

Contenu du cours

INTRODUCTION :	5
1-Defition d'hydrogéologie :	5
2-L'importance de l'eau dans la vie de l'homme	5
3-Liaison réciproque entre les disciplines de l'hydrogéologie et hydraulique :	5
4-Buts théoriques et pratiques de l'hydrogéologie :	5
a. Les buts théoriques :	5
b. Les buts pratiques :	5
I-HYDRAULIQUE	6
Introduction :	6
CHAPITRE I : PRINCIPALES PROPRIETES DES LIQUIDES	7
a) Masse volumique	7
b) Densité :	7
c) Poids spécifique :	7
d) La compressibilité :	7
e) La dilatation thermique	7
f) La viscosité :	8
a. La viscosité dynamique	8
b. La viscosité cinématique :	9
CHAPITRE II : PRESSION HYDROSTATIQUE ET SES PROPRIETES :	10
II-1-Les propriétés de la pression hydrostatique sont les suivantes :	10
II-2-Relation fondamentale de l'hydrostatique :	10
II-2-Pression absolue et Pression manométrique	11
II- 3-La hauteur piézométrique :	11
II-4- Le vacuum :	12
II-5- Principe de Pascal :	12
II-6-Principe d'Archimède :	13
II-7-POUSSEE D'UN FLUIDE SUR UNE PAROI VERTICALE	14
II-7-1- Hypothèses	14
II-7-2- DEFINITION DU TORSEUR :	14

II-7-3 Eléments de réduction du torseur des forces de pression :	14
II-8-Conclusion :	15
CHAPITRE III : DYNAMIQUE DES FLUIDES COMPRESSIBLES	15
1- la section d'écoulement :	15
1-a-L'aire d'une section trapézoïdale :	16
1-b-Le périmètre mouillé :	16
1-c-Rayon hydraulique :	16
2-Equation de continuité	16
3-Notion de débit	17
3-1-Débit massique :	17
3-2-Débit volumique :	18
3-3- Relation entre débit massique et débit volumique.....	18
4-Theoreme de BERNOULLI	18
4-1-Ecoulement pour un filet du liquide parfait :	18
4- 2-Interpretation de l'équation de Bernoulli :	19
5- Régimes d'écoulement des liquides	20
6- Pertes des charges	21
II- HYDROGEOLOGIE.....	22
CHAPITRE IV : CYCLE GENERAL DE L'EAU DANS LA NATURE.....	22
1- Introduction	22
2-Cycle général de l'eau	22
3-humidité et température de l'air	22
- Humidité de l'air :	22
- Température de l'air :	24
4-Précipitation :	24
5-Le ruissellement	24
7-Infiltration :	25
Notion de bassin versant.....	25
a) Bassin versant topographique :	25
b) Bassin versant hydrogéologique	25
CHAPITRE V : PROPRIETES PHYSIQUES ET HYDRAULIQUES DES TERRAINS	26

1- Zone de température dans l'écorce terrestre	26
2-Porosité et fissuration des terrains	26
2- 1-Porosité :	26
2-2-La fissuration :	27
3-Différentes catégories d'eaux contenues dans les terrains	27
a) L'eau de constitution :	27
b) L'eau en phase de vapeur :	27
c) L'eau hygroscopique :	27
d) L'eau pelliculaire :	28
e) L'eau capillaire :	28
f) L'eau libre :	28
4- Propriétés hydrauliques des terrains	28
Les types des propriétés des terrains :	28
CHAPITRE VI : PROPRIÉTÉS PHYSIQUES ET CHIMIQUES DES EAUX SOUTERRAINES.	
1-Propriétés physico-chimiques des eaux souterraines	30
a) La transparence :	30
b) La couleur :	30
c) L'odeur :	30
d) Saveur :	30
e) La température :	30
f) Le PH :	30
g) La conductivité :	30
2-COMPOSITION CHIMIQUE DES EAUX SOUTERRAINES	30
3-QUALITE REQUISE DE L'EAU POTABLE ET DE L'EAU TECHNIQUE	32
a) Qualité de l'eau potable :	32
Qualité de l'eau technique :	32
4-L'action agressive de l'eau sur le béton	32
5-Composition bactériologique des eaux souterraines	33
La classification de l'eau suivant la teneur en colibacille :	33
CHAPITRE VII : PRINCIPAUX TYPES DES NAPPES D'EAUX SOUTERRAINES	
a. Table d'eau perchée :	34
b. Eaux phréatiques :	34

□ La zone d'aération	34
□ La zone en eau capillaire :	34
□ Zone de saturation :	34
c. Eaux artésiennes :	36
Zone des eaux artésiennes :	36
d. Eaux minérales :	37
CHAPITRE VIII : MOUVEMENT DES EAUX SOUTERRAINES	38
Loi fondamentale d'écoulement des eaux souterraines :	38
1) Loi de Darcy :	38
a) Définition :	38

INTRODUCTION

1-Defition d'hydrogéologie : l'hydrogéologie est une science des eaux souterraines se trouvant en interaction avec les roches ; elle étudie leur origine, leur composition, leur mode de gisement, leur extension, leur répartition et leur mouvement.

2-L'importance de l'eau dans la vie de l'homme : les eaux souterraines jouent un rôle considérable dans la vie et activités quotidiennes des régions tropicales ; elles satisfont aux besoins et usage de nombreuses villes, en économie, dans les entreprises industrielles et habitats ruraux. Elles sont largement utilisées à des fins médicinales (eaux minérales). Entant que matière première par extraction des principaux minéraux dont elles sont chargées pour la mise en valeur de la chaleur si leur température est élevée (eau thermale), et en fin comme indicateur lors de la prospection minière.

Hydrogéologie a une importance énorme pour l'agriculture, la recherche des ressources en l'eau, l'irrigation, l'assèchement des zones marécageuse et nombreux d'autres problèmes y sont étroitement rattachés.

3-Liaison réciproque entre les disciplines de l'hydrogéologie et hydraulique : l'hydrogéologie est une branche de la géologie qui est étroitement liée aux sciences connexes : la météorologie, géologie générale, géomorphologie, géochimie, l'hydraulique, mécanique des sols, géologie structurale, physique etc...

4-Buts théoriques et pratiques de l'hydrogéologie : a.

Les buts théoriques :

- Détermination de l'origine des eaux souterraines ;
- Détermination de formation et de la composition des gaz dans les eaux souterraines ;
- Détermination de répartition des couches aquifères dans la coûtes terrestre ;
- Etudes des mouvements des eaux souterraines ;

b. Les buts pratiques : en même temps l'hydrogéologie résout les tâches pratiques suivantes ;

- La recherche et la prospection des couches aquifères ;
- Alimentation des villes et industriels avec l'eau potable et technique ; L'irrigation des terrains et drainés ;
- La prospection des couches aquifères qui contiennent de l'eau minérale et médicale ;
- Lutter contre l'inondation des gisements des minéraux utiles ;
- Lutter contre l'élévation des nappes phréatiques dans le domaine de génie civil et des mines.

I-HYDRAULIQUE

Introduction : l'hydraulique est chargée d'étudier les lois physiques par rapport au liquide à l'état d'équilibre et de mouvement. L'hydraulique considère principalement les courants liquides dirigés et limités par deux parois solides, c'est-à-dire les canaux découverts et conduit à la pression, y compris au milieu poreux.

Le terme "canaux " considère tous les dispositifs qui limitent et dirigent le courant (tuyaux ; ajoutages milieu poreux).

L'hydraulique étudie principalement les mouvements des liquides dont la plupart des cas considérés comme incompressible. C'est une science appliquée ou bien technique, étant donné qu'elle est née des besoins de la pratique et que ses résultats sont largement employés dans le domaine technique.

CHAPITRE I : PRINCIPALES PROPRIETES DES LIQUIDES

Dans l'établissement des principes de l'hydraulique, certaines propriétés des liquides jouent un rôle important, d'autre seulement un rôle mineur ou aucun rôle de tout. C'est pourquoi il est indispensable d'examiner leur principale propriété physique.

a) **Masse volumique** : est le rapport de la masse (M) du liquide à son volume total (V).

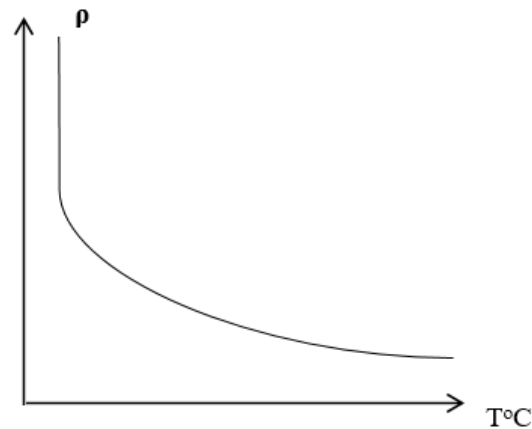
Elle se détermine à l'aide du pesage ou bien à l'aide d'un aëromètre. La masse volumique du liquide dépend du genre des liquides et de la température.

Elle est calculée par la formule suivante : $\rho = \frac{M}{V}$; en Kg/m³.

b) **Densité** : est le rapport entre la masse volumique du fluide et la masse volumique d'un fluide de référence.

Elle est calculée par la formule suivant : $d = \frac{\rho}{\rho_{re}}$;

Dans le cas des liquides on prendra l'eau comme fluide de référence. Dans le cas des gaz on prendra l'air comme fluide de référence.



c) **Poids spécifique** : il représente la force de gravité agissant sur la masse par unité de volume. $\gamma = \rho g$; en N/m³. Il existe un rapport entre la masse volumique et le poids spécifique.

$$\gamma = \frac{G}{V} = \frac{mg}{V} = \rho \cdot g.$$

d) **La compressibilité** : c'est la capacité des liquides de changer leur volume sous l'action d'une pression et se caractérise par le coefficient de compressibilité β_v . Elle est calculée par la formule

$$\text{suivante : } \beta = \frac{v_1 - v_2}{v_2} \times \frac{1}{p_2 - p_1} ; \text{ en Pa}^{-1}$$

Pour les calculs hydrauliques on utilise une valeur initiale appelée module d'élasticité volumique dont

$$: E = \frac{1}{\beta_v} ; \text{ pour l'eau } E = 2,1 \times 10^9 ; \text{ en Pa}$$

e) **La dilatation thermique** : est caractérisée par un coefficient β_t qui exprime la variation relative des volumes correspondants à une augmentation de la température de 1° Celsius. Il est calculé par la

$$\text{formule suivante : } \beta_t = \frac{v_{t_2} - v_{t_1}}{v_{t_1}} \times \frac{1}{t_2 - t_1} ; \text{ en } ^\circ\text{C}^{-1}.$$

V_{t_1} est le volume du liquide à la température t_1 ;

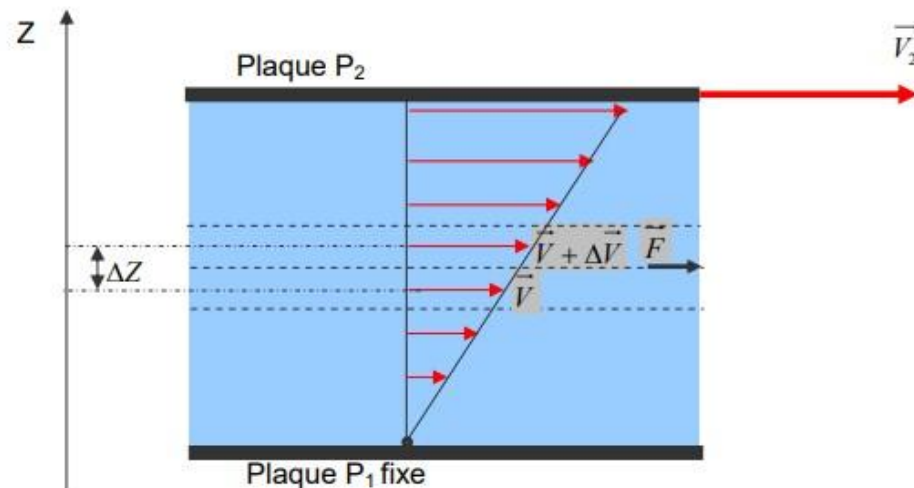
V_{t_2} est le volume du liquide à la température t_2 ;

La dilatation thermique de l'eau à la température de 20°C est égale à $0,00015^{\circ}\text{C}^{-1}$.

Exemple : Calculer le coefficient de dilatation thermique de l'eau lorsque le volume d'eau était à partir de 15000 litres à 15100 litres à la température de 40-50°C.

f) **La viscosité** : C'est une grandeur qui caractérise les frottements internes du fluide, autrement dit sa capacité à s'écouler. Elle caractérise la résistance d'un fluide à son écoulement lorsqu'il est soumis à l'application d'une force. C'est à dire, les fluides de grande viscosité résistent à l'écoulement et les fluides de faible viscosité s'écoulent facilement. Elle peut être mesurée par un viscosimètre à chute de bille, dans lequel on mesure le temps écoulé pour la chute d'une bille dans le fluide. Elle peut également être mesurée par un récipient dont le fond comporte un orifice de taille standardisée. La vitesse à laquelle le fluide s'écoule par cet orifice permet de déterminer la viscosité du fluide. La viscosité est déterminée par la capacité d'entraînement que possède une couche en mouvement sur les autres couches adjacentes. Par exemple, si on considère un fluide visqueux placé entre deux plaques P_1 et P_2 , tel que la plaque P_1 est fixe et la plaque P_2 est animée d'une vitesse V_2 .

Figure n°1



Si on représente par un vecteur, la vitesse de chaque particule située dans une section droite perpendiculaire à l'écoulement, la droite qui relie des extrémités de ces vecteurs représente le profil de vitesse. Le mouvement du fluide peut être considéré comme résultant du glissement des couches de fluide les unes sur les autres. La vitesse de chaque couche est en fonction de la distance Z . On distingue la viscosité dynamique et la viscosité cinématique.

a. **La viscosité dynamique** : elle exprime la proportionnalité entre la force qu'il faut exercer sur une plaque lorsqu'elle est plongée dans un courant et la variation de vitesse des veines de fluide entre les 2 faces de la plaque. ...Elle est exprimée par un coefficient représentant la contrainte de cisaillement nécessaire pour produire un gradient de vitesse d'écoulement d'une unité dans la matière.

Considérons deux couches de fluide adjacentes distantes de Δz . La force de frottement F qui s'exerce à la surface de séparation de ces deux couches s'oppose au glissement d'une couche sur l'autre. Elle est proportionnelle à la différence de vitesse des couches soit Δv , à leur surface S et inversement proportionnelle à Δz : voir figure (n°1)

Le facteur de proportionnalité, μ est le coefficient de viscosité dynamique du fluide.

$$F = \mu S x \frac{\Delta V}{\Delta z} ;$$

Où :

F : force de glissement entre les couches en (N) ;

μ : Viscosité dynamique en (kg/m.s) ;

S : surface de contact entre deux couches en (m²),

ΔV : Écart de vitesse entre deux couches en (m/s),

ΔZ : Distance entre deux couches en (m).

Remarque : Dans le système international (SI), l'unité de la viscosité dynamique est le Pascal seconde (Pa.s) ou Poiseuille (Pl) : 1 Pa.s = 1 Pl = 1 kg/m.s **Exemple :**

Fluide	μ (Pa.s)
eau (0 °C)	$1,787 \cdot 10^{-3}$
eau (20 °C)	$1,002 \cdot 10^{-3}$
eau (100 °C)	$0,2818 \cdot 10^{-3}$
Huile d'olive (20 °C)	$\approx 100 \cdot 10^{-3}$

glycérol (20 °C) $\approx 1000 \cdot 10^{-3}$

Hydrogène (20 °C) $0,86 \cdot 10^{-5}$

Oxygène (20 °C) $1,95 \cdot 10^{-5}$

b. La viscosité cinématique : $\nu = \frac{\mu}{\rho}$

L'unité de la viscosité cinématique est le (m²/s).

Remarque 1 : (unité) : On utilise souvent le Stokes (St) comme unité de mesure de la viscosité cinématique. 1 St = 10⁻⁴ m²/s

Remarque 2 : (Influence de la température) : Lorsque la température augmente, la viscosité d'un fluide décroît car sa densité diminue.

Remarque 3 : (différence entre viscosité dynamique et viscosité cinématique) La viscosité cinématique caractérise le temps d'écoulement d'un liquide. Par contre, la viscosité dynamique correspond à la réalité physique du comportement d'un fluide soumis à une sollicitation (effort). En d'autre terme, cette dernière exprime la « rigidité » d'un fluide à une vitesse de déformation en cisaillement.

CHAPITRE II : PRESSION HYDROSTATIQUE ET SES PROPRIETES :

L'hydrostatique étudie les conditions d'équilibre des liquides au repos. Ce chapitre aborde l'étude de la répartition de pression, notamment en fonction de distance verticale, ainsi que les forces qui en résultent. La pression hydrostatique est créée par les forces superficielles et massiques.

- Les forces superficielles : sont celles de la pression atmosphérique agissant à la surface du liquide.
- Les forces massiques : sont les forces du poids du liquide ; et l'action simultanée de ces forces naît la pression hydrostatique.

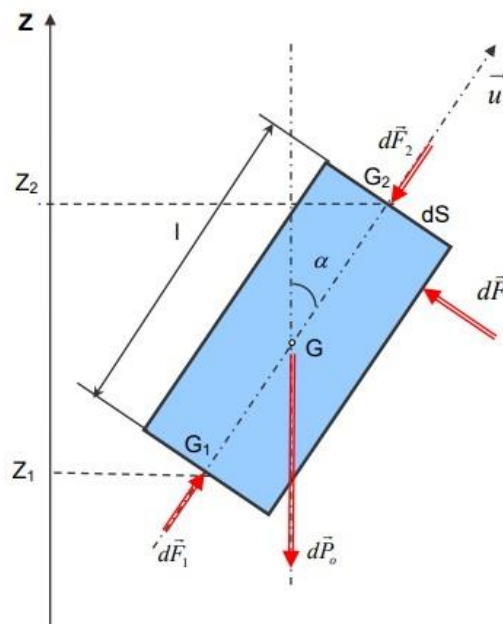
II-1-Les propriétés de la pression hydrostatique sont les suivantes :

- a. La pression hydrostatique agissant sur la surface extérieure des liquides est toujours dirigée normalement à la surface et vers l'intérieur du volume du liquide considéré.
- b. En importe quel point pris à l'intérieur du liquide, la pression hydrostatique est la même dans toute les directions c'est-à-dire qu'elle ne dépend pas de l'angle d'inclinaison de l'aire sur la quelle agit au point donné.
- c. La valeur de la pression hydrostatique dépend des coordonnées dans l'espace où se trouve les particules du liquide.

II-2-Relation fondamentale de l'hydrostatique :

Considérons un élément de volume d'un fluide incompressible (liquide homogène de poids volumique ω). Cet élément de volume a la forme d'un cylindre d'axe (G,u) qui fait un angle α avec l'axe vertical (O, Z) d'un repère $R(O, X, Y, Z)$. Soit l la longueur du cylindre et soit dS sa section droite.

Schéma N°2



Soit G_1 d'altitude Z_1 et G_2 d'altitude Z_2 , les centres des sections droites extrêmes. Etudions l'équilibre du cylindre élémentaire, celui-ci est soumis aux :

- **actions à distance** : son poids : $d\vec{P}_0 = -\omega \cdot l \cdot dS \cdot \vec{Z}$
- **Actions de contact** : force de pression s'exerçant sur la surface latérale et les surfaces planes extrêmes ;

- **la surface latérale** : $\Sigma d\vec{F}_i$
- **les deux surfaces planes extrêmes** : $d\vec{F}_1 = P_1 \times dS(\vec{u})$ et $d\vec{F}_2 = P_2 \times dS(\vec{u})$ avec P_1 et P_2 les pressions du fluide respectivement en G_1 et en G_2 .

Le cylindre élémentaire étant en équilibre dans le fluide, écrivons que la résultante des forces extérieures qui lui sont appliquées est nulle : $d\vec{P}_0 + \Sigma d\vec{F}_i + \vec{F}_1 + d\vec{F}_2 = \vec{0}$

En projection sur l'axe des symétries $(G, \vec{u})$

$$-\varpi l dS \cos \alpha + P_1 dS - P_2 dS = 0$$

Exprimons la différence de pression $P_1 - P_2$ après avoir divisé par dS et remarqué que

$$-\varpi l \cos \alpha = Z_1 - Z_2 ;$$

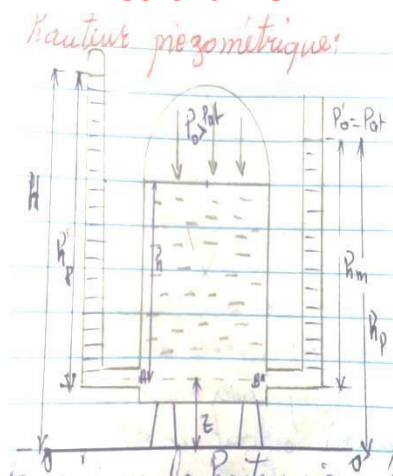
$$P_1 - P_2 = \varpi (Z_2 - Z_1) = \rho g (Z_2 - Z_1)$$

Relation fondamentale de l'hydrostatique.

II-2-Pression absolue et Pression manométrique : elles s'obtiennent à partir de la relation fondamentale de l'hydrostatique. $P = P_0 + \rho gh$ où P = absolue aussi appelée pression complète et ρgh est la pression manométrique, elle est créée par le poids du liquide.

II-3-La hauteur piézométrique : est un niveau d'eau relevé dans un forage par un piézomètre. Il caractérise la pression de la nappe en un point donné. La mesure est ramenée au niveau zéro de la mer.

Schéma N°3



Déterminons la hauteur piézométrique (hauteur d'eau) de tube droit malgré que la valeur de la pression au point A et B est la même, nous obtenons la relation suivante : $P_A = P_B = P_0 + \rho gh$. Alors la pression au point B agissant de la gauche s'équilibre avec celle de la droite provoquée par le poids du liquide du piézomètre droit (manomètre d'eau). D'où $P_A = P_B = P_0 + \rho gh$ (1) et $P_B = P'_0 + \rho gh_m$ (2)

D'après l'équation (1) on : $P_0 + \rho gh = P'_0 + \rho gh_m$; au point B, $P'_0 = P_{at}$ d'où $P_0 + \rho gh = P_{at} + \rho gh_m$.

Alors $h_m = \frac{P_0 - P_{at}}{\rho g} + h$ et $h_p = h_m + z \Rightarrow h_p = \frac{P_0 - P_{at}}{\rho g} + h + z$; si $P_{at} = 0 \Rightarrow h_p = \frac{P_0}{\rho g} + h + z$; figure N°3.

Nous remarquons dans le piézométrique B, l'eau peut monter jusqu'à certaine hauteur par rapport à la surface OO' .

Cette hauteur (h_p) est toujours constante à n'importe quel point du liquide dans le réservoir puisque la valeur $\frac{P_0 - P_{at}}{\rho g}$ est constante, y compris celle de $(Z+h)$ par rapport à O.

La valeur h_p , est la hauteur piézométrique ou charge piézométrique. La hauteur d'eau dans le tube A (à gauche) est supérieur à $\frac{P_0}{\rho g} + h$ par rapport à celle de B

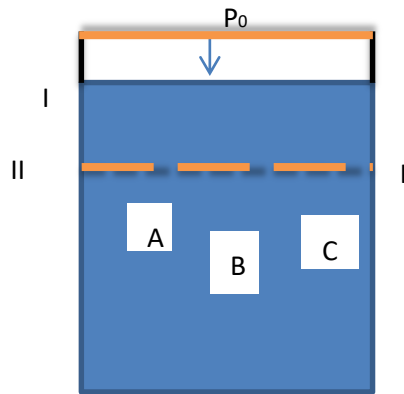
II-4- Le vacuum : dans le cas où la pression absolue dans un liquide ou un gaz est inférieure à la pression atmosphérique, on dit qu'il y a une dépression ou un vide appelé vacuum. On prend comme valeur de la dépression, la valeur par défaut de la pression par rapport à la pression atmosphérique.

Analysons l'équation suivante : $P_m = P_{abs} - P_{at}$ dans le vacuum cette deuxième partie de l'équation est inférieure à zéro, alors P_m est une valeur négative c'est à dire une pression négative à n'importe quel point dans le liquide provoquer par un vacuum.

D'après la relation ci-dessus : $\rho g h = P_{abs} - P_{at}$ ou $h = \frac{P_{abs} - P_{at}}{\rho g}$ en (m)

Dans ce cas la valeur de h est négative pour éviter celle-ci nous posons : $h_{vac} = -h \Rightarrow h_{vac} = \frac{P_{at} - P_{abs}}{\rho g}$

II-5- Principe de Pascal : « dans un fluide incompressible au repos, toute variation de pression en un point entraine la même variation de pression en tout autre point ». **Schéma** N°4



Considérons un réservoir rempli d'eau. Un piston peut coulisser librement dans le goulot. Si le piston se trouve à la position I-I, la pression sur la surface libre du liquide est égale à P_0 .

La pression en importe porte quel point pris à l'intérieur du liquide est la même. D'après la relation fondamentale de l'hydrostatique nous avons les relations suivantes :

Au point A, $P_A = P_0 + \rho g h_A$; au point B, $P_B = P_0 + \rho g h_B$; au point C, $P_C = P_0 + \rho g h_C$.

P_A ; P_B ; P_C sont les pressions absolues régnant au point A ; B et C. P_0 est la pression agissant sur la surface libre du liquide ; ρ est la masse volumique du liquide h_A ; h_B ; h_C sont les profondeurs des points considérés.

Si le piston se déplace jusqu'au point II-II, la pression sur la surface libre augmente de ΔP et au point A P_A sera égale $P_0 + \rho g h_A + \Delta P$; au point B, P_B sera égale $P_0 + \rho g h_B + \Delta P$; au point C, P_C sera égale $P_0 + \rho g h_C + \Delta P$.

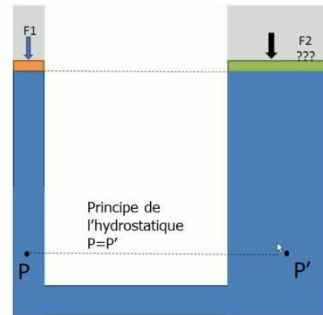
Démonstration : supposons qu'au point G_1 intervienne une variation de pression telle que celle-ci devienne $P_1 + \Delta P_1$. ΔP_1 étant un nombre algébrique. Calculons la variation de pression ΔP_2 qui en résulte en G_1 (voir figure N°4).

Appliquons la relation fondamentale de l'hydrostatique entre G_1 et G_2 pour le fluide ;

- à l'état initial : $P_1 - P_2 = \rho g (Z_2 - Z_1)$ (1)
- à l'état final : $(P_1 + \Delta P_1) - (P_2 + \Delta P_2) = \rho g (Z_2 - Z_1)$ (2)

En faisant la différence entre les équations (2) et (1) on obtient : $\Delta P_1 - \Delta P_2 = 0$. D'où $\Delta P_1 = \Delta P_2$. Dans le cas de vérin hydraulique (un appareil utilisé pour soulever des charges très pesantes sur une faible hauteur) la pression au point (1) est égale à la pression au point (2) ;

Schema N°5



$$P_1 = \frac{F_1}{s_1} = P_2 = \frac{F_2}{s_2}$$

II-6-Principe d'Archimède :

« Tout corps plongé dans un fluide reçoit de part de ce fluide une force (poussée) verticale, vers le haut dont l'intensité est égale au poids du volume de fluide déplacé (ce volume est donc égal au volume immergé du corps).

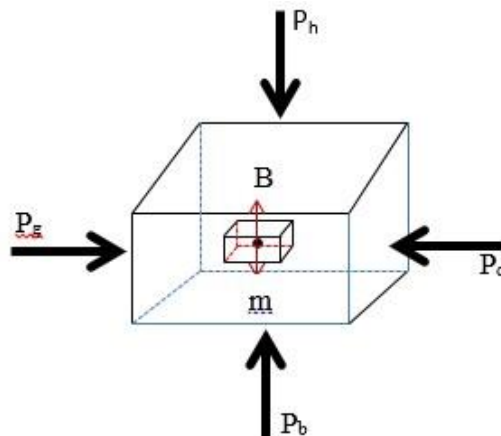
D'où la formule : $P_{Arch} = \rho_{fluide} \times V_{immer} \times g$

Dans ce cube ci-dessous pour que le fluide soit en équilibre il doit exister une force B qui équilibre mg . Cette force B provient du fluide environnant. $P_d = P_g$ (pas de force latérale) ;

$P_b = P_h + \rho gh$ (force dirigée vers le haut) ;

$B = (P_b - P_h) \times A = \rho ghA$; $hA = V \Rightarrow B = P_{ar} = \rho gV$

$B = P_{ar} = \rho gV_{im}$



B = poussée d'Archimède = poids du fluide déplacé par l'objet ; ρ = masse volumique du liquide ; g = la pesanteur ; V = volume du corps ; P_h = force d'Archimède ou poussée verticale suivant la proportion qui existe entre le poids du corps G et la force d'Archimède P ou B , trois cas sont possible après le bilan des forces on : $mg - B = (\rho - \rho_f \cdot g \cdot v)$

- ✓ si $mg < B$ le corps flotte à la surface du liquide ;
- ✓ si ; $mg = B$ le corps émerge dans le liquide ;
- ✓ si ; $mg > B$ le corps coule au fond ;

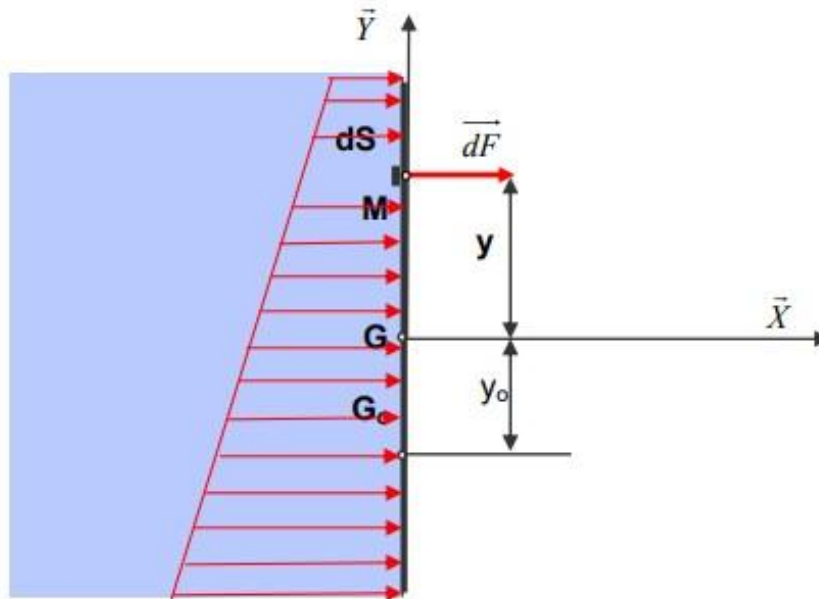
II-7-POUSSEE D'UN FLUIDE SUR UNE PAROI VERTICALE

II-7-1- Hypothèses

La paroi verticale possède un axe de symétrie (G, Y) . G est son centre de surface.

D'un côté de la paroi il y a un fluide de poids volumique γ , de l'autre côté, il y a de l'air à la pression atmosphérique P_{at} . On désigne par P_G la pression au centre de surface G du côté fluide.

Schéma n°6



II-7-2- DEFINITION DU TORSEUR :

C'est un ensemble formé par une force et un couple dont l'axe a la même direction que la force.

II-7-3. Eléments de réduction du torseur des forces de pression :

Connaissant la pression P_G au point G , la pression P_M au point M est déterminée en appliquant la relation fondamentale de l'hydrostatique : $P_M - P_G = \gamma \cdot (Y_G - Y_M)$. Dans le repère $(G, \vec{X}, \vec{Y}, \vec{Z})$ défini sur la figure : $y_G = 0$ et $Y_M = y$, donc $P_M = P_G - \gamma \cdot y$;

Exprimons la force de pression en M : $d\vec{F} = (P_G - \gamma y) \cdot dS \cdot \vec{X}$. Soit $\{\tau_{poussée}\}$ le torseur associé aux force de pression relative :

$$\{\tau_{poussée}\} = \left\{ \begin{array}{l} \vec{R} = \int d\vec{F} \\ \vec{M}_G = \int \vec{GM} \wedge d\vec{F} \end{array} \right\}$$

II-7-3-1 Résultante : $\vec{R} = P_G \cdot S \cdot \vec{X}$

II-7-3-2 Moment : $\vec{M} = \gamma \cdot I_{(G,\vec{Z})} \cdot \vec{Z}$

II-7-3-3 centre de poussée

On cherche à déterminer un point G_0 où le moment résultant des forces de pression est nul.

Compte tenu de l'hypothèse, si ce point existe il appartient à l'axe (G,Y) et il est tel que : Avec

les résultats précédents on obtient : $y_0 \vec{Y} \wedge P_G \cdot S \cdot \vec{X} = \gamma \cdot I_{(G,\vec{Z})} \cdot \vec{Z} \rightarrow y_0 = -\frac{\gamma \cdot I_{(G,\vec{Z})}}{P_G \cdot S}$. G_0 existe,

et appelé le centre de poussée de la paroi.

Remarque : le centre de poussée est toujours au-dessous du centre de surface G.

II-8-Conclusion : la statique des fluides est principalement sur les résultats suivants ;

➤ La différence de pression entre deux points est proportionnelle à leur différence de profondeur :

$P_1 - P_2 = \gamma \cdot (Z_2 - Z_1) = \rho g h$	C'est la relation fondamentale de l'hydrostatique
---	---

➤ Toute variation de pression en un point engendre la même variation de pression en tout autre point d'après le théorème de Pascal.

➤ **Le torseur associé aux forces de pression d'un fluide sur une paroi plane verticale est :**

$$\{\vec{r}_{poussée}\} = \left\{ \begin{array}{l} \vec{R} = \int_{(S)} d\vec{F} \\ \vec{M}_G = \int_s \vec{GM} \wedge d\vec{F} \end{array} \right\}_G$$

➤ La position du centre de poussé est $y_0 = -\frac{\gamma \cdot I_{(G,\vec{Z})}}{P_G \cdot S}$

➤ Tout corps plongé dans un fluide subit une force verticale, orientée vers le haut c'est la poussée d'Archimède et dont l'intensité est égale au poids du volume de fluide déplacé.

CHAPITRE III : DYNAMIQUE DES FLUIDES COMPRESSIBLES

Dans ce chapitre, nous allons étudier les fluides en mouvement. Contrairement aux solides, les éléments d'un fluide en mouvement peuvent se déplacer à des vitesses différentes. L'écoulement des fluides est un phénomène complexe.

On s'intéresse aux équations fondamentales qui régissent la dynamique des fluides incompressibles parfaits, particulier :

- L'équation de continuité (conservation de la masse) ;
- Le théorème de Bernoulli (conservation de l'énergie).

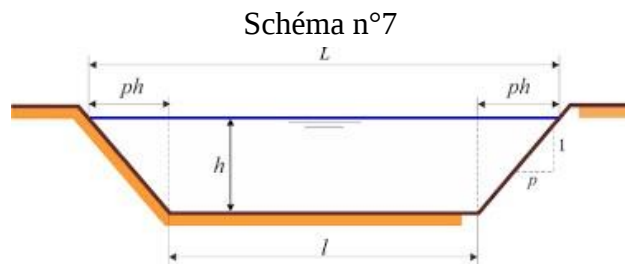
1- la section d'écoulement :

C'est une surface tracée à l'intérieur des lignes du courant. Dans le cas général cette section est une surface tortueuse ou non curviligne. En pratique, la section d'écoulement est perpendiculaire à la ligne du courant. Les types de section usuelle sont les suivantes : section circulaire, section trapézoïdale, section rectangulaire, section parabolique, section triangulaire etc.

Certains cours d'eau naturels ont une forme géométrique assez irrégulière, mais peuvent toutefois être approximés par des sections trapézoïdales ou paraboliques.

1-a-L'aire d'une section trapézoïdale :

La section est définie par sa largeur ou plafond (l) et la pente des talus données par (p), la pente des talus données par p signifie que pour une distance verticale unitaire, donc valant «1», on a une distance horizontale « p ». On enduit donc pour une distance verticale h , c'est-à-dire la profondeur d'eau dans la section, on a une distance horizontale (hp).



Partant de cette profondeur d'eau h régnant dans la section, on peut calculer la surface mouillée (aire).

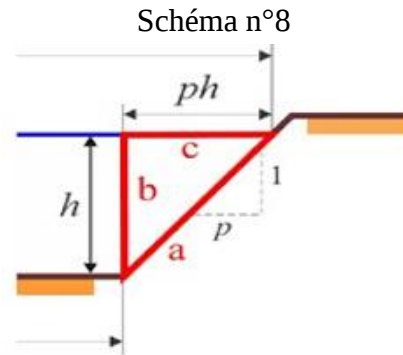
$$A = (\text{grande base} + \text{petite base}) \cdot h / 2$$

$$\text{Grande base} = L + 2ph ; \text{petite base} = l ; h = \text{hauteur}$$

$$\text{Donc : } A = (l + 2ph + l) \cdot h / 2 \rightarrow A = h(l + Ph) ; (\text{m}^2)$$

1-b-Le périmètre mouillé :

C'est une ligne par laquelle le courant du liquide touche les parois des canaux. Il est noté par χ , pour calculer le périmètre mouillé d'une section trapézoïdale, il faut additionner les longueurs des côtés mouillés du trapèze : le plafond de longueur l et les deux talus, on utilise le théorème de PYTAGORE



$$\text{Donc } \chi = 1 + 2hx = \sqrt{1 + m^2}$$

1-c- Rayon hydraulique : est le rapport de la section mouillée au périmètre mouillée.

$$R = \frac{A}{\chi} \text{ (m)}$$

2-Equation de continuité : considérons une veine d'un fluide incompressible de masse volumique ρ animée d'un écoulement permanent.

Soit S_1 et S_2 deux sections normales d'un petit tube du courant, ρ_1 et ρ_2 les masses spécifiques, v_1 et v_2 les vitesses scalaires moyennes du fluide qui traverse ces sections. En vertu du principe de conservation de la masse, les débits de la masse à travers S_1 et S_2 sont égaux en régime stationnaire.

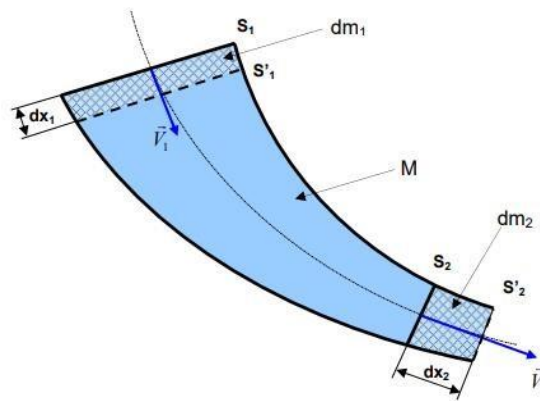
$$\rho_1 S_1 \cdot v_1 = \rho_2 S_2 \cdot v_2$$

Dans le cas d'un fluide incompressible : ρ_1 et ρ_2 et les débits Q_1 et Q_2 sont égaux.

$$Q_1 = Q_2 \Rightarrow S_1 v_1 = S_2 v_2. \quad (1)$$

Ce résultat s'applique normalement à l'écoulement d'un liquide dans un tuyau de section variable que l'on peut considérer comme un tube de courant unique.

Schéma n°9



3-Notion de débit

Définition : c'est la quantité de liquide qui passe à travers la section d'écoulement pendant une unité de temps. Pour le filet élémentaire dont les sections sont infiniment petites, on peut admettre que la vitesse réelle (v) est la même en tous les points de chaque section. Pour un courant de dimension fini, dans le cas général, la vitesse a des sections différentes entre différents points d'une fonction. Dans ce cas, le débit doit être calculé comme la somme des débits élémentaires des filets.

$$q = v \cdot S \text{ en m}^3/\text{s}$$

On distingue deux types de débits :

3-1-Débit massique : le débit massique d'une veine fluide est la limite du rapport $\frac{dm}{dt}$ quand dt tend vers zéro. Où : $q_m = \frac{dm}{dt}$

- q_m : est la quantité de la masse du fluide par unité de temps qui traverse une section droite quelconque de la conduite.
- dm : masse élémentaire en (kg) qui traverse une section droite pendant un intervalle de temps dt ;
- dt intervalle de temps en (s) ;

En tenant compte des équations précédentes on obtient :

$q_m = \frac{dm}{dt} = \rho S_1 \frac{dx_1}{dt} = \rho S_2 \frac{dx_2}{dt}$ (2); avec $\frac{dx_1}{dt} = v_1 = \|\vec{v}\|$: vitesse moyenne d'écoulement de la veine fluide à travers S_1

$\frac{dx_2}{dt} = v_2 = \|\vec{v}_2\|$: vitesse moyenne d'écoulement de la veine de fluide à travers S_2 ;

après (2): $q_m = \rho S_1 \cdot V_1 = \rho S_2 \cdot V_2$

Soit dans une section droite quelconque S de la veine fluide à travers laquelle le fluide s'écoule à la vitesse moyenne V : $q_m = \rho s v$ (3)

Où :

- q_m : débit massique en (kg/s)
- ρ : Massique volumique en (kg/m³)
- S : section de la veine fluide en (m²)
- V : vitesse moyenne du fluide à travers (s) en (m/s)

3-2-Débit volumique : le débit volumique d'une veine fluide est la limite du rapport $\frac{dv}{dt}$ quand dt tend vers 0. $q_v = \frac{dv}{dt}$

Où :

- q_v : volume de fluide par unité de temps qui travers une section droite quelconque de la conduite en (m³/s);
- dv : volume élémentaire en (m³), ayant traversé une surface s pendant un intervalle de temps dt ;
- dt : intervalle de temps en secondes (s)

D'après la relation (3) et en notant que $dv = \frac{dm}{\rho}$ on peut écrire également que $q_v = \frac{q_m}{\rho}$ soit $q_v = S \cdot V$.

3-3- Relation entre débit massique et débit volumique

A partir des relations précédentes on peut déduire facilement la relation entre le débit massique et le débit volumique : $q_m = \rho \cdot q_v$

4-Theoreme de BERNOULLI

L'équation d'un liquide établit par D.Bernoulli en 1738 est une équation fondamentale d'hydrodynamique. Elle détermine la loi de la conservation de l'énergie à l'aide de laquelle se résolvent plusieurs problèmes. Lorsqu'une particule d'eau se déplace à une vitesse (v), elle est soumise à des différentes énergies : l'énergie cinétique, l'énergie potentielle de pesanteur, l'énergie liée à la pression.

4-1-Ecoulement pour un filet du liquide parfait : soit une veine fluide ;

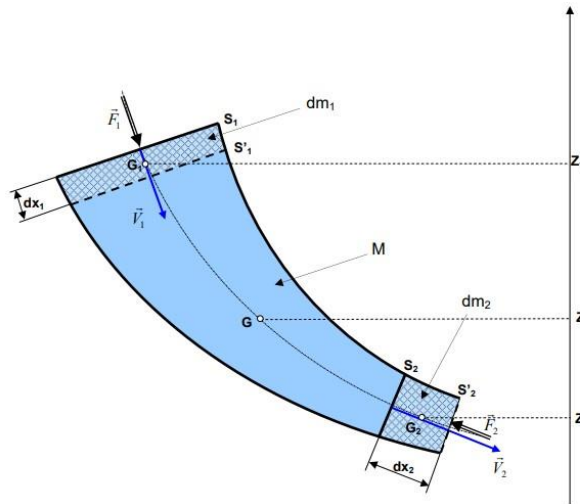
- Le fluide est parfait et incompressible ;
- L'écoulement est permanent ;

➤ L'écoulement est dans une conduite parfaitement lisse.

On considère un axe $\vec{Z}$ vertical dirigé vers le haut.

On note Z_1 , Z_2 et Z respectivement les altitudes des centres de gravité des masses dm_1 , dm_2 et M . On désigne par F_1 et F_2 respectivement les normes des forces de pression du fluide agissant au niveau des sections S_1 et S_2 .

Schéma 10



A l'instant t le fluide de masse $(dm + M)$ est compris entre S_1 et S_2 . Son énergie mécanique est :

$$E_{\text{mec}} = E_p + E_{\text{cin}} = (dm_1 \cdot g \cdot Z_1 + MgZ) + \frac{1}{2} dm_1 \cdot V_1^2 + \int_{S_1}^{S_2} \frac{dm}{2} V^2;$$

A l'instant $t' = (t + dt)$ le fluide de masse $(M + dm_2)$ est compris entre S_1' et S_2' . Son énergie mécanique

$$\text{est : } E'_{\text{mec}} = E'_{\text{pot}} + E'_{\text{cin}} = (MgZ + dm_2 \cdot g \cdot Z_2) + \int_{S_1}^{S_2} \frac{dm}{2} V^2 + \frac{1}{2} dm_2 \cdot V_2^2;$$

On applique le théorème de l'énergie mécanique au fluide entre t et t' : « la variation de l'énergie mécanique est égale à la somme des travaux des forces extérieures ».

$E'_{\text{mec}} - E_{\text{mec}} = W_{\text{fp}} = F_1 dx_1 - F_2 dx_2 \Leftrightarrow E'_{\text{mec}} - E_{\text{mec}} = P_1 S_1 dx_1 - P_2 S_2 dx_2$; en simplifiant on obtient :

$$dm_2 \cdot g \cdot Z_2 + \frac{1}{2} dm_2 V_2^2 - dm_1 g \cdot Z_1 - \frac{1}{2} dm_1 V_1^2 = \frac{P_1}{\rho_1} dm_1 - \frac{P_2}{\rho_2} dm_2;$$

Par conservation de la masse : $dm_1 = dm_2 = dm$ et puisque le fluide est incompressible : $\rho_1 = \rho_2 = \rho$.

On aboutit à l'équation de Bernoulli. $\frac{1}{2} (v_2^2 - v_1^2) + \frac{1}{2} (P_2 - P_1) + g(z_2 - z_1) = 0$ (4)

L'unité de chaque terme de la relation (4) est en joule par kilogramme (J/kg). D'après

la relation (4) on peut alors écrire : $g \cdot Z_1 + \frac{P_2}{\rho} + \frac{1}{2} V_2^2 = \frac{1}{2} V_1^2 + \frac{P_1}{\rho} + g \cdot Z_1$

- si z_1 et z_2 sont égales alors : $\frac{1}{2} V_2^2 + \frac{P_2}{\rho} = \frac{1}{2} V_1^2 + \frac{P_1}{\rho}$ cela signifie lorsque la vitesse augmente la pression diminue et inversement. Cette équation est valable pour un fluide incompressible et parfait en écoulement permanent et irrotationnel.

4-2-Interpretation de l'équation de Bernoulli : l'équation de Bernoulli peut être interprétée géométriquement, puisque chaque membre de celle-ci a de l'unité de mesure linéaire. Le premier membre de l'équation Z est une hauteur géométrique se trouvant sur un plan conventionnel. Le

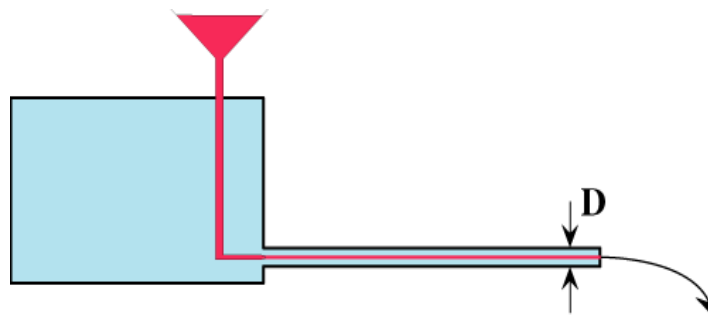
deuxième membre $\frac{P}{\rho g}$ est une hauteur piézométrique et le troisième membre $\frac{1}{2g}V_2^2$ s'appelle hauteur de la vitesse ou charge de la vitesse. La somme des hauteurs géométrique, piézométrique et de la vitesse est toujours constante et s'appelle la charge complète.

5- Régimes d'écoulement des liquides

Le régime d'un écoulement se caractérise par la fluctuation temporelle des vitesses et des pressions au sein de la veine du liquide. On distingue deux types d'écoulements : régime d'écoulement laminaire et régime d'écoulement turbulent.

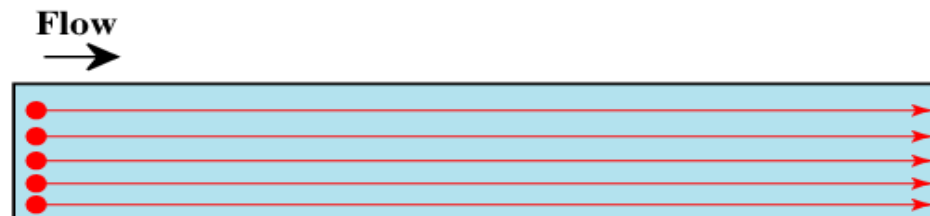
Soit un réservoir d'eau de niveau constant est vidangé par un tuyau. Une vanne placée à l'extérieur du tuyau permet de faire varier le débit $Q(m^3)$. Un deuxième tuyau est placé à l'intérieur du réservoir. Il contient un colorant et permet d'obtenir un mince filet fluide coloré au centre du tuyau.

Schéma n°11



Lorsque la vitesse est très faible le filet coloré reste bien défini, rectiligne et parallèle à l'axe du tuyau. Le régime est dit laminaire. L'écoulement laminaire est rare dans le domaine de l'hydraulique de l'eau potable et de l'assainissement, toutefois il n'est inexistant.

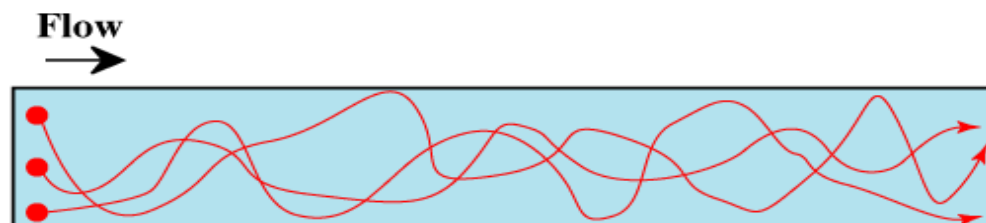
Schéma n°12



Low discharge

Quand la vitesse est plus élevée, le filet devient ondulé et très instable. Il se mélange rapidement au fluide ambiant. Des tourbillons de différentes tailles apparaissent. Le régime est dit turbulent.

Schéma n°13



High discharge

La turbulence se caractérise donc par la création de tourbillons. Ils mélangent les matières dissoutes dans l'eau, comme par exemple le chlore dans un réseau d'eau potable ou le rejet d'une station de traitement des eaux usées dans une rivière.

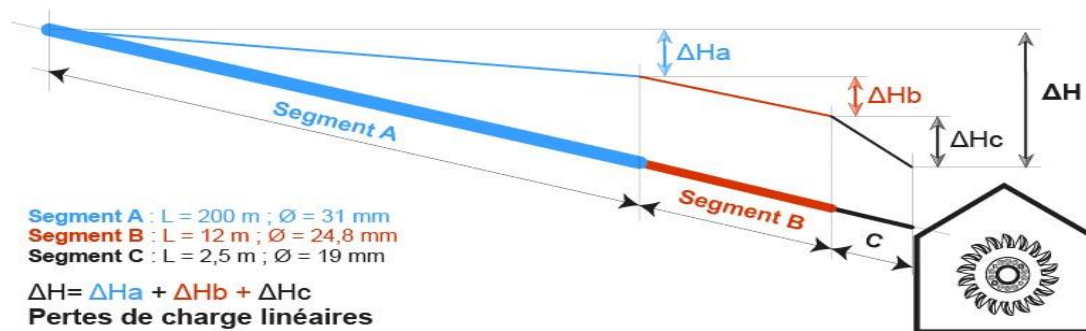
6- Pertes des charges

Il existe deux types de pertes de charge : pertes de charge linéaires, liées au frottement et les pertes de charges singulières qui affectent la charge hydraulique en un point donné. Cette notion a été mise en évidence pour les écoulements en charges où elle joue un rôle très néfaste dans la capacité et le rendement des dispositifs mise en mouvement de ces fluides, et les capacités d'évaluation d'une conduite donnée impliquant donc un surdimensionnement ici de la hauteur de relégation des stations de pompage, là des sections d'écoulement nécessaire pour évacuer les débits idoines.

Ainsi lorsqu'une singularité se présente dans la géométrie d'une conduite en charge hydraulique dans la section immédiatement voisine dans le sens de la propagation des informations hydraulique. Son influence est donc ponctuelle et durable.

La perte linéaire peut se calculer par la relation suivante : $K_L = \frac{\Delta P}{\Delta L}$; $\Delta P = \rho g h \rightarrow K_L = \frac{\Delta h}{\Delta L} \cdot \rho g \text{ (N/m}^3\text{)}$

Schéma n°14



II- HYDROGEOLOGIE

CHAPITRE IV : CYCLE GENERAL DE L'EAU DANS LA NATURE

1- Introduction

D'une façon très générale, l'hydrologie peut se définir comme l'étude d'un cycle de l'eau et l'estimation de ses différents flux. L'hydrologie au sens large regroupe :

- Climatologie, pour la partie aérienne du cycle de l'eau (précipitations, retour à l'atmosphère, transfères etc.) ;
- L'hydrologie de surface au sens strict, pour les écoulements à la surface des continents.
- L'hydrodynamique des milieux non saturés pour les échanges entre les eaux de surface et les eaux souterraines (infiltration).

L'hydrologie de surface est la science qui traite essentiellement des problèmes qualitatifs et quantitatifs des écoulements à la surface des continents.

2-Cycle général de l'eau

Le cycle général de l'eau, aussi appelé cycle hydrologique, est l'ensemble des cheminements que peut suivre une particule d'eau. Ces mouvements, accompagnés des changements d'état, peuvent s'effectuer dans l'atmosphère, à la surface du sol et dans le sol. Sous l'influence de la chaleur solaire, l'eau s'évapore de la surface des Océans, des mers, des lacs, des cours d'eau ainsi que le sol. L'eau évaporée est refroidie dans les couches supérieures de l'atmosphère, s'y condense et donne de nouveau des précipitations sous formes de pluie ou de neige. Ainsi le cycle de l'eau dans la nature peut être représenté par la relation suivante :

$$P = E + R + I$$

Cette relation caractérise, sous forme générale. Le bilan hydraulique des portions isolées de la surface de la Terre. Les grandeurs qui y entre et leurs relations mutuelles ne sont pas constantes. Elles dépendent du climat, du relief, de la nature de végétation et des conditions géologiques

Schéma n°15



3-humidité et température de l'air

– **Humidité de l'air** : l'eau dans l'atmosphère se trouve sous trois formes : **solides, liquides et vapeurs**.

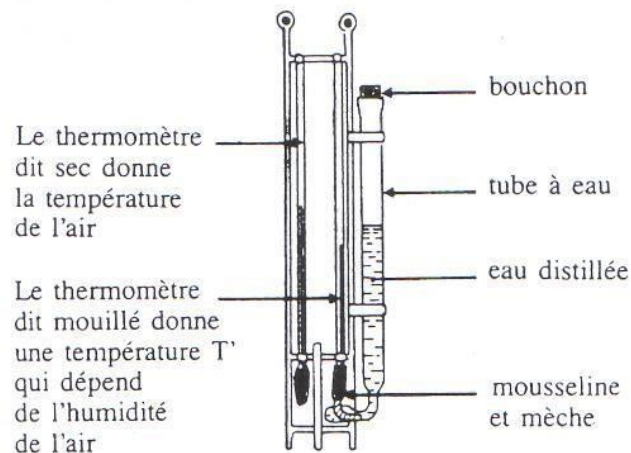
La teneur en vapeur d'eau n'est pas constante elle dépend de la température, de la pression

atmosphérique, de la saison, de l'air dans la journée et l'abondance de la végétation. La quantité de l'air contenue dans l'air.

On distingue deux types de l'humidité

- L'humidité absolue** : est la quantité de vapeur d'eau contenue dans 1m^3 d'air exprimé en (g). Autrement dit c'est la masse de vapeur d'eau par unité de volume. Avec les unités habituelles en climatologie, on a la relation suivante : $h_a = 217 \frac{e}{T}$; h_a en g/m^3 ; e est tension de vapeur en mbar ; T c'est la température absolue.
 - Humidité relative** : est le rapport de la quantité de vapeur d'eau (Q_1) dans 1m^3 d'air à l'instant d'observation à la quantité de vapeur d'eau nécessaire pour saturer le même volume d'air à la même température. Elle est calculer par la relation suivante : $U_r = \frac{Q_1}{Q} \cdot 100 \%$;
 - **Mesure de la température** : pour mesurer l'humidité de l'air on utilise les appareils suivants : Psychromètre ; hygromètre enregistreur ; hygromètre à cheveux.
- ❖ Psychromètre : il se compose de deux thermomètres à mercure l'un normal dit "sec" et l'autre dit "humide" dont le réservoir est entouré d'une mousse humidifiée par de l'eau. Le thermomètre sec indique alors la température de l'air ambiant (t) alors que le thermomètre humide enregistre une température plus faible (t') due à l'évaporation de l'eau de la mousse.

Schéma n°16



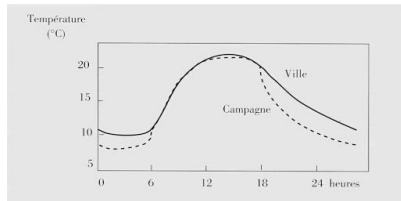
- ❖ Hygromètre enregistreur : les psychromètres se prêtent mal à un enregistrement en continu du degré de saturation de l'air. On a recours alors à des hygromètres organiques utilisant la propriété de certains corps de s'allonger lorsque l'humidité relative croît.

Le plus souvent, c'est une mèche de cheveux qui sert de "capteur" ; leur dilatation relative amplifiée et rendue linéaire en fonction de l'humidité relative. Les mouvements sont transmis à une plume qui enregistre les variations sur un diagramme entraîné par un mouvement d'horlogerie. Là encore, on utilise le plus souvent des diagrammes hebdomadaires.

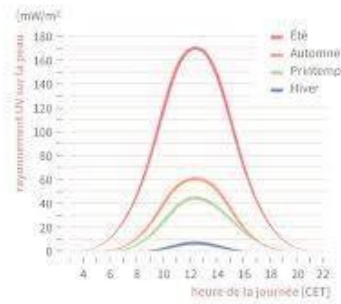
- **Température de l'air** : à une température déterminée de l'air qui s'appelle le point de rosé, la vapeur qui s'y trouve commence à se condenser et passe à l'état liquide ou bien se solidifie lors d'une variation très brusque de température.

Il existe deux types de variation de température : la variation diurne (a) et la variation annuelle (b).

Graphique n°17



a



b

➤ **Mesure de la température** : la valeur de la température se mesure à l'aide d'un thermomètre. Il existe deux types de thermomètres : thermomètre à mercure et thermomètre à l'alcool. Pour les besoins de l'hydrologie, un thermomètre à mercure à 0,1°C est suffisamment précis, mais pour obtenir des températures moyennes journalières ou bien mensuelles, il nécessiterait des relevés trop fréquents.

4-Précipitation : le nuage est un aérosol pouvant être constitué d'air, de vapeur d'eau, de gouttelettes d'eau liquides et de cristaux de glace. De dimensions variables dans l'ordre de 5 à 30 μ et leur espacement de 1mm.

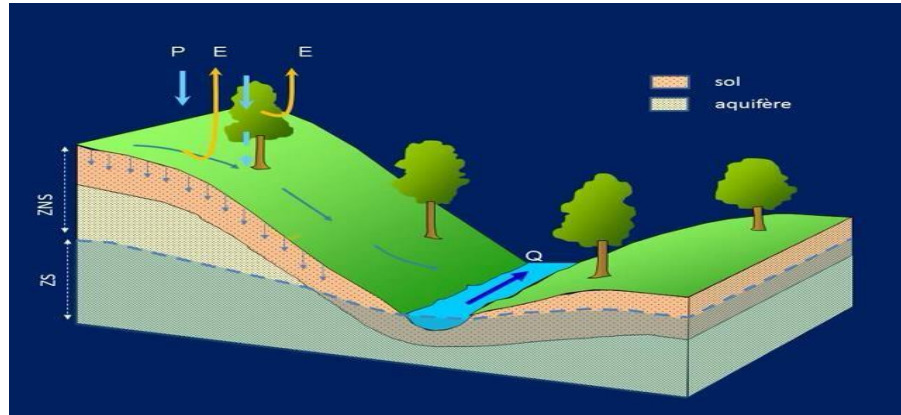
Pour qu'il y ait chute des particules d'eau, il faut que leur vitesse soit supérieure à la vitesse des courants ascendants. Pour provoquer une pluie, les gouttes doivent avoir au moins un diamètre de 0,5mm. La précipitation atmosphérique dépend de la région. Dans les régions à climat tempérés par exemple, lorsque plusieurs masses d'air de propriétés différentes se rencontrent, les plus chaudes et les plus humides sont poussées vers les hautes altitudes où elles se refroidissent. Ce sont ces précipitations qui sont les plus importantes et plus longue. Elles produisent essentiellement sous formes : de la gèle ou de la neige.

5-Le ruissellement : si l'intensité de la pluie est forte, le sol ne peut ingurgiter l'apport d'eau : passés les premiers instants et humidification de la zone supérieure du sol, un excès d'eau apparaît en surface. Ce ruissellement circule suivant la ligne de plus grande pente du sol et vient alimenter le réseau de drainage naturel (fossés, ruisseaux, rivières etc...).

6-Evaporation : même pendant la pluie, une partie non négligeable de l'eau arrivée au sol est immédiatement ré-éaporée. En effet l'atmosphère est rarement saturée, même pendant un orage.

Une fois la pluie arrêtée, cette évaporation continue et assèche peu à peu l'eau qui se trouve interceptée par la végétation, ou qui reste en surface. Elle continue sur les surfaces d'eau libre et à la surface du sol. Elle est mesurée à l'aide d'un évapomètre.

Schéma n°18



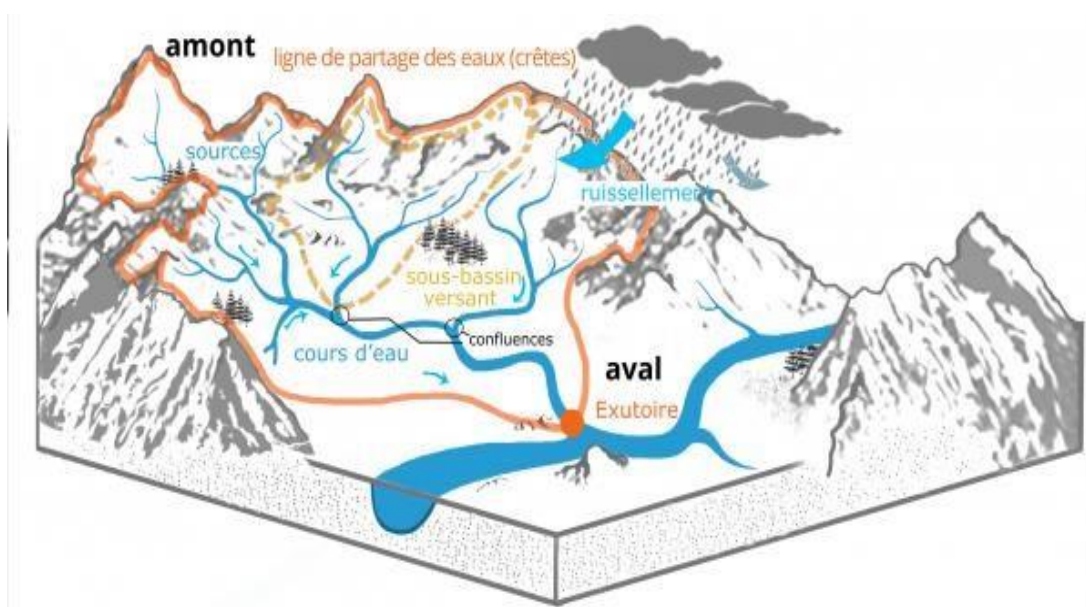
7-Infiltration : c'est un processus de pénétration de l'eau en profondeur par un mouvement vertical sous l'effet des forces de gravités. Voir le schéma ci-dessus

Notion de bassin versant

Le bassin versant en une section d'un cours d'eau est défini comme la surface drainée par ce cours d'eau et ses affluents en amont de la section. Tout écoulement prenant naissance à l'intérieur de cette surface doit donc traverser la section considérée, appelée exutoire, pour poursuivre son trajet vers l'aval. Selon la nature des terrains nous considérons deux définitions :

- Bassin versant topographique** : si le sous-sol est imperméable, le cheminement de l'eau ne sera déterminé que par la topographie. Le bassin versant sera alors limité par des lignes de crêtes et des lignes de plus grande pente.
- Bassin versant hydrogéologique** : dans le cas d'une région au sous-sol perméable, il se peut qu'une partie des eaux tombées à l'intérieur du bassin topographique s'infiltre puis sorte souterrainement du bassin (ou qu'à l'inverse des eaux entrent souterrainement dans le bassin).

Schéma n°19



CHAPITRE V : PROPRIETES PHYSIQUES ET HYDRAULIQUES DES TERRAINS**1- zone de température dans l'écorce terrestre**

Les observations de la température des terrains dans les tailles montrent qu'en hiver ils gèlent à une profondeur variable selon leur nature, l'humidité, le relief, la végétation, la couverture de neige et la situation géographique du lieu. Sur le territoire de l'union Soviétique, la profondeur de la congélation des terrains augmente du Sud au Nord et l'Ouest à l'Est et varie de quelques dizaines de centimètre à plusieurs mètres.

La profondeur et la durée de la congélation ont une grande influence sur la pénétration des précipitations atmosphérique dans le sol. Plusieurs spécialistes pensent qu'un sol gelé est imperméable à l'eau.

Il existe deux variations de la température du sol :

- a. L'amplitude diurne de variation de la température de sol. C'est-à-dire la différence entre les températures maximales et minimales en 24h, dépend de la l'altitude, de latitude et d'autres facteurs.
- b. En plus de l'amplitude diurne on note l'amplitude annuelle qui est la différence entre la température moyenne de la couche superficielle du sol pendant le mois le plus chaud de l'année et la température moyenne de la même année pendant le mois le plus froid. (graphique n°17) En une certaine profondeur se trouve la couche où la température du sol est constante pendant toute l'année. Cette couche s'appelle couche de température constante ou zone d'amplitude annuelle. En Guinée par exemple cette couche se trouve (200 – 300m).

Sous la couche à la température constante, la température des terrains augmente progressivement. Intervalle de profondeur sous lequel la t° augmente de 1°C s'appelle **degré géothermique**. Le nombre inverse c'est-à-dire augmentation de la température exprimée en degré qui correspond à un enfoncement de 1m s'appelle **gradient géothermique**.

La valeur du degré géothermique est variable selon la région et la profondeur.

Exemple :

- Inde : 32m correspond à 1°C
- Berlin : 33,7m correspond à 1°C
- Angleterre : 34,5m correspond à 1°C
- Moscou : 45,4m correspond à 1°C
- Amérique du Sud : 77,00m correspond 1°C

Le degré géothermique moyen de 33m correspond à 1°C . L'importance pratique de ce thème est que la valeur de la température du terrain définit celle de l'eau souterraine.

2-Porosité et fissuration des terrains

2-1-Porosité : la plupart des roches et des sols contiennent naturellement un certain pourcentage de vides qui peuvent être occupés par de l'eau ou de fluides. Une des principales propriétés des terrains qui détermine le rapport avec l'eau est la porosité et fissuration. Dans l'étude de la porosité, nous distinguerons deux notions :

- L'existence des vides et leurs caractéristiques géométriques (porosité totale) ;
- La façon dont ces vides sont occupés par un fluide.

La porosité est le rapport du volume vide (V_{vi}) au volume total (V_{total}). Elle est calculée par la formule suivante :

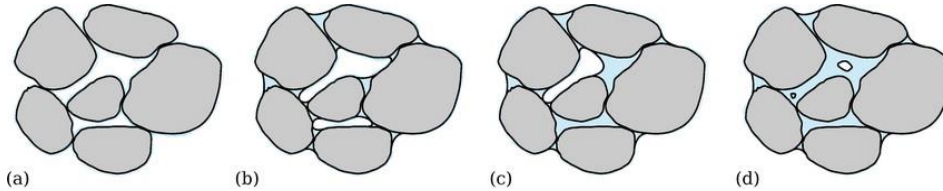
Porosité (n) :

$$n = \frac{V_v}{V_t} = \frac{V_t - V_s}{V_t} = 1 - \frac{V_s}{V_t}$$

Indice de vide (e) :

$$e = \frac{V_v}{V_s} = \frac{V_t - V_s}{V_s} = \frac{V_t}{V_s} - 1$$

Schéma n°20



2-2-La fissuration : est un cas particulier de vide dans les roches compactes ; par le jeu de la tectonique, la quasi-totalité des roches de l'écorce terrestre est fracturée : failles, fissures, diaclases. Ces fissures s'organisent généralement en au moins deux directions principales de fissuration qui découpent la roche en blocs.

La porosité dépende de la dimension des grains de la forme et de l'arrangement des grains. (Voir les schémas ci-dessus)

3-Différentes catégories d'eaux contenues dans les terrains

L'eau peut se trouver dans plusieurs états à l'intérieur du sol. Ces états se distinguent essentiellement par l'intensité des forces qui lient l'eau et les grains.

a) **L'eau de constitution** : qui fait partie de la constitution chimique des masses minérales présentes dans la phase solide. Elle se présente sous deux formes ;

❖ Eau de cristallisation contenue dans le réseau cristallin des minéraux sous forme molécule (H₂O).

Exemple : gypse CaSO4.2H2O ; diaspoire Al2O3.H2O.

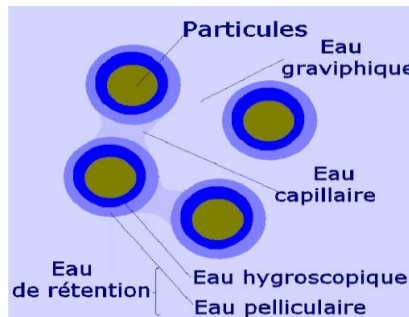
❖ Eau de constitution qui entre dans les réseaux cristallins sous forme d'ion.

L'eau de cristallisation se dégage à la température de 350-380°C tandis que l'eau de constitution s'évacue à la température plus de 400°C.

b) **L'eau en phase de vapeur** : d'une manière générale un sol non saturé à l'atmosphère à ses pores saturés en vapeur d'eau sauf si une circulation importante d'air est possible. Cette vapeur en eau dépend de la profondeur, mais aussi de la condition géologique.

c) **L'eau hygroscopique** : c'est de l'eau adhérant fortement par adsorption à la surface des particules du sol. Elle forme autour des grains une pellicule adhésive dont l'épaisseur varie suivant la nature et la surface spécifique du minéral d'une part la tension de vapeur d'autre part.

Schéma n°21



Cette catégorie d'eau ne se déplace pas, ne congèle pas, ne transmet pas la pression hydrostatique et ne dissout pas le sel.

La quantité d'eau hygroscopique n'est pas constante et elle dépend de l'humidité, de la pression et de la température.

- d) **L'eau pelliculaire** : elle entoure les particules de sol et leur eau hygroscopique. L'eau pelliculaire est soumise à des forces d'attraction moléculaires de la part de la couche d'eau hygroscopique qui diminuent rapidement quand on s'éloigne de la particule. Les eaux hygroscopique et pelliculaire sont en quelque sorte une eau liée dont les propriétés physiques sont bien différentes de celles de l'eau libre à la même température.
- e) **L'eau capillaire** : elle est retenue dans les pores du sol par les forces de capillarité dues à la tension superficielle qui se développe à l'interface eau-air. Elle est soumise à l'action de la pesanteur et elle transmet les pressions.
- f) **L'eau libre** : c'est celle qui obéit uniquement à la pesanteur, s'écoule dans le sol et peut être extraite par des techniques simples. Elle transmet la pression hydrostatique et sous l'action de différences de pression, elle peut circuler librement.

4- Propriétés hydrauliques des terrains

L'eau souterraine remplit les porosités du milieu géologique, c'est-à-dire les fractures et les espaces entre les grains, que ce soit dans les dépôts meubles ou dans le roc. Plus la porosité du milieu géologique est élevée, plus il y a d'espace disponible pour emmagasiner de l'eau ce qui constitue l'aquifère. Pour qu'une unité géologique soit intéressante pour l'approvisionnement en eau souterraine, il faut que les vides communiquent entre eux. Ça permet l'eau de circuler d'un endroit à un autre.

Les propriétés hydrauliques permettent d'analyser de façon quantitative l'aptitude d'une formation géologique à contenir de l'eau et à la laisser circuler. Elles dépendent à la fois de propriétés du fluide, en occurrence de l'eau eut des propriétés physiques du milieu permettant l'emmagasinement et l'écoulement de l'eau.

Les types des propriétés des terrains :

– **Capacité d'absorption** : c'est la capacité des terrains d'absorber une quantité d'eau déterminée. Il existe deux types d'absorption : absorption totale et absorption capillaire.

❖ **Absorption totale** : c'est le contenu maximum d'eau dans un terrain, lorsque tous les pores sont remplis d'eau en %.

❖ **Absorption capillaire** : c'est la quantité d'eau maximale retenue dans les capillaires.

Tous les terrains peuvent être partagés sous ce rapport en différentes catégories qui sont :

- Les terrains à forte capacité d'absorption : tourbe, vase, limon, argile etc....
- Les terrains à faible capacité d'absorption : craie, sable fin, grès meuble, marnes etc...
- Les terrains sans capacité d'absorption : calcaire, dolomie, granite, les roches massives etc...
- **Humidité naturelle** : il est nécessaire de connaître l'humidité à l'état naturel des terrains pour leur caractérisation. C'est la teneur d'eau contenue dans les terrains dans les conditions naturelles. Cette humidité dépend des conditions météorologiques, de la température, latitude, et de longitude, de la profondeur etc...
- **Capacité de libre écoulement ou percolation** : c'est la propriété des terrains de se ressuyer par gravité. C'est un écoulement d'eau dans le sous-sol à travers les couches perméables sous l'effet de la gravité. Exemple dans le cas d'une eau de surface qui alimente une nappe phréatique.
- **Déficit de saturation** : on appelle déficit de saturation la différence entre l'absorption totale et l'humidité naturelle.
- **Perméabilité** : une roche est dite perméable si les vides qu'elle contient sont continus. C'est-à-dire elle a la capacité de laisser passer l'eau. La perméabilité des roches dépend de la porosité, de la dimension des fissures, de la viscosité et de la température.

CHAPITRE VI : PROPRIETES PHYSIQUES ET CHIMIQUES DES EAUX SOUTERRAINES**1-Propriétés physico-chimiques des eaux souterraines**

Les propriétés physiques des eaux souterraines sont les suivantes : la transparence, la couleur, l'odeur, la saveur, la température etc...

- a) **La transparence** : l'eau nature peut être limpide ou trouble, la turbidité de l'eau est déterminée par la présence des particules d'origine minérales (sable, limon, argile et composés chimiques inorganiques) ou de particules d'origine organique (débris d'organismes, algues microscopiques et des composés chimiques organiques) en suspensions.
- b) **La couleur** : généralement une eau potable est incolore, la couleur des eaux souterraines peut être causée par la présence d'ions métalliques (cuivre, fer, manganèse). Exemple : une eau souterraine de couleur rougeâtre indique la présence du fer. Les eaux souterraines contenant des composées de manganèse sont noires.
- c) **L'odeur** : dans la majorité des cas, les eaux souterraines sont inodores. L'existence d'une odeur spécifique dans l'eau s'explique par la pourriture de boisage ou par la pénétration dans l'eau de certaine combinaison chimique.
- d) **Saveur** : le goût est conditionné par différent corps en solution, par exemple : le goût salé est bien perçu lorsqu'une solution contient environs 300 mg/l de chlorures. Si une solution contient la teneur en sulfates qui varie entre 400-450 mg, elle a un goût amer et salé. Lorsque l'eau contient une grande quantité de combinaison azotée d'origine organique, elle a un goût douceâtre. Il existe des eaux naturelles de goût acide, souvent rencontrée dans les régions de gisements de sulfures.
- e) **La température** : la détermination de la température des eaux souterraines dépend des paramètres suivants : la profondeur où se trouvent la nappe aquifère, localisation géographique, la présence des foyers volcaniques.

Classification des eaux souterraines selon la température :

- Eau très froide température jusqu'à 5°C ;
- Eau froide 5-10°C ;
- Eau douceâtre 10-18°C ;
- Eau modérément tiède 18-25°C ;
- Eau tiède 25-37°C ;
- Eau chaude de température supérieure à 37°C.

La température de l'eau influe sensiblement sur la quantité des sels et de gaz dissous.

- f) **Le PH** : l'eau naturelle pure est neutre c'est-à-dire le PH = 7. Le pH d'une eau représente son acidité ou son alcalinité. Le pH des eaux souterraines est lié à la nature des terrains traversés. Dans l'eau à l'acide il y a plus d'ions H^+ , tandis que celle alcaline contient plus d'ions OH^- .
- g) **La conductivité** : la conductivité de l'eau est une mesure de sa capacité à conduire le courant électrique. La mesure de la conductivité de l'eau nous permet d'apprécier la quantité des sels dissous dans l'eau (chlorures, sulfates, calcium, sodium, magnésium etc...). Elle est plus importante lorsque la température de l'eau augmente.

2-COMPOSITION CHIMIQUE DES EAUX SOUTERRAINES

Pour juger de la composition chimique des eaux souterraines, il faut connaître la réaction de l'eau, c'est-à-dire la concentration d'ions hydrogène (H^+) et hydroxyde (OH^-). Pour mesurer le PH, on utilise un papier tournesol. Ce papier mouillé par l'eau de réaction neutre ne change pas sa couleur violette, il devient bleu en cas de réaction basique et rouge si la réaction est acide.

Les eaux souterraines contiennent les principales composantes chimiques suivantes : Cl^- , NO_3^- , SO_4^{2-} , N_2O_5 , CO_3^{2-} , SO_2 etc...

Les eaux peuvent également entrer en contact avec certains gaz, notamment les eaux souterraines dans la zone d'infiltration. La plupart des gaz en contact avec l'eau ont une solubilité du même ordre azote (N_2), oxygène (O_2), hydrogène (H_2)). Certains gaz, tels que CO_2 , l'ammoniaque (NH_3) et le sulfure d'hydrogène (H_2S) ont une solubilité plus importante.

Les composants chimiques dans l'eau se trouvent à l'état de dissolution de cela, il faut connaître la qualité de sels dissolue dans l'eau (minéralisation globale).

La minéralisation globale de l'eau : elle s'exprime par la somme des éléments et des combinaisons chimiques qu'elle contient. Elle est mesurée par le résidu sec ou compacte qui s'obtient après évaporation de l'eau à la température de 105-110°C. D'après la quantité du résidu sec les eaux sont classées comme suit :

- Eau douces jusqu'à 1 g/l de sels ;
- Eau faiblement salée 1-5 g/l de sels ;
- Eau saumâtre 5-10 g/l ;
- Eau salée 10-50 g/l ;
- Eau saumure supérieur à 50 g/l.

En appréciant les eaux souterraines utilisées dans les buts techniques il faut attacher une attention particulière à la dureté de l'eau.

La dureté de l'eau, c'est la propriété par les sels de calcium et de magnésium et autre composant chimique qu'elle contient (chlorure de manganèse, bicarbonate de calcite, $CaCl_2$, $CaCO_3$, $Mg(HCO_3)$ etc....

Dans une eau dure le savon ne mousse pas. Dans un récipient contenant une eau dure les dépôts se forment sur les parois et au fond du récipient, la viande et les légumes cuisent lentement etc... Les catégories de la dureté de l'eau sont les suivantes :

- a. La dureté totale : elle correspond à la présence de tous les sels de calcium et magnésium ;
- b. La dureté permanente : elle correspond à tous les composants à l'exception des bicarbonates de calcium et de magnésium ;
- c. Dureté temporaire ou carbonatique : elle correspond aux sels suivants : $Ca(HCO_3)$, $Mg(HCO_3)$.

Ces sels se transforment par ébullition de $CaCO_3$, $MgCO_3$.



On bouille l'eau pour éliminer la dureté temporaire ou carbonatique. C'est pourquoi, l'eau bouillit n'a que la dureté permanent. Les résultats d'analyse chimique permettent de calculer la dureté de l'eau par

la formule suivante : $H = 0,1a + 0,14b$ d'où H est la dureté de l'eau en °C ; a = la teneur de CaO en g/l ; b = la teneur de MgO en g/l.

Le Savant Soviétique O. Alékine classe les eaux naturelles d'après leur dureté permanente exprimée en degré ou en milliéquivalent en types suivants :

- Eau très molle jusqu'à 1,5 mmoleq/l ;
- Eau molle 1,5-3,0 mmoleq/l ;
- Eau moyennement dure 3,0 – 6,0 mmoleq/l ;
- Eau dure 6,0 – 9,0 mmoleq/l
- Eau très dure supérieur à 9,0 mmoleq/l

3-QUALITE REQUISE DE L'EAU POTABLE ET DE L'EAU TECHNIQUE

L'eau destinée à l'alimentation de l'homme et à l'industrie n'a pas la même qualité. Ainsi, les eaux potables ne conviennent pas toujours pas aux buts techniques et inversement. Des normes déterminées existent pour apprécier la convenance des eaux souterraines pour les usages divers.

a) **Qualité de l'eau potable** : il est convenu que l'eau destinée à l'alimentation humaine peut renfermer les principaux composants chimiques suivants (données standard de l'Etat) :

- Odeur et goût à la température de 25°C ;
- Résidu sec, jusqu'à 1000 ml/g ou 1g/l ;
- Dureté totale 7 mg.eq/l parfois jusqu'à 14 mg.eq/l ;
- Teneur de : $N_2O_5 \rightarrow 20\text{mg/l}$; trace de NO_2 ; $NO_3 \rightarrow 10\text{ mg/l}$; $Cl \rightarrow 25\text{-}50\text{ mg/l}$; $(Fe^{2+} ; Fe^{3+}) \rightarrow 0,3\text{ mg/l}$; $SO_4 \rightarrow 100\text{ mg/l}$; $\sum Fe + Mn \rightarrow 0,5\text{-}1,0\text{ mg/l}$; $Pb \rightarrow 0,1\text{ mg/l}$; $As \rightarrow 0,05\text{mg/l}$; $Cu \rightarrow 3,0\text{ mg/l}$.
- L'eau ne doit pas contenir de Hg ; Cl à six valence Ba et autres composants toxiques.
- Présence de H_2S inadmissible
- p^H entre 6,5 – 9,5
- Test coli : 3 bact/l d'eau

Qualité de l'eau technique : l'appréciation de la provenance de l'eau technique à l'industrie est basée sur l'observation de (3) phénomènes suivants :

- Formation des dépôts ;
- Formation d'écume ;
- Corrosion des parois des chaudières.

Pour avertir la formation des dépôts, les eaux techniques subissent à l'opération chimique d'adoucissement. A cet effet, on utilise la méthode de la chaux ou mélange chaux-soude où le réactif adoucissant tels que la chaux éteinte $Ca(OH)_2$ et bicarbonate de soude $Na(HCO_3)$; $Ca(HCO_3)$. Les sels solubles de Na et K se forment d'une mousse persistante à la surface de l'eau bouillante. Ce phénomène s'accompagne par une oscillation du niveau d'eau ce qui perturbe le processus d'évaporation.

Pour éviter la formation d'écume, on ajoute à l'eau bouillie des sels d'aluminium. La présence dans l'eau de N_2O_5 supérieur à 50 mg/l ; Cl supérieur à 200 mg/l ; O_2 supérieur à 5 mg/L ; trace de $CaSO_4$ et SiO_2 donnent aux eaux une action nuisible de la corrosion.

4-L'action agressive de l'eau sur le béton

Non seulement dans les ouvrages de captages, mais dans toutes les constructions en béton se trouvent immergés d'une manière constante ou temporaire. Se manifeste par sa détérioration, du fait de la cristallisation de nouveau composé chimique. Dont la formation s'accompagne d'un gonflement, ainsi que d'un délavage de certains constituants du béton plus ou moins solubles dans l'eau et en particulier du carbonate de calcium (CaCO_3).

La capacité de dissolution de l'eau par rapport à CaCO_3 est tout d'abord déterminée par la présence dans l'eau d'acide carbonique agressif. Souvent, dans les eaux naturelles il y a en même temps de l'acide carbonique libre et des ions HCO_3^- . Les ions CO_3^{2-} ne peuvent pas exister en quantité notable en présence de l'acide carbonique des ions HCO_3^- . $\text{CaCO}_3 + \text{H}_2\text{OCO}_2 \rightarrow \text{Ca}^{2+} + 2\text{HCO}_3^-$.

5-Composition bactériologique des eaux souterraines

Les eaux courantes et stagnantes superficielles, ainsi que les eaux souterraines, suivant leur degré de pollution contiennent différents micro-organismes et des bactéries. 1cm³ d'eau peuvent contenir plusieurs centaines ou millions de bactéries. Il démontré que le nombre de bactérie dans une eau souterraine diminue avec la profondeur.

Les bactéries peuvent être inoffensives ou pathogène, provoquant différentes maladies de l'appareil digestif. Elles apparaissent dans les eaux souterraines dans les fleuves à la suite de leur pollution par toutes sortes de détrit. La taille des bactéries varie entre quelques fractions de microns à quelques microns. Ainsi, les bactéries qui oxydent le méthane sont longues de 2-3 μ pour une épaisseur de 1,52 μ . Pour apprécier le degré de pollution organique de l'eau, on se sert du titre coli qui représente le volume d'eau contenant un seul colibacille. Cette bactérie qui est toujours présente dans les excréments de l'Homme et des animaux n'est pas pathogène par elle-même, mais elle est souvent accompagnée de bactéries pathogènes très dangereuses, qui causent des maladies comme : la fièvre typhoïde, de choleras, de dysenterie etc....

La classification de l'eau suivant la teneur en colibacille :

- ✓ Eau excessivement pure, si une bactérie se trouve dans 500-700 cm³ ;
- ✓ Eau pure, si une bactérie se trouve dans 300-500 cm³ ;
- ✓ Eau suspecte, si une bactérie se trouve dans 200-300 cm³ ;
- ✓ Eau douteuse, si une bactérie se trouve dans 180-200 cm³ ;
- ✓ Eau impure, si une bactérie se trouve dans 50-180 cm³ ;
- ✓ Eau très impure et inutilisable, si une bactérie se trouve dans 25-50 cm³.

La présence des colibacilles dans l'eau est actuellement évaluée par le test coli c'est-à-dire par le nombre de bactéries dans un litre d'eau. L'eau dont le test coli ne dépasse pas 2-3 est estimée sans danger bactériologique.

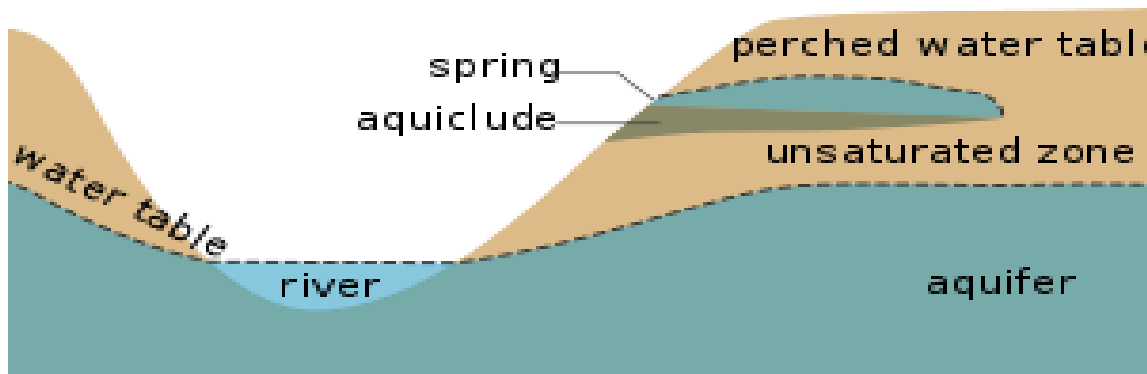
CHAPITRE VII : PRINCIPAUX TYPES DES NAPPES D'EAUX SOUTERRAINES

Elles peuvent être soit captive soit libre, mais il n'existe pas de classification précise et unique de différents types des eaux souterraines. Elles possèdent toutes une série caractéristique spécifique qui les distinguent.

D'après leur origine elles se subdivisent en des différentes catégories : table d'eau perchée, eaux phréatiques, eaux artésiennes, eaux captives et eaux minérales etc...

- a. **Table d'eau perchée** : cette couche d'eau s'accumule à une faible profondeur. Leur nappe à une épaisseur limitée, dépassant pas 1 à 2m généralement et leur extension est restreinte. La formation de ces nappes perchées est conditionnée par la présence dans la zone d'aération de lentille de roche étanche, tel que les argiles, de limons etc... à la surface desquelles sont retenues et accumulées les eaux infiltrées et les eaux de condensation.

Schéma n°22

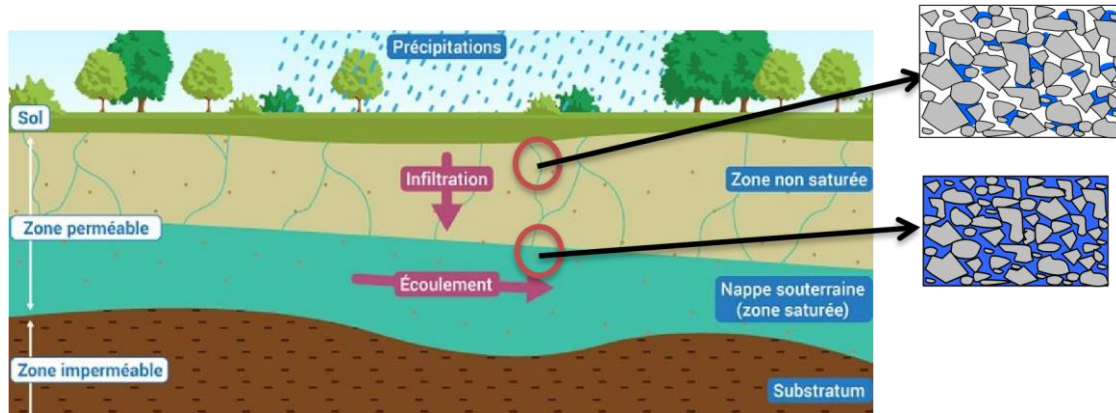


La nappe perchée peut être souvent le fait des fuites d'eau de canalisation d'une zone habitée ou des établissements industriels. Le niveau de la nappe dans ce cas est rapproché à la surface du sol, ce qui peut rendre le terrain marécageux ou bien provoquer l'inondation des terrains ; la nappe perchée disparaît en période de sécheresse.

La composition chimique des eaux de la nappe perchée est en générale caractérisée par une faible minéralisation, par contre elles sont souvent contaminées par des matières organiques.

- b. **Eaux phréatiques** : dans la partie superficielle de l'écorce terrestre la plus accessible aux observations on distingue trois zones différentes par le caractère de leur eau souterraine : zone d'aération ou d'infiltration, zone capillaire et zone de saturation.
- ❖ **La zone d'aération** : c'est la partie qui est en relation étroite avec l'atmosphère. L'infiltration des eaux souterraines se fait à travers cette zone. Une partie des interstices est constamment remplis par de l'air. On rencontre quelque fois dans la zone d'aération des nappes perchées.
 - ❖ **La zone en eau capillaire** : elle se trouve à la limite entre le niveau piézométrique de la nappe aquifère ou zone saturée et la zone d'aération. Dans cette zone les interstices capillaires sont remplis d'eau, tandis que les espaces plus larges compris entre les grains restent vides.
 - ❖ **Zone de saturation** : elle précise une zone du sous-sol dans laquelle l'eau occupe complètement les interstices des roches, formant dans un aquifère, une nappe d'eau souterraine.

Schéma n°23



Les nappes phréatiques appartiennent à la nappe aquifère d'extension continue reposant sur la couche imperméable au-dessous de la surface terrestre.

Un aquifère est un réservoir d'eau souterraine, suffisamment poreux et suffisamment perméable pour être considéré comme une réserve exploitable par l'Homme. L'aquifère contient une nappe d'eau (douce) : l'aquifère est donc le contenant, la nappe étant le contenu.

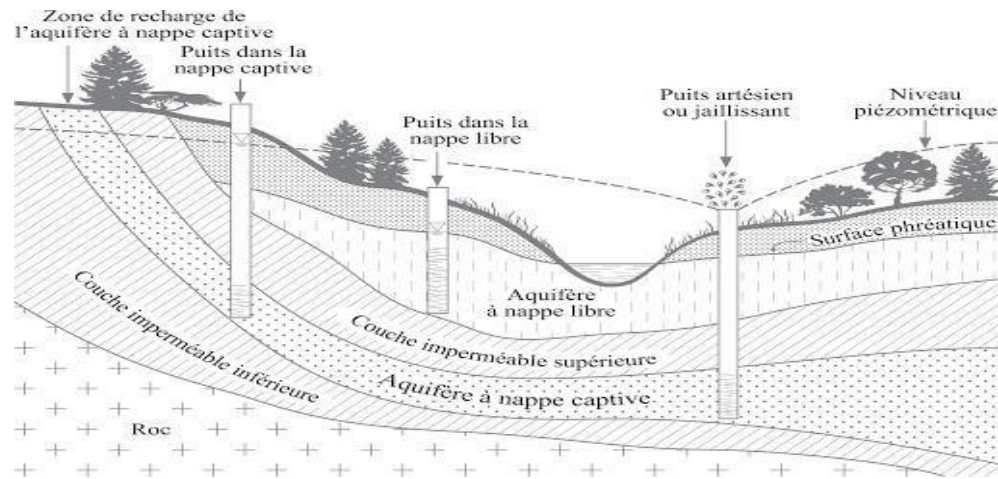
De point de vu hydrogéologique les couches se divisent en :

- Nappes phréatiques ou alluviales : peu profondes et alimentée par les précipitations pluvieuses ou les écoulements d'eau en dessus ;
- Nappes captives : plus profondes que les premiers et séparées de la surface par une couche imperméables, l'alimentation de ces nappes est assurée par l'infiltration sur leurs bordures. La nature du terrain sous lequel se trouve ces eaux est un déterminant de leurs compositions chimiques, cependant elles sont appelées aussi les eaux propres car elles répondent en générale aux normes de potabilités. Il existe des aquifères complexes (multicouches).

Les systèmes aquifères multicouches, plus ou moins profonds, peuvent échanger des "flux de drainages" à travers les couches "semi-perméables." On distingue généralement trois types de couches dans les systèmes aquifères multicouches :

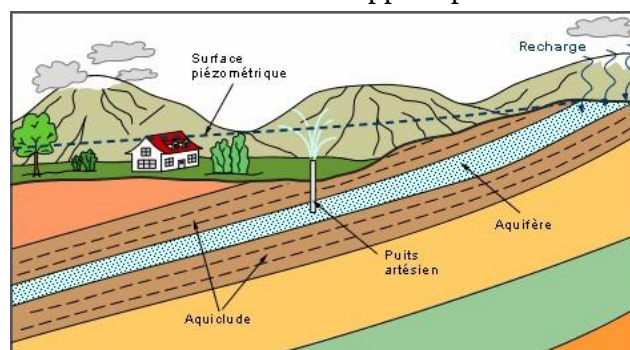
- 1) Les couches perméables considérées comme aquifères (sable et graviers), de perméabilité $K=10^{-1}$ à 10^{-4} m/s ;
- 2) Les couches semi-perméables (sables très fins et argileux, limons fins et silts etc...) de perméabilité $K=10^{-5}$ à 10^{-8} m/s ;
- 3) Les couches imperméables (argiles, argilites, granites peu fracturés etc...) ; de perméabilité $K=10^{-9}$ m/s.

Schéma n°24



c. **Eaux artésiennes** : les aquifères captifs ne reçoivent pas de recharge directe de la pluie parce qu'ils sont séparés de la surface par une couche imperméable. Ils peuvent être rechargés à partir d'un point éloigné où les couches aquifères affleurent à la surface. Ils peuvent être entièrement captifs sous les couches imperméables et ne reçoivent des charges du tout. Puisque les aquifères captifs ne sont pas ouverts à l'atmosphère, l'eau qui y trouve est appelée eau artésienne ou captive et est généralement sous pression résultant du niveau de l'eau dans la zone recharge. Cette pression est appelée pression piézométrique. Si un forage est foré dans une nappe captive, l'eau monte généralement dans le forage à un niveau au-dessus du toit de la l'aquifère en raison de la pression piézométrique. Lorsque l'eau est pompée à partir d'un aquifère captif, la pression piézométrique est réduite, mais la couche aquifère reste totalement saturée. Les conditions de gisement des nappes artésiennes peuvent être différentes le plus souvent, elles prennent une disposition en forme de bateau ou monoclinale. Une série de nappes aquifères artésiennes en position superposée encaissée dans les terrains d'âge différents et séparée par des couches peu perméables de différentes épaisseurs forment des bassins artésiens des eaux souterraines.

Schéma n°25 : Nappe captive



Zone des eaux artésiennes

Actuellement on distingue selon la série des zones verticales dans laquelle les eaux souterraines se différencient par leur composition chimique et le degré de minéralisation des zones suivantes :

1. Zone supérieur décharge hydraulique libre : y prédomine les eaux douces hydrocarbonates calciques et hydrocarbonates sodiques.

2. Zone moyenne décharge hydraulique perturbé : il prédomine les eaux minéralisées sodique sulfurique.
3. Zone inférieure décharge hydraulique : dégrader avec les eaux à forte minéralisation (saumure). Chloré calcique, chlorure sodique. Si la minéralisation globale des eaux de la première zone ne dépasse pas 1g/l et elle atteint dans la deuxième zone 5-50 g/l et dans la troisième zone 200 g/l et plus.
- d. **Eaux minérales** : on appelle eaux minérales, les eaux souterraines contenant en dissolution une quantité radicalement supérieure de la substance chimique souvent radioactive et des gaz. Dans bien des cas, ces eaux sont utiles pour la santé et ont une application médicale. Certaines sources minérales possèdent une température élevée. La minéralisation globale des eaux minérales varie de 0,3-10 g/l et plus.

Les eaux minérales peuvent être en nappe libre ou artésienne, elles proviennent des fissures ou des fractures. Les sources des eaux minérales sont disposées près de contact des couches de différente perméabilité ou bien dans les zones de dislocation tectonique.

CHAPITRE VIII : MOUVEMENT DES EAUX SOUTERRAINES

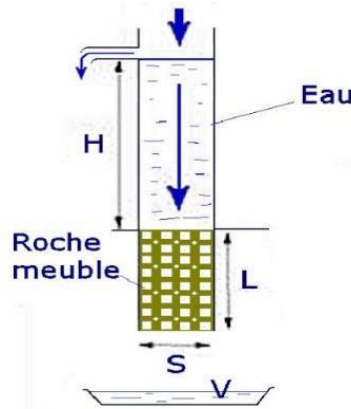
Loi fondamentale d'écoulement des eaux souterraines : l'eau souterraine s'écoule suivant un gradient, des zones de charge hydraulique élevée vers les zones de charge inférieure. La vitesse d'écoulement est régie par le gradient et par les propriétés de l'aquifère. La plupart des eaux souterraines sont en mouvement lent et continu, des zones de recharge naturelle de l'aquifère provenant de la pluie, vers les zones de décharge de l'aquifère, comme les sources et d'côtières. L'écoulement des eaux souterraines est régi par la loi de Darcy.

1) Loi de Darcy

a) Définition : suivant la loi de Darcy, le débit de l'écoulement d'un fluide à travers un milieu poreux est proportionnel à la perte de charge, inversement proportionnel au chemin parcouru et proportionnel à un coefficient k . La loi peut donc s'écrire ainsi : $Q = KiA$ ou $\frac{Q}{A} = v = ki$.

b) L'expérience de Darcy : en 1856 Henry Darcy a publié une expérience de transfère d'eau à travers un milieu poreux dans un livre intitulé « les fontaines publiques de la ville de Dijon ». Dans son expérience il a mesuré le flux d'eau ($Q = m^3/s$) à travers un filtre composé du sable. Darcy a relié le flux à la section (aire) du filtre et au gradient hydraulique. Il a appelé conductivité hydraulique la constante qui relie ces paramètres.

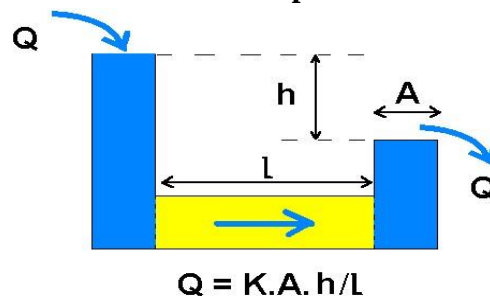
Schéma n°26 : expérience de Darcy



Les résultats de l'expérience de Darcy sont les suivantes :

- ✓ Q est proportionnel à la surface A du filtre ;
- ✓ Q est proportionnel à $h_a - h_b$;
- ✓ Q est inversement proportion à L la longueur du filtre ;
- ✓ La constante de proportionnalité (k) dépend des matériaux poreux. K dépend de la taille des grains et de la connectivité des pores S ;

Schéma n°27 : expérience de Darcy



Q = flux d'eau ; en m^3/s

K = conductivité hydraulique ; en m/s

A = surface traversée par le fluide ; en m^2

i = gradient hydraulique ; sans dimension

Cette loi peut être mesurée par : $Q = kAi$ où $i = \frac{h_a - h_b}{L}$ ou $Q = kA \frac{dh}{dL}$ ou plus généralement.

Le signe est choisi tel qu'il indique que le fluide s'écoule dans la direction de diminution du gradient hydraulique. On définit la vitesse de filtration (appelé aussi vitesse apparente ou vitesse de Darcy) V par : $v_f = ki$ ou $\frac{Q}{A}$. On définit la vitesse réelle du fluide $v_r = \frac{v_f}{v_e}$ où v_e est la porosité efficace du milieu poreux.

- c) **Limites de la loi de Darcy** : en général, la loi de Darcy considère que l'eau se propage dans un milieu homogène continu, et que la structure des particules solides est microscopique par rapport au champ d'observation. La loi Darcy ne s'applique donc pas à l'écoulement en milieu fissuré.

2) Propriétés hydrauliques des aquifères

- Le débit d'une nappe** : volume d'eau en m^3 traversant par unité de temps (s) une section transversale en m^2 d'aquifère, sous l'effet d'un gradient hydraulique déterminé.
- Coefficient de perméabilité K** : D'après Darcy, le coefficient de perméabilité K peut être défini comme le volume d'eau qui s'écoule pendant une unité de temps à travers une unité de surface d'une section de terrain sous un gradient hydraulique égal à l'unité. K a la dimension d'une vitesse : m/s
- Transmissivité T** : Caractérise la capacité de l'aquifère à transmettre l'eau. Paramètre qui régit le débit d'eau qui s'écoule par unité de largeur d'un aquifère sous l'effet d'une unité de gradient hydraulique. Évalue la fonction « conduite » de l'aquifère. Produit du coefficient de perméabilité moyen par l'épaisseur de l'aquifère. T s'exprime en longueur²/temps (souvent en m^2/s ou en m^2/j).
 $T = K.H$ en m^2/s .
- Coefficient d'emmagasinement S** : volume d'eau pouvant être libéré ou emmagasiné par un prisme vertical du matériau aquifère de section égale à l'unité à la suite d'une variation unitaire du niveau piézométrique ou de charge. Il est sans dimension.

3) Venue d'eau au fond des puits

Aménagement du fond des captants : les fossés, les galeries, différents puits de mines, fontaines parties des installations de captage. Ces ouvrages peuvent être revêtus de bois, de débris, de pierres naturelles, de béton armé de pierres naturelles, de céramique (argiles brûlées), de béton armé et de métal.

Les puits sont classés suivant le mode d'exécution en deux types :

- ❖ Les puits creusés ;
- ❖ Les puits forés (percés) ;

Selon la nature de la charge, ils sont classés comme suit :

- ❖ Les puits en nappe libre ou phréatique ;
- ❖ Les puits en nappe captive ou artésienne.

Pour renforcer les puits profonds on utilise les tubes soit métalliques soit plastiques.

- ✓ Les avantages des tubes métalliques sont que, ils sont moins stables à la corrosion et coûteux.

✓ Inconvénient des tubes métalliques, ils sont moins stables à la corrosion.

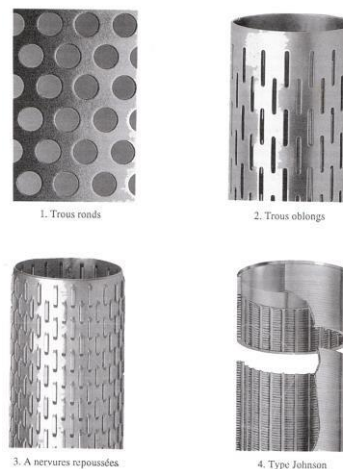
D'après la profondeur, on distingue les ouvrages captant parfait qui traverse toute la nappe aquifère jusqu'à la couche imperméable et les ouvrages imparfait qui ne pénètre que partiellement dans la couche aquifère.

Dans le cas des puits imparfait l'eau viens par les parois et le fond ou par le fond seul si les parois sont imperméables. Dans le cas des puits parfait l'eau vient par les parois.

La partie la plus importante des forages et des puits est le dispositif filtrant qui intercepte couche aquifère entièrement ou partiellement selon l'épaisseur et sa nature.

Le revêtement des puits par les filtres est de différentes natures : en bois, en céramique. La dimension du filtre correspond au diamètre basal (filtre) du puits. C'est un tuyau perforé de trous ronds de diamètre $d=1-2$ cm et sont distante de 2-4 cm ou de trous rectangulaires de largeur 0,8-1,5 cm et une longueur de 2,5 cm.

Schéma n°28



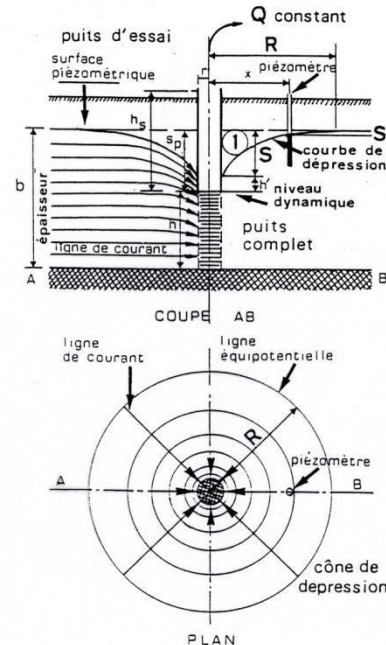
Pour que le sable ne soit pas entraîné dans le puits, on entoure le tuyau perforé par un tamis fin forme de grillage. Les mailles du tamis sont choisies de façon à laisser passer jusqu'à 40% des terrains secs provenant de la nappe. Avec un tel calibre de la charge enlevé à la nappe aquifère, il se crée autour du filtre un terrain très perméable qui n'opposera pas de sensible résistance au mouvement de l'eau vers le puits. Les matériaux du tuyau et de tamis filtrant sont choisis en tenant compte de la composition chimique et la réaction de l'eau à la présence des gaz libres et dissous.

Le nombre de trous de perforation par mètre du tuyau est de 500-800. L'aire des orifices sur un filtre peut atteindre 20-22% (perméabilité du filtre). Admettre une perméabilité supérieure à 25% pour un filtre à trous, et 30-40% pour un filtre à fentes n'est pas recommandé pour raison de résistance. Dans les puits artésiens à cause de la pression élevée de la nappe artésienne l'espace sera rempli avec une solution de ciment. Pour appeler la venue d'eau au fond du puits on réalise les travaux de perforation en utilisant les perforateurs à bille et les perforateurs cumulatifs.

Pour appeler la venue d'eau au fond du puits dans la pratique d'hydrogéologie on applique les travaux d'aération, le but duquel est diminuée la densité de la boue de forage. Cette opération favorise à la diminution de contre pression sur la couche aquifère.

La venue d'eau vers un puits en nappe libre :

Schéma n°29 ;30 :



D'après la loi de Darcy le débit d'un puits $Q = A.V$ ou $A = 2\pi \cdot xy$; xy est la surface latérale du cylindre de hauteur h et de rayon x et $v = ki = k \frac{dy}{dx}$. Dans cette manière la première équation peut être :

$$Q = 2\pi \cdot xy \cdot k \frac{dy}{dx} \rightarrow Q \frac{dx}{x} = 2\pi k y dy. \text{ En intégrant cette équation on obtient : } Q \int_r^R \frac{dx}{x} = 2\pi k \int_h^H y dy$$

$$Q = [\ln x]_r^R = 2\pi k \left[\frac{1}{2} y^2 \right]_r^R ; Q(\ln R - \ln r) = k\pi(H^2 - h^2) \rightarrow Q \ln \frac{R}{r} = k\pi(H^2 - h^2) \rightarrow k\pi = \frac{(H^2 - h^2)}{\ln \frac{R}{r}}$$

K est le coefficient de perméabilité ;

Page 41

TRAVAUX DIRIGES

Enonce

Déterminer le poids volumique de l'essence sachant que sa densité $d=0,7$.

On donne :

- l'accélération de la pesanteur $g=9,81 \text{ m/s}^2$
- la masse volumique de l'eau $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$

Enoncé

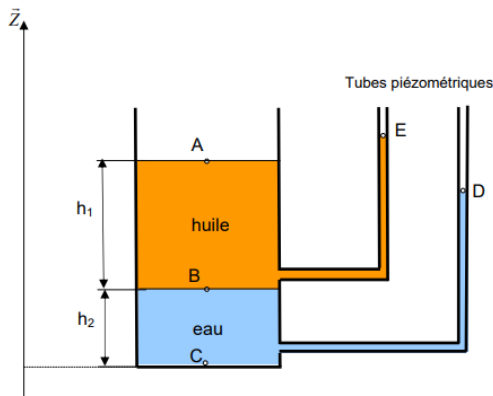
Du fuel porté à une température $T=20^\circ\text{C}$ a une viscosité dynamique $\mu = 95.10^{-3} \text{ Pa.s}$. Calculer sa viscosité cinématique ν en stokes sachant que sa densité est $d=0,95$.

On donne la masse volumique de l'eau est $\rho_{\text{eau}} = 1000 \text{ kg/m}^3$.

Enoncé

La figure ci-dessous représente un réservoir ouvert, équipé de deux tubes piézométriques et rempli avec deux liquides non miscibles :

- de l'huile de masse volumique $\rho_1=850 \text{ kg/m}^3$ sur une hauteur $h_1=6 \text{ m}$;
- de l'eau de masse volumique $\rho_2=1000 \text{ kg/m}^3$ sur une hauteur $h_2=5 \text{ m}$.



On désigne par :

- A un point de la surface libre de l'huile,
- B un point sur l'interface entre les deux liquides,
- C un point appartenant au fond du réservoir
- D et E les points représentant les niveaux dans les tubes piézométriques,
- $(O, \vec{z})$ est un axe vertical tel que $Z_C = 0$.

Appliquer la relation fondamentale de l'hydrostatique (RFH) entre les points :

- 1) B et A. En déduire la pression P_B (en bar) au point B.
- 2) A et E. En déduire le niveau de l'huile Z_E dans le tube piézométrique.
- 3) C et B. En déduire la pression P_C (en bar) au point C.
- 4) C et D. En déduire le niveau de l'eau Z_D dans le tube piézométrique.

Enoncé

Suite au naufrage d'un pétrolier, on envoie un sous-marin pour inspecter l'épave et repérer d'éventuelles fuites. L'épave repose à une profondeur $h= 1981 \text{ m}$.

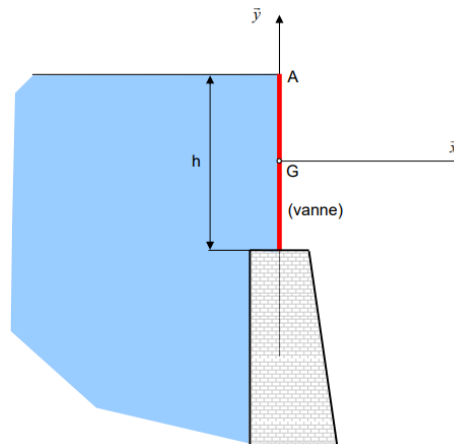
On donne :

- l'accélération de la pesanteur $g= 9,8 \text{ m/s}^2$,

- la pression atmosphérique $P_{\text{atm}} = 1 \text{ bar}$,
 - la masse volumique de l'eau de mer est $\rho = 1025 \text{ kg/m}^3$,
- Le sous-marin est équipé d'un hublot vitré de diamètre $d = 310 \text{ mm}$, de centre de gravité G , et de normale $(G, \vec{X})$ est situé dans un plan vertical $(G, \vec{Y}, \vec{Z})$. L'axe $(G, \vec{Z})$ est vertical.
- 1) Calculez la pression P_G de l'eau à cette profondeur au point G .
 - 2) Quelle est l'intensité $\|\vec{R}\|$ de la résultante des actions de pression de l'eau sur le hublot ?
 - 3) Calculer le moment quadratique $I_{(G, \vec{Z})}$ du hublot.
 - 4) Quelle est l'intensité $(\|\vec{M}_G\|)$ du moment des actions de pression de l'eau sur le hublot ?

Enoncé

La figure ci-dessous représente une vanne de sécurité de forme rectangulaire destinée à un barrage. Elle permet d'évacuer l'eau stockée dans le barrage surtout lorsque le niveau du fluide devient élevé. Les dimensions de la vanne sont : $b = 4 \text{ m}$ et $h = 2 \text{ m}$. Sa partie supérieure affleure la surface du plan d'eau. Un repère $(G, \vec{X}, \vec{Y}, \vec{Z})$ est représenté sur la figure tel que : G est le centre de surface de la vanne. On donne : la masse volumique de l'eau $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$ et l'accélération de la pesanteur $g = 9,81 \text{ m/s}^2$,



- 1) En négligeant la pression atmosphérique, calculer la pression P_G de l'eau au centre de gravité.
- 2) Déterminer la résultante $\vec{R}$ des forces de pression.
- 3) Déterminer le moment $\vec{M}_G$ des forces de pression.
- 4) Calculer l'ordonnée y_0 du centre de poussée.

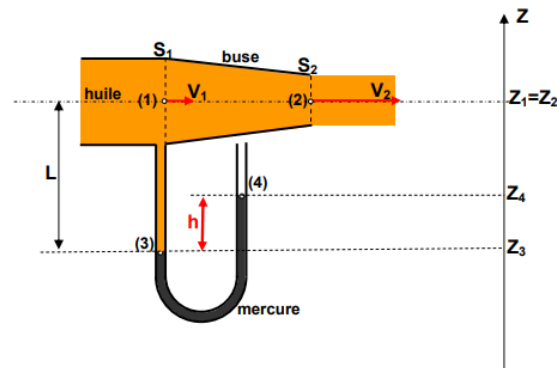
Enoncé

Un fluide parfait incompressible s'écoule d'un orifice circulaire situé sur le côté d'un réservoir avec un débit volumique $q_v = 0,4 \text{ L/s}$. Le diamètre de l'orifice est $d = 10 \text{ mm}$.

- 1) Déterminer la vitesse d'écoulement au niveau de l'orifice.
- 2) Enoncer le théorème de Bernoulli.
- 3) A quelle distance de la surface libre se trouve l'orifice ?

Enoncé

De l'huile est accélérée à travers une buse en forme de cône convergent.



La buse est équipée d'un manomètre en U qui contient du mercure.

Partie 1 : Etude de la buse

Un débit volumique $q_v = 0,4 \text{ L/s}$, l'huile traverse la section S_1 de diamètre $d_1 = 10 \text{ mm}$ à une vitesse d'écoulement V_1 , à une pression P_1 et sort vers l'atmosphère par la section S_2 de diamètre d_2 à une vitesse d'écoulement $V_2 = 4.V_1$ et une pression $P_2 = P_{\text{atm}} = 1 \text{ bar}$.

On suppose que :

- le fluide est parfait,
- la buse est maintenue horizontale ($Z_1 = Z_2$).

On donne la masse volumique de l'huile : $\rho_{\text{huile}} = 800 \text{ kg/m}^3$.

- 1) Calculer la vitesse d'écoulement V_1 .
- 2) Ecrire l'équation de continuité. En déduire le diamètre d_2 .
- 3) En appliquant le Théorème de Bernoulli entre le point (1) et le point (2) déterminer la pression P_1 en bar.

Partie 2 : Etude du manomètre (tube en U).

Le manomètre, tube en U, contient du mercure de masse volumique $\rho_{\text{mercure}} = 13600 \text{ kg/m}^3$. Il permet de mesurer la pression P_1 à partir d'une lecture de la dénivellation : $h = (Z_4 - Z_3)$.

On donne :

- $(Z_1 - Z_3) = L = 1274 \text{ mm}$.
- l'accélération de la pesanteur : $g = 9,81 \text{ m/s}^2$.
- la pression $P_4 = P_{\text{atm}} = 1 \text{ bar}$,

- 1) En appliquant la RFH (Relation Fondamentale de l'hydrostatique) entre les points (1) et (3), déterminer la pression P_3 .
- 2) De même, en appliquant la RFH entre les points (3) et (4), déterminer la dénivellation h du mercure.

Enoncé

Du fuel lourd de viscosité dynamique $\mu = 0,11 \text{ Pa.s}$ et de densité $d = 0,932$ circule dans un tuyau de longueur $L = 1650 \text{ m}$ et de diamètre $D = 25 \text{ cm}$ à un débit volumique $q_v = 19,7 \text{ l/s}$.

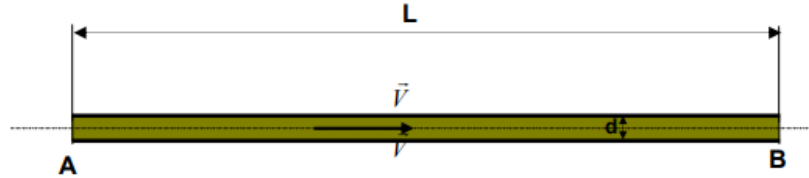
On donne la masse volumique de l'eau $\rho_{\text{eau}} = 1000 \text{ kg/m}^3$.

Travail demandé :

- 1) Déterminer la viscosité cinématique ν du fuel.
- 2) Calculer la vitesse d'écoulement V .
- 3) Calculer le nombre de Reynolds Re .
- 4) En déduire la nature de l'écoulement.
- 5) Déterminer le coefficient λ de pertes de charge linéaire.
- 6) Calculer la perte de charge J_L dans le tuyau.

Enoncé

Un pipe-line de diamètre $d=25$ cm est de longueur L est destiné à acheminer du pétrole brut d'une station A vers une station B avec un débit massique $q_m=18\text{kg/s}$.



Les caractéristiques physiques du pétrole sont les suivantes :

- masse volumique $\rho = 900 \text{ kg/m}^3$,
- viscosité dynamique $\mu = 0,261 \text{ Pa.s}$.

On suppose que le pipe-line est horizontal.

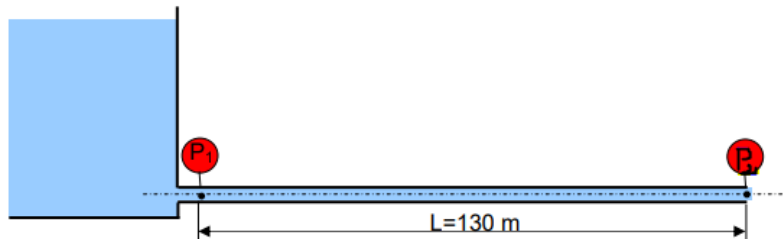
- 1) Calculer le débit volumique q_v du pétrole.
- 2) Déterminer sa vitesse d'écoulement V .
- 3) Calculer le nombre de Reynolds Re .
- 4) Quelle est la nature de l'écoulement ?
- 5) Calculer la valeur du coefficient de perte de charge linéaire λ .
- 6) Exprimer la relation de Bernoulli entre A et B.

Préciser les conditions d'application et simplifier.

- 7) Déterminer la longueur L maximale entre deux stations A et B à partir de laquelle la chute de pression $(P_A - P_B)$ dépasse 3 bar.

Enoncé

Un fluide de masse volumique $\rho = 961 \text{ kg/m}^3$ à une vitesse $V=1,5 \text{ m/s}$ dans une conduite horizontale de diamètre $d = 120 \text{ mm}$ à partir d'un réservoir de très grande section ouvert à l'air libre.

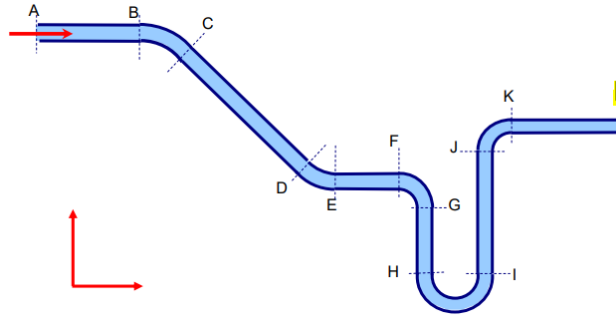


Sur la partie horizontale de ce tube sont installés deux manomètres distants de $L = 130 \text{ m}$. On relève une chute de pression $\Delta P = P_1 - P_2 = 5,1 \text{ bar}$.

- 1) En appliquant le théorème de Bernoulli, déterminer la valeur du coefficient de pertes de charge linéaire λ en fonction de ΔP , ρ , L , d et V .
- 2) On suppose que l'écoulement est laminaire, Calculer le nombre de Reynolds en fonction de λ .
- 3) En déduire la viscosité cinématique du fluide.

Enoncé

De l'huile ayant une viscosité dynamique $\mu = 7,0 \text{ Pa.s}$ et une densité $d=0,896$ est pompée d'un point A vers un point L.



Elle circule dans une canalisation de diamètre $d=100$ mm formée des six tronçons rectilignes suivants :

- AB de longueur 6 m,
- CD de longueur 12 m,
- EF de longueur 5 m,
- GH de longueur 4 m,
- IJ de longueur 7 m,
- KL de longueur 8 m.

La canalisation est équipée :

- de deux coudes à 45° : BC, DE : ayant chacun un coefficient de perte de charge $K_{\text{coude } 45} = 0,2$,
- de deux coudes à 90° : FG et JK : ayant chacun un coefficient de perte de charge $K_{\text{coude } 90} = 0,3$;
- d'un coude à 180° HI : ayant un coefficient de perte de charge $K_{\text{coude } 180} = 0,4$,

La pression d'entrée est $P_A = 3$ bars.

La conduite est supposée horizontale et transporte un débit volumique $q_v = 2,5$ l/s.

- 1) Calculer la vitesse d'écoulement V en m/s.
- 2) Calculer le nombre de Reynolds.
- 3) Il s'agit d'un écoulement laminaire ou turbulent ?
- 4) Déterminer le coefficient de perte de charges linéaire λ .
- 5) Calculer les pertes de charges linéaires $\Delta P_{\text{linéaire}}$.
- 6) Calculer les pertes de charges singulières $\Delta P_{\text{singulière}}$.
- 7) Déterminer la pression de sortie P_L .
- 8) Quelle sera la pression de sortie P_L' si le débit volumique Q_v atteint 5 L/s.