

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة جيلالي بونعاما خميس مليانة
Université Djilali Bounaama de khemis Miliana
كلية علوم الطبيعة و الحياة و علوم الأرض
Faculté des Sciences de la Nature et de la vie et science de la Terre



Polycopié de Cours

Hydraulique

Département : Écologie et environnement

Cycle : 3^{ème} année Licence Aquaculture et Pisciculture



Présenté par :

Dr. HALLOUZ Faiza : *Maitre de Conférences classe A-HDR*

Année Universitaire

2022-2023

	Sommaire	Page
	Avant-propos	06
Chapitre 1 :	Unités des grandeurs physiques et Propriétés des fluides	08
1.1.	Unités des grandeurs physiques : Système d'unités	08
1.2.	Propriétés des fluides.	12
1.2.1.	Définition d'un fluide	12
1.2.2	États des fluides	12
1.2.3	Masse spécifique (masse volumique)	12
1.2.4	Poids spécifique (poids volumique)	13
1.2.5	Densité	14
1.2.6	Viscosité	115
1.2.7	Forces agissant sur un fluide	20
Chapitre 2 :	Hydrostatique et Hydrodynamique	24
2.1.	Hydrostatique	24
2.1.1.	Définition	24
2.1.2.	Différentes pressions	24
2.1.3	Dimension, Unités, ordres de grandeur	24
2.1.4	Équation fondamentale de l'hydrostatique	25

2.1.5.	Appareils de mesure de la pression hydrostatique	29
2.1.6	I.6. Force de pression du liquide sur une surface	31
2.2.	Hydrodynamique	44
2.2.1.	Définition et objectifs	44
2.2.2.	Régimes d'écoulement du liquide	44
2.2.3	Ligne de courant et filet liquide	46
2.2.4	Équation de continuité pour un filet liquide et le courant liquide en mouvement permanent	49
2.2.5.	Équation de Bernoulli pour un liquide parfait (non visqueux)	51
2.2.6	Équation de Bernoulli pour un filet d'un liquide réel (visqueux)	52
2.2.7	Conditions d'application de l'équationnel Bernoulli	53
Chapitre 3.	Aquaculture	54
3.1	Histoire de l'aquaculture	54
3.2	Définition	56
3.3	Normes retenues et pratiques courantes	57
3.4	Éléments constitutifs d'un étang	57
3.5	Disposition des étangs	58
3.6	Dimensions et nombre des étangs	58
3.7	Pêcherie	58

3.8	Moines de vidange	60
Chapitre 4	Ouvrages de prise d'eau	62
4.1.	Définition	62
4.2.	Stations de pompages et réseaux hydraulique	63
4.2.1	Stations de pompage	63
4.2.2	Captage	63
4.2.3	Adduction et traitement	63
4.2.4	Distribution et accumulation	63
4.2.5	Disposition des stations de pompage	63
4.2.6	Exigences principales soumises à la station de pompage	65
4.2.7	Équipements hydrauliques de la station de pompages	65
XII	Equipement à l'entrée de la pompe	65
XIII	Equipement à la sortie de la pompe	68
XIV	Système de drainage et d'assèchement	70
XV	Réservoir Anti-Bélier	70
4.2.8	Dimensionnement de la station de pompages	72
4.3.	Systèmes de distribution des eaux	73
4.3.1	Description de système de distribution	73
4.3.2	Réseau ramifié	73

4.3.3	Réseau maillé	74
	Références bibliographiques	75
	Liste des figures	80
	Liste des tableaux	82
	Séries d'exercices avec corrigés	83

AVANT PROPOS

L'hydraulique est une science qui traite des lois de l'équilibre et du mouvement des liquides et établit des modes d'application de ces lois à la résolution des problèmes pratiques.

Les domaines les plus importants où l'on applique les lois et les différentes méthodes de calcul de l'hydraulique sont : hydrotechnique, bonification hydraulique, alimentation en eau, canalisation, hydro-énergétique et transport sur l'eau.

La notion « hydraulique » s'est formée à la combinaison des mots grecs « hudôr » (eau) et « tuyau » (tube) ce qui auparavant signifiait une science sur le mouvement de l'eau dans les conduites.

A l'heure actuelle, on entend sous le terme hydraulique l'étude de tout liquide (et non seulement de l'eau).

Cet ouvrage, destiné aux étudiants de la 3^{ème} année Licence *Aquaculture et Pisciculture*, vise à apporter les bases nécessaires à la compréhension et au calcul des phénomènes hydrauliques appliqués au génie de l'eau et de l'environnement. Chaque concept en hydraulique est accompagné d'une série d'exemples et d'exercices pour illustrer les concepts présentés. Ces exemples sont tirés d'ouvrages hydrauliques existants dans le réseau. Des techniques de calcul liées à la résolution des équations mises en œuvre sont développées pour plus d'efficacité. Le polycopié se compose de quatre chapitres, décrits comme suit :

Dans le premier chapitre sont présentés les **unités des grandeurs physiques et les propriétés des fluides**

Le chapitre 2 est consacré à la présentation mathématique et à la quantification des phénomènes hydrauliques rencontrés dans l'eau potable, l'assainissement et les cours d'eau, ce chapitre présente :

- L'Hydrostatique
 - L'Équation fondamentale de la statique des fluides
 - La Forces de pression
- L'Hydrodynamique des fluides
 - L'Équation fondamentale du fluide parfait en mouvement
 - L'Équation fondamentale du fluide réel en mouvement.

Le troisième chapitre s'intéresse aux :

- Fermes aquacoles et étangs (Structures et fonctionnement)
- Pêcheurie
- Moines de vidange

Et enfin le quatrième chapitre et le dernier est dédié aux : Ouvrages de prise d'eau.

- Stations de pompages
- Réseaux hydrauliques.

Chapitre 1 : Unités des grandeurs physiques et Propriétés des fluides

1.1. Unités des grandeurs physiques

Plusieurs systèmes d'unités sont utilisés, parmi eux on distingue [1] :

- Système métrique type (FLT), dont les unités fondamentales sont : l'unité de la force (F) en kilogramme force, l'unité de la longueur (L) en mètre et l'unité du temps (T) en secondes.
- Système anglais type (FLT), l'unité de la force en livre (Pound) **lb**, la longueur en pied (foot) **ft** ou en pouce (inch) **in** et le temps en seconde (second) sec.
- Système CGS type MLT, les unités fondamentales : la longueur (le centimètre, cm), la masse (le gramme, g), le temps (second, sec) et la force (g.s/cm²).
- Actuellement, le système international (S.I) type MLT est le plus utilisé.

Les unités de base du système **SI** sont :

- Mètre (m) : longueur ;
- Kilogramme (kg) : masse ;
- Seconde (s) : temps ;
- Ampère (A) : intensité de courant électrique ;
- Degré Kelvin (K) : température ($K=C^{\circ}+273.5$) ;
- Mole (mole) : quantité de substance ;
- Candela (cd) : intensité lumineuse.

Les unités supplémentaires du système **SI** sont :

- Radian (rad) : angle plan ;
- Stéradian (sr) : angle solide.

Les unités dérivées du SI sont établies à l'aide des expressions algébriques entre les grandeurs physiques. Les grandeurs dérivées utilisées fréquemment dans les calculs hydrauliques sont données dans le tableau (1-1) suivant [2] :

Tableau 1-1 : Grandeurs dérivées utilisées fréquemment dans les calculs hydrauliques [2]

Grandeur	Unité		Exprimée par	
	Désignation	Symbole	D'autres unités de SI	Unités de base de SI
Superficie	Mètre carré	m ²		
Volume, capacité	Mètre cube	m ³		
Vitesse	Mètre par seconde	m/s (m.s ⁻¹)		
Accélération	Mètre par seconde carrée	m/s ² (m.s ⁻²)		
Masse volumique	Kilogramme par mètre cube	kg/m ³ (kg.m ⁻³)		
Force, pesanteur, poids	Newton	N		kgm/s ²
Poids spécifique	Newton par mètre cube	N/m ³ (N.m ⁻³)		(kg/(m ² s ²))
Pression, contrainte, module d'élasticité	Pascal	Pa	N/m ²	kg/(ms ²)
Énergie, travail	Joule	J	Nm	
Puissance	Watt	W	J/s	
Viscosité dynamique	Pascal-seconde	Pas	Ns/m ²	

Viscosité cinématique	Mètre carré par seconde	m^2/s ($m^2.s^{-1}$)		
-----------------------	----------------------------	--------------------------	--	--

Les grandeurs physiques sont désignées et munies de symboles conformément aux normes d'État. Pour exprimer les grandes et faibles valeurs des grandeurs physiques, on utilise les multiples et les sous multiples décimaux formes avec préfixes et facteurs indiqués dans le tableau 1.2 ci-dessous :

Tableau 1.2. Multiples et les sous multiples décimaux formes avec préfixes et facteurs [1]

Facteur	Préfixe		Exemple
	Désignation	Symbole	
10^6	méga	M	MN (méganewton)
10^3	kilo	k	kPa (kilopascal)
10^{-1}	déci	d	dm (décimètre)
10^{-2}	centi	c	cm (centimètre)
10^{-3}	milli	m	mm (millimètre)
10^{-6}	micro	μ	μm (micromètre)

Dans le tableau suivant (tableau 1.3.) sont énumérées les unités dont l'utilisation est temporairement autorisée simultanément avec les unités **SI**.

Ces unités sont employées pour les calculs hydrauliques.

Tableau 1.3. Unités employées pour les calculs hydrauliques [3]

Grandeur	Unité		Correspondance avec les unités
	Désignation	Symbole	SI
Force, pesanteur, poids	Kilogramme-force	kgf	1 kgf = 9.81 N \approx 10 N
	tonne-force	tf	1 tf = 9810 N \approx 10 kN
	gramme-force	gf	1 gf = 9.81.10 ⁻³ N \approx 10 mN
Pression, contrainte, module d'élasticité	kilogramme-force par centimètre carré	kgf/cm ²	1 kgf/cm ² = 98 100 Pa \approx 100 kPa \approx 10 ⁻¹ MPa
	Énergie, travail	Kilogramme-force- mètre	kgfm
tonne-force-mètre		tfm	1 tfm = 9810 J \approx 10 kJ
Puissance		cheval-vapeur	cv
Masse	tonne	t	1 t = 1000 kg
Volume	litre	l	1 l = 10 ⁻³ m ³
Débit	litre par seconde	l/s	1 l/s = 10 ⁻³ m ³ /s
Viscosité dynamique	poise	P	1 P = 10 ⁻¹ Pas
Viscosité cinématique	stokes	St	1 St = 10 ⁻⁴ m ² /s

1.2. Propriétés des fluides

1.2.1. Définition d'un fluide

Un fluide peut être considéré comme une substance composée d'un grand nombre de particules matérielles, qui sont très petites et peuvent se déplacer librement les unes par rapport aux autres. C'est un milieu matériel continu, déformable, non rigide et fluide. La cohésion entre les particules élémentaires est très faible, ainsi un fluide est un objet qui n'a pas de forme propre, il prend la forme du récipient qui le contient.

On distingue deux types de fluides [4] :

a. Liquides : La compressibilité est minimale, ce qui explique leur utilisation dans les systèmes hydrauliques à haute pression (fig. 1.1. b).

b. Gaz : mauvais vecteurs énergétiques car très compressibles. La principale différence entre les liquides et les gaz est que les liquides sont en fait incompressibles (fig. 1.1c). A moins que du gaz ne soit présent, le liquide occupe un volume défini et le gaz diffuse à travers l'espace disponible [5].

1.2.2. États des fluides

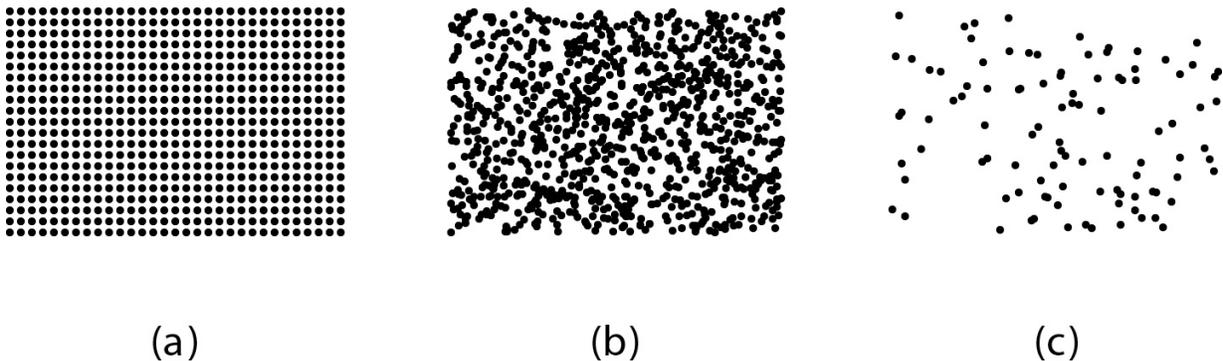


Figure 1.1. Trois états se présentent pour un corps simple : (a) solide : matériau à faible température ; (b) liquide : matériau à faible température et pression élevée ; (c) gazeux : matériau à température suffisamment élevée et pression faible [6].

1.2.3. Masse spécifique (masse volumique)

La masse volumique, aussi appelée densité volumique de masse, est une grandeur physique qui caractérise la masse d'un matériau par unité de volume.

$$\rho = \frac{M}{V} \quad (1.1)$$

Elle a pour dimensions $M.L^{-3}$. En système S.I, l'unité est kg/m^3 [1].

Relation : masse volumique / température.

$$\rho = \rho_0 \frac{P(273+t_0)}{P_0(273+t)} \quad (1.2)$$

Où : ρ_0 et P_0 : La masse volumique initiale et la pression initiale sont des valeurs spéciales.

Quelques masses volumiques connues :

- Eau: $\rho_w = 1000 \text{ kg.m}^{-3}$
- Mercure: $\rho_{Hg} = 13546 \text{ kg.m}^{-3}$
- Air: $\rho_G = 1,2 \text{ kg.m}^{-3}$

La masse volumique des gaz varie avec la pression, alors que celle des liquides peut généralement être considérée comme constante.

1.2.4. Poids spécifique (poids volumique)

Le poids spécifique est le poids par unité de volume d'un matériau. Le symbole du poids spécifique est γ (la lettre grecque Gamma). Le poids spécifique de l'eau à la surface de la Terre à 5°C est de 9807 N/m^3 (Dimensions : $ML^{-2} T^{-2}$). Au contraire de la masse volumique, le poids spécifique n'est pas absolu. Il dépend de l'accélération de la gravité, qui fluctue selon l'emplacement géographique (par exemple l'altitude) [7].

La gravité spécifique est le rapport poids/volume d'un liquide. La gravité spécifique est la force avec laquelle un liquide contenu dans une unité de volume (m^3) est soumis à la gravité. La densité diminue avec l'augmentation de la température et vice versa [8].

$$\omega = \frac{Mg}{V} = \rho g \quad (1.3)$$

*** Quelques valeurs connues du poids spécifique :**

- Eau : $\omega_w = 9814 \text{ N/m}^3$
- Mercure : $\omega_{Hg} = 132943 \text{ N/m}^3$
- Air : $\omega_G = 1,2 \text{ N/m}^3$

1.2.5. Densité "D"

C'est le rapport qui existe entre la masse du volume d'un corps et la masse du même volume d'un corps de référence (eau pour les corps solides et liquides, air pour les corps gazeux), dans les mêmes conditions de température et de pression [9].

$$D = \frac{\rho}{\rho_{ref}} \quad (1.4)$$

Unité : adimensionnelle (sans unité).

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

* Quelques valeurs connues :

- Eau : $D_w = 1$
- Mercure : $D_{Hg} = 13.6$
- Air : $\rho_G = 1.2 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$

Exemple 1

On dispose d'un litre d'essence qui pèse 0,68kg et sachant que l'accélération de la pesanteur est $g = 9,80665 \text{ m/s}^2$, et la masse volumique est $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$, déterminer :

- Sa masse volumique,
- Son poids volumique,
- Sa densité.

Solution

$$\rho = \frac{M}{V} = \frac{0,68}{10^{-3}} = 680 \text{ kg/m}^3$$

$$\omega = \frac{Mg}{V} = \frac{0,68 * 9,810665}{10^{-3}} = 6670,8 \text{ N/m}^3$$

$$D = \frac{\rho}{\rho_w} = \frac{680}{1000} = 0,68$$

1.2.6. Viscosité

La **viscosité** d'un fluide définit l'état d'un fluide dont les molécules sont freinées dans leur déplacement par des interactions ou des associations moléculaires plus ou moins intenses ; elle dépend de la température [10]. Newton a mené une expérience simple en 1687 pour démontrer l'effet de la viscosité du liquide sur le débit.

Nous avons vu que dans un fluide parfait, la contrainte qui s'exerce sur une particule de fluide est toujours perpendiculaire aux parois de celle-ci [11]. Dans un fluide réel en écoulement, la contrainte possède une composante tangentielle dite contrainte visqueuse.

A. FLUIDES NEWTONIENS

1. EXPERIENCE DE COUETTE [12]

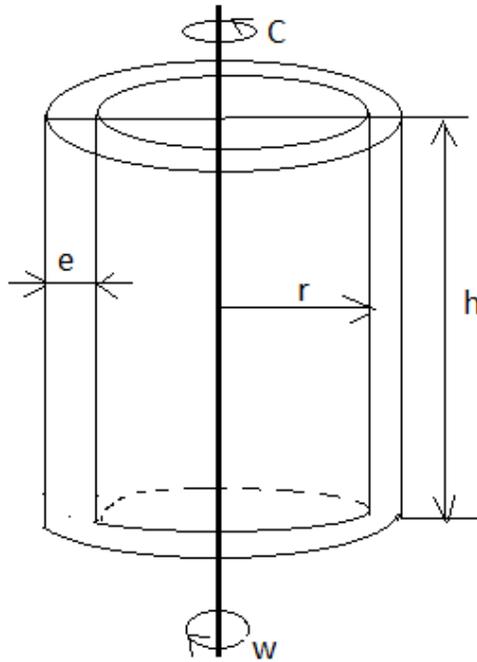


Figure 1.2. Expérience de Couette

Considérons deux cylindres coaxiaux avec un très petit espace (e) entre eux, remplis d'un fluide spécifique. Nous utilisons le moteur pour faire tourner le cylindre extérieur avec une vitesse angulaire w , nous voyons que le cylindre intérieur tourne dans le même sens, nous devons lui appliquer un couple C dans le sens opposé pour le maintenir immobile (Fig. 1.2.).

Cette expérience met en évidence la présence d'une contrainte tangentielle, qui devient plus importante à l'approche d'un cylindre en mouvement.

Soit r_m le rayon moyen des cylindres on a $e \ll r_m$. On peut schématiser l'expérience dans le plan.

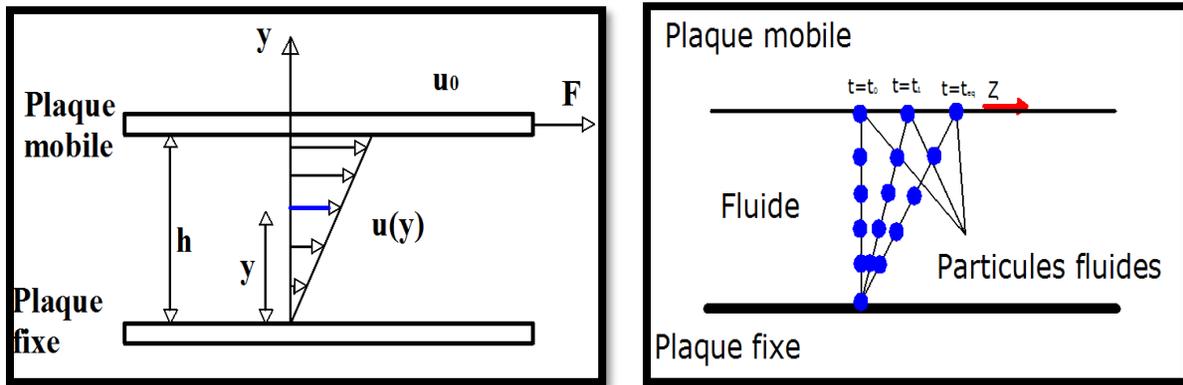


Figure 1.3. Représentation qualitative de la déformation du liquide après chargement de la paroi supérieure [13]

Il y a adhérence du fluide à la paroi

Mise en évidence des forces tangentielles qui cisailent le fluide

- Surface des cylindres en contact avec le fluide (Fig. 1.3.) :
- V vitesse linéaire du cylindre mobile (extérieur)

Le plan immobile est soumis à une force F :

$$F = \mu \frac{SV}{e}$$

F est la force sur le cylindre maintenu immobile

En ramenant à l'unité de surface on a $\tau_0 = \mu \frac{V}{e}$ qui est appelé Contrainte de Cisaillement

ou $\tau_0 = \mu \frac{du}{dy}$ avec $\frac{du}{dy}$ le gradient de vitesse de déformation

μ : viscosité dynamique ou absolue, elle dépend du fluide, dépend fortement de la température et faiblement de la pression.

On peut définir également la viscosité cinématique $\nu = \frac{\mu}{\rho}$ avec ρ la masse volumique du fluide

NB : Pour les fluides au repos, il n'y a pas de déplacements relatifs des molécules, et la viscosité n'interviendra pas. Nous pouvons donc considérer un fluide au repos comme parfait.

Par rapport aux faits expérimentaux, on est conduit à considérer deux types de fluides :

- D'une part **les fluides newtoniens** qui satisfont à la loi de Newton. Ces fluides ont un coefficient de viscosité indépendant du gradient de vitesse. C'est le cas des gaz, des vapeurs, des liquides purs de faible masse molaire,
- D'autre part **les fluides non-newtoniens**. Ce sont les solutions de polymères, les purées, les gels, les boues, le sang, la plupart des peintures, etc ...L'étude de ces fluides relève de la rhéologie : fluides pseudo plastiques, rhéoplastiques, thixotropiques, rhéopectiques.

A. VISCOSITÉ DYNAMIQUE

La viscosité dynamique (notée η [êta]) est une grandeur physique qui caractérise la résistance à l'écoulement laminaire (écoulement plus ou moins dans la même direction) d'un fluide incompressible (eau, huile ou miel par exemple). La viscosité dynamique s'exprime en Pa.s (Pascal seconde) ou en Poiseuille (Pl) [14].

Soit deux couches de liquide en mouvement l'une sur l'autre comme le montre la figure (1.4) [15].

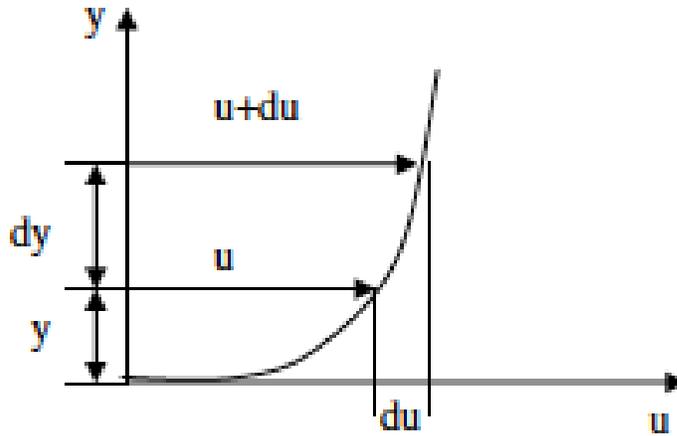


Figure 1.4. Profil des vitesses [15]

La constante de proportionnalité μ est appelée viscosité cinématique.

$$\mu = \frac{\zeta_{xy}}{\frac{du_x}{dy}} = \frac{\frac{\text{Force}}{\text{Surface}}}{\frac{\text{Vitesse}}{\text{Distance}}} = \frac{\text{Force} \cdot \text{temps}}{\text{Surface}} \quad (1.5)$$

unité: $[N \cdot s \cdot m^{-2} = kg \cdot m^{-1} \cdot s^{-1}]$

Remarque : μ est généralement exprimée en Poise (Po) $10 \text{ Po} = 1 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$

* 1 Poiseuille (PI) = $1 \text{ NS/m}^2 = 1 \text{ pa} \cdot \text{s}$

* Eau: $\mu = 1,14 \times 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$

* Mercure: $\mu = 1,552 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$

Exemple 2

Calculer la viscosité cinématique ν en stokes d'un carburant porté à une température $T = 22^\circ\text{C}$ avec une viscosité dynamique $\mu = 88 \cdot 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}$ et sachant que sa densité est $d = 0,88$.

* La masse volumique de l'eau est 1000 kg/m^3

Solution

$$\nu = \frac{\mu}{\rho d} = \frac{88 \cdot 10^{-3}}{10^3 \cdot 0,88} = \frac{10^{-4} \text{ m}^2}{\text{s}} = 1 \text{ stokes}$$

B. VISCOSITÉ CINEMATIQUE

La viscosité cinématique est définie comme étant le rapport entre la viscosité dynamique μ et la masse volumique du fluide ρ [16]

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (1.6)$$

Viscosité dynamique μ

Masse volumique du fluide ρ

Unité : m^2/s ; dimension : $\text{L}^2.\text{T}^{-1}$

Lorsque la température augmente, la viscosité d'un fluide décroît car sa densité diminue.

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'autres termes, cette dernière exprime la « rigidité » d'un fluide à une vitesse de déformation en cisaillement [16].

Exemple 3

Déterminer la viscosité dynamique de l'huile d'olive sachant que sa densité est 960 et sa viscosité cinématique est 1,11 Stokes.

Solution

$$\mu = \rho \cdot \nu = 960 * 1,11 * 10^{-4} = 1,06 \text{Pa.s}$$

* Suivant la viscosité on distingue cinq types de fluide [15] :

- **Fluides idéals** : Ce sont des fluides incompressibles et sans viscosité. C'est un fluide qui n'existe pas dans la nature.
- **Fluides réels** : Tout ce qui est visqueux est un vrai liquide, et cela s'applique à tous les fluides disponibles.
- **Fluides Newtoniens** : Les vrais fluides qui obéissent aux lois de Newton sont appelés fluides newtoniens.
- **Fluides non Newtoniens** : Ce sont de vrais fluides qui n'obéissent pas aux lois de Newton.
- **Fluides plastiques idéals** : Fluide dans lequel la ligne de proportionnalité entre la force tangentielle et le gradient de vitesse ne passe pas par zéro.
- La viscosité n'affecte pas la pression hydrostatique.

i. Fluide parfait

C'est un fluide totalement sans frottements internes. Il s'écoule sans frottement, avec une viscosité nulle [17].

ii. Fluide réel

Contrairement aux fluides parfaits, qui ne sont qu'un modèle pour simplifier les calculs et n'existent pas réellement dans la nature, dans les fluides réels, la force tangentielle de frottement interne s'opposant au glissement relatif des couches fluides est à considérer. Le phénomène de frottement visqueux se produit lors du mouvement des fluides [17].

iii. Fluide compressible

Un fluide est dit compressible si le volume occupé par une certaine masse change avec la pression extérieure. Les gaz sont des fluides compressibles. Les états gazeux de l'air, de l'hydrogène et du méthane sont considérés comme des fluides compressibles [17].

iv. Fluide incompressible

Un liquide est dit incompressible si le volume occupé par une masse donnée ne change pas avec la pression extérieure. Les liquides peuvent être considérés comme des fluides incompressibles (eau, huile, etc.) [17].

1.2.7. Forces agissant sur un fluide

Deux (02) types de forces peuvent agir sur un volume fini de fluide, à savoir :

A) Forces de volumes : **COMPOSEES DES FORCES SUIVANTES :**

- **Forces de pesanteur (Provenant de la gravité) :** les composantes de la force F d'un fluide soumis à la pesanteur s'écrivent [18] :

$$F_x = 0$$

$$F_y = 0$$

$$F_z = -g$$

- **Forces d'accélération pure :**

Elles proviennent de la variation de la vitesse (V) de la masse d'un fluide (M) dans le temps. Prenons par exemple deux réservoirs à la même hauteur, dont l'un est vide et l'autre plein, reliés par une conduite de diamètre constant, horizontale et muni d'une vanne. A l'ouverture de la vanne, il se produit un écoulement. La variation de vitesse crée au sein de l'écoulement une force d'accélération pure [18].

$$F_{\text{accélération pure}} = M \frac{\partial V}{\partial t} \quad (1.7)$$

- **Forces d'accélération convective :**

Elles proviennent de la variation de la vitesse (V_x, V_y, V_z) dans l'espace (repère $[x, y, z]$). Prenons une conduite dont l'écoulement en entrée ne varie pas dans le temps ($\partial V / \partial t = 0$). Cette conduite est à diamètre conique et décroissant. L'écoulement étant permanent, le débit en entrée est identique à celui de la sortie. On peut dire que la vitesse en entrée est inférieure à la vitesse en sortie. Cette variation de vitesse va engendrer une accélération qui va générer une force de convection [18].

$$F_{\text{accélération convection}} = M \left(\frac{\partial V}{\partial X} \cdot V_X + \frac{\partial V}{\partial Y} \cdot V_Y + \frac{\partial V}{\partial Z} \cdot V_Z \right) \quad (1.8)$$

B) FORCES DE SURFACE

Les forces de surface se composent des forces de pression, de frottement et de turbulence.

i. Forces de pression

Elles agissent perpendiculairement à la surface d'un fluide.

$$P = \frac{df}{dx \cdot dy} = \frac{df}{ds} \quad (1.9)$$

En un point P du fluide (Fig. 1.5), la pression est identique quelle que soit l'orientation de la normale à la surface [18] :

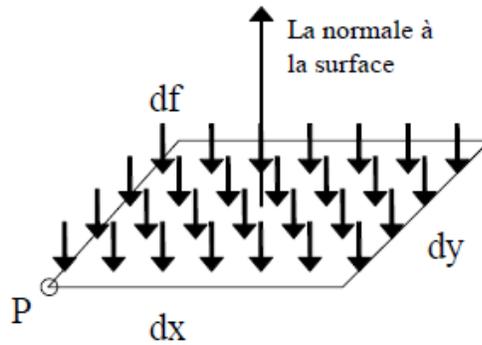


Figure 1.5. : Force de pression sur une paroi [18]

L'unité de la pression est généralement Pa ($\text{N}\cdot\text{m}^{-2}$) ou en bar.

ii. Forces de frottement de viscosité

Nous avons vu précédemment qu'un fluide, dont les particules sont en mouvement relatif, génèrent des forces de frottement dues à la viscosité [18]. Cette force de frottement est donnée par la relation :

$$F = \mu A \frac{\partial U}{\partial y} = \zeta A \quad (1.10)$$

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

μ : la viscosité dynamique du fluide (en $\text{kg}/\text{m}\cdot\text{s}$)

A : surface de contact entre deux couches en (m^2)

$\frac{\partial U}{\partial y}$: Écart de vitesse entre deux couches en (m/s) / Distance entre deux couches en (m)

ζ : contrainte de cisaillement

iii. Forces générées par la turbulence

La turbulence joue un rôle majeur dans l'écoulement des fluides réels. En mouvement turbulent, l'intensité et la direction de la vitesse ponctuelle varient sans aucune régularité. La turbulence n'est pas une propriété intrinsèque du fluide, sauf à travers la viscosité mais dépend de la « mémoire » du fluide [18].

Exemple 4

Si le diamètre du grand piston est $D = 2m$, quelle est la force F_2 sur le grand piston ?

$f = 50 N$ et $d = 20cm$ (Diamètre du petit piston). Le petit piston descend d'une hauteur $h_1 = 1m$

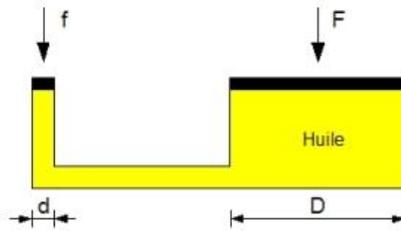


Figure 1.6. Pression dans les fluides [19]

Solution :

$$P_1 = \frac{f}{S_1} = \frac{100}{\pi \times \frac{0,1^2}{4}} = 1592 Pa$$

$$F = P_2 \times S_2 \text{ avec } P_1 = P_2$$

$$\text{Donc } F = 1592 \times \frac{\pi \times (2)^2}{4} = 5001N$$

Chapitre 2 : Hydrostatique et Hydrodynamique

2.1. Hydrostatique

2.1.1. Définition

On appelle hydrostatique une branche de l'hydraulique qui s'occupe de l'équilibre du liquide et son interaction avec les corps solides [3].

Le liquide se trouve en équilibre absolu (par rapport à la terre) ou relatif si ses particules ne se déplacent pas l'une par rapport à l'autre. Dans ce cas, le liquide est soumis à l'action des forces de masse (pesanteur, inertie) et des forces superficielles (pression) [8].

2.1.2 Différentes pressions [4]

Les différentes pressions sont :

- Pression atmosphérique : $1\text{Pa} = 1,033\text{ bar}$.
- Pression du liquide à la profondeur h : $P = \rho \cdot g \cdot h$. (2.1)
- Pression suite à une force mécanique : $P = \frac{F}{S}$. (2.2)
- Pression absolue, pression relative : $P_{absolue} = P_{relative} + P_{atmosphérique}$ (2.3)

Remarque :

- Si $P_{relative} = 0 \Rightarrow P_{absolue} = P_{atm}$
- Si $P_{relative} > 0 \Rightarrow P_{absolue} > P_{atm}$
- Si $P_{relative} < 0 \Rightarrow P_{absolue} < P_{atm}$

$P_{relative}$ ne peut être $\leq -1\text{bar}$ sinon $P_{absolue} \leq 0$

2.1.3. Dimension, Unités, ordres de grandeur [20]

- Dimension : $[P] = M L^{-1} T^{-2}$
- Unité S.I. : le pascal (Pa)

$$1\text{ Pa} = 1\text{ N m}^{-2}$$

- **Unités dérivées**

- Le bar : $1\text{bar} = 10^5 \text{ Pa}$
- Le mbar : $1\text{mbar} = 100\text{Pa} = 1\text{hPa}$
- L'atmosphère : $1 \text{ atm} = 101325 \text{ Pa} = 1,013 \text{ bar}$
- Le Torr / mmHg : $133,32 \text{ Pa}$

- **Ordres de grandeur**

- Vide intersidéral : 10^{-15} Pa ($1-10 \text{ molécules cm}^{-3}$)
- Tube du LHC : 10^{-9} Pa
- Sol lunaire : 10^{-8} Pa
- Dans une ampoule électrique classique : 1 Pa
- Sol martien : 10^4 Pa
- Sol terrestre : 10^5 Pa
- Bouteille de gaz (labo) : 10^7 Pa (100 bar)

2.1.4. Équation fondamentale de l'hydrostatique

Afin de formuler la loi de répartition de la pression hydrostatique par le volume du liquide au repos, découpons dans ce volume de parallélépipède rectangulaire élémentaire avec arêtes l, L et h et examinons son équilibre (fig. 2.1) [20].

Les surfaces des faces du parallélépipède perpendiculaires aux axes de coordonnées sont respectivement égales à :

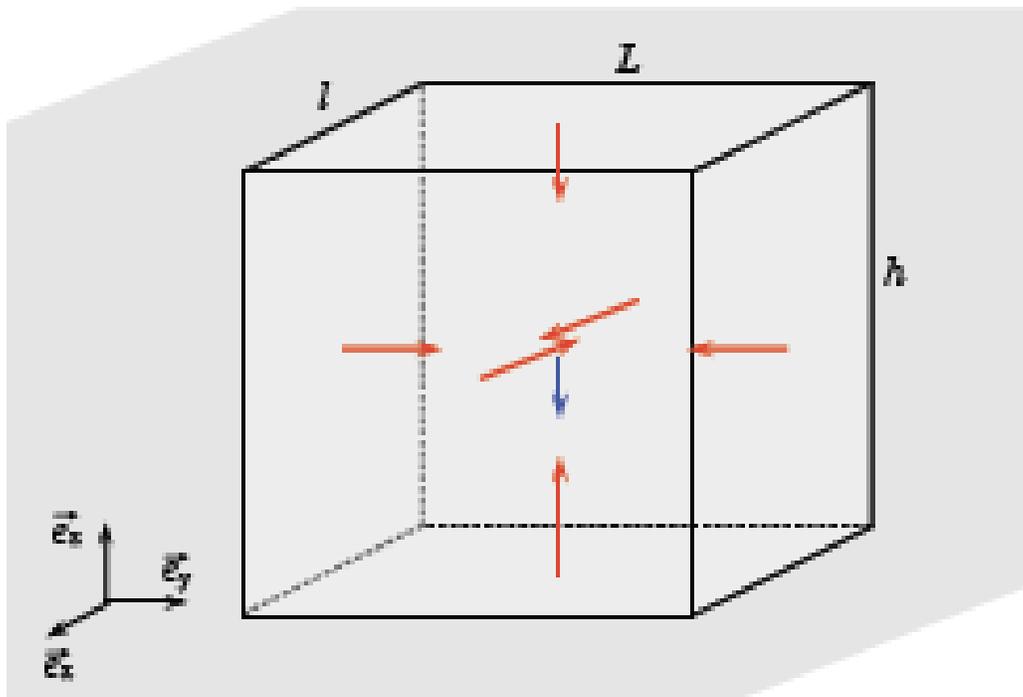


Figure 2.1. : Répartition de la pression hydrostatique par le volume du liquide [20]

Cet élément de volume est stationnaire dans le repère (O, e_x, e_y, e_z) . Selon la première loi de Newton, cela signifie que la force totale sur cet élément de volume est nulle [20].

$$\Sigma \vec{F}_{ext} = \vec{0} \quad (2.4)$$

Quelle est la force agissant sur ce volume ?

a. Forces de pression

- Selon \vec{e}_x : \vec{F}_x et $\vec{F}_{(x+l)}$
- Selon \vec{e}_y : \vec{F}_y et $\vec{F}_{(y+L)}$
- Selon \vec{e}_z : \vec{F}_z et $\vec{F}_{(z+h)}$

b. Forces de volume

- Poids: $\vec{P}_{poids} = m\vec{g} = \rho V\vec{g}$

La condition d'équilibre s'écrit donc :

$$\vec{F}_x + \vec{F}_{(x+l)} + \vec{F}_y + \vec{F}_{(y+L)} + \vec{F}_z + \vec{F}_{(z+h)} + \vec{P}_{poids} = \vec{0} \quad (2.5)$$

En outre, il apparaît que :

1. Les forces de compression horizontales dues à \vec{e}_x et \vec{e}_y se compensent 2 à 2 :

$$\vec{F}_x + \vec{F}_{(x+l)} = \vec{0} \quad (2.6)$$

$$\vec{F}_y + \vec{F}_{(y+l)} = \vec{0} \quad (2.7)$$

2. La force de pression verticale totale due à \vec{e}_z s'oppose au poids du volume considéré.

$$\vec{F}_z + \vec{F}_{(z+h)} + \vec{P}_{poids} = \vec{0} \quad (2.8)$$

Avec :

$$- \vec{F}_z = P(z) l L \vec{e}_z \quad (\text{Vers le haut})$$

$$- \vec{F}_{(z+h)} = -P(z+h) l L \vec{e}_z \quad (\text{Vers le bas})$$

$$- \vec{P}_{poids} = \rho V \vec{g} = -\rho \cdot l \cdot L \cdot h \cdot g \vec{e}_z \quad (\text{Vers le bas})$$

$$\text{Soit : } \mathbf{P(z) = P(z+h) + \rho gh = 0} \quad (2.9)$$

Enfin, l'équation de base de la pression hydrostatique est définie :

$$\mathbf{P(z) = P(z+h) + \rho gh = 0 \quad avec h > 0}$$

On peut aussi reformuler cette formule selon la position des points considérés (fig. 2.2) :

$$P_{(zB)} = P_{(zA)} + \rho g (zA - zB) \quad (2.10)$$

$$\Leftrightarrow P_{(zB)} - P_{(zA)} = -\rho g (zB - zA) \quad (2.11)$$

$$\Leftrightarrow \Delta P = -\rho g \Delta z \quad (2.12)$$

Cette relation indique que le changement de pression pour un fluide incompressible est proportionnel à :

- La densité du fluide,
- La différence de hauteur.

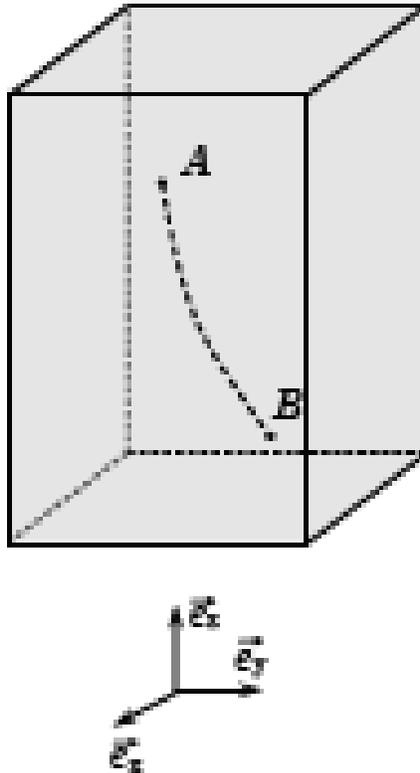


Figure 2.2 : Répartition des pressions [20]

On peut écrire que la quantité $P + \rho gz$ est constante :

$$P(z_A) + \rho gz_A = P(z_B) + \rho gz_B = C_{te} \quad (2.13)$$

Conséquences :

- la surface isobare est horizontale

$$P = C_{te} \Leftrightarrow z = C_{te} \quad (2.14)$$

- la surface libre d'un liquide au repos est horizontale

$$P = P_{atm} \Leftrightarrow z = C_{te} \quad (2.15)$$

• Principe de Pascal

Les changements de pression sur le fluide à l'intérieur du boîtier étanche sont entièrement transmis dans tout le fluide.

$$P(z_A) + \Delta P + \rho g z_A = C_{te} = P(z_B) + \Delta P + \rho g z_B \quad (2.16)$$

2.1.5. Appareils de mesure de la pression hydrostatique

Pour mesurer la pression dans le liquide, on utilise les appareils de construction différentes : à liquide, mécaniques, électriques ou combinés [3].

Deux premiers types d'appareils sont les plus répandus, ils mesurent non la pression absolue, mais ils mesurent la différence de pressions, c'est-à-dire :

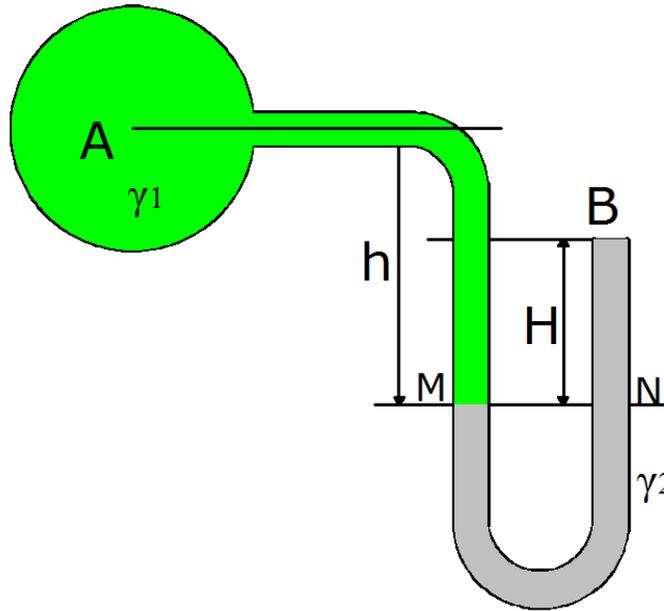


Figure 2.3 : Tube manométrique en U [13]

Sont des appareils différentiels. Ainsi, les manomètres (fig. 2.3) mesurent la différence de pressions absolue et atmosphérique (surpression par rapport à la pression atmosphérique) ; les vacumètres mesurent la différence de pressions atmosphérique et absolue (manque de pression jusqu'à celles atmosphérique) ; les manomètres dits différentiels mesurent la différence de pression entre deux points arbitraires [13].

Appareils à liquide : le piézomètre est un mesureur de pression le plus simple.

Exemple 1

Soit P la pression sur la surface de l'eau dans le récipient ($P > P_{atm}$) (fig. 2.4.). Dans le piézomètre installé au point C à la profondeur $h_c = 0.5 \text{ m}$, l'eau monte à la hauteur $h = 1,5 \text{ m}$. Déterminer la pression hydrostatique absolue dans le récipient au-dessus du liquide.

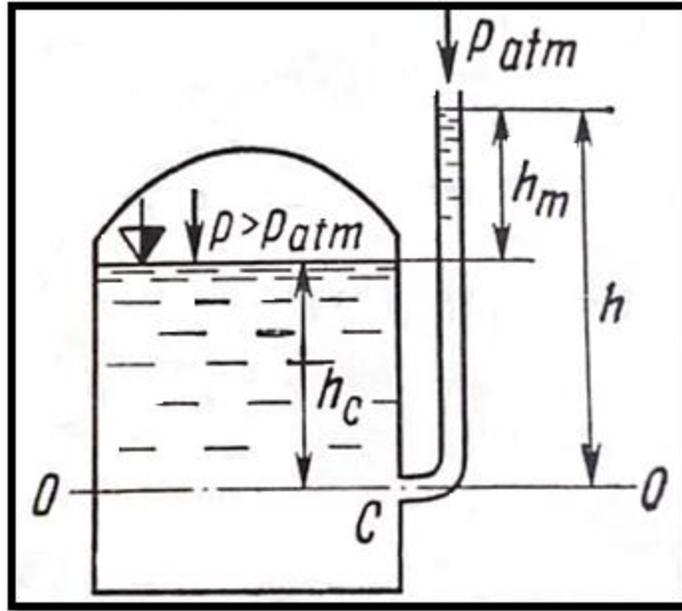


Figure 2.4 : Piézomètre (mesure de la pression) [3]

Solution

$$P_{mC} = \rho g h = 9,81 \cdot 1,5 = 14,7 \text{ kPa}$$

Établissons l'équation de l'équilibre par rapport à un plan horizontal arbitraire, par exemple OO'.

La pression hydrostatique absolue au point C du côté du piézomètre :

$$P_C = P_{atm} + \rho g h$$

Du côté du récipient :

$$P_C = P + \rho g h_c$$

Il en découle :

$$P = P_{atm} + \rho g (h - h_c) \text{ et}$$

$$P - P_{atm} = P_m = \rho g (h - h_c)$$

Donc, la pression manométrique P_m sur la surface libre est déterminée par l'intermédiaire de la hauteur de la colonne de liquide dans le piézomètre au-dessus du niveau dans le récipient h_m .

Sous conditions données, on aura :

$$P_m = 1 \cdot 9,81(1,5 - 0,5) = 9,81 \text{ kPa};$$

$$P = 98,1 + 9,81 = 107,91 \text{ kPa}$$

- Appareils mécaniques : parmi les appareils de ce type, les plus répandus sont les manomètres et vacuomètres à ressort (Fig. 2.5).



Figure 2.5 : Tube manomètre mécanique [21]

2.1.6. Force de pression du liquide sur une surface

A. FORCE DE PRESSION HYDROSTATIQUE SUR UNE SURFACE PLANE HORIZONTALE

Le plan horizontal dans un liquide au repos est une surface à pression égale. Tout point de cette surface (Fig. 2.6) subit la même pression $P = P_0 + \rho gh$ [22].

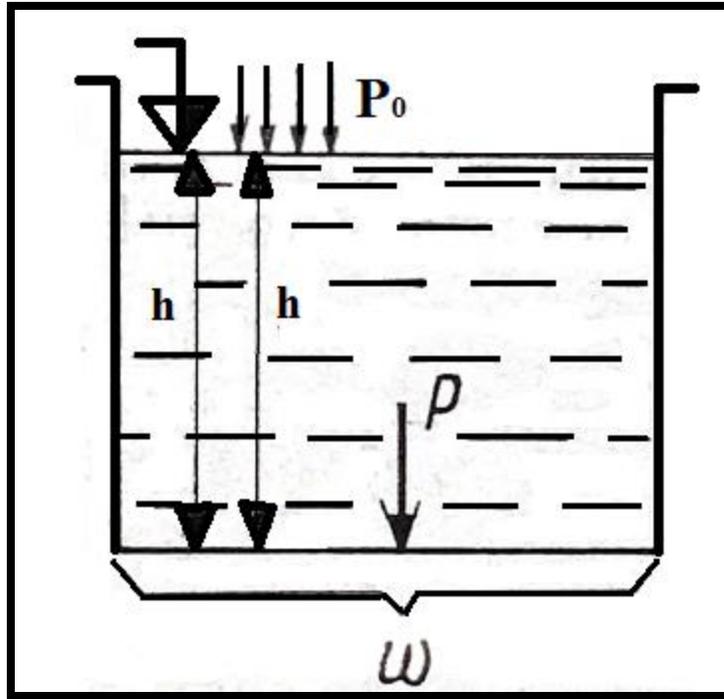


Figure 2.6. : Force de la pression hydrostatique [3]

Dans l'hydraulique, l'intérêt pratique est porté à la force de la pression manométrique du liquide sur la surface.

Si la pression extérieure est égale à celle atmosphérique ($P_0 = P_{atm}$), la formule devient :

$$P = \rho g h \omega \quad (2.17)$$

C'est-à-dire la force de pression sur un palier horizontal correspond au poids de la colonne liquide à hauteur h au-dessus de lui.

Suivant la formule 2.17, la force de pression du liquide sur un fond horizontal d'un vase dépend de $g = \text{const.}$ de la masse volumique ρ , de la hauteur de remplissage h et de l'aire du fond de vase ω , mais ne dépend pas de la forme et du volume du vase. Par conséquent, pour tous les vases de forme différente et d'aire égale du fond, remplis d'un même liquide à hauteur égale (fig. 2.7), la force de pression sur le fond est égale, bien qu'il soit évident que le poids du liquide dans les vases est différent.

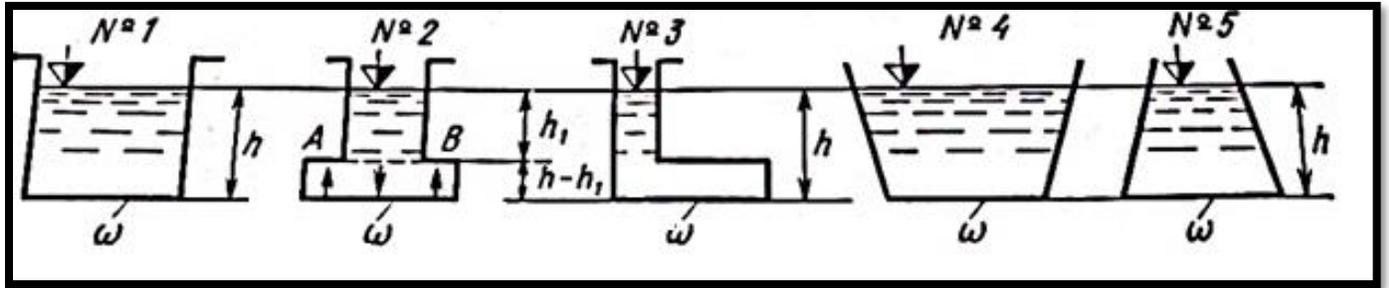


Figure 2.7. : Force de pression du liquide sur un fond horizontal d'un vase [3]

Ceci est le paradoxe dit hydrostatique.

Exemple 2

Déterminer le poids de l'eau dans le vase, la force de pression sur le fond et la partie supérieure AB du vase représenté sur la figure 11 l'aire du fond $\omega = 0,1 \text{ m}^2$, l'aire de section de la partie supérieure $\omega_1 = 0,05 \text{ m}^2$, la hauteur de la colonne d'eau $h = 0,6 \text{ m}$, $h_1 = 0,4 \text{ m}$

Solution 2

La force de pression sur le fond du vase si $\rho g = 9,81 \times 1000 = 9810 \text{ N/m}^3$

$$P = \rho g h \omega = 9810 \times 0,6 \times 0,1 = 588,6 \text{ N}$$

Le poids de l'eau dans le vase est égal à :

$$G = \rho g h_1 \omega_1 + \rho g (h - h_1) \omega = 9810 \times 0,4 \times 0,05 + 9810(0,6 - 0,4)0,1 = 392,4 \text{ N}$$

Donc, la force de pression sur le fond du vase est de 196,2 N plus grande que le poids du liquide y contenu. Mais la pression du liquide agit également sur d'autres surfaces intérieures du vase. Les forces de pression sur les parois verticales se compensent réciproquement. La force de pression sur la partie horizontale AB est dirigée verticalement vers le haut et conformément à la formule 12 est égale à :

$$P_1 = \rho g h_1 (\omega - \omega_1) = 9810 \times 0,4 \times 0,5 = 196,2 \text{ N}$$

Le poids du liquide transmis vers la surface sur laquelle repose le vase est égal à la somme algébrique des forces de pression sur les surfaces horizontales du vase :

$$P - P_1 = 588,6 - 196,2 = 392,4 \text{ N} = G$$

B. FORCE DE PRESSION SUR LES SURFACES PLANES A ORIENTATIONS ARBITRAIRE

Chaque point d'une surface inclinée en contact avec le liquide est soumis à une pression différente en fonction de la profondeur d'immersion. C'est pourquoi pour déterminer la force résultante de pression sur une surface plane inclinée, il est impossible d'appliquer la formule 2.17 [23].

Examinons une certaine paroi plane inclinés par rapport à l'horizon d'un angle α et soumise à la pression du liquide (Fig. 2.8.).

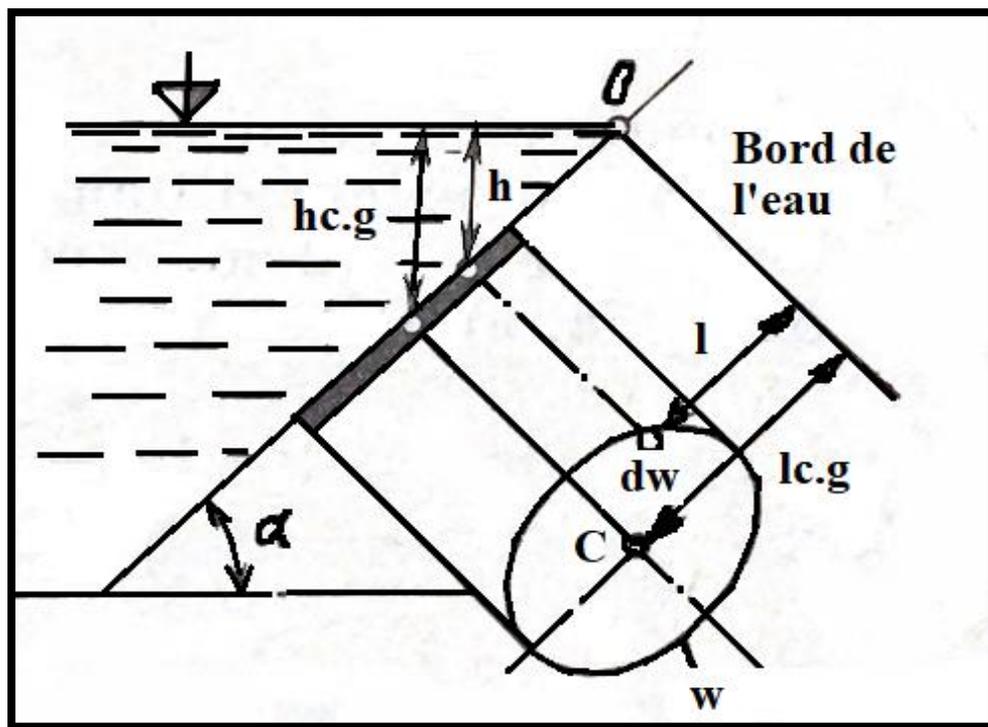


Figure 2.8. : Force de pression sur les surfaces planes à orientations arbitraire [3]

Découpons du palier ω limité par des contours arbitraires un élément suffisamment petit d'aire $d\omega$ dans les limites de laquelle la pression P peut-être considéré constante. Les coordonnées de l'aire $d\omega$ sont h en verticale et l en plan incliné par rapport au bord de l'eau. Alors, la force de pression sur l'élément $d\omega$ dirigée suivant la normale inférieure par rapport à cette dernière est déterminée à l'aide de la formule suivante :

$$dP = Pd\omega = (P_0 + \rho gh)d\omega \quad (2.18)$$

En additionnant les forces élémentaires parallèles de pression sur tous les éléments de la surface, on obtient :

$$P_a = P_0 \omega + \rho g h_{c.g} \omega \quad (2.19)$$

Si la pression extérieure sur la surface libre du liquide P_0 est égale à celle atmosphérique P_{atm} , la force de pression manométrique se détermine comme :

$$P = \rho g h_{c.g} \omega \quad (2.20)$$

Donc, la force de pression sur une surface plane à orientation arbitraire est égale au produit de la surface de la paroi par la pression que subit son centre de gravité, et est dirigée suivant la normale intérieure par rapport au palier d'action.

La surface plane horizontale est un cas particulier d'une surface à orientation arbitraire (à $\alpha = 0^\circ$) et la formule 2.17 est un cas particulier de la relation 2.20 car pour un palier horizontal $h_{c.g} = h$.

Afin de calculer la force de pression P sur une paroi concrète, on doit connaître la position de son centre de gravité qui est fonction de la forme du palier et, ensuite, on met les valeurs faisant partie d'un même système des unités dans la formule 2.20.

Exemple 3

Déterminer la force de pression sur une vanne de vidange de fond pour deux cas :

a- la vanne est rectangulaire (fig. 2.9.a) ;

b- la vanne est triangulaire à sommet en haut (fig. 2.9b)

La largeur de la vanne $b = 1$ m, la profondeur d'immersion de son bord supérieur $a = 0.8$ m et de son bord inférieur $h = 2$ m. angle d'inclinaison de la vanne $\alpha = 60^\circ$ (fig. 2.9).

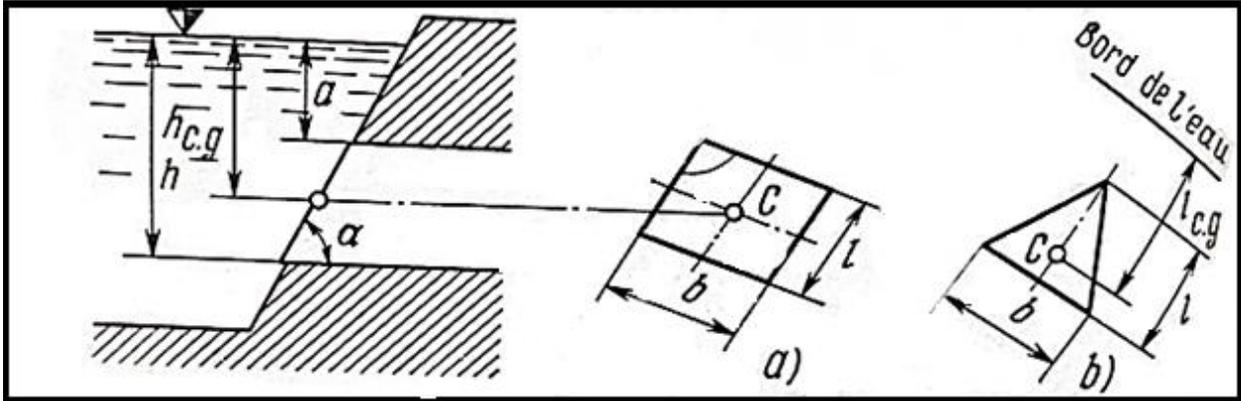


Figure 2.9. : Force de pression sur une vanne de vidange de fond pour deux cas (a et b) [3]

Solution 3

a- Déterminons la hauteur de la vanne l et la surface mouillée ω :

$$l = \frac{h - a}{\sin \alpha} = \frac{2 - 0,8}{0,866} = 1,39 \text{ m.}$$

Le centre de gravité du rectangle se trouve à la moitié de sa hauteur l , donc :

$$h_{c.g.} = a + \frac{l}{2} \sin \alpha$$

D'où :

$$h_{c.g.} = a + \frac{h - a}{2} = 0,8 + \frac{2,0 - 0,8}{2} = 1,4 \text{ m}$$

Alors conformément à la relation 2.20 :

$$P = 9,81 \times 1 \times 1,4 \times 1,39 = 19,03 \text{ kN}$$

b. Déterminons la surface de la vanne triangulaire à la même hauteur $l = 1,39 \text{ m}$:

$$\omega = \frac{1}{2} bl = \frac{1}{2} \times 1 \times 1,39 = 0,695 \text{ m}^2$$

La profondeur d'immersion du centre de gravité :

$$h_{c.g.} = a + \frac{2}{3} l \sin \alpha$$

Où :

$$h_{c.g} = a + \frac{2}{3}(h + a) = 0,8 + \frac{2}{3}(2,0 - 0,8) = 1,6 \text{ m}$$

La force de pression sur la vanne triangulaire :

$$P = 9,81 \times 1 \times 1,6 \times 0,695 = 10,9 \text{ kN}$$

I. CENTRE DE PRESSION

Pour calculer les ouvrages, on doit connaître, outre la direction de la force de pression et la valeur de cette dernière, son point d'application.

On appelle centre de pression le point de croisement de la résultante des forces de pression du liquide avec la surface subissant la pression [3].

Il est évident que sur une surface horizontale plane le centre de pression coïncide avec son centre de gravité. Sur le palier à orientation arbitraire, la position du centre de pression est définie par deux coordonnées. Comme en pratique hydrotechnique, les parties des ouvrages hydrotechniques sur lesquelles agit le liquide sont en général symétriques, une coordonnée du centre de pression est connue : ce centre se dispose sur l'axe de symétrie de la paroi plane. La deuxième coordonnée peut être la distance entre le centre de pression et la surface libre ou la ligne de son croisement (bord de l'eau) avec la paroi plane. Déterminons la coordonnée $l_{c.g}$ [23].

A cet effet, examinons une paroi plane symétrique qui retient le liquide au repos et est inclinée par rapport à l'horizon d'un angle α (fig. 2.10).

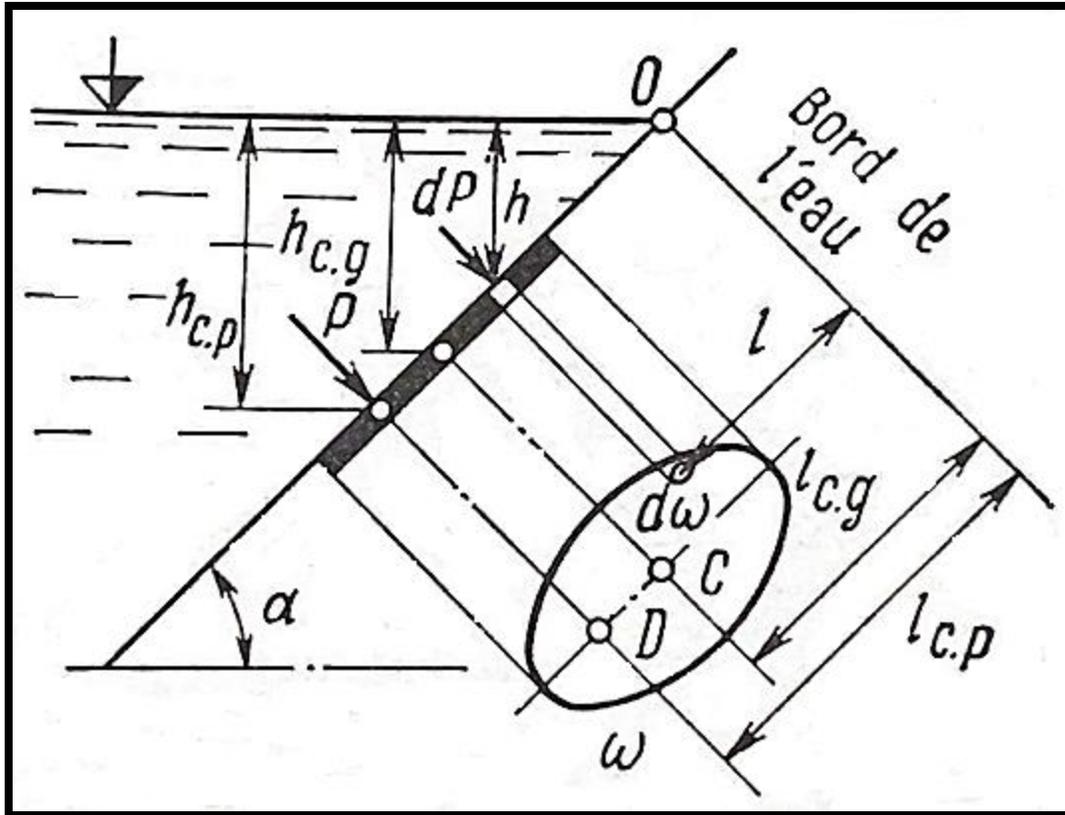


Figure 2.10. Centre de pression [3]

En utilisant le principe de la mécanique théorique sur l'égalité du moment de la résultante à la somme des moments des composantes par rapport au même axe et en prenant le bord de l'eau en axe des moments, on écrit [3] :

$$l_{c.p} = \frac{J_x}{l_{c.g}\omega} \quad (2.21)$$

Où ω est la surface de la paroi ; $l_{c.g}$ est la distance entre le bord de l'eau et le centre de gravité de la paroi mesurée le long du plan incliné ; $l_{c.p}$ idem, mais par rapport au centre de pression ; J_x est le moment d'inertie de la surface de la paroi par rapport au bord de l'eau.

Pour les calculs, il est plus commode de remplacer le moment d'inertie J_x par rapport au bord de l'eau par le moment d'inertie J_0 par rapport à l'axe parallèle à celui-ci qui passe par le centre de gravité de la paroi en utilisant, à cet effet, une équation bien connue dans la mécanique théorique [3].

$$l_{c.p} = l_{c.g} + \frac{J_0}{l_{c.g} \omega} \quad (2.22)$$

Il découle de cette équation que le centre de pression sur une surface plane à orientation arbitraire est toujours au-dessous de son centre de gravité d'une valeur du rapport du moment d'inertie J_0 de la surface par rapport à l'axe central parallèle au bord de l'eau au moment statique $\omega l_{c.g}$ de la même surface par rapport au bord de l'eau [3].

Exemple 4

Déterminez la position du centre de pression sur une vanne plane rectangulaire dont le bord supérieur coïncide avec le bord de l'eau (fig. 2.11). La profondeur de l'eau en amont de la vanne $h = 2 \text{ m}$.

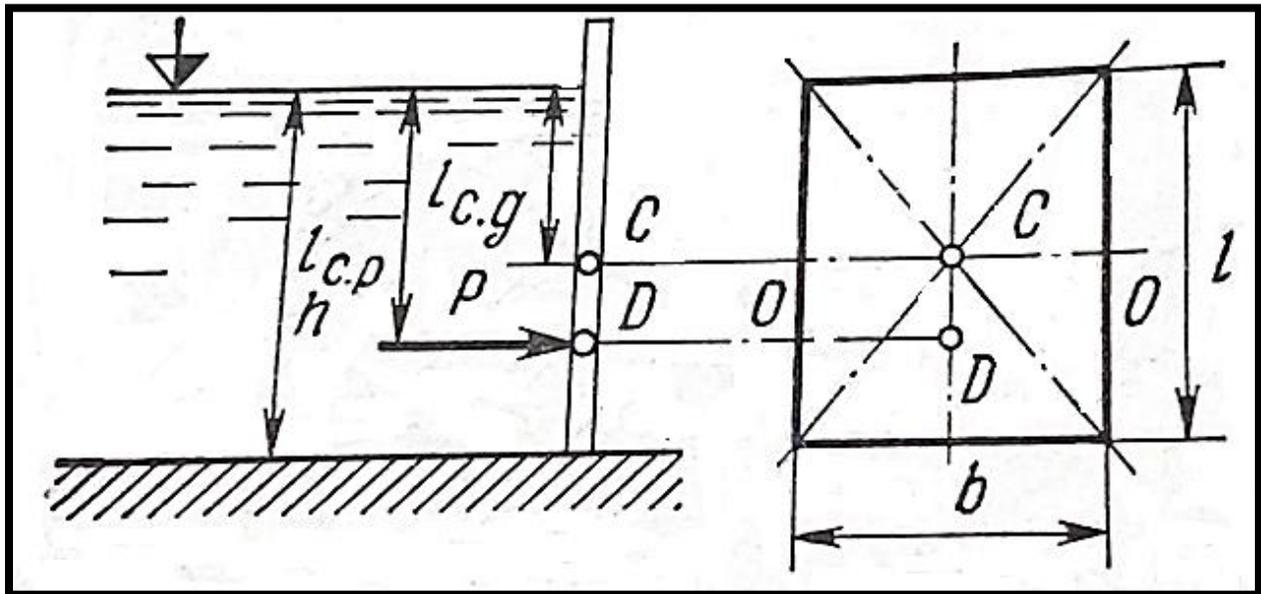


Figure 2.11. Centre de pression sur une vanne plane rectangulaire [3]

Solution 4

Pour un rectangle, on a :

$$\omega = bl = 2 \times 3 = 6 \text{ m}^2$$

$$l_{c.g} = h_{c.g} = \frac{l}{2} = 1,5 \text{ m}$$

$$J_0 = \frac{bl^3}{12} = \frac{2 \times 3^3}{12} = 4,5 \text{ m}^4$$

En utilisant la formule (2.9), on obtient :

$$l_{c.p} = \frac{l}{2} + \frac{bl^3}{12bl \frac{l}{2}} = \frac{2}{3}l = \frac{2}{3} \times 3 = 2 \text{ m}$$

$$l_{c.p} = 1,5 + \frac{4,5}{1,5 \times 6} = 2 \text{ m}$$

Exemple 5

Déterminez la position du centre de pression sur une vanne plane de la vidange de fond (fig. 2.12) pour 2 cas :

- a. Vanne rectangulaire à largeur $b = 2 \text{ m}$;
- b. Vanne triangulaire à sommet en haut, $b = 2 \text{ m}$.

La profondeur d'immersion du bord supérieur de la vanne $a = 1 \text{ m}$, du bord inférieur $h = 4 \text{ m}$.
Angle d'inclinaison de la vanne $\alpha = 60^\circ$.

Solution 5

Hauteur de la vanne :

$$l = \frac{h - a}{\sin \alpha} = \frac{4 - 1}{0,866} = 3,46 \text{ m}.$$

Distance entre le bord de l'eau et le bord supérieur de la vanne suivant l'inclinaison :

$$l_1 = \frac{a}{\sin \alpha} = 1,15 \text{ m}$$

a. Pour le rectangle :

$$\omega = bl = 2 \times 3,46 = 6,92 \text{ m}^2$$

$$J_0 = \frac{bl^3}{12} = \frac{2 \times 3,46^3}{12} = 6,92 \text{ m}^4$$

$$l_{c.g} = l_1 + \frac{l}{2} = 1,15 + \frac{3,46}{2} = 2,88 \text{ m}$$

Alors, suivant (2.22) :

$$l_{c.p} = l_1 + \frac{l(3l_1 + 2l)}{3(2l_1 + l)}$$

$$l_{c.p} = 2,88 + \frac{6,92}{6,92 \times 2,88} = 3,23 \text{ m.}$$

b. pour le triangle :

$$\omega = \frac{bl}{2} = \frac{2 \times 3,46}{2} = 3,46 \text{ m}^2$$

$$J_0 = \frac{bl^3}{36} = \frac{2 \times 3,46^3}{36} = 2,31 \text{ m}^4$$

$$l_{c.g} = l_1 + \frac{2}{3}l = 1,15 + \frac{2}{3}3,46 = 3,46 \text{ m}$$

Alors, suivant (2.22) :

$$l_{c.p} = l_1 + \frac{l(4l_1 + 3l)}{3(3l_1 + 2l)}$$

Où :

$$l_{c.p} = 3,46 + \frac{2,31}{3,465 \times 3,46} = 3,65 \text{ m.}$$

En appliquant les méthodes identiques démontrées dans les exemples, on peut obtenir les formules pour déterminer la coordonnée du centre de pression des surfaces planes de formes différentes.

Tableau 2-1. Moments d'inertie, coordonnées du centre de gravité du palier et du centre de pression des figures planes [3] :

Schéma	Surface de la paroi, ω	Moment d'inertie central de la paroi, J_0	Coordonnée du centre de gravité, $I_{c.g}$	Coordonnée du centre de pression, I_p	Force de pression du liquide sur la paroi, P
	bl	$\frac{bl^3}{12}$	$\frac{l}{2}$	$\frac{2}{3}l$	$g\rho \frac{bl^2}{2}$
	bl	$\frac{bl^3}{12}$	$a + \frac{l}{2}$	$a + \frac{l}{3} \times \frac{3a + 2l}{2a + l}$	$g\rho bl(a + \frac{l}{2})$
	$(B + b) \frac{l}{2}$	$\frac{l^3}{36} (B + b + \frac{2bB}{B + b})$	$\frac{l}{3} \frac{B + 2b}{B + b}$	$\frac{l}{2} \frac{B + 3b}{B + 2b}$	$g\rho \frac{l^2}{6} \times (B + 2b)$
	$(B + b) \frac{l}{2}$	$\frac{l^3}{36} (B + b + \frac{2bB}{B + b})$	$a + \frac{l}{3} \times \frac{B + 2b}{B + b}$	$a + \frac{l}{2} \times \frac{2a(B + 2b) + l(B + b)}{6a(B + b) + 2l(B + b)}$	$g\rho \frac{al}{2} \times (B + b) + g\rho \frac{l^2}{6} \times (B + 2b)$

	$\frac{bl}{2}$	$\frac{bl^3}{36}$	$\frac{l}{3}$	$\frac{l}{2}$	$\frac{g\rho bl^2}{6}$
	$\frac{bl}{2}$	$\frac{bl^3}{36}$	$a + \frac{l}{3}$	$a + \frac{l(2a+1)}{2(3a+1)}$	$\frac{g\rho bl}{3} \times (a + \frac{l}{3})$
	$\frac{bl}{2}$	$\frac{bl^3}{36}$	$\frac{2}{3}l$	$\frac{4}{3}l$	$g\rho \frac{bl^2}{3}$
	$\frac{bl}{2}$	$\frac{bl^3}{36}$	$a + \frac{2}{3}l$	$a + \frac{l(4a+3l)}{2(3a+2l)}$	$\frac{g\rho bl}{2} \times (a + \frac{2}{3}l)$
	b^2	$\frac{b^4}{12}$	$\frac{l}{2} = \frac{\sqrt{2}}{2}b$	$\frac{7\sqrt{2}}{12}b$	$\frac{\sqrt{2}}{2}g\rho b^3$

2.2. Hydrodynamique

2.2.1. Définition et objectifs

La dynamique des fluides consiste à étudier le mouvement des particules fluides soumises à un système de forces. Si les forces dues à la viscosité ne se manifestent pas, il n'y a pas de mouvement relatif entre les particules ; on parle alors de l'hydrodynamique des liquides parfaits [24].

Dans l'hydrodynamique on étudie le liquide qui remplit totalement un espace sans vides ni ruptures. On considère que si une particule de liquide se trouve dans un point quelconque et possède une certaine vitesse et une pression au moment donné, son déplacement à une distance très faible dans un autre point fait varier la vitesse et la pression d'une valeur également très faible. La vitesse et la pression sont considérées comme des fonctions continues des coordonnées et du temps si elles varient dans le temps [25].

La pression intérieure dans le liquide en mouvement est la pression hydrodynamique, désignée par la lettre P [25].

L'objectif principal de l'hydrodynamique est de déterminer la vitesse, la pression hydrodynamique, leurs relations et les résistances en écoulement du liquide.

Parfois, on considère dans l'hydrodynamique que le liquide est privé de viscosité, c'est-à-dire il est parfait et incompressible. Une telle supposition permet de simplifier le processus d'obtention des solutions recherchées qu'on doit corriger ultérieurement en fonction de la viscosité du liquide [3].

2.2.2 Régimes d'écoulement du liquide

II. ÉCOULEMENT NON PERMANENT

Il est caractérisé par le fait que dans chaque point donné de l'espace la vitesse (u) du mouvement et la pression hydrodynamique (P) varient dans le temps

$$u = f_1(x, y, z, t); P = f_2(x, y, z, t) \quad (2.23)$$

Parmi les exemples de l'écoulement non permanent, on peut citer [26] :

- * Vidange des retenues d'eau ;
- * mouvement de l'eau dans une rivière au changement des niveaux (crues, évacuation d'eau variable dans le temps à travers le barrage...).

III. ÉCOULEMENT PERMANENT

C'est celui auquel la vitesse et la pression hydrodynamique ne varient pas dans chaque point donne dans le temps, mais elles peuvent être différentes dans d'autres points, c'est-à-dire u et P ne dépendent que des coordonnées des points examinés [27] :

$$u = \varphi_1(x, y, z); P = \varphi_2(x, y, z) \quad (2.24)$$

L'écoulement permanent se subdivise en écoulement uniforme et non uniforme (variable)

1. l'écoulement uniforme est caractérisé par le fait que les vitesses, la forme et la surface de la section du courant ne varient pas en longueur.
2. l'écoulement non uniforme diffère par la variabilité des vitesses, des profondeurs et des aires des sections du courant en sa longueur.

Parmi les écoulements non uniformes, on doit faire attention à l'écoulement graduellement varié caractérisé par les faits suivants :

- * les lignes de courant ont une faible courbure ;
- * les lignes de courant sont presque parallèles, c'est pourquoi on peut considérer la section d'écoulement presque plane ;
- * les pressions dans le plan de la section d'écoulement sont réparties suivant la loi hydrostatique, c'est-à-dire :

$$Z + \frac{P}{\rho g} \quad (2.25)$$

IV. ÉCOULEMENT EN CHARGE

Il a lieu dans le cas où le courant est limité partout par les surfaces solides, la pression hydrodynamique en chaque point étant différente de celle atmosphérique et peut être supérieure ou inférieure à celle-ci. Dans ce cas le mouvement se fait sous l'action de la pression (charge) due à la pompe ou d'un château d'eau (mouvement dans les conduites d'adduction et d'autres tubes) [28].

V. ÉCOULEMENT A SURFACE LIBRE

Les écoulements dans les canaux naturels (rivière) et artificiels (irrigation, assainissement) sont, dans la plupart des cas, des écoulements à surface libre. La surface libre est l'interface entre l'air et l'eau. La pression y est égale le plus souvent à la pression atmosphérique [24].

VI. LIGNE DE COURANT ET FILET LIQUIDE

Une ligne tangente en chacun de ses points, au vecteur vitesse, à l'instant considéré, est appelée ligne de courant [29].

Il faut faire la distinction entre la ligne de courant et la trajectoire. Cette dernière caractérise la voie parcourue par une particule donnée. La ligne de courant caractérise la direction du mouvement des différentes particules y appartenant à l'instant considéré.

En cas d'écoulement permanent, les lignes de courant coïncident avec les trajectoires des particules du liquide. Si le mouvement est non permanent, elles ne coïncident pas parce que chaque particule du liquide ne se trouve qu'un instant sur la ligne de courant qui elle-même n'existe qu'un instant [30].

2.2.3. Caractéristiques hydrauliques du courant. Débit et vitesse moyenne

En hydraulique, on distingue les caractéristiques suivantes du courant : aire de la section d'écoulement ou liquide, périmètre mouillé, rayon hydraulique.

On appelle section liquide la section transversale du courant normale à toutes les lignes de courant qui la traversent. Ainsi, la section d'écoulement représente un plan en écoulement graduellement varie (bien plus, à celui uniforme). Si le mouvement est non uniforme, cette surface peut être courbe. La pression dans le plan de la section liquide, rappelons-le, varie suivant la loi hydrostatique en écoulement graduellement varie d'un liquide réel (visqueux) [27].

Le périmètre mouillé est une ligne de contact du liquide avec les surfaces du lit dans la section liquide donnée. La longueur de cette ligne est désignée par χ .

Le périmètre mouillé coïncide avec le périmètre géométrique à l'écoulement en charge parce que tous les points de la surface tubulaire de la section liquide sont en contact avec les parois. Dans les lits ouverts, le périmètre mouillé ne coïncide pas avec le périmètre géométrique de la section liquide qui inclut également la longueur de la ligne de contact du liquide avec l'atmosphère [3].

On appelle rayon hydraulique R une caractéristique très importante de la section liquide représentant le rapport de l'aire de la section liquide ω au périmètre mouillé χ :

$$R = \frac{\omega}{\chi} \quad (2.26)$$

Il est évident que le rayon hydraulique est une grandeur linéaire.

En cas d'un écoulement en charge dans un tuyau circulaire, le rayon hydraulique est égal à :

$$R = \frac{\omega}{\chi} = \frac{\frac{\pi d^2}{4}}{\pi d} = \frac{d}{4} \quad (2.27)$$

Exemple 6

Déterminer le rayon hydraulique d'un canal trapézoïdal si la largeur du canal de fond $b = 8m$, la profondeur de l'eau dans le canal $h = 2.5 m$, le coefficient de la pente du talus $m = \cot g\theta = 1.5$, ou θ est l'angle d'inclinaison des talus par rapport à l'horizon (fig. 2.12).

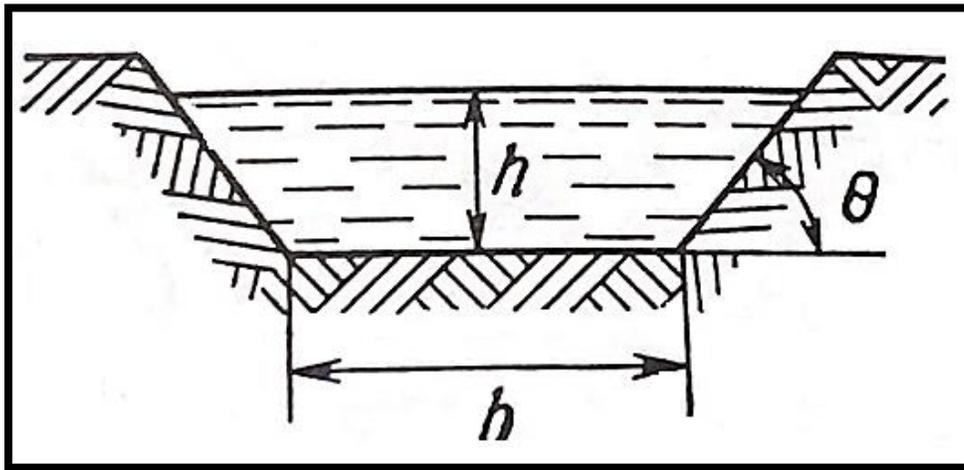


Figure 2.12. Canal trapézoïdal

Solution 6

L'aire de la section liquide trapézoïdale du canal :

$$\omega = (b + mh)h = (8 + 1,5 \times 2,5) \times 2,5 = 29,4 m^2$$

Le périmètre mouillé est calculé comme suit :

$$\chi = b + 2h\sqrt{1 + m^2} = 8 + 2 \times 2,5\sqrt{1 + 1,5^2} = 17,02 m$$

Le rayon hydraulique est donné par :

$$R = \frac{\omega}{\chi} = \frac{29,4}{17,02} = 1,73 \text{ m}$$

Le **débit du liquide** est le volume du liquide passant par unité de temps par la section d'écoulement donnée du courant. En général, le débit du liquide est mesuré en m^3/s , dm^3/s (ou l/s), le débit est désigné par la lettre Q et le débit du filet liquide par dQ [27].

Le **débit du courant** est déterminé par le débit des filets particuliers :

$$Q = \int dQ, \quad (2.28)$$

Alors que la sommation doit être réalisée suivant toute la section d'écoulement. Vu que la vitesse de mouvement u est constante suivant toute l'aire $d\omega$ de la section d'écoulement d'un filet liquide en cas d'écoulement permanent, le débit du filet liquide est égal à [3] :

$$dQ = u d\omega \quad (2.29)$$

Et le débit du courant :

$$Q = \int dQ = \int u d\omega \quad (2.30)$$

La **vitesse moyenne du courant** dans la section donnée est une vitesse fictive imaginaire du courant égale pour tous les points dans la section d'écoulement donnée qui assure un débit par la section d'écoulement, égal à celui réel [27].

En cas d'un écoulement non uniforme, la vitesse moyenne dans les différentes sections d'écoulement est différente suivant la longueur du courant. Elle est constante en longueur du courant dans toutes les sections d'écoulement en écoulement uniforme [31].

La vitesse moyenne est désignée par une lettre v .

Si l'on prend la formule 2.30 et y remplace les vitesses locales u de chaque filet liquide par une vitesse moyenne, on obtient :

$$Q = \omega v \quad (2.31)$$

Exemple 7

Déterminez le débit dans une conduite d'eau si la vitesse moyenne $v = 1.1 \text{ m/s}$ et le diamètre du tuyau $d = 300 \text{ mm}$.

Solution 7

$$Q = \omega v = \frac{\pi d^2}{4} v = 0.785 d^2 v = 0.785 \times 0.3^2 \times 1.1 = 0.0778 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} = 77.8 \text{ l/s}$$

Exemple 8

Déterminez le diamètre de la tuyauterie qui débite 500 m^3 d'eau par 1 h avec une vitesse moyenne de 1.5 m/s .

Solution 8 :

On détermine le débit :

$$Q = \frac{500}{3600} = 0.139 \text{ m}^3/\text{s}$$

De la formule (2.31) :

$$\omega = 0.785 d^2 = \frac{Q}{v}$$

D'où :

$$d = \sqrt{\frac{Q}{0.785 v}} = \sqrt{\frac{0.139}{0.785 \times 1.5}} = 0.345 \text{ m}$$

2.2.4. Équation de continuité pour un filet liquide et le courant liquide en mouvement permanent

En hydraulique, on examine en général les courants sans ruptures ni vides non remplis de liquide, autrement dit, le liquide occupe tout l'espace [26].

Examinons un filet liquide d'un liquide incompressible en écoulement permanent. Découpons les sections 1-1 et 2-2 disposées à la distance ds l'une de l'autre (fig. 2.13). Ici : $\Delta\omega_1$ et $\Delta\omega_2$ sont respectivement les aires des sections liquides ; u_1 et u_2 sont les vitesses ; dQ_1 et dQ_2 sont les

débites du filet liquide dans les sections. Il est évident que $dQ_1 = \Delta\omega_1 u_1$ et $dQ_2 = \Delta\omega_2 u_2$, alors que dQ_1 entre dans le compartiment examiné et dQ_2 en ressort [3].

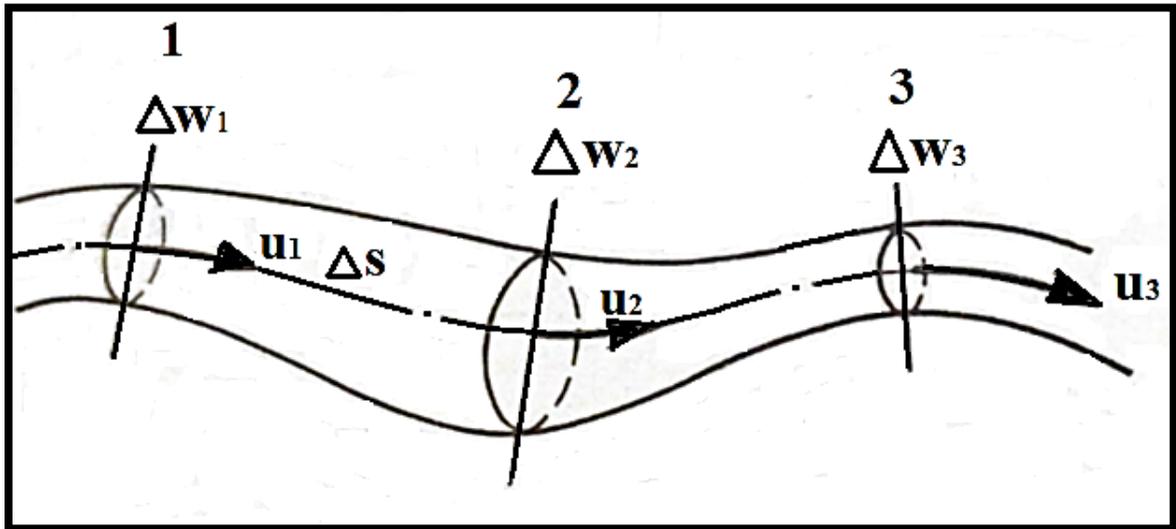


Figure 2.13. Filet liquide d'un liquide incompressible

En tenant compte de ce que la forme d'un filet liquide ne change pas dans le temps, l'arrivée et le départ transversaux sont impossibles puisque les vitesses sur la surface latérale du filet sont tangentiels aux lignes de courant formant cette surface latérale, on obtient que les débits dQ_1 et dQ_2 sont égaux, i.e. :

$$\Delta\omega_1 u_1 = \Delta\omega_2 u_2 \quad (42)$$

Les rapports identiques peuvent être écrits pour toutes deux sections du filet liquide disposées le long de ce dernier :

$$\Delta\omega_1 u_1 = \Delta\omega_2 u_2 = \dots = u d\omega = dQ = \text{Const.} \quad (43)$$

Ceci est l'équation de continuité d'un filet liquide d'un liquide incompressible en mouvement permanent.

On obtient alors l'équation de continuité pour le courant liquide en mouvement permanent

$$Q_1 = Q_2 = Q = \text{Const.} \quad (44)$$

$$v_1 \omega_1 = v_2 \omega_2 = \dots = v \omega = Q = \text{const.} \quad (45)$$

De cette équation, on peut dire que les vitesses moyennes sont inversement proportionnelles aux aires de sections d'écoulement auxquelles correspondent ces vitesses moyennes [3].

$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{\omega_1}{\omega_2} \quad (46)$$

L'équation de continuité (46) est une des équations de base de l'hydrodynamique.

Exemple 9

Dans un tuyau divergent existe un écoulement en charge du liquide, la vitesse moyenne dans la première et dans la deuxième section sont respectivement égales à 1.6 et 0.9 m/s ; le diamètre du tube dans la première section $d_1 = 0.5m$. Déterminez le diamètre du tuyau dans la deuxième section.

Solution 9

En appliquant l'équation, on a :

$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{\omega_1}{\omega_2}$$

On obtient :

$$d_2 = \sqrt{\frac{v_1 d_1^2}{v_2}} = \sqrt{\frac{1.6 \times 0.5^2}{0.9}} \approx 0.67 \text{ m.}$$

2.2.5. Équation de Bernoulli pour un liquide parfait (non visqueux)

Examinons un filet liquide de fluidité parfaite en écoulement permanent. Découpons un compartiment de ce filet (fig. 2.14) en sections 1 – 1 et 2 – 2. Les hauteurs des centres de gravité des sections de filet par rapport à un plan de comparaison 00 dispose d'une façon arbitraire sont caractérisées par des ordonnées Z_1 et Z_2 [27].

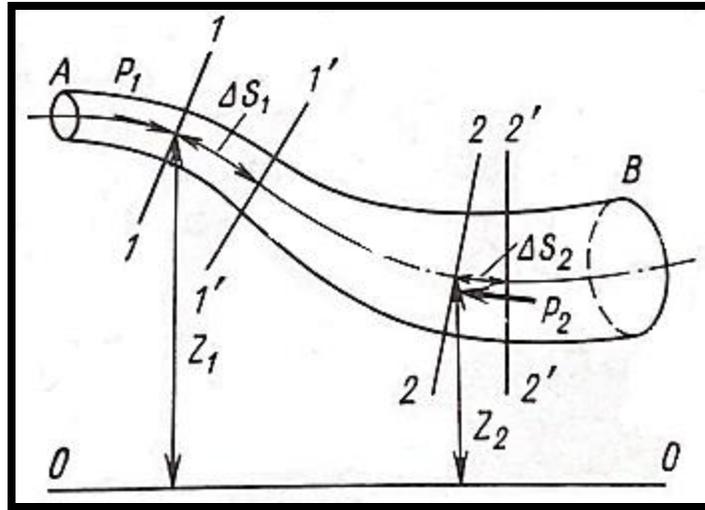


Figure 2.14. Filet liquide de fluidité parfaite en écoulement permanent [3]

Les pressions sont respectivement p_1 et p_2 dans les centres des sections et les vitesses u_1 et u_2 .

Soit le compartiment n'est soumis qu'aux forces de gravitation et de la pression hydrodynamique (les forces du frottement intérieur sont absentes parce le liquide n'est pas visqueux).

En un court laps de temps dt , les particules du liquide se déplacent de $1 - 1$ à $1' - 1'$ a la distance de $ds_1 = u_1 dt$ et les particules de $2 - 2$ à $2' - 2'$ a la distance $ds_2 = u_2 dt$

Enfin l'équation de Bernoulli pour un filet d'un liquide non visqueux en mouvement permanent sous l'action des seules forces de gravite est comme suit :

$$gz_1 + \frac{p_1}{\rho} + \frac{u_1^2}{2} = gz_2 + \frac{p_2}{\rho} + \frac{u_2^2}{2} \quad (47)$$

2.2.6. Équation de Bernoulli pour un filet d'un liquide réel (visqueux)

Examinons un filet du liquide réel en écoulement permanent. La réserve totale de l'énergie mécanique spécifique ne peut pas rester constante en mouvement d'un filet du liquide réel, comme c'était le cas d'un liquide parfait. En cas du mouvement du liquide réel, par suite de sa viscosité, apparaissent les résistances à son mouvement qui sont vaincues aux dépens d'une perte partielle de l'énergie mécanique [23].

La forme définitive de l'équation de Bernoulli pour un filet du liquide est la suivante ;

$$z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{u_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{u_2^2}{2g} + h_{p.e.} \quad (48)$$

Où, h_{pe} représente les pertes de charge.

2.2.7. Conditions d'application de l'équationnel Bernoulli

L'équation de Bernoulli est souvent utilisée dans les différentes branches de l'hydraulique, elle est la base des formules de calcul et permet de résoudre des problèmes pratiques importants. A l'aide de l'équation de Bernoulli, on peut établir les formules pour les vitesses et le débit du liquide qui se déverse à travers les orifices et ajutages, pour le débit du réservoir, pour le calcul de la conjugaison entre la nappe d'eau et le courant aval des ouvrages hydrotechnique (i.e., dans la zone en aval de l'ouvrage) et pour d'autres cas [3].

Mais il faut réunir certaines conditions pour pouvoir appliquer l'équation de Bernoulli en pratique.

L'équation de Bernoulli pour un courant liquide réel (visqueux) a été établie pour les conditions d'un écoulement permanent et elle ne peut être appliquée que pour des sections où existent tous les indices de cet écoulement [31].

Le fait que les pressions en cas d'un écoulement graduellement varie se répartissent suivant la loi hydrostatique, permet de choisir pour l'équation de Bernoulli les points permettant d'inscrire les hauteurs de position z et les pressions p en tout endroit des sections désignées, c'est-à-dire au fond, à la surface libre, au centre de la section d'écoulement, sur l'axe du tube, etc. les points choisis peuvent ne pas appartenir à la même ligne de courant.

Pourtant, il est plus commode de choisir ces points soit sur la surface libre (dans ce cas, le plus souvent on a $p_1 = p_2 = p_{atm}$), soit au centre de gravité des sections d'écoulement. Ceci permet de réduire un peu le nombre de calcul [3].

Chapitre 3. Aquaculture

3.1. Histoire de l'aquaculture

L'aquaculture consiste à élever des organismes aquatiques. En Méditerranée, les Romains ont commencé à cultiver des huîtres et des poissons dans les lagons vers 500 avant JC, tandis que la Chine a développé empiriquement l'aquaculture en eau douce il y a déjà 1 000 ans. Dès le Moyen Âge, l'élevage de la carpe en étang conduit à la domestication complète de l'espèce, et la mytiliculture débute, avec peu de changement dans les techniques d'élevage jusqu'au XXe siècle. Les plus anciennes traces de pisciculture ont été trouvées en Chine avant 1000 avant JC. Pendant la dynastie Zhou (1112-221 av. J.-C.), l'homme d'État de l'époque, Fan Li, vers 500 av. J.-C., fut le premier à décrire l'élevage de la carpe, symbole de chance et de richesse, utilisée comme nourriture. Pendant la dynastie Tang, vers 618 après JC, l'empereur Li, nommé "Carpe", interdit l'extraction du poisson du même nom [32].

Les éleveurs se sont alors tournés vers d'autres poissons similaires de la famille des *Cyprinidae* et ont développé la première forme de polyculture. Le fumier de bétail est également utilisé dans les étangs pour stimuler la croissance des algues et les enrichir en nutriments.

Puis les fonds des étangs sont drainés à leur tour et utilisés comme fertilisant. Les premiers systèmes intégrés d'agriculture - aquaculture ainsi voient le jour et se pratiquent encore dans la Chine d'aujourd'hui.

En Europe, les exigences de l'aquaculture remontent à la Rome antique. Les Romains, qui aimaient les poissons de mer et les huîtres, ont établi des fermes ostréicoles et acquis des viviers assyriens. Les viviers assyriens étaient une sorte de « bassin » dans lequel les poissons et crustacés pêchés dans le lagon étaient maintenus en vie jusqu'à leur consommation. Ces réservoirs sont construits dans les maisons les plus riches où les clients peuvent choisir le poisson qu'ils veulent manger. Au Moyen Âge, le développement des viviers d'eau douce dans toute l'Europe féodale était laissé aux moines et aux aristocrates qui avaient le monopole des terres, des forêts et des cours d'eau. La mytiliculture (culture de moules) est inventée au 13^e siècle et la technique évolue peu jusqu'aux années 1960. Comme la chasse, le braconnage est sévèrement puni et les pauvres doivent attendre des siècles pour assiette du poisson frais. Depuis la Renaissance, l'élevage des poissons d'eau douce s'est perfectionné [32].

Plusieurs mémoires détaillent la construction de l'étang, sa gestion, la sélection des espèces d'élevage, leurs maladies et leurs techniques d'alimentation. Il règne sur l'étang et se reproduit à l'initiative de l'Empereur Charles IV.

La reproduction artificielle est découverte en Allemagne à l'époque des Lumières, mais il faudra attendre le 19^e siècle et l'industrialisation pour qu'on y prête attention. En cent ans, l'industrie change le paysage européen. La pollution réduit les populations de poissons et empêche des espèces telles que le saumon de trouver des voies de migration bloquées par des barrages et des canaux d'irrigation. Pour compenser ce déclin dramatique, la recherche sur l'élevage en captivité s'est concentrée sur l'élevage de la truite, maîtrisant avec succès toutes les étapes de la fécondation, du stockage et du transport des œufs, de l'élevage en étang ou de la libération. Des aires de reproduction sont apparues dans tout l'Ouest et, dans les années 1860, la truite et d'autres salmonidés s'étaient établis dans les voies navigables de la Terre. Elle couvrait les États-Unis, l'Inde, la Nouvelle-Zélande et même le Japon, grand producteur d'algues comestibles.

Au cours des 50 premières années du XX^e siècle, d'autres espèces de poissons ont été introduites et élevées dans les colonies anglo-belges d'Afrique pour la pêche récréative, la lutte contre le paludisme par les espèces insectivores et comme source de nourriture pour le tilapia.

A la fin des années 1950, l'invention des aliments artificiels granulés a révolutionné la pisciculture. Jusqu'alors, nous dépendions des produits de l'agriculture et de l'élevage (viande crue, etc.) pour nourrir nos poissons.

Dans les années 1970, l'aquaculture marine a connu un renouveau grâce à des matériaux de construction plus légers, plus solides et moins chers (fibre de verre, tuyaux en plastique) et des cages flottantes qui ont remplacé les coûteux réservoirs en verre et en fer forgé de la rizière. Cependant, de nouvelles installations se sont avérées économiquement non viables, et l'optimisation et la stabilisation de la production de poissons marins sont devenues l'objectif de la décennie suivante. L'aube du 21^e siècle marque l'importance croissante de l'aquaculture à l'échelle mondiale [32].

Selon le rapport sur la pêche et l'aquaculture de l'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO) en 2016, « en volume, la production mondiale combinée de poissons d'élevage et de plantes aquatiques cultivées a dépassé celle des pêches de capture en 2013 ».

Tableau 3-1 L'historique de l'aquaculture [33].

- 2000 avant J.C.	pisciculture rudimentaire	Carpe en Chine Tilapia en Egypte
- 600	parcage d'huîtres	Grèce
XVème	valliculture : maintien en enceinte close des poissons capturés lors de leur remontée vers les eaux saumâtres.	Italie
XVIIIème	découverte de la fécondation artificielle application aux salmonidés	
XIXème	transplantation appliquée aux salmonidés développement de l'ostréiculture	Europe
1950	élevage de l'anguille	Japon
1960	explosion de la production de la truite « Arc en Ciel »	Europe Amérique du Nord
1970	ranching ou pacage marin avec l'aquaculture de la Sériole, du Poisson-chat et des Pectinidés	
1980	"nouvelle aquaculture" avec la production des Saumons, des Crevettes, du Bar, de la Daurade	
1990	émergence du Turbot, des Esturgeons, et d'espèces tropicales comme le Mérou, le Loup tropical ou l'Ombrine	

3.2. Définition

Le terme **aquaculture** (ou aquiculture, en usage au début du XXème siècle et préconisé par l'Académie française) est défini comme " l'Art de multiplier et d'élever les animaux aquatiques" [34].

a. **Amanieu (1974)** : Le terme aquaculture désigne toutes les activités humaines relatives aux problèmes d'élevage d'animaux et, plus rarement, de culture de végétaux aquatiques.

b. **Barnabé (1989)** : Ce terme recouvre toutes les activités ayant pour objet la production, la transformation (conditionnement) et la commercialisation d'espèces aquatiques, qu'il s'agit de plante ou d'animaux d'eau douce, saumâtre ou salée sous des conditions contrôlées ou semi-contrôlées par l'homme.

L'aquaculture est la science de l'élevage, la reproduction et l'amélioration des organismes aquatiques d'importance économique.

L'aquaculture constitue une alternative qui pourrait permettre de résorber progressivement ce déficit et d'améliorer l'offre nationale en produits piscicoles.

3.3. Normes retenues et pratiques courantes

Les conditions de base suivantes sont à vérifier pour la création d'étangs d'aquaculture. Il s'agit de [35] :

1. La disponibilité de l'eau : l'eau doit être disponible de façon permanente pendant la période de production allant de la production des alevins à la récolte des poissons (6 à 10 mois). Les sources d'eau généralement utilisés sont les barrages, les lacs, les mares, les fleuves et rivières, etc. ;
2. La possibilité d'alimenter les étangs de façon gravitaire : les étangs doivent être placés de sorte à être alimentés en eau gravitaire à partir de la source d'eau. Le pompage rendrait les coûts de production trop élevés ;
3. Disponibilité des terres de qualité : pour des raisons économiques et de fonctionnalité, les bassins ne sont pas toujours revêtus. Il est nécessaire de s'assurer que les sols du site sont peu perméables pour limiter les pertes d'eau par infiltration ;
4. La disponibilité des aliments : il est nécessaire de s'assurer de la possibilité d'approvisionner régulièrement la station en aliments (site accessible, proximité de centres de production ou de vente des aliments) ou prévoir l'installation d'une unité de production d'aliments dans le projet ;
5. La proximité d'un exutoire : pour l'évacuation des eaux provenant de la vidange des étangs, il est nécessaire de pouvoir disposer à proximité du site d'un exutoire (cours d'eau, rigole, dépression, etc.).

3.4. Éléments constitutifs d'un étang

Il existe de nombreux types d'étangs piscicoles, les principaux éléments et ouvrages associés à chacun d'eux sont [35] :

- Les digues, qui retiennent l'eau dans l'étang ;
- Les canaux, qui amènent et évacuent l'eau de l'étang ;
- Les dispositifs de régulation, qui contrôlent le niveau de l'eau ou son débit à travers l'étang, ou bien les deux ;
- Les chemins et voies de desserte, qui longent l'étang et permettent d'y accéder.

3.5. Disposition des étangs

La disposition des étangs en parallèle offre plus d'avantages dans la gestion par rapport à la disposition en série. En effet, dans ce dernier cas, l'alimentation et la vidange des étangs nécessitent de longs temps de manœuvre en plus cette disposition favorise la propagation des maladies [35].

3.6. Dimensions et nombre des étangs

Les dimensions et le nombre de bassins sont fonction des besoins de production. Il est généralement admis des étangs de forme rectangulaire de 20 m x 25 m soit 500 m² par étang [35].

Une station de taille moyenne à vocation de production d'alevins et de grossissement de poissons pourra comporter 4 étangs de 20 m x 25 m soit une surface utile de 0,20 ha. En tenant compte des zones de servitude (canaux d'alimentation et de drainage, pistes de circulation, autres ouvrages d'exploitation), il est nécessaire de disposer d'environ 0,50 ha [35].

La profondeur des étangs varie de 0,50 - 1,0 m à l'entrée à 1,00 – 1,50 m à la sortie du bassin. Il est appliqué une pente régulière au fond de l'entrée à la sortie pour permettre la vidange complète en cas de nécessité [35].

3.7. Pêche

Selon la définition de l'IFREMER (Institut Français de Recherche pour l'Exploitation de la Mer) : La pêche est une entité de gestion d'une capacité de pêche circonscrite à une zone géographique donnée, où opèrent différents métiers qui capturent des espèces occupant des habitats de caractéristiques semblables [36].



Photo 3-1 : Une pêcherie avec son carrelet sur la côte atlantique [37]

L'utilisation de pêcheries est une activité très ancienne ; il existe des traces de nombreuses pêcheries qui datent de l'époque préhistorique [38].

Les définitions suivantes se réfèrent spécifiquement à la pêche pour la consommation humaine et à d'autres formes de dynamisme intéressant. Ils n'ont rien à voir avec le développement uniquement à des fins de protection [39] :

3.7.1. Pêche continentale

C'est l'activité de pêcher des poissons et d'autres espèces aquatiques dans les eaux intérieures [39].

3.7.2. Pêche par capture :

Il s'agit de ramassage d'espèces aquatiques dans des eaux continentales à l'état naturel ou aménagées [39].

3.7.3. Pêche fondée sur l'élevage

Cette pêche se fait avec du matériel en provenance d'installations aquacoles pour capturer les poissons mais sa durabilité dépend de l'empoissonnement [39].

3.7.4. Pêcheries gérées (Aussi pêcheries fondées sur l'élevage)

Activités visant à introduire ou à maintenir la présence d'un ou plusieurs organismes aquatiques pour augmenter, par des processus naturels, la production totale d'une pêcherie donnée ou la production de certains composants au-dessus des niveaux durables [39].

3.7.5. Pêche récréative

La pêche privée est principalement sportive, bien que parfois la pêche accessoire pour la consommation privée [39].

3.7.6. Pêche sauvage

Elle est basée sur la production naturelle et la reproduction. [39].

3.8. Moines de vidange

Il s'agit d'un ouvrage de drainage qui permet l'évacuation des eaux et l'assèchement progressif du bassin. Il a été inventé par des moines cisterciens au Moyen Âge et est aujourd'hui le système de drainage le plus répandu. Les moines sont spécifiquement autorisés à régler les procédures d'évacuation [40].

Le moine permet de puiser l'eau en profondeur et de contrôler le débit d'évacuation grâce au retrait continu des panneaux mobiles (Fig. 3.1). L'eau pénètre dans la partie inférieure du moine puis s'écoule, suivant le principe des vases communicants, dans l'espace entre la paroi avant et la cloison (plaque), puis il tombe en cascade à l'arrière, puis se retire [40].

Le moine peut être posé dans l'étang (cas le plus fréquent), derrière ou dans la digue.

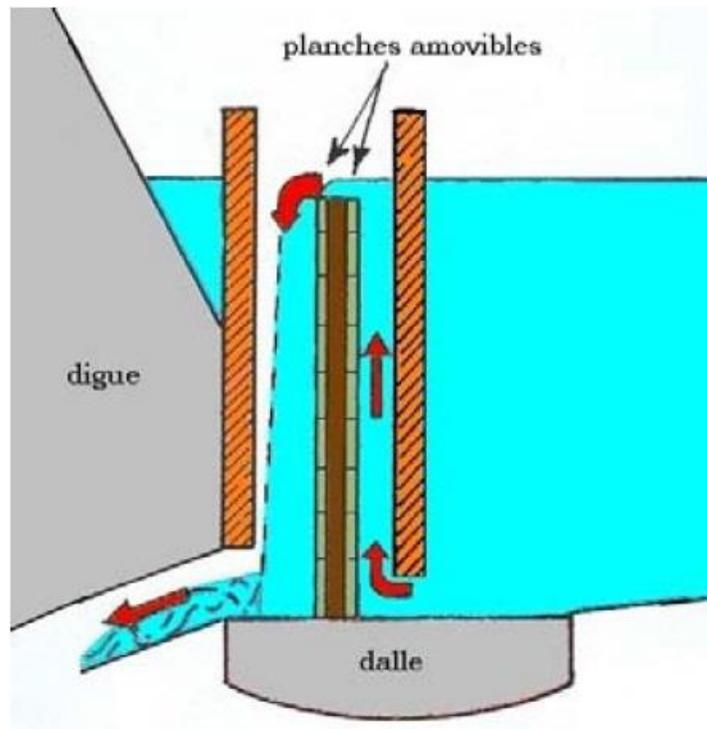


Figure 3.1 : Schéma d'un moine de vidange placé dans l'étang (source : [41])

3.8.1. Utilité du moine de vidange

Pendant les périodes chaudes, la stratification thermique se produit dans les masses d'eau. L'eau chaude plus légère est à la surface et l'eau froide est au fond. Cependant, l'eau de surface (chaude) est renvoyée dans les rivières en aval par des débordements et d'autres systèmes de drainage (inondation ou autre).

Les moines permettent de récupérer des eaux de fond plus fraîches, entraînant ainsi des variations de température limitées en aval [41].

Des chutes d'eau à l'intérieur de la structure permettent également l'oxygénation des eaux rejetées. Dans le cas des moines, le niveau d'eau de l'étang pendant le drainage diminue progressivement en enlevant la plaque supérieure en séquence. Ainsi, les plans d'eau peuvent être progressivement (et partiellement) vidés pour permettre des travaux de pêche, de nettoyage ou d'entretien sans décoller la vase du fond. Ce système est privilégié en cas de travaux de restauration, de remplacement d'autres ouvrages moins fonctionnels ou de création de plans d'eau [41].

Chapitre 4. Ouvrages de prise d'eau.

4.1. Définition

La prise d'eau (Photo 4.1) elle-même peut être fixée au fond du réservoir. Il peut s'agir d'un simple robinet de dérivation à l'extrémité aval de la ligne de refoulement. Dans certains cas, il peut être intéressant de prélever de l'eau à la surface du réservoir ou à différents niveaux, notamment en fonction de la température de l'eau. Ceci est réalisé en utilisant des portails flottants ou des tours de portail avec différentes hauteurs de portail. En petites œuvres, on peut imaginer une sorte de petite tour de pêche naïve très simpliste, un "moine". Pour l'aspiration par siphon, la partie amont du siphon peut être constituée d'un élément mobile qui suit les fluctuations du niveau d'eau [42].

Les prélèvements peuvent se faire sur des étangs alimentés par des canaux utilitaires tels que des rivières, des sources à l'extérieur de l'étang, des puits et des pompes [43].



Photo 4-1. Tour de prise d'eau du barrage Ghrib sur l'oued Cheurfa [44]

4.2. Stations de pompage et réseaux hydrauliques

4.2.1. Stations de pompage

Utilité des pompes : les pompes sont des machines servant à relever l'eau en augmentant sa pression ; leur emploi peut s'imposer en de multiples points d'un circuit d'adduction et de distribution d'eau et, dans certains cas, dans une raison d'assainissement. On cherchera presque toujours à choisir leur emplacement de façon à limiter le nombre de points ou leur emploi sera nécessaire [45].

4.2.2. Captage

Les pompes sont souvent nécessaires pour les captages de sources d'émergence, des puits à nappe libre et des rivières. On évite le plus souvent leur emploi pour les puits artésiens et les réservoirs artificiels [45].

4.2.3. Adduction et traitement

L'adduction est le transport de l'eau depuis la zone de captage jusqu'à proximité de la zone d'utilisation (réservoir). Une opération de traitement de cette eau est nécessaire avant sa distribution de cette eau [45].

4.2.4. Distribution et accumulation

En fonction du relief, il est nécessaire de pomper de l'eau pour la soulever dans le réservoir et/ou de la distribuer avec une pression suffisante, mais pas trop élevée (Généralement comprise entre 1 et 7 bars) [45].

4.2.5. Disposition des stations de pompage

Les stations de pompage peuvent être placées en divers endroits du circuit hydraulique, suivant les circonstances [45] :

- Sur puits (si l'on capte par un ou plusieurs puits),
- Sur une bêche d'aspiration (soit à proximité du captage, soit à distance si la pente permet l'adduction par gravité avant pompage- parfois à proximité de la distribution).

VII. STATIONS DE POMPAGE SUR PUIT

Une ou plusieurs pompes à axe vertical puisent l'eau dans le (ou les) puits. On peut également puiser dans plusieurs puits (pas trop éloignés les uns des autres) par des tuyauteries d'aspiration travaillant en siphon, amorcées par pompe à vide et amenant l'eau à un puisard unique d'où elle est pompée [45].

VIII. TURBOS POMPES VERTICALES

Installées sur puits sont un peu plus onéreuses que les pompes horizontales.

Les pompes sur puits peuvent être appelées à fonctionner en permanence ; aussi peuvent-elles être distinctes des pompes de relèvement, qu'on pourra ne faire fonctionner qu'à certaines heures (énergie électrique plus économique la nuit), à condition de disposer d'un réservoir suffisant entre les deux groupes de pompes [45].

IX. STATION DE POMPAGE SUR BACHE D'ASPIRATION

Les différentes pompes, y compris la pompe de secours, aspirent en parallèle dans un petit réservoir ou bache ; elles peuvent être placées soit au-dessus, ou elles sont hors d'eau (nécessité de l'amorçage), soit dans une salle séparée de la bache par une cloison verticale, ce qui supprime l'amorçage et diminue les risques de cavitation, mais nécessite des vannes d'isolement [45].

X. L'AMORÇAGE

Pour faire fonctionner une pompe centrifuge, elle doit d'abord être remplie de liquide. En fait, faire tourner une roue dans un gaz de très faible densité crée suffisamment de pression négative pour aspirer le liquide. La pompe turbo ne peut pas être amorcée. L'air contenu doit d'abord être expulsé. Un réservoir supplémentaire au-dessus de la pompe peut être utilisé pour effectuer cet amorçage par gravité [46].

XI. DISPOSITIONS DIVERSES

Il faut réserver dans la station de pompage une salle pour les installations électriques par ailleurs l'injection de stérilisants peut se faire dans la station de pompage, ou elle doit pouvoir être contrôlée depuis la salle des machines [45].

4.2.6. Exigences principales soumises à la station de pompage

Pour réaliser une station de pompage, on doit prendre en considération les exigences suivantes [45] :

- Respecter les conditions technico-économiques (moins de dépenses mais avec une bonne structure qui résiste à tout choc).
- Se baser sur des projets-types (Variantes déjà existantes).
- Éviter la construction des stations de pompage dans les zones inondables.

4.2.7. Equipements hydraulique de la station de pompages

Dans n'importe quelle station de pompage, on trouve :

- Équipements coté aspiration (Entrée de la pompe)
- Équipements coté refoulement (sortie de la pompe) [46].

XII. EQUIPEMENT A L'ENTREE DE LA POMPE :

iv. Grilles

Ces dispositifs sont utilisés afin d'éviter le passage des corps solides dans la pompe [46].

v. Crépine

Vient après la grille, elle est utilisée afin d'éviter l'entrée accidentelle des corps solides dans la pompe, elle est formée par un cylindre perforé (Photo 4-2) [46].



Photo 4-2 : Crépine [47]

iii. Conduite d'aspiration

Éviter la formation de poches d'air dans la conduite d'aspiration. Par conséquent, la section horizontale a une pente de seulement 2 % en montant vers la pompe. Cela expulsera définitivement les bulles d'air [46].

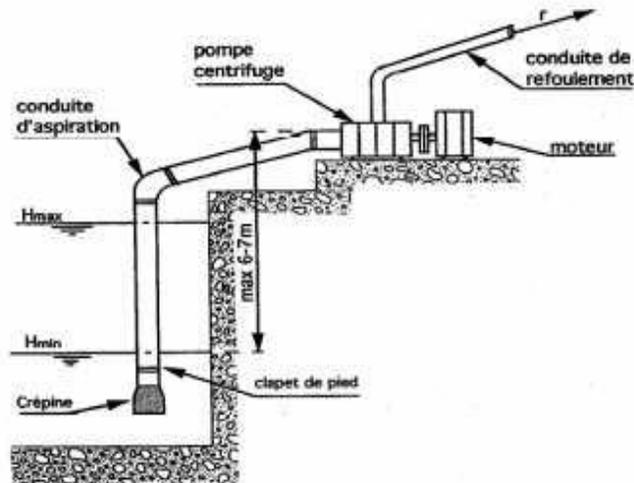


Figure 4.1. Installation aspiration-refoulement [48]

iv. Clapet d'aspiration (clapet à pied crépine)

Si la pompe n'est pas immergée, un clapet anti-retour est placé dans la ligne d'aspiration pour empêcher le retour d'eau lorsque la pompe est arrêtée (Fig. 4.1). Ce dispositif maintient la colonne d'eau dans la ligne d'aspiration et le corps de pompe pour éviter les amorçages répétés. Ce clapet peut être associée à une crépine d'aspiration pour former une vanne à crépine [46].

v. Joints

La tubulure d'admission étant sous pression, une attention particulière a été portée aux raccords pour éliminer toute possibilité d'entrée d'air et assurer l'étanchéité. Dans ce cas, il est préférable de les souder aux joints d'emboîtement et aux articulations avec douilles filetées, pour le raccordement aux appareils : clapets anti-retour, vannes, pompes, des raccords à bride sont utilisés. Les raccords à bride de démontage en caoutchouc sont couramment utilisés pour le démontage pour l'entretien ou la réparation d'équipements tels que des vannes, des pompes et des clapets anti-retours [46].

vi. Coudes

Les coudes sont les moins nombreux et fortement courbés. Éviter d'installer des coudes directement devant la bride d'aspiration.

vii. Convergent d'aspiration

Le tuyau d'aspiration est relié à la pompe par un convergent, ce qui accélère progressivement le débit et donne une bonne répartition des vitesses. Placer la ligne supérieure du convergent horizontalement pour éviter la formation de poches d'air [46].

viii. Tubulure d'aspiration

Pour le raccordement entre la pompe et la ligne d'aspiration, le diamètre de ce tuyau est inférieur au diamètre de la ligne d'aspiration, donc $D_a = 1,2d_a$.

ix. La ventouse

Son but est d'assurer le dégazage des tubes en évacuant l'air contenu dans les tubes et en permettant à l'eau de s'accumuler pendant le fonctionnement [46].

XIII. EQUIPEMENT A LA SORTIE DE LA POMPE

i. Divergent

On utilise ce dispositif afin de maintenir la vitesse à la sortie de la pompe dans une plage admissible.

ii. Clapet de refoulement

Un clapet peut être installé à la sortie de la pompe pour éviter le retour d'eau lorsque la pompe est à l'arrêt. Les clapets les plus couramment utilisées sont les clapets à battant, qui sont montées sur des conduites horizontales (Photo 4.3) [46].



Photo 4-3. Clapet anti-retour [49]

iii. Vanne de refoulement

Une vanne de refoulement est placée avec un clapet anti-retour à la sortie de la pompe. Cette vanne peut servir à plusieurs fins. Cette vanne isole initialement la pompe pendant l'entretien et le démontage. Les vannes peuvent également intervenir lors du démarrage et de l'arrêt de la pompe centrifuge (dans notre cas), le fonctionnement progressif de la vanne de sortie permet également de limiter les coups de bélier dus aux fluctuations rapides de la vitesse de l'eau dans les canalisations [46].

iv. Joint de démontage

Le but des joints de démontage est de faciliter le montage et le démontage des pièces et accessoires. Lors du montage, il convient de tenir compte du fait que le joint ne peut pas être serré et que le guide ne peut pas être déplacé pendant le fonctionnement [46].

v. Conduite de refoulement

Elle est utilisée pour transporter l'eau entre la pompe et le collecteur de refoulement.

vi. Tubulure de refoulement

Il s'agit d'un orifice de vidange vers la conduite de refoulement, et la position de cette conduite détermine le diamètre selon un catalogue [46].

vii. **Conduite de vidange**

Elle est installée le long de la conduite de refoulement et sert à évacuer l'eau restante dans le tuyau de refoulement en cas d'arrêt de la pompe. Le diamètre de cette conduite est donné par la formule : $d_v = 0,25D_r$ (d_v : diamètre du tuyau de vidange) [46].

viii. **Collecteur de refoulement**

Il est utilisé pour transporter l'eau jusqu'au point de refoulement. Les études technico-économiques serviront de support pour déterminer le diamètre de ce collecteur.

ix. **Le By-pass**

Il y a une dérivation entre les côtés aspiration et refoulement de la pompe. Cette dérivation est équipée d'un clapet fermé pendant le fonctionnement normal de la pompe. Si la pompe s'arrête soudainement, la pression négative dans la conduite ouvrira le clapet et le côté aspiration. Le clapet empêche l'eau de revenir.

x. **Soupape de décharge**

Elle sert à limiter la surpression.

XIV. SYSTEME DE DRAINAGE ET D'ASSECHEMENT

L'évacuation de l'eau de la station de pompage peut être effectuée à l'aide de pompes auto-amorçantes ou immergées, et parfois de pompes portables.

Les systèmes d'équipement comprennent les puisards, les conduites de rejet et de refoulement, les pompes, les vannes et les appareils de contrôle et commandes.

Une légère pente est prévue pour le drainage des eaux de surface, ce qui aide à rediriger l'eau dans le canal puis dans l'oued.

XV. RESERVOIR ANTI-BELIER

Les réservoirs d'air anti-bélier portent des noms tels que douches à air, ballons à air et réservoirs d'air. Le réservoir d'air est situé près de la pompe. Lorsque cette dernière s'arrête, le débit de la conduite chute brusquement et est partiellement remplacé par le débit du ballon d'air. Pendant la surpression, plus d'eau pénètre dans le ballon, ce qui réduit cette surpression.



Figure 25. Réservoir Anti bélier [50]

Les réservoirs anti-bélier sont agencés selon un dispositif qui facilite l'évacuation de l'eau dans les canalisations lors de la dépression et facilite la perte de charge lors de la surpression.

4.2.8. Dimensionnement de la station de pompages :

I. BATIMENT DE LA STATION DE POMPAGE

Il existe deux types de stations de pompage : une flottante et l'autre stationnaire.

A l'intérieur du bâtiment de la station de pompage, on trouve les installations suivantes [46] :

- Équipement hydraulique et hydromécanique.
- Appareillage électrique. – bureaux de personnel, etc.

II. TYPE DE BATIMENT

Il faut construire un bâtiment qui répond aux conditions suivantes (Fig. 4.2) [46] :

- Type de raccordement de ce bâtiment au système de prise d'eau,
- Destination de cette station de pompage (AEP, Irrigation),
- Modèle de pompes (à axe horizontal, vertical),
- Respect des conditions climatiques, relief, géologiques, hydrogéologiques...,
- La nature des matériaux de construction utilisés dans ce type de bâtiment

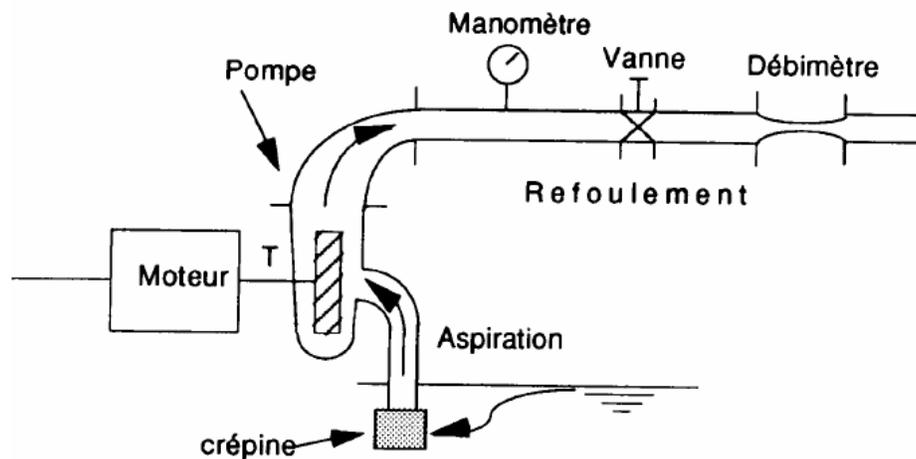


Figure 4.2 : Exemple d'une installation de pompage [25]

4.3. Systèmes de distribution des eaux

4.3.1. Description de système de distribution

Le but d'un réseau de distribution d'eau est de ramener l'eau des réservoirs vers les consommateurs en assurant un débit maximal garanti et une pression au sol minimale (ou hauteur manométrique) proportionnée à la hauteur du bâtiment [51].

L'eau est distribuée par le réseau local au sein de la zone d'approvisionnement en eau. Les principaux éléments d'un réseau de distribution sont : les canalisations, les raccordements et les composants spéciaux (coudes, raccords, vannes, compteurs, bouches d'incendie, etc.). Les conduites de distribution d'eau doivent descendre dans les rues de la ville et être posées sous terre, généralement sous les trottoirs [48].

Selon la connexion entre les différents segments de distribution, il est généralement divisé en deux types de réseaux : réseau ramifiés (de dérivation) et réseau maillé.

4.3.2. Réseau ramifié

Le réseau ramifié est caractérisé par l'eau circulant dans un seul sens dans toute la canalisation (de la canalisation principale vers la canalisation secondaire jusqu'à la canalisation tertiaire). Par conséquent, chaque point du réseau n'est alimenté en eau que d'un côté. Ce type de réseau présente des avantages économiques mais manque de sécurité (en cas de défaillance de la canalisation principale, tous les usagers situés en aval se trouveront sans eau).

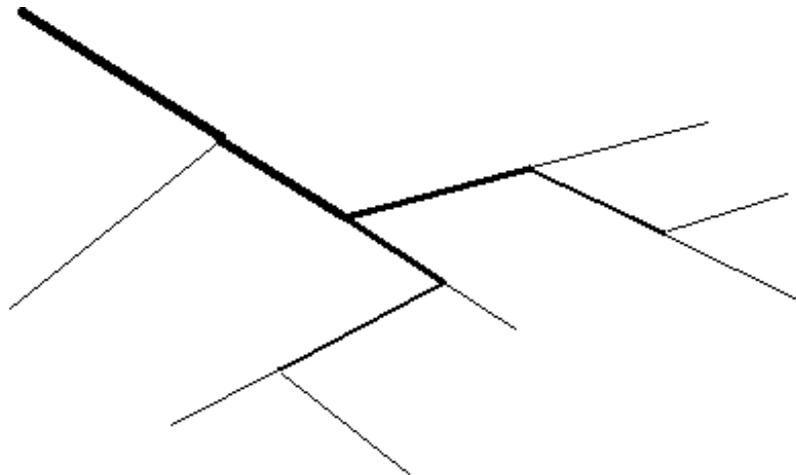


Figure 4.3. Réseau ramifié

4.3.3. Réseau maillé

Les réseaux maillés sont dérivés des réseaux ramifiés en reliant les extrémités des canalisations (généralement jusqu'au niveau des canalisations tertiaires), permettant des retours. Par conséquent, chaque point du réseau peut être alimenté en eau de deux côtés ou plus. Les petites rues sont toujours alimentées par des branchages.

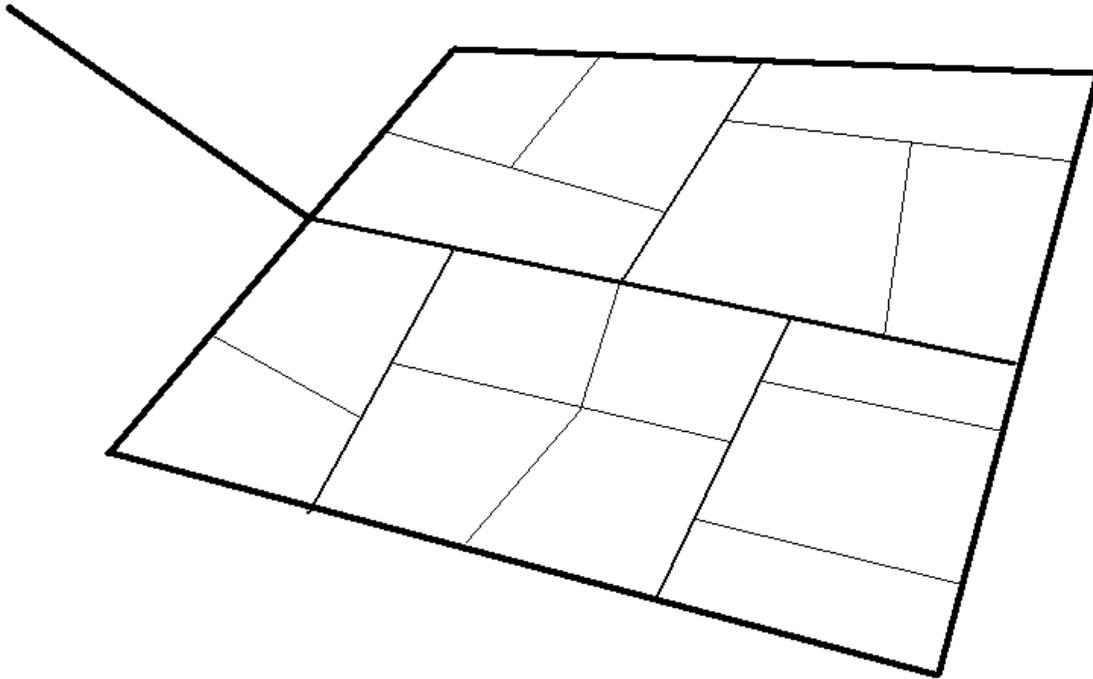


Figure 4.4 : Réseau maillé

Ce type de réseaux présente les avantages [52] :

- L'alimentation est plus sécurisée (en cas de rupture de canalisation, il suffit de l'isoler, tous les usagers situés en aval seront alimentés par d'autres canalisations).
- Pressions et débits plus uniformes sur tout le réseau.
- Cependant, il est plus cher et plus difficile à calculer.

Alternativement, d'autres types de réseaux peuvent être utilisés :

- Réseau hybride, qui est un réseau maillé, incluant quelques branches si nécessaire, pouvant alimenter certaines zones isolées de la ville (zones industrielles ou rurales).
- Réseau en couches, dans des situations où le terrain est très irrégulier.
- Réseaux alimentés séparément : réseau d'eau potable et réseau d'eau non potable

Références bibliographiques

- [1] Ammari A. (2014). Livre de Main d'Hydraulique Générale, partie I « Cours ». Ecole Nationale Supérieure d'Hydraulique, 68 pages. <https://www.ensh.dz/files/Cours/1011/Hydraulique/II-Propriétés%20des%20fluides.pdf>
- [2] <https://www.maxicours.com/se/cours/caracteristiques-de-fonctionnement-des-pompes-hydrauliques-volumetriques>
- [3] Kréménetski N., Shtérenliht D., Alychev V. et Yakovléva L. (1980). Hydraulique. Edition Mir-Moscou, 298 pages. Traduction française Edition Mir 1984, traduit du Russe par Grigoriev A.
- [4] Mesaoui M. (2011). Support de cours Systèmes hydrauliques. ISET- Gafsa DGM, Tunisie, 69 pages, <http://www.isetgf.rnu.tn/ENS/uploads/messaoui-mosbah/Systemes-hydraulique.pdf>.
- [5] Bonnefoy O., (2021). Mécanique des fluides et transferts. Version : 6.3 du 6 septembre 2021, 166 pages. <http://www.emse.fr/~bonnefoy/Public/MecaFlu-EMSE.pdf>.
- [6] <https://lhe.epfl.ch/cours/bachelor/slides/chapitre1.pdf>
- [7] Finnemore, J. E. (2002). *Fluid Mechanics with Engineering Applications*. New York : McGraw-Hill. ISBN 0072432020.
- [8] https://perso.crans.org/mbertin/Cours_Mecanique_des_fluides.pdf
- [9] Gasnier M., 1927. Dépôts métalliques directs et indirects, p. 151. <https://archivescantionales.jura.ch/detail.aspx?ID=111529>.
- [10] <https://www.aquaportail.com/definition-4369-viscosite.html>.
- [11] Roussel J., (2013). Dynamique des fluides parfaits (en ligne), 2013. Disponible sur FEMTO-PHYSIQUE.FR
- [12] (<http://www.foad.uadb.edu.sn/mod/book/view.php?id=1963&chapterid=1197>).

[13] Habibi B. (2020). Hydraulique générale. Polycopié de cours de l'université Hassiba Ben Bouali de Chlef, 61 pages. https://www.univ-chlef.dz/fsnv/wp-content/uploads/Cours-hydraulique-general_-Mr.-Habibi-6-L3-sol-et-eau.pdf.

[14] Ben Hamouda R. (2008). Notions de mécanique des fluides. CPU.

[15] (<https://www.ensh.dz/files/Cours/1011/Hydraulique/II-Propriétés%20des%20fluides.pdf>).

[16]. Altinakar M., Graf Walter H., (1998). Hydrodynamique : Une introduction. Traité de Génie Civil Vol. 14.

[17]. http://elearning.univ-biskra.dz/moodle/pluginfile.php/304038/mod_resource/content/1/Chapitre%204%20et%205_%20Mécanique%20des%20fluides%20_final_050118.pdf.

[18] Vazquez J., (2010a). Hydraulique générale. Formation CES/Mastère eau potable et assainissement. Ecole Nationale du Génie de l'eau et de l'environnement de Strasbourg. Laboratoire Systèmes Hydrauliques Urbains, 69 p.

[19] https://public.iutenligne.net/mecanique/mecanique-des-fluides/courtin/pression-dans-les-fluides/co/Pression%20dans%20les%20fluides_49.html

[20] http://www-ext.impmc.upmc.fr/~menguy/PDFs/1P003/1P003_C1_Hydrostatique_2019.pdf

[21] <https://www.usinenouvelle.com/expo/manometres-mecaniques-industriels-a-t-p25811003.html>

[22] https://perso.crans.org/mbertin/Cours_Mecanique_des_fluides.pdf).

[23] Broch H., (2016). Cours Mécanique des Fluides. Licence "Sciences de la Vie", v.4.0 2016. Université Nice Sophia Antipolis, 33 pages. https://elearning.esgee-oran.dz/pluginfile.php/6223/mod_resource/content/2/Travaux%20pratiques%20MDF%20Akermi%20%281%29.pdf.

- [24] Vazquez J., (2010b). Hydraulique générale. Formation CES/Mastère eau potable et assainissement. Ecole Nationale du Génie de l'eau et de l'environnement de Strasbourg. Systèmes Hydrauliques Urbains – ENGEES, 81 p.
- [25] Vazquez J., (2006). Hydraulique à surface libre. Formation initiale. Ecole Nationale du Génie de l'eau et de l'environnement de Strasbourg. (Laboratoire Systèmes Hydrauliques Urbains) ENGEES, 104 p. https://engees.unistra.fr/fileadmin/user_upload/pdf/shu/cours_HSL_FI_2006.pdf
- [26] <https://www.universalis.fr/encyclopedie/hydraulique/2-ecoulement-des-fluides-et-theoremes-generaux/>
- [27] Carlier M. (1998). Hydraulique générale et appliquée. Edition Eyrolles.
- [28] Bahlous El-Ouafi S. (2002). Hydraulique, cours et exercices. CPU.
- [29] Esposito D. L., , (2004). Mécanique des Fluides Appliquée. Chabard, Pont et Chaussée, Paris, 2004
- [30] Bniaiche E. (2013). Ecoulement à surface libre. ITSMAERB, PPT online.
- [31] Lencastre A. (1995). Hydraulique générale. Editions Eyrolles.
- [32] <https://www.alimentarium.org/fr/savoir/histoire-de-l%E2%80%99aquaculture>.
- [33] Hafsaoui I. (2020). Aquaculture générale. Polycopié de cours de l'Université Hassiba Ben Bouali de Chlef, 12 pages, <https://www.univ-chlef.dz/fsnv/wp-content/uploads/Cours-Aquaculture-générale-L3-Aquaculture-Mr.-Hafssaoui-I..pdf>.
- [34] Binet D., Trespeuch-Berthelot A., Passera F., (202). L'épuisement des mers : une histoire universelle de la surpêche. 2020. ffhal-03537735f.
- [35] https://reca-niger.org/IMG/pdf/Fiche_etang_d_aquaculture-version_1.pdf
- [36] <https://peche.ifremer.fr/Glossaire/Glossaire/Pecherie>.

[37]

<https://www.google.fr/url?sa=i&url=https%3A%2F%2Ffr.m.wikipedia.org%2Fwiki%2FFichier%3APecherie.jpg&psig=A0vVaw0Ij7T1CJonSKs7FOLPkksu&ust=1643150234495000&source=images&cd=vfe&ved=2ahUKEwiRkMvhucv1AhXU6eAKHeZPCvMQr4kDegUIARDQAQ>

[38] <https://www.espacedappareance.fr/tournage-a-la-plage-du-moulin-blanc-avec-nesrine-mouelhi>.

[39] <https://www.fao.org/3/W6930F/w6930f06.htm#TopOfPage>

[40] <https://www.epage-largue.eu/riviere-largue/wp-content/uploads/2012/02/Fiche-B-Moine.pdf>

[41] <https://www.morbihan.gouv.fr/content/download/37720/279257/file/Moine-2017.pdf>

[42]

[http://wikhydro.developpementdurable.gouv.fr/index.php/Wikibardig:Organes de prise et de vidange](http://wikhydro.developpementdurable.gouv.fr/index.php/Wikibardig:Organes_de_prise_et_de_vidange).

[43] [https://fsnv.univ-bba.dz/wp-content/uploads/2018/10/Ouvrages et Systemre dirrigation Cours L3 Sol et Eau.pdf](https://fsnv.univ-bba.dz/wp-content/uploads/2018/10/Ouvrages_et_Systeme_dirrigation_Cours_L3_Sol_et_Eau.pdf).

[44] ANBT, (2018). Document interne.

[45] Office National de l'Irrigation et du Drainage (ONID) (2006). Monographie de l'Aménagement Hydro-Agricole Du Périmètre du Haut Chélif (W) de Ain-Defla, 66 pages. www.onid.com.dz.

[46] <https://fsnv.univ-bba.dz/wp-content/uploads/2020/09/Résumé-M1-Aménagement-HydroAgricole-Pompe-et-Station-de-pompage-.pdf>.

[47] <https://www.arrosage-distribution.fr/crepine-inox.html>

[48] <https://www.cu-elbayadh.dz/ar/wp-content/uploads/2020/03/pompes.pdf>

[49] <https://fr.dreamstime.com/photos-images/le-clapet-anti-retour.html>

[50] <http://lokistagnepas.canalblog.com/archives/2007/10/01/6406514.html>

[51] (<https://www.cu-elbayadh.dz/ar/wp-content/uploads/2020/03/aep.pdf>).

[52] Dupont A., (1974). Hydraulique urbaine. Tome 2, Ouvrage de transport, Elévation et distribution des eaux. Editions Eyrolles, 229 pages.

Liste des figures

Figure 1. Trois états se présentent pour un corps simple : (a) solide : matériau à faible température ; (b) liquide : matériau à faible température et pression élevée ; (c) gazeux : matériau à température suffisamment élevée et pression faible.

Figure 1.2. Représentation qualitative de la déformation du liquide après chargement de la paroi supérieure

Figure 1.3. Profil des vitesses

Figure 1.4. Force de pression sur une paroi

Figure 1.5. Répartition de la pression hydrostatique par le volume du liquide

Figure 6. Répartition des pressions

Figure 7. Tube manométrique en U

Figure 8. Piézomètre (mesure de la pression)

Figure 9. Tube manomètre mécanique

Figure 10. Force de la pression hydrostatique

Figure 11. Force de pression du liquide sur un fond horizontal d'un vase

Figure 12. Force de pression sur les surfaces planes à orientations arbitraire

Figure 13. Force de pression sur une vanne de vidange de fond pour deux cas

Figure 14. Centre de pression

Figure 15. Centre de pression sur une vanne plane rectangulaire

Figure 16. Canal trapézoïdal

Figure 17. Filet liquide d'un liquide incompressible

Figure 18. Filet liquide de fluidité parfaite en écoulement permanent

Figure 19. Une pêcherie avec son carrelet sur la côte atlantique

Figure 20. Schéma d'un moine de vidange placé dans l'étang

Figure 21. Tour de prise d'eau du barrage Ghrib sur l'oued Cheurfa

Figure 22. Crépine

Figure 23. Installation aspiration-refoulement

Figure 24. Clapet anti-retour

Figure 25. Réservoir Anti bélier

Figure 26. Exemple d'une installation de pompage

Figure 27. Réseau ramifié

Figure 28. Réseau maillé

Liste des tableaux

Tableau 1. Grandeurs dérivées utilisées fréquemment dans les calculs hydrauliques

Tableau 2. Multiples et les sous multiples décimaux formes avec préfixes et facteurs

Tableau 3. Unités employées pour les calculs hydrauliques

Tableau 4. Moments d'inertie, coordonnées du centre de gravité du palier et du centre de pression des figures planes

Tableau 05. L'historique de l'aquaculture

SERIES D'EXERCICES AVEC CORRIGES

SERIE D'EXERCICES (TD N° 01)

Exercice 01 :

Une surface rectangulaire de 3 m de largeur et de 04 m de longueur est soumise à une pression uniforme de 40 Pa. Quelle est la force qui agit sur cette surface ?

Solution 01 :

La section rectangulaire

$$S = 4 \times 3 = 12m^2$$

La force qui agit sur cette surface est :

On a

$$P = \frac{F}{S} \Rightarrow F = P \times S = 40 \times 12 = 480 N$$

Exercice 02 :

Un tube cylindrique vertical de 2 cm² de section contient 4 l d'eau. On place sur cette eau un piston pesant 220g.

1. Calculer la pression en un point situé à 15 cm du fond.
2. Calculer la pression effective sur le fond du tube ainsi que la force pressante.

* On propose : $P_0 = 10^5 Pa$ et $g = 10m/s^2$)

Solution 02 :

1. D'abord on doit calculer la hauteur du liquide h

$$h = \frac{V}{S} = \frac{4 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 10^{-4}} = 20 \text{ m}$$

. La pression en un point situé à 15 cm du fond

En un point du liquide, la pression

$$P = P_0 + P_{eau} + P_{piston}$$

Avec

$$P_{eau} = \rho g h' = 1000 \cdot 10 \cdot 15 \cdot 10^{-2} = 1500 \text{ Pa} = 0.015 \cdot 10^5 \text{ Pa}$$

$$P_{piston} = \frac{F}{S} = \frac{mg}{S} = \frac{0.22 \times 10}{2 \times 10^{-4}} = 0.11 \times 10^5 \text{ Pa}$$

Donc

$$P = 10^5 + 0.015 \times 10^5 + 0.11 \times 10^5 \text{ Pa} = 1.26 \times 10^5 \text{ Pa}$$

$$P = 1.26 \times 10^5 \text{ Pa}$$

2. La pression effective sur le fond du tube ainsi que la force pressante

$$P_{eff} = P_{eau} + P_{piston} = \rho g h + \frac{m \cdot g}{S} = 1000 \times 10 \times 20 + 0.11 \cdot 10^5$$

$$P_{eff} = 2.11 \cdot 10^5 \text{ Pa}$$

$$F = P_{eff} \times S = 2.11 \times 10^5 \times 2 \times 10^{-4}$$

$$F = 42.2 \text{ N}$$

Exercice 03 :

Déterminer les pressions hydrostatique absolue et manométrique sur le fond du récipient rempli d'eau. Ce récipient est ouvert d'en haut, la pression sur la surface libre est atmosphérique. La profondeur d'eau dans le récipient est $h = 1.2m$.

Solution 03 :

1. La pression hydrostatique absolue dans le point de détermination est fonction de l'équation :

$$P = P_{atm} + \rho gh$$

Si

$$P_{atm} = 98.1 \text{ kPa}, g = \frac{9.81 \text{ m}}{\text{s}^2}, \rho = 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 1 \text{ t/m}^3 \text{ on a:}$$

$$P = 98.1 + 9.81 \cdot 1 \cdot 1.2 = 109,872 \text{ kPa} (1,12 \text{ kgf/cm}^2)$$

2. La pression manométrique sur le fond du récipient est déterminée en tant que la différence entre les pressions hydrostatique absolue et atmosphérique :

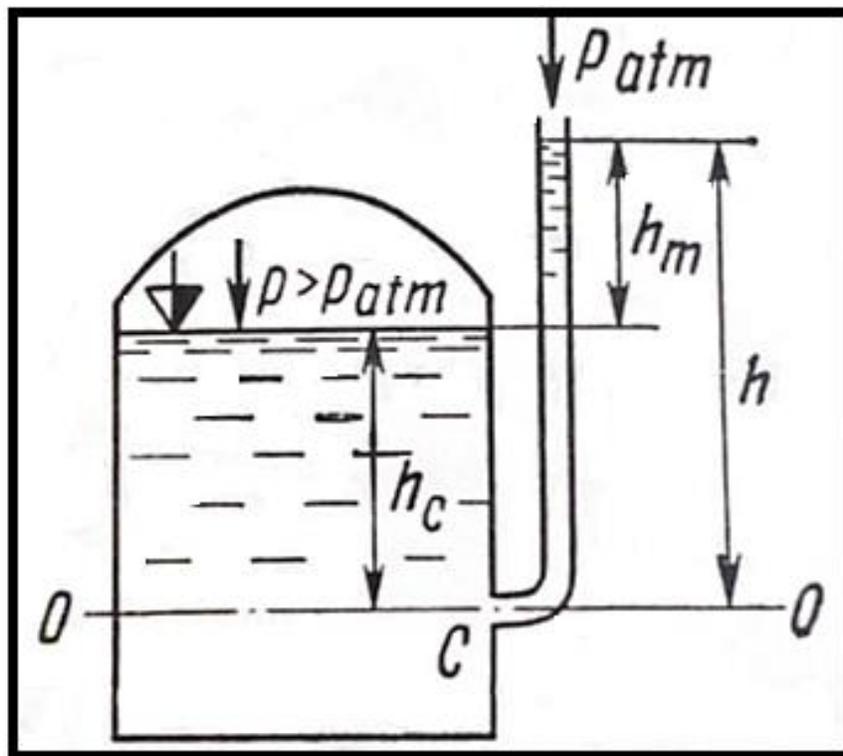
$$P_m = P - P_{atm} = \rho gh$$

Alors

$$P_m = 109,872 - 98,1 = 11,772 \text{ kPa} \left(0,12 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2} \right)$$

Exercice 04

Soit la pression sur la surface de l'eau dans le récipient $P \gg P_{atm}$. Dans le piézomètre installé au point C à la profondeur $h_c = 0,5 \text{ m}$, l'eau monte à la hauteur $h = 1,5 \text{ m}$. Déterminer la pression manométrique en point C et sur la surface libre dans le récipient. Déterminer la pression hydrostatique absolue dans le récipient au-dessus du liquide.



Solution 04 :

1. La pression manométrique en point C est déterminée via la hauteur piézométrique h :

$$P_{mC} = \rho g h = 1 \times 9.81 \times 1,5 = 14,7 \text{ kPa}$$

2. La pression hydrostatique absolue au point C est :

$$P = 98.1 + 9.81 = 107,91 \text{ kPa}$$

Exercice 05 :

Déterminer la hauteur à laquelle monte l'eau dans le vacuomètre si la pression hydrostatique absolue dans la bouteille $P = 78,48 \text{ kPa}$

Solution 05 :

1. Etablissons l'équation de l'équilibre par rapport au plan horizontal 00 :

$$P + \rho g h = P_{atm}$$

D'où

$$h = \frac{P_{atm} - P}{\rho g} = \frac{P_v}{\rho g}$$

Autrement dit, la hauteur de la colonne de liquide dans le vacuomètre correspond au manque de pression atmosphérique ou au vide dans la bouteille.

$$h = \frac{98,1 - 78,48}{9,81 \times 1} = 2.0 \text{ m}$$

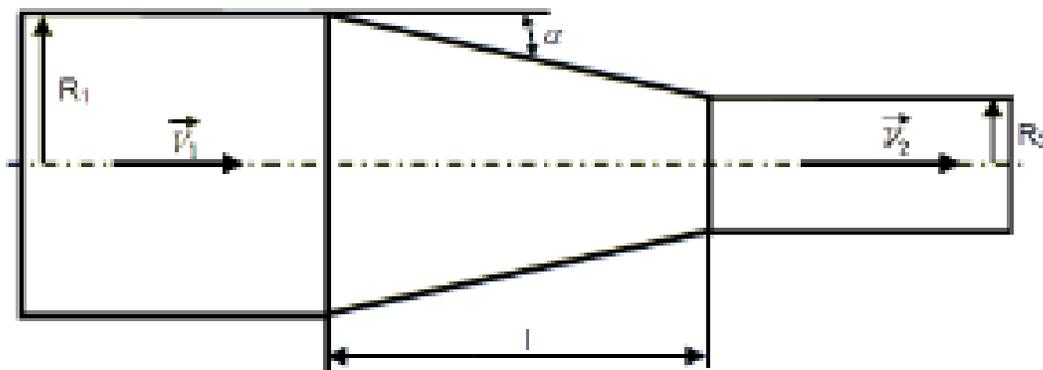
Série d'exercices (TD n°02)

Exercice 01

On veut accélérer la circulation du fluide parfait dans le tuyau pour que sa vitesse soit multipliée par 4. A cet effet, la conduite comprend un convergent caractérisé par angle α

1) Calculer le rapport des rayons ($R1/R2$)

2) Calculer ($R1 - R2$) en fonction de l et α . En déduire la longueur l . On donne : $R1 = 70 \text{ mm}$ et $\alpha = 18^\circ$



Solution 01.

1. On applique l'équation de continuité :

$$v_1 \times S_1 = v_2 \times S_2, \text{ on aura : } \frac{S_1}{S_2} = \frac{v_2}{v_1}, \text{ or } S_1 = \pi R_1^2 \text{ et } S_2 = \pi R_2^2$$

Donc

$$\frac{R_1^2}{R_2^2} = \frac{v_2}{v_1}, \text{ on aura } \frac{R_1}{R_2} = \sqrt{\frac{v_2}{v_1}} = \sqrt{\frac{4v_1}{v_1}} = \sqrt{4} = 2 \Rightarrow R_2 = \frac{R_1}{2}$$

2. Calcul de (R1-R2) :

$$\tan \alpha = \frac{R_1 - R_2}{l} \Rightarrow l = \frac{R_1 - R_2}{\tan \alpha} \text{ or d'après la réponse 1, } R_2 = \frac{R_1}{2} \text{ donc } l = \frac{R_1}{2 \times \tan \alpha}$$

Application numérique :

$$l = \frac{70}{2 \times \tan 18} = 107.7 \text{ mm}$$

Exercice 02 :

Déterminer le débit dans une conduite d'eau si la vitesse moyenne $v = 1.1 \text{ m/s}$ et le diamètre du tuyau $d = 300 \text{ mm}$.

Solution 02 :

On calcule le débit suivant la formule :

$$Q = v \times S = \pi \frac{d^2}{4} \times v = 0.785 d^2 v = 0.785 \times 0.3^2 \times 1.1 = 0.0778 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} = 77.8 \text{ l/s.}$$

Exercice 03 :

Déterminer le diamètre de la tuyauterie qui débite **500 m³** d'eau par 1 heure avec la vitesse moyenne de **1.5 m/s**.

Solution 03 :

Tout d'abord on détermine le débit :

$$Q = \frac{500}{3600} = 0.139 \text{ m}^3/\text{s}$$

On a :

$$Q = v \times S \text{ or } S = 0.785 d^2 = \frac{Q}{v}$$

D'où :

$$d = \sqrt{\frac{Q}{0.785v}} = \sqrt{\frac{0.139}{0.786 \times 1.5}} = 0.345 \text{ m.}$$

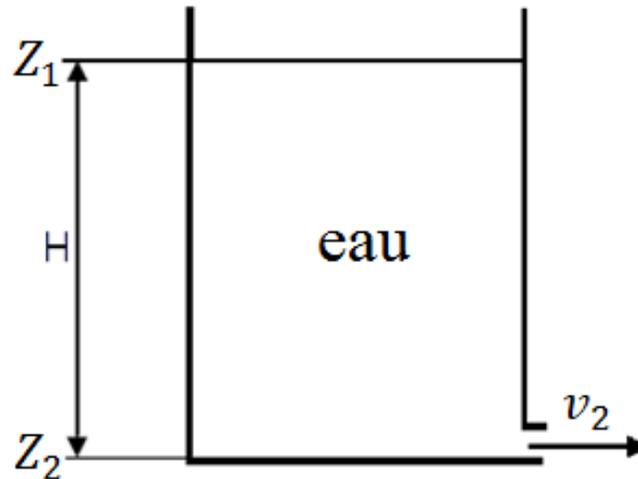
Exercice 04 :

Un réservoir rempli d'eau à une hauteur **H = 4 m** muni d'un petit orifice à sa base de diamètre **d = 12 mm**.

1) En précisant les hypothèses prises en comptes, appliquer le théorème de Bernoulli pour calculer la vitesse **v₂** d'écoulement d'eau.

2)

2) Déduire le débit volumique Q_v en (l/s) en sortie de l'orifice. On donne $g = 9,81 \text{ m/s}^2$



Solution 04 :

a. Calcul de la vitesse v_2 :

On applique l'équation de Bernoulli avec les hypothèses $v_1 = 0$ car le niveau du réservoir varie lentement et $P_1 = P_2 = P_{atm}$

Donc

$$\frac{v_1^2}{2g} + \frac{P_1}{\rho g} + Z_1 = \frac{v_2^2}{2g} + \frac{P_2}{\rho g} + Z_2 \Rightarrow \frac{v_2^2 - v_1^2}{2} + \frac{P_2 - P_1}{\rho} + g(Z_2 - Z_1) = 0 \Rightarrow v_2 = \sqrt{2 \times g \times H}$$

A.N :

$$v_2 = \sqrt{2 \times 9.81 \times 4} = 8.86 \text{ m/s}$$

2. Déduire le débit volumique Q_v en (l/s)

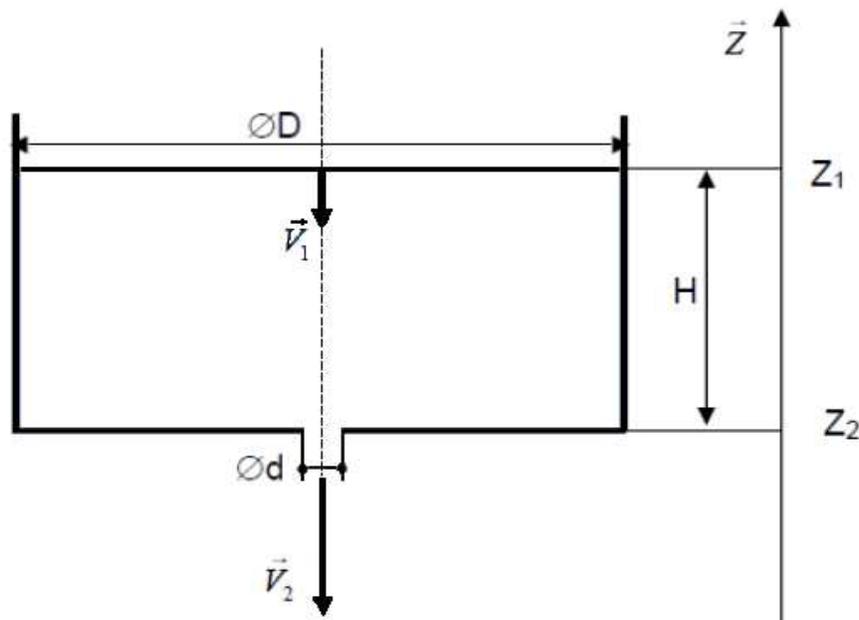
$$Q_v = v_2 \times S \text{ or } S = \frac{\pi d^2}{4} \text{ donc } Q_v = \frac{v_2 \times \pi d^2}{4}$$

A.N :

$$Q_v = \frac{8.86 \times \pi \times (12 \times 10^{-3})^2}{4} = 1.001 \text{ l/s}$$

Exercice 05 :

Un réservoir cylindrique de diamètre intérieur $D = 3 \text{ m}$ rempli d'eau jusqu'à une hauteur $H = 2 \text{ m}$, muni, au fond, d'un orifice de diamètre $d = 12 \text{ mm}$ qui lui permet d'évacuer l'eau.



Si on laisse passer un temps très petit dt , le niveau H du réservoir descend d'une quantité dH .

On note $v_1 = \frac{dH}{dt}$, la vitesse de descente du niveau d'eau, et v_2 la vitesse d'écoulement dans

l'orifice. On donne $g = 9,81 \text{ m/s}^2$.

- 1) Ecrire l'équation de continuité. En déduire l'expression de v_1 en fonction de v_2, D et d .
- 2) Ecrire l'équation de Bernoulli. On suppose que le fluide est parfait et incompressible.
- 3) A partir des réponses aux questions 1) et 2) établir l'expression de la vitesse d'écoulement v_2 en fonction de g, H, D et d .

Solution 05 :

1. Ecrire l'équation de continuité et en déduire l'expression de v_1 en fonction de v_2, D et d :

$$v_1 \times S_1 = v_2 \times S_2 \Rightarrow \frac{S_1}{S_2} = \frac{v_2}{v_1}, \text{ or } S_1 = \pi \frac{D^2}{4} \text{ et } S_2 = \pi \frac{d^2}{4} \text{ donc } v_1 = \left(\frac{d}{D}\right)^2 \times v_2 \quad (1)$$

2. Ecrire l'équation de Bernoulli, en supposant que le fluide est parfait et incompressible.

$$\frac{v_2^2 - v_1^2}{2} + \frac{P_2 - P_1}{\rho} + g(Z_2 - Z_1) = 0 \text{ or } P_1 = P_2 = P_{atm} \text{ donc } \frac{v_2^2 - v_1^2}{2} - gH = 0 \quad (2)$$

3. On substitue l'équation 1 dans l'équation 2, on aura :

$$\frac{v_2^2 - \left(\frac{d}{D}\right)^4 \times v_2^2}{2} = gH \quad \text{Donc } v_2 = \sqrt{\frac{2gH}{1 - \left(\frac{d}{D}\right)^4}}$$

Exercice 06 :

Un siphon de diamètre $d = 10 \text{ mm}$ alimenté par un réservoir d'essence de grandes dimensions par rapport à d et ouvert à l'atmosphère.

On suppose que :

- Le fluide est parfait ;

- Le niveau du fluide dans le réservoir varie lentement.

- L'accélération de la pesanteur $g = 9,81 \text{ m/s}^2$.

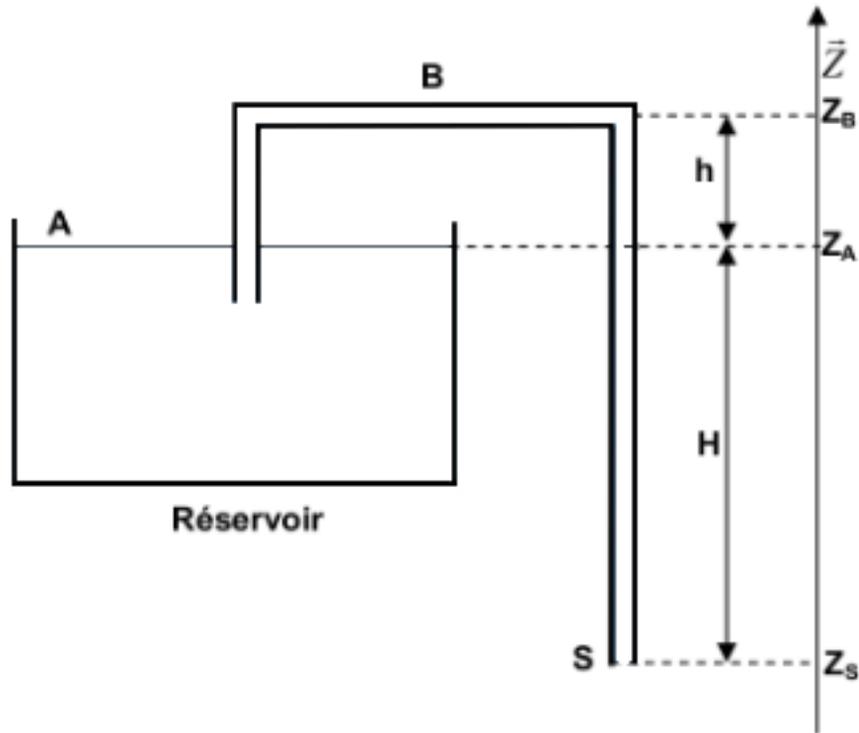
- Le poids volumique de l'essence : $\omega = 6896 \text{ N/m}^3$

- $H = Z_A - Z_S = 2,5 \text{ m}$.

1) En appliquant le théorème de Bernoulli entre les points A et S, calculer la vitesse d'écoulement v_s dans le siphon.

2) Déduire le débit volumique Q_V

3) Donner l'expression de la pression P_B au point B en fonction de h, H, ω et P_{atm} . Faire une application numérique pour $h = 0,4 \text{ m}$.



Solution 06 :

1. Théorème de Bernoulli entre S et Z :

$$\frac{v_S^2}{2} + \frac{P_S}{\rho} + gZ_S = \frac{v_A^2}{2} + \frac{P_A}{\rho} + gZ_A \text{ or } \omega = \rho \cdot g \cdot P_S = P_A = P_{atm} \cdot v_A = 0 \text{ et } Z_A - Z_Z = H$$

$$\text{Donc } v_s = \sqrt{2gH}$$

$$\text{A.N : } v_s = \sqrt{2 \times 9.81 \times 2.5} = 7 \text{ m/s}$$

2. Débit volumique : $Q_V = v_s \frac{\pi d^2}{4}$

$$\text{A.N : } Q_V = 7 \times \frac{\pi \times 0.01^2}{4} = 5.5 \times \frac{10^{-4} \text{ m}^3}{\text{s}} = 0.55 \text{ l/s}$$

3. Théorème de Bernoulli entre B et S :

$$\frac{v_B^2}{2} + \frac{P_B}{\rho} + gZ_B = \frac{v_S^2}{2} + \frac{P_S}{\rho} + gZ_S \text{ or } v_s = v_B, Z_B - Z_S = H + h \text{ et } P_s = P_{atm}$$

Donc $P_B = P_{atm} - \omega(H + h)$

A.N : $P_B = 10^5 - 6896 \times (2.5 - 0.4) = 80001.6Pa = 0.8 \text{ bar}$

4. Non, il faut que $P_B > 0$ *équivaut* à $h < \frac{P_{atm}}{\omega} - H$

A.N : $h < \frac{10^5}{9.81 \times 700} - 2.5$ *donc* $h < 12 \text{ m}$

Exercice 07 :

Dans un tuyau divergent existe un écoulement en charge du liquide, alors que les vitesses moyennes dans la première et la deuxième section sont respectivement égales à 1.6 et 0.9 m/s ; le diamètre du tube dans la première section $d_1 = 0.5m$.

1. Déterminer le diamètre du tuyau dans la deuxième section

Solution 07 :

En tenant compte de l'équation de continuité, on a :

$$v_1 \times S_1 = v_2 \times S_2$$

Où

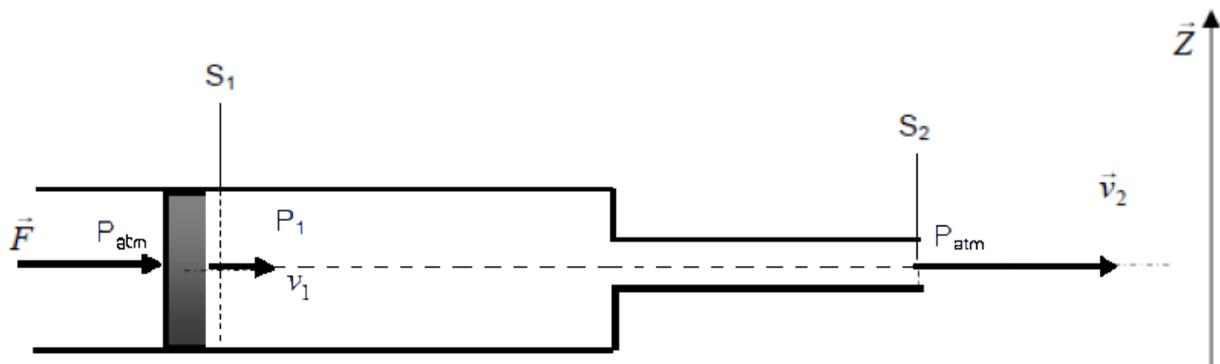
$$\frac{d_2^2}{d_1^2} = \frac{v_1}{v_2}$$

On obtient

$$d_2 = \sqrt{\frac{v_1 d_1^2}{v_2}} = \sqrt{\frac{1.6 \times 0.5^2}{0.9}} \approx .67m$$

Exercice 08 :

La figure ci-dessous représente un piston qui se déplace sans frottement dans un cylindre de section S_1 et de diamètre $d_1 = 4cm$ rempli d'un fluide parfait de masse $\rho = 1000 kg/m^3$. Le piston est poussé par une force F d'intensité $62,84 N$ à une vitesse v_1 constante. Le fluide peut s'échapper vers l'extérieur par un cylindre de section S_2 et de diamètre $d_2 = 1 cm$ à une vitesse v_2 et une pression $P_2 = P_{atm} = 1 bar$.



1. Ecrire l'équation de continuité et déterminer l'expression de la vitesse v_1 en fonction de v_2 .
2. En appliquant l'équation de Bernoulli, déterminer l'expression de la vitesse d'écoulement v_2 en fonction de P_1, P_{atm} et ρ . (On suppose que les cylindres sont dans une position horizontale ($Z_1 = Z_2$)).

3. Déduire le débit volumique Q_v

Solution 08 :

1. Equation de continuité :

$$v_1 \times S_1 = v_2 \times S_2 \Rightarrow v_1 = v_2 \frac{S_2}{S_1} = v_2 \times \left(\frac{d_2}{d_1}\right)^2 = v_2 \times \left(\frac{1}{4}\right)^2 = \frac{1}{16} v_2$$

2. Equation de Bernoulli :

$$\frac{v_2^2 - v_1^2}{2} + \frac{P_2 - P_1}{\rho} + g(Z_2 - Z_1) = 0 \text{ or } P_2 = P_{atm} \text{ et } Z_1 = Z_2$$

$$\text{donc } v_2 = \sqrt{\frac{512 \times (P_1 - P_{atm})}{255 \times 1000}}$$

$$\text{Alors } v_2 = \sqrt{\frac{512 \times (1.5 \times 10^5 - 10^5)}{255 \times 1000}} = 10 \text{ m/s}$$

$$\boxed{v_2 = 10 \text{ m/s}}$$

3. Débit volumique Q_v

$$Q_v = v_2 \times \frac{\pi d_2^2}{4}$$

$$\text{donc } Q_v = \frac{v_2 \times \pi d^2}{4} = \frac{10 \times 0.01^2}{4} = 0.785 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$$

$$\boxed{Q_v = 0.785 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}}$$