

L'hydraulique urbaine

Présenté par : A.Gouzrou (Ingénieur dans le domaine de l'eau)

Janvier 2011

Sommaire

- 1) Généralités.**
- 2) Les besoins en eau.**
- 3) Généralités d'hydrodynamique.**
- 4) Calcul des pertes de charges.**
- 5) Généralités sur les pompes hydrauliques.**
- 6) Les conduites d'eau.**
- 7) Les châteaux d'eau.**
- 8) Généralités sur les réseaux de distribution.**
- 9) Calcul du prix de revient de l'eau.**

Généralités

I) Objet de l'hydraulique :

L'hydraulique est la science et la technique qui étudie l'eau sous l'aspect aussi bien statique que dynamique. Elle essaie de décrire, analyser et expliquer un certain nombre de phénomènes ou propriétés à travers des lois connues de sciences exactes (mécanique, chimie, thermodynamique...).

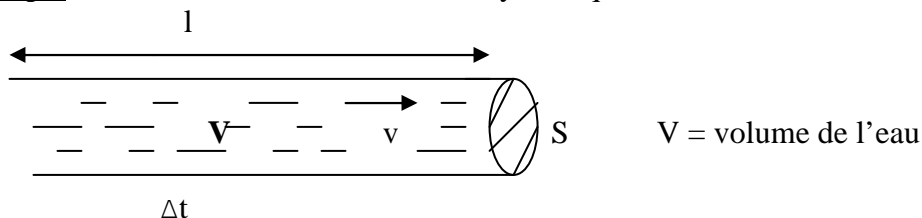
II) Paramètres régissant un besoin en eau :

Un besoin en eau qu'il soit la nature est exprimé par le biais de deux grandeurs : la quantité et la qualité.

- la quantité est exprimée par **le débit**.

Le débit est le volume s'écoulant par unité de temps ($Q = V/t$), il s'exprime en m^3/s .

Exemple : écoulement dans une conduite cylindrique



$$Q = V/\Delta t = S \times l/\Delta t \quad \text{d'où } Q = v \times S \quad (v \text{ est la vitesse de l'eau})$$

- la qualité de l'eau dépend de l'usage prévu.
- pour une eau destinée à la consommation humaine, beaucoup de critères chimiques et bactériologiques ont été imposés par l'OMS (organisation mondiale de la santé), à titre d'exemple, des concentrations maximales admissibles ont été fixées pour les ions majeurs (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+ , Cl^- , CO_3^{2-} , HCO_3^-).
- pour une eau à usage industriel, on insiste souvent sur le fait qu'elle ne soit pas trop dure ($d = I Ca^{2+} + I Mg^{2+}$).
- pour l'usage agricole, chaque type de culture nécessite une certaine qualité d'eau. Pour la céréaliculture par exemple, on peut tolérer une eau titrant jusqu'à 2 g/l pour la totalité des sels dissous (Résidu sec)

III) Quelques grandeurs physiques relatives à l'eau :

- symbole chimique : H_2O
- masse molaire : 18g
- température d'ébullition : $100^\circ C$
- température de fusion : $0^\circ C$
- masse volumique : $1g/cm^3 = 1000 Kg/m^3$
- poids volumique : $\omega = \rho g = 10^4 N/m^3$

Les besoins en eau

I/- Introduction :

L'évaluation des besoins en eau constitue la première phase dans la conception d'un projet hydraulique. (Eau potable, irrigation, industrie). C'est à partir des besoins calculés qu'un dimensionnement des différents organes peut se faire (pompes, conduites, châteaux d'eau.. etc.).

Les besoins sont variables dans le temps, il y a lieu de cerner cette évolution dans le temps.

II/-calcul des besoins :

II-1- Eau potable :

Les besoins moyens en milieu urbain Marocain sont de l'ordre de 80 à 150 l/j/habitant (ville moyenne à grande ville). En milieu rural, ils sont de l'ordre de 30 à 40 l/j/habitant. A côté des besoins moyens, on définit les besoins de pointe. (Périodes de forte demande). En milieu urbain par exemple, on prend souvent un coefficient de pointe qui est de l'ordre de 1,5.

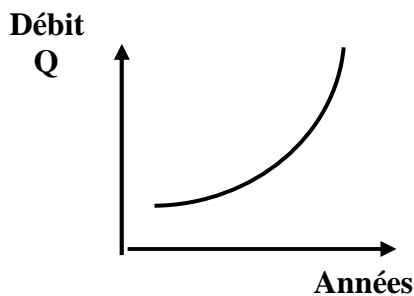
La population est donc la base des calculs, celle - ci varie dans le temps selon la loi suivante :

$$P_n = P_o (1+i)^n$$

Avec P_n = population à un horizon n .

i = Taux d'accroissement démographique (de l'ordre de 1 à 2% dans le contexte national Marocain).

Les besoins en eau potable varient donc d'une manière exponentielle.



On définit également les besoins à court terme, moyen terme et long terme. Le choix des horizons est arbitraire.

Ex : court terme = 2011 ; moyen terme = 2020 ; Long terme = 2050

Dans la conception d'un projet d'eau potable .Il faut fixer les paramètres suivants :

- ❖ L'année de référence (année où l'étude se fait)
- ❖ L'année de mise en service

❖ L'horizon de l'étude ou l'année de saturation.

La consommation d'eau est la partie où volume d'eau réellement utilisé, c'est un paramètre qu'il faut également cerner à partir de la production.

Le débit fictif continu est le débit qui serait théoriquement pompé d'une manière continue ($24^h/24^h$). Autrement dit, on transforme un débit instantané qui est pompé pendant une certaine durée (2^h , 4^h ou 8^h etc.) en un débit durable dans le temps.

Dans un réseau d'eau potable on définit également le taux de raccordement ou de branchement au réseau. Comme son nom l'indique, c'est le pourcentage d'abonnés qui sont branchés sur le réseau.

Dans un projet, il peut y avoir plusieurs variantes en matière d'alimentation en eau. Dans de tels cas, il faut procéder à des comparaisons technico-économiques et faire des calculs concernant le prix de revient du mètre cube d'eau produit. La variante retenue doit minimiser ce prix de revient.

II-2 - Irrigation :

Les besoins d'irrigation dépendent essentiellement de deux facteurs :

- ❖ La nature des assolements (type de cultures)
- ❖ La superficie à irriguer

En fait, si on parle des consommations en eau, il faudrait ajouter un troisième facteur qui est la technique d'irrigation : (gravitaire, aspersion, irrigation localisée, etc.).

La faisabilité d'un périmètre irrigué est étroitement liée aux ressources en eau.

Il est donc fondamental de calculer les besoins (et surtout les besoins de pointe) et les confronter avec les ressources existantes. Ceci permet d'arrêter le programme des assolements et également les superficies à irriguer. De même que les projets d'eau potable, il faut calculer le prix de revient de l'eau. Notons aussi qu'un projet agricole doit être rentable, pour cela il faut prévoir dans les études de faisabilité les calculs économiques et notamment le T.R.I (taux de rentabilité interne).

II.3) Industrie :

Les besoins sont variables selon l'industrie considérée et le procédé de fabrication ou production envisagé (traitement de minerais, fabrication de papiers, ...).

Toute usine doit intégrer dans son mécanisme de production les besoins en eau aussi bien sur le plan quantitatif que qualitatif.

Exemples :

- Une usine de textile dans le quartier industriel de Marrakech à un besoin en eau évalué à $32 \text{ m}^3/\text{heure}$ (9 l/s en fictif continue).
- Une mine polymétallique dans la région de Marrakech a un besoin en eau de l'ordre de 120 l/s pour le traitement du minerai.

Remarque :

On évoque souvent la notion de stress hydrique et notamment par les organismes internationaux (La Banque mondiale par exemple), on parle de stress hydrique lorsqu'on a une dotation en eau inférieure à $1000 \text{ m}^3 / \text{an} / \text{habitant}$.

Exercices

1/- Dans un puits, on pompe chaque jour un débit $Q=15 \text{ l/s}$ pendant 10 heures. Quel est le débit fictif continu ?

Réponse :

Le débit fictif continu correspond a un pompage 24 h/ 24h.

$Q= 15 \text{ l/s}$, $V (24 \text{ heures}) = 15 \times 10 \times 3600 \text{ litres}$.

Ce volume est pompé pendant 24 heures donc $Q= \frac{15 \times 10 \times 3600}{24 \times 3600} (\text{l/s})$

Soit $Q = 15 \times \frac{10}{24}$

$Q = 6,25 \text{ l/s}$

2/- La production de l'ONEP en eau potable pour la ville de Chichaoua pendant l'année 1995 a été comme suit :

Production (m^3)	Consommation (m^3)	Nombre d'abonnés
276979	198940	1184

Sachant qu'un abonné représente un foyer de 6 personnes, calculer la consommation par habitant.

Réponse :

Le nombre d'habitants consommateurs est de $1184 \times 6 = 7104$ habitants. La consommation annuelle est de 198940 m^3 soit donc

$$\frac{198940}{7104} = 28 \text{ m}^3 / \text{habitant (pendant 365 jour),}$$

D'où la consommation (par litre/jour/habitant) qui est de

$$\frac{28}{365} \times 1000 =$$

77 Litres / jour/habitant

3/- En milieu urbain Marocain (grande ville), la dotation en matière d'eau potable est en moyenne de l'ordre de 120 l/j/habitant . Une ville compte 50.000 habitant en 2007, calculer

les besoins moyens et les besoins de pointe pour les années 2007, 2015, 2025, 2050, on admet que l'accroissement démographique est de l'ordre de 1 % annuellement. On admet également un coefficient de pointe de 1,5.

On suppose que les besoins (120 l/j/habitant) restent constants au cours de la période étudiée.

Réponses :

En 2007, les besoins moyens sont de $50.000 \times 120 \text{ l/j} = 70 \text{ l/s}$.

Les besoins de pointe sont $70 \times 1,5 = 105 \text{ l/s}$.

En l'an 2015, la population est $P = 50.000 (1+0.01)^8 = 54143 \text{ habitants}$

En 2025, $P = 50.000 (1+0.01)^{18} = 59807 \text{ habitants}$

En 2050, $P = 50.000 (1+ 0.01)^{43} = 76700 \text{ habitants}$

Les besoins seront donc comme suit :

Années	2007	2015	2025	2050
Besoins moyens (l/s)	70	75	83	107
Besoins de pointe (l/s)	105	113	125	161

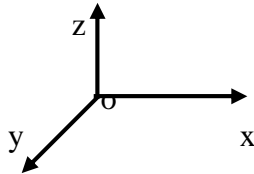
Généralités d'hydrodynamique

I/- Introduction :

L'objectif principal de l'hydrodynamique est de déterminer en un point donné la vitesse, la pression, le débit et leurs relations au cours de l'écoulement.

II/- Définitions générales :

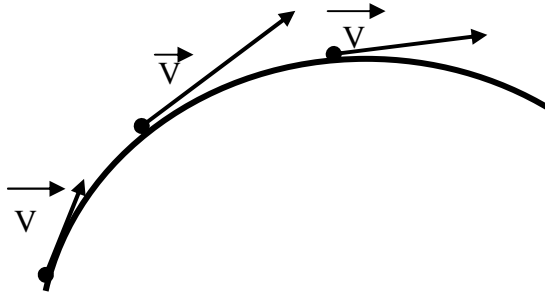
a) Ecoulement permanent :



C'est un écoulement où les caractéristiques d'une particule liquide ne dépendent que de la position du point M. donc $V = f(x, y, z)$; $Q = f(x, y, z)$; $P = f(x, y, z)$.

Dans un écoulement permanent, les caractéristiques d'une particule liquide ne dépendent pas du temps. En contre partie un écoulement non permanent fait intervenir x, y, z et t .

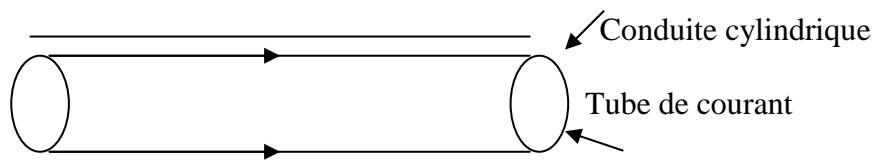
b) ligne de courant :



On appelle ligne de courant, une ligne qui à un instant donné est tangente en chacun de ses points au vecteur vitesse. Si l'écoulement est permanent, les lignes de courant et les trajectoires sont confondues.

c- Tube de courant :

On appelle tube de courant, l'ensemble des lignes de courant appuyées sur un contour fermé placé à l'intérieur de l'écoulement.



d- Ecoulement laminaire :

L'écoulement est dit laminaire si les particules liquides se déplacent suivant des filets parallèles et qui ne changent pas tout le long de l'écoulement.

e- Ecoulement turbulent :

L'écoulement est dit turbulent si au contraire, les particules liquides suivent des trajectoires non régulières et non rectilignes.

La distribution entre l'écoulement laminaire et l'écoulement turbulent est faite à l'aide d'une grandeur appelée : nombre de Reynolds (Re).

$$\boxed{Re = \frac{U \cdot D}{\nu}} \quad \boxed{Re = \frac{Q \cdot D}{S \cdot \nu}} \quad ; \left(U = \frac{Q}{S} \right)$$

U = Vitesse moyenne

D = Paramètre caractérisant l'ouverture de la section d'écoulement, c'est le diamètre pour une section circulaire.

ν = Viscosité cinématique du liquide
(Re est un nombre sans dimension)

- Si $Re < 2000$: écoulement laminaire
- Si $Re > 2000$: écoulement turbulent

f- Ecoulement en charge :

Un écoulement est dit en charge s'il n'y a pas de contact entre le liquide et l'atmosphère. C'est le cas des écoulements dans les conduites.

g- Ecoulement à surface libre :

Le liquide s'écoule en contact avec l'atmosphère, c'est le cas des écoulements dans les canaux découverts et dans les oueds.

h- Equation de continuité :

L'équation de continuité exprime que le liquide est continu, c'est à dire qu'il ne peut y avoir aucune partie du liquide ni apport extérieur, ni prélèvement de la nature. La masse se conserve au cours de l'écoulement.



$$Q_1 = Q_2 \text{ donc } V_1 S_1 = V_2 S_2$$

III/- Différentes formes d'énergie :

En hydrodynamique, l'énergie d'une certaine quantité de liquide, en écoulement est rapportée à l'unité de poids (force) du liquide qui s'écoule. C'est ce qu'on appelle la charge hydraulique H. Les dimensions sont celles d'une longueur (Kg.m/ Kg) → mètre.

Une particule liquide Q amenée d'une vitesse V, soumise à une pression P et située à une côte Z par rapport à un repère, possède par unité de poids 3 formes d'énergie.

a) Energie cinétique :

$W_c = \frac{1}{2} mv^2$; v= Vitesse, or $m = \rho v$ avec ρ = masse volumique et v = volume), donc

$$H_c = \frac{W_c}{F} \text{ et } F = \rho g v \text{ d'où } H_c = \frac{v^2}{2g}$$

b) Energie de pression :

$W_p = p \times v$ avec v = volume et p = pression

$$H_p = \frac{W_p}{F} = p \times v \times (1/\rho g v) \text{ donc } H_p = \frac{P}{\varpi} \text{ avec } \varpi = \text{poids volumique de l'eau}$$

b) Énergie de position ou énergie potentielle :

$$W_z = f \times z \Rightarrow H_z = \frac{F \times z}{F} \text{ d'où } H_z = z$$

z = position du liquide par rapport à un niveau de référence. La charge totale sera donc

$$H = z + \frac{P}{\varpi} + \frac{V^2}{2g}$$

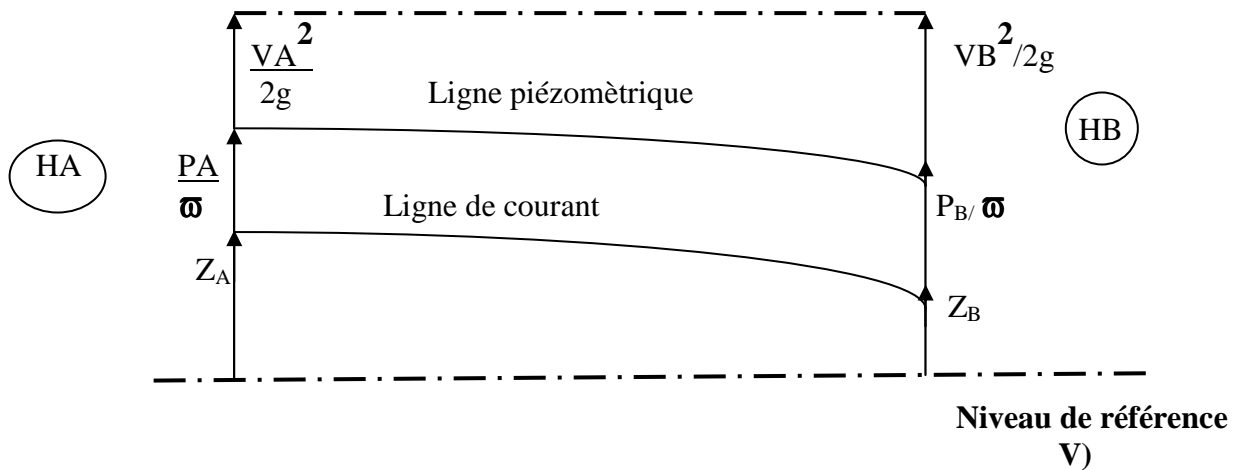
C'est la charge totale d'un filet liquide non visqueux en mouvement permanent sans l'action des seules forces de gravité

IV/- Théorème de Bernoulli pour un liquide parfait (viscosité nulle) :

$$H = z + \frac{P}{\varpi} + \frac{V^2}{2g} = Cte$$

C'est à dire que la charge hydraulique se conserve
Au cours de l'écoulement.

Représentation graphique :



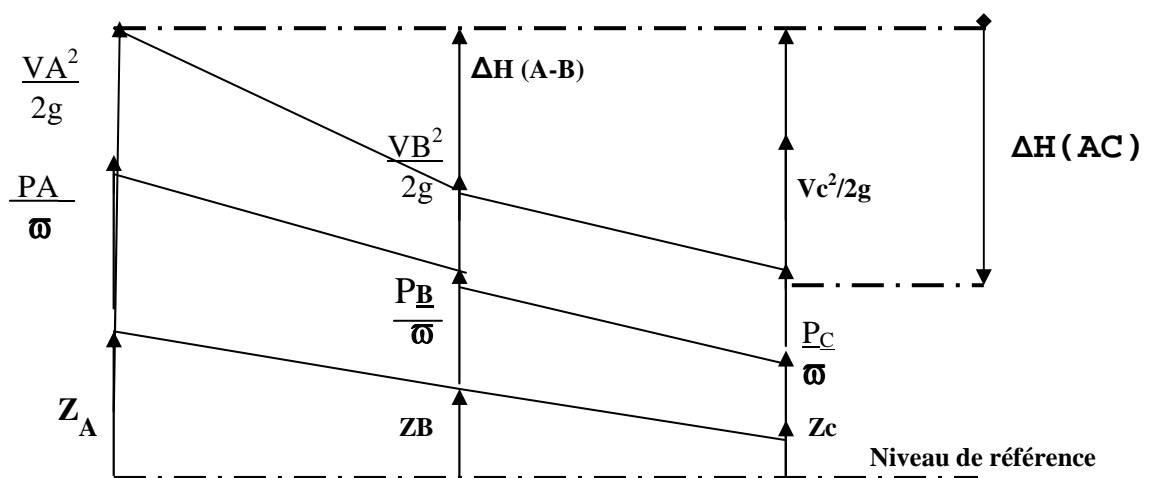
Théorème de Bernoulli pour un liquide réel :

$$H = Z + \frac{P}{\rho} + \frac{V^2}{2g} + \Delta H = \text{Cte}$$

$$Z_1 + \frac{P_1}{\rho} + \frac{V_1^2}{2g} = Z_2 + \frac{P_2}{\rho} + \frac{V_2^2}{2g} + \Delta H \quad (1-2)$$

ΔH 1-2 est appelé pertes de charges entre le point 1 et le point 2 (l'écoulement se faisant du point 1 vers le point 2).

Représentation graphique



L'équation de Bernoulli est souvent utilisée dans les différentes branches de l'Hydraulique, elle est la base des formules de calcul et permet de résoudre des problèmes pratiques importants. Pour y arriver, il faut choisir le niveau de référence d'une manière judicieuse et de même pour les deux points A et B : ceci permet concrètement de minimiser le nombre d'inconnues.

Si l'on introduit dans l'équation de Bernoulli deux inconnues, il faut également appliquer l'équation de continuité.

Pour transporter un débit Q sur une certaine distance, il faut déterminer les caractéristiques de la conduite par un calcul économique tenant compte de sa résistance mécanique, de la pression du fluide et des pertes de charges.

Calcul des pertes de charges

I) Introduction :

Les pertes de charge se composent de deux parties : les pertes de charges singulières ΔH_S et les pertes de charges linéaires ΔH_L .

Les pertes de charges totales sont : $\Delta H_T = \Delta H_L + \Delta H_S$.

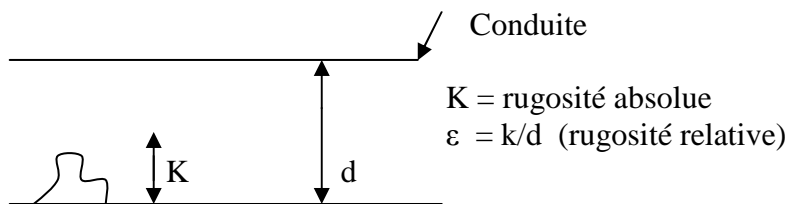
1/- Les pertes de charges linéaires/ :

Ce sont les pertes de charges qui s'effectuent le long d'une conduite dépourvue de singularités. L'expression générale des pertes de charges linéaires s'écrit :

$\Delta H_L = \lambda \times l/d \times v^2/2g$: (Formule de Darcy-Weisbach) avec les désignations suivantes :

v = vitesse moyenne de l'écoulement ; g = accélération de la pesanteur ; d = diamètre de la conduite ; l = longueur de la conduite ; λ = coefficient des pertes de charges linéaires.

Le coefficient λ dépend de la nature de l'écoulement (laminaire ou turbulent) et de la rugosité des parois de la canalisation (K).



Parmi les formules empiriques proposées pour le calcul de λ en fonction de k , on cite la formule suivante :

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 1,74 + 2 \log_{10} [d/2k]$$

Rugosité uniforme équivalente pour quelques types de matériaux :

Nature	Rugosité (en mm)	Nature	Rugosité (en mm)
- Tube de verre	$\sim 10^{-4}$	- Tube en acier soudé rouillé	0.4
- Tube en acier laminé neuf	$\sim 5 \cdot 10^{-4}$	- Tube en fer galvanisé	0.15 à 0.20
- Tube en acier laminé rouillé	0.15 à 0.25	- Tube de ciment lisse	0.3 à 0.8
- Tube en acier laminé incrusté	1.5 à 3	- Tube de ciment brut	jusqu'à 3
- Tube en acier soudé neuf	0.03 à 0.1		

Pour un écoulement laminaire dans une conduite cylindrique $\lambda = 64/R_e$

Avec R_e = nombre de Reynolds.

Il est à noter qu'au fur et à mesure du temps, le coefficient de rugosité k varie ce qui influe sur les pertes de charges.

Pour un écoulement turbulent, les formules sont très nombreuses et très compliquées, la formule la plus utilisée est celle de cool brook à savoir :

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \log_{10} \left[\left(\frac{\epsilon}{3,7 D} \right) + \left(\frac{2,51}{R_e \sqrt{\lambda}} \right) \right] \quad \text{avec } D = \text{diamètre de la conduite}$$

ϵ = rugosité absolue
 R_e = nombre de Reynolds

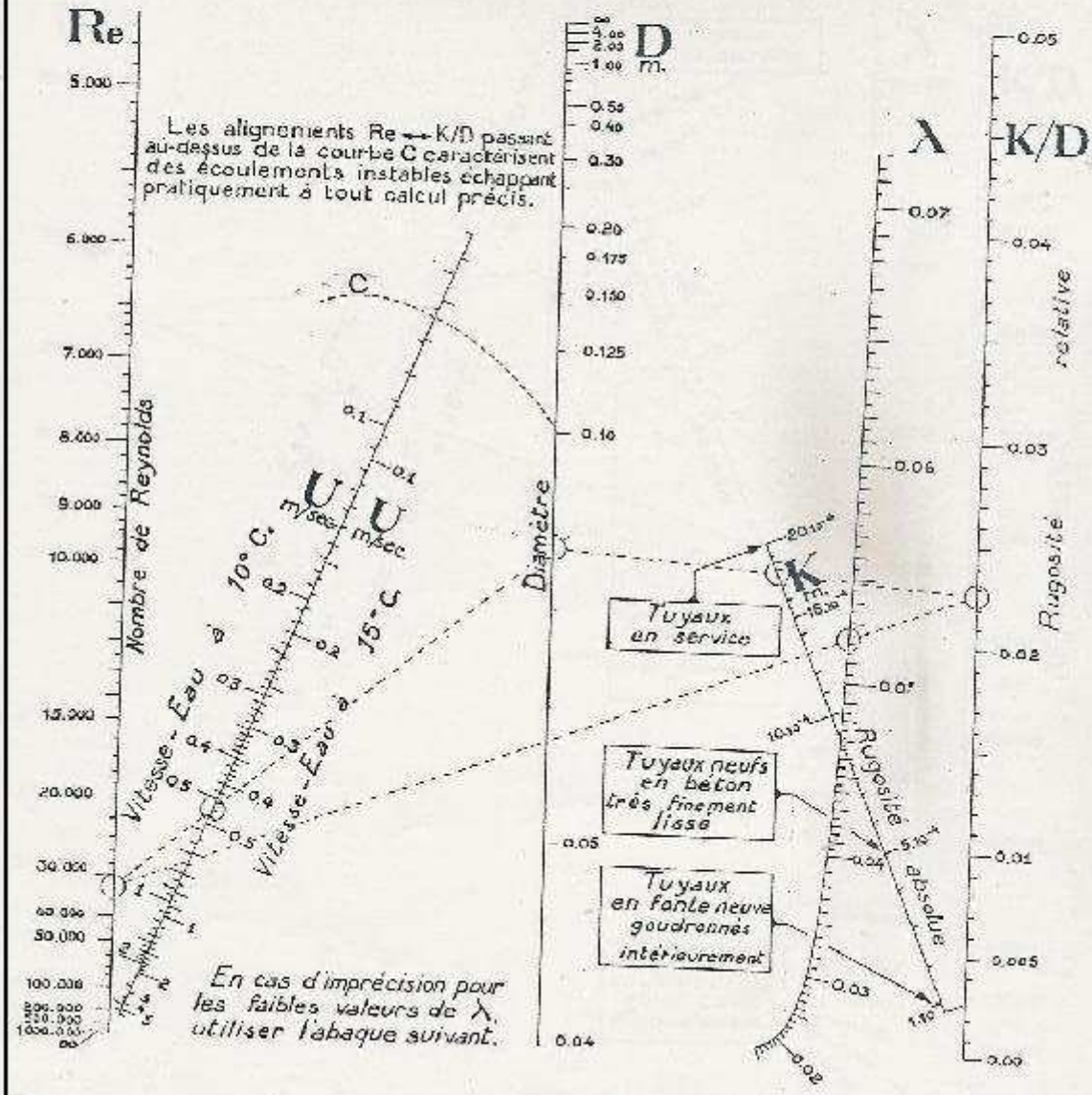
Cette équation est difficile à résoudre, en pratique on utilise un abaque : il suffit de connaître R_e et ϵ/D . (voir Graphiques)

Avec le développement de la micro informatique, et grâce au tableur Excel, on peut calculer λ (outils ----- valeur cible) :

- entrer et afficher tous les paramètres intervenant dans la formule de coolbrook.
- Donner à λ une valeur arbitraire
- Calculer les deux membres de l'équation de coolbrook et afficher la différence de ces deux membres dans une cellule
- Aller dans le menu outils, valeur cible : pour la valeur à atteindre, il faut que la cellule contenant la différence des deux membres soit égale à 0, pour ce faire, la valeur cible à changer est la cellule correspondant à λ
- Une fois que toutes ces étapes sont validées, des itérations seront entreprises et la valeur exacte de λ sera affichée dans la cellule correspondante.

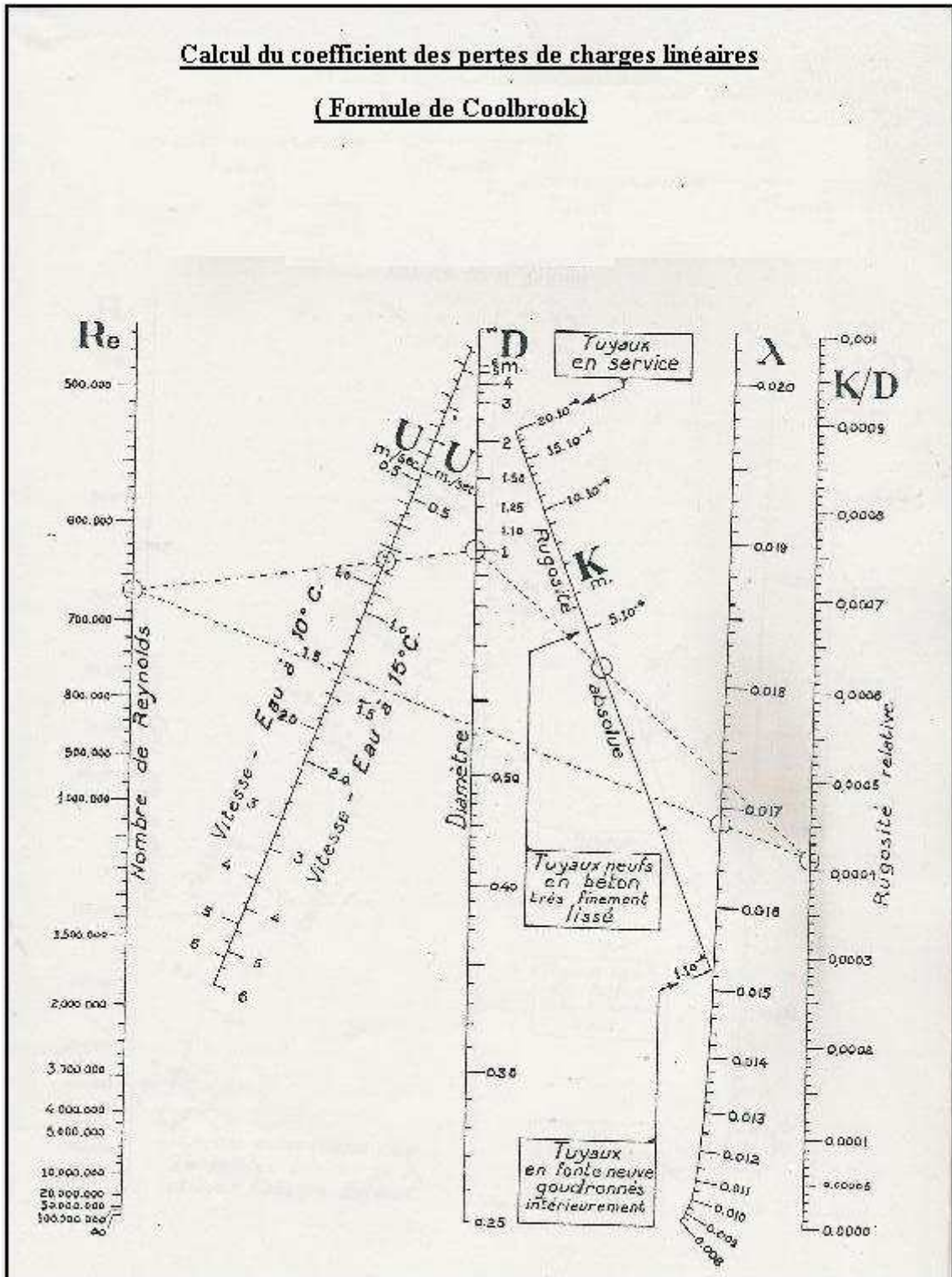
Calcul du coefficient des pertes de charges linéaires

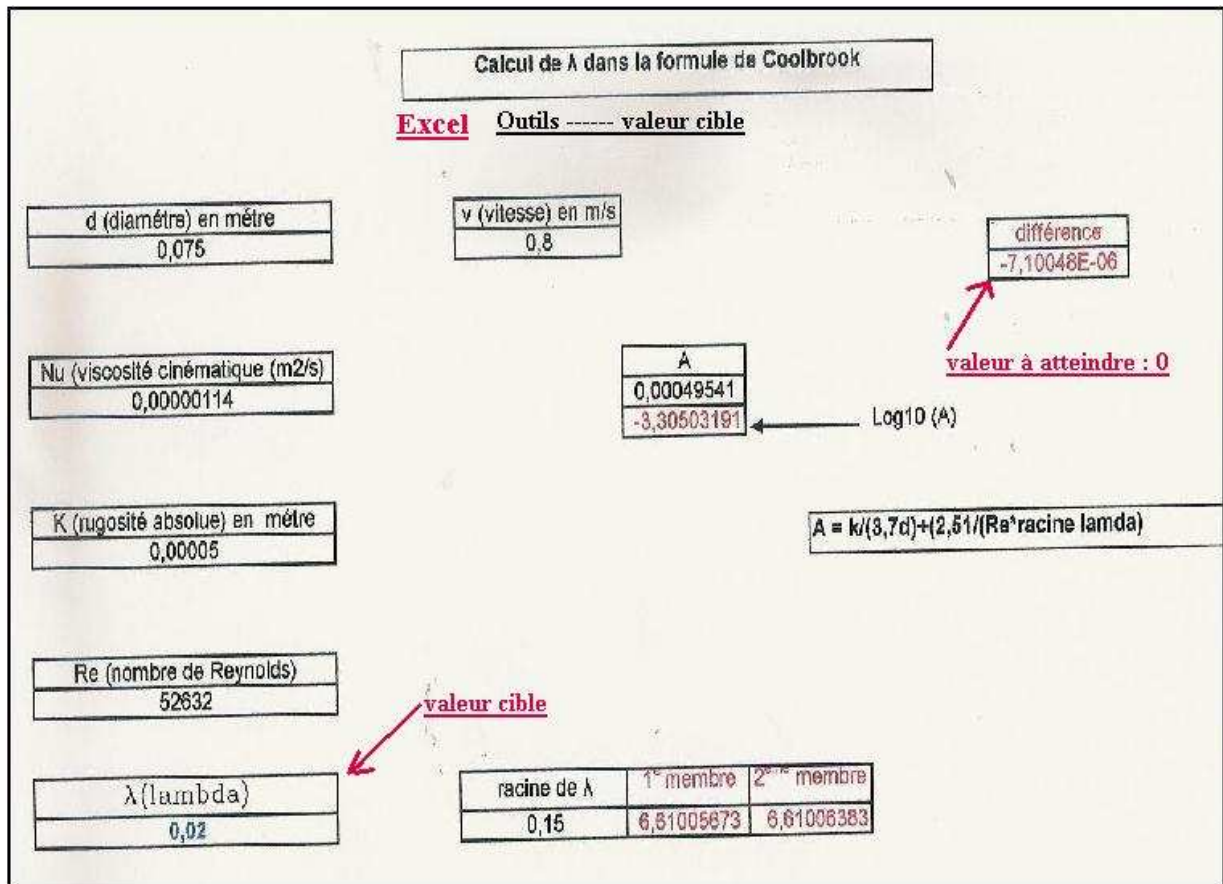
(Formule de Coolbrook)



Calcul du coefficient des pertes de charges linéaires

(Formule de Coolbrook)





Formule de Bausuius : (pour les conduites hydrauliquement lisses).

$$\lambda = 0,316 / Re^{1/4}$$

Formule de Chezy :

$$v = C \sqrt{R_h \cdot j} \quad (1) \text{ avec } v = \text{vitesse} ; j = \text{perte de charge}$$

linéaire par unité de longueur $j = \Delta H_L / L$.

$$R_h = \text{rayon hydraulique} = \frac{\text{Section mouillée}}{\text{Périmètre mouillé}}$$

Ex : Pour une section circulaire totalement remplie. On a $S = \pi D^2/4$; $P = \pi D$

Soit $R_h = D/4$

C : est le coefficient de Chezy ; d'après Manning on a : $C = 1/n R_h^{1/6}$ (2)

n = est un nombre qui dépend de l'écoulement et de la nature de la conduite.

En combinant l'équation (1) et (2) on obtient $v = 1/n R_h^{2/3} \times [\Delta H_L / L]^{1/2}$

Soit :

$$\Delta H_L = \frac{V^2 L}{1/n^2 R_h^{4/3}}$$

Remarque : Dans la formule générale on a $\Delta H_L = \lambda \times 1/d \times v^2/2g$

Soit : $\Delta H_L = 8\lambda L Q^2 / \pi^2 D^5 g$ on voit donc que les pertes de charge linéaire sont :

- Proportionnelles au carré du débit.
- Inversement proportionnelles à D^5 .
- Proportionnelles à la longueur L.

Formule de Hazen Williams : (très utilisé dans les pays Anglo-Saxons)

$$\Delta H_L = L \times 10,72 / (CHW)^{1,85} \times Q^{1,85} / D^{4,87}$$

Avec Q= débit en m³/s ; D = diamètre de la conduite en mètres ; L = longueur de la conduite.

CHW = Coefficient de Hazen Williams.

CHW = 100 pour la fonte.

CHW = 130 pour l'acier galvanisé.

CHW = 95 pour l'acier.

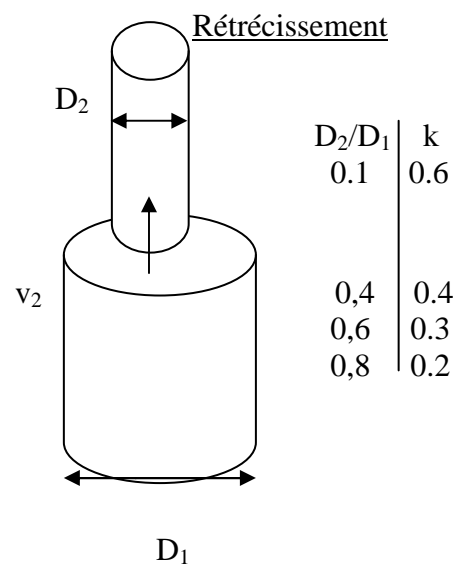
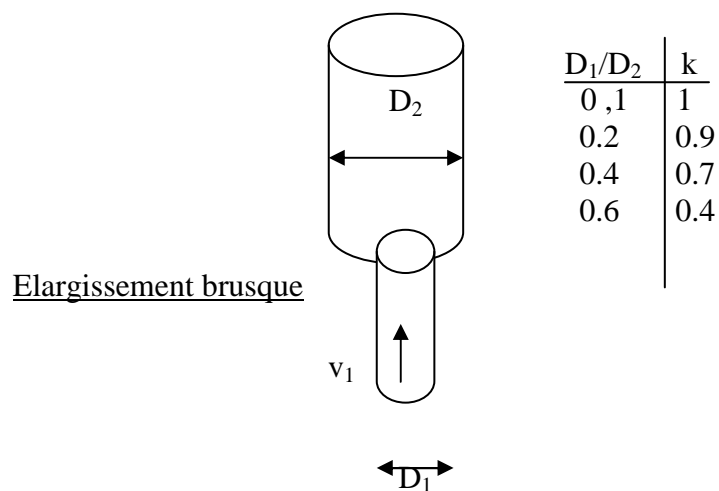
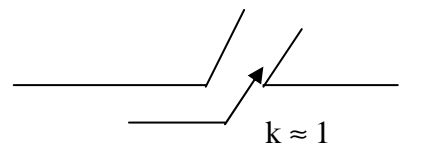
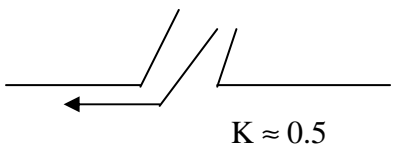
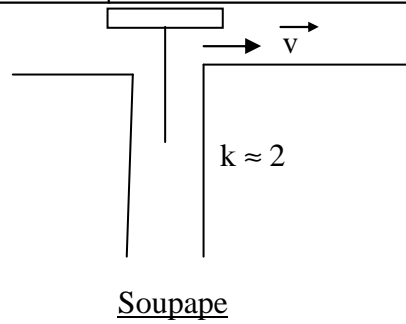
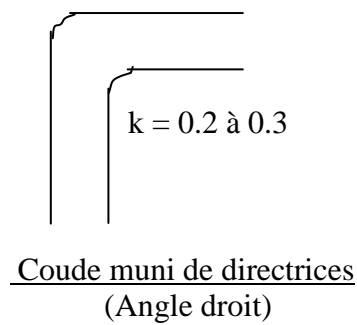
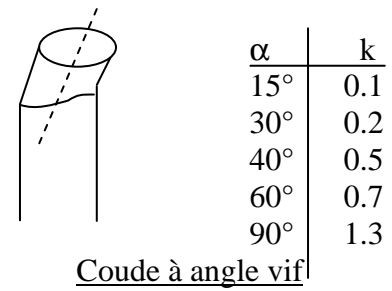
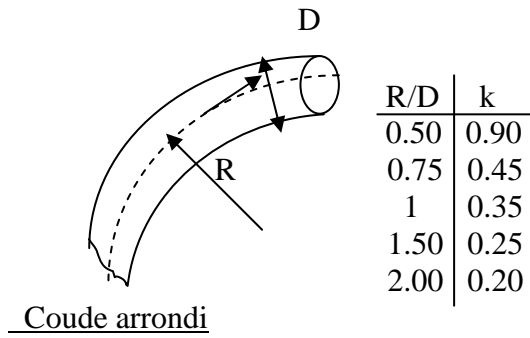
2) Les Pertes de Charges Singulières :

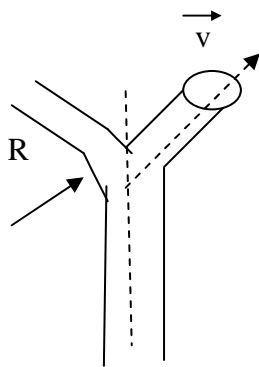
On appelle pertes de charges singulières celles qui sont occasionnées par les singularités (Coudes, vannes, clapets, branchement ...etc), c'est à dire en dehors de longs alignements.

La formule générale des pertes de charges singulières s'écrit : $\Delta H_S = k \times v^2/2g$

k est un coefficient sans dimension qui dépend de la forme et des dimensions de l'irrégularité.
v est la vitesse de l'eau.

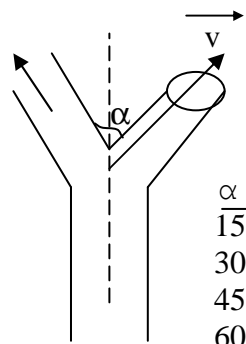
Les cas de figures suivants donnent certaines valeurs de k :





R/D	K
0,5	1,2
0,75	0,6
1	0,4
1,5	0,25
2	0,20

Bifurcation arrondie



α	k
15°	0,1
30°	0,3
45°	0,7
60°	1
90°	1,4

Bifurcation à angle vif

Exercices

Ex 1 : Déterminer les pertes de charges à l'arrivée de l'eau avec une vitesse $v=0,7$ m/s à partir d'une conduite en béton bien lisse de diamètre $d= 0,075$ m et de longueur $l= 20$ m. La viscosité cinématique de l'eau dans ces conditions est $\nu= 0.0131$ stokes.

Réponses :

$$\Delta H_L = \lambda \times \frac{l}{d} \times \frac{v^2}{2g} ; l, d \text{ et } v \text{ sont connus.}$$

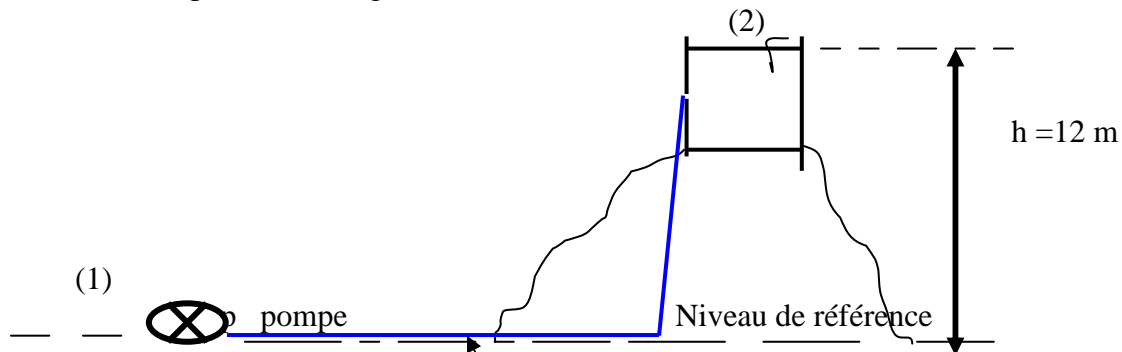
D'après la formule de Blasius, $\lambda = 0,316 / Re^{0,25}$ (écoulement hydrauliquement lisse)

$$Re = V \times D / \nu \text{ soit } Re = 40076 \text{ d'où } \lambda = 0,022 ; \text{ tout calcul fait,}$$

On obtient

$$\Delta H = 0,14 \text{ m}$$

Ex 2 : Déterminer la pression manométrique que doit fournir une pompe pour amener de l'eau en quantité $Q = 15$ l/s dans un château d'eau à la hauteur de 12 m par une tuyauterie de longueur $l = 50$ m. Diamètre des conduites ; $d = 150$ mm. Prendre $\lambda = 0,03$ et $k = 0,2$ (coefficients des pertes de charges).



Réponse :

conduite d'amenée

Appliquons l'équation de Bernoulli entre les points 1 et 2

$$Z_1 + \frac{P_1}{\rho} + \frac{V_1^2}{2g} = Z_2 + \frac{P_2}{\rho} + \frac{V_2^2}{2g} + \Delta H$$

On peut travailler avec des pressions manométriques : ($P_2 = 0$).

$$\text{Or } Z_1 = 0 ; Z_2 = 12 \text{ m} ; V_2 = 0. ; Q = v.s = v. \frac{\pi d^2}{4} \text{ soit}$$

$$V = 4Q/\pi d^2 \quad \underline{\text{A.N}} \quad V = 0,85 \text{ m/s.}$$

$$\text{Donc } P1 + \frac{(0,85)^2}{10^4} = \frac{12}{20} + \Delta H$$

$$\Delta H = \Delta H_L + \Delta H_s.$$

$$\Delta H_L = \lambda \times \frac{1}{d} \times \frac{v^2}{2g} \quad \text{soit } \Delta H_L = 0,36 \text{ m}$$

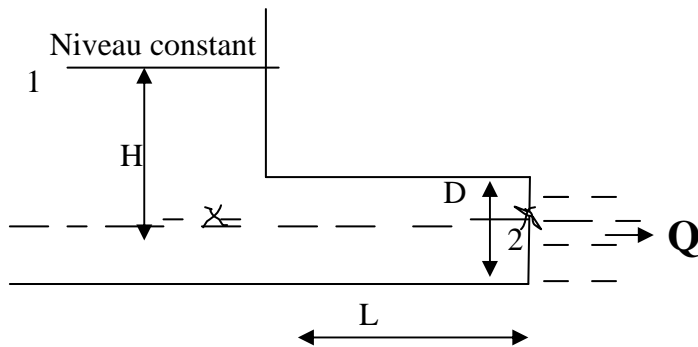
$$\Delta H_s = k \times \frac{v^2}{2g} = 0,007 \text{ d'où } \Delta H_T = 0,37 \text{ m}$$

$$\text{Donc } \frac{P}{104} + \frac{(0,85)^2}{20} = 12 + 0,37 ; P = 123340 \text{ Pa}$$



$P = 1,23 \text{ bars.}$

Ex 3 :



$H = 10 \text{ m}$, $n \text{ (acier)} = 0,01$, $d = 80 \text{ cm}$; $L = 800 \text{ m}$; $K = 0,5$ calculer le débit Q à la sortie de la conduite.

Réponse :

L'exercice en question peut être assimilé à un barrage où on veut calculer le débit au niveau de la vidange de fond.

Appliquons l'équation de Bernoulli entre les points 1 et 2.

$$\text{On a } z_1 + \frac{P_1}{\varpi} + \frac{v_1^2}{2g} = z_2 + \frac{P_2}{\varpi} + \frac{v_2^2}{2g} + \Delta H$$

$$Z_1 = H ; z_2 = 0.$$

$$P_1 = (P_{atm}); P_2 = P_{atm} ; v_1 = 0.$$

$$\text{Donc } H = \frac{V^2}{2g} + \Delta H$$

$$\Delta H = \Delta H_L + \Delta H_s$$

$$\text{Avec } \Delta H_L = \frac{L n^2 v^2}{(Rh)^{4/3}} \text{ et } \Delta H_s = K \frac{v^2}{2g}$$

$$\text{D'où } \Delta H = \frac{v^2}{2g} \left[\frac{2g L n^2}{(Rh)^{4/3}} + k \right] \text{ d'où}$$

$$H = \frac{v^2}{2g} + \frac{v^2}{2g} \left[\frac{2g L n^2}{(Rh)^{4/3}} + k \right] \text{ soit, } H = \frac{v^2}{2g} \left[1+k+ \frac{2g L n^2}{(Rh)^{4/3}} \right]$$

$$\text{Avec } Rh = \frac{d}{4} \text{ donc}$$

$$V = \sqrt{\frac{2gH}{1+k+ \frac{2g L n^2}{(d/4)^{4/3}}}}$$

A.N

$$V = 3,6 \text{ m/s.}$$

$$Q = V.S = V.\pi d^2/4$$



$$Q = 1,8 \text{ m}^3/\text{s}$$

Généralités sur les pompes hydrauliques

I) Introduction :

Une pompe hydraulique est une machine constituée d'un ensemble d'organes électro-mécaniques aspirant l'eau au niveau d'un point pour le refouler vers un autre. Dans le choix technico-économique d'une pompe au sein d'un projet on doit tenir compte des aspects suivants :

- Il faut que l'eau arrive jusqu'à l'utilisateur en débit et pression demandés.
- Assurer un bon rapport qualité/prix.
- Il faut que la qualité du matériel choisi procure une durée de vie aussi longue que possible des différents organes.

II) Les pompes centrifuges :

Ce sont les pompes les plus utilisées en pratique. Ces pompes donnent des débits qui varient en raison inverse des hauteurs de refoulements. Le système de pompage est soit thermique, soit électrique. (Le pompage solaire et éolien font partie du domaine des énergies renouvelables qu'on verra dans le prochain chapitre).

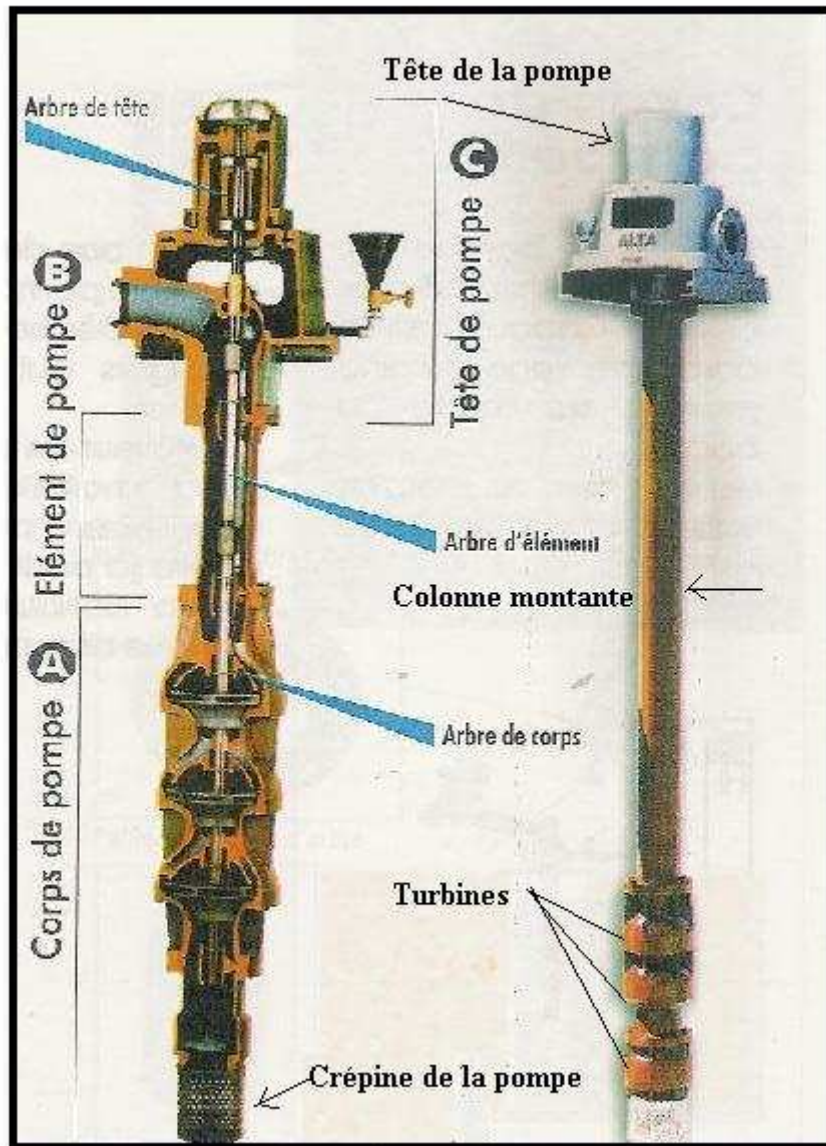
- pompage thermique : pompe mécanique à axe vertical ou horizontal entraînée par un moteur diesel.
- Pompage électrique : pompe électrique alimentée par le réseau de l'ONE (office national de l'électricité) ou par un groupe électrogène.

Définition : un groupe électrogène est une machine électrique constituée d'un moteur diesel qui actionne un alternateur et ce dernier produit de l'électricité. La consommation normale en fuel est de l'ordre de 160 à 180 g/cv/heure.

Un groupe électrogène



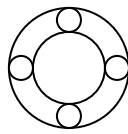
II.1) pompe mécanique à axe vertical :



Ces pompes sont très utilisées en milieu rural Marocain et notamment pour l'irrigation. Ces pompes se composent de :

- La tête de la pompe qui supporte tout le poids du système et reçoit le mouvement de rotation du moteur par l'intermédiaire d'une courroie. Ce mouvement est transmis au corps de la pompe par le biais de la poulie.
- Un corps de turbine (une ou plusieurs turbines), le nombre de turbines varie en fonction de la hauteur de refoulement. Dans la partie inférieure se trouve la crépine qui permet à l'eau d'entrer et d'être aspirée tout en bloquant les corps étrangers. A l'intérieur de la crépine se trouve un clapet anti-retour permettant à la colonne de refoulement de rester pleine.

- Une colonne montante qui est constituée d'éléments en acier (galvanisés à chaud dans le meilleur des cas) avec une longueur de 2,5 m. Ces éléments sont reliés entre eux par des brides

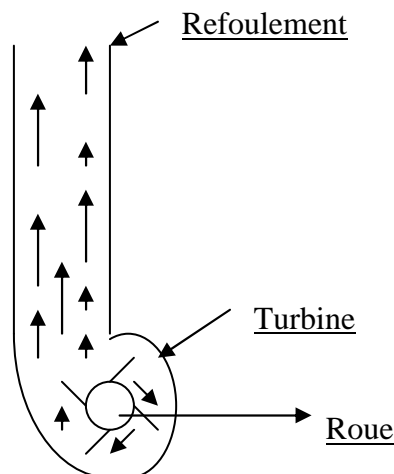


Une bride

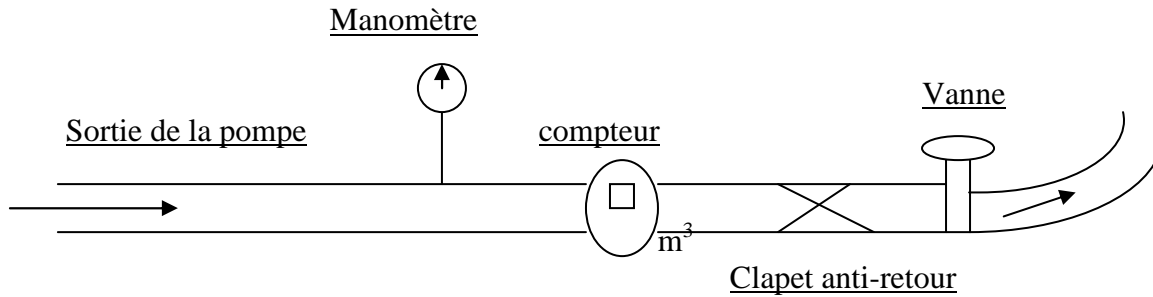
L'axe d'entraînement vertical est centré dans la conduite de refoulement, c'est un arbre généralement en acier sur lequel sont fixées la ou les turbines, c'est donc cet axe qu'il faut faire tourner à une vitesse donnée pour que les turbines puissent fouetter l'eau et la déplacer. La colonne montante est livrée dans le commerce selon son diamètre exprimé en pouces (1'' = 2,54 cm) en fonction du débit désiré :

Débit en m ³ /h	Vitesse de rotation en tr/min	Diamètre de la colonne en pouces
20 à 25	1500 à 1750	2,5
25 à 40	1750 à 2500	3

- un moteur diesel à démarrage électrique (souvent par batterie de 12 V) fournit l'énergie à la pompe par l'intermédiaire de la courroie. La vitesse de rotation est souvent comprise entre 1500 et 3000 tr/min. L'eau introduite par l'orifice d'aspiration arrive au centre du corps, elle est entraînée en rotation par les aubes de la roue. La force centrifuge projette l'eau à la périphérie du corps de la pompe d'où elle s'échappe par l'orifice de refoulement, le vide partiel créé par l'aspiration assure l'arrivée continue de l'eau.



La liaison entre une pompe et une conduite de refoulement se présente souvent comme suit :

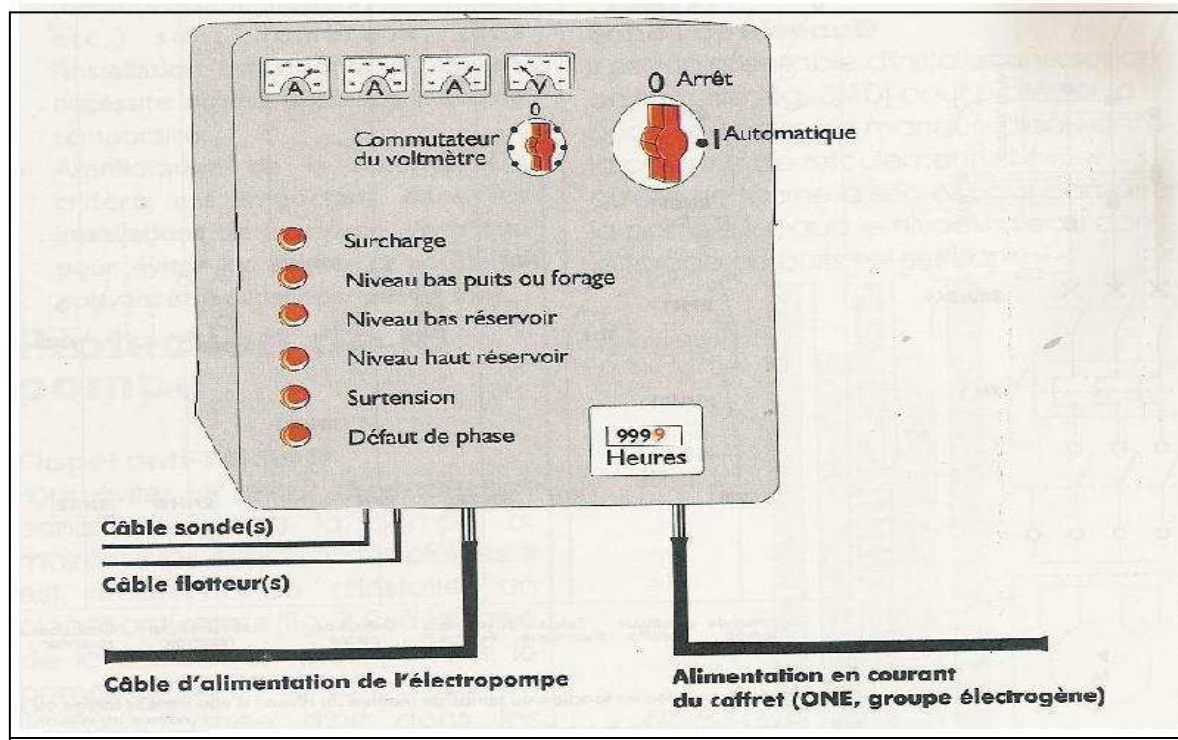


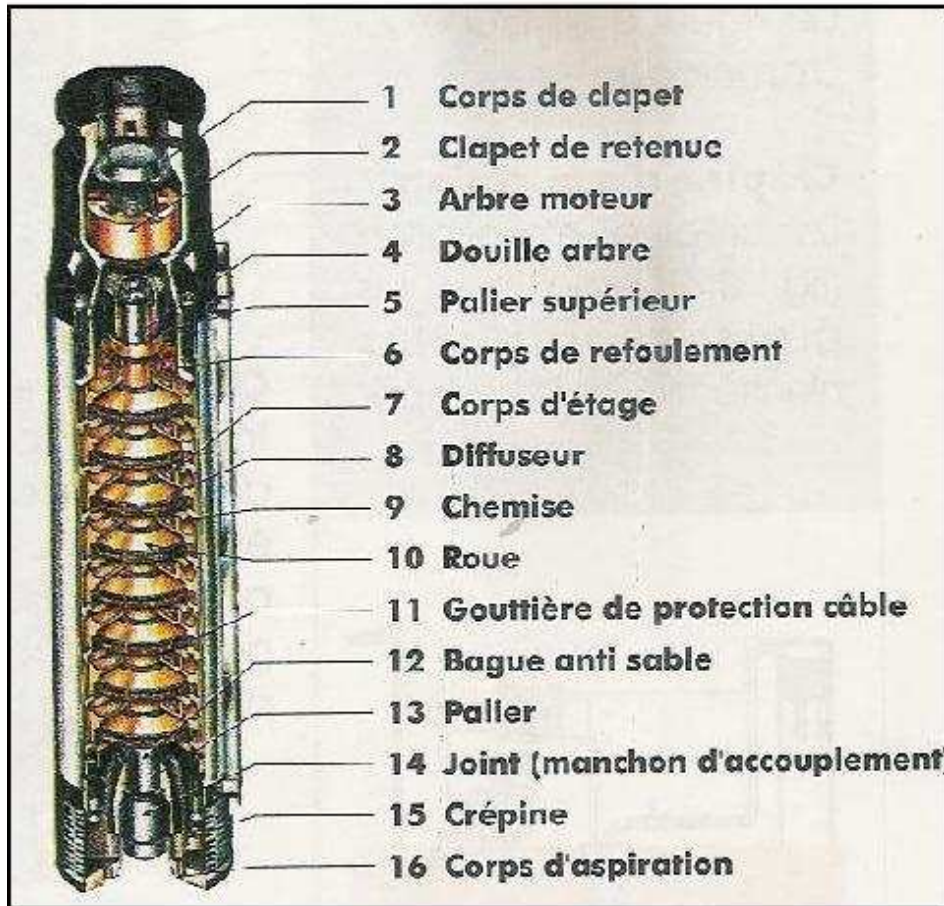
II.2) Pompe mécanique à axe horizontal :

On les emploie souvent pour pomper dans une rivière, un canal ou un puits peu profond. Le principe est le même qu'une pompe à axe vertical seulement que l'axe est cette fois-ci horizontal.

II.3) les pompes immergées :

Ce type de pompe doit son appellation au fait que le corps de la pompe ainsi que le moteur sont prévus pour être noyés dans l'eau. Il est même indispensable que le moteur le soit, car son refroidissement est obtenu par la circulation de l'eau autour du moteur. Ces pompes sont livrées sous une tension de 220 ou 380 V en circuit triphasé et sous une fréquence de 50 Hz. Leur vitesse étant voisine des 3000 tr/min, le moteur est accouplé en direct avec la pompe. Un câble électrique également noyé dans l'eau relie le moteur au boîtier de démarrage placé dans un abri en surface. Ce boîtier est lui-même relié à la source d'énergie électrique (réseau ONE ou groupe électrogène).





Une pompe immergée est multicellulaire composée d'étages qui portent chacun une roue comme le montre la figure précédente.

L'armoire de commande d'une pompe électrique dispose d'indicateurs et de voyants lumineux, il est souvent constitué de métal galvanisé et est placé sous abri pour être protégé vis-à-vis des aléas climatiques. Les dimensions sont souvent standard, (pour les petites installations, on a généralement 40 cm de longueur, 30 cm de largeur et 20 cm d'épaisseur). Les éléments indiqués sont souvent comme suit :

- Interrupteur pour la mise en marche (position 1) et arrêt (position 0), manuel et automatique.
- Température du moteur, si celle-ci est supérieure à la température préconisée par le constructeur, un voyant s'allume.
- Voltmètre pour la tension d'alimentation.
- Ampèremètre avec commutateur pour la mesure des courants dans les trois phases.

- Un compteur horaire pour le fonctionnement de la pompe.
- Les relais de niveau pour la régulation automatique.
- La marche à sec ou surcharges, au cas où la puissance absorbée dépasse la valeur nominale, le moteur s'arrête.

Le groupe électrogène qui va éventuellement alimenter la pompe doit être bien précisé en matière de caractéristiques techniques et en premier lieu la puissance en KVA qu'on verra plus loin et ensuite les paramètres du **moteur, l'alternateur et le tableau de commande**.

Exemple :

1) Moteur :

- marque : X
- refroidissement par air
- injection directe
- démarrage manuel
- filtre à air, filtre à gasoil, filtre à huile
- option : démarrage électrique avec batterie de 12 V
- intensité sonore : x décibels

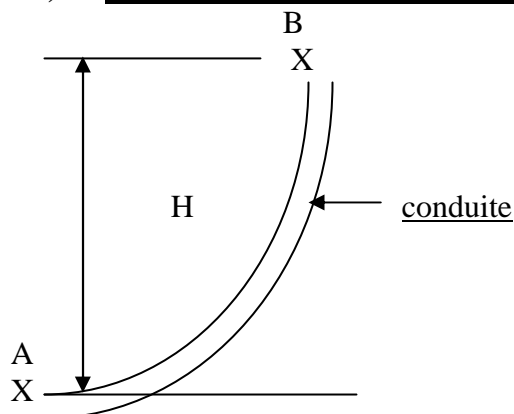
2) Alternateur :

- régime : 1500 tr/min
- tension : 220/380 V
- auto régulé, auto excité
- isolation tropicale

3) Tableau de commande :

- monté avec silentblocs sur l'alternateur et comprenant :
 - 1 voltmètre avec commutateur
 - 1 ampèremètre avec commutateur
 - 1 disjoncteur magnéto-thermique
 - 2 boutons marche et arrêt
 - 1 voyant lumineux

III) Hauteur manométrique totale (HMT) :



Pour amener une particule liquide du point A vers le point B par le biais d'une pompe, celle-ci doit vaincre la hauteur $H + \Delta H (A-B)$ avec $\Delta H (A-B)$ = pertes de charges entre A et B. la somme de la hauteur géométrique et la perte de charge est appelée hauteur manométrique totale entre A et B. une pompe centrifuge est toujours caractérisée par le couple (Q, H).

$$HMT = H + \Delta H (A-B)$$

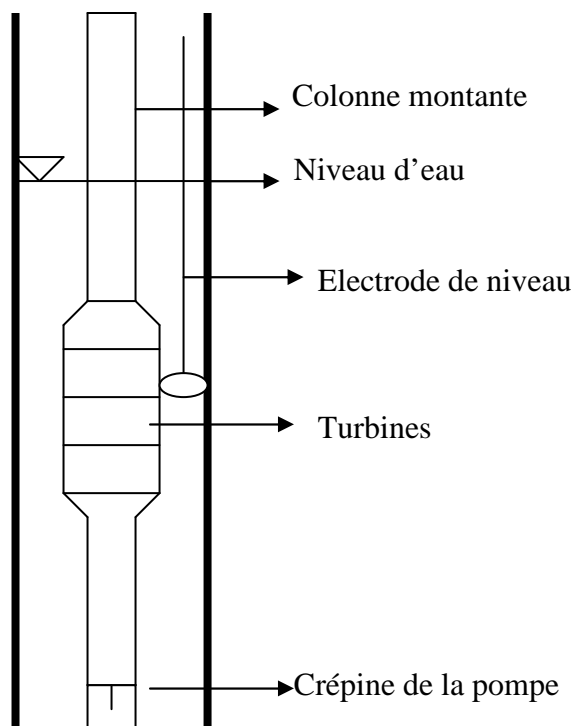
Lorsqu'il s'agit d'une pompe immergée, la vitesse étant invariable, il suffit de définir le nombre de turbines nécessaire pour atteindre la hauteur manométrique requise, les courbes caractéristiques fournies par le constructeur (qu'on verra plus loin), permettent de faire ce choix. Ex : pour une pompe de $30 \text{ m}^3/\text{h}$ tournant à 2900 tr/min, la hauteur par turbine est de 8 mètres.

Lorsqu'il s'agit d'une pompe à axe vertical, la vitesse pouvant être variable, il faut en premier lieu choisir la vitesse à laquelle on souhaite travailler sachant qu'elle peut varier de 1600 à 3600 tr/min pour les petites pompes et de 1500 à 2200 tr/min pour les grandes. Il n'est pas souhaitable d'utiliser la vitesse maximale.

Il arrive que dans certains projets mal dimensionnés, l'eau n'arrive pas à un point éloigné à cause du HMT mal calculée. Il existe dans le commerce des surpresseurs pour remédier à la situation. Un surpresseur de 6 bars par exemple procure une HMT additionnelle de 60m. Ces surpresseurs sont équipés de ballon servant de réserves d'eau à un volume V fixé (10 litres, 30 litres, 40 litres, 200 litres.. ; etc.)

IV) Protection de la pompe :

- **Clapet anti-retour** : il faut l'installer juste à la sortie de la station de pompage pour éviter le retour des eaux de la canalisation.
- **Electrodes de niveau** : lorsque la crépine est dénoyée, la pompe risque de tourner à vide et être grillée. Par mesure de sécurité, on installe des électrodes de niveau qui, une fois le niveau d'eau descendu, la pompe s'arrête automatiquement.



- **Vannage** : le démarrage de la pompe doit être lent et progressif, ainsi la vanne installée à la sortie de la pompe doit être fermée lors de la mise en marche.
- **Compteur** : il permet le suivi quantitatif des volumes d'eau produits
- **Manomètre** : il permet de contrôler la pression de l'eau au moment du démarrage.
- **Dispositif anti-bélier** : les pompes doivent être généralement protégées contre les coups de bélier (augmentation ou diminution brutale de la pression) qui sont provoqués par les arrêts ou mise en marche brutaux. En pratique, on utilise des dispositifs anti-bélier (DAB) constitués par des réservoirs d'air sous pression. La dilatation ou la compression de cet air permet d'amortir les coups de bélier jusqu'à des valeurs supportables par le matériel.

Ballon d'air pour le dispositif anti-bélier



Paramètres de la cavitation :

La cavitation est une formation de bulles de vapeur due à une baisse de pression lors de l'aspiration. Ceci se traduit physiquement par la naissance d'ondes de choc qui se propagent le long de la conduite en provoquant des bruits et des vibrations, ceci occasionne une détérioration du matériel. Ce phénomène se produit essentiellement à l'aspiration des pompes. La baisse de pression est principalement due aux causes suivantes :

- élévation géométrique au dessus du niveau libre de l'eau à l'aspiration de la pompe.
- pertes de charges excessives dans la tuyauterie d'aspiration
- énergie cinétique importante dans la roue de la pompe.

Il faut toujours respecter le point de fonctionnement optimal d'une pompe, sinon on a soit un risque de surpression, soit un risque de cavitation.

V) Section du câble électrique :

Le câble qui alimente la pompe doit avoir une section adéquate en fonction de l'intensité du courant et de la tension d'alimentation, celle-ci est calculée par la formule :

$$q \text{ (mm}^2\text{)} = \frac{3,1 \times l \times I \times \cos(\varnothing)}{(\text{PV}) \% \times U}$$

Avec l = longueur du câble, U = tension en volts (380 V), PV = chute de tension = 3%, I = intensité du courant en A, $\cos(\varnothing) = 0,8$ (facteur de puissance)

Exemple : pour $l = 60$ m, $I = 17,6$ A, on obtient $q = 2,22$ mm². La section adoptée sera de $3 \times 2,5$ mm²

La formule de calcul correspond à la température ambiante (25 à 30° C), à 40° C, on peut corriger la section en divisant par 0,85.

Remarques :

- la section calculée par la formule précédente correspond à un mode de démarrage direct de la pompe. En cas de démarrage étoile-triangle, il faut diviser la section par 2, autrement dit la section est maximale en cas de démarrage direct.
- En pratique, on utilise des abaques pour le calcul de la section du câble.

VI) Critères de choix d'une pompe :

Le choix d'une pompe doit se faire en tenant compte d'un certain nombre de critères :

- **a) profondeur de l'eau :**

Dans un canal ou rivière, les pompes à axe horizontal sont à retenir. Pour un puits ou un forage, le choix est à faire en fonction de la disponibilité ou pas d'énergie électrique. Il y a lieu de signaler que les pompes mécaniques à axe vertical sont limitées en matière de HMT, (100 m est pratiquement une limite).

- **b) énergie de pompage :**

Les pompes électriques offrent beaucoup d'avantages technico-économiques. Toutefois, l'achat d'un groupe électrogène pour entraîner une pompe immergée est fortement déconseillé : cette formule est très coûteuse en investissement et également en entretien

- **c) débit désiré :**

A titre indicatif, le tableau suivant définit les débits que l'on peut atteindre en fonction du diamètre extérieur d'encombrement de la pompe :

Pompe immergée		Pompe à axe vertical	
Encombrement	Q (maximal)	Encombrement	Q (maximal)
142 mm	30 m ³ /h	142 mm	30 m ³ /h
194 mm	150 m ³ /h	190 mm	100 m ³ /h
274 mm	400 m ³ /h	241 mm	200 m ³ /h
		286 mm	300 m ³ /h
		333 mm	400 m ³ /h

- **d) rendement du pompage :**

Le rendement des pompes varie entre 60 et 80% en fonction du diamètre du corps et de la qualité. Ainsi les petites se situent autour de 60% et les grosses autour de 80%. Lorsque les pompes sont de mauvaise qualité ou mal entretenues, il est fréquent qu'elles perdent une dizaine de points de rendement.

VII) Puissance et rendement :

Le rendement d'une pompe est le rapport entre la puissance efficace réellement fournie par la pompe et la puissance fournie au moteur de la pompe. Pour les pompes industrielles, le rendement est de 70 à 80%.

La puissance nécessaire au pompage est donnée par la formule suivante :

$$P \text{ (KW)} = 9,8 \times H \text{ (m)} \times Q \text{ (m}^3\text{/s)} / \eta$$

Avec H = hauteur manométrique exprimée en mètres

Q = débit de pompage en m³/s

η = rendement global de pompage (pompe, moteur)

Remarque : il ne faut pas confondre la puissance nécessaire au pompage qui provient d'une source externe (réseau ONE ou groupe électrogène) et la puissance du moteur électrique de la pompe qui est intégré au corps de la pompe.

La puissance électrique en circuit triphasé est : $P = U.I.\cos(\varnothing).\sqrt{3}$

Avec U= tension en Volts, I = intensité du courant en Ampères, \varnothing = déphasage courant-tension, $\cos(\varnothing)$ = facteur de puissance (0,8)

La puissance est également exprimée en chevaux (CV ou HP : horse power en anglais), à retenir que 1 cheval = 736 Watts.

Sur la plaque signalétique d'une pompe, on trouve toujours les caractéristiques techniques données par le constructeur.

VIII) démarrage d'une pompe électrique :

Le démarrage d'un moteur électrique nécessite au départ une puissance supérieure à la puissance nominale. Le tableau suivant montre dans quelles proportions varient les couples de démarrage et les courants de démarrage en fonction du mode de démarrage.

Mode de démarrage	Id/In	Cd/Cn
<u>Moteur à cage</u>		
* Direct (pleine tension)	5	1,5
* Auto transformateur	2,45	0,74
* Etoile- triangle	1,65	0,5
<u>Moteur à rotor bobiné</u>		
* Résistance rotorique	1,5 à 2,5	1,5 à 2,5
	Id= Courant de démarrage In= Courant nominal	Cd= Couple de démarrage Cn= Couple nominal

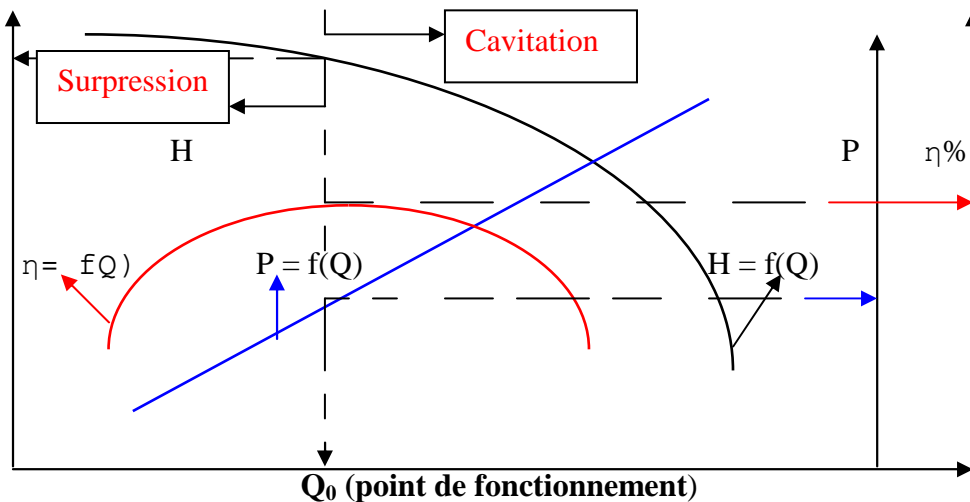
Donc pour calculer une puissance de démarrage, il faut calculer la puissance en Kw par la formule classique citée plus haut et diviser par $0.8 / (\cos \varphi)$ pour passer à la puissance en K.V.A et ensuite majorer cette puissance selon le mode de démarrage adopté. (rapport I_d/I_n)

IX) courbes caractéristiques d'une pompe :

Cette particularité des pompes centrifuges permet d'effectuer facilement leurs réglages et de tracer les courbes de leur fonctionnement afin de définir le régime optimum de débit, de hauteur manométrique ainsi que d'économie d'énergie.

Pour une pompe donnée et une vitesse de rotation constante, on trace :

- une courbe des hauteurs manométriques en fonction des débits, $H = f(Q)$
- une courbe des puissances absorbées en fonction des débits, $P = f(Q)$
- une courbe des rendements globaux (pompe et moteur) en fonction des débits $\eta = f(Q)$



Remarque :

Lorsque la vitesse de rotation d'une pompe varie de n_1 tr/min à n_2 tr/min (cas des pompes mécaniques à axe vertical), les points Q_1 , H_1 , et P_1 des courbes de fonctionnement à la vitesse n_1 deviennent à la vitesse n_2 .

$$Q_2 = (n_2 / n_1) Q_1$$

$$H_2 = (n_2 / n_1)^2 H_1$$

$$P_2 = (n_2 / n_1)^3 P_1$$

Par exemple une pompe qui tournerait deux fois plus vite, verrait son débit multiplié par 2, sa hauteur manométrique multipliée par 4, et sa puissance absorbée multipliée par 8.



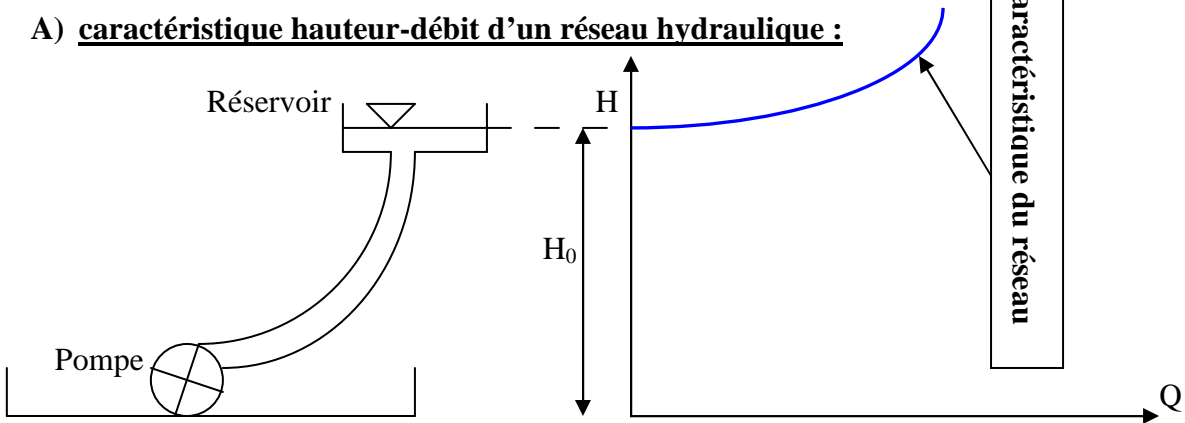
Conduite branchée à une pompe dans un forage : manomètre, compteur, ventouse pour purger l'air

Stock de matériel de pompage dans un magasin de société



X) Fonctionnement d'une pompe sur un réseau hydraulique :

A) caractéristique hauteur-débit d'un réseau hydraulique :

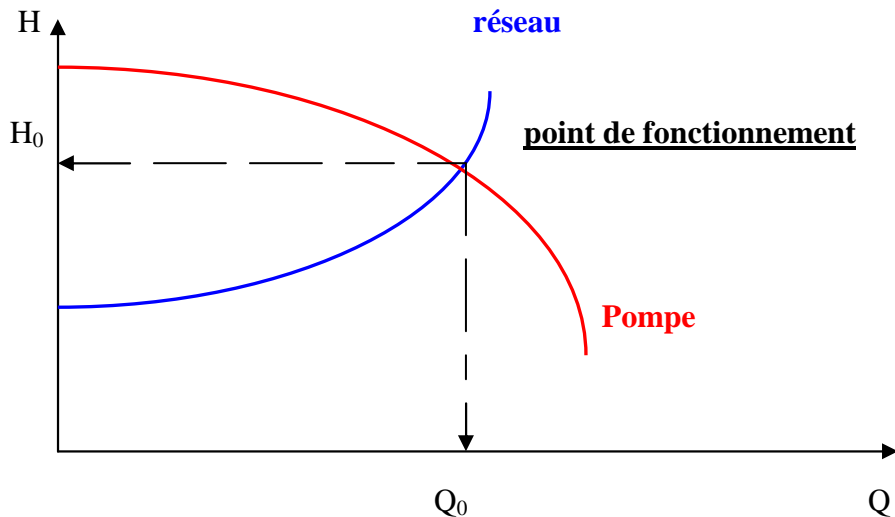


Dans la conception d'un réseau de distribution, l'eau doit parvenir au point le plus haut. L'eau doit donc vaincre une hauteur $H = H_0 + \Delta H$ or $\Delta H = KQ^2$ avec $K = \text{constante}$

Donc $H = H_0 + KQ^2$ c'est l'équation d'une parabole

B) couplage d'une pompe et d'un réseau :

La courbe caractéristique de la pompe $Q = f(H)$ est une parabole décroissante, celle du réseau est une parabole croissante. Le point de fonctionnement est l'intersection des deux courbes.



IX) le coût de l'énergie :

1) cas d'un pompage électrique :

Lorsqu'il s'agit d'un pompage électrique, on a $W_i = P \times N_i$ (1)

Avec W_i = énergie consommée en KWh
 N_i = nombre d'heures de fonctionnement
 P = puissance consommée

Or $P = 9,8 \times Q \times \text{HMT} / 0,7$ (on a pris 70% comme rendement), donc $P = 14 \times Q \times H$ (2)

Soit V_i le volume d'eau pompée, $V_i = Q \times N_i \times 3600$ d'où $Q = V_i / (N_i \times 3600)$ (3)

En combinant les équations (2) et (3), on obtient $P = 0,004 \times V_i / N_i \times \text{HMT}$,

D'après l'équation (1), on a

$$W_i = 0,004 \times V_i \times \text{HMT}$$

Avec W_i exprimé en KWh, V_i en m^3 (volume d'eau pompé annuellement) et HMT en mètre

Exercice

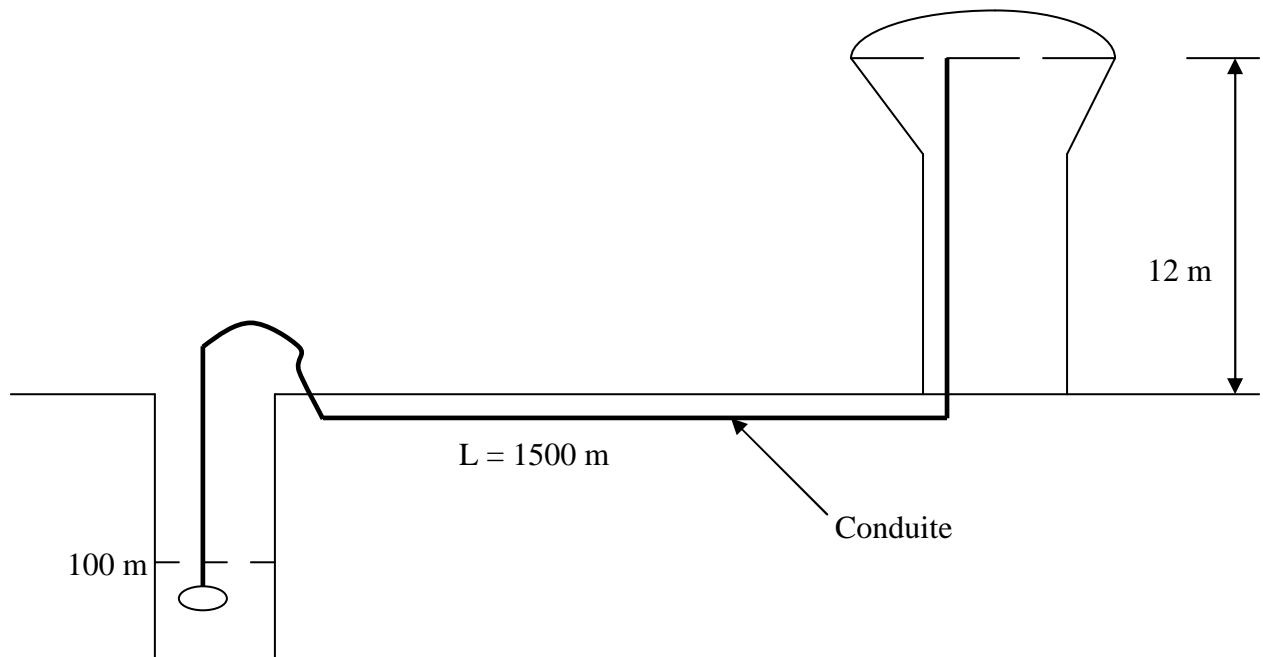
Pour alimenter en eau potable une agglomération de taille moyenne, une pompe électrique est installée dans un forage où le niveau dynamique est à 100m (niveau d'eau le plus bas après pompage). Le débit à refouler est de 15 l/s et ce dans un château d'eau surélevé dont la hauteur maximale du plan d'eau est à 12 m par le biais d'une tuyauterie de 1500 mètres de diamètre 150mm. Les coefficients de pertes de charges linéaires et singulières sont respectivement $\lambda = 0,02$ et $k = 0,3$.

La localité à desservir en eau potable n'est pas électrifiée et on doit installer un groupe électrogène.

Déterminer les caractéristiques du matériel de pompage (prendre pour rendement global 70%).

Le volume annuel à produire pour satisfaire les besoins a été estimé à 70000 m^3 , quel sera le coût énergétique annuel sachant que le tarif pratiqué est de 1,3 Dh/KWh.

Réponses :



1) la pompe aura un débit $Q = 15 \text{ l/s}$

HMT = hauteur géométrique + pertes de charges

Hauteur géométrique = 100 + 12 = 112 m

$$\Delta H = \Delta H_L + \Delta H_s \quad ; \quad \Delta H_L = \lambda l / d \quad V^2 / 2g \quad ; \quad \Delta H_s = K v^2 / 2g$$

$$L = 1500 \text{ m} \quad d = 150 \text{ mm} \quad \lambda = 0,02 \quad k = 0,3$$

$$Q = VS = v \Pi d^2 / 4 \quad \text{d'où } V = 4Q / \Pi d^2 \quad \text{A.N} \quad V = 0,85 \text{ m/s}$$

$$\Delta H_L = 0,02 \times 1500 / 150 \times 0,85^2 / 20 \quad \text{soit } \Delta H_L = 7,2 \text{ m}$$

$$\Delta H_s = 0,3 \times 0,85^2 / 20 \quad \text{soit } \Delta H_s = 0,01 \text{ m}$$

$$\Delta H = 7,21 \text{ m.}$$

$$\text{Donc HMT} = 112 + 7,21 = 119,21 \text{ m (on prendra HMT} = 120 \text{ m)}$$

2) la puissance nécessaire au pompage est $P \text{ (KW)} = 9,8 \times 15.10^{-3} \times 120 / 0,7$ soit $P = 25,2 \text{ KW}$

$25,2 / \cos(\Phi) = 25,2 / 0,8 = 31,5 \text{ KVA}$; en majorant cette puissance par un rapport $I_d / I_n = 3$; on aura une puissance au démarrage de **95 KVA. (Nécessité d'un groupe électrogène de puissance 95 KVA).**

3) l'énergie électrique consommée en KWh est $W_i = 0,004 \times V_i \times \text{HMT}$ avec V_i = volume annuel produit A.N = $W_i = 33600 \text{ KWh}$, soit un coût annuel de $1,3 \times 33600 = \mathbf{43680 \text{ Dhs}}$

Les conduites d'eau

I/- Introduction :

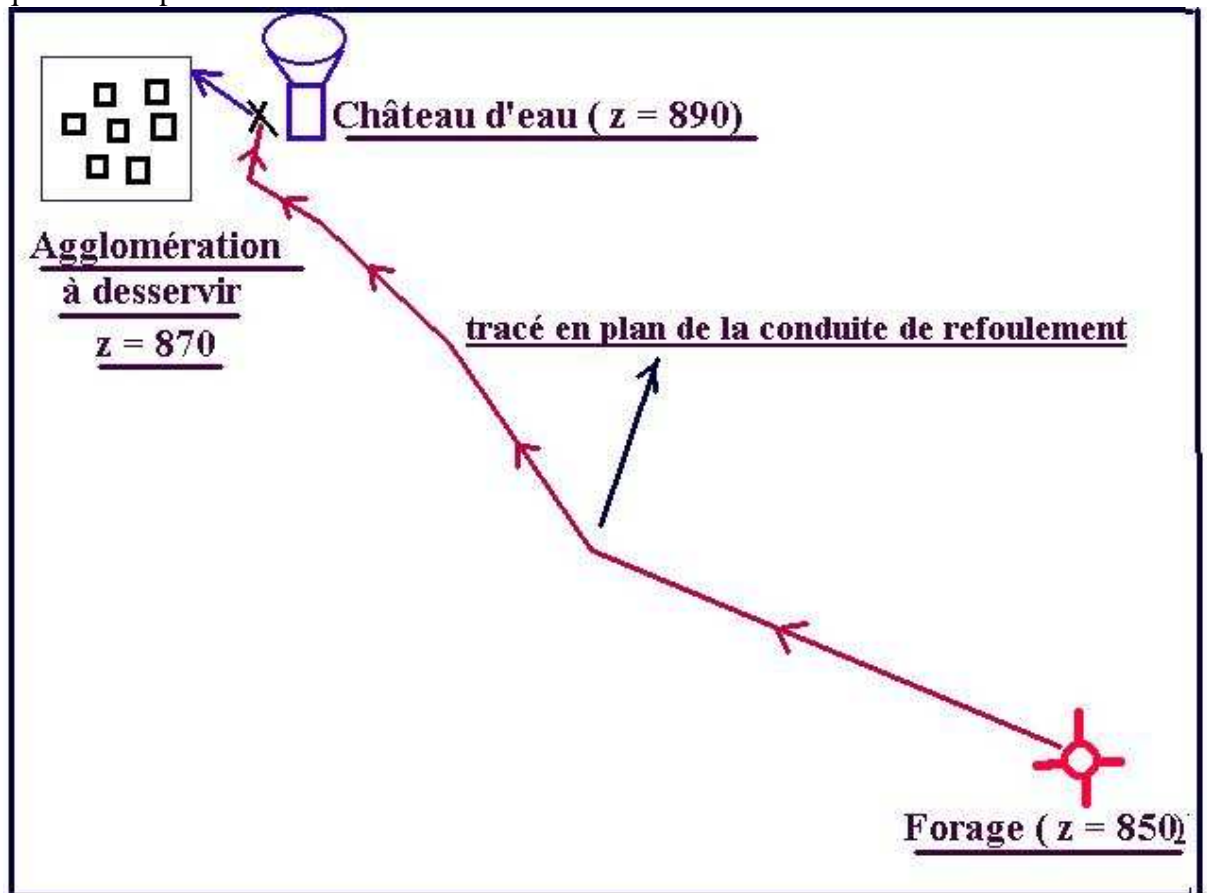
Les conduites constituent l'élément assurant le transfert de l'eau. Plusieurs caractéristiques sont à préciser lors du choix d'une conduite à savoir : nature, longueur, diamètre, pression de service. Ce sont ces 4 paramètres qu'il faut préciser dans le calcul d'une conduite. Il est clair qu'un dimensionnement d'une conduite doit être conçu de manière à minimiser les pertes de charges. Sur le plan économique, le calcul d'une conduite doit tenir compte des paramètres suivants :

- ❖ L'investissement initial
- ❖ Le phasage de réalisation (chronologie de réalisation)
- ❖ Les frais d'exploitation
- ❖ Les frais d'entretien et de renouvellement.

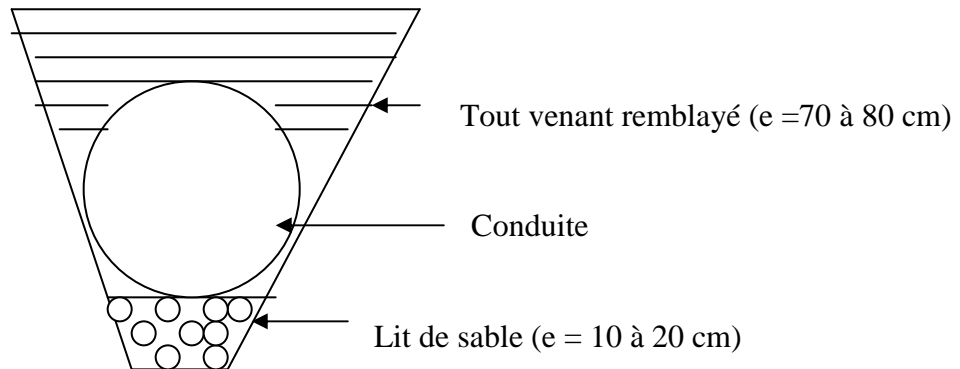
II/- Les paramètres de dimensionnement :

II-1- Longueur :

La longueur de la conduite est tributaire du tracé de la conduite, lui même dépendant du profil topographique de l'amont jusqu'à l'aval. (De la pompe jusqu'à l'utilisateur). Pour protéger les conduites, il vaut mieux les enterrer. Certaines précautions doivent être prises pour protéger les conduites et en particulier contre les coups de Bélier qu'on verra plus loin.



Une conduite doit être généralement enterrée et posée sur une couche de sable (10 à 20 cm) puis remblayée par un tout venant sélectionné. En terrain meuble, le lit de pose sera constitué par du sable fin, en terrain rocheux par de la gravette. La conduite doit être auscultée de temps à autre et notamment en matière de fuites : c'est en fait ce qui conditionne le rendement et l'efficacité du réseau.



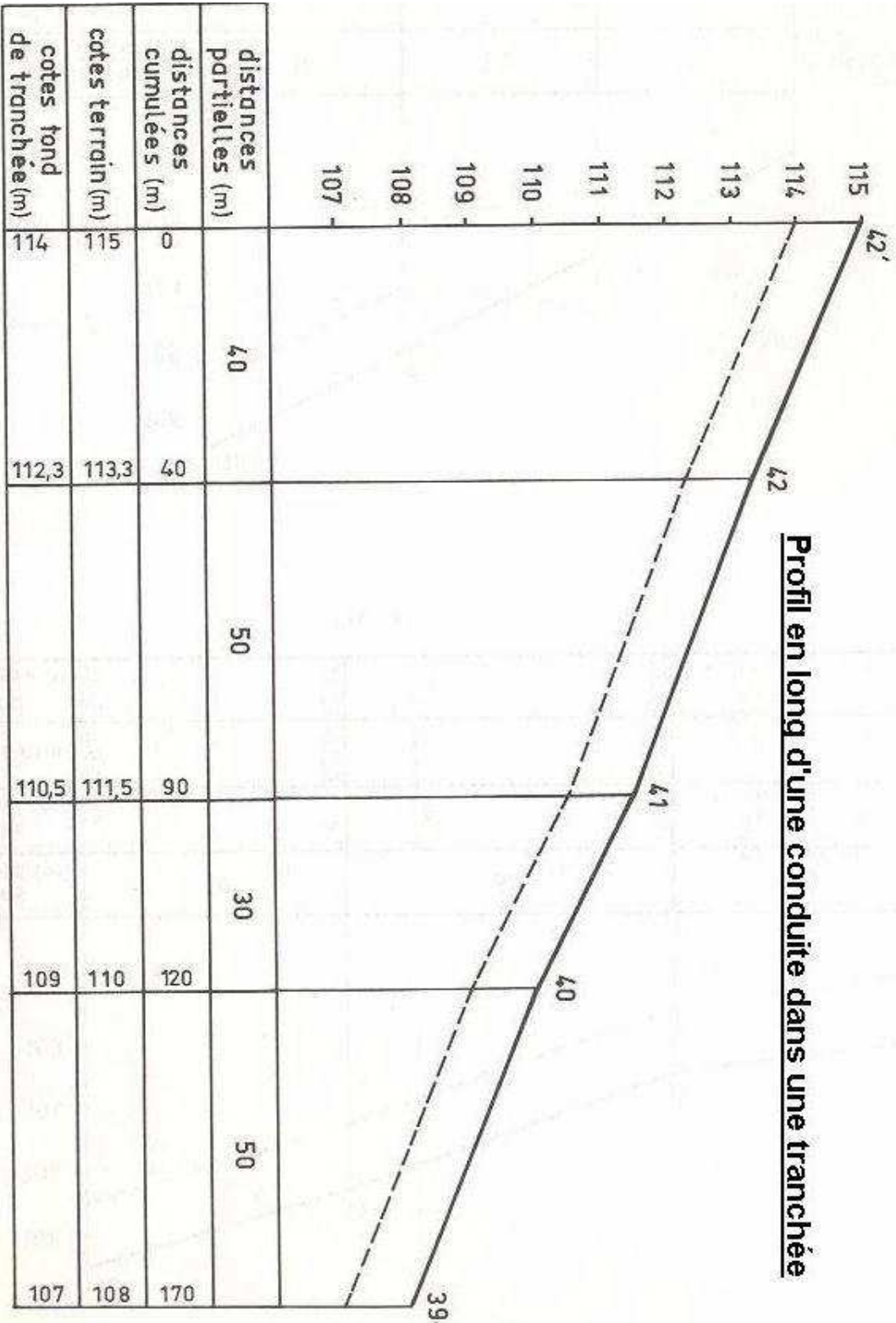
La conduite doit être aussi protégée contre la corrosion. Ce phénomène peut agir sur la paroi extérieure (exemple : à cause de l'humidité du sol) comme sur la paroi intérieure (cas d'une eau corrosive). Il convient à cet effet de passer sur la conduite et à l'intérieur un revêtement protecteur tel que les peintures.

Remarque :

Lorsqu'un écoulement est conçu d'être gravitaire au sein d'une conduite, il faut que les pertes de charges totales soient inférieures à la hauteur géométrique disponible.

Terrassement et pose d'une conduite





La guitare

II-2- Pression de service :

C'est la pression maximale à laquelle peut résister une conduite donnée sans éclatement ou fissuration. Cette pression dépend du matériau constituant la conduite et du diamètre. Cette pression est donnée par le constructeur et peut être testée avec des essais de pression en tranchée. Ainsi, on trouvera sur le marché PN6, PN10, PN16 etc. (pression nominale 6 bars, 10 bars, 16 bars). Remarquons au passage qu'il est toujours intéressant d'installer des manomètres sur les conduites afin de pouvoir contrôler la pression de l'eau.

L'essai en tranchée à une durée minimale d'une demi heure et ne devra en aucun cas excéder 2 heures.

Remarque :

- La pression de service dépend aussi du régime de fonctionnement au sein d'un réseau hydraulique. En gravitaire, c'est la pression qui règne en tout point de la canalisation en régime statique. En refoulement, c'est la pression qui règne en régime dynamique. Ces valeurs sont souvent majorées de 1 à 2 bars pour résister aux coups de bélier.
- On appelle **classe d'une conduite**, la pression à laquelle elle est éprouvée en usine. Il est recommandé d'utiliser des conduites dont la classe est le double de la pression de service

II-3- Diamètre :

Le choix du diamètre doit être optimal en tenant compte des considérations suivantes :

- ❑ En augmentant le diamètre, on augmente le prix de la conduite, mais en contrepartie, on diminue très vite les pertes de charges et par suite les dépenses en énergie pour faire circuler l'eau.
- ❑ En diminuant le diamètre, on augmente les pertes de charge et on crée des surpressions sur les parois de la conduite mais en contrepartie, on diminue le coût.

Il faut donc trouver un compromis et chercher un diamètre qui optimise les différents paramètres hydrauliques et en particulier, la vitesse, les pertes de charges et la pression. (Le débit à véhiculer est fixé une fois pour toutes, il doit correspondre au débit de pointe). Le diamètre à chercher est appelé diamètre économique. Les contraintes à respecter sont comme suit :

- ❖ La vitesse doit être de l'ordre de 1 m/s, la vitesse minimale est de l'ordre de 0,5 m/s pour éviter les dépôts, le maximum est de l'ordre de 1,5 m/s pour éviter les bruits et les coups de bélier)
- ❖ Les pertes de charges doivent être minimales
- ❖ La pression demandée au niveau de l'utilisation doit être assurée

Remarque : Pour le choix du diamètre, Il est obligatoire de tenir compte de l'horizon de l'étude pour satisfaire les besoins à travers le débit transitant.

Pour faire ce choix, il y a lieu de faire un certain nombre de simulations avec des diamètres donnés et choisir celui qui répond le mieux.

Exemple pour l'alimentation en eau potable d'un petit douar:

D (pouces)	Q (l/s)	V (m/s)	Re (Nombre de Reynolds)	λ	Longueur de la conduite (m)	ΔH (m)
1,5	1	0,88	29329	0,065	18	1,3
2	1	0,5	21997	0,058	18	0,28
2,5	1	0,32	17598	0,054	18	0,08
3	1	0,22	14665	0,051	18	0,03

Solution retenue : D= 2 pouces (diamètre minimisant les pertes de charges et permettant une vitesse acceptable).

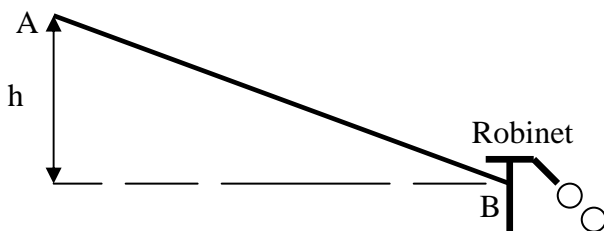
N.B / : La valeur de λ a été calculée sur ordinateur (Excel \Rightarrow outils \Rightarrow valeur cible)

Autres approches:

• **cas du pompage :**

On adopte directement $V = 1\text{m/s}$, $Q = VS = V\pi d^2 / 4$ soit $d \text{ (m)} = 2 \sqrt{Q/\pi}$

• **cas du gravitaire :**

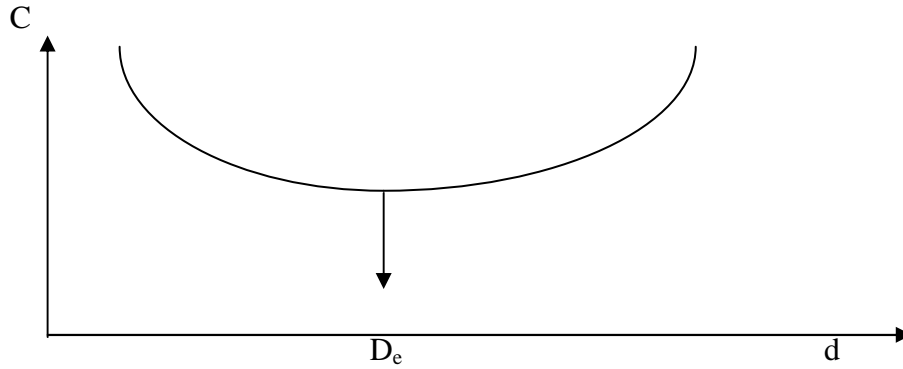


Pour que l'eau arrive du point A pour alimenter le robinet de la maison située au point B, il faut adopter un diamètre d tel que : $\Delta H_{AB} < h$

NB : le débit unitaire d'un robinet est en moyenne de 6 litres/minute = 0,1 l/s. le nombre de robinets pour satisfaire les besoins d'une agglomération = **besoins de pointe à satisfaire (l/s)/0,1. La pointe journalière = besoins moyens (l/s) x Kp**, Kp est le coefficient de pointe journalier (24h/durée d'ouverture des robinets). En général, cette durée est prise égale à 8 heures ce qui donne **Kp =3**. Les conduites de distributions doivent donc avoir des diamètres capables de véhiculer ce débit

• **analyse économique :**

La méthode consiste à évaluer les différents coûts actualisés avec des taux de 8%, 10%,12% et tracer la courbe $C = f(d)$ qui présente un minimum, c'est le diamètre économique.



Dans la pratique courante, on fait cette analyse avec 3 ou 4 diamètres proches, et on calcule le prix de revient du m³ d'eau avec les diamètres étudiés. Le diamètre économique est celui minimisant le prix de revient.

Remarques : le plus souvent et pour des réseaux comportant plusieurs conduites, on a recours de plus en plus aux logiciels informatiques. **Exemple :** Piccolo, Epanet, Loop

Dans la littérature on peut trouver certaines formules empiriques pour le calcul du diamètre et dont les plus connues sont :

a- Formule de Bresse : $D \text{ (m)} = \sqrt[3]{Q}$ avec Q en m³/s.

- Nature des conduites :

Suivant les diamètres, les pressions supportées et les conditions d'installation, on est amené à réaliser les conduites en charge avec des matériaux de nature et de types différents.

a- Tuyaux en fonte :

Ils sont couramment utilisés pour la distribution comme pour l'assainissement. Ils supportent une pression de service atteignant 50 bars pour les tuyaux ne dépassant pas 0,60 m de diamètre et 40 bars pour les diamètres supérieurs.

b- Tuyaux en acier :

La pression de service dans ces canalisations peut atteindre :

- * 60 bars jusqu'à 150 mm de diamètre (Ø 150)
- * 50 bars jusqu'à 275 mm de diamètre (Ø 275)
- * 40 bars jusqu'à 400 mm de diamètre (Ø 400)

L'inconvénient de ces conduites est qu'elles sont sensibles à la corrosion, pour remédier à ce problème on a recours à l'acier galvanisé.

c- Tuyaux en béton :

A cause de son prix bon marché par rapport au métal, le béton est utilisé lorsqu'il est possible pour la confection de tuyaux.

Les faibles effets dus à la pression dans les tuyaux usuels en béton rendent relativement importantes les charges extérieures dues au remblai qui couvre ces tuyaux ainsi qu'éventuellement aux véhicules. Les tuyaux doivent bien entendu résister à l'écrasement dû à ces charges. On définit pour estimer cette résistance, une charge de fissuration F et une charge de rupture R , toutes deux rapportées au mètre linéaire de canalisation. La charge de fissuration est celle qui développe dans la conduite une fissure de 0,2 mm de largeur et de 1,30 m de longueur.

d- Tuyaux en plastique :

L'usage des tuyaux en plastique se répand de plus en plus, sous forme soit de plastique dur pour l'assainissement, soit de plastique dur ou de plastique mi- souple pour la distribution d'eau. Ces tuyaux beaucoup moins rugueux ont donc l'avantage de diminuer les pertes de charge. Les joints sont facilement réalisés soit par collage, soit par soudure à l'air chaud (cas du PVC).

Actuellement et compte tenu des progrès technologiques, les conduites en plastique utilisés sont de plus en plus le polyéthylène haute densité (**PEHD**), son grand avantage réside dans le fait qu'il épouse facilement la topographie du terrain puisqu'il est livré en rouleau.



Rouleau de PEHD en usine

Pour les petits diamètres, on a de $\varnothing 20$ jusqu'à $\varnothing 110$ avec des pressions de services de 6 bars, 10 bars et 16 bars. Pour les grands diamètres, on arrive jusqu'à $\varnothing 250$.

Remarque :

Il est fréquent de trouver plusieurs natures de conduites sur un même tracé et également avec des variations dans le diamètre.

II) Equipement des conduites :

En tenant compte de la topographie et du tracé de la conduite, il faut équiper les points hauts et les points bas, surtout lorsqu'il s'agit d'un linéaire de conduite très important.

Points hauts :

Le problème est souvent l'accumulation de l'air aux points hauts, on installe souvent **des ventouses à double effet** (dégazage et évacuation de l'air). Ce dispositif comporte généralement :

- une ventouse pour purgeage
- une vanne de garde pour le démontage et le remplacement de la ventouse.
- Un Té raccordé à la conduite par des joints.

Ces équipements sont placés dans un regard en béton armé doté d'un tampon de visite et une échelle pour accès.

Points bas :

Ce sont les points où la pression d'eau est maximale, on installe souvent des vidanges composées de :

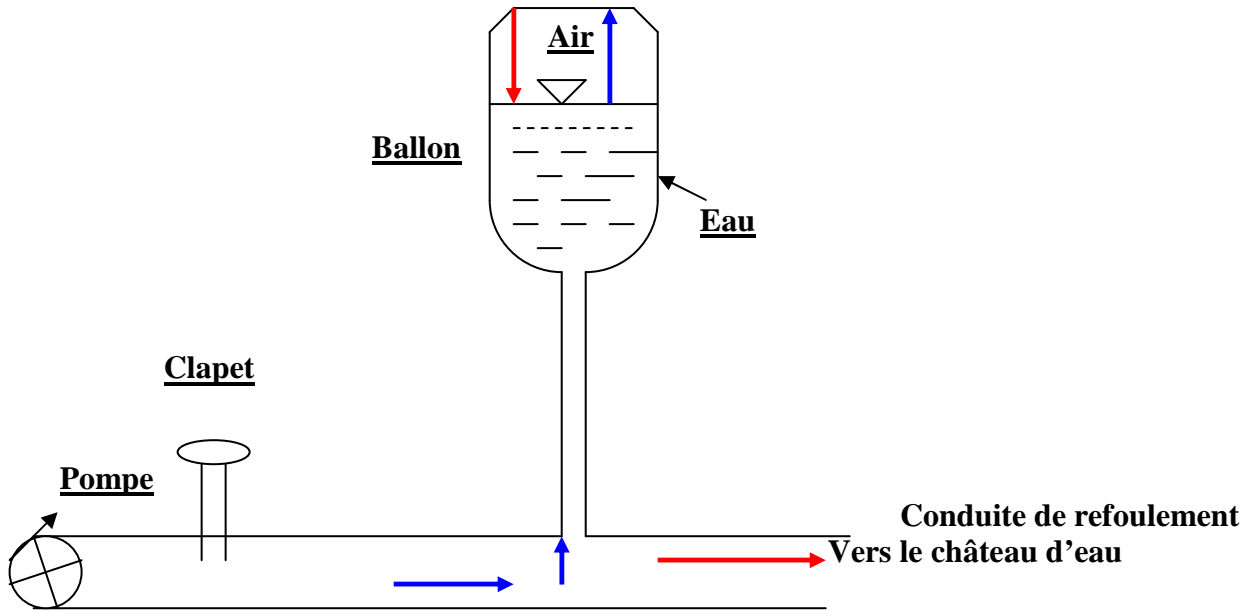
- un Té raccordé à la conduite par des joints
- une vanne de sectionnement
- un tronçon de conduite pour le raccordement au point de vidange

Le diamètre de la vidange doit être au minimum égal au $\frac{1}{4}$ du diamètre de la conduite. Tous ces équipements doivent être également placés dans un regard.

IV) le phénomène du coup de Bélier :

On entend sous le terme «Coup de Bélier », un écoulement non permanent du liquide avec variations pratiquement sensibles de la pression qui peuvent devenir dangereuses pour la tuyauterie. Le coup de Bélier dans une conduite apparaît au moment de variation brusque de la vitesse d'écoulement par suite d'une fermeture ou ouverture rapide de la vanne, soit d'un brusque arrêt de la pompe consécutif à la disparition de l'alimentation électrique. La disparition de l'alimentation électrique d'une station de pompage est la cause la plus répandue d'un coup de Bélier. Ce phénomène peut conduire à des surpressions pouvant endommager la conduite et les équipements accessoires, soit à des dépressions pouvant occasionner une cavitation donnant naissance à des gaz.

Pour palier à ce phénomène, on installe des dispositifs anti-bélier (DAB) qu'on installe entre la pompe et le château d'eau. Il s'agit principalement de ballons d'air sous pression, la dilatation ou la compression de cet air permet d'amortir les coups de bélier jusqu'à des valeurs acceptables et supportables par le matériel. Ce système se pratique surtout pour des conduites en régime de refoulement.



Le dimensionnement d'un dispositif anti-bélier doit principalement déterminer la capacité du ballon ainsi que le diamètre de la vanne d'entrée.

Quatre paramètres sont fondamentaux pour dimensionner un dispositif anti-bélier :

- la longueur L de la conduite (en cas de faible longueur, le phénomène est minime).
- La vitesse V de l'eau
- La durée T de la perturbation
- La vitesse de l'onde de pression ou célérité (α), (généralement comprise entre 700 et 1300 m/s), on prend souvent une moyenne de 1000 m/s

V) Piquage sur les conduites :

Pour desservir en eau certains points proches d'une conduite régionale existante, il est plus pratique d'effectuer un piquage sur cette conduite si le bilan ressources-besoins le permet. Pour ce faire, il est obligatoire d'avoir les documents suivants :

- le tracé en plan de l'adduction régionale au 1/50 000
- le profil en long et la ligne piézométrique prévue à l'horizon de saturation des installations et équipements existants.
- La cartographie au 1/50 000 des différents organes : stations de pompage, réservoirs, brises charges, ventouses, vidanges.
- L'implantation sur un fond au 1/50 000 des nouveaux points à alimenter.

A partir des données précédemment citées, on peut définir :

- le point de piquage adéquat
- la côte piézométrique et la pression disponibles
- le système de desserte à prévoir
- les ouvrages nécessaires pour la desserte.

V) Les bouches d'incendie :

Il s'agit d'un réseau souterrain de conduites accessibles par un regard et qui sont généralement placées en bordure de la chaussée. L'eau est sous pression (**de l'ordre de 1 bar**) et permet d'alimenter la tuyauterie des sapeurs pompiers. Ces bouches d'incendie sont souvent munies de colonne mobile. Le débit à prélever sur les canalisations est de l'ordre de $60 \text{ m}^3/\text{h}$ (17 l/s).

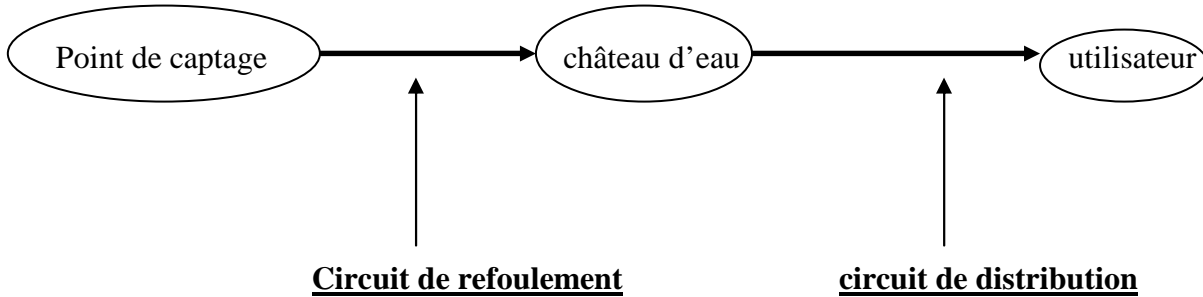
Une bouche d'incendie



Les châteaux d'eau

I) Introduction :

Au cours d'une même journée, le débit de la conduite d'adduction est constant alors que celui de la distribution est essentiellement variable dans le temps. Les châteaux d'eau jouent un rôle régulateur entre les deux régimes.



Les rôles à jouer par un château d'eau sont comme suit :

- régulariser le fonctionnement des pompes
- assurer le débit nécessaire pendant les heures de pointe
- assurer la mise en pression du réseau de desserte.
- Combattre efficacement les incendies (alimentation des bouches d'incendie, réserve de 120 m³ pour les grandes villes)
- Assurer l'alimentation en cas d'incidents sur les ouvrages de production (pannes de pompe par exemple)

Une agglomération urbaine peut avoir plus d'un château d'eau en fonction de la topologie du réseau de distribution. Lorsqu'il s'agit de capacités relativement faibles (10 m³ à 15 m³), on parle également de bâches.

Le dimensionnement d'un château d'eau consiste à cerner les paramètres suivants : emplacement, forme et capacité.

II) dimensionnement d'un château d'eau

II.1) Emplacement :

Le réservoir sera dans la mesure du possible proche du point de captage pour éviter des linéaires de conduites très importants. Il est toujours préférable à ce que le réservoir soit plus élevé par rapport à la côte maximale des localités à desservir pour pouvoir les alimenter par simple gravité.

Compte tenu de la topographie, les réservoirs peuvent être soit enterrés, semi-enterrés, ou surélevés. Les réservoirs surélevés sont le seul mode de construction possible en plaine.

II.2) capacité :

La capacité théorique d'un réservoir dépend des variations en matière de consommation d'eau durant la journée. En réalité, ce paramètre est très difficile à cerner compte tenu des saisons ainsi que des habitudes dans le mode de vie.

En pratique, la capacité d'un réservoir est calculée pour une durée d'**autonomie** de 24 heures, soit une journée de consommation et pour les besoins de pointe avec une projection sur un horizon d'étude (10 ans, 15 ans, 20 ans, 25 ans). Il faut ajouter à cette capacité la réserve incendie. Pour les petites villes, on peut adopter une autonomie de 10 à 12 heures.

Remarque :

Dans une station de pompage et afin d'éviter des démarrages répétitifs du moteur, on a parfois des débits équipés supérieurs aux besoins (si la ressource en eau le permet) avec des capacités de réservoirs également grandes. Ceci permet un planning de pompage optimal ainsi qu'une bonne gestion des ouvrages et équipements de la station de pompage. Pour les petites et moyennes installations, et dans bien de cas, le planning de pompage est de 8 à 10 heures/24 h. Pour les grandes villes, on peut atteindre 24 h/24 h.

Les capacités les plus courantes sont 10, 20, 25, 30, 40, 50 m³ (milieu rural) puis 75, 100, 150, 200, 300 m³ (ville moyenne) et enfin 300, 500, 750, 1000 m³ pour les grandes villes. A titre d'exemple, la capacité de stockage pour la ville de Marrakech en 2002 était de **92500 m³** dont un réservoir de **55000 m³** (route de l'ourika). Pour la ville de Casablanca en 2001, il y avait 36 réservoirs et châteaux d'eau totalisant une capacité de stockage de **608769 m³**.

Exemple pratique :

Une ville moyenne compte actuellement 500 000 habitants. En adoptant une consommation de 80 l/j/habitant et une évolution démographique de 1,1%, quelle doit être la capacité de stockage en faisant une projection sur 10 ans. On prendra un coefficient de pointe de 1,5

Réponse :

La population en 10 ans sera $P = 500\,000 (1,011)^{10}$ soit $P = 557804$ habitants. Avec cette population, les besoins moyens seront $Q = 557804 \times 80$ soit $Q = 516$ l/s.

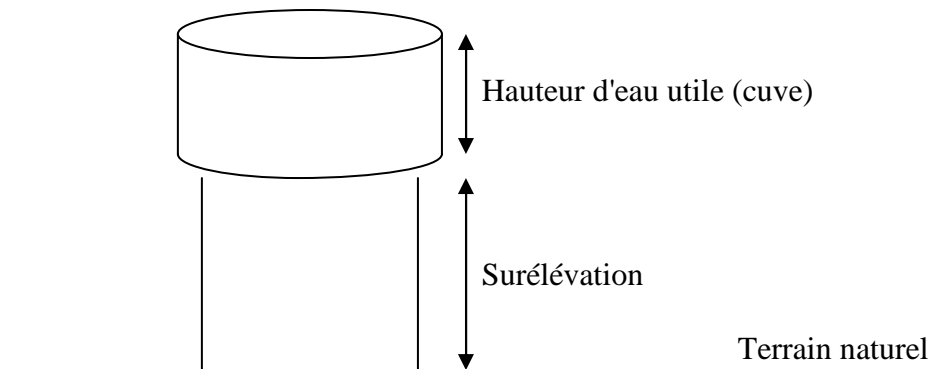
Avec un coefficient de pointe de 1,5, les besoins de pointe seront d'ici 10 ans $Q = 516 \times 1,5$ soit $Q = 774$ l/s. Avec ce débit la consommation d'une journée sera $V = 774 \times 3600 \times 24$ soit **$V = 66873$ m³**

Il faudra donc construire 2 ou 3 châteaux d'eau totalisant une capacité de **66873 m³**

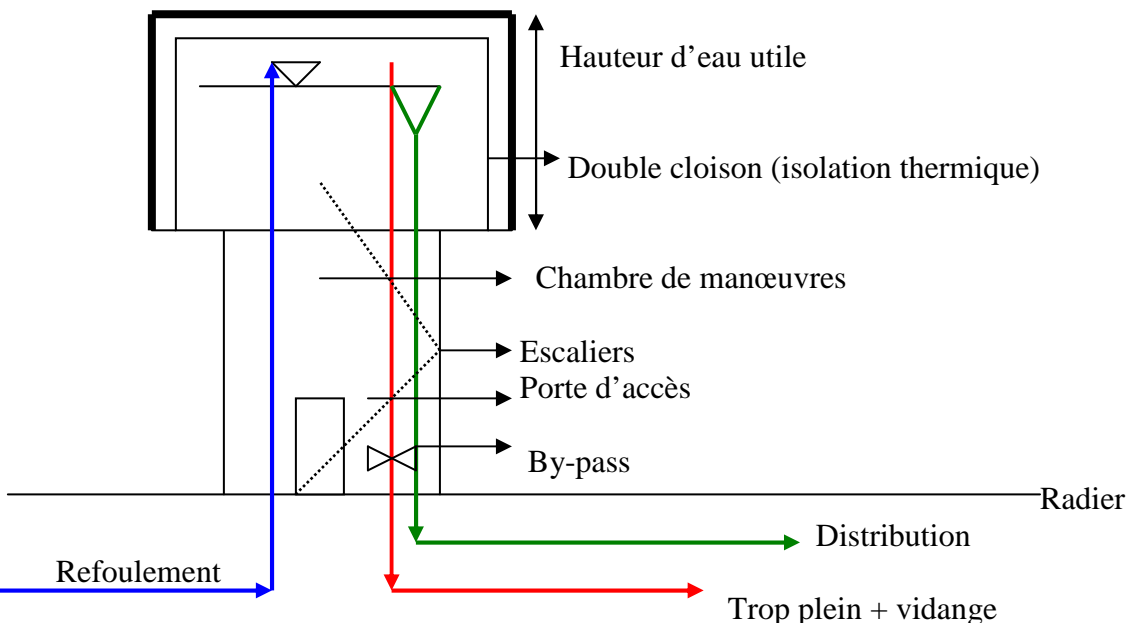
II.3) forme et proportions :

La lame d'eau dans un réservoir ou hauteur d'eau utile est le plus souvent entre 3 et 6 m. l'optimum pour les agglomérations d'importance petite ou moyenne se situe le plus souvent vers 4 à 5m. Pour les réservoirs de grande importance (grandes villes), la hauteur d'eau peut atteindre 7 à 10m. La section en plan des réservoirs est le plus souvent circulaire, notamment pour des raisons de coût.

Château d'eau surélevé



III) Organes et accessoires d'un château d'eau :



Terminologie :

- **Trop plein** : conduite permettant d'évacuer la totalité du débit arrivant au réservoir (souvent en acier galvanisé).
- **Vidange** : conduite partant du point bas du réservoir et se raccordant sur la canalisation de trop plein (souvent en acier galvanisé) , cette conduite est indispensable pour les réparations éventuelles et nettoyages périodiques.
- **Conduite de refoulement** : c'est la conduite qui doit permettre l'alimentation du réservoir. A son débouché dans le réservoir, elle doit s'obturer lorsque l'eau atteint un niveau maximal dans le château d'eau. (télésurveillance, automatisme, système de flotteur). (souvent en acier galvanisé)
- **Conduite de distribution** : c'est la conduite permettant d'alimenter les utilisateurs. le départ de cette conduite doit être à 0,15m environ au dessus du radier du château afin

d'éviter d'introduire dans la distribution des boues ou des sables ayant décanté. (souvent en acier galvanisé)

- **By-pass** : en cas de travaux sur le réservoir, il y a lieu de prévoir une communication entre la conduite de refoulement et celle de distribution. le système by-pass permet de faire cette liaison.
- **Chambre de manœuvres** : elle se trouve au pied de la tour, les différentes vannes s'y trouvent. L'accès à la cuve s'effectue par une échelle ou un escalier.
- **Double cloison** : il est intéressant, voire impératif de prévoir une double cloison au niveau de la cuve afin d'assurer une isolation thermique. En effet, en période de forte chaleur, il peut y avoir un développement de bactéries.
- **Accessoirement des compteurs** à l'arrivée et au départ du château d'eau pour le suivi des données et établissement de ratios d'exploitation.
- **Un tampon de visite** (ou capot regard) pour des visites périodiques de l'ouvrage

Remarque :

Une fois la conception géométrique et architecturale du château d'eau arrêtée, il faut procéder à l'étude de béton armée (le maître d'ouvrage confie souvent cette étude à un bureau d'étude).

Un château d'eau de 25 m³ en milieu rural



IV)entretien des réservoirs :

La cuve doit faire l'objet d'un soin particulier et notamment en matière de :

- Désinfection à l'aide de produits chlorés pour l'élimination des bactéries
- Vidange et traitement des dépôts sur les parois
- Auscultation générale en matière de fuites et suintements
- Diagnostic des équipements vétustes (vannes, robinets, conduites)

Lorsque l'ouvrage est bien réalisé et régulièrement entretenu, sa durée de vie est de 30 à 40 ans.

Généralités sur les réseaux de distribution

I) Introduction :

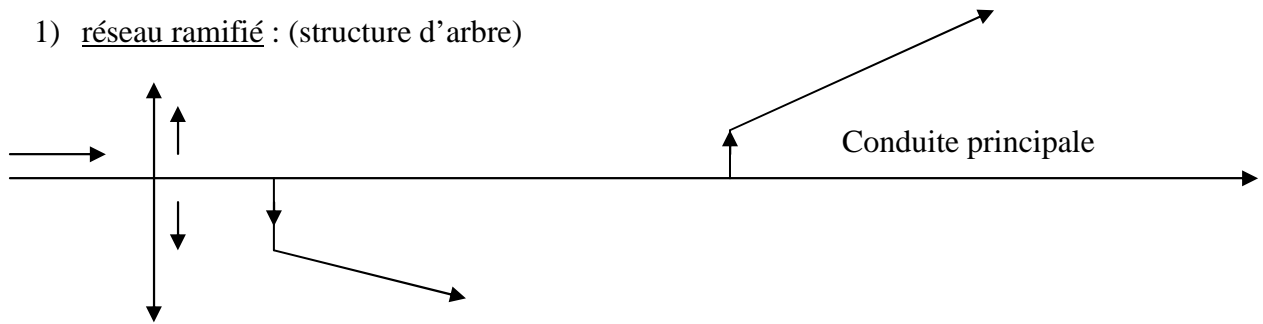
Un réseau de distribution est un ensemble de canalisations et d'équipements destinés à desservir les utilisateurs ou abonnés à partir d'un réservoir de stockage. La typologie du réseau dépend de l'étendue de l'agglomération à alimenter ainsi que de la topographie du site. Dans un réseau de distribution, on distingue trois sortes de conduites :

- conduites principales ou réseau primaire (juste à la sortie du réservoir)
- conduites de transit ou réseau secondaires (desservant les quartiers et grandes agglomérations).
- Conduites d'alimentation ou réseau tertiaire (desservants les maisons, administrations).

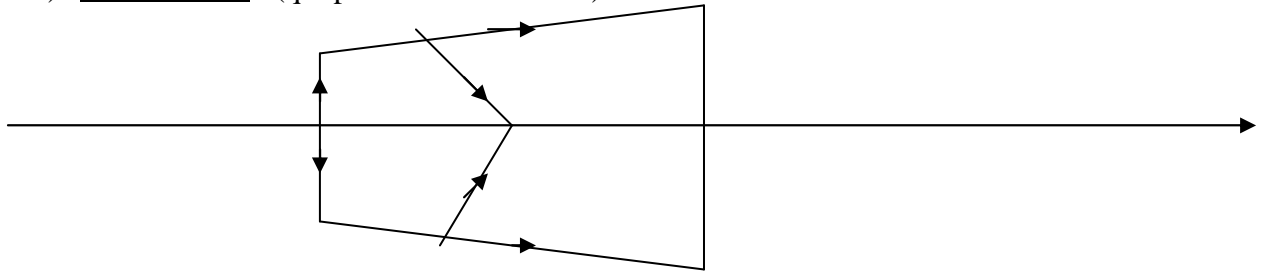
II) les différents types de réseau :

On distingue quatre types de réseau :

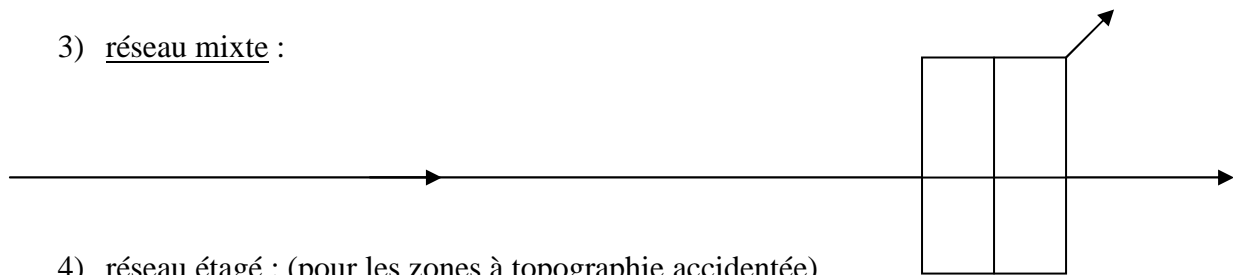
1) réseau ramifié : (structure d'arbre)



2) réseau maillé : (qui présente des mailles)



3) réseau mixte :



4) réseau étagé : (pour les zones à topographie accidentée)

- réseau haut
- réseau bas

III) Caractéristiques d'un réseau de distribution :

Les canalisations doivent être calculées de manière à assurer le débit maximal demandé en période de pointe horaire. Les conduites doivent être enterrées au minimum de 80 cm par rapport à la génératrice supérieure et doivent se situer obligatoirement plus haut que les conduites d'assainissement afin d'éviter toute contamination.

* La vitesse de l'eau doit être de l'ordre de 0,6 à 1,2 m/s :

- une vitesse inférieure à 0,6 m/s favorise les dépôts.
- Une vitesse supérieure à 1,2 m/s favorise les bruits.
- le réseau doit être bien géré et contrôlé en matière de fuites, c'est ce qui conditionne l'efficacité du réseau. Exemple, en 2001 et sur le réseau de Lydec (Casablanca), 28220 fuites ont été réparées ce qui a permis une économie sur la ressource de 22 Mm³.

IV) Les paramètres hydrauliques d'un réseau de distribution :

Au niveau d'un réseau, il est indispensable d'assurer au niveau de chaque point de puisage le débit de pointe horaire tout en ayant la pression requise. Pour cela, le réseau doit être bien conçu et avec des diamètres adéquats

1) le débit de pointe horaire :

C'est le débit de l'heure la plus chargée. En milieu urbain, on admet une consommation uniforme répartie sur 12 heures de la journée ($C_p = 2$). En milieu rural, on admet une consommation uniforme sur 8 heures de la journée ($C_p = 3$).

$$Q_p = C_p \times Q_{p,j} \quad Q_{p,j} \text{ est le débit moyen (l/s)}$$

2) détermination des diamètres :

Le calcul d'un réseau maillé est similaire à celui d'un réseau électrique. Il existe deux sortes de relations appliquées respectivement aux nœuds et aux mailles du réseau. Ce sont les relations connues sous le nom de lois de Kirchhoff. La méthode de Hardy-Cross qu'on trouve dans la littérature est basée sur ces deux lois.

Définitions :

- Un nœud est l'intersection d'au moins deux branches
- Une maille est un circuit fermé et qui est formé par l'adjonction d'au moins trois branches

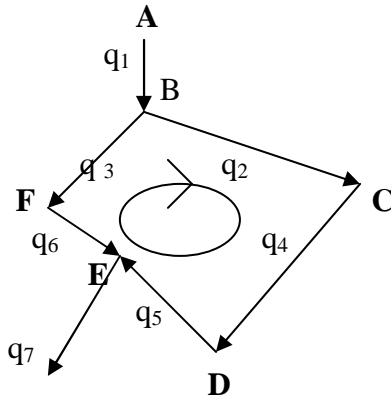
3.1) la loi des nœuds :

Cette loi exprime la conservation des débits au niveau de chaque nœud (principe de continuité).

3.2) la loi des mailles :

En choisissant un sens positif arbitraire, la somme algébrique des pertes de charges est nulle.

Exemple :



Dans la maille BCDF, on peut écrire :

$$q_1 = q_2 + q_3 \quad (1)$$

$$j_2 + j_4 + j_5 - j_6 - j_3 = 0 \quad (2)$$

Les lois de Kirchhoff sont assez complexes pour être résolues manuellement, surtout si le réseau comporte plusieurs conduites. En pratique, on utilise des logiciels (Loop, Piccolo, Epanet...)

Remarques :

- Lorsqu'on veut procéder à de nouveaux branchements (nouveaux lotissements), il faut toujours procéder à des simulations pour visualiser les nouveaux paramètres hydrauliques.
- Il faut toujours prendre en considération le rendement du réseau ainsi que l'horizon de saturation.
- Un diagnostic permanent en matière de fuites doit être entrepris. Les techniques de détection se développent de plus en plus (exemple : sonde acoustique).
- La conception de réseaux internes au niveau des immeubles, villas, hôtels, restaurants, administration fait partie d'une nouvelle branche de l'hydraulique dite : la plomberie sanitaire. Toutes les lois de l'hydraulique étudiées jusqu'à présent (calcul de diamètre, pertes de charges, pressions ...) s'appliquent mais il faut surtout prendre en considération les appareils à brancher (baignoires, lavabo, bidet, lave-mains, évier, douche, urinoir, machine à laver, WC à action siphonique, nombre de robinets). Les débits unitaires pour chaque type d'appareil sont comme suit :

Appareil	Débit de base en l/s
Baignoire	1,2
Douche	0,5
Lavabo	0,75
Bidet-lave-mains	0,5
Evier	0,75
Bac à laver	0,75
Urinoir	0,5
Urinoir à action siphonique	1
WC à chasse directe	1,5
WC à action siphonique	1,5
Machine à laver le linge domestique	0,65
Machine à laver la vaisselle domestique	0,40

Les diamètres pour conduites d'évacuation sont souvent de l'ordre de 30 à 33 mm, pour les WC à action siphonique, ils sont de 60 à 70 mm. Les pentes pour ces diamètres sont généralement comprises entre 1 et 3 cm/m.

Calcul du prix de revient de l'eau

I) Introduction :

Avant de réaliser un projet quelconque, il faut étudier sa faisabilité économique et ce en intégrant le coût des différents organes (organes de captages, pompes, canalisations, châteaux d'eau....). L'analyse économique doit déboucher sur le prix de revient de l'eau.

II) les paramètres de calcul :

Dans un projet d'hydraulique, il y a deux types de charges : les charges fixes et les charges variables.

II.1) les charges fixes :

Ces charges correspondent aux différents coûts de l'investissement initial :

- le coût de réalisation de l'ouvrage de captage : puits ou forage
- le coût du matériel de pompage : groupe électro-pompe
- le coût des ouvrages de génie civil : abri de pompage, château d'eau
- le coût des canalisations

II.2) les charges variables :

Ces charges correspondent aux coûts suivants :

- les coûts d'entretien : pièces de rechange par exemple
- les coûts de l'énergie : électrique ou thermique
- les coûts du gardiennage
- les coûts relatifs aux produits chimiques pour traitement de l'eau

Pour le matériel, les durées de vie techniques moyennes sont comme suit :

- ❖ Génie- Civil canalisations ; $m = 40$ ans
- ❖ Equipement de refoulement ; $m = 13$ ans
- ❖ Pièces spéciales ; $m = 20$ ans

Les frais d'entretien sont généralement comme suit :

- ❖ Génie Civil, canalisations : 0,5 % par an du montant des investissements initiaux.
- ❖ Equipement électro-mécanique : 0,3 % par an du montant des investissements initiaux.

En plus des charges fixes et variables, il faut tenir compte de l'amortissement. Celui-ci tient compte de la durée de vie de chaque organe. Dans tout calcul de prix de revient de l'eau, il faut définir :

- l'année de **référence**, exemple : 2011
- l'année de **mise en service**, exemple : 2015
- l'année de **saturation**, exemple : 2025

III) calcul des différents postes :

III.1) les charges fixes :

Il faut évaluer le coût de chaque organe mais en l'actualisant avec des taux préférentiels (8%, 10%, 12%) et ce jusqu'à l'horizon de l'étude.

$$\text{Investissement actualisé} = \sum_{i=1}^{i=n} \frac{I_i}{(1+a)^i}$$

a = taux d'actualisation (en général à 8 %, 10 %, et 12 %)

I_i = Investissement à l'année i

Remarque : l'investissement actualisé tient compte de la dévaluation de la monnaie.

III.2) les coûts d'entretien :

Il faut évaluer les différents coûts d'entretien mais en les actualisant également

$$\text{Entretien actualisé} = \sum_{i=1}^{i=n} T_i (1+a)^{-i}$$

T_i = pourcentage d'entretien /an : 0,5% ou 0,3%

a = Taux d'actualisation. (8 %, 10 %, et 12 %)

III.3) les coûts de l'énergie :

Pour un pompage électrique et comme il a été démontré dans les cours précédents, on a :

$$W_i = 0,004 \times V_i \times \text{HMT}$$

Avec W_i = énergie électrique annuellement consommée (en Kwh)

V_i = volume d'eau annuellement pompé (en m^3)

HMT = hauteur manométrique totale

IV) le prix de revient de l'eau :

Le prix de revient du m³ d'eau correspond à l'ensemble des charges actualisées rapportées au volume total d'eau susceptible d'être produit jusqu'à l'horizon de l'étude.

$$P = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} \text{charges actualisées}}{\sum_{i=1}^{i=n} V_i \text{ (Volumes d'eau annuellement produits jusqu'à l'horizon de l'étude)}}$$