régime laminaire $Re < 2\,000$

Seules les forces de viscosité interviennent, la vitesse est très faible et l'état de surface de la paroi n'intervient pas dans le calcul :

- Formule de Poiseuille :

$$\lambda = \frac{64}{Re}$$

Régime turbulent tuyau lisse $Re < 100\,000$

Dans ce domaine, la turbulence est encore modérée, l'épaisseur de la sous couche limite est suffisante pour englober les aspérités de la conduite qui se comporte comme un tuyau lisse :

- Formule de Blasius

$$\lambda = 0,316 Re^{-0,25}$$

- Formule de Von Karman

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \log_{10} \left(\frac{2,51}{Re \sqrt{\lambda}} \right)$$

Régime turbulent tuyau ruqueux $Re > 100\,000$

La turbulence devient importante et λ ne dépend plus que de la rugosité relative ε/D .

- Formule de Nikuradse :

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \log_{10} \left(\frac{\varepsilon}{3,71 D} \right)$$

Régime turbulent tuyau lisse, ruqueux et en zone de transition

L'ensemble des résultats sont résumés dans la formule de Colebrook qui s'est inspiré des résultats de Von Karman et de Nikuradse

- Formule de Colebrook :

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \log_{10} \left(\frac{2,51}{Re \sqrt{\lambda}} + \frac{\varepsilon}{3,71 D} \right)$$

Cette relation implicite est difficile à exploiter analytiquement et est le plus souvent représentée sur un graphique : l'abaque de Moody permettant de regrouper l'ensemble des régimes d'écoulement, les variables utilisées sont λ , Re et ε/D .

Formule pratique

Dans les cas courant de l'hydraulique urbaine, compte tenu des vitesses, des diamètres des canalisations, nous avons à faire à des écoulements de type turbulent rugueux.

Dans ces conditions, il est loisible d'utiliser la formule de Nikuradse sous la forme suivante pratique à manipuler :

$$\Delta h = L C Q_v^2$$

- Δh : pdc en mCE
- L : longueur de la conduite en km
- C : coefficient fonction du diamètre et de la rugosité
- Q_v : débit en m³/s

Pour info, le coefficient **C** issu de la formule de Nikuradse se définit comme suit :

$$C = \frac{1}{48,5 D^5 (\log_{10} \frac{3,7 D}{\varepsilon})^2}$$

Tableau des valeurs de **C** en fonction de la rugosité

DN	$\varepsilon = 0,2 \text{ mm}$	$\varepsilon = 0,5 \text{ mm}$	$\varepsilon = 1,0 \text{ mm}$
60	2 890 800	3 758 040	4 818 000
80	618 000	813 700	1 030 000
100	193 936	250 240	312 800
125	59 957	76 136	95 170
150	22 730	29 225	36 080
200	5 091	6 422	7 832
250	1 561	1 970	2 402
300	604,30	759,95	915,60
350	271,75	336,65	405,60
400	134,34	168,42	200,50
450	72,23	90,55	107,80
500	42,06	51,96	61,86
600	16,12	20,15	23,70
700	7,27	8,96	10,54
800	3,607	4,443	5,227
900	1,972	2,394	2,817
1000	1,135	1,378	1,621

Une autre formule permet un calcul aisé des pdc linéaires, il s'agit de la formule de MM LECHAPT & CALMON :

$$\Delta h = L \cdot Q^M \cdot D^{-N}$$

Où L, M & N sont des invariants pour une valeur de la rugosité ε . Cette formule donne pour des vitesses $0,4 \leq V \leq 2$ m/s qu'un écart de l'ordre de 3% par rapport à la loi de Colebrook.

- Q : en m³/s
- D : en m
- Δh : en mCE/m

Valeurs usuelles des coefficients L, M & N

ε (mm)	L (x 10 ⁻³)	M	N
2	1,863	2	5,33
1	1,601	1,975	5,25
0,5	1,40	1,96	5,19
0,25	1,160	1,93	5,11
0,1	1,10	1,89	5,01
0,05	1,049	1,86	4,93
0,025	1,01	1,84	4,88

Nota :

Les valeurs de « L » mentionnées dans le tableau sont à multiplier par 10⁻³.

Ex : Pour $\varepsilon = 0,5$ mm $\Rightarrow L = 0,0014$

D'où : $\Delta h = 0,0014 \cdot Q^{1,96} \cdot D^{-5,19}$

Important :

La perte de charge Δh peut s'exprimer suivant la loi générale :

$$\Delta h = R Q^2$$

R : représentant la « **résistance** » de la conduite $R = f$ (diamètre(s), rugosité(s), Re, L, singularités). Pour un circuit hydraulique et un fluide donné : $R = \text{Cte}$.

- Dans le cas général : $R = [(\lambda L) / (D^5 g S^2)]$
- Avec Nikuradse : $R = LC$

8.3 Calcul des pertes de charges singulières (ou locales)

La perte de charge singulière, localisée dans une section de la conduite, est provoquée par un changement de direction et d'intensité de la vitesse (voir premier chapitre).

L'écoulement uniforme est perturbé et devient localement un écoulement non uniforme. La turbulence joue un rôle considérable, alors que les forces de viscosité sont négligeables. La perte de charge n'a donc lieu qu'en régime turbulent.

Une telle non-uniformité de la vitesse peut être provoquée par :

- un branchement de section de la conduite,
- un changement de direction (coude),
- un branchement ou raccordement,
- un dispositif de mesure et contrôle de débit...

Comme pour les pertes de charge linéaire, les pertes de charges singulières se traduisent par la relation :

$$\Delta h = k \frac{V^2}{2g}$$

La valeur de **k** est donnée par des tableaux, des abaques ou par les fournisseurs des équipements concernés.

En pratique le calcul des pdc singulières peut se faire selon les méthodes suivantes :

- détaillée : nécessite de connaître tous les « accidents » engendrant des pdc
- forfaitaire : en appliquant un pourcentage au pdc linéaires
- par longueur équivalente : des abaques fournissent pour un accident donné et pour un débit donné la longueur équivalente de canalisation produisant la même pdc

8.4 Pertes de charges totales dans un circuit hydraulique

C'est la somme des pdc linéaires et singulières du circuit concerné :

$$\Delta H_{\text{circuit}} = \Sigma \Delta h_{\text{linéaire}} + \Sigma \Delta h_{\text{singulières}}$$

Avec :

$$\text{pdc linéaires : } \Delta h = \lambda \frac{L}{D} \frac{U^2}{2g} \Rightarrow \Delta h = \lambda \frac{L}{D} \frac{q_v^2}{2g S^2}$$

$$\text{pdc singulières : } \Delta h = k \frac{V^2}{2g} \Rightarrow k \frac{q_v^2}{2g S^2}$$

Soit :

$$\text{pdc totales } \Delta h = \sum \left(\lambda \frac{L}{D} \frac{1}{2g S^2} + k \frac{1}{2g S^2} \right) q_v^2$$

Le terme de la parenthèse regroupe tous les facteurs qui ne dépendent que de la conduite elle-même, état de la paroi, longueur, diamètre $\Rightarrow$ il traduit la **résistance R** offerte au passage de l'eau dans la conduite, la pdc totale s'exprime alors d'une manière générale sous la forme suivante :

$$\Delta h = R Q_v^2$$

Dans le cas de la formule pratique de Nikuradse :

$$R = \left(LC + \frac{k}{2gS^2} \right)$$

Rappel :

Dans certains ouvrages, la pdc Δh est représentée comme suit :

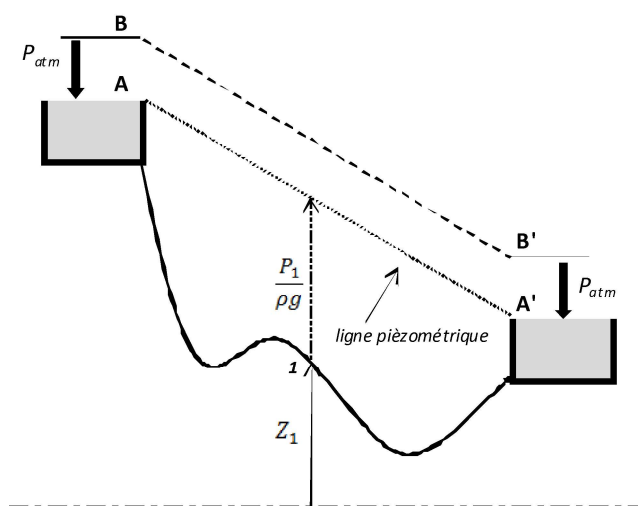
- j : pdc unitaire (m/m)
- J : pdc totale J = j.L

-9- LIGNE PIEZOMETRIQUE – COURBE RESEAU

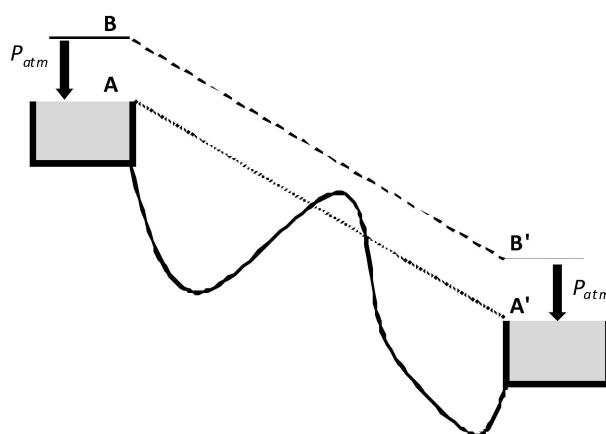
9.1 Lignes piézométrique

La ligne piézométrique est la ligne représentative des pressions relatives et image le niveau de l'eau correspondant.

Nota : comme évoqué précédemment, dans la pratique le terme $(V^2/2g)$ est négligé.



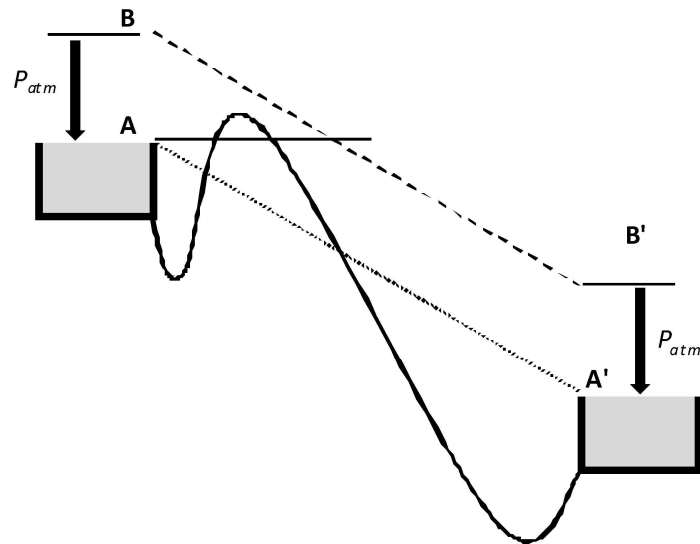
Si la conduite toute entière est située au dessous de AA', la pression dépasse la pression atmosphérique. Cette hypothèse correspond à une situation normale. Il faut prévoir des ventouses aux points les plus élevés pour la sortie de l'air accumulé et des décharges de fond pour la vidange et le nettoyage.



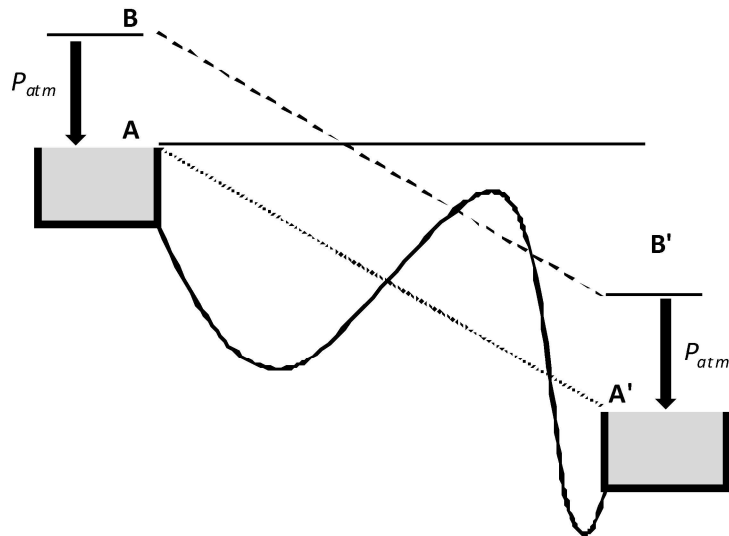
Si la conduite passe au-dessus de la ligne piézométrique AA', la partie du tronçon au dessus de AA' est en dépression.

En général, on doit éviter les zones en dépression ; en effet, une fente éventuelle facilitera l'entrée de corps étrangers et peut contaminer l'eau.

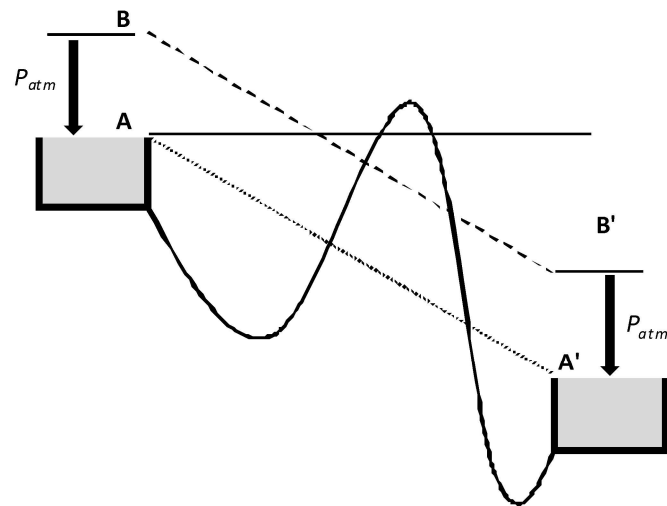
La pose d'une ventouse normale est contre indiquée, étant donné qu'elle permettrait l'entrée de l'air et provoquerait en conséquence, une réduction de débit. Dans la majorité des cas, on évite ce type de tracé



Si la conduite s'élève au-dessus de la ligne horizontale qui passe par A, il n'y aura écoulement que si toute la conduite a été remplie d'eau au préalable (effets de siphonage).



Si la forme de la conduite est toujours située au-dessous de l'horizontale passant par A, mais dépassant BB', l'écoulement se fait sans siphonage. Cependant, la pression est nulle pour la partie située au-dessus de BB' : il y a cavitation. L'écoulement se fait avec une section partiellement pleine et le débit diminue. Les dégagements d'air et de vapeur d'eau dans les régions de forte dépression rendent l'écoulement irrégulier.



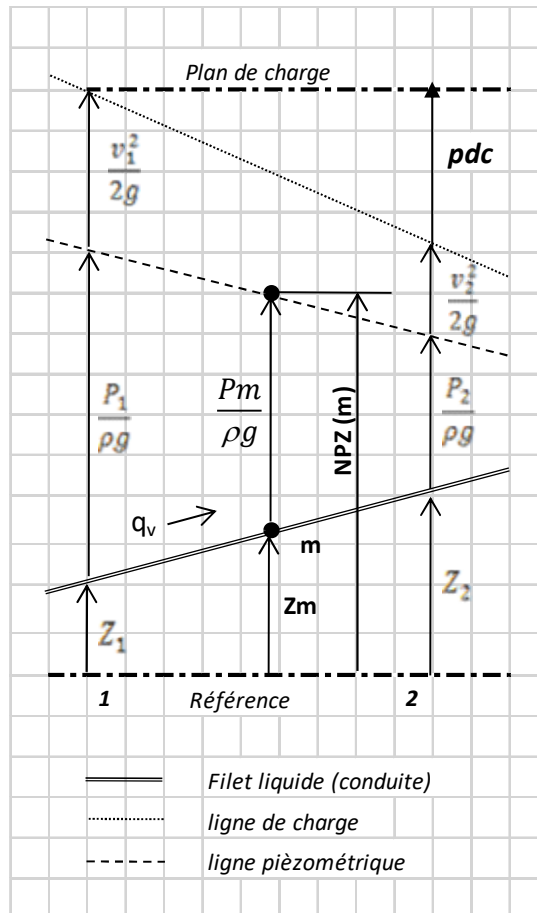
Si la conduite à un tronçon au-dessus de l'horizontale passant par A, il faudrait amorcer le siphon, l'écoulement se ferait en section partiellement pleine et de façon très irrégulière.

Si la conduite dépasse la cote B, il est impossible d'amorcer l'écoulement.

9.2 Niveau piézométrique (NPZ)

Le niveau piézométrique (**NPZ**) est la valeur de l'altitude de la ligne piézométrique (ligne d'eau) au point concerné par rapport au plan de référence.

En hydraulique urbaine, le plan de référence est en général le référentiel NGF (Nivellement Général de la France).



$$NPZ(m) = Z(m) + \frac{P(m)}{\rho g}$$

Rappel pratique :

En hydraulique urbaine, le terme relatif à l'énergie cinétique ($v^2/2g$) est réputé négligeable au vu autres grandeurs en jeu $\Rightarrow v^2/2g = 0$

Méthode pratique de calcul du NPZ

On désire calculer le NPZ au point « m » : NPZ(m)

Les valeurs suivantes sont réputées connues :

- $Z(1)$
- $(P1/\rho g)$
- $Z(m)$
- $Pdc (1 \Rightarrow m)$

Bernoulli permet d'écrire :

$$Z(1) + (P1/\rho g) = Z(m) + (Pm/\rho g) + Pdc (1 \Rightarrow m)$$

Donc

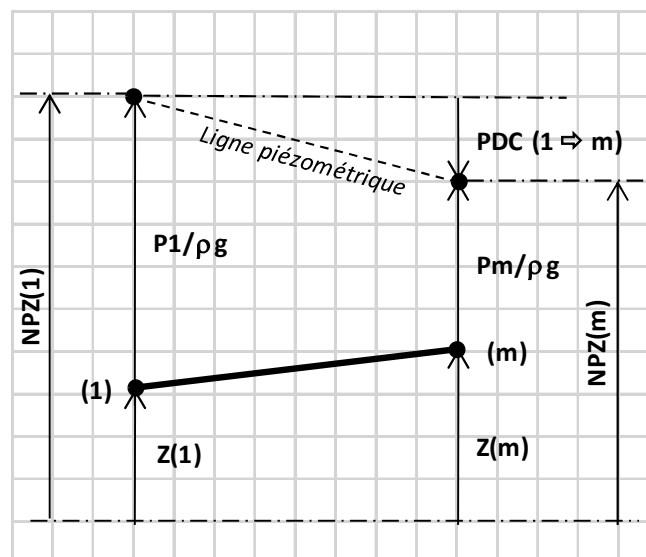
$$Z(m) + (Pm/\rho g) = Z(1) + (P1/\rho g) - Pdc (1 \Rightarrow m)$$

Avec :

- $Z(1) + (P1/\rho g) = NPZ(1)$
- $Z(m) + (Pm/\rho g) = NPZ(m)$

D'où : $NPZ(m) = NPZ(1) - Pdc (1 \Rightarrow m)$
--

En pratique, le NPZ d'un point est égal au NPZ du point précédent déduction faite de la perte de charge entre ces deux points (sous réserve des termes en $v^2/2g$ négligeables).

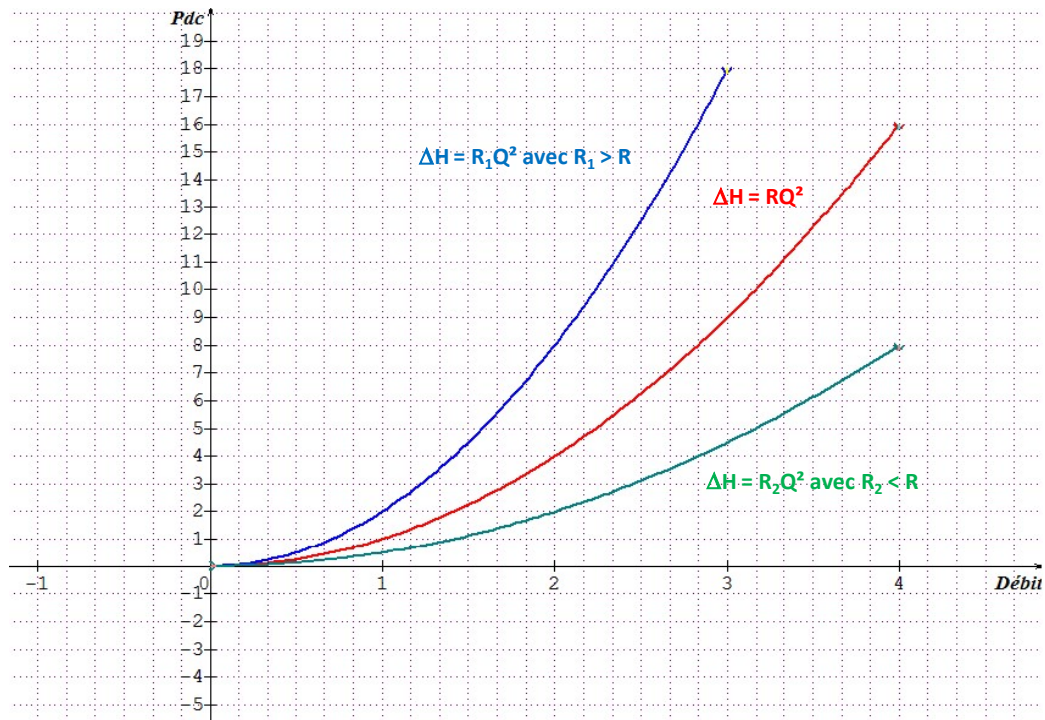


9.3 Courbe réseau

On a vu précédemment que la pdc d'un circuit hydraulique varie suivant le carré du débit et s'exprime comme suit :

$$\Delta h = RQ^2$$

C'est l'équation d'une parabole :



Remarque :

La courbure de la parabole est d'autant plus importante que R est grand. En d'autres termes, plus la résistance d'un circuit donné est grande, plus la courbure est importante.

Cette propriété est utilisée lorsqu'on veut augmenter artificiellement la résistance d'un circuit hydraulique en créant une perte de charge singulière sur le circuit.

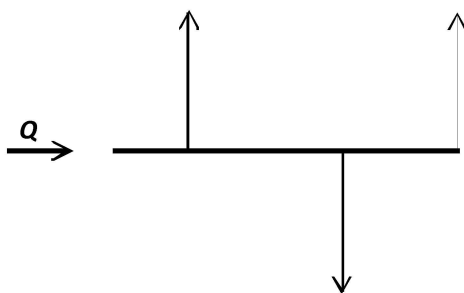
-10- CONDUITES ET RESEAUX EN PRESSION

10.1 Classification des réseaux

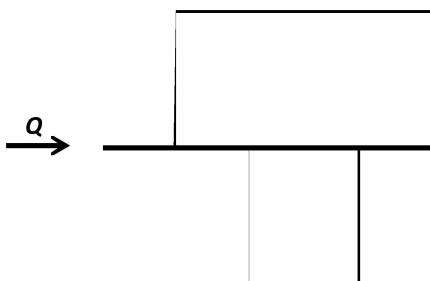
Selon leur organisation, les réseaux peuvent être classés comme suit :

- réseau ramifié
- réseau maillé
- réseau étagé
- réseau à alimentations distinctes

Selon l'importance du réseau et la configuration du site, le réseau peut être une combinaison des différents schémas évoqués ci-dessus.

Réseau ramifié :

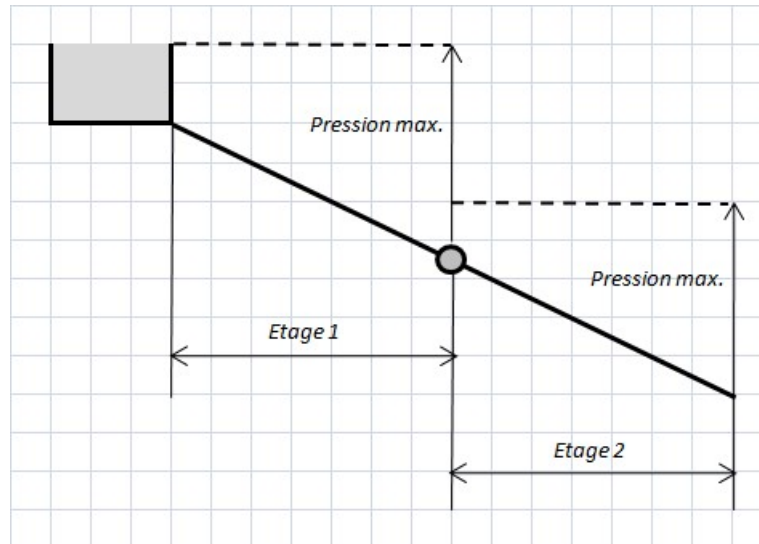
- réseau économique
- pas d'alimentation en retour
- pas de sécurité en cas d'accident sur la conduite principale pour les tronçons situés en aval

Réseau maillé :

- réseau plus coûteux que le réseau ramifié
- possibilité d'alimentation en retour (isolement du tronçon accidenté)
- préférable par rapport au réseau ramifié (sécurisation de l'alimentation)

Réseau étagé :

Dans les zones à fortes dénivelées, il est possible de constituer des réseaux indépendants en limitant la pression maximale à un seuil donné (environ 4 à 5 bars)

Réseau à alimentations distinctes :

Certaines agglomérations (importantes) disposent de réseaux indépendants, l'un pour la distribution de l'eau potable, l'autre pour les besoins de services (arrosage, incendie, lavage des rues, industriels, ...)

10.2 Calcul des conduites

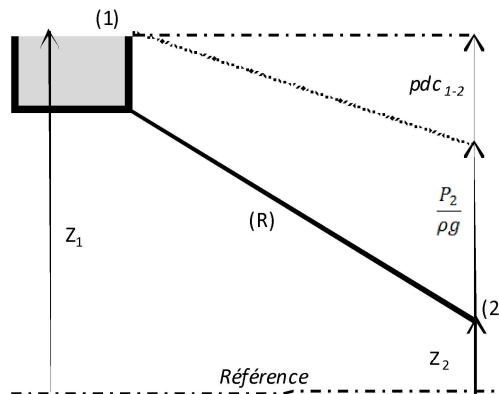
Le calcul d'une conduite consiste principalement à évaluer la perte de charge (p_{dc}) sur un tronçon déterminé connaissant le débit (Q_v) et la résistance (R) du tronçon de conduite concerné.

Connaissant la p_{dc} et en appliquant la relation de Bernoulli, on peut en déduire aisément :

- la pression dans la conduite : $(p/\rho g)$
- la cote piézométrique : $(z + p/\rho g)$

Rappel : on néglige le terme $(v^2/2g)$

a) Conduite débitant un débit Q_v à son extrémité :

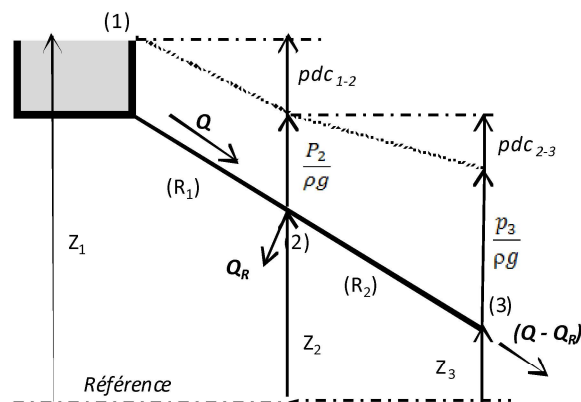


Bernoulli entre (1) et (2) donne :

$$Z_1 = Z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + pdc_{1-2}$$

Avec : $pdc_{1-2} = R Q_v^2$

b) Conduite avec un débit de route Q_R



Bernoulli entre (1) et (2) donne :

$$Z_1 = Z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + pdc_{1-2}$$

Bernoulli entre (2) et (3) donne :

$$Z_2 + \frac{p_2}{\rho g} = Z_3 + \frac{p_3}{\rho g} + pdc_{2-3}$$

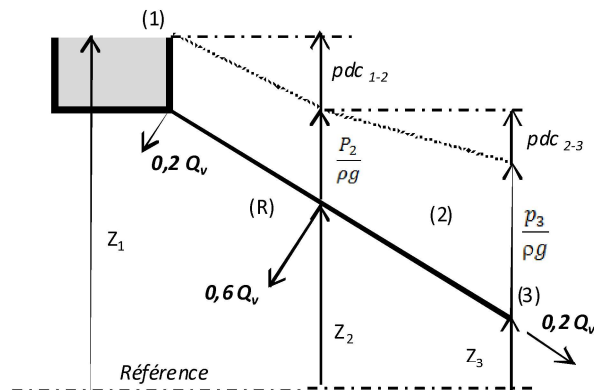
Avec :

- $pdc_{1-2} = R_1 Q^2$
- $pdc_{2-3} = R_2 (Q - Q_R)^2$

$$pdc_{\text{totale}} = pdc_{1-2} + pdc_{2-3}$$

c) Conduite avec un débit de route Q_v uniformément réparti sur toute la longueur

Cas 1 : le débit est intégralement consommé sur toute la longueur :



On estime que le système se comporte comme le système équivalent défini comme suit :

- Débit de $0,2 Q_v$ prélevé en (1)
- Débit de $0,6 Q_v$ prélevé en (2)
- Débit de $0,2 Q_v$ prélevé en (3)

On est ramené à la configuration (b) en prenant en compte les débits suivants :

- Débit de $0,8 Q_v$ sur le tronçon 1-2
- Débit de $0,2 Q_v$ sur le tronçon 2-3

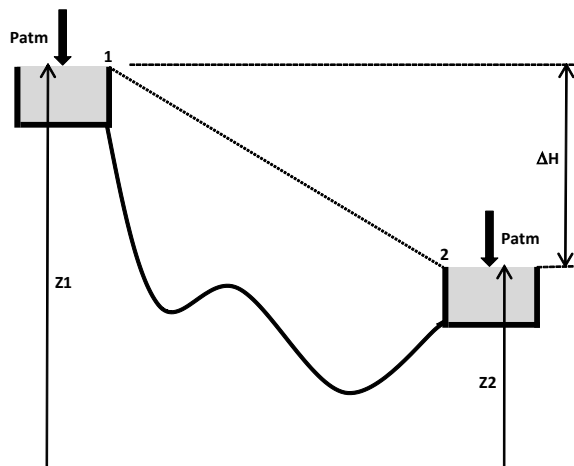
Cas 2 : le débit est uniformément réparti avec débit d'extrémité ($Q_{\text{extrémité}}$) :

- Débit au départ : Q_v
- Débit de route uniformément réparti : Q_{Route}
- Débit restant : $Q_{extrémité} = Q_v - Q_{Route}$

On montre que le système est sensiblement équivalent à une conduite débitant un débit uniforme (**q**) sur toute sa longueur et défini comme suit :

$$q = Q_{\text{extrémité}} + 0,55 Q_v$$

Dans ce cas, on est ramené à la configuration (a) avec un débit (q).

d) Conduite unique entre deux réservoirs

Bernoulli entre (1) et (2) donne :

$$z_1 + \frac{p_{atm}}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_{atm}}{\rho g} + \frac{v_2^2}{2g} + p_{dc}$$

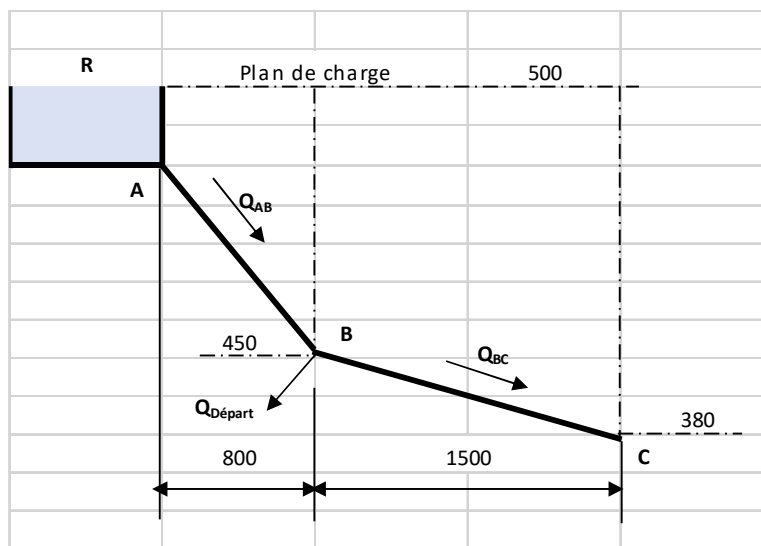
V_1 et V_2 négligeable

$$P_{dc} = (Z_1 - Z_2) = \Delta H$$

La perte de charge est égale à la différence d'altitude entre les 2 réservoirs

10.3 Exemple de calcul des PDC sur un circuit simple – Méthodologie

A) Schéma du circuit



B) Données

a) Réseau

	Diamètre (DN)	rugosité (mm)	longueur (m)
AB	200	0,5	800
BC	150	0,2	1 500

b) Equipements

	Vannes	Coudes	Compteur
AB	2	8	1
BC	1	12	0
Coef K	0,4	0,2	0,8

c) Débits

	m ³ /h
Q _{AB}	150
Q _{Départ}	90

- PDC linéaires : Calculs avec NIKURADSE $\Rightarrow P_{dc} = L C_\varepsilon Q^2$
- PDC singulières : Formule générale $\Rightarrow P_{dc} = K / (v^2/2g)$

C) Méthodologie

a) Définition des tronçons

Rappel : 1 tronçon $\Rightarrow$ mêmes débit, diamètre et rugosité

- Dans le circuit proposé il y a donc 2 tronçons : AB et BC

b) Préparation des données

Il convient de préparer les données pour les rendre directement exploitable par les formules (unités) :

- Diamètres en (m)
- Longueurs en (km)
- Recherche coefficients « C » de Nikuradse $\Rightarrow$ tableau (cours hydraulique)
- Calcul du débit sur BC = débit AB (150 m³/h) – débit départ (90 m³/h) = 60 m³/h
- Débits en m³/s
- Vitesses en (m/s)

Il est plus commode de faire des tableaux pour les calculs

c) Calculs des PDC linéaires

	longueur (km)	Coef C	Débit (m ³ /s)	PDC (mCE)
AB	0,800	6 422	0,042	8,92
BC	1,500	22 730	0,017	9,47

Il suffit de multiplier : $L C Q^2$ sur la ligne

d) Calculs de PDC singulières

Remarque : pour un tronçon, la vitesse est la même (Q et DN constants), donc on peut mettre en facteur le terme $V^2/2g$ et regrouper les « K » du tronçon :

$$Ex : K_{vanne} (V^2/2g) + K_{coude} (V^2/2g) + K_{clapet} (V^2/2g) = (K_{vanne} + K_{coude} + K_{clapet}) \cdot (V^2/2g)$$

- Calcul des vitesses

	Section (m ²)	Débit (m ³ /s)	Vitesse (m/s)	$V^2/2g$
AB	0,0314	0,042	1,33	0,09
BC	0,0177	0,017	0,94	0,05

- Calcul des ΣK par tronçon

	Vannes	Coudes	Compteur	ΣK
AB	0,8	1,6	0,8	3,2
BC	0,4	2,4	0	2,8

- Calcul des pdc singulières

	ΣK	$V^2/2g$	Pdc (mCE)
AB	3,2	0,09	0,29
BC	2,8	0,05	0,13

e) Calcul des PDC totales

- Par tronçon : PDC totales = PDC linéaires + PDC singulières

	Linéaires	singulières	totales
AB	8,92	0,29	9,21
BC	9,47	0,13	9,60

f) Calcul des NPZ en B et C

Rappel : NPZ aval = NPZ amont – PDC amont/aval

- On démarre le calcul depuis le plan d'eau d'origine (R) :

	NPZ
R	500
B	490,79
C	481,20

g) Calcul des pressions en B & C

Rappel : $NPZ = Z + P/\rho g \quad \Leftrightarrow \quad P/\rho g = NPZ - Z$

- Connaissant le NPZ en 1 point et son altitude, on en déduit aisément la pression en mCE :

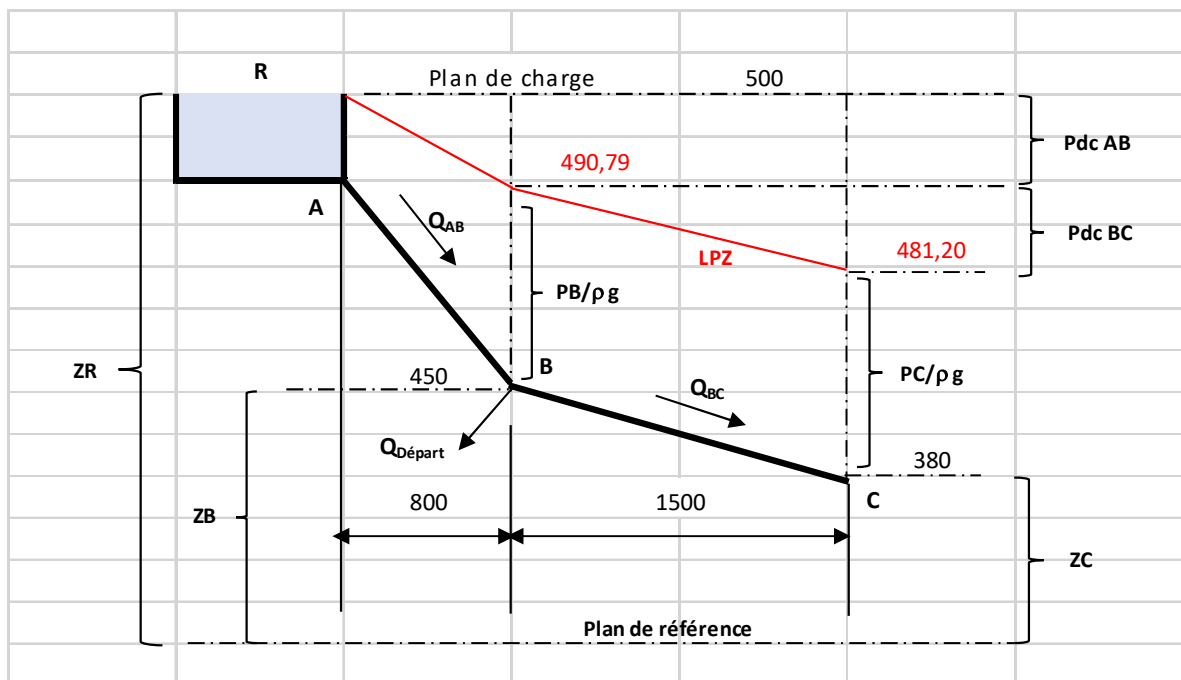
	NPZ	Altitude	pression mCE
B	490,79	450	40,79
C	481,20	380	101,20

- On peut aussi calculer de manière traditionnelle en écrivant Bernoulli entre :

Rappel : les termes en $v^2/2g$ sont négligeables (énergie cinétique)

- R et B $\Rightarrow Z_R + PR/\rho g = Z_B + PB/\rho g + p_{dc\ AB} \Rightarrow PB/\rho g = (Z_R - Z_B) - p_{dc\ AB}$ (avec $PR/\rho g = 0$)
- Soit $PB/\rho = (500 - 450) - 9,21 = 40,79\text{ mCE}$ ($p_{dc\ AB} = p_{dc\ BC}$)
- B et C $\Rightarrow Z_B + PB/\rho g = Z_C + PC/\rho g + p_{dc\ BC} \Rightarrow PC/\rho g = (Z_B - Z_C) + PB/\rho g - p_{dc\ BC}$
- Soit $PC/\rho = (450 - 380) + 40,79 - 9,60 = 101,19\text{ mCE}$

h) Représentation schématique

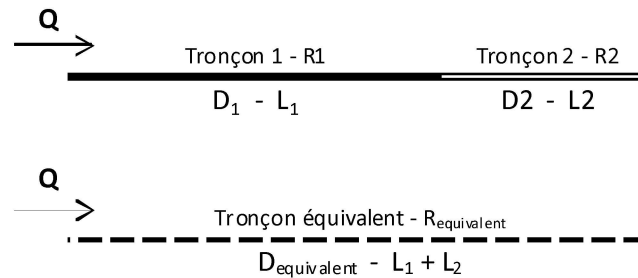


10.4 Conduites en séries ou en parallèles

Conduites en séries :

Une conduite en série est composée d'une succession de tronçons de différents diamètres et régnant sur des longueurs différentes.

La conduite équivalente à cette conduite mixte est celle qui pour le même débit engendre la même perte de charge.



- Tronçon 1 : $J_1 = R_1 Q^2$
- Tronçon 2 : $J_2 = R_2 Q^2$

Pdc totale : $J = J_1 + J_2$ avec $J = R_{\text{équivalent}} Q^2$

D'où : $R_{\text{équivalent}} = R_1 + R_2$

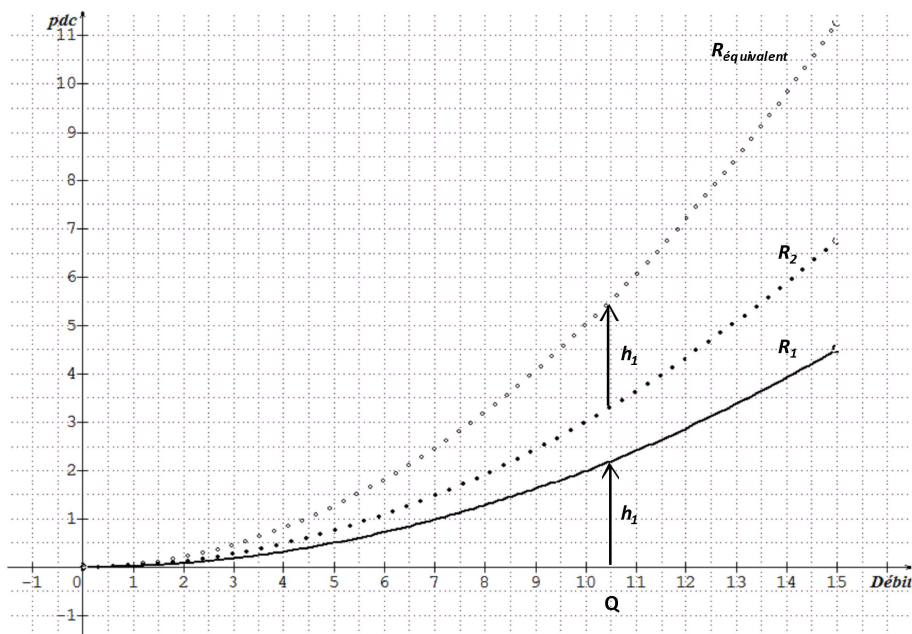
Cette expression se généralise pour « **n** » tronçons :

$$R_{\text{équivalent}} = \sum_{i=1}^n R_i$$

Nota :

La connaissance de $R_{\text{équivalent}}$ permet de déterminer le diamètre de la conduite équivalente produisant la même pdc sur la totalité des tronçons.

Interprétation géométrique :

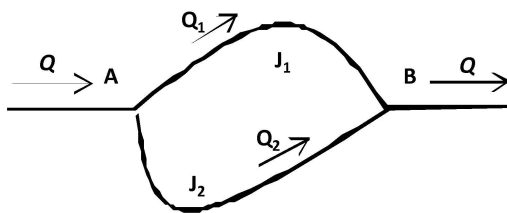
Construction de la courbe $R_{\text{équivalent}}$:

Pour une même abscisse, on ajoute à l'ordonnée de la courbe R_2 l'ordonnée h_1 de la courbe R_1 (l'addition étant commutative [$a + b = b + a$], la réciproque est vraie).

Conduites en parallèles :

Quand un ensemble de conduites issue d'un même point et aboutit en un autre même point, les diamètres et les longueurs étant différents, on est en présence de conduites en parallèles.

La conduite équivalente à ces conduites en parallèles est celle qui pour le même débit total engendre la même perte de charge entre les 2 points communs.



On a :

- $Q = Q_1 + Q_2$
- $J_{AB} = J_1 = J_2 = J$ avec $J_1 = R_1 Q_1^2$ et $J_2 = R_2 Q_2^2$ et $J_{AB} = R_{\text{équivalent}} Q^2$

D'où

- $Q_1 = (J_1 / R_1)^{0,5} = (J / R_1)^{0,5}$
- $Q_2 = (J_2 / R_2)^{0,5} = (J / R_2)^{0,5}$
- $Q = (J_{AB} / R_{\text{équivalent}})^{0,5} = (J / R_{\text{équivalent}})^{0,5}$
- On peut écrire : $(J / R_{\text{équivalent}})^{0,5} = (J / R_1)^{0,5} + (J / R_2)^{0,5}$

En simplifiant par J on obtient :

$$\frac{1}{\sqrt{R_{\text{équivalent}}}} = \frac{1}{\sqrt{R_1}} + \frac{1}{\sqrt{R_2}}$$

Cette expression se généralise pour « n » conduites en parallèles :

$$\frac{1}{\sqrt{R_{\text{équivalent}}}} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{\sqrt{R_i}}$$

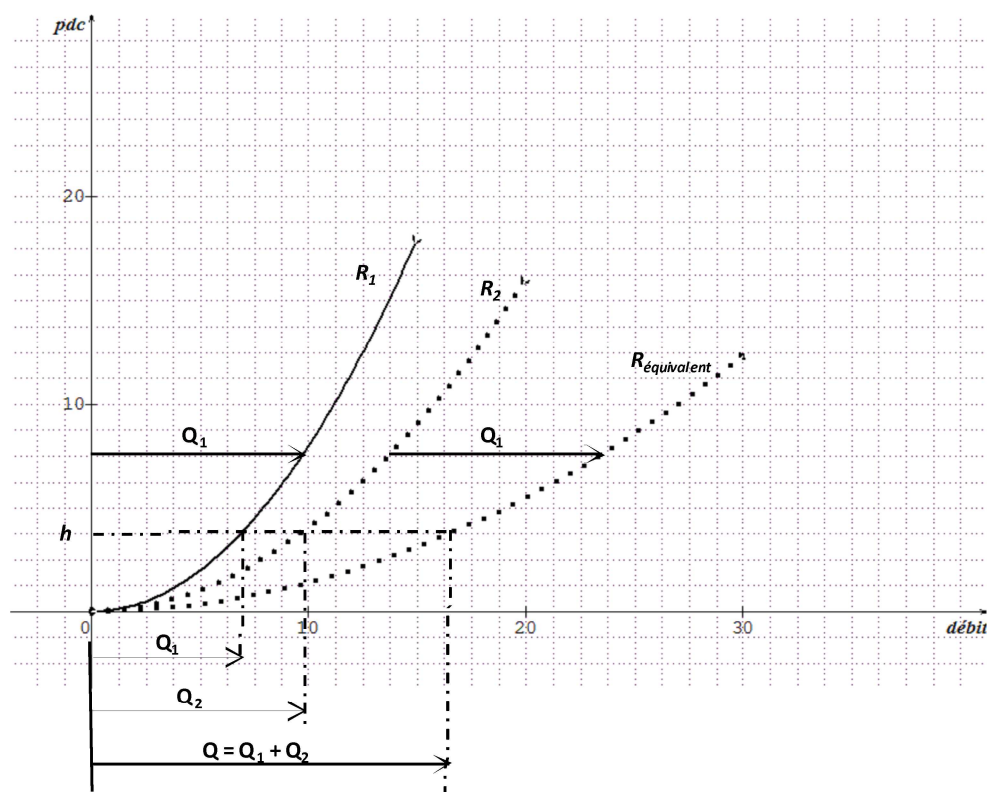
Nota :

La connaissance de $R_{\text{équivalent}}$ permet de déterminer le diamètre de la conduite équivalente produisant la même pdc que l'ensemble des conduites en parallèles entre les points A et B.

Méthode de calcul des débits par branches :

- Q connu
- On se fixe à priori un débit Q'_1 qui donne $J'_1 = R_1 Q'^2_1 = J'_{AB}$
- On en déduit Q'_2 tel que $Q'_2 = (J'_{AB} / R_2)^{0,5}$
- On vérifie $Q'_1 + Q'_2 = Q' \neq Q$
- On calcule le rapport $Q' / Q = k$ (coefficient correcteur)
- On calcule le débit $Q_1 = Q'_1 / k$
- On calcule le débit $Q_2 = Q'_2 / k$
- On vérifie $Q = Q_1 + Q_2$

Interprétation géométrique :

Construction de la courbe $R_{\text{équivalent}}$:

Pour une même ordonnée, on ajoute à l'abscisse de la courbe R_2 l'abscisse Q_1 de la courbe R_1 (l'addition étant commutative [$a + b = b + a$], la réciproque est vraie).

Cette construction graphique permet de déterminer la valeur des débits Q_1 et Q_2 dans chaque conduites pour une $pdc = h$ correspondante à un débit Q

Table de THIEM

Si les conduites ont la même longueur, on peut utiliser la table de THIEM qui cadre assez bien avec la formule de Colebrook.

Diamètre (mm)	Unité de débit	Diamètre (mm)	Unité de débit	Diamètre (mm)	Unité de débit	Diamètre (mm)	Unité de débit
60	2,6	200	62	500	682	1 100	5 365
80	5,6	250	111	600	1 099	1 200	6 735
100	10,0	300	179	700	1 645	1 400	10 076
125	18,0	350	268	800	2 333	1 500	12 066
150	29,0	400	380	900	3 174	1 600	14 281
175	43,5	450	517	1 000	4 182	1 800	19 423
						2 000	25 569

Mode opératoire :

Il consiste à diviser le débit total de l'ensemble des conduites fonctionnant en parallèle en parties proportionnelles aux unités de débit correspondant au diamètre intérieur de ces conduites.

Exemple :

Deux tuyaux de diamètre intérieur 150 et 300 millimètres partent d'une machine hydraulique ou d'un réservoir et fournissent ensemble un débit $Q = 110$ litres par seconde. Quel est le débit dans chacun des tuyaux ?

D'après le tableau, les deux tuyaux ont : $29 + 179 = 208$ unités de débit, et à celles-ci correspond le débit total de 110 litres par seconde.

Le plus petit tuyau fournit donc :

$$\bullet \quad Q_1 (150) = \frac{29}{208} \cdot 110 = 15,34 \text{ l/s}$$

$$\bullet \quad Q_2 (300) = \frac{179}{208} \cdot 110 = 94,66 \text{ l/s}$$

Vérification :

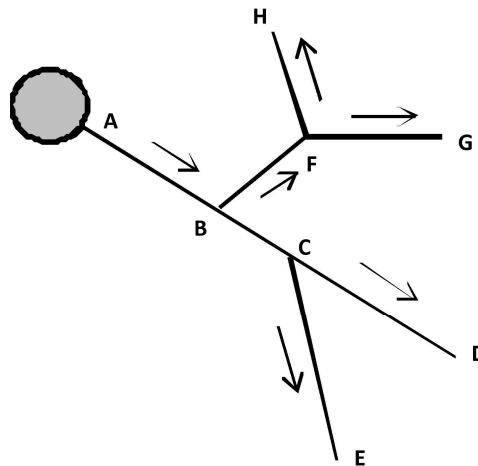
$$Q_1 + Q_2 = 15,34 + 94,66 = 110 \text{ l/s} = Q$$

10.5 Calcul des réseaux

Calcul des réseaux ramifiés

Le calcul des réseaux ramifiés doit se faire avec méthode, à savoir :

- Le calcul des débits se fait de l'aval vers l'amont
- Le calcul des conduites se fait de l'amont vers l'aval



- $Q_{BC} = Q_{CD} + Q_{CE}$
- $Q_{BF} = Q_{FG} + Q_{FH}$
- $Q_{AB} = Q_{BC} + Q_{BF}$

Calcul des réseaux maillés

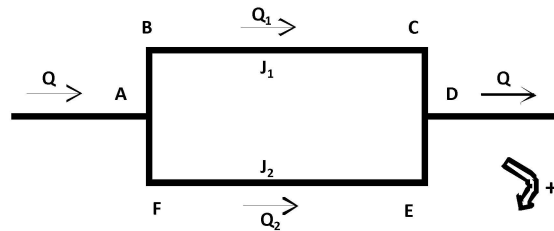
Le calcul des réseaux maillés est complexe et se résout par approximations successives (calculs itératifs). Le calcul manuel est fastidieux et l'on utilise couramment des modèles mathématiques pour traiter ce type de réseau (logiciel EPANET par exemple).

La méthode la plus couramment utilisée est la méthode de Hardy-Cross qui s'appuie sur les lois de Kirchhoff, à savoir :

- **1^{ère} loi** : en un nœud quelconque, la somme des débits qui arrive à ce nœud est égale à la somme des débits qui en sortent
- **2^{ème} loi** : le long d'un parcours orienté et fermé, la somme algébrique des pertes de charge est nulle

Soit la maille ABCDEF, on peut écrire :

- $Q = Q_1 + Q_2$ (1^{ère} loi)
- $J_1 - J_2 = 0$ (2^{ème} loi)
- $J_1 = \text{pdc tronçon ABCD}$
- $J_2 = \text{pdc tronçon AFED}$



La méthode consiste à se fixer à priori les débits et le sens d'écoulement, ces débits arbitrairement choisis différent des débits réels de la valeur « Δq » qui est donnée par la formule de FAIR. Cette valeur de Δq doit tendre vers zéro.

On fixe les débits Q_1 (trop fort de Δq) et Q_2 (trop faible de Δq) :

- La 1^{ère} loi donne : $Q = (Q_1 + \Delta q) + (Q_2 - \Delta q) = Q_1 + Q_2$
- La 2^{ème} loi donne : $J_1 - J_2 = 0$

$$J_1 = R_1 (Q_1 + \Delta q)^2$$

$$J_2 = R_2 (Q_2 - \Delta q)^2$$

$$\Rightarrow R_1 (Q_1 + \Delta q)^2 - R_2 (Q_2 - \Delta q)^2 = 0$$

En développant l'expression et en négligeant les termes en Δq^2 , on obtient :

$$\Delta q = \frac{-R_1 Q_1^2 + R_2 Q_2^2}{2(R_1 Q_1 + R_2 Q_2)}$$

Les débits choisis doivent être corrigés comme suit (avec Δq en valeur algébrique) :

- $Q'_1 = Q_1 + \Delta q$
- $Q'_2 = Q_2 - \Delta q$

En opérant de la sorte plusieurs fois de suite (pour satisfaire la 2^{ème} loi $\Delta q \Rightarrow 0$), on s'approchera du débit réel avec une bonne approximation.

Avec : $R_1 = J_1/Q_1^2$ et $R_2 = J_2/Q_2^2$

L'expression devient :

$$\Delta q = - \frac{J_1 - J_2}{2(\frac{J_1}{Q_1} + \frac{J_2}{Q_2})}$$

Ce qui en se généralisant se traduit par la formule de Fair :

$$\Delta q = - \frac{\sum J}{2 \sum \frac{J}{Q}}$$

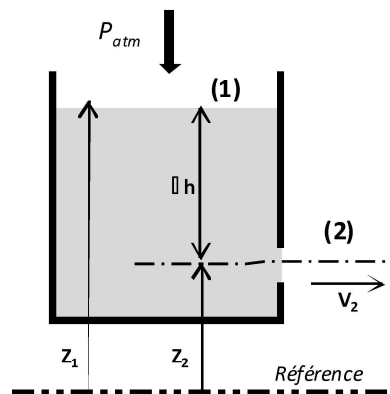
- $\sum J$: en valeur algébrique
- $\sum J / Q$: en valeur absolue

-11- ORIFICES, AJUTAGES ET DEVERSOIRS

Un orifice est constitué par une ouverture sur une paroi, l'écoulement se fait à surface libre. Il peut être :

- En paroi mince (le jet ne touche que le bord interne de l'orifice)
- En paroi épaisse (généralement en maçonnerie)

11.1 Orifice non noyé



Bernoulli entre (1) et (2) donne :

$$z_1 + \frac{p_{atm}}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_{atm}}{\rho g} + \frac{v_2^2}{2g}$$

Avec :

- $P_1 = P_2 = P_{atm}$
- $Z_1 - Z_2 = \Delta h$
- $V_1 = 0$ (bassin de grande dimension)

D'où (formule de Torricelli) :

$$v_2 = \sqrt{2 g \Delta h}$$

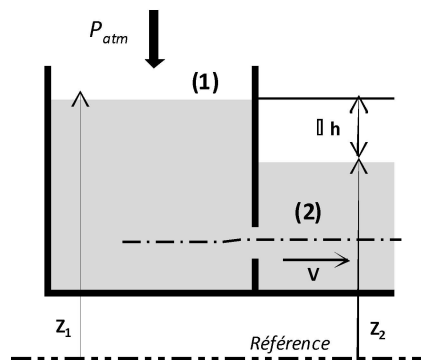
Il s'agit en fait de la vitesse théorique, la veine liquide étant contractée au niveau de l'orifice, la vitesse est pondérée par un coefficient **m**, dans ces conditions et pour une section de l'orifice **S**, le débit est alors :

$$Q = m S \sqrt{2 g \Delta h}$$

Dans la littérature spécialisée, on trouve la valeur du coefficient **m** à prendre en compte suivant la configuration du dispositif. En première approximation on adopte en général, pour un orifice circulaire

$$m = 0,62$$

11.2 Orifice noyé



En appliquant le même raisonnement que pour l'orifice non noyé, on obtient la même relation, à savoir :

$$Q = m S \sqrt{2 g \Delta h}$$

Avec dans ce cas : Δh = différence d'altitude des plans d'eau amont / aval

La valeur du coefficient **m** est du même ordre que pour les orifices non noyés, pour une vanne de fond rectangulaire, le coefficient m est pris en général à **m = 0,7**

11.3 Ajustages

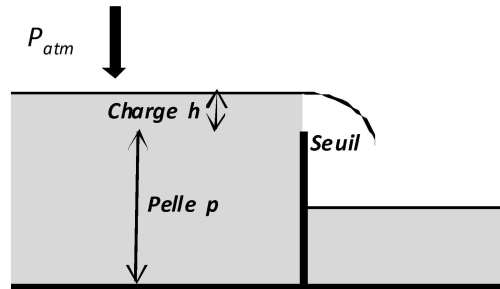
Un ajustage est en général une portion de tuyau de faible longueur continuant intérieurement ou extérieurement un orifice.

Ajustage cylindrique sortant		$Q = 0,82 S \sqrt{2 g \Delta h}$
Ajustage cylindrique rentrant (dit de Borda)		Ajustage court $Q = 0,5 S \sqrt{2 g \Delta h}$ Ajustage long $Q = 0,7 S \sqrt{2 g \Delta h}$
Ajustage à veine moulée	Epouse la forme du jet (tuyères)	$Q = 0,98 S \sqrt{2 g \Delta h}$

11.4 Déversoirs

Un déversoir est un orifice superficiel, généralement rectangulaire, ouvert à sa partie supérieure et pratiqué dans une paroi verticale.

Le plan d'eau à une certaine distance en amont du déversoir peut être considéré comme horizontal.



Quelle que soit la nature du déversoir, son débit est donné par la formule :

$$Q = m l h \sqrt{2 g h}$$

Il existe, dans la littérature spécialisée, différentes formules et tableaux qui donnent les valeurs de m suivant le type de déversoir et la configuration du dispositif hydraulique.

Pour un déversoir à mince paroi, la formule de Bazin fournit une valeur de m :

$$m = \left(0,405 + \frac{0,003}{h} \right) \left[1 + 0,55 \left(\frac{h}{h+p} \right)^2 \right]$$

Pour un déversoir à seuil épais, on a la relation suivante :

$$Q = 0,385 l h \sqrt{2 g h}$$

Nota :

Les déversoirs peuvent être utilisés comme instrument de mesure du débit sous réserve de respecter un certain nombre de conditions de conception (géométrie, écoulement, ...)