

## I. **Keywords:**

Ultrafiltration, reverse osmosis, seawater pumping station, operating point, pumping station, drinking water

## Table des matières

<b>I.</b> <i>Introduction</i> .....	<b>1</b>
<b>II.</b> <i>Niveau politique :</i> .....	<b>1</b>
<b>III.</b> <i>Ressources en eau :</i> .....	<b>1</b>
<b>IV.</b> <i>Les stations de dessalement en Algérie :</i> .....	<b>2</b>
CHAPITRE01: SITE DE LA STATION DE SOUK TLETA	
<b>I.</b> <i>Historique</i> .....	<b>5</b>
<b>V.</b> <i>Le fonctionnement de la station</i> .....	<b>5</b>
A. <b>Les équipements majeurs du dessalement utilisés dans la station</b> .....	<b>5</b>
B. <b>Admission de l'eau de mer</b> .....	<b>8</b>
C. <b>Prétraitement de l'eau</b> .....	<b>8</b>
1. Système de dosage en chloration dans l'admission .....	8
2. Chambre d'admission d'eau de mer .....	10
3. Station de pompage de l'eau de mer .....	12
4. Le système de l'ultrafiltration (UF) .....	13
5. Réservoir de stockage de l'eau filtrée et la station de pompage .....	17
D. <b>L'osmose inverse</b> .....	<b>18</b>
1. Définition .....	18
1. Principe de fonctionnement .....	18
2. La station de pompage pour l'alimentation de l'osmose inverse.....	22
E. <b>Stade du post-traitement</b> .....	<b>25</b>
CHAPITRE02: BASES SUR LA MECANIQUE DES FLUIDES	
<b>I.</b> <i>Introduction</i> .....	<b>27</b>
<b>VI.</b> <i>Rappels des notions de mécanique des fluides</i> .....	<b>27</b>
A. <b>Débit</b> .....	<b>27</b>
1. Débit massique : .....	27
1. Débit volumique : .....	27

<b>B. Régimes d'écoulements .....</b>	<b>27</b>
1. Régime laminaire .....	27
2. Régime transitoire .....	27
3. Régime turbulent.....	28
4. Nombre de Reynolds (Re).....	28
<b>C. Equation de conservation de la masse (équation de continuité) .....</b>	<b>29</b>
1. Définition .....	29
5. Conservation du débit : .....	29
6. Expression du débit en fonction de la vitesse : .....	30
7. Vitesse moyenne : .....	30
<b>D. Equation de Bernoulli :.....</b>	<b>31</b>
1. Cas des fluides parfaits : .....	31
8. Cas d'échanges d'énergie : .....	32
9. Cas de pertes de charge :.....	32
10. Application de Théorème de Bernoulli : .....	33
<b>E. Propriétés des liquides : .....</b>	<b>33</b>
1. Pression : .....	33
11. Pression absolue : .....	34
12. Pression relative : .....	34
13. Masse volumique :.....	34
14. Viscosité : .....	34
<b>F. Les pertes de charge :.....</b>	<b>35</b>
1. Les pertes de charge Linéaires :.....	36
15. Les pertes de charge singulières :.....	39
16. Pourquoi provoquer des pertes de charge ? : .....	43
<b>VII. Réseaux des pompes .....</b>	<b>44</b>
<b>A. Définition .....</b>	<b>44</b>
<b>A. Types des pompes :.....</b>	<b>44</b>
<b>B. Pompe volumétrique :.....</b>	<b>44</b>
1. Pompes volumétriques rotatives :.....	45
2. Pompe volumétriques alternatives : .....	47
<b>C. Turbopompes :.....</b>	<b>49</b>
1. Avantages et inconvénients des turbopompes : .....	49
1. Pompes hélico-centrifuges : .....	49
2. Pompes hélices : .....	50
3. Pompes centrifuges : .....	50

<b>VIII. Réseaux des conduites :</b>	<b>71</b>
<b>A. Définition des conduites :</b>	<b>71</b>
1. Conduite simple :	71
1. Conduites mixtes :	71
2. Conduites multiples :	72
3. Pertes totales dans les conduites :	72
<b>B. Les équipements dans un réseaux de conduites :</b>	<b>72</b>
1. Equipements en amont (aspiration) :	72
2. Equipement en aval (refoulement) :	73
<b>C. Courbes caractéristique du réseau de conduites :</b>	<b>74</b>
<b>D. Point de fonctionnement :</b>	<b>75</b>
<b>E. Type de conduites :</b>	<b>77</b>
<b>IX. Conclusion :</b>	<b>77</b>

## CHAPITRE03: CALCUL DES PERTES DE CHARGES ET POINTS DE FONCTIONNEMENT

<b>I. Introduction.....</b>	<b>79</b>
<b>A. Calculs des pertes de charges linéaires et singulières.....</b>	<b>79</b>
1. La station de pompage de l'eau de mer .....	79
2. La station de pompage de l'alimentation de l'osmose inverse .....	93
3. La station de pompage de l'alimentation de l'ERS : .....	100
<b>B. Phénomènes et problèmes rencontrés dans la station .....</b>	<b>106</b>
1. La turbidité .....	106
1. L'effet de siphon .....	107
<b>C. Conclusions.....</b>	Erreur ! Signet non défini.

# La liste des figures

Figure 1 Réservoirs de stockages .....	9
Figure 2 Ecran de barre grossier (CBS) et Ecran à bande fine (TBS) .....	10
Figure 3 Racleur du CBS .....	11
Figure 4 Bassin de rejet pour TBS .....	11
Figure 5 Station de pompage de l'eau de mer vers l'UF .....	12
Figure 6 Polluants éliminés par l'Ultrafiltration .....	13
Figure 7 Les trains de l'Ultrafiltration .....	15
Figure 8 Filtration et lavage à contre-courant .....	17
Figure 9 Schéma de l'osmose inverse .....	18
Figure 10 les étapes de l'opération de l'osmose inverse .....	19
Figure 11 le fonctionnement d'une membrane .....	20
Figure 12 la section d'osmose inverse .....	21
Figure 13 Schéma type d'une installation d'osmose inverse .....	24
Figure 14 Représentation de l'écoulement .....	29
Figure 15 Conservation d'énergie .....	30
Figure 16 Profil de vitesse .....	30
Figure 17 Ecoulement avec échange de travail .....	32
Figure 18a Elargissement brusque de la section .....	39
Figure 19 Cas d'un coude .....	41
Figure 20 Quelques valeurs de coefficient de perte de charge singulières .....	42
Figure 21 Pertes de charge singulières pour quelques vannes .....	43
Figure 22 Pompe à palettes .....	45
Figure 23 Pompe à engrenage .....	46
Figure 24 Pompe à rotor hélicoïdal excentré .....	46
Figure 25 Représentation schématique d'une pompe centrifuge .....	50
Figure 26 Différentes roues d'une pompe centrifuge .....	51
Figure 27 Principe de fonctionnement d'une pompe centrifuge .....	52
Figure 28 Quelques cas de $H_m$ .....	56
Figure 29 NPSH .....	57
Figure 30 NPSHdispo pour une pompe en aspiration et en charge .....	58
Figure 31 schéma représentatif des directions des vitesses .....	59
Figure 32 Triangle des vitesses .....	59
Figure 33 Problème de cavitation .....	63
Figure 34 Courbe Hauteur-débit .....	64

Figure 35 Courbe Puissance-débit .....	64
Figure 36 courbe Rendement-débit.....	65
Figure 37 Courbe (NPSH)-débit .....	65
Figure 38 Courbe rassemblée.....	67
Figure 39 Choix de pompe.....	68
Figure 40 pompe en série .....	69
Figure 41 courbe hauteur-débit pour deux pompes .....	69
Figure 42 Pompes en parallèle .....	70
Figure 43 Courbe équivalente de deux pompes en parallèle .....	70
Figure 44 Conduite mixte .....	71
Figure 45 Conduites multiples .....	72
Figure 46 Courbe réseau .....	75
Figure 47 Point de fonctionnement.....	76
Figure 48 coude 90° .....	83
Figure 49 Singularité Té perpendiculaire.....	84
Figure 50 Coude 90° avec D=1.8      Figure 51 Coude 90° avec D=0.9 .....	87
Figure 52 Singularité Té perpendiculaire.....	88
Figure 53 Détermination du point de fonctionnement de la partie INTAKE .....	91
Figure 54 Courbes et points de fonctionnements suivant le nombre de pompes .....	92
Figure 55 Singularité Té perpendiculaire.....	97
Figure 56 Détermination du point de fonctionnement de la partie osmose inverse.....	99
Figure 57 Détermination du point de fonctionnement du système ERS .....	105
Figure 58 Vanne ouverte à 100%      Figure 59 Manomètre du perméat .....	107
Figure 60 débitmètre du perméat .....	107
Figure 61 Vanne légèrement ouverte      Figure 62 Manomètre du perméat.....	109
Figure 63 Débitmètre du permeat .....	109

## Nomenclature

$\rho$ : masse volumique.	[Kg/m <sup>3</sup> ]
$C$ : chaleur massique.	[KJ/(kg °C)]
$\mu$ : Viscosité dynamique.	[N. s/m <sup>2</sup> ] ou [pascal.s]
$\nu$ : Viscosité cinématique.	[m <sup>2</sup> /s]
$D$ : Diamètre.	[m]
$d$ : densité	
$W$ : Vitesse de circulation d'eau dans les tubes	[m/s]
n: La vitesse de rotation	[tr/min]
$\eta_g$ : Rendement global.	
$\eta_m$ : Rendement mécanique.	
$\eta_{fi}$ Rendement par frottement interne.	
$\eta_v$ : Rendement volumétrique.	
$\eta_h$ : Rendement hydraulique.	
C : couple de torsion sur l'arbre de la pompe.	[N.m]
$J_T$ : Pertes de charge linéaire.	[m ou, bar]
$J_s$ : Perte de charge singulière.	[m ou, bar]
$q_m$ : Débit massique	[kg/s]
$Q_v$ : Débit volumétrique	[m <sup>3</sup> /s]
$\vec{u}$ : vitesse d'entrainement	[m/s]
$\vec{w}$ : vitesse relative	
NPSH: Net Positive Suction Head.	[bar ou, m]
$H_{MT}$ : Hauteur manométrique totale.	[m]
$H_{sta}$ : Hauteur manométrique de l'installation.	[m]
$\lambda$ : coefficient de pertes de charge linéaire.	
$\varepsilon$ : coefficient de pertes de charge singulière.	
$H_{asp}$ : La hauteur à l'aspiration.	[m]
$J_{asp}$ : La perte de charge à l'aspiration.	[m ou, bar]
$J_{ref}$ : la perte de charge de refoulement	[m ou, bar]
$P_a$ : Puissance absorbée.	[W]
$P_u$ : Puissance utile	[W]

$Q_v$ : Débit volumique	[m <sup>3</sup> /s]
$Q_m$ : Débit massique	[kg/s]
$R_e$ : Nombre de Reynolds	
S : Section	[m <sup>2</sup> ]
P : pression	[N/m <sup>2</sup> ]
$\rho$ : masse volumique	[kg/m <sup>3</sup> ]
k : rugosité de paroi	
NPT : National pipe tapered	

#### Abréviations :

COBS: Coarse bar screens  
 TBS: Traveling band screens  
 RO: reverse osmosis  
 ERS: Energy recovery system  
 UF: Ultrafiltration  
 CIP: clean in place

# **INTRODUCTION GENERALE**

## **II.**

### **Introduction**

L'Algérie compte environ 32.3 millions d'habitants en 2004, dont 41% de ruraux. La densité moyenne est de 14 habitants/km<sup>2</sup>, mais la population est fortement concentrée dans la zone côtière composée de terres agricoles plus fertiles et riches en ressources naturelles, ainsi que dans les principales villes et pôles d'activités économiques du pays (215 habitants/km<sup>2</sup> en 2000, contre 38 habitants/km<sup>2</sup> dans la région des hauts plateaux et 7 habitants/km<sup>2</sup> dans le sud). La croissance démographique poursuit son déclin avec un taux de 1.6% en 2003, alors que l'espérance de vie à la naissance atteint 70 ans pour la même année. L'eau potable est accessible pour 87% de la population en 2002 (92% en milieu urbain et 80% en milieu rural). Le taux de chômage est officiellement estimé à plus de 29% de la population active avec de fortes différences selon les régions. Dans le cadre de la politique général du Gouvernement et de son programme d'action, le ministre des ressources en eau propose les éléments de la politique nationale dans le domaine des ressources en eau et assure le suivi et le contrôle de leur mise en œuvre conformément aux lois et règlements en vigueur.

## **III.**

### **Niveau politique :**

Le ministre des ressources en eau exerce ses attributions, en relation avec les secteurs concernés, dans les domaines suivants : l'évaluation permanente, quantitative et qualitative, des ressources en eau ; les recherches géophysiques et hydrogéologiques, destinées à la localisation, à la connaissance et à l'évaluation des ressources en eaux souterraines ; les recherches hydro climatologiques et géologiques liées à la connaissance, à l'évaluation des ressources en eau de surface et à la localisation des sites de barrages et autres ouvrages de stockage ; les études agro-pédologiques ; la production de l'eau domestique, industrielle et agricole, y compris la production et l'utilisation de l'eau de mer et des eaux épurées ; la réalisation, l'exploitation et la maintenance des ouvrages de retenue d'eau et des unités de traitement et de pompage de l'eau, des réseaux d'adduction, de stockage et de distribution de l'eau ainsi que des réseaux et ouvrages d'épuration et d'assainissement ; la réalisation, l'exploitation et la maintenance des systèmes d'assainissement et des unités d'épuration des eaux usées; la réalisation, l'exploitation et la gestion des infrastructures d'irrigation et de drainage.

## **IV.**

### **Ressources en eau :**

Le pays est divisé en 5 bassins hydrographiques regroupant les 19 bassins versants du pays. Les ressources en eau superficielle renouvelables totales internes sont estimées à 13.2 km<sup>3</sup>/an pour l'ensemble du pays dont le Sahara, bassin le plus important par la surface, ne renferme que 0.6 km<sup>3</sup>. Les ressources en eau souterraine renouvelables contenues dans les nappes du nord du pays sont estimées à près de 1.7 km<sup>3</sup>/an.

Ces nappes sont alimentées essentiellement par les précipitations dont la répartition demeure irrégulière à la fois dans le temps et dans l'espace. Le sud du pays se caractérise par l'existence de ressources en eau souterraine très importantes provenant des nappes du Continental Intercalaire et du Complexe Terminal. Considérant une partie commune entre eaux de surface et eaux souterraines estimée à 1 km<sup>3</sup>/an, les ressources totales renouvelables internes s'élèvent à 13.9 km<sup>3</sup>/an. Les ressources exploitables sont estimées à 7.9 km<sup>3</sup>/an.

La capacité totale initiale des barrages des 5 bassins hydrographiques était d'environ 5 km<sup>3</sup>, en 2000, cependant avec l'envasement il est estimé que cette capacité a diminué plus de 25%. En 2003, la capacité totale a été estimée à environ 6 km<sup>3</sup>. Le dessalement de l'eau de mer existe déjà avec 14 stations dans 3 des bassins hydrographiques pour une capacité de 47 000 m<sup>3</sup>/jour (5 000 m<sup>3</sup>/jour dans l'Oranie et dans le Constantinois et 37 000 m<sup>3</sup>/jour dans l'Algérois), soit 17.155 millions de m<sup>3</sup>/an. La construction d'une station à Arzew dans l'ouest du pays permettra d'augmenter cette capacité de production. Le volume annuel d'eaux usées domestiques rejetées est estimé à 600 millions m<sup>3</sup> et d'eaux usées industrielles à 220 millions m<sup>3</sup>.

## **V. Les stations de dessalement en Algérie :** L'Algérie comprend plusieurs stations de dessalement au niveau de quatorze Wilayas

- Wilaya de Chlef**

La wilaya de Chlef comprend la station de dessalement d'eau de mer suivante :

Station de dessalement de Ténès : 200 000 m<sup>3</sup>/jour d'eau potable.

- Wilaya de Bejaia**

La wilaya de Bejaia comprend la station de dessalement d'eau de mer suivante :

Station de dessalement de Bejaia : 100 000 m<sup>3</sup>/jour d'eau potable.

- Wilaya de Tlemcen**

La wilaya de Tlemcen comprend la station de dessalement d'eau de mer suivante :

Station de dessalement de Souk Tléta : 200 000 m<sup>3</sup>/jour d'eau potable.

Station de dessalement de Honaine : 200 000 m<sup>3</sup>/jour d'eau potable.

- Wilaya de Tizi Ouzou**

La wilaya de Tizi Ouzou comprend la station de dessalement d'eau de mer suivante :

Station de dessalement de Tigzirt : 2 500 m<sup>3</sup>/jour d'eau potable3.

- Wilaya d'Alger**

La wilaya d'Alger comprend les stations de dessalement d'eau de mer suivantes :

Station de dessalement d'El Hamma : 200 000 m<sup>3</sup>/jour d'eau potable4.

- Wilaya de Jijel**

La wilaya de Jijel comprend la station de dessalement d'eau de mer suivante :

Station de dessalement de Jijel : 200 000 m<sup>3</sup>/jour d'eau potable.

- **Wilaya de Skikda**

La wilaya de Skikda comprend la station de dessalement d'eau de mer suivante :

Station de dessalement de Skikda : 100 000 m<sup>3</sup>/jour d'eau potable.

- **Wilaya d'Annaba**

La wilaya d'Annaba comprend la station de dessalement d'eau de mer suivante :

Station de dessalement d'Annaba : 50 000 m<sup>3</sup>/jour d'eau potable.

- **Wilaya de Mostaganem**

La wilaya de Mostaganem comprend la station de dessalement d'eau de mer suivante :

Station de dessalement de Mostaganem : 200 000 m<sup>3</sup>/jour d'eau potable5.

- **Wilaya d'Oran**

La wilaya d'Oran comprend les stations de dessalement d'eau de mer suivantes:

Station de dessalement d'Arzew : 90 000 m<sup>3</sup>/jour d'eau potable6.

Station de dessalement de Bousfer : 5 500 m<sup>3</sup>/jour d'eau potable.

Station de dessalement de AïnTurck : 5 000 m<sup>3</sup>/jour d'eau potable.

Station de dessalement de Chatt El Hilal : 200 000 m<sup>3</sup>/jour d'eau potable.

Station de dessalement de Mactaâ : 500 000 m<sup>3</sup>/jour d'eau potable.

- **Wilaya de Boumerdès**

La wilaya de Boumerdès comprend la station de dessalement d'eau de mer suivante :

Station de dessalement de Djinet : 100 000 m<sup>3</sup>/jour d'eau potable.

- **Wilaya d'El Tarf**

La wilaya d'El Tarf comprend la station de dessalement d'eau de mer suivante :

Station de dessalement d'El Tarf : 50 000 m<sup>3</sup>/jour d'eau potable.

- **Wilaya de Tipaza**

La wilaya de Tipaza comprend la station de dessalement d'eau de mer suivante :

Station de dessalement de Oued Sebt : 100 000 m<sup>3</sup>/jour d'eau potable.

Station de dessalement de Fouka : 120 000 m<sup>3</sup>/jour d'eau potable.

- **Wilaya de AïnTémouchent**

La wilaya de AïnTémouchent comprend la station de dessalement d'eau de mer suivante :

Station de dessalement de Béni Saf: 200 000 m<sup>3</sup>/jour d'eau potable.

**CHAPITRE 1**

**SITE DE LA STATION DE**

**DESSALEMENT EAU DE MER DE**

**SOUK TLETA**

## **I. Historique**

En marge de la visite présidentielle, les ministres des Ressources en eau et de l'Énergie et des Mines, ont procédé à l'inauguration d'une première station de dessalement d'eau de mer dans la commune de Souk Tléta, et ce, pour renforcer l'alimentation en eau potable de 19 communes. Cette infrastructure est d'une capacité de 200 000 m<sup>3</sup>/jour, soit l'équivalent de 73 millions m<sup>3</sup>/an. Cette nouvelle station a été réalisée avec une enveloppe avoisinant les 250 millions de dollars et couvrira les besoins en eau potable d'une population de plus de 300 000 habitants de 19 communes, y compris le chef-lieu de wilaya. Il est à rappeler que ce projet entre dans le cadre de l'investissement commun entre l'Algérie par le biais de l'Algerien Energy Company et la société malaisienne Malakoff. Pour l'acheminement de cette eau vers les localités urbaines, des canalisations ont été réalisées sur une distance de 150 km et l'édification de six réservoirs d'une capacité de 46 000 m<sup>3</sup> ainsi que la mise en service de cinq stations de pompage. Cette infrastructure sera d'un apport considérable pour l'approvisionnement de la wilaya en eau potable. Avec la mise en service de l'autre station de dessalement de Honaïne, on s'attend à une capacité de production de 400 000 m<sup>3</sup>/j. Cette situation permettra à la wilaya de dégager un excédent en eau potable qui sera destiné à d'autres wilayas et permettra à la nappe phréatique de se régénérer.

## **VI. Le fonctionnement de la station**

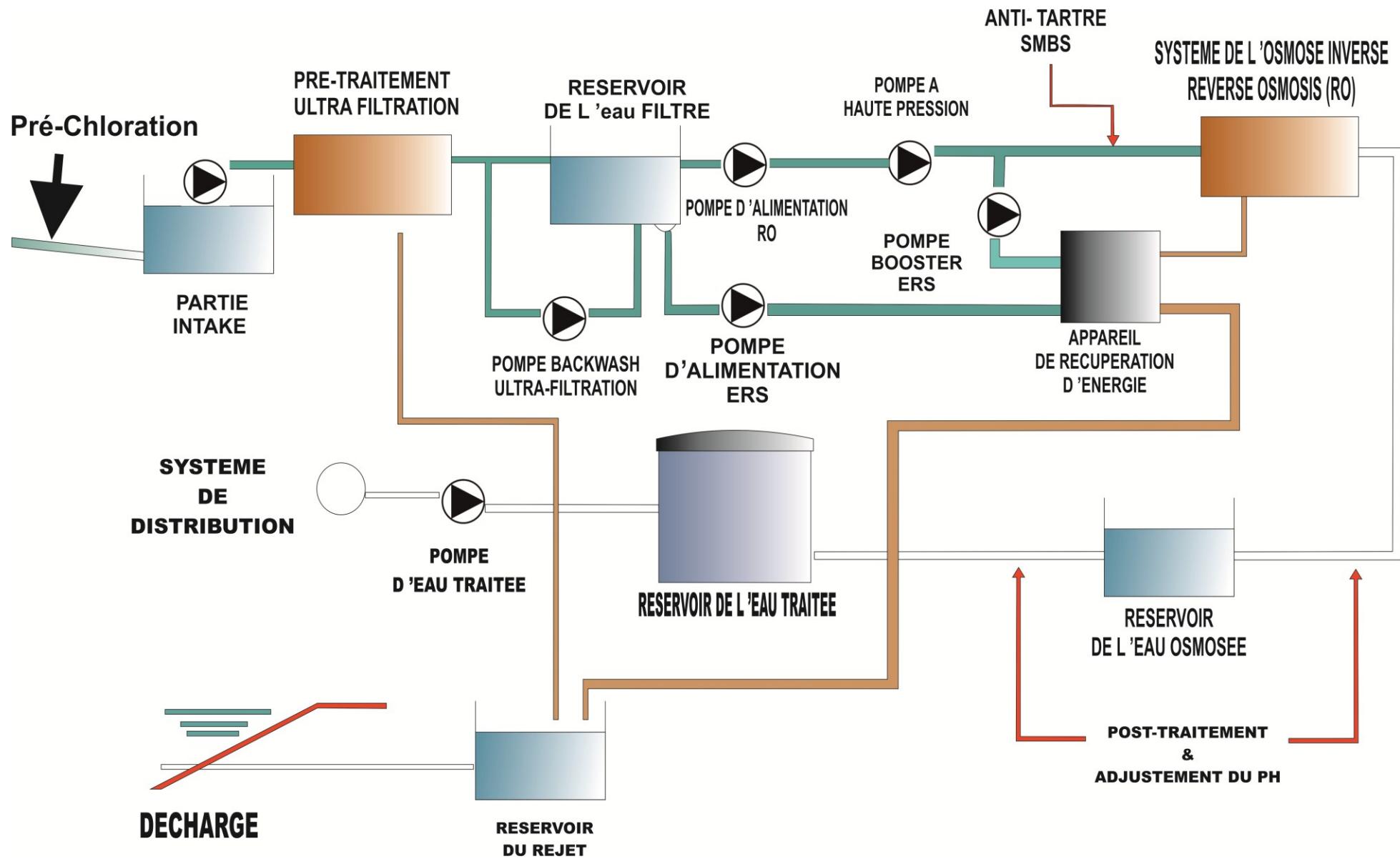
### **A. Les équipements majeurs du dessalement utilisés dans la station**

- Apport d'eau de mer et les écrans (écran Bar grossier, CBS et l'écran la bande Voyager, SCT).
- Les pompes à eau de mer d'admission
- Les trains d'ultra-filtration(UF)
- Nettoyage en place (CIP- clean in place) de la partie ultra-filtration (UF)
- Réservoir d'eau filtrée
- Des pompes du back Wash de la partie ultra-filtration (UF)
- Les pompes d'alimentation en osmose inverse (RO – Reverse Osmosis)
- Système de récupération d'énergie des pompes d'alimentation(ERS)
- Les trains d'osmose inverse (RO)
- Systèmes de récupération d'énergie(ERS)
- Les pompes à haute pression (HP) en Osmose inverse (RO)
- Récupération d'énergie du système(ERS) de rappel pompes
- Réservoir de chasse
- Nettoyage en place(CIP) de l'osmose inverse (RO)
- Cuve de contact du chlore
- Post-traitement
- Réservoir d'eau traitée
- Les pompes à eau traitée
- Neutralisation Pit déversoir

## ***CHAPITRE01- SITE DE LA STATION DE SOUK TLATA***

---

- Système de dosage de produits chimiques
- Utilitaires



**Figure I : Schéma et fonctionnement principal de la station de dessalement de Souk Tleta**

## **B. Admission de l'eau de mer**

L'arrivée de l'eau de mer à la station est une étape fondamentale, dans ce cas-là, la station reçoit de l'eau par effet de gravitation, à une profondeur de 12m, l'entrée du canal possède une crêpine afin d'empêcher les différents débris d'entrer et arrive directement vers deux réservoirs d'une hauteur de 17 m.

## **C. Prétraitement de l'eau**

Afin de prévoir une longue durée du système de l'osmose inverse, afin d'éviter l'introduction de produits indésirables dans le système, qui provoquera un remplacement inévitable des membranes, car le nettoyage de ces dernières est un processus à la fois complexe et long, il faut stopper le train, pour cela, le processus du prétraitement est nécessaire pour la protection des membranes RO, car ces dernières devraient acquérir de l'eau avec une faible turbidité, qui est loin de l'être malgré le prétraitement à cause de la nature de l'encrassement et de colmatage.

- . Système de dosage de chlore
- Chambre d'admission de l'eau de mer
- Ecran à barres grossier (CBS)
- Ecran à bandes fines (TBS)
- Les pompes de l'eau de mer
- Ultra-système de filtration membranaire(UF)
- Réservoir de stockage de l'eau filtrée
- Les pompes du retro lavage de l'UF
- UF système CIP

### **1. Système de dosage en chloration dans l'admission**

L'hypochlorite de sodium (NaClO) est dosé périodiquement dans la chambre d'admission pour la chloration. L'hypochlorite de sodium (NaClO) aura pour but de désinfecter l'entrée, et de réduire la croissance biologique au stade de prétraitement, et dans la tuyauterie d'alimentation de l'UF. Le dosage doit être généralement de 10 mg / l de chlore pendant 1 heure ou 5 mg / l de chlore pendant 2 heures en cas de besoin. À la fin de la période du dosage de la ligne, le dosage doit être rincée avec de l'eau de service pour déplacer l'ensemble du chlore dans l'entrée.

L'hypochlorite de sodium (NaClO) est stocké dans un réservoir de FRP à l'aide des pompes à membrane. Ce réservoir de stockage à la zone de prétraitement est également la source de NaClO utilisé pour le système du CIP des membranes de l'UF. En raison de sa nature oxydante forte, le chlore ne doit pas être autorisé à atteindre les membranes de l'osmose inverse car il les oxyde. L'élimination du chlore de l'eau de mer est accomplie par le dosage d'un agent réducteur.

Dans ce cas, le méta bisulfates de sodium (SMBS) est utilisé. Son but est l'élimination du chlore pour ne pas atteindre les membranes de l'osmose inverse.

Le premier dosage SMBS injecte la solution dans la ligne d'alimentation de l'eau de mer, juste avant les banques de l'ultrafiltration. Le dosage n'est pas une injection continue, mais il est synchronisé avec le système du dosage du chlore. Un temps prédéterminé après le dosage du chlore commence le système du dosage SMBS injecte la méta bisulfate de sodium pour réagir avec et de retirer le chlore de l'eau.

Un second dosage est prévu à l'entrée de la ligne de l'eau filtrée pour les trains de l'osmose inverse afin d'enlever le chlore libre dans l'eau filtrée fournie au système de l'osmose inverse. Toutefois, la lecture ORP est vue dans LA ligne d'alimentation en eau de l'osmose inverse, le système de dosage va commencer à affecter de la chloration automatique.



*Figure 1 Réservoirs de stockages*

## **2. Chambre d'admission d'eau de mer**

Le système d'entrée est une admission ouverte, l'eau est aspirée dans l'entrée par l'intermédiaire d'un pipeline, qui s'étend à environ 900 mètres à la mer afin d'assurer que le l'eau de mer aspirée est sans débris et est plus homogène dans ses caractéristiques. L'eau de mer coule par gravité dans le réservoir. Les Ecran de barre grossier (CBS) et Ecran à bande fine (TBS) sont logés dans la chambre pour la première étape de filtration.

### **a) Ecran de barre grossier (CBS) et Ecran à bande fine (TBS)**

La première étape du traitement consiste à faire passer l'eau de mer à travers de 2 écrans. Le premier contient des ouvertures de 20 mm qui est l'Ecran de barre grossier (CBS). Là où on trouve deux dégrilleurs, une en marche et l'autre en veille. Ce dégrilleur va exclure les plus grands organismes présents dans l'eau de mer tels que les poissons et les planctons. Il peut fonctionner en mode automatique en fonction du niveau différencié sur les côtés amont et aval ou par une minuterie de pré-ensemble pour chaque cycle. Aussi, il y a un racleur pour le nettoyage de ce dégrilleur. Il descend 4m de hauteur et après on ouvre le racleur pour laisser échapper toutes les particules qui colmatent ce dégrilleur, quand il atteint les parois, il ferme automatiquement et après il monte et enfin il jette ces débris dans une cuve. Cette dernière est nettoyée manuellement.

La deuxième étape de sélection utilise un dégrilleur fin (TBS) de 200 microns. On trouve deux dégrilleurs fins ; une en marche et l'autre en veille. Ces TBS vont filtrer les petits organismes, les solides fins ainsi que fournir une protection pour le système en aval de l'ultrafiltration (UF) qui est un système très fragile aux organismes. Les TBS sont fournis avec un système d'auto-nettoyage afin d'enlever les débris accumulés au fil du temps. Les écrans peuvent être configurés en mode automatique sur la base du différentiel de niveau ou par une minuterie de présérie.



**Figure 2      Ecran de barre grossier (CBS) et Ecran à bande fine (TBS)**



*Figure 3 Racleur du CBS*



*Figure 4 Bassin de rejet pour TBS*

### **3. Station de pompage de l'eau de mer**

Chaque pompe offre 5300 m<sup>3</sup> par heure d'eau de mer blindés avec une pression de refoulement de 3,5 bars jusqu'à l'entrée des trains d'ultrafiltration (UF). Il y a un total de cinq pompes en service et une en veille pendant le fonctionnement normal (voir le tableau 3 au-dessus pour les caractéristiques des pompes).

Chaque pompe envoie de l'eau de mer dans un collecteur commun qui transporte l'eau de mer au système de prétraitement appelé Ultrafiltration UF. Ces pompes sont commandées par des dispositifs à fréquence variable afin de minimiser les chocs du système de démarrage et l'arrêt du fonctionnement des pompes et de contrôler l'UF.

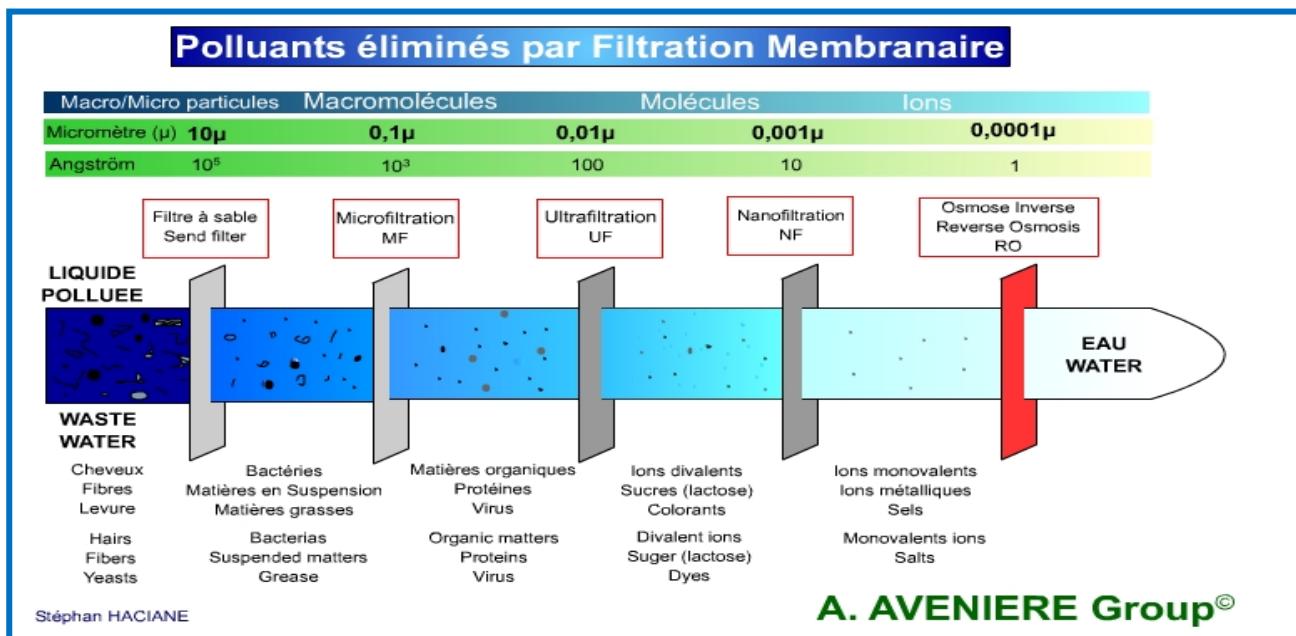
De l'en-tête commun, les points d'échantillonnage sont prévus pour le prélèvement manuel et l'alimentation des analyseurs en ligne. Ces analyseurs sont situés en dehors du puits sec.



*Figure 5 Station de pompage de l'eau de mer vers l'UF*

#### 4. Le système de l'ultrafiltration (UF)

L'ultrafiltration (UF) est une méthode de séparation membranaire par laquelle des particules en solution ou en suspension (nanoparticules, macromolécules, la plupart des virus) sont séparées du mélange liquide (sang, eau, lait, etc.) qui les contenait. La taille de ces matières varie entre  $10^2$  -  $10^0$  nanomètre (nm). L'ultrafiltration n'est pas fondamentalement différente de la microfiltration ou de la nanofiltration, si ce n'est qu'elle retient des matières de tailles différentes de ces dernières. L'ultrafiltration est majoritairement utilisée pour séparer des particules dissoutes alors que la microfiltration est majoritairement utilisée pour séparer des particules en suspension<sup>1</sup>



*Figure 6 Polluants éliminés par l'Ultrafiltration*

#### Propriétés

L'ultrafiltration est un procédé baro-membranaire car le transfert a lieu sous l'effet de la pression. Cette pression transmembranaire (PTM) est entre 1 et 10 bars<sup>2</sup>. Ces membranes sont alors dites « basses pressions ». Le mécanisme de séparation se fait par tamisage, le transfert a lieu dans une membrane poreuse et résulte de la différence de la taille des composants par rapport à celle des pores de la membrane. Les pores d'une membrane d'ultrafiltration sont entre 2 et 50 nm. Ils sont appelés des méso pores

**a) Dans l'industrie**

L'ultrafiltration est utilisée dans l'industrie pour purifier et/ou concentrer des solutions de macromolécules ( $10^3$  -  $10^6$ )

Industrie agroalimentaire extraction de l'eau contenu naturellement dans le lait avant de le transformer en fromage industriel. Le but est une valorisation extrême du lait par un gain de rendement en temps d'égouttage des fromages et en volume fabriqué (les éléments constituant le petit-lait sont incorporés au fromage alors que les procédés traditionnels les destinent à être des sous-produits ;

Séparation et purification des protéines<sup>3</sup> ;

Clarification de jus de fruit ;

Traitements des eaux usées.

**a) En traitement de l'eau**

En eau potable, l'ultrafiltration est caractérisée par un seuil de coupure de l'ordre de 0,01 µm. Toutes les molécules de taille supérieure sont stoppées (pollens, algues, parasites, bactéries, virus, germes et grosses molécules organiques), laissant filtrer à l'arrivée une eau parfaitement clarifiée et désinfectée sans utilisation de produits chimiques.

En assainissement, l'ultrafiltration est utilisée comme clarificateur et sert donc à séparer les boues biologiques de l'effluent épuré.

Procédé universel qui peut être installé seul ou intégré dans une chaîne de traitement plus complexe, l'ultrafiltration clarifie et désinfecte l'eau en une seule étape.

**b) Le système utilisé par la station**

Hy flux Kristal TM ultrafiltration® (UF) utilise des modules avec nominalement de cinquante à soixante-dix litres par m<sup>2</sup> et par heure de flux de conception et ayant une surface spécifique totale de soixante-dix m<sup>2</sup> par module, ces modules sont utilisés pour le processus de filtration. Le système d'ultrafiltration se compose de cinq banques, avec chaque banque alimente neuf trains. Huit des trains sont en service pendant que le neuvième train est en lavage à contre-courant, ou CIP (nettoyage sur place) ou en cours de maintenance. Chaque train est fourni avec un espace de 162 modules, mais seulement 144 modules sont installés. Cette configuration permet une certaine augmentation de capacité de l'usine si nécessaire.

Les membranes d'ultrafiltration sont de type fibres creuses. Ces dernières contiennent 8000 fibres à l'intérieur à chaque module. Ils ont un diamètre inférieur à 0.1 µm.



*Figure 7 Les trains de l'Ultrafiltration*

**c) Le fonctionnement de l'ultrafiltration**

Les systèmes de Hyflux Kristal TM ® fonctionnent sur un mode dans lequel le courant d'alimentation s'écoule à l'extérieur de la membrane avec le filtrat s'écoulant à travers l'intérieur. Le courant de recyclage s'écoule sur partie extérieure de la membrane et concentré sur la longueur de la membrane. Le courant de recyclage est soit renvoyé vers la chambre d'admission ou est saigné-off pour réduire l'accumulation de matières solides dans les modules à membranes. Voir ci-dessous les caractéristiques des membranes d'ultrafiltration

**Tableau 1 Caractéristiques des membranes d'ultrafiltration**

Spécifications du module	Kristal™600B Module
Dimensions ( $\varnothing$ x L)	8" par 2 m
Type de débit	À l'extérieur – in
Entrée alimentation	NPT 1.5"
Sortie du perméat	NPT 1.5"
Sortie du rejet	NPT 1"
Poids à expédition (kg)	55
Poids opérationnel (kg)	100
Constructions de logements	PVC / ABS
Matériaux d'étanchéité	Hyflux Matériaux de trame composite exclusifs
Température de fonctionnement de la gamme (°C)	5 – 40
Gamme de pH en fonctionnement	2 – 10
Gamme de pH de nettoyage	2 – 11
Service typique TMP (bar)	0.2 – 2.0

Les membranes sont contrôlées en permanence afin que la pression transmembranaire (TMP) puisse être mesurée et normalisée afin de surveiller le rendement. Dans le cadre de la conception, utilisant le procédé d'écoulement transversale du système de membrane d'ultrafiltration, le rejet du débit à travers les membranes dans un train, est recyclé vers l'entrée de sorte qu'il ne soit pas perdu à partir du système.

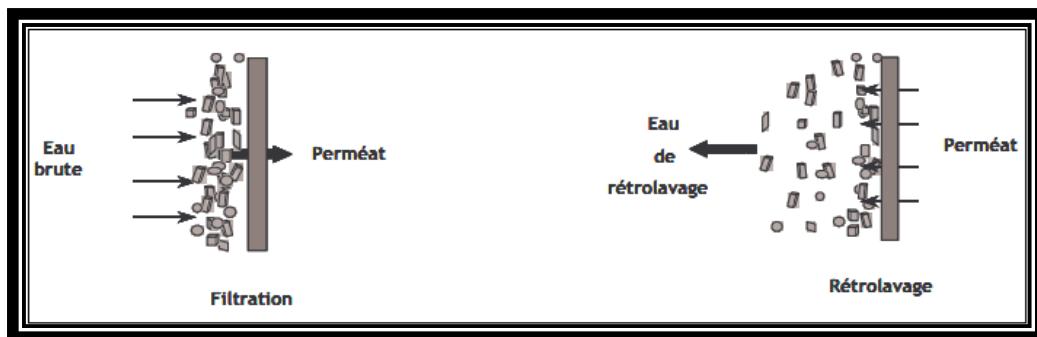
#### **d) Lavage à contre-courant**

Avec l'accumulation de matières solides pendant la filtration, la résistance à l'écoulement augmente, ce qui peut être surmontée en soumettant la membrane à un débit inverse à l'ultrafiltration. L'air est introduit à récurer en même temps d'améliorer l'efficacité du contre-lavage. Cette opération de rétro lavage est effectuée périodiquement, qui peut être prédéterminée par le débit total ou le temps écoulé, généralement tous les 30 - 45 minutes. Le système est commandé de telle sorte que seul un train entre

## **CHAPITRE01- SITE DE LA STATION DE SOUK TLETA**

dans l'étape de rétro lavage. Le flux de lavage est évacué directement à l'exutoire. L'efficacité du procédé dépend de plusieurs paramètres opératoires tels que

- La pression transmembranaire de rétro lavage
- Le débit de rétro lavage
- La durée du rétro lavage
- La structure du dépôt crée pendant la phase de filtration



*Figure 8 Filtration et lavage à contre-courant*

### **5. Réservoir de stockage de l'eau filtrée et la station de pompage**

L'eau filtrée produite par l'ultrafiltration des trains est stockée dans un réservoir. L'eau filtrée à partir de ce réservoir, est utilisée comme eau d'alimentation pour les trains de l'osmose inverse. Seule une partie est utilisée pour le lavage des membranes d'ultrafiltration afin de maintenir la forme d'exploitation du flux des membranes pour permettre une amélioration au niveau du nettoyage des modules à membranes. La capacité de bassin de stockage est 11000 m<sup>3</sup>.

#### **a) Le nettoyage sur place de l'ultrafiltration -Clean-In-Place (CIP)**

**Le CIP est nécessaire** périodiquement pour permettre un nettoyage plus efficace que le lavage à contre-courant. Un nettoyage sur place (CIP) du système est prévu pour l'ultrafiltration afin de maintenir ses performances de filtration. Enfin, il faut un lavage à contre-courant après et avant chaque étape de CIP.

Il y a deux types de lavages chimiques et qui sont

- Entretien fréquent Nettoyage (MC) qui est un processus de courte durée de nettoyage. Son pH est de 10 à 11. Les produits de nettoyage sont le chlore alcalin et NaOH. On fait ce nettoyage quand
  - ✓ Une durée de service des trains soit égale ou supérieure à 120 heures
  - ✓ Il y a diminution de débit de train (la plus importante et la plus contrôlée)
  - ✓ Il y a augmentation de la pression de service
- Le nettoyage de récupération (RC), qui exige un arrêt et qui demande aussi plus de temps mais donne un nettoyage plus profond de la membrane. Le nettoyage (RC) du train UF sera effectué à l'aide d'acide HCl.

## D. L'osmose inverse

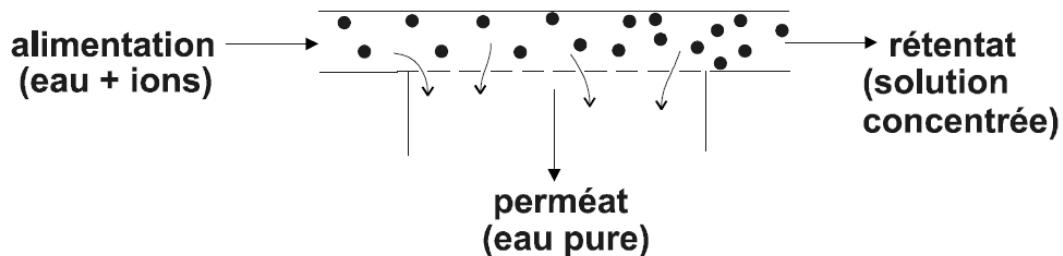
### 1. Définition

L'osmose inverse est un procédé industriel efficace de dessalement. Avec une pression de 50 à 80 bars – la pression osmotique de l'eau de mer étant d'environ 60 bars<sup>4</sup> –, environ 50 % de l'eau d'une eau de mer peut être extraite, le sel se retrouve concentré dans les 50 % restants. L'eau "osmosée" convient pour tous les usages de l'eau potable (par exemple la fabrication de sodas<sup>5</sup>).

L'osmose inverse est un procédé de séparation en phase liquide par perméation à travers des membranes semi-sélectives sous l'effet d'un gradient de pression.

L'écoulement s'effectue en continu tangentiellement à la membrane. Une partie de la solution à traiter (débit  $Q_0$ ) se divise au niveau de la membrane en deux parties de concentrations différentes

- une partie (débit  $Q_r$ ) passe à travers la membrane (perméat)
- une partie qui ne passe pas à travers la membrane (concentrât ou retentât) et qui contient les molécules ou particules retenues par la membrane

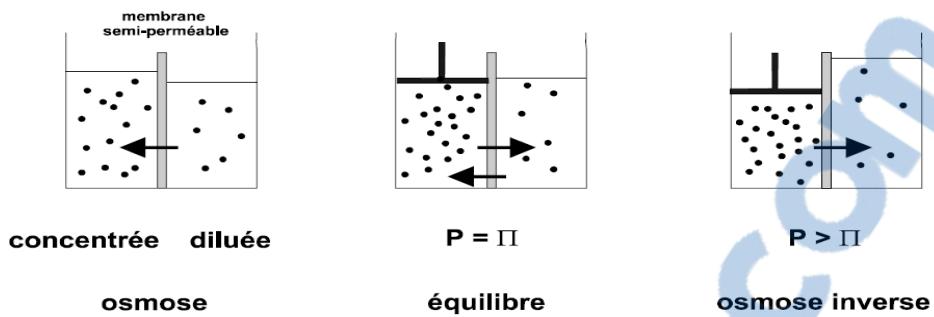


*Figure 9 Schéma de l'osmose inverse*

### 1. Principe de fonctionnement

#### a) Pression osmotique

L'osmose est le transfert de solvant à travers une membrane sous l'effet d'un gradient de concentration. Si on considère un système à deux compartiments séparés par une membrane semi-sélective et contenant deux solutions de concentrations différentes, l'osmose se traduit par un flux d'eau dirigée de la solution vers la solution concentrée. Si on applique une pression sur la solution concentrée, la quantité d'eau transférée par osmose va diminuer. Avec une pression suffisamment forte, le flux d'eau va même s'annuler cette pression est nommée la pression osmotique  $P$  (en faisant l'hypothèse que la solution diluée est de l'eau pure). Si on dépasse la valeur de la pression osmotique, on observe un flux d'eau dirigé en sens inverse du flux osmotique c'est le phénomène d'osmose inverse.



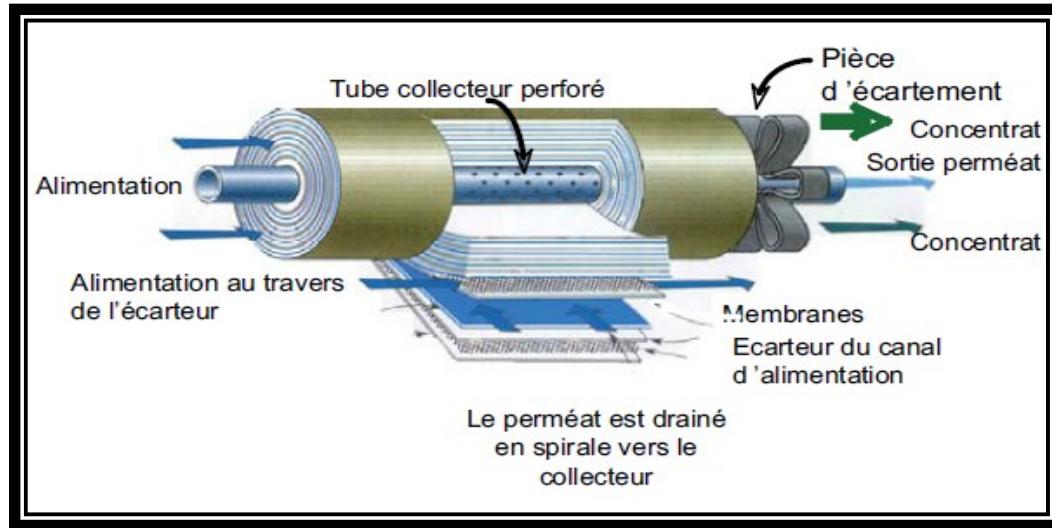
*Figure 10 les étapes de l'opération de l'osmose inverse*

#### a) Membranes

Les membranes sont le plus souvent fabriqués en acétate de cellulose ou en polymères de synthèse (polyamides, polysulfones). Elles peuvent être planes ou tubulaires (épaisseur de l'ordre de 200 µm). Les membranes sont caractérisées par leur qualités de stabilité chimique (pH, oxydants, dichlore ...), de stabilité thermique (important facteur pour les utilisations biologiques où il y a stérilisation en autoclave), de stabilité microbiologique (dégradation bactérienne pour les membranes en acétate de cellulose) et de résistance mécanique. Leur coût intervient dans 40 à 50 % de l'investissement d'une unité d'osmose inverse.

Pour être mises en œuvre les membranes doivent être montées dans des supports appelés modules. Une enceinte résistante à la pression est toujours nécessaire. On trouve trois types principaux

- ✓ Module spirale une membrane plane est enroulée autour d'un tube creux.
- ✓ Module tubulaire une membrane tubulaire est fixée sur un support poreux.
- ✓ Module à fibres creuses : Le liquide à traiter circule perpendiculairement à l'axe des fibres tandis que le concentrat est recueilli dans une enceinte qui enveloppe le faisceau et permet son évacuation à une des extrémités du module. Le perméat s'écoule à l'intérieur de chacune des fibres puis dans un collecteur<sup>6</sup>.



*Figure 11 le fonctionnement d'une membrane*

### b) L'osmose inverse dans la station

Le dessalement de l'eau de mer dans la station est réalisé par une osmose inverse à un seul passage.

La section d'osmose inverse de l'installation comprend des équipements suivants

- système de dosage Antitarbre
- Pompes d'alimentation osmose inverse (OI)
- Système de récupération d'énergie des pompes d'alimentation (ERS)
- Osmose inverse (RO) pompes à haute pression
- Trains de RO
- Système de récupération d'énergie (ERI)
- Pompes ERS
- Rinçage du réservoir
- système CIP des trains RO



*Figure 12 la section d'osmose inverse*

Treize unités de trains RO sont installées et 12 trains sont en opération pour fournir le maximum de débit de perméat. Le treizième train est un train de veille.

La ligne d'alimentation de la pompe à haute pression à chaque train RO a un contrôleur vanne qui ouvre progressivement par minuterie ; Ceci est important, car un taux trop élevé d'augmentation de la pression pourrait endommager les membranes. Pendant le démarrage, la vanne est maintenue partiellement ouverte pendant quelques minutes (valeur nominale) pour permettre à l'air qui se trouve à l'intérieur des tubes à être expulsé du système par la soupape d'évacuation d'air.

Les trains de l'osmose inverse (RO) sont conçus sur la base de l'utilisation de tubes de pression collecteurs pour réduire les besoins de tuyauterie et de simplifier la construction.

L'eau dessalée se produit dans cette étape d'osmose inverse (RO). Le rendement de la station est environ 45% de l'eau d'alimentation qu'on appelle le perméat et la saumure est l'eau rejetée en arrière à la mer. Les trains de l'osmose inverse (RO) produisent environ 202 MLD (million litre par jour) de perméat, pour lequel 200 MLD sont exporté et le reste est utilisé en interne.

## **2. La station de pompage pour l'alimentation de l'osmose inverse**

La station de pompage contient six unités de pompes d'eau de lavage à contre-courant. Les 5 pompes sont en service avec la sixième étant la pompe commune en veille. Les pompes sont installées avec VFD (variateur de fréquence) dispositifs de contrôle pour fournir le débit requis pour le lavage de l'ultrafiltration.

Neuf unités de pompes d'alimentation sont fournies pour les trains de l'osmose inverse. Au débit maximal de l'usine, huit des pompes sont en service, la neuvième reste en réserve. Les numéros de pompes de service dans de service sont fondés sur le nombre de trains RO en service ; chaque pompe peut alimenter 1.5 train, avec une pression de service de 13 bars. Les pompes sont installées avec VFD qui conçoit et maintient une pression.

Sept unités de pompes d'alimentation de l'ERS avec des démarreurs progressifs sont prévues, chaque pompe étant dimensionnée pour fournir de l'eau filtrée pour les systèmes ERS (Système de récupération d'énergie) pour deux trains. Au maximum six pompes sont en service avec la septième étant en mode veille. Le numéro de pompes de service est fondé sur le nombre de trains RO en service. Toutes les pompes sont au-dessus de la construction centrifuge horizontale. Et fabriquée avec des matériaux appropriés afin de garantir un bon fonctionnement avec de l'eau de mer.

### **a) Système de dosage anti tarte**

L'entartrage est dû à la formation de dépôt de sels minéraux (matières en suspension inorganiques) qui ont tendance à se former sur les surfaces d'échange. Ces dépôts sont constitués principalement par du carbonate de calcium, de l'hydroxyde de magnésium et du sulfate de calcium afin de minimiser l'échelle potentielle, l'acide sulfurique ou inhibiteur de l'échelle est utilisé pour l'eau de mer par osmose inverse (RO). L'usine est équipée d'un système de dosage antitartrage. Cela permet à l'osmose inverse (RO) d'avoir un pH de l'eau qui est presque équivalente au pH de l'eau de mer normale de 7.8 à 8.2 et offre une meilleure qualité de perméat. Les inhibiteurs d'entartrages ce sont des produits tartrifuges que l'on injecte à très faibles doses dans l'eau d'appoint ; ils ont la propriété de minimiser les dépôts qui se forment sur les parois d'échange.

**a) Les pompes d'alimentation de L'osmose inverse (RO)**

Les pompes d'alimentation de l'osmose inverse (RO) fournissent de l'eau filtrée à une pression élevée. Ils compensent également la pression d'alimentation requise au fil du temps. Il y a 9 pompes d'alimentation de RO. Le débit de chaque pompe est 1260 m<sup>3</sup>/h et la pression est 13 bars.

Avant d'entrer dans les membranes d'osmose inverse, l'eau de mer clarifiée est pressurisée au moyen de la pompe haute pression généralement entre 55 et 65 bars, en fonction de la température et de la salinité de l'eau.

Chaque train de l'osmose inverse est pourvu d'une pompe à pression élevée, par conséquent, treize unités de pompes RO à haute pression sont fournies.

Ces pompes sont de type pompes centrifuges et fabriquées à partir de matériaux en acier inoxydable duplex et fonctionnent à une vitesse fixe.

Quand un train RO est mis en service, cette pompe commence par la séquence de démarrage et met sous pression l'eau d'alimentation au train RO.

Pour éviter d'endommager les membranes de l'osmose inverse, la pression maximale développée par ces pompes doit être lentement admise dans le train RO jusqu'à ce que la pression de tarage soit atteinte. A la fin, une soupape de commande est montée sur la conduite d'évacuation de chacune des pompes. Au cours de la séquence de démarrage d'un train, cette soupape s'ouvre lentement pour augmenter graduellement la pression d'alimentation.

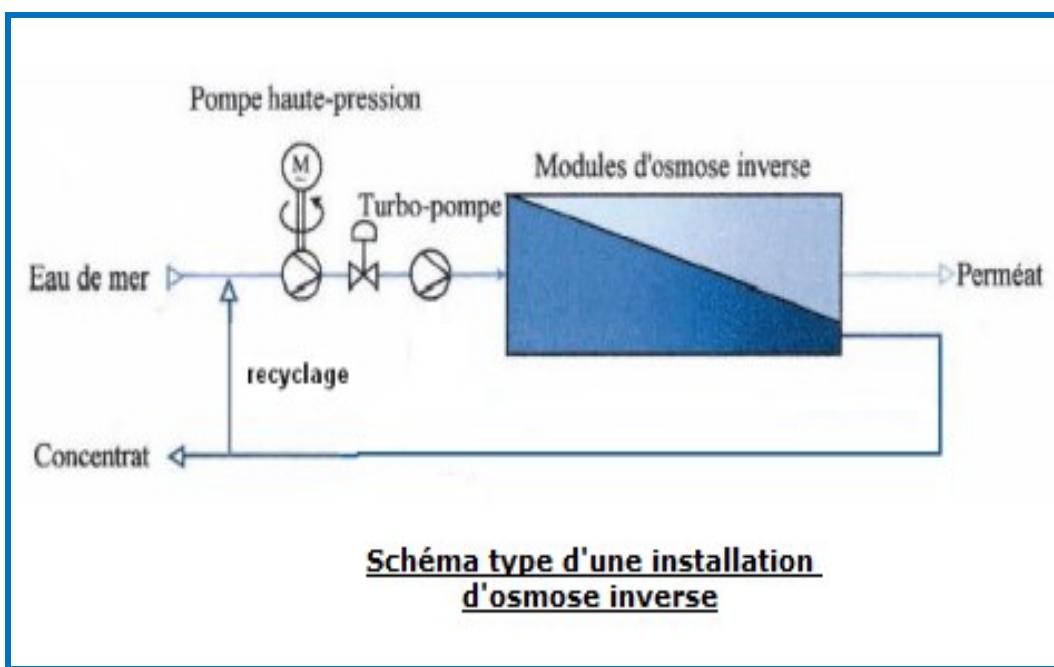
Ces pompes à vitesse fixe stimulent la pression de l'eau filtrée à la pression requise pour l'opération de l'osmose inverse (RO) du système. La haute pression filtrée de l'eau provenant de cette source est mélangée avec l'eau filtrée par le système sous pression ERS (Récupération de l'énergie de pression de l'osmose inverse (RO) pour alimenter l'osmose inverse (RO) en train.

**b) Système de récupération d'énergie (ERS) pompes d'alimentation**

L'eau de mer filtrée est pompée vers le côté basse pression du système ERS par des pompes d'alimentation ERS. Les pompes sont équipées de démarreurs progressifs pour le démarrage en douceur et l'arrêt. Les pompes et les valves de contrôle de flux à en-têtes principaux sont utilisées pour maintenir l'alimentation.

Un système de récupération d'énergie isobare est utilisé pour récupérer l'énergie de RO avant leur rejet dans l'exutoire. Les dispositifs isobariques transfèrent la haute pression dans le courant de rejet de l'eau en raison de la haute pression, à la basse pression qui est alimentée jusqu'à l'RO. Pour permettre à l'eau sous pression filtrée d'entrer dans la ligne d'alimentation RO, la pression doit être augmentée légèrement. Ceci est fait en utilisant les pompes ERSBooster (11 bars). Le débit d'eau filtrée à travers cette pompe est contrôlé par une variation de l'affichage VFD pour le contrôle de chaque pompe de surpression ERS.

On trouve dans cette station sept pompes d'ERS avec une pression de 3 bars. Chaque ERS alimente deux trains de RO.



*Figure 13 Schéma type d'une installation d'osmose inverse*

**c) Nettoyage sur place (CIP) d'osmose inverse (RO)**

Le nettoyage sur place (CIP) est fourni afin de nettoyer les membranes de l'osmose inverse (RO) en utilisant des produits chimiques afin d'éviter l'encrassement des membranes. Le nettoyage chimique est un contrôle déterminé par l'opérateur et la fonction doit être déclenchée manuellement.

**E. Stade du post-traitement**

En fonction de l'application de l'eau traitée, le perméat de l'osmose inverse (RO) devrait être traité avant l'usage final. Alors, il doit passer par le stade de post-traitement afin de satisfaire les exigences finales d'eau traitée, dont la désinfection par le dosage d'hypochlorite de sodium (NaClO).

Le perméat de l'osmose inverse (RO) est "agressif" en raison de très négative LSI (Indice de Langelier de Saturation) et la valeur doit être augmentée afin de protéger le stockage et la distribution en utilisant le dioxyde de carbone fourni à l'état liquide (CO<sub>2</sub>) et le système de la chaux. Le perméat du procédé de l'osmose inverse a un pH relativement acide après la première passe, un TDS de 70 à 350 mg/l, 2 à 6 mg/l de calcium et une concentration de magnésium et de Bore entre 0,5-1,2 mg/l, basé sur la salinité de l'eau brute et de la température.

Pour accomplir tout ce qui précède, les équipements suivants sont inclus

- dosage du chlore (à l'aide d'hypochlorite de sodium)
- cuve de contact du chlore
- dioxyde de carbone et le dosage de la chaux
- stockage des eaux traitées
- pompes à eau traitée.

# **CHAPITRE II**

## **BASES SUR LA**

## **MECANIQUE DES**

## **FLUIDES**

## **I. Introduction**

On va vous présenter dans ce chapitre quelques rappels des notions de mécanique des fluides, ainsi que les deux principaux composants pour étudier une station de pompage, les réseaux des pompes et des conduites.

## **VII. Rappels des notions de mécanique des fluides**

### **A. Débit**

#### **1. Débit massique :**

$$Q_m = \frac{\Delta m}{\Delta t} \text{ en kg/s}$$

$\Delta m$  : masse de fluide qui a traversé une section droite de la conduite [kg]

$\Delta t$  : temps d'écoulement le fluide [s]

#### **1. Débit volumique :**

$$Q_v = \frac{dv}{\Delta t} \text{ en } m^3/s$$

$dv$  : volume de fluide qui a traversé une section droite de la conduite [ $m^3$ ]

$\Delta t$  : temps d'écoulement le fluide [s]

### **B. Régimes d'écoulements**

#### **1. Régime laminaire**

L'écoulement d'un fluide est dit laminaire lorsqu'il est strictement permanent ou lorsque le champ de vitesse évolue de façon continue et ordonnée en fonction du temps et de l'espace. Pour un tel écoulement d'un fluide réel, la vitesse peut avoir une intensité variable dans une section droite à cause de la viscosité.

La vitesse est nulle pour les particules voisines de toute surface matérielle immobile et maximale pour les points les plus éloignés.

#### **2. Régime transitoire**

Les régimes transitoires sont des phénomènes complexes. Ce régime dépend directement de variations brutales de la vitesse d'écoulement dans la conduite.

Ces variations de vitesse sont à l'origine de variations de pression (également appelées coups de bâlier) qui peuvent être positives ou négatives.

Les régimes transitoires ou coups de bélier ont des causes très diverses comme :

- Disjonction électrique
- Manœuvre rapide d'ouverture ou de fermeture d'un robinet-vanne
- Fin de remplissage d'une conduite
- Implosion d'une poche de cavitation
- Arrêt et démarrage d'une pompe

Dans le cas d'une station de pompage, les régimes transitoires les plus dangereux sont consécutifs à une disjonction électrique (ou panne de courant).

### 3. Régime turbulent

Les écoulements turbulents dans le régime permanent n'existent pas. On ne peut constater, dans certains cas, qu'un régime permanent en moyenne, encore appelé : pseudo-permanent dans lequel les trajectoires s'enchevêtrent.

Le plus fréquent sur le plan industriel : la vitesse des particules de fluide qui se succèdent en un point de l'écoulement, plus élevée que précédemment, varie au cours du temps.

Cependant, la vitesse moyenne de ces particules est indépendante du temps.

### 4. Nombre de Reynolds (Re)

Le régime d'écoulement dépend du nombre de Reynolds (Re) (Tableau 1), c'est un nombre sans dimension, donné par la formule suivante :

$$Re = \frac{\rho U_m D}{\mu}$$

$\rho$ : masse volumique [Kg/m<sup>3</sup>]

$U_m$ : vitesse moyenne du fluide [m/s]

$D$ : diamètre de la canalisation [m]

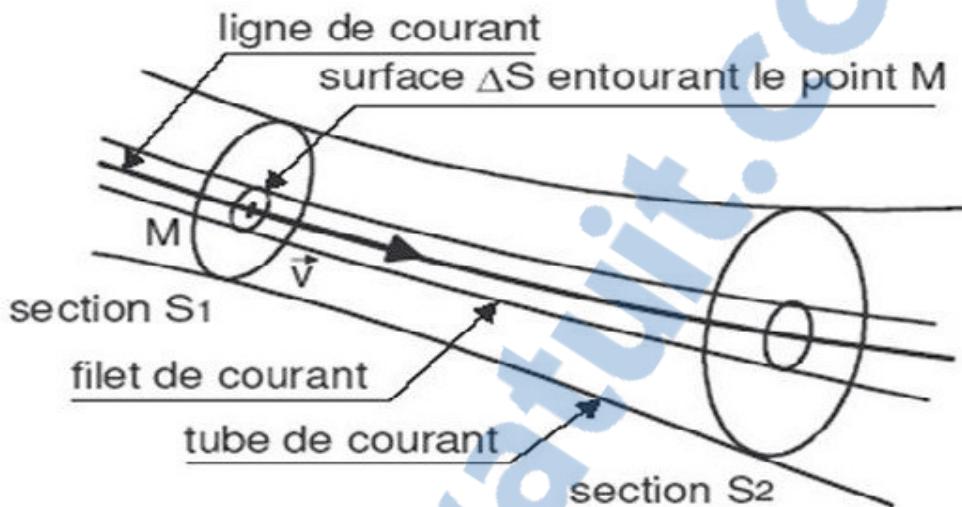
$\mu$ : viscosité dynamique de fluide [N.s/m<sup>2</sup>]

**Tableau 1 : Régimes d'écoulements**

Ecoulement dans conduite Circulaire	Ecoulement entre deux Plaques parallèles	Ecoulement autour d'une sphère
Re> 4000 turbulent Re< 2000 laminaire 2000 <Re< 4 000 Transitoire.	Re< 500 laminaire Sinon turbulent	Re< 1 laminaire Sinon turbulent

### C. Equation de conservation de la masse (équation de continuité)

#### 1. Définition



*Figure 14 Représentation de l'écoulement*

#### Ligne de courant

Les lignes de courant sont des lignes imaginaires de l'écoulement indiquant la direction du mouvement du fluide. Une ligne de courant est tangente en chacun de ses points au vecteur vitesse du fluide en ce point.

#### Tube de courant

Ensemble de ligne de courant s'appuyant sur une courbe fermée.

#### Filet de courant

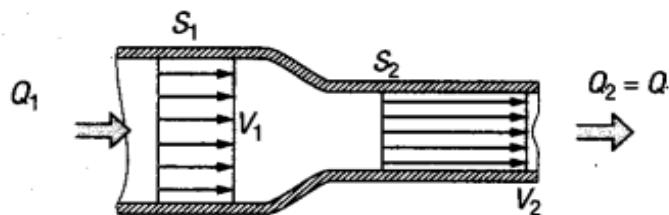
Filet de courant s'appuyant sur un petit élément de surface  $\Delta s$ , La section de base  $\Delta s$  du tube ainsi est suffisamment petite pour que la vitesse du liquide soit la même en tous ses points.

#### 5. Conservation du débit :

Considérons un tube de courant entre deux sections S<sub>1</sub> et S<sub>2</sub>. Pendant l'intervalle de temps  $\Delta t$ , infiniment petit, la masse  $\Delta m_1$  de fluide ayant traversé la section S<sub>1</sub> est égale à la masse  $\Delta m_2$  ayant traversé la section S<sub>2</sub>. Donc

$$Q_{m1} = Q_{m2}$$

En régime stationnaire, le débit-volume est le même à travers toutes les sections droites d'un même tube de courant. (*Figure 15*)



**Figure 15 Conservation d'énergie**

#### 6. Expression du débit en fonction de la vitesse :

Le débit-volume ( $Q_v$ ) est aussi la quantité de liquide occupant un volume cylindrique de base égale à vitesse  $V$ , correspondant à la longueur de trajet effectué pendant l'unité de temps, par une particule de fluide traversant la section  $S$ .

$$Q_v = U \cdot S$$

#### 7. Vitesse moyenne :

Sous l'effet des forces d'interaction entre les molécules de fluide et celles de la paroi, chaque molécule de fluide ne s'écoule pas à la même vitesse. On dit qu'il existe un profil de vitesse (*Figure 16*)



**Figure 16 Profil de vitesse**

Dans une section droite  $S$  de la canalisation, on appelle la vitesse moyenne  $U_m$  la vitesse telle que :

$$U_m = \frac{Q_v}{S}$$

La vitesse moyenne  $U_m$  apparaît comme la vitesse uniforme à travers la section  $S$  qui assurerait le même débit que la répartition réelle des vitesses (*Figure 3*).

Si l'écoulement est isochore, cette vitesse moyenne est inversement proportionnelle à l'aire de la section droite. Équation de continuité :  $Q_v = U_{m1} \cdot S_1 = U_{m2} \cdot S_2 = cte \Rightarrow \frac{U_{m1}}{U_{m2}} = \frac{S_2}{S_1}$

La vitesse moyenne est d'autant plus grande que la section est faible.

## D. Equation de Bernoulli :

### 1. Cas des fluides parfaits :

Les fluides parfaits sont des fluides permanents et sa viscosité nulle. Ils permettent d'établir l'équation de Bernoulli facilement.

Le tube de courant est énergétiquement isolé et il y a conservation de l'énergie entre sa section d'entrée S<sub>1</sub> et sa section de sortie S<sub>2</sub>

A partir de l'intégration de l'équation d'Euler en régime permanent ( $\frac{\partial}{\partial t} = 0$ ) sur une ligne de courant fournit l'équation de Bernoulli.

$$\frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + \overrightarrow{\text{grad}}(\vec{U}) \cdot \vec{U} + \frac{1}{\rho} \overrightarrow{\text{grad}}(p + \rho g z) = 0$$

En trouve :

$$p + \rho g z + \frac{\rho U^2}{2} = cst$$

**Equation 1 : Equation de Bernoulli en terme de pression**

Avec :

- $p$  : pression statique ou local
- $\rho g z$  : pression de pesanteur
- $\frac{\rho U^2}{2}$  : pression dynamique

Tous les termes s'expriment en pascal [Pa].

En divisant tous les termes de la relation précédente par le produit  $\rho g$ , on écrira tous les termes dans la dimension d'une hauteur (pression exprimée en mètres de colonne de fluide).

$$\frac{p}{\rho g} + \frac{U^2}{2g} + z = H = cst$$

**Equation 2 : Equation de Bernoulli en terme de hauteur**

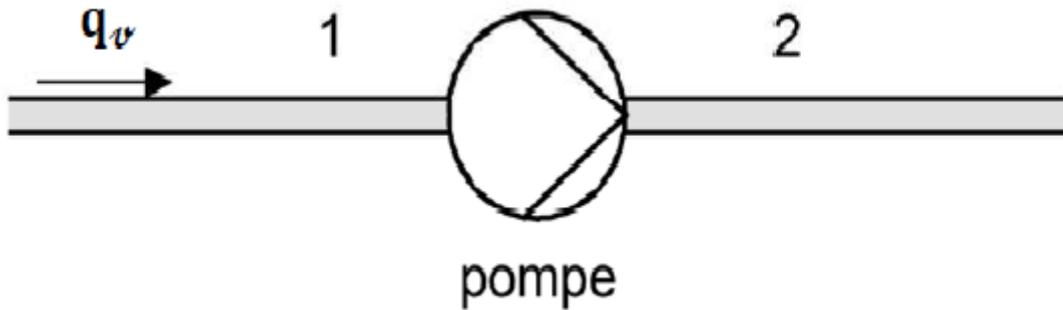
- $H$  : hauteur totale
- $\frac{p}{\rho g}$  : hauteur de Pression
- $z$  : cote
- $\frac{U^2}{2g}$  : hauteur dynamique
- $\frac{p}{\rho g} + z$  : hauteur piézométrique

Tous les termes s'expriment en mètre [m]

### 8. Cas d'échanges d'énergie :

Lorsque le fluide traverse une machine hydraulique, il échange de l'énergie avec cette machine sous forme de travail  $\Delta W$  pendant une durée  $\Delta t$ .

$$\text{La puissance } P \text{ échangée est : } P = \frac{\Delta W}{\Delta t}$$



*Figure 17 Ecoulement avec échange de travail*

$P > 0$  si l'énergie est reçue par le fluide (ex : pompe).

$P < 0$  si l'énergie est fournie par le fluide (ex : turbine).

Si le débit-volume est  $Qv$ , la relation de Bernoulli s'écrit alors :

$$\frac{1}{2} \rho (U_2^2 - U_1^2) + \rho g (Z_2 - Z_1) + (p_2 - p_1) = \frac{P}{q_v}$$

**Equation 3 : Equation de Bernoulli avec échange d'énergie**

### 9. Cas de pertes de charge :

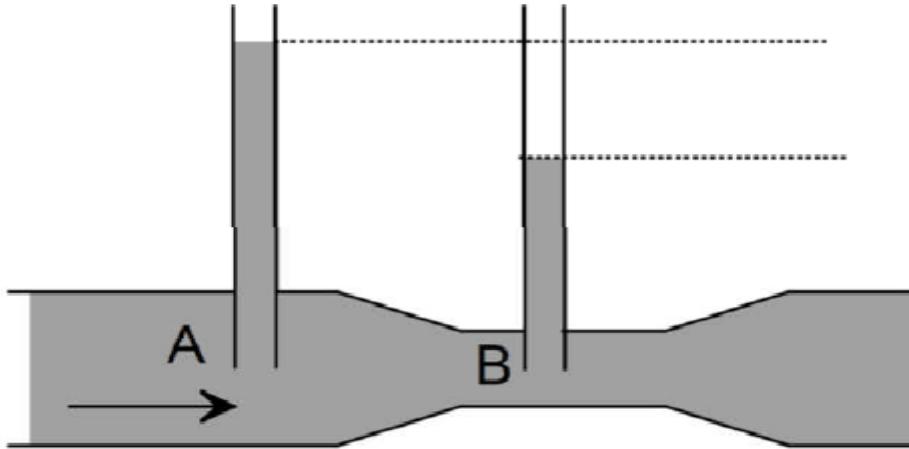
Le frottement du fluide sur les parois des canalisations, les obstacles au passage fluide comme les coudes, tés, rétrécissement, etc. se traduisent par des pertes d'énergie du fluide. Ces pertes se retranchent de l'énergie dont dispose le fluide à l'entrée  $S_1$ , et Bernoulli s'écrit:

$$\frac{p_1}{\rho g} + \frac{U_1^2}{2g} + z_1 = \frac{p_2}{\rho g} + \frac{U_2^2}{2g} + z_2 + \sum \Delta H_{L+S}$$

**Equation 4 : Equation de Bernoulli avec les pertes de charge**

### 10. Application de Théorème de Bernoulli :

#### a) Phénomène de Venturi :



*Figure 18 Tube de Venturi*

Un conduit de section principale  $S_A$  subit un étranglement en B ou sa section  $S_B$ . La vitesse d'un fluide augmente dans l'étranglement, donc sa pression diminue :  $U_B > U_A$  donc  $p_A > p_B$

Le théorème de Bernoulli s'écrit ici :

$$P_A + \frac{1}{2} \rho U_A^2 = P_B + \frac{1}{2} \rho U_B^2$$

D'après l'équation de continuité :

$U_B S_B = U_A S_A = q_v$  et  $V_B > V_A$  donc  $P_A > P_B$  alors  $h_B > h_A$

$$p_1 - p_2 = \frac{1}{2} \rho \left( \frac{1}{S_2^2} - \frac{1}{S_1^2} \right) q_v^2 = Kq^2$$

La différence de pression aux bornes aux extrémités du tube de Venturi est proportionnelle au carré du débit, application à la mesure des débits (organe déprimogène). On peut citer aussi la trompe à eau, le pulvériseur...

7

### E. Propriétés des liquides :

#### 1. Pression :

La pression est le rapport d'une force sur une surface.

$$P = \frac{F}{S}$$

Avec :

F : force [N]

S : surface [ $m^2$ ]

**11. Pression absolue :**

La pression absolue est définie par rapport à la pression dans le vide qui correspond à la pression nulle. On en déduit donc que la pression minimale possible est zéro.

**12. Pression relative :**

La pression relative se définit par rapport à une référence que l'on choisit le plus souvent égale à la pression atmosphérique. Cela consiste finalement à faire une translation du repère des pressions. La pression nulle est donc équivalente à la pression atmosphérique [ $p_{atm}$ ]. La pression minimale correspond donc à :  $[-p_{atm}]$  (pression atmosphérique négative).

**13. Masse volumique :**

La masse volumique ( $\rho$ ) est le rapport  $\rho = \frac{Massee}{Volume} = \frac{M}{V} [\text{kg/m}^3]$

Pour les liquides, le volume est pratiquement insensible aux variations de pression et, dans la majorité des cas, il augmente faiblement quand la température augmente, l'eau faisant exception à cette règle en dessous de  $4^\circ\text{C}$ .

$$\rho_{\text{eau}} = 1000 \text{ kg/m}^3$$

$$\rho_{\text{mercure}} = 13546 \text{ kg/m}^3$$

$$\rho_{\text{air sec}} = 1,205 \text{ kg/m}^3$$

**14. Viscosité :**

La viscosité se manifeste chaque fois que les couches voisines d'un même fluide sont en mouvement relatif, c'est à dire lorsqu'il s'établit un gradient de vitesse. On peut donc dire de la viscosité qu'elle est la mesure du frottement fluide. La force de frottement peut être figurée par l'énergie nécessaire pour déplacer un objet qui frotte sur un autre. La viscosité peut donc être considérée comme le frottement interne qui résulte du glissement d'une couche de fluide sur une autre. Un liquide très visqueux est un liquide qui présente un frottement interne élevé.

**a) Viscosité dynamique :**

Considérons deux couches de fluide contigües distantes d' $\Delta z$ . la force de frottement F qui s'exerce à la surface de séparations de ces deux couches s'oppose au glissement d'une couche sur l'autre. Elle est proportionnelle à  $\Delta v$ , à leur surface S et inversement proportionnelle à  $\Delta z$  :

$$F = \mu \int \frac{\Delta v}{\Delta z}$$

Le facteur de proportionnalité est le coefficient de viscosité dynamique du fluide  $\mu$ .

**Dimension :**  $\mu = M \cdot L^{-1} \cdot T^{-1}$  -**Unité :** Dans le système international (SI), l'unité de viscosité dynamique est le Pascal par seconde (Pa/s) ou Poiseuille (Pl)

$$[\mu] = \frac{[F][\Delta z]}{[s][\Delta v]} = \frac{Nm}{m^2 \frac{m}{s}} = \frac{kg \cdot m}{s^2} \frac{s}{m^2} = \frac{kg}{m \cdot s} = 1 \text{ kg/m.s} = 1 \text{ Pl} = 1 \text{ Pa/s}$$

### b) Viscosité cinématique :

Dans les nombreuses formules apparaît le rapport de la viscosité dynamique et de la masse volumique. Ce rapport est appelé viscosité cinématique :

$$\vartheta = \frac{\mu}{\rho}$$

**Dimension :**  $[\vartheta] = L^2 \cdot T^{-1}$

**Unité :** Dans le système international (SI), l'unité de viscosité ( $m^2/s$ ). Dans le système CGS (non légal), l'unité est le Stokes (St) :  $1 \text{ m}^2/\text{s} = 10^4 \text{ St}$ .

### F. Les pertes de charge :

Lors du déplacement des liquides des frottements apparaissent entre les différentes couches du liquide et contre les parois de la canalisation. Ces frottements entraînent donc une production de chaleur correspondant à une perte d'énergie pour le liquide. On parle alors de pertes de charge.

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

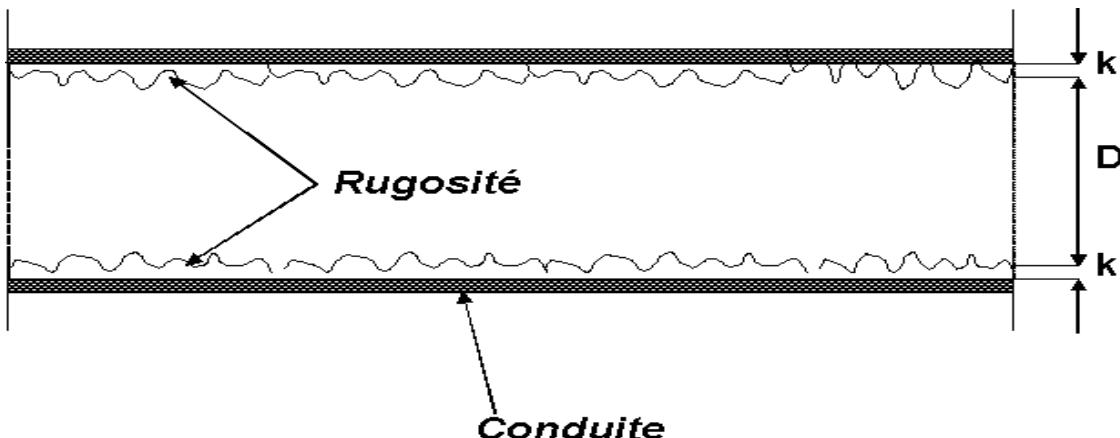
Les pertes de charge sont un élément fondamental de l'écoulement des liquides car elles apparaissent pour tous les liquides. Elles se classent en deux types :

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

### 1. Les pertes de charge Linéaires :

#### a) Notion de Rugosité des conduites :

Contrairement à une surface lisse, une surface rugueuse implique un état de surface dont les irrégularités ont une action directe sur les forces de frottement.



*Figure 19 Tuyaux rugueux en coupe*

Une surface rugueuse peut être considérée comme étant constituée par une série de protubérances élémentaires, caractérisées par une hauteur, notée  $k$ , et appelée "Rugosité". Afin de comparer la rugosité par rapport au diamètre de la conduite, on introduit le rapport :  $\frac{K}{D}$  « Rugosité relative »

#### b) Expression de la perte de charge linéaire due aux frottements :

La perte de charge linéaire est calculée par la formule de Darcy-Weisbach(1857) :

$$J_L = \lambda \frac{L}{D} \frac{U_m^2}{2g}$$

Avec :

- D : Diamètre de la section d'écoulement (m)
- L : Longueur de la conduite (m)
- $U_m$ : Vitesse moyenne d'écoulement (m/s)
- $\lambda$  : Coefficient de frottement ou coefficient de perte de charge linéaire (sans unité)

#### c) Le calcul de $\lambda$ :

Plusieurs formules sont proposées pour le calcul de  $\lambda$  et dépendent du régime d'écoulement :

➤ **Régime laminaire :  $R_e < 2400$**

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

➤ **Régime turbulent :  $Re > 3200$**

Dans ce régime  $\lambda$  est en fonction de la rugosité de parois  $k$  et du nombre de Reynolds. Dans ce cas il y a plusieurs formules de calcul du coefficient  $\lambda$  qui sont proposées par différents auteurs :

Formule de Colebrook-White :

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \log \left[ \left( \frac{k}{3,71D} \right) + \left( \frac{2,51}{R_e \sqrt{\lambda}} \right) \right]$$

Dans le cas où [ $\lambda = f(k/D)$ ], on parlera d'un " *Ecoulement hydrauliquement Rugueux* " et la formule de Colebrook – White devient :

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 2 \log \left( \frac{D}{2k} \right) + 1,735$$

Dans le cas où [ $\lambda = f(Re)$ ], on parlera d'un " *Ecoulement hydrauliquement lisse* " la formule de Colebrook – White devient :

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 2 \log \left( \frac{R_e \sqrt{\lambda}}{2.51} \right)$$

Formule de Blasius (1911) :

Cette une formule proposée pour :  $4000 < Re < 10^5$  ; et  $\lambda$  est en fonction uniquement du nombre de Reynolds, ainsi :

$$\lambda = \frac{0.316}{R_e^{0.25}}$$

Diagramme de Moody :

Les travaux de Nikuradse sur les pertes de charge dans les conduites ont permis d'élaborer un graphique (Diagramme de Moody) permettant de déterminer le coefficient  $\lambda$  en fonction de  $Re$  pour les différents types d'écoulement et des rugosités relatives  $k/D$  allant de 1/30 à 1/1014 :

## Moody Diagram

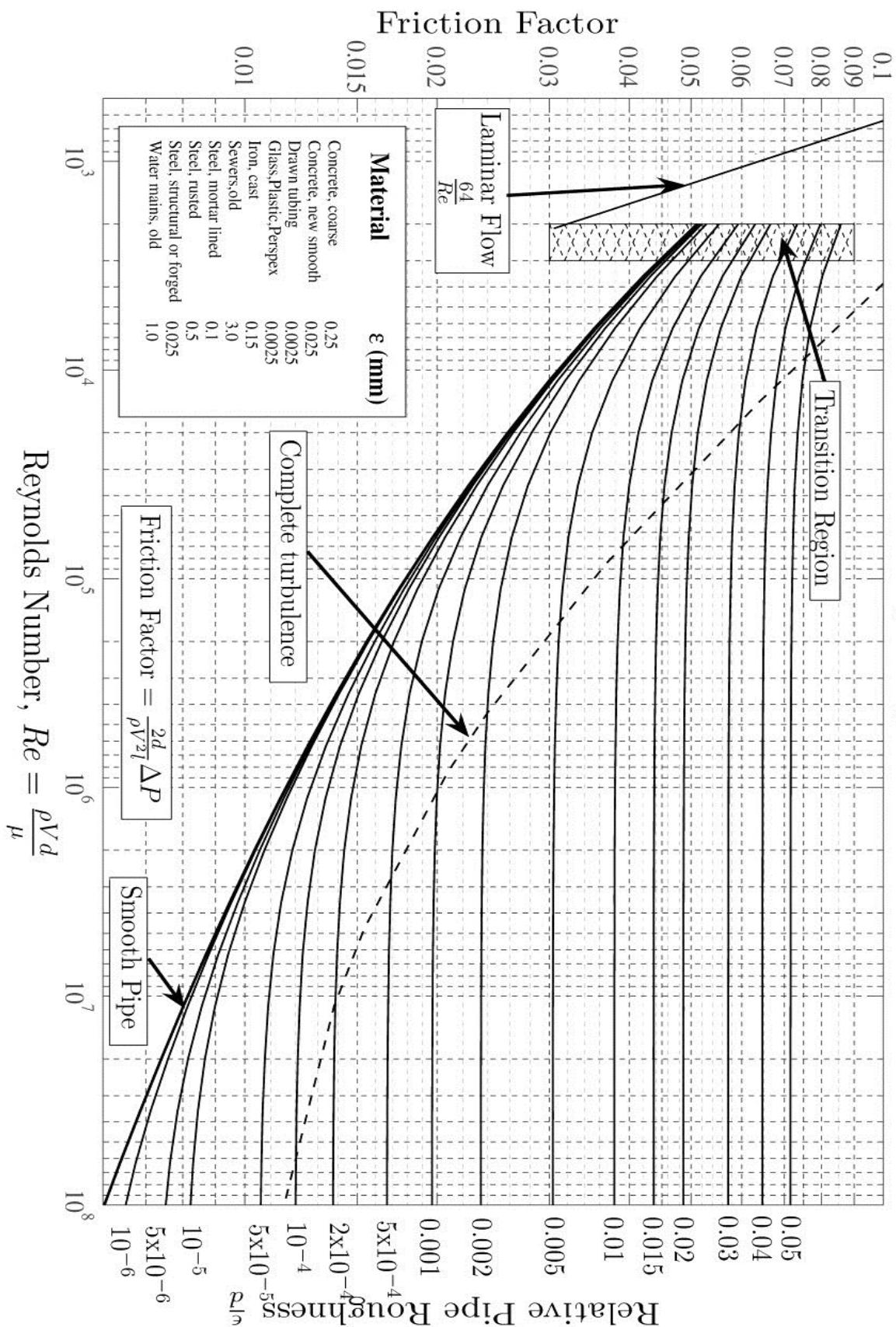


Figure 20 Diagramme de Moody

Le diagramme permet d'observer et d'identifier plusieurs régions :

- Zone à Ecoulement Laminaire :  $R_e < 2000 \Rightarrow \lambda = f(R_e) = 64/R_e$
- Zone de transition :  $2000 < R_e < 4000$
- Zone de Turbulence Lisse :  $\lambda = f(R_e)$
- Zone de Turbulence Transitoire :  $\lambda = f(R_e ; k/D)$
- Zone de Turbulence Rugueuse :  $\lambda = f(k/D)$

### 15. Les pertes de charge singulières :

En plus des pertes de charge linéaires, la perte de charge singulière se produit localement au niveau d'une modification brusque de la nature physique de la section d'écoulement. Elle se calcule par la formule générale suivante :

$$J_s = \varepsilon \frac{U_m^2}{2g}$$

Avec :  $\varepsilon$  = Coefficient qui dépend de la nature de la déformation

8

#### a) Cas d'un élargissement brusque de la section d'écoulement :

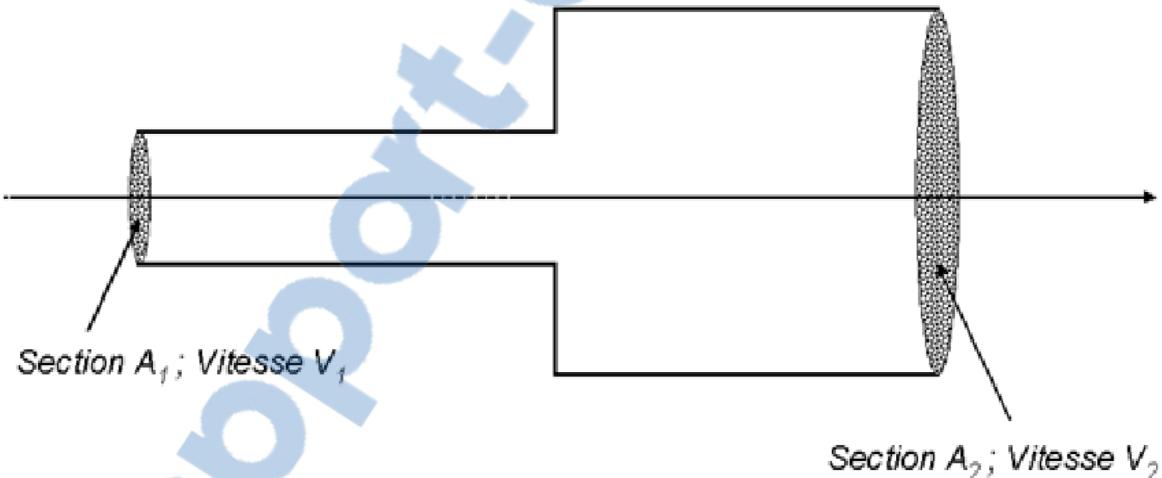


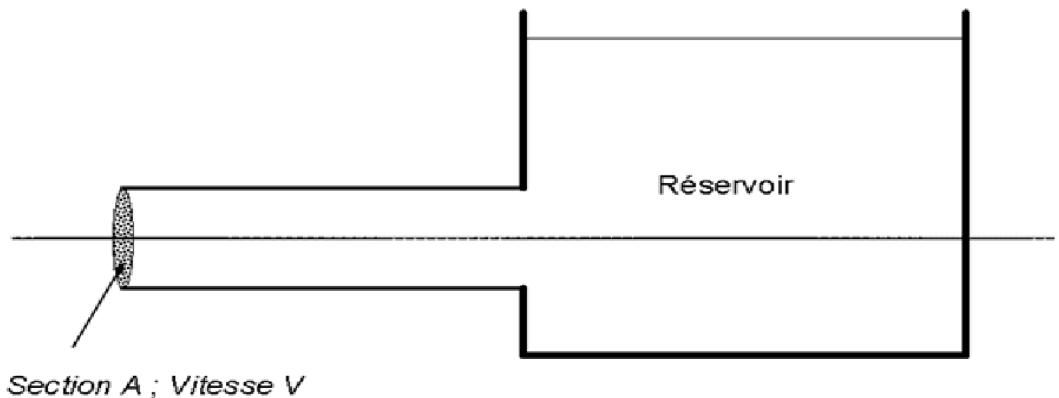
Figure 18a Elargissement brusque de la section

Dans ce cas :

$$\varepsilon_{eb} = \left(1 - \frac{S_1}{S_2}\right)^2$$

$$\Rightarrow h_{seb} = \left(1 - \frac{S_1}{S_2}\right)^2 \frac{U_{m1}^2}{2g}$$

➤ Remarque : Cas particulier d'une sortie vers un réservoir :

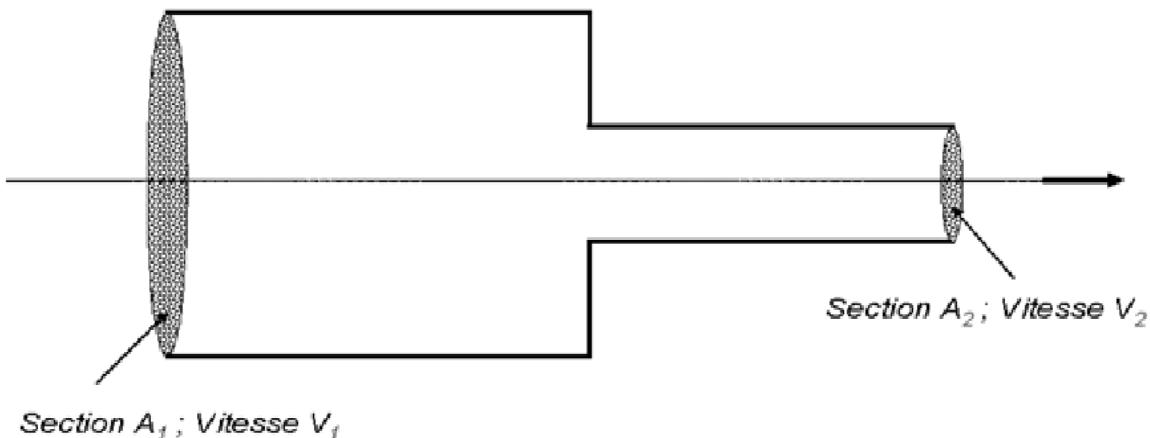


**Figure 22b Elargissement brusque (sortie vers un réservoir)**

Dans ce cas, le terme  $A_1/A_2$  tend vers zéro du fait que la section du réservoir est très grande devant celle de la conduite, et la formule précédente devient :

$$\varepsilon_{CR} = 1 \rightarrow h_{SCR} = \frac{U_{m1}^2}{2g}$$

**b) Cas d'un rétrécissement brusque de la section d'écoulement :**



**Figure 23a Rétrécissement brusque**

La formule de calcul s'écrit :

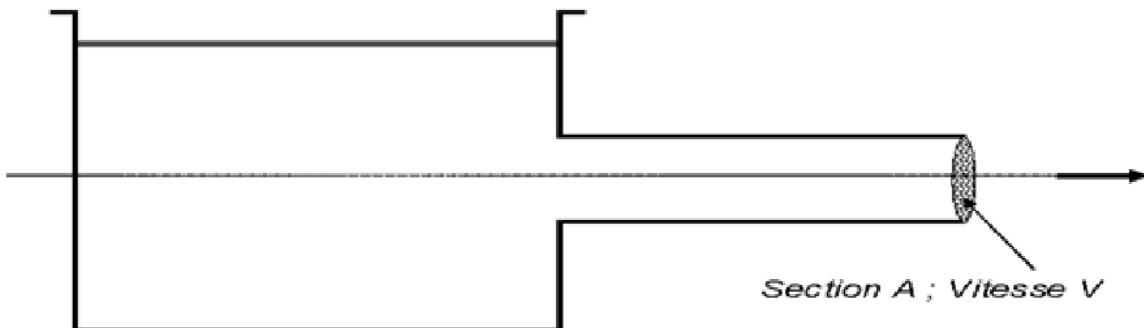
$$h_{srh} = \varepsilon_{rb} \frac{U_{m1}^2}{2g}$$

Avec :  $\varepsilon_{rb}$  = Coefficient du au rétrécissement brusque donné par le tableau suivant :

**Tableau 1 : Rétrécissement brusque**

S <sub>1</sub> /S <sub>2</sub>	0,1	0,5	0,7
<b><math>\varepsilon_{rb}</math></b>	<b>0,41</b>	<b>0,24</b>	<b>0,14</b>

- Remarque : Cas particulier d'une sortie à partir d'un réservoir :



*Figure 24 Rétrécissement brusque (Réservoir vers conduite)*

**Forme de calcul :**

$$h_{SRC} = \varepsilon_{RC} \frac{U_{m1}^2}{2g}$$

Avec :  $\varepsilon_{RC}$  : Coefficient de rétrécissement brusque “Réservoir conduite” égale 0.5

**c) Autres pertes de charge singulières :**

D'autres types de pertes de charge peuvent avoir lieu dans les conduites :

- ❖ Coudes
- ❖ Vannes
- ❖ Crépine, etc...

**■ Cas d'un coude :**

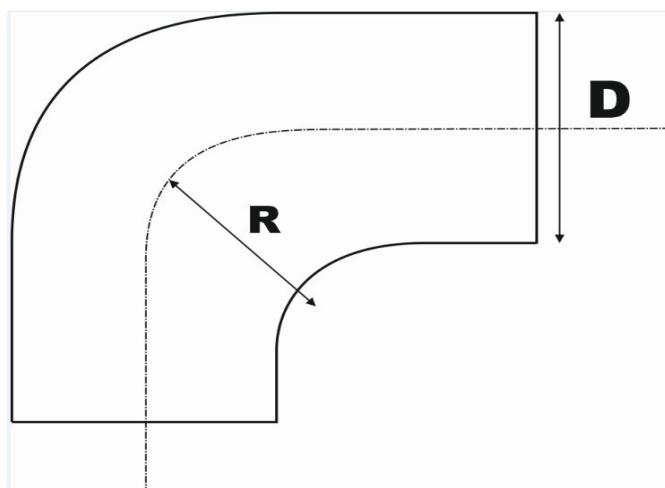


Tableau 2 : Cas d'un coude

R/D	2	4	6
$\epsilon_C$	0.4	0.3	0.3

- Quelques formules pour les pertes de charge singulières (coude, changement de section) :

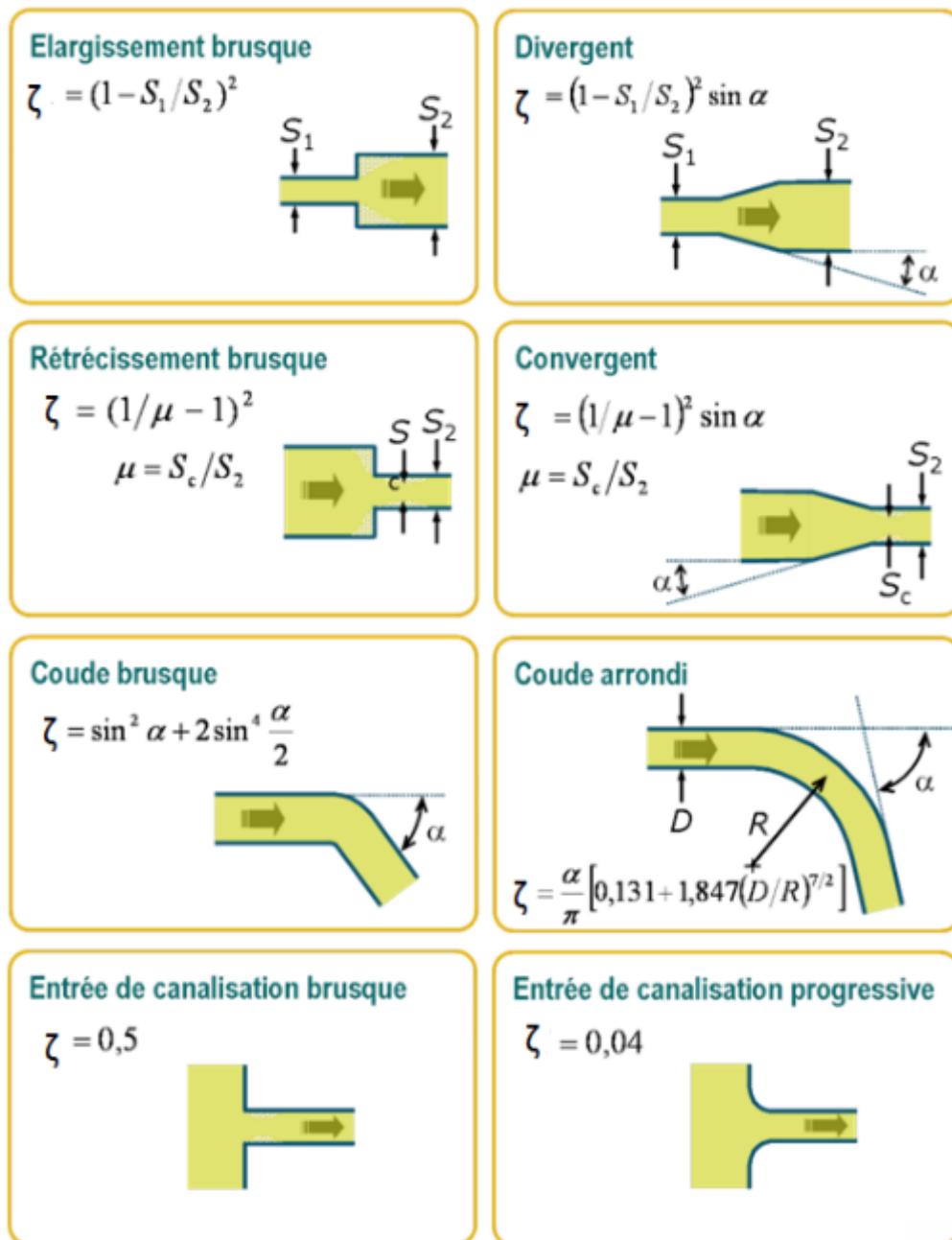


Figure 20 Quelques valeurs de coefficient de perte de charge singulières

### Cas d'une vanne :

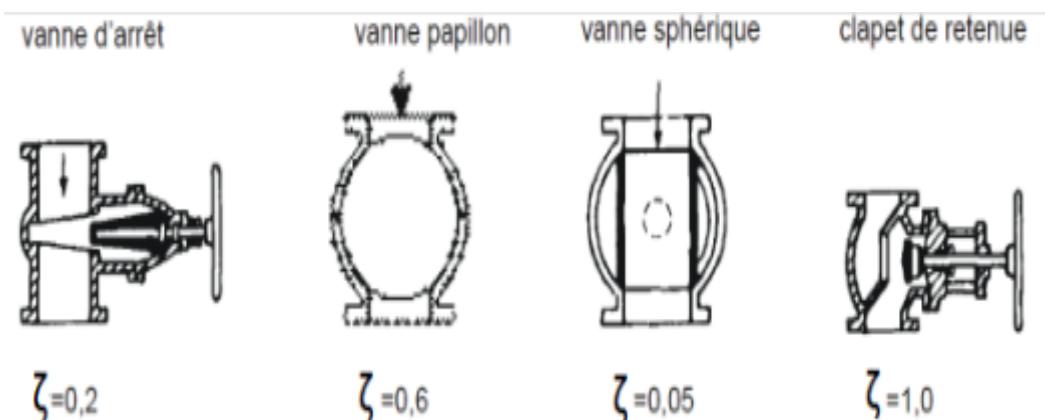
Des vannes sont utilisées dans les aménagements hydroélectriques pour isoler un composant du reste.

Les pales de la roue ou les vannes à pointeau de la turbine.

La perte de charge produite par l'écoulement à travers une vanne ouverte dépend du type de vanne.

La figure montre la valeur de  $\zeta_{sv}$  pour différents types de vannes.

Coefficients de perte de charge typiques pour un écoulement à travers des vannes :



*Figure 21 Pertes de charge singulières pour quelques vannes*

### 16. Pourquoi provoquer des pertes de charge ? :

Dans l'équilibrage d'un réseau d'alimentation, il est parfois nécessaire de créer des pertes de charge pour diminuer la pression du fluide dans certaines parties de l'installation.

Prenons l'exemple d'une colonne montante de 30 mètres de hauteur (alimentation en eau d'un immeuble de 30 mètres de haut soit 7 étages). La norme impose une pression d'utilisation disponible pour chaque appartement de 3 bars.

La pression au point le plus bas de la colonne montante (rez-de-chaussée) doit donc être de 6 bars (3 bars disponibles pour l'appartement du dernier étage + 3 bars pour monter à 30 m).

L'appartement le plus bas ne peut pas être alimenté sous une pression de 6 bars d'où la nécessité de "créer une perte de charge" de 3 bars par un réducteur de pression à l'entrée de cet appartement. A chaque étage, un réducteur de pression permettra en créant une perte de charge adaptée d'alimenter l'appartement à une pression de 3 bars.<sup>9</sup>

## VIII.

## Réseaux des pompes

### A. Définition

Les pompes sont des appareils mécaniques servant à véhiculer des liquides d'un point A, à un point B. Elles permettent, notamment, de prendre un liquide à la pression  $P_1$  et de le porter à la pression  $P_2$  (avec  $P_2 > P_1$ ). Pour véhiculer un liquide d'un endroit à un autre, la pompe doit fournir une certaine énergie. Cette dernière se manifeste sous deux formes :

- Cinétique : pour la mise en mouvement du fluide (le débit).
- Potentielle : pour accroître la pression en aval.

L'énergie requise pour faire fonctionner ces machines dépend donc des nombreux facteurs rencontrés dans l'étude des écoulements :

- Les propriétés du fluide : masse volumique, viscosité, compressibilité.
- Les caractéristiques de l'installation : longueur, diamètre, rugosité, singularités ...
- Les caractéristiques de l'écoulement : vitesse, débit, hauteur d'élévation, pression

### A. Types des pompes :

Devant la grande diversité de situations possibles, on trouve un grand nombre de machines que l'on peut classer en deux grands groupes :

- Les pompes volumétriques comprenant les pompes alternatives (à piston, à diaphragme, ...) et les pompes rotatives (à vis, à engrenage, à palettes, hélicoïdales, péristaltiques ...).
- Les turbopompes sont toutes rotatives ; elles regroupent les pompes centrifuges, à hélice et hélico-centrifuges.

L'utilisation d'un type de pompes ou d'un autre dépend des conditions d'écoulement du fluide. De manière générale, si on veut augmenter la pression d'un fluide on utilisera plutôt les pompes volumétriques, tandis que si on veut augmenter le débit on utilisera plutôt les pompes centrifuges.<sup>10</sup>

### B. Pompe volumétrique :

Une pompe volumétrique se compose d'un corps de pompe parfaitement clos à l'intérieur duquel se déplace un élément mobile rigoureusement ajusté. Leur fonctionnement repose sur le principe suivant

- o Exécution d'un mouvement cyclique
- o Pendant un cycle, un volume déterminé de liquide pénètre dans un compartiment avant d'être refoulé à la fin.

Ce mouvement permet le déplacement du liquide entre l'orifice d'aspiration et l'orifice de refoulement.

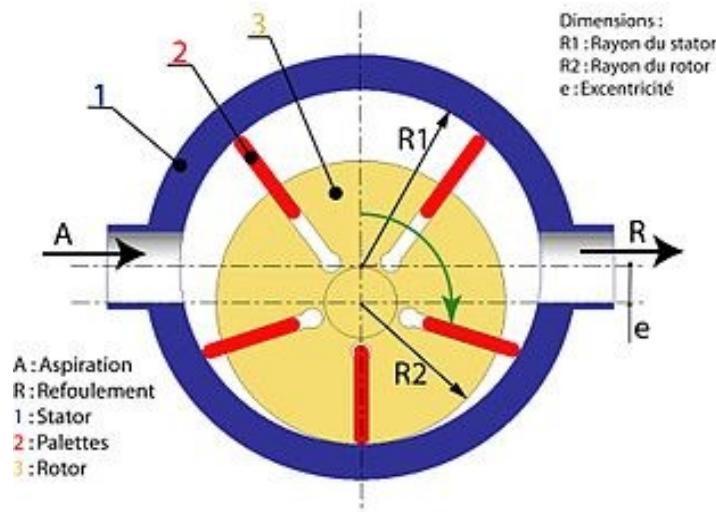
On distingue généralement :

- Les pompes volumétriques rotatives : Ces pompes sont constituées par une pièce mobile animée d'un mouvement de rotation autour d'un axe, qui tourne dans le corps de pompe et crée le mouvement du liquide pompé par déplacement d'un volume depuis l'aspiration jusqu'au refoulement.

- Les pompes volumétriques alternatives : la pièce mobile est animée d'un mouvement alternatif.

### 1. Pompes volumétriques rotatives :

#### a) Pompes à palettes :



*Figure 22 Pompe à palettes*

#### Caractéristiques et utilisation :

Ce sont des pompes caractérisées par des débits allant jusqu'à 100 m<sup>3</sup>/h et des pressions au refoulement de 4 à 8 bars. Elles conviennent aux liquides peu visqueux.

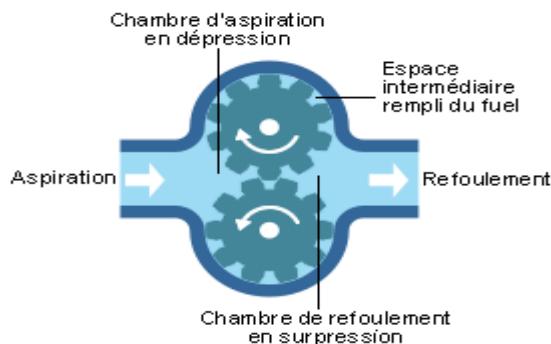
#### Avantages :

- Pas de brassage, ni d'émulsionnage du liquide pompé
- Débit régulier
- Marche réversible de la pompe

#### Inconvénients :

- Usure du corps par frottement des palettes
- Difficile pompage des produits visqueux

**b) Pompes à engrenages :**



*Figure 23 Pompe à engrenage*

**Caractéristiques et utilisation :**

Ce sont des pompes qui peuvent atteindre des pressions au refoulement de l'ordre de 5 à 30 bars. Les débits peuvent atteindre  $300 \text{ m}^3/\text{h}$ . La hauteur manométrique maximale est de 50 à 200 mCE. Elles n'admettent pas le passage de particules solides sous peine de destruction. Elles sont utilisées pour les produits autolubrifiants et alimentaires.

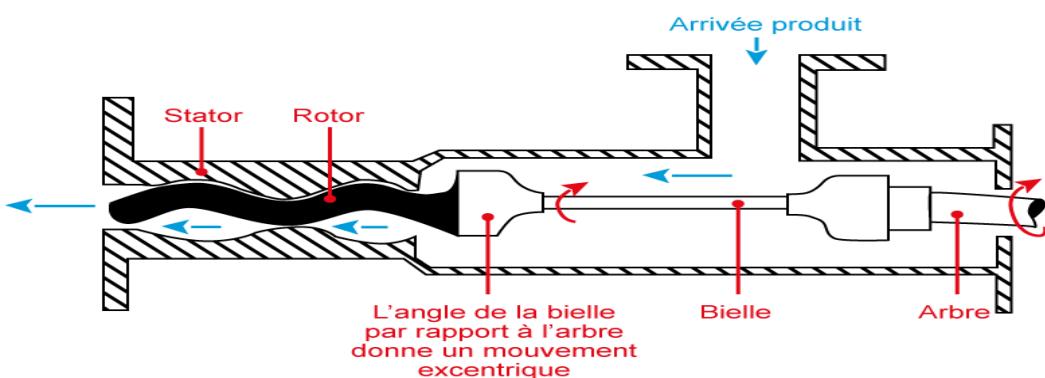
**Avantages :**

- Débit régulier
- Pas de clapets nécessaires
- Marche de la pompe réversible

**Inconvénients :**

- Nombreuses pièces d'usure
- Pas de particules solides dans cette pompe, ni de produits abrasifs ; la présence de traces de solide ayant pour effet d'accélérer l'usure mécanique des pignons et de diminuer l'étanchéité entre le corps de pompe et les dents.

**c) Pompes à rotor hélicoïdal excentré :**



*Figure 24 Pompe à rotor hélicoïdal excentré*

## **CHAPITRE 02 - RAPPELS DE COURS DE MECANIQUES DES FLUIDES**

### **Caractéristiques et utilisation :**

Ces pompes peuvent atteindre des pressions au refoulement de 20 à 60 bars. Le débit est de 500 m<sup>3</sup>/h. Elles sont utilisées notamment pour les produits pétroliers et les produits alimentaires. Son utilisation pour alimenter les filtres presses est fréquente.

<b>Avantages :</b>	<b>Inconvénients</b>
<ul style="list-style-type: none"><li>• Passage de particules solides, de produits abrasifs et de boue</li><li>• Débit régulier</li><li>• Marche de la pompe réversible</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Pas de marche à sec de la pompe</li><li>• Maintenance assez difficile et coûteuse</li><li>• Encombrement important</li></ul>

### **d) Pompes péristaltiques :**

### **Caractéristiques et utilisation :**

Elles permettent de pomper des liquides très abrasifs et chargés à un débit pouvant aller à 50 m<sup>3</sup>/h. La pression au refoulement est de 15bars. La hauteur manométrique maximale est de 160 m CE. Elles s'utilisent pour les produits chimiques et alimentaires.

<b>Avantages :</b>	<b>Inconvénients</b>
<ul style="list-style-type: none"><li>• Utilisation comme pompe doseuse possible</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Débit limité</li><li>• Refoulement très saccadé</li><li>• Température d'utilisation assez faible</li></ul>

## **2. Pompe volumétriques alternatives :**

### **a) Pompe à piston :**

### **Caractéristiques et utilisation :**

Elles ne conviennent que pour des débits moyens de l'ordre de 80 m<sup>3</sup>/h. L'intérêt des membranes est l'utilisation avec des produits chimiques corrosifs, abrasifs ou acides. La pression au refoulement peut aller jusqu'à 25 bars.

<b>Avantages :</b>	<b>Inconvénients</b>
<ul style="list-style-type: none"><li>• Fonctionnement à sec sans dommage</li><li>• Bon rendement (&gt; 90%)</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Débit limité</li><li>• Viscosités assez faibles</li><li>• Pompage de particules solides impossible : la pompe ne fonctionne bien que si l'étanchéité est parfaite entre le cylindre et le piston.</li></ul>

**a) Pompes doseuses :**

Elles sont essentiellement à piston et (ou) à membrane. L'introduction d'un débit bien déterminé de liquides est rendue possible grâce à un dispositif précis de réglage de la course du piston et de sa fréquence.

Elles ont des débits relativement faibles et peuvent mettre en œuvre des pressions au refoulement allant jusqu'à 300 bars.

Elles sont auto-amorçantes mais n'acceptent que des viscosités faibles.

Les principales applications sont :

- Le dosage fin de produits chimiques
- L'injection de carburant pour les véhicules automobiles

### C. Turbopompes :

Les pompes hydrodynamiques sont de construction très simple : en version de base, elles sont essentiellement constituées d'une pièce en rotation, le rotor appelé aussi roue ou hélice qui tourne dans un carter appelé corps de pompe.

Une certaine vitesse est ainsi communiquée au fluide.

La différence entre les pompes centrifuge hélico-centrifuge et à hélice porte essentiellement sur la direction de la vitesse donnée au fluide.

Les turbopompes se composent de deux parties principales :

Rotor : qui communique au liquide un mouvement de rotation par l'intermédiaire d'aubes ou d'ailettes et qui est fixé sur un arbre supporté par des paliers et couplé au moyen d'un dispositif rigide ou flexible.

Corps de pompe : dont le rôle est de diriger le liquide en lui donnant un accroissement de pression, comprenant des orifices d'aspiration et de refoulement et il supporte des paliers et sert d'habitat pour l'équipage mobile.

#### 1. Avantages et inconvénients des turbopompes :

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"><li>• Ce sont des machines de construction simple, sans clapet ou soupape, d'utilisation facile et peu coûteuses.</li><li>• Pour caractéristiques égales, elles sont plus compactes que les machines volumétriques.</li><li>• Le rendement est souvent meilleur.</li><li>• Elles sont adaptées à une très large gamme de liquides.</li><li>• Le débit est régulier.</li><li>• En cas de colmatage partiel ou d'obstruction de la conduite de refoulement, la pompe centrifuge ne subit aucun dommage et l'installation ne risque pas d'éclater.</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Impossibilité de pomper des liquides trop visqueux</li><li>• Production d'une pression différentielle peu élevée (de 0,5 à 10 bar)</li><li>• Elles ne sont pas auto-amorçantes</li><li>• A l'arrêt ces pompes ne s'opposent pas à l'écoulement du liquide par gravité (donc, vannes à prévoir).</li></ul>

#### 1. Pompes hélico-centrifuges :

Ce type est intermédiaire entre les pompes hélices et les pompes centrifuge. Le flux résulte de la composition des flux axial et radial, la trajectoire d'une particule de liquide est une courbe tracée sur un cône de révolution.

## **2. Pompes hélices :**

Le liquide entraîné dans un mouvement de rotation par l'équipage mobile est rejeté axialement, la trajectoire d'une particule de liquide est entièrement située sur un cylindre de révolution, c'est une hélice circulaire.

## **3. Pompes centrifuges :**

Les pompes centrifuges sont des machines rotodynamiques destinées pour le transport des liquides. Ce sont les machines les plus utilisées aussi bien sur le plan industriel que dans le domaine domestique. La pompe centrifuge est une machine tournante qui grâce à un rotor à aubes convenablement orientées augmente l'énergie cinétique et projette à l'aide de la force centrifuge le liquide à la périphérie sur la volute.

A la sortie et à l'aide d'un divergent, une grande partie de l'énergie cinétique se transforme en pression motrice.

Comme toute turbomachine, la pompe centrifuge est constituée de deux parties décrites comme suit :

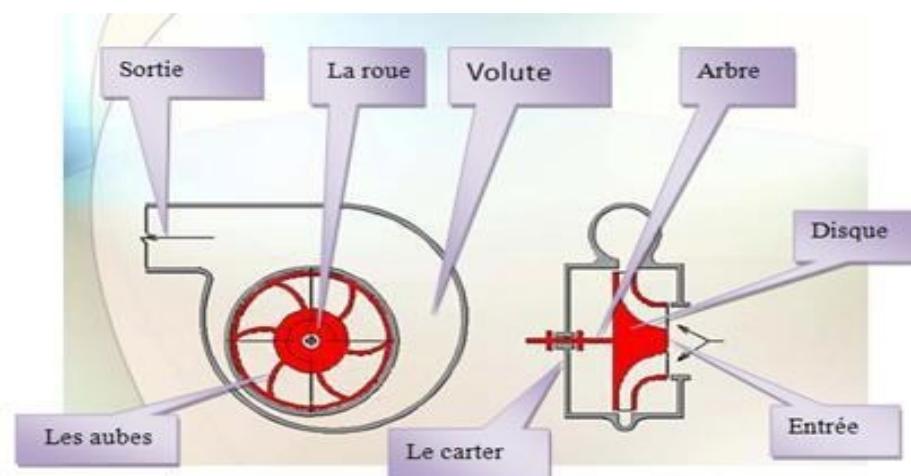
- Partie mobile.
- Partie fixe.

### **a) Composants d'une pompe centrifuge :**

Une pompe centrifuge dans sa forme la plus simple est constituée d'une roue munie d'ailettes radiales tournantes à l'intérieur d'une enveloppe (Corps de pompe).

Elle se compose de trois organes principaux, qui sont :

- Distributeur
- Rotor (roue)
- Récupérateur



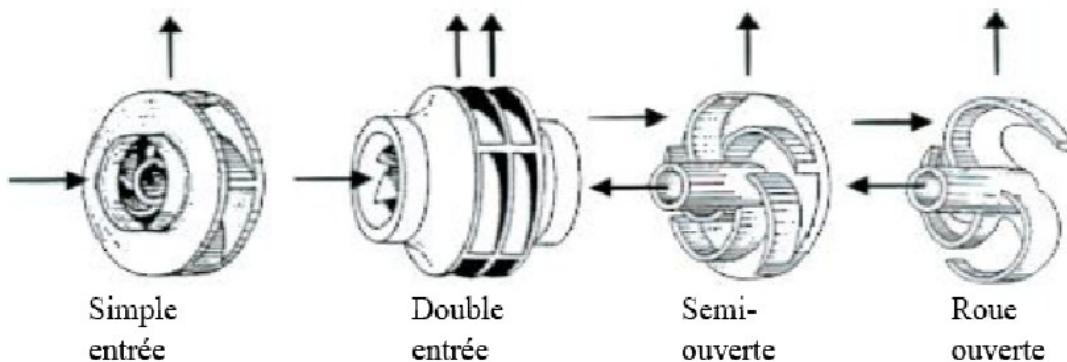
*Figure 25 Représentation schématique d'une pompe centrifuge*

- **Le distributeur** : Le rôle du distributeur, situé en amont de la roue, est de permettre une accélération et une meilleure orientation des filets fluide à l'entrée de la roue. Il se réduit à une simple tuyauterie pour les pompes monocellulaires.

- **Roue (turbine, rotor)** : C'est l'organe principal de la pompe. Elle comporte des aubes ou ailettes qui grâce à leur interaction avec le liquide véhiculé transforme l'énergie mécanique en une énergie cinétique. Elles peuvent être :

- Ouvertes sans flasque, les aubes sont reliées seulement au moyeu.
- Semi-ouvertes avec un seul flasque arrière.
- Fermés avec deux flasques ou trois

Toutes ces roues centrifuges sont alimentées axialement par le liquide qui, après circulation dans les canaux, sort radialement par rapport à l'axe de rotation.



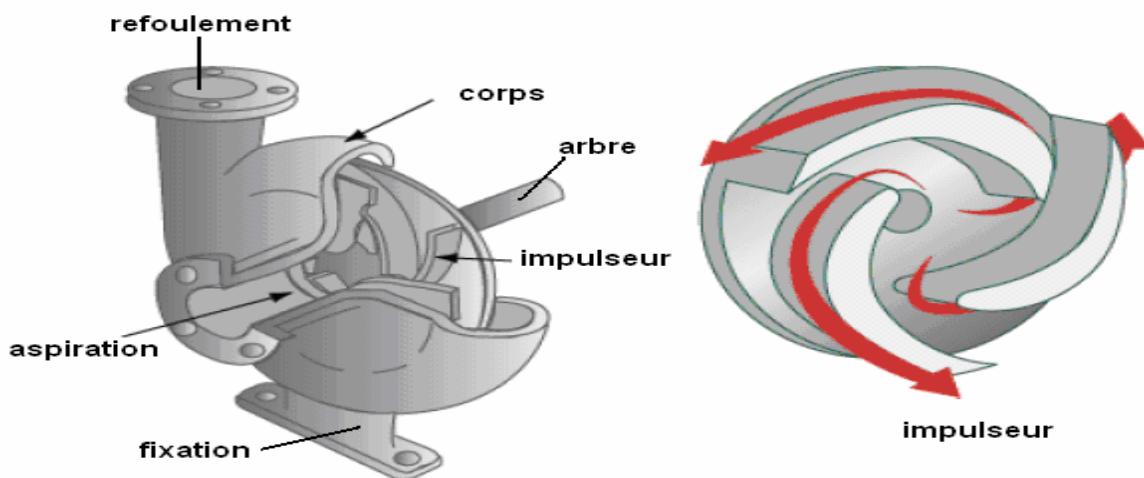
*Figure 26 Différentes roues d'une pompe centrifuge*

- **Le récupérateur** : Est un organe fixe qui collecte le liquide à la sortie du rotor et le canalise vers la sortie de la pompe avec la vitesse désirée, durant cette opération une transformation pareille de l'énergie de pression tient lieu. Le récupérateur se compose en générale de deux organes :

- Le diffuseur : Avec ou sans aubages, cet organe permet de transformer une partie l'énergie cinétique due à la vitesse et d'orienter correctement le fluide à la sortie de la roue pour son entrée dans la volute ou dans le distributeur de l'étage suivant.
- La volute : est un collecteur du liquide venant du diffuseur, elle assure la transformation de l'énergie cinétique en énergie de pression, et la canalisation du liquide vers la section de sortie de la pompe.

### b) Principe de fonctionnement d'une pompe centrifuge

Sous l'effet de la rotation de la roue, le liquide emmagasiné entre les aubes du rotor est projeté de la région axiale à la périphérie à cause de la force d'inertie centrifuge, de ce fait une dépression est créée à l'entrée de la pompe, provoquant l'aspiration du liquide, par suite, un écoulement continu de la veine liquide laquelle est recueillie par la volute ou par le diffuseur et dirigée dans la conduite de refoulement . Dans la volute, l'énergie cinétique est transformée en énergie potentielle et on dispose, ainsi à l'orifice de refoulement un débit sous une certaine pression qui se traduit par une hauteur manométrique de refoulement.



*Figure 27 Principe de fonctionnement d'une pompe centrifuge*

### c) Classification des pompes centrifuges

Les pompes centrifuges sont classées suivant la forme de la roue, la forme du corps de la pompe, le nombre des roues et la position de l'axe de la pompe.

#### - Forme de la roue

Il existe essentiellement trois types de pompes

- Les pompes centrifuges proprement dites, ou à écoulement radial
- Pompes hélico centrifuges
- Pompes à écoulement axial

#### - Forme du corps de pompe

Ils existent essentiellement les types de pompes suivants :

- Pompes à volute ou colimaçon

Corps de pompe dessiné de façon à maintenir les vitesses égales autour de la roue et à réduire la vitesse de l'eau dans le passage à la section de sortie.

- Pompes à diffuseur circulaire ou du type turbine

Corps de pompe à section constante et concentrique à la roue, qui dans ce cas est entouré d'aubes fixes qui dirigent l'écoulement et réduisent la vitesse de l'eau, ainsi transformant l'énergie cinétique en énergie de pression.

- **Nombre de roues :**

On peut diviser les pompes en deux catégories :

- Pompes à un seul étage (pompes monocellulaires) :

Quand la pompe ne comporte qu'une seule cellule, elle est dite monocellulaire. Elle se compose d'une roue et d'une volute ou corps de pompe, qui joue le rôle du diffuseur de la pompe. On peut atteindre des pressions de 1,5 à 8 bars (soit 15 à 80 m d'eau)

- Pompes à plusieurs étages (pompes multicellulaires) :

Elles sont utilisées lorsque la pression exigée au refoulement est importante, donc il serait théoriquement possible d'utiliser une pompe équipée d'une roue de grand diamètre, mais il est en général très rentable d'utiliser des pompes multicellulaires constituées de pompes monocellulaires montées en série sur un même arbre de commande. On peut atteindre des pressions très importantes de 8 à 30 bars (soit 80 à 300 m d'eau).

- **La position de l'axe :**

Les pompes sont classées en pompes à axe horizontal et à axe vertical.

- Pompes à axe horizontal : Cette disposition est la plus classique, elle est adoptée généralement pour les pompes de surface. L'entretien et le démontage de la pompe sont simplifiés.
- Pompes à axe vertical : Ces pompes verticales sont submergées ou immergées, elles sont spécialement conçues pour l'équipement des puits profonds.

**d) Utilisation des pompes centrifuges :**

Les pompes centrifuges sont les plus utilisées dans le domaine industriel à cause de la large gamme d'utilisation qu'elles peuvent couvrir, de leur simplicité et de leur faible coût. Néanmoins, il existe des applications pour lesquelles elles ne conviennent pas, comme :

- Utilisation de liquides visqueux, la pompe centrifuge nécessaire serait énorme par rapport aux débits possibles.
  - Utilisation de liquides "susceptibles" c'est-à-dire ne supportant pas la très forte agitation dans la pompe (liquides alimentaires tel que le lait).
  - Utilisation comme pompe doseuse ; la nécessité de réaliser des dosages précis instantanés risque d'entraîner la pompe en dehors de ses caractéristiques optimales.
- Ces types d'application nécessitent l'utilisation de pompes volumétriques. Par contre à la plupart des pompes volumétriques, les pompes centrifuges admettent les suspensions chargées de solides.

**e) Théorie des pompes centrifuges :**

**(1) Critères généraux de définition des pompes :**

Les critères les plus importants sont :

- \* **La vitesse de rotation n [tr/min] :** c'est le nombre de tours qu'effectue la pompe par unité de temps.

$$\omega = 2\pi \cdot \frac{n}{60} \quad [\text{rd/sec}]$$

- \* **Le débit Q[m³/s] :** c'est le volume qu'une pompe peut ou doit fournir par unités de temps.
- \* **La hauteur H [m] produite par la pompe :** cette hauteur est la différence entre la hauteur totale du liquide au refoulement ( $H_R$ ) et la hauteur totale à l'aspiration ( $H_A$ )
- \* **La puissance utile est absorbée :** la puissance disponible au niveau de l'arbre d'entraînement de la roue de la pompe est la puissance absorbée  $P_a$  de cette pompe.

La puissance transmise au fluide est appelée puissance hydraulique utile  $P_u$ . Le rapport de la puissance utile  $P_u$  et la puissance absorbée  $P_a$  est le rendement global de la pompe  $\eta_g$ .

$$\eta_g = \frac{\rho g H Q_v}{P_a} = \frac{P_u}{P_a}$$

**f) Rendement :**

Le rendement de la pompe c'est le rapport entre la puissance hydraulique (reçue par le liquide) et la puissance mécanique fournie à la pompe. Ce rendement varie en fonction du débit. Il est représenté par une courbe fournie par le constructeur de la pompe puissance sur l'arbre connaissant la puissance hydraulique.

Le meilleur rendement de la pompe détermine le **débit nominal** pour lequel correspondent la hauteur nominale et la puissance nominale.

Les rendements maximaux sont de l'ordre de :

- 70 % pour les pompes procédant à 3000 tr/min
- 80 % pour les pompes procédant à 1500 tr/min
- 80 % pour les pompes de forte puissance
- 50 à 60 % pour les petites pompes.

➤ **Rendement global :**

$$\eta_g = \frac{P_u}{P_a}$$

$P_u$  : puissance utile Avec  $P_u = \rho \cdot g \cdot H_{man} \cdot Q$

$P_a$  : puissance totale absorbée  $P_a = C \cdot \omega = C \cdot 2 \cdot \pi \cdot \frac{n}{60}$

➤ **Rendement mécanique :**

$$\eta_m = \frac{P_i}{P_a}$$

$P_i$  : puissance interne  $P_i = P_a - P_m$

$P_m$  : pertes mécaniques

➤ **Rendement par frottement interne :**

$$\eta_{fi} = \frac{P_i - P_{fi}}{P_i}$$

$P_{fi}$  = puissance par frottement sur disques

➤ **Rendement volumétrique :**

$$\eta_v = \frac{Q}{Q_i}$$

Avec :

$Q_i$  : débit interne traversant la roue       $Q_i = (Q + q_{g0} + q_p)$

$q_{g0}$  et  $q_p$  : respectivement débit dans les garnitures d'ouïe

➤ **Rendement hydraulique :**

$$\eta_h = \frac{P_{ur}}{P_r}$$

Avec :

$P_{ur}$  : puissance utile transmise au fluide par la roue     $P_{ur} = Q_i \cdot \rho \cdot h$

$P_r$  : puissance brute transmise au fluide par la roue     $P_r = P_i - P_{fi}$

➤ **Rendement global :** C'est le produit des rendements partiels cité précédemment :

$$\eta_g = \eta_{fi} \cdot \eta_h \cdot \eta_v \cdot \eta_m$$

**(1) La puissance :**

La puissance sur l'arbre est une caractéristique de la pompe permettant de déterminer le moteur d'entraînement pour un débit, cette puissance se calcule à partir de la connaissance des données de la hauteur, du rendement et de la densité.

$$P_a = \frac{P_h}{\eta_h}$$

Avec :

$\eta_h$  : Rendement de la pompe

$P_h$  : Puissance hydraulique.

**(2) La hauteur manométrique totale  $H_{MT}$ :**

On appelle hauteur manométrique ( $H_{MT}$ ) d'une pompe, l'énergie fournie par la pompe à l'unité de poids du liquide qui la traverse.

La hauteur manométrique permet de choisir la pompe pour une courbe de réseau imposée.

$$H_{MT} = H_h + Jasp + Jref + P_r$$

$Jasp$  : Pertes de charge de la conduite d'aspiration en Pa

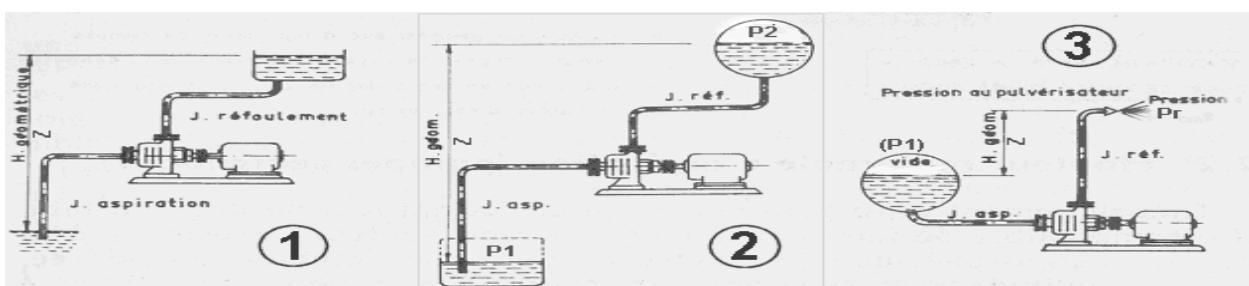
$Jref$  : Pertes de charge de la conduite de refoulement en Pa

$P_r$  : Pression résiduelle ou pression de service en Pa ( $P_r$  est une pression relative)

$H_h$  : Charge hydraulique en Pa,  $H_h = \rho \cdot g \cdot Z$

$Z$  : Hauteur géométrique (d'aspiration ou de refoulement ou les deux) en mètre de colonne d'eau, mCE.

**Autres cas avec des pressions relatives  $P_1$  et  $P_2$  différentes :**



*Figure 28 Quelques cas de  $H_m$*

$$1 \Rightarrow H_{MT} = H_h + Jasp + Jref$$

$$2 \Rightarrow H_{MT} = H_h + Jasp + Jref + (p_2 - p_1) \dots \text{(A condition que } p_1 \text{ soit > à la pression atmosphérique)}$$

$$3 \Rightarrow H_{MT} = H_h + Jasp + Jref + p_r + (p_{atm} - p_1) \dots \text{(A condition que } p_1 \text{ soit < à la pression atmosphérique)}^{11}$$

**(3) NPSH:**

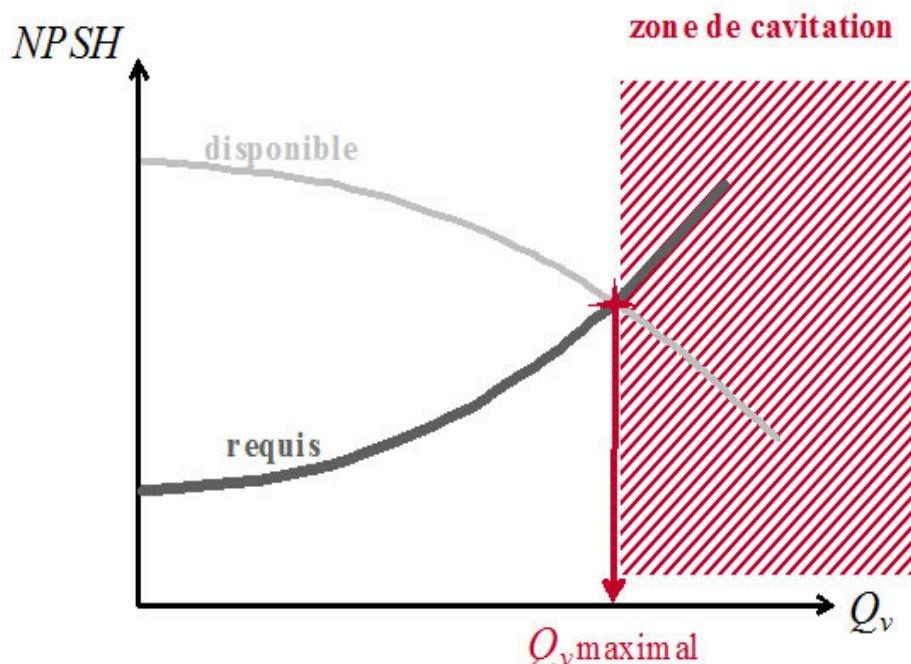
NPSH est l'abréviation de l'expression anglaise « Net-Positive-Section-Head », encore appelée « hauteur d'aspiration nette positive » ou « hauteur totale de pression de retenue ». Le NPSH est rattaché au phénomène de cavitation. De même que la hauteur d'élévation, le débit et la puissance absorbée, il représente pour une pompe une des données les plus importantes. On distingue le NPSH de l'installation (NPSH disponible) et le NPSH de la pompe (NPSH nécessaire). En comparant simplement les deux valeurs  $NPSH_{dispo}$  et  $NPSH_{nécess}$ , il est possible de déterminer si la pompe choisie

pour l'installation concernée est adaptée ou non. Pour que la pompe fonctionne sans cavité on doit avoir :

$$NPSH_{\text{dispo}} > NPSH_{\text{necess}}$$

Cette condition doit être remplie sur la totalité du domaine de fonctionnement admissible de la pompe.

C'est le cas lorsque le  $NPSH_{\text{dispo}}$  [m] est supérieur d'environ 0,5 m au  $NPSH_{\text{necess}}$ .



*Figure 29 NPSH*

#### \* NPSH de la pompe :

Le  $NPSH_{\text{necess}}$  dépend seulement des caractéristiques de la pompe et non de celles de l'installation. Il est variable pour chaque pompe en fonction du débit et de la vitesse de rotation. De plus il est toujours positif.  $NPSH_{\text{necess}}$  est indépendant de la nature du fluide transféré. Les valeurs de NPSH mentionnées sur la courbe caractéristique de chaque pompe résultent de mesures effectuées avec de l'eau froide. Ces valeurs ont été obtenues sur un banc d'essai spécialement conçu pour mesurer le NPSH et peuvent être vérifiées à tout moment. Le  $NPSH_{\text{necess}}$  donne une indication sur la possibilité d'aspiration de la pompe en un point précis de la courbe.

La capacité nécessaire d'aspiration de la pompe est d'autant plus grande que la valeur NPSH est faible.

Grâce à une construction adaptée, on peut obtenir de faibles valeurs de NPSH. Ces valeurs jouent un rôle très important, notamment dans le cas de transfert de liquides proches du point d'ébullition (gaz liquéfiés).

\* **NPSH de l'installation :**

$NPSH_{dispo}$  équivaut à la réserve totale de pression au-dessus de la tension de vapeur du produit qui est disponible à la bride d'aspiration de la pompe. Cette notion résume en un terme toutes les données de l'installation qui ont une influence sur la hauteur d'aspiration de la pompe. Il suffit au constructeur de la pompe de connaître la valeur  $NPSH_{dispo}$  pour pouvoir garantir un fonctionnement irréprochable de l'installation de pompage.

Les différentes données contenues dans la formule  $NPSH_{dispo}$  sont :

- $P_{atm}$  : pression atmosphérique (dépend de l'altitude) en [Pa]
- $P_v$  : pression absolue [Pa] de vaporisation
- $J_{asp}$  : pertes de charge de la conduite d'aspiration en [Pa]
- $H_h$  : charge hydraulique du fluide  $H_h = \rho \cdot g \cdot h$

$h$  : hauteur géométrique (d'aspiration ou de refoulement ou les deux) en mètre d'eau  
 $\rho$  : masse volumique de liquide  
 $g$  : pesanteur [m/s<sup>2</sup>]

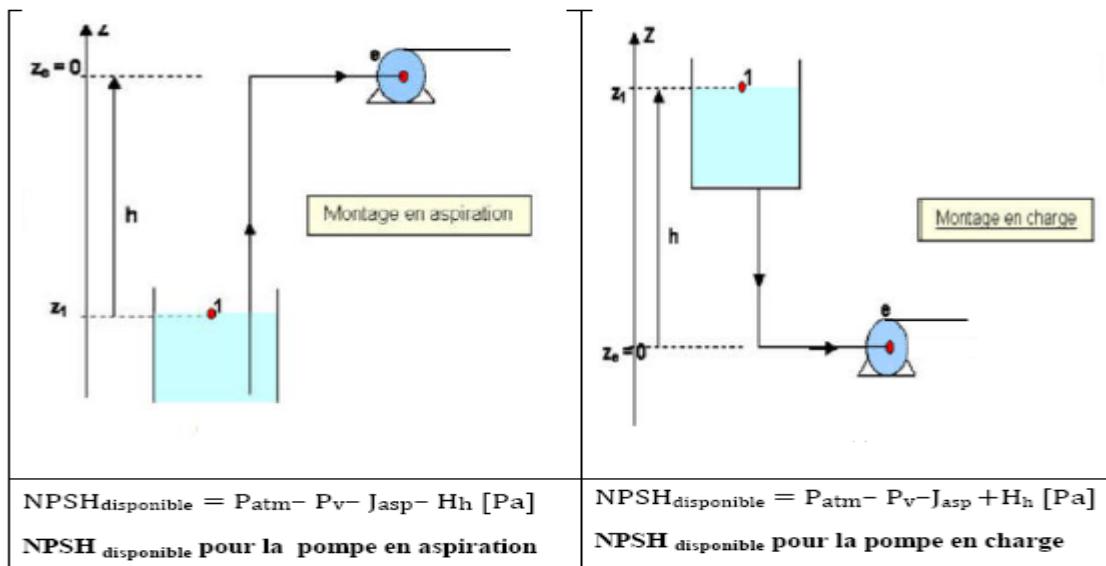


Figure 30  $NPSH_{dispo}$  pour une pompe en aspiration et en charge

(4) **Géométrie de l'écoulement du liquide dans la roue :**

- Triangle des vitesses :

L'étude des diverses composantes des vitesses d'écoulement dans la roue d'une pompe est possible grâce à la répartition des vitesses par des vecteur. La roue est animée par une certaine vitesse de rotation

$$\omega : u_1 = \omega r_1, u_2 = \omega r_2$$

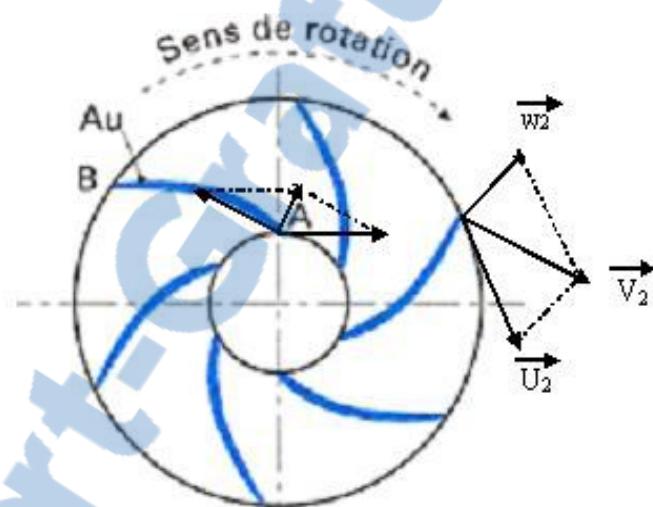
Avec :  $r_1 = \frac{d_1}{2}, r_2 = \frac{d_2}{2}$

Quant à l'eau qui remplit l'espace compris entre deux aubages successifs, elle est animée du fais de la rotation, d'une vitesse relatif  $\omega$  par rapport à ces aubages et qui se comporte avec la vitesse tangentielle (d'entrainement) précédente pour donner une vitesse absolue  $V$ .

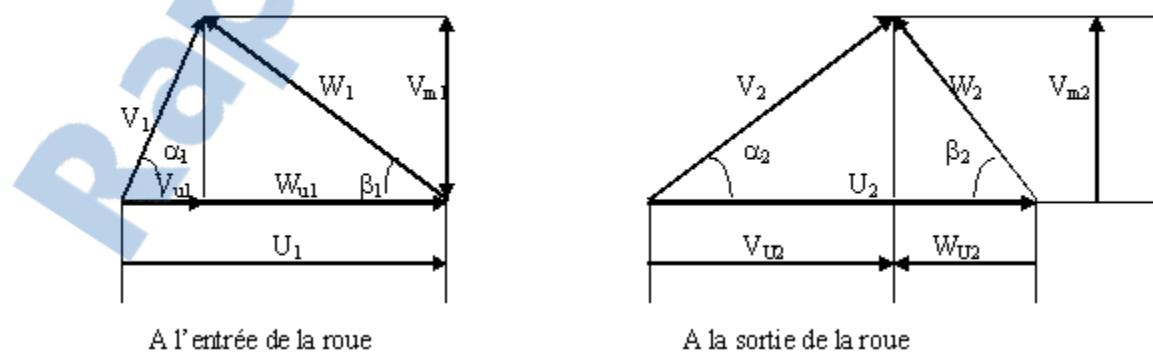
On aura ainsi au point 1 et 2 (voir la figure) :

- A l'entrée de l'aubage en (1) les vitesses :  $u_1, w_1, V_1$
- A la sortie de l'aubage en (2) les vitesses :  $u_2, w_2, V_2$
- $\alpha_1$  et  $\alpha_2$ : angles des vitesses absolues (d'aubes) d'entrée
- $\beta_1$  et  $\beta_2$  : angles des vitesses absolues (d'aubes) de sortie

Les états du mouvement d'entrée et de sortie de la roue tournante à la vitesse angulaire  $\omega$  sont représentés par les triangles de vitesse d'entrée et de sortie construits de la manière suivante :



*Figure 31 schéma représentatif des directions des vitesses*



*Figure 32 Triangle des vitesses*

$\vec{u}$ : vitesse d'entrainement dirigée suivant la tangente à la roue

$\vec{w}$ : vitesse relative par rapport à la roue

$\vec{V}_u$ : vitesse périphérique (projection de la vitesse absolue  $V$  sur la tangente de la roue)

$\vec{V}_m$ : vitesse méridienne (projection de la vitesse absolue  $V$  sur le plan méridien)

$\vec{V}_r$ : vitesse radiale (projection de la vitesse absolue  $V$  sur le rayon)

**(5) Equation fondamentale des turbopompes :**

➤ **Equation d'Euler :**

On suppose que l'écoulement absolu est permanent, nous allons appliquer le théorème de quantité de mouvement au fluide contenu dans une surface de référence cylindrique contenant la roue, le changement géométrique de la vitesse absolue de  $V_1$  et  $V_2$ , et le changement de mouvement des vitesses dans le sens périphérique de  $r_1 V_1 \cos \alpha_1$  et  $r_2 V_2 \cos \alpha_2$

Le mouvement du couple moteur transmis par l'arbre à la roue mobile égale :

$$M = \rho q v (r_2 \cdot V_2 \cos \alpha_2 - r_1 \cdot V_1 \cos \alpha_1) \text{ En m N}$$

La puissance fournie au liquide par la roue de la pompe :

$$P = M \cdot \omega = \rho q v (r_2 \cdot V_2 \cos \alpha_2 \cdot \omega - r_1 \cdot V_1 \cos \alpha_1 \cdot \omega)$$

Or que :

$$r_2 \cdot \omega = u_2$$

$$r_1 \cdot \omega = u_1$$

Alors :

$$P = M \cdot \omega = (u_2 \cdot V_2 \cos \alpha_2 - u_1 \cdot V_1 \cos \alpha_1) \text{ En W}$$

Après élimination des fonctions tri géométriques de cette dernière

$$V_1 u_1 \cos \alpha_1 = \frac{1}{2} (V_1^2 + u_1^2 - w_1^2) \Leftrightarrow V_2 u_2 \cos \alpha_2 = \frac{1}{2} (V_2^2 + u_2^2 - w_2^2)$$

On obtient :

$$P = \bar{\omega} q_v \left[ \frac{V_2^2 - V_1^2}{2g} + \frac{u_2^2 - u_1^2}{2g} - \frac{w_2^2 - w_1^2}{2g} \right]$$

$\bar{\omega}$  : Le poids spécifique du mètre cube de liquide refoulé

$\frac{V_2^2 - V_1^2}{2g}$ : L'accroissement unitaire de l'énergie cinétique du liquide du au changement de vitesse  $V_1$  à  $V_2$

$\frac{u_2^2 - u_1^2}{2g}$ : L'accroissement unitaire de l'énergie de pression produit par la force centrifuge

$\frac{w_2^2 - w_1^2}{2g}$ : L'accroissement unitaire de l'énergie relative au passage par les canaux divergents de la roue

Comptent des relations de la figure de diagrammes de vitesse :

$$V_1^2 = V_{u1}^2 + V_{m1}^2$$

$$V_2^2 = V_{u2}^2 + V_{m2}^2$$

$$W_1^2 = W_{u1}^2 + W_{m1}^2$$

$$W_2^2 = W_{u2}^2 + W_{m2}^2$$

➤ **Élution de BeutBrend :**

$$P = \bar{\omega} q_v \left[ \frac{V_{u2}^2 - V_{u1}^2}{2g} + \frac{u_2^2 - u_1^2}{2g} + \frac{w_{u2}^2 - w_{u1}^2}{2g} \right]$$

➤ **Hauteur d'élévation théorique dans le cas d'une roue à nombres d'aube indéfiniment grand d'une pompe centrifuge :**

La hauteur d'élévation théorique (hauteur d'Euler) est donnée par l'équation :

$$M_w = \bar{\omega} q_v H_{th\infty}$$

Après substitution aux termes correspondants aux valeurs donnée par les dernières équations on obtient :

$$H_{th\infty} = \frac{V_2^2 - V_1^2}{2g} + \frac{u_2^2 - u_1^2}{2g} + \frac{w_2^2 - w_1^2}{2g}$$

$\frac{V_2^2 - V_1^2}{2g}$ : Hauteur dynamique d'élévation (effet du changement des vitesses absolues)

$\frac{u_2^2 - u_1^2}{2g} + \frac{w_2^2 + w_1^2}{2g}$ : Hauteur potentielle d'élévation (effet de l'action des forces centrifuges et de la réduction des vitesses relatives de  $w_1, w_2$ ) Pour un débit donné et une vitesse de rotation donnée cette énergie ne dépend que des angles d'entrée et de sortie du fluide mais non pas du trajet suivi à l'intérieur de la roue.

En générale il n'y a pas de roue directrice modifiant la direction d'amenée du liquide avant l'entrée de la roue donc l'arrivée du liquide à l'entrée de la roue est radial ( $\alpha=90^\circ$ )

Cos 90 = 0

D'où :  $u_1 \cdot v_1 \cos \alpha_1 = 0$

Et  $u_2 \cdot v_2 \cos \alpha_2 = V_{u2}$  composante tangentielle de  $v_2$

L'équation devient plus simple :  $H_{th\infty} = \frac{V_{u2} u_2^2}{u_2 g}$

On déduit que  $H_{th\infty}$  est proportionnelle à  $V_{u2}^2$

**g) Types des pertes dans la pompe centrifuge**

a. **Pertes mécaniques :**

- Perte dans paliers radiaux.
- Perte dans paliers axiaux.
- Pertes d'accouplement.
- Pertes dans la garniture mécanique.
- Pertes par frottement des surfaces immergées en rotation :
  - \* Pertes par frottement de disque.
  - \* Pertes par frottement sur un cylindre.



**b. Pertes par fuites :**

- Fuite d'une garniture d'ouïe mono étage.
- Fuite dans une garniture d'ouïe bi étage.
- Fuite sur barrage arrière d'une roue équilibrée.
- Fuite au piston d'équilibrage.
- Fuite à l'extrémité des aubes.
- Fuite externes.

**c. Pertes hydrauliques :** Les pertes hydrauliques sont constituées par :

- Les pertes dans le conduit d'aménée.
- Les pertes dans les roues.
- Les pertes dans les diffuseurs lisses.
- Les pertes dans les canaux de retour.
- Les pertes dans la volute ; le diffuseur droit et le coude pour les pompes hélices.
- Les pertes des organes situés sur les conduits (pipe) entre les pompes et les puits injecteurs.

**h) Problèmes d'installation et de fonctionnement d'une pompe centrifuge :**

La rupture de fonctionnement d'une pompe peut être causée par plusieurs facteurs :

➤ **Surcharge :**

Une pompe est choisie d'après certaines conditions spécifiques telles que débits, pression, vitesse... qu'elle peut fonctionner de temps à autrement surcharge. Mais si on oublie que ce service devrait être rendu occasionnellement, et qu'on la fait tourner 24 heures par jour sous ce régime, on obtient une rupture de l'arbre ou des paliers grillés.

➤ **Mauvais graissage :**

Si on fait tourner une pompe avec des paliers sans graisse, on finit par un arrêt brutal, dans ce cas, on s'aperçoit souvent de l'absence de graisseur sur la pompe ou sur la pompe concernée n'est pas inscrite dans le plan de graissage. Le fiabiliste doit veiller à la présence des graisseurs le cas échéant ou les retirer dans le cas des roulements graissés à vie.

➤ **Fluide inadapté :**

Si on modifie le critère de pompage en changeant la nature du fluide à véhiculer ou en augmentant la température, les matériaux peuvent ne pas être adaptés, la pompe risque d'être détruite.

➤ **Fonctionnement à vide :**

En cas d'absence de contrôle de démarrage, la vanne de refoulement étant fermée, ainsi que la vanne de by-pass, la pompe peut fonctionner à vide ; le débit est nul, toute la puissance fournie se transforme en chaleur et puisque le liquide ne circule pas, la chaleur produite ne peut être évacuée. Dans ce cas la roue et la garniture seront endommagées.

➤ **Mauvais alignement :**

La pompe et le moteur ne sont pas exactement en face par le défaut de l'accouplement, défaut de fixation ou de fondation. Les paliers et l'arbre seront soumis à des vibrations et finiront par se casser.

➤ **Fuite :**

Le liquide fuit. Si le liquide est acide, les pièces métalliques extérieures qui sont différentes de la partie hydraulique seront attaquées érognées. Une fuite abondante provient de l'usure de la garniture ou d'un défaut de tresse.

➤ **La cavitation :**

La cavitation est le problème majeur dans les pompes. Elle est provoquée par la formation et l'implosion de bulles de gaz provenant de la formation d'une pression négative locale sous l'effet de la pression de vaporisation du fluide pompé à l'entrée de la roue. Cela a pour conséquence un rendement (hauteur manométrique totale) et une efficacité moindre et provoque un fonctionnement irrégulier, du bruit et des dommages à l'intérieur de la pompe.

Pour éviter la cavitation, le fluide pompé doit être soumis à une pression statique minimale. Cette hauteur d'eau d'entrée minimale dépend de la température et de la pression du fluide pompé.

\* **Quelques précautions pour empêcher la cavitation :**

- Augmentation de la pression statique
- Diminution de la température du fluide
- Choix de pompe avec hauteur d'entrée d'eau minimale



*Figure 33 Problème de cavitation*

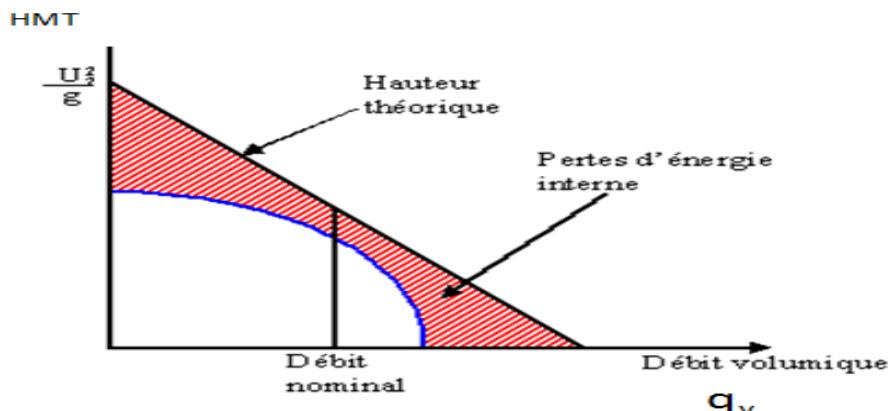
i) **Courbes caractéristique des pompes centrifuges :**

L'installation de la pompe dans un système de pompage exige, la connaissance de ses paramètres nominaux, débit nominal  $q_v$  et la hauteur nominale  $H_n$  assurés à la vitesse de rotation nominale  $N_n$ . Dans ce but, le fonctionnement des pompes est caractérisé par un ensemble de courbes appelées caractéristique, dont les plus utilisées sont :

- Hauteur-débit
- Puissance-débit
- Rendement-débit
- (NPSH) -débit

✓ **Courbe Hauteur-débit :**

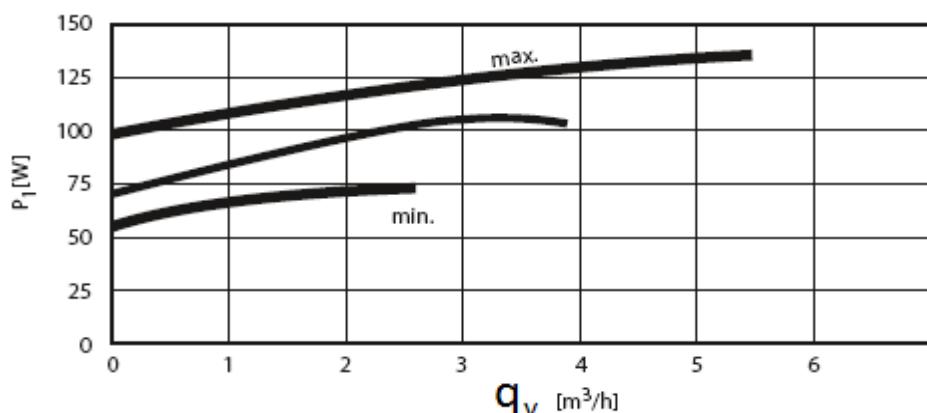
On trace cette courbe réelle à partir de la courbe théorique par soustraction des pertes d'énergies. Cette courbe montre la variation de la pression ou hauteur en fonction du débit, ce qui permet aux exploitants d'obtenir la pression désirée par une simple manœuvre de la vanne de refoulement, ce qui change le débit.



*Figure 34 Courbe Hauteur-débit*

✓ **Courbe Puissance-débit :**

Dans les pompes à faible et moyenne vitesse spécifique, les courbes  $P_{ab}$  représente la puissance absorbée par l'arbre de pompe, ce qui permet de faire le choix de la courbure qui convient, les courbes  $P_{ab}=F(q_v)$ , sont régulièrement montantes et atteignent par foie un maximum.

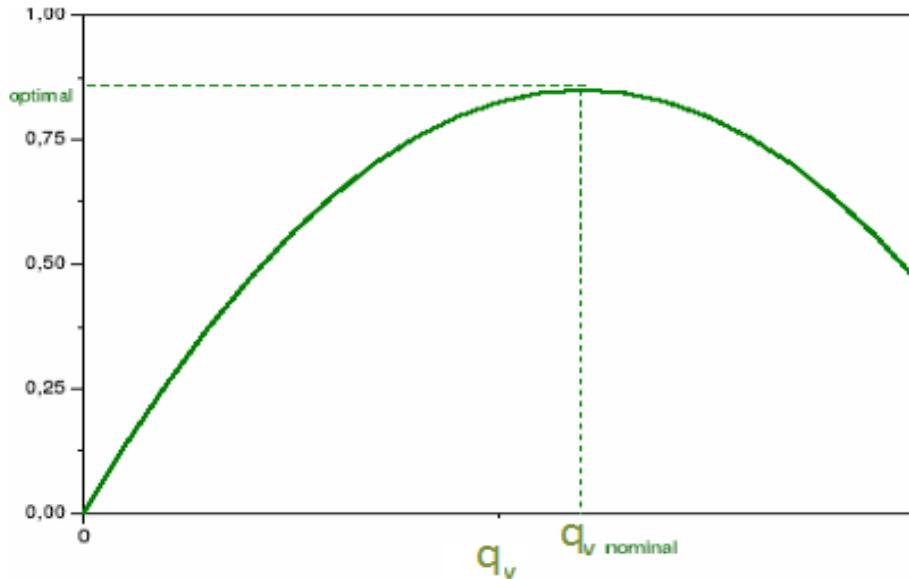


*Figure 35 Courbe Puissance-débit*

✓ **Courbe Rendement-débit :**

Les courbes de rendement  $\eta = F(q_v)$  montent d'abord jusqu'au sommet  $\eta_{\max}$ , qui correspond aux conditions optimales de fonctionnement et rendement, en suite d'une façon moins marquée dans les pompes à faible vitesse spécifique, et d'une façon plus marquée dans les pompes à vitesse spécifique élevée.

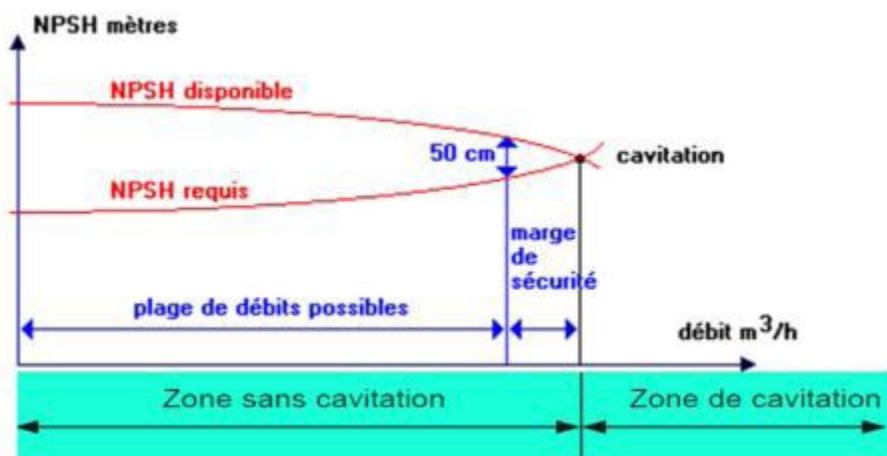
- Elle montre l'efficacité de la pompe
- Elle se définit comme étant le rapport entre la puissance utile et la puissance absorbée par l'arbre.



*Figure 36 courbe Rendement-débit*

✓ **Courbe (NPSH)-débit :**

Pour qu'une pompe fonctionne normalement (sans cavitation), il faut que le NPSH disponible (calculé) soit supérieur au NPSH requis (indiqué par le constructeur).

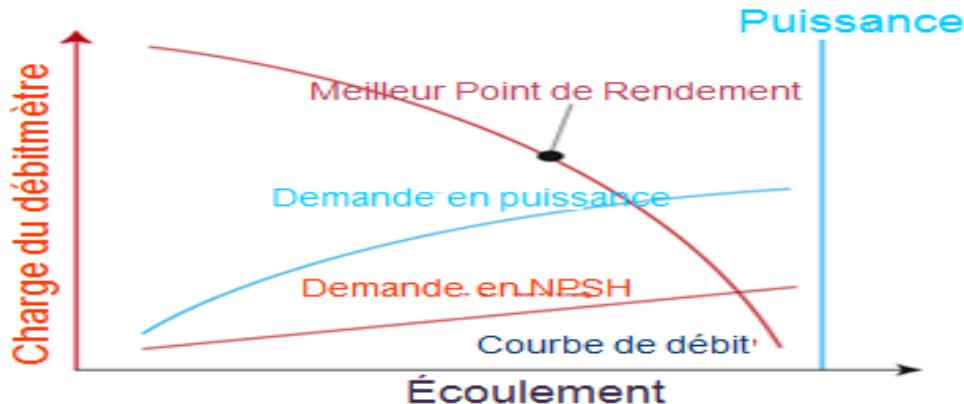


*Figure 37 Courbe (NPSH)-débit*



✓ **Courbes rassemblées :**

Cette courbe, élaborée par un fabricant de pompe à partir d'essais réels, montre la relation entre le débit, la charge dynamique, le rendement total, la demande en NPSH et la demande en puissance.



*Figure 38 Courbe rassemblée*

j) **Avantages et inconvénients des pompes centrifuges :**

❖ **Avantage :**

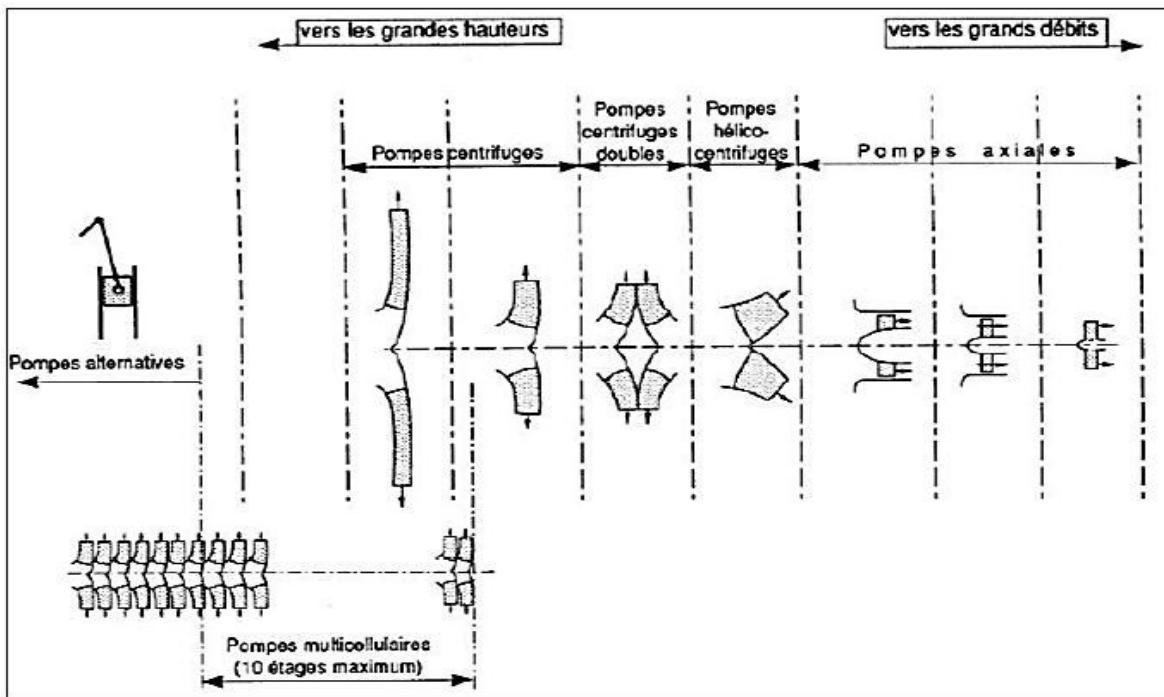
- Elles sont moins encombrement par rapport aux pompes volumétrique
- Elles ont un meilleur rendement
- Elles sont adaptées à une très large gamme de liquides
- Elles sont simples
- Régularité dans le fonctionnement (absence de variation du débit et de pression)
- Aptitude au fonctionnement à grande vitesse, dans l'accouplement peut se faire directement avec des moteurs électriques ou diesel.
- En cas de colmatage partiel ou d'obstruction de la conduite de refoulement, la pompe centrifuge ne subit aucun dommage et l'installation ne risque pas d'éclater.

❖ **Inconvénients :**

- Faible débit
- Impossibilité de pomper des liquides trop visqueux
- Production d'une pression différentielle peu élevée (de 0,5 à 10 bar)
- Leurs amorcages ne se fait pas automatiquement
- A l'arrêt ces pompes ne s'opposent pas à l'écoulement du liquide par gravité

**k) Choix de la pompe :**

Le type de pompes utilisées dépend des conditions d'écoulement de fluide. Si on veut augmenter la pression d'un fluide on utilise les pompes volumétriques, si on veut augmenter le débit on utilise les pompes centrifuges.



*Figure 39 Choix de pompe*

**l) Couplage des pompes :**

Pour parvenir à obtenir certaines conditions de fonctionnement impossibles à réaliser avec une seule pompe, les utilisateurs associent parfois deux pompes dans des montages en série ou en parallèle.

**• Couplage en série :**

Il a pour but d'augmenter la pression tout en maintenant le débit constant.

$$q_{v_{eq}} = q_{v1} = q_{v2}$$

$$H_{eq} = H_1 + H_2$$

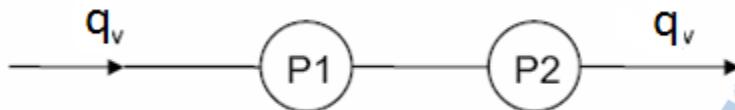


Figure 40 pompe en série

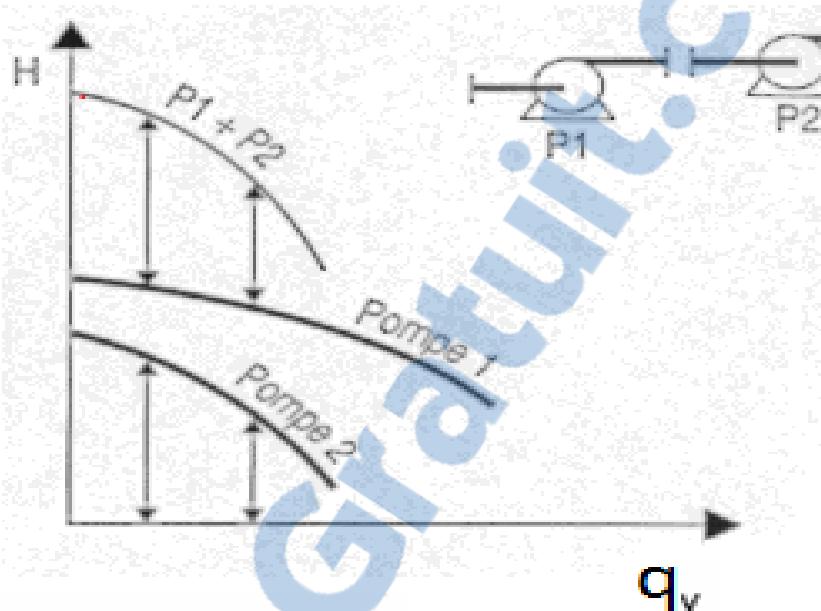


Figure 41 courbe hauteur-débit pour deux pompes

Graphiquement, on trouve la caractéristique de la hauteur manométrique totale du montage en additionnant les caractéristiques de chaque pompe pour un même débit. Le couplage en série permet d'augmenter la hauteur manométrique totale, donc la charge du réseau. Il convient donc bien pour un réseau présentant des pertes de charge importantes.

- Couplage en parallèle :**

Il a pour but d'augmenter le débit en plaçant les pompes en parallèle pour le même  $H_{MT}$  on fait la somme des  $q_v$

$$H_{eq} = H_1 = H_2$$

$$q_{v_{eq}} = q_{v1} + q_{v2}$$

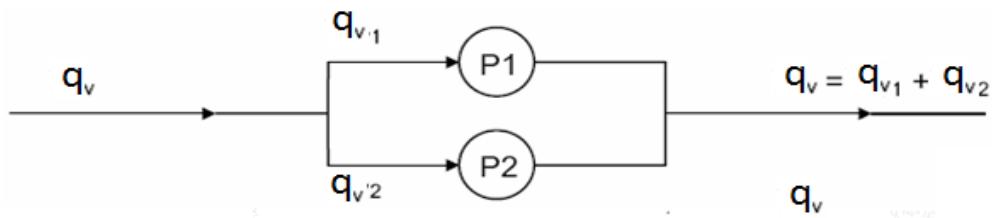


Figure 42 Pompes en parallèle

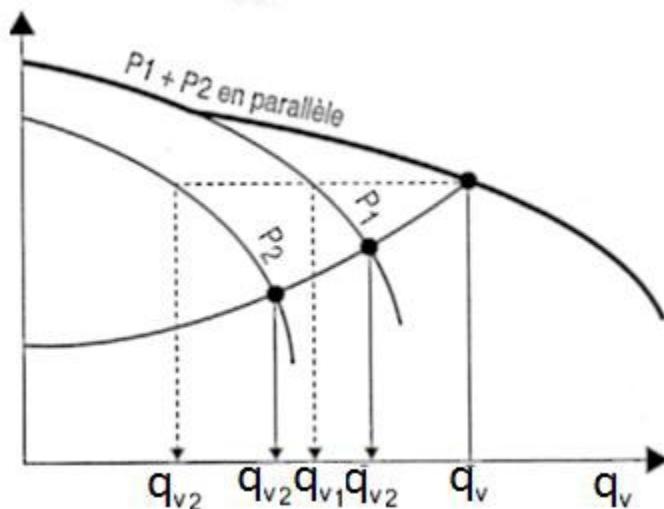


Figure 43 Courbe équivalente de deux pompes en parallèle

Graphiquement, on trouve la caractéristique du débit total du montage en additionnant les débits des deux pompes pour une même hauteur manométrique totale. Le couplage en parallèle permet d'augmenter le débit dans le réseau. Il convient bien pour un réseau présentant des pertes de charge assez faibles. Les pompes sont parfois montées en parallèle (by-pass) avec une seule des deux qui fonctionne. En cas de panne ou pour une action de maintenance le montage permet alors de continuer à fonctionner en démarrant la deuxième pompe.

## IX.

### Réseaux des conduites :

#### A. Définition des conduites :

C'est un ensemble de tuyauteries régulières en série ou en parallèle, reliés par des jonctions, des coudes, des filtres, des réservoirs, des appareils d'instrumentation, des changements de section, des robinets, des pompes.

Les canalisations constituent l'un des éléments les plus importants des projets de distribution, c'est pourquoi il est essentiel que les éléments utilisés dans l'installation, qu'elles soient aériennes ou enterrées, aient une longue vie de service capable de garantir l'usage efficient des ressources investies.

Ces canalisations sont valorisées par leur diamètre, leur longueur, leurs parois intérieures et extérieures en tenant compte des pertes de charge.

#### 1. Conduite simple :

C'est une conduite de diamètre et rugosité constante véhiculant un même débit sur toute la longueur.

#### 1. Conduites mixtes :

Sont des conduites en série qui sont traversé par le même débit. Les pertes totales sont égales aux sommes des pertes de charge

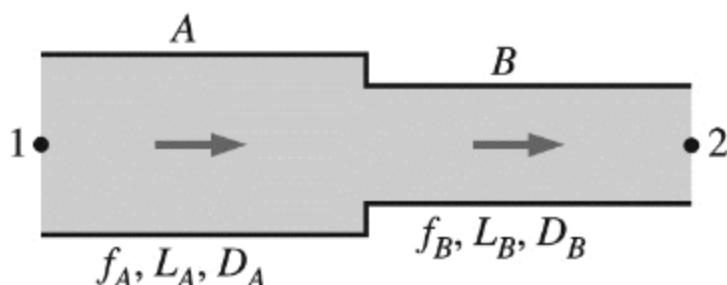


Figure 44 Conduite mixte

$$q_A = q_B$$

$$J_{(L+S)_{1-2}} = J_{(L+S)_A} + J_{(L+S)_B}$$

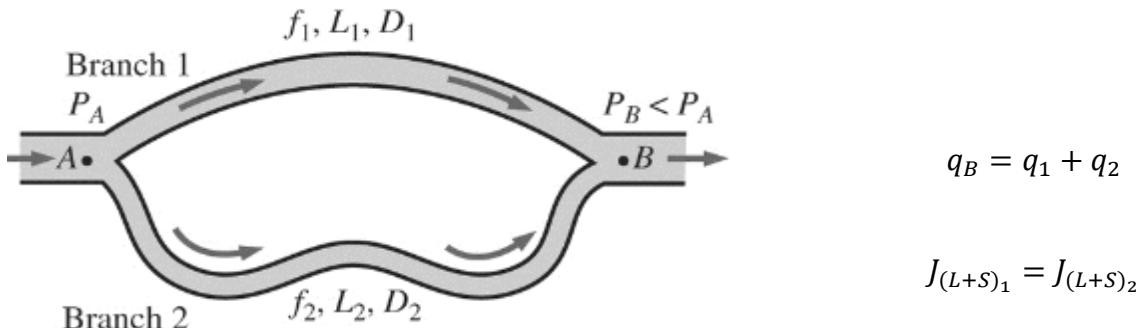
Avec :

\$J\_{(L+S)}\$ : les pertes de charge linéaires et singulières

## 2. Conduites multiples :

Sont des conduites simples passées en parallèle, qui sont traversé par deux débits différents.

Dans ce cas le débit total est égal aux sommes des débits



**Figure 45 Conduites multiples**

## 3. Pertes totales dans les conduites :

En pratique, le calcul des pertes de charge totales dans les conduites s'effectue en additionnant les pertes dues au frottement dans les conduites (pertes majeures) avec les pertes locales (pertes mineures).

$$J_{totale} = J_{conduites} + J_{local}$$

## B. Les équipements dans un réseaux de conduites :

Les équipements hydrauliques d'une station de pompage en dehors des pompes elles-mêmes sont :

### 1. Equipements en amont (aspiration) :

L'aspiration des pompes d'une station peut se faire soit dans une bâche d'aspiration, soit dans une conduite.

#### a) Aspiration en bâche :

L'eau à éléver est stockée dans une bâche ou réservoir en communication avec l'atmosphère, et l'aspiration des pompes se fait alors directement dans la bâche.

- **Grille :**

Ces dispositifs ne sont utilisés que pour les pompages d'eau brute, afin d'éviter l'entrée des corps solides dans les pompes.

- **Tulipe :**

La nécessité de la tulipe dépend essentiellement de la vitesse d'entrée de l'eau dans la conduite d'aspiration. Pour des valeurs ne dépassant pas 0.8m/s, il est possible de ne pas prévoir de tulipe.

- **Crépine :**

Tout comme la grille, la crépine évite l'entrée de corps solides dans la pompe. Elle doit être entièrement immergée pour éviter les rentrées d'air (une marge suffisante doit être prévue pour le vortex) et éloignée d'environ 0.5m du fond du puisard.

- **Clapet d'aspiration, clapet à crépine :**

Un clapet anti-retour placé sur la canalisation d'aspiration évite à l'arrêt de la pompe le retour d'eau. Si de son côté le clapet anti-retour normalement placé au refoulement ferme mal. De plus, ce clapet permet de maintenir la colonne d'eau dans la conduite d'aspiration et le corps de la pompe, évitant de recommencer chaque fois l'amorçage. Ce clapet peut être combiné avec la crépine d'aspiration pour former un clapet à crépine.

**b) Aspiration sur conduite :**

- **Conduite ou collecteur d'aspiration :**

Sur la conduite, on évite toute formation de poches d'air. Les parties horizontales comporteront une légère pente montant en direction de la pompe ; Ceci permettra l'évacuation permanente des bulles d'air qui pourront être libérées dans l'eau. L'équipement du collecteur comprendra tous les dispositifs nécessaires à son sac vidange. Pour le raccordement sur les appareillages, on utilise les joints à brides.

**c) Organes communs aux deux cas d'une aspiration :**

- **Coude :**

Les coudes seront le moins nombreux possible, à grand rayon de courbure ; on évite de monter un coude juste en amont de la bride d'aspiration.

- **Vanne d'aspiration :**

Une vanne montée à l'aspiration de la pompe permet d'isoler la pompe pour les travaux d'entretien ou démontage. Les vannes utilisées peuvent être soit des vannes à opercule avec presse-étoupe hydraulique, soit des vannes papillon.

- **Convergent d'aspiration :**

Afin de limiter les pertes de charges à l'aspiration des pompes, la conduite d'aspiration a fréquemment un diamètre élevé donnant une vitesse de circulation inférieure à la vitesse à l'entrée de la bride de la pompe. La conduite est alors raccordée à la pompe par un convergent, ce qui permet d'avoir une accélération progressive de l'écoulement, favorisant la bonne répartition des vitesses juste à l'amont de la pompe.

**2. Equipement en aval (refoulement) :**

- **Joint de raccordement :**

La conduite de refoulement sera raccordée à la pompe de manière à ne transmettre aucun effort sur la pompe. Pour ça on peut utiliser un joint genre GIBAULT ou similaire.

- **Divergent :**

A la sortie de la pompe, la vitesse de l'eau peut être de 3 à 7m/s. Dans les conduites de refoulement, il est nécessaire de ralentir cette vitesse pour la maintenir dans une plage de 1.2 à 1.5 m/s. Le divergent à interposer à la sortie de la pompe pourra être un cône droit.

- **Clapet de refoulement :**

Le clapet pourra être placé à la sortie de la pompe dont le rôle est d'empêcher l'inversion du débit d'eau lors de l'arrêt de la pompe. Les clapets les plus utilisés sont les clapets à battant. Ils sont installés sur des conduites horizontales.

- **Vanne de refoulement :**

La vanne de refoulement se place après la pompe et le clapet anti-retour, elle peut avoir plusieurs rôles. Cette vanne permettra tout d'abord d'isoler la pompe lors des entretiens et des démontages. La vanne peut intervenir également lors de la mise en marche et de l'arrêt de la pompe dans le cas des pompes centrifuges. Pour celle-ci, en effet, la courbe de puissance absorbée montre que la puissance est minimale lorsque la vanne de refoulement est fermée. Il sera donc intéressant, dans le cas de grosses puissances sont en jeu, de démarrer la pompe avec une vanne fermée pour limiter la durée du démarrage.

### C. Courbes caractéristique du réseau de conduites :

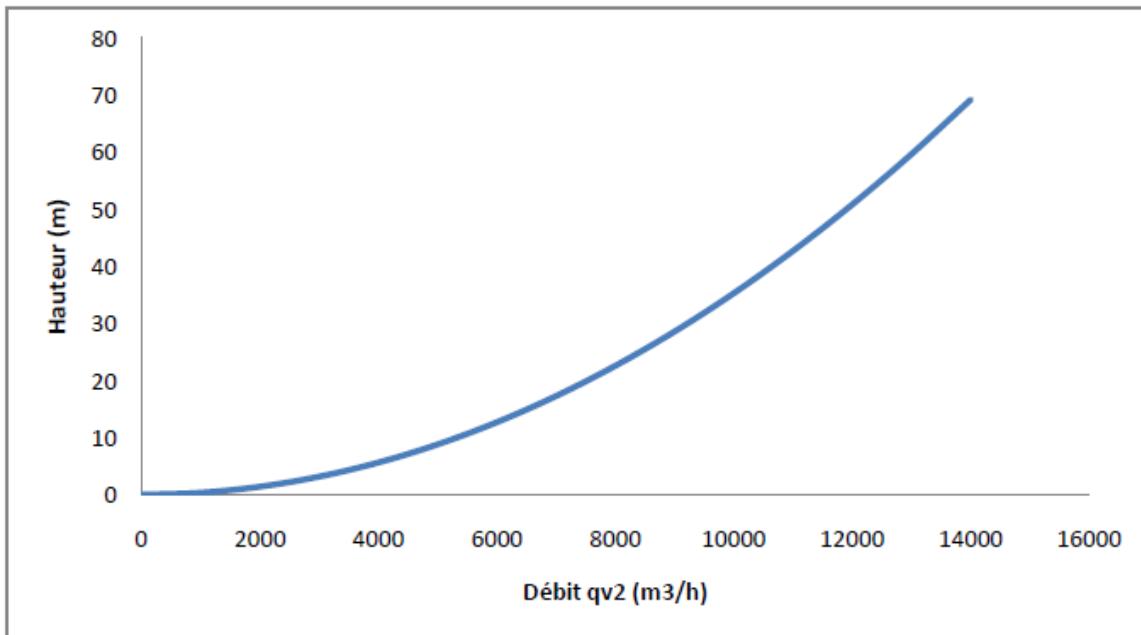
Pour chaque conduite, branche, singularité (vanne diaphragme, coud etc....) ou appareil hydraulique (turbine, pompe....)

On peut tracer une courbe caractéristique  $J_{(L+S)}=f(q_v)$  appeler la caractéristique fondamentale comme ceci :

$$J_{(L+S)} = \theta \cdot q_v^2$$

Telle que :

$$\theta = \frac{\sum \varepsilon_1 + \frac{\lambda_1 L_1}{D_1}}{2gS_1^2}$$



**Figure 46 Courbe réseau**

#### **D. Point de fonctionnement :**

Le point d'intersection entre la courbe de pompe et la courbe de réseau. Cela signifie qu'à ce point, il y a équilibre entre la génération de puissance de la pompe et la consommation d'énergie requise pour surmonter le liquide dans le système de tuyaux. Cela génère le débit que la pompe peut produire. Il faut faire attention à ne pas dépasser une valeur de débit minimale. Sinon elle surchauffe et s'endommage. Les spécifications du fabricant doivent être respectées.

La caractéristique de la pompe est toujours descendante, il n'y a qu'un seul point de fonctionnement possible. Ce point d'intersection détermine le point de régime de fonctionnement de la pompe sur la conduite.

Pour changer le point de fonctionnement du réseau (pompe -conduite) il faut changer la caractéristique de la conduite en fermant la vanne de refoulement ou de réglage.<sup>13</sup>

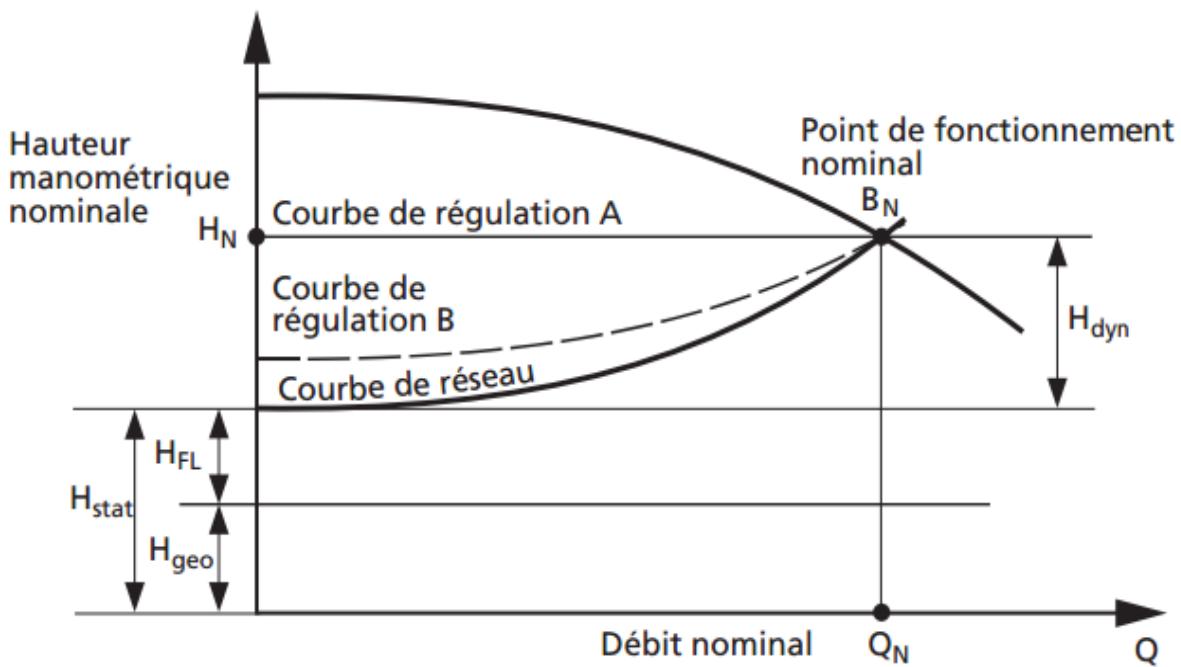


Figure 47 Point de fonctionnement

$H_{FL}$  : pression résiduelle (pression souhaitée à l'utilisation)

$H_{geo}$  : hauteur géométrique (entre les niveaux d'eau)

$H_{dyn}$  : hauteur manométrique dynamique (pertes de charge)

$H_{stat}$  : hauteur manométrique statique (part de HMT indépendante de  $Q$ )

**E. Type de conduites :**

**Conduite en PRV (GRP) :**

Un plastique à renfort de verre (ou Polyester Renforcé de fibres de Verre ou Polymère Renforcé aux fibres de Verre) est un matériau composite constitué d'une matrice polymère (appelée résine) renforcée par des fibres ou parfois par des microsphères de verre. La résine est généralement un polyester thermodurcissable, un époxyde, un vinylester ou thermoplastique (polyamide, par exemple).

Ses propriétés de résistance (mécanique, chimique) et sa densité sont très favorables, comparé aux métaux. Les renforts en verre (fibres, tissus, mats, etc.) sont très utilisés et très bon marché, comparés à la fibre de carbone.

Ces matériaux trouvent un usage dans de nombreux secteurs : automobile, marine, matériaux de construction, aéronautique, aérospatiale, équipements résistants à la corrosion (tels réservoirs, récipients, tuyaux), etc.

**Conduite en PVC :**

Le poly (chlorure de vinyle), connu sous le sigle PVC, est un polymère thermoplastique de grande consommation, amorphe ou faiblement cristallin, principal représentant de la famille chloropolymères.

Il est préparé à partir de deux matières premières : à 57 % de sel de mer (NaCl) et à 43 % de pétrole, c'est la seule matière plastique constituée par plus de 50 % de matière première d'origine minérale.

**Conduite en fonte ductile :**

La fonte ductile est un alliage de fer, carbone et silicium qui, en plus de conserver les propriétés traditionnelles de la fonte grise, a aussi les qualités de résistance à la rupture, la résistance aux chocs, une haute limite élastique ainsi qu'un allongement important.

**Conduite en résine Epoxy :**

L'époxy est un matériau fréquemment utilisé pour recouvrir les surfaces en béton telles que les planchers de garage. Le revêtement en époxy est constitué de deux composantes: une résine et un durcisseur. La résine est généralement de couleur transparente, alors que le durcisseur est de couleur plus foncé. Ce type de revêtement est reconnu pour sa durabilité, sa solidité et sa résistance aux produits chimiques.

**X. Conclusion :**

Dans ce chapitre on a indiqué les notions de la mécanique des fluides ainsi les réseaux des pompes et des conduites qui nous aident à calculer le point de fonctionnement de la station de SOUK TLATA

# **CHAPITRE 3**

## **CALCULS DES PERTES DE CHARGES**

### **ET POINT DE FONCTIONNEMENT**

## I. Introduction

Les pertes de charge sont des chutes de pression dues à la résistance que rencontrent les fluides en écoulement les actions de cisaillement occasionnent en effet des pertes énergétiques.

Dans ce chapitre nous allons nous intéresser au calcul des pertes de charges linéaires ainsi que les pertes de charges singulières, afin d'avoir une idée sur les chutes de pression occasionnées par la rugosité des parois ainsi que les singularités utilisées dans les conduites

### A. Calculs des pertes de charges linéaires et singulières

Nous allons effectuer ces calculs au niveau de trois parties

- De la station de pompage de l'eau de mer jusqu'à l'entrée de l'ultrafiltration.
- De la station de pompage qui alimente les trains de l'osmose inverse jusqu'à l'arrivée à la pompe HP.
- De la station de pompage qui alimente le système de récupération d'énergie jusqu'à l'arrivée.

#### 1. La station de pompage de l'eau de mer

Afin de faciliter les calculs, nous allons diviser cette partie en deux zones

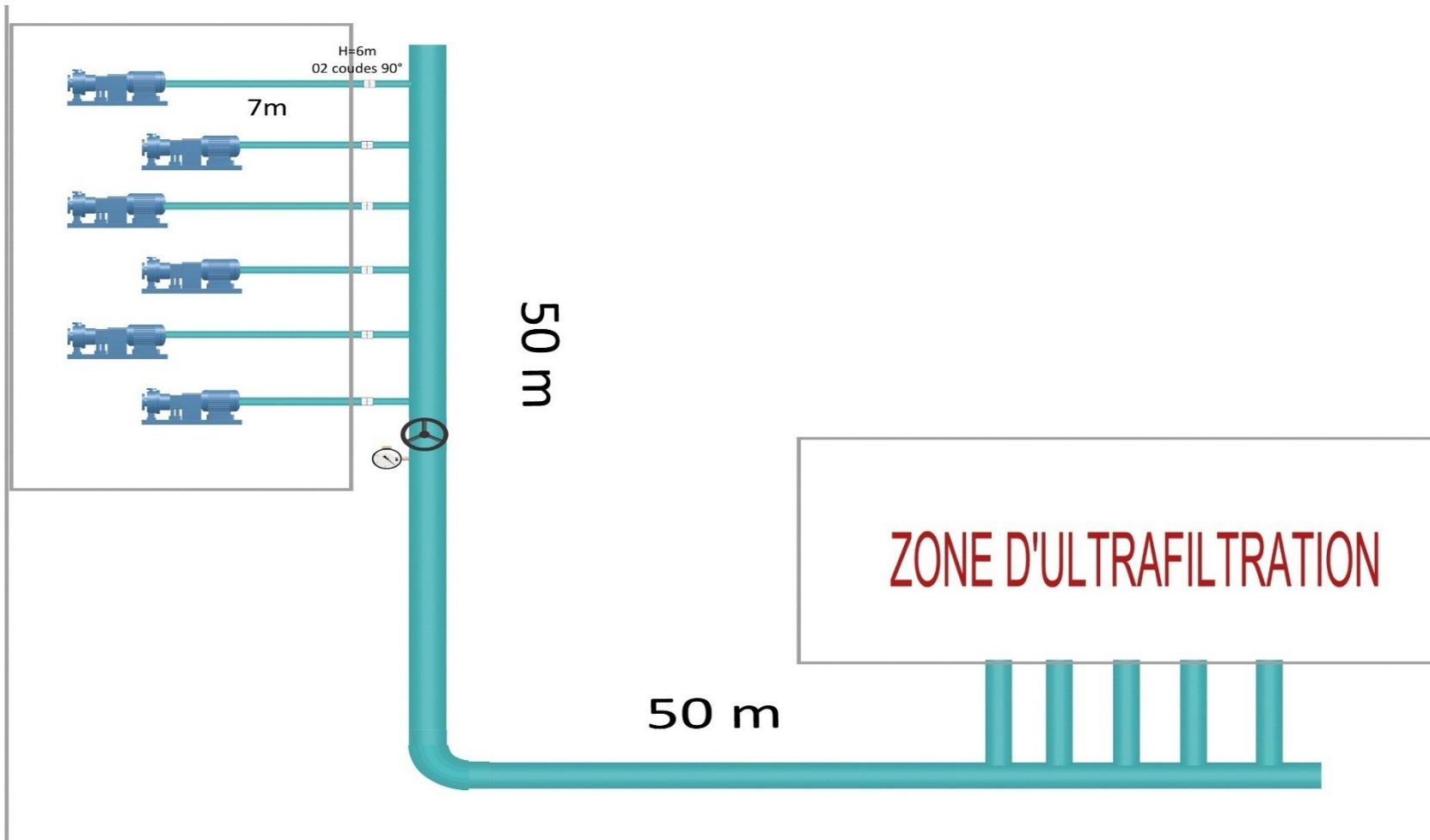
La première zone commence de la sortie des pompes de refoulement de l'eau de mer (point 1), jusqu'au manomètre situé dans le collecteur (point2) (voir le schéma correspondant).

La deuxième zone continue du manomètre (point2) jusqu'à l'arrivée de l'ultrafiltration (point 3)

##### a) Première zone

###### (1) Les équipements majeurs de cette partie

- 6 pompes centrifuges donc 5 en service et une en veille, avec une pression de refoulements de 3.4 bars
- 6 conduites en PRV dont on connaît la longueur et la hauteur ainsi que la rugosité de la paroi avec un diamètre de 750 mm
- 6 clapets anti retour, un dans chaque conduite
- 12 coudes à 90° arrondies (2 dans chaque conduite)
- Un collecteur qui relie les 6 conduites de refoulement avec un diamètre de 1800 mm
- 6 Té perpendiculaires qui relient entre les conduites de refoulements et le collecteur.
- Un manomètre dans le collecteur après les 6 conduites qui donne une pression de 2.34 bars.



**Figure II – Schéma de la station de pompage de l'eau de mer vers l'ultrafiltration**

**(2) Calcul des pertes de charges totales**

✓ *Données de calculs pour le point 1*

$Qv1=5300 \text{ m}^3/\text{h}$  soit  $Qv1=1.47 \text{ m}^3/\text{s}$

La rugosité de paroi  $\epsilon= 0.01 \text{ mm}$  ...

Diamètre de la conduite  $D=750 \text{ mm}$  soit  $D=0.75$

Longueur de la conduite  $L= 17 \text{ m}$

✓ *Données de calculs pour le point 2*

$Qv2=26500 \text{ m}^3/\text{h}$  soit  $Qv2= 7.36 \text{ m}^3/\text{s}$

Diamètre du collecteur  $D= 1800 \text{ mm}$  soit  $D=1.8$

La masse volumique  $\rho=1030 \text{ kg/m}^3$

La gravité  $g = 9.81 \text{ m/s}^2$

La viscosité dynamique pour  $T=20^\circ\text{C}$   $\mu=1,002 \cdot 10^{-3}$

Le niveau du collecteur  $\Delta Z= 9,5 \text{ m}$

**(a) Equations de calculs**

$$J_{(L+S)} (\sum_{i=1}^n \zeta_i + \sum_{j=1}^m \frac{\lambda_i L_i}{D_j}) \left( \frac{V_m^2}{2g} \right) \quad (I)$$

$$Q_v = V_m \cdot S \Rightarrow V_m = \frac{Q_v}{S} = \frac{Q_v}{\frac{\pi D_1^2}{4}} = \frac{4 \cdot Q_v}{\pi D^2} \quad (II)$$

$$J_L = \lambda_j \frac{V_m^2}{2g} \frac{L_j}{D_j} \quad (III)$$

$$R_{ej} = \frac{\rho V_m j D_j}{\mu} \quad (IV)$$

$$J_s = \sum \zeta_i \left( \frac{V_m^2}{2g} \right) \quad (V)$$

$$\frac{P_1}{\rho g} + \frac{V_1^2}{2g} + Z_1 = \frac{P_2}{\rho g} + \frac{V_2^2}{2g} + Z_2 + J_{(L+S)} \quad (VI)$$

(b) **Calcul des pertes de charges linéaires**

$$V_{m1} = \frac{4 \cdot 1.47}{\pi(0.75)^2}$$

$$V_{m1} = 3.32 \text{ m/s}$$

$$V_{m2} = \frac{4 \cdot 7.36}{\pi(1.8)^2}$$

$$V_{m2} = 2.89 \text{ m/s}$$

$$R_{ej} = \frac{1030 \cdot 3,32 \cdot 0.75}{0.001}$$

$$R_{ej} = 2.5647 \cdot 10^6$$

La rugosité de paroi  $\epsilon = 0.01 \text{ mm}$

$$\text{Calculons la rugosité relative } \frac{\epsilon}{D} = \frac{0.01}{750} = 1,33 \cdot 10^{-5}$$

En utilisant le diagramme de Moody pour  $\begin{cases} Re_1 = 2,5647 \cdot 10^6 \\ \frac{\epsilon}{D} = 1,33 \cdot 10^{-5} \end{cases}$

On obtient  $\lambda_1 = 0,01049$

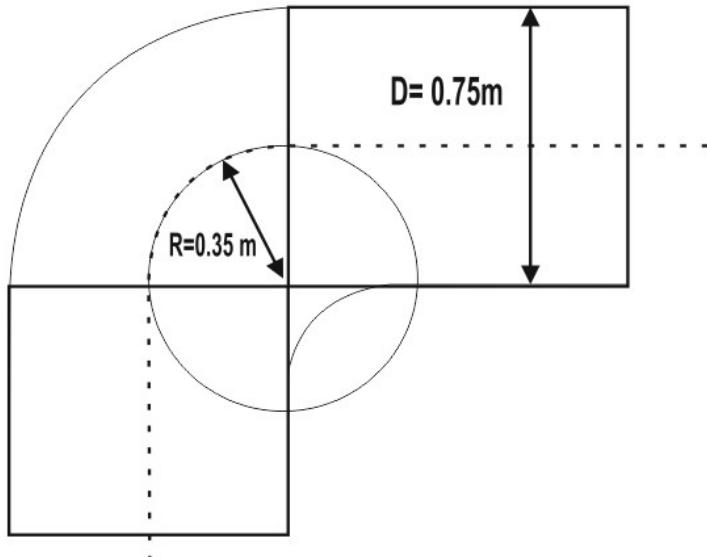
$$\text{Donc } J_L = 0.01049 \frac{3.32^2}{2.981} \frac{17}{0.75} = 0.13 \text{ m}$$

(c) **Calcul des pertes de charges singulières**

Entre les pompes de refoulements et le point du collecteur on a trois singularités qui sont

- Deux coudes à 90°
- Clapet anti-retour
- Un TE

Coude à 90°



**Figure 48 coude 90°**

Grace à un logiciel de conception, nous avons pu obtenir le rayon de courbure à l'aide de son diamètre et son angle de courbure

$$D = 0.75 \text{ m}$$

$$\alpha = 90^\circ$$

$$R = 0.375 \text{ m}$$

D'après la formule de Weisbach, on a

$$\zeta_a = \left[ 0.131 + 1.847 \left( \frac{D}{2R} \right)^{\frac{7}{2}} \right] \frac{\theta}{90}$$

$$\zeta_a = \left[ 0.131 + 1.847 \left( \frac{0.75}{2(0.375)} \right)^{\frac{7}{2}} \right] \frac{90}{90}$$

$$\zeta_a = 1.97$$

Clapet anti-retour

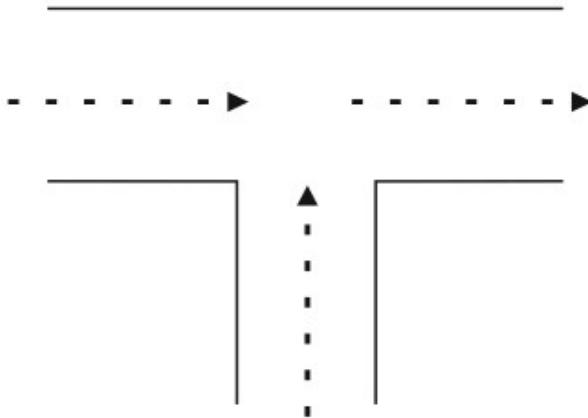
Le tableau suivant donne des valeurs expérimentales moyennes de  $\zeta_b$ , en fonction de  $\alpha$  = angle formé par le clapet mobile et l'axe de la conduite, en degrés

$\alpha$	20	30	40	50	60	70	75
$\zeta_b$	1,7	3,2	6,6	14	30	62	90

On a un angle de  $20^\circ \Rightarrow \zeta_b = 1.7$

Au niveau du Té

D'après l'abaque des coefficients de perte de charges singulières on a pu en tirer le coefficient de perte de charge pour ce type de sens d'écoulement :



*Figure 49 Singularité Té perpendiculaire*

$$\zeta_c = 1$$

$$(V) \dots J_s = \sum \zeta_i \left( \frac{V^2 m}{2g} \right)$$

$$J_s = (1.97 + 1.7 + 1) \left( \frac{3.32^2}{2(9.81)} \right)$$

$$Js = 2.62$$

*Remarque* Afin de vérifier si les calculs sont justes, on va appliquer ces pertes de charge dans l'équation de BERNOULLI, sachant la pression du démarrage on cherchera à connaître celle du collecteur, et on vérifiera avec le manomètre placé au point 2.

$$J_{T_1} = 2,62 + 0,13$$

$$J_{T_1} = 2,75$$

*Equation de Bernoulli entre point 1 et point 2*

$$\frac{P_1}{\rho g} + \frac{V_1^2}{2g} + Z_1 = \frac{P_2}{\rho g} + \frac{V_2^2}{2g} + Z_2 + J_{(L+S)}$$

$$\frac{340000}{1030 \cdot 9,81} + \frac{3,32^2}{2 \cdot 9,81} = \frac{P_2}{1030 \cdot 9,81} + \frac{2,89^2}{2 \cdot 9,81} + 9,5 + (0,13 + 2,62)$$

$$\Rightarrow P_2 = 2,35 \text{ bar}$$

Le manomètre posé dans le collecteur donne une pression  $P_2 = 2,34 \text{ bar}$ , ce qui vérifie nos calculs.

### b) Deuxième zone

#### (3) Les équipements majeurs de cette partie

- Une conduite en PRV de diamètre 1800mm et de longueur  $l=100\text{m}$
- Un coude à  $90^\circ$  arrondie de diamètre 1800mm
- 5 Té perpendiculaires qui relient le collecteur avec les conduites des Banks
- 5 conduites des Banks de diamètre 900mm

#### (4) Calcul des pertes de charge totales

- ✓ *Données de calculs pour le point 2*

$Q_{v2}=26500 \text{ m}^3/\text{h}$  soit  $Q_{v2}=7.36 \text{ m}^3/\text{s}$

Diamètre du collecteur  $D= 1800 \text{ mm}$  soit  $D=1.8\text{m}$

La masse volumique  $\rho=1030 \text{ kg/m}^3$

La pesanteur  $g = 9.81 \text{ m/s}^2$

La viscosité dynamique pour  $T=20^\circ\text{C}$  :  $\mu=1,002 \cdot 10^{-3}$

La longueur de la conduite  $L= 100\text{m}$

- ✓ Données de calculs pour le point 3

$Q_{v3}=1699 \text{ m}^3/\text{h}$  soit  $Q_{v3}=0.47 \text{ m}^3/\text{s}$

Diamètre  $D= 900 \text{ mm}$  soit  $D=0.9\text{m}$

Longueur de la conduite  $L=9\text{m}$

La masse volumique  $\rho=1030 \text{ kg/m}^3$

La pesanteur  $g = 9.81 \text{ m/s}^2$

La viscosité dynamique pour  $T=20^\circ\text{C}$   $\mu= 1,002 \cdot 10^{-3}$

Le niveau du Bank  $\Delta z= 6 \text{ m}$

(a) **Calcul des pertes de charges linéaires :**

**Equations de calcul**

$$(II) \dots V_m = \frac{4 \cdot Q_v}{\pi \cdot D^2}$$

$$(IV) \dots R_{ej} = \frac{\rho V_m}{\mu}$$

$$V_{m2} = 2,89 \text{ m/s}$$

$$V_{m3} = \frac{4 \cdot 0,47}{\pi \cdot (0,9)^2}$$

$$V_{m3} = 0,74 \text{ m/s}$$

$$R_{ej2} = \frac{1030 \cdot 2,89 \cdot 1,8}{0,001}$$

$$R_{ej2} = 5,35 \cdot 10^6$$

$$R_{ej3} = \frac{1030 \cdot 0,74 \cdot 0,9}{0,001}$$

$$R_{ej3} = 6,85 \cdot 10^5$$

La rugosité de paroi  $\varepsilon = 0,01 \text{ mm}$

Calculons la rugosité relative au point 2 :  $\frac{\varepsilon}{D} = \frac{0,01}{1800} = 5,55 \cdot 10^{-6}$

En utilisant le diagramme de Moody pour  $\left\{ \begin{array}{l} R_{e2} = 5,35 \cdot 10^6 \\ \frac{\varepsilon}{D} = 5,55 \cdot 10^{-6} \end{array} \right\}$

On obtient  $\lambda_2 = 0.00926$

Calculons la rugosité relative au point 3 :  $\frac{\varepsilon}{D} = \frac{0,01}{900} = 1,11 \cdot 10^{-5}$

En utilisant le diagramme de Moody pour  $\left\{ \begin{array}{l} R_{e3} = 6,85 \cdot 10^5 \\ \frac{\varepsilon}{D} = 1,11 \cdot 10^{-5} \end{array} \right\}$

On obtient  $\lambda_3 = 0.012$

$$(III) \dots J_L = \lambda_j \frac{V_m^2 L_j}{2g D_j}$$

$$J_{L2} = \frac{0,00926 \cdot 100}{1,8} \frac{2,89^2}{2 \cdot 9,81}$$

$$J_{L2} = 0,21$$

$$J_{L3} = \frac{0,012 \cdot 9}{0,9} \frac{0,74^2}{2 \cdot 9,81}$$

$$J_{L3} = 0,003$$

$$J_{LT_2} = 0,213$$

(b) **Calcul des pertes de charges singulières**

Entre les pompes de refoulements et le point du collecteur on a trois singularités qui sont

- Un coude à 90° avec un diamètre de 1800 mm, Un coude à 90° avec un diamètre de 900 mm
- Un Té

**Au niveau du coude :**

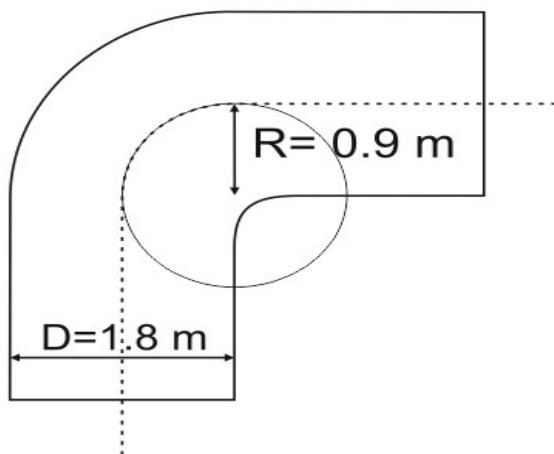


Figure 50 Coude 90° avec  $D=1.8$

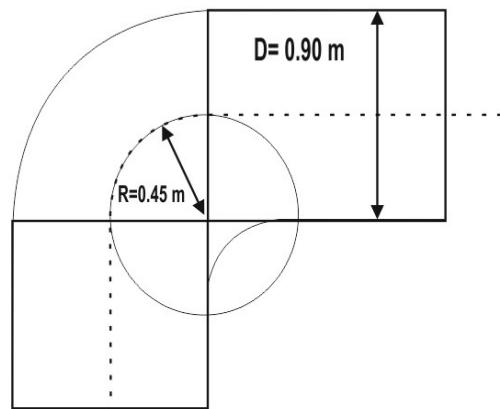


Figure 51 Coude 90° avec  $D=0.9$

$$D = 1.8 \text{ m}$$

$$\alpha = 90^\circ$$

$$R = 0.9 \text{ m}$$

D'après la formule de Weisbach, on a

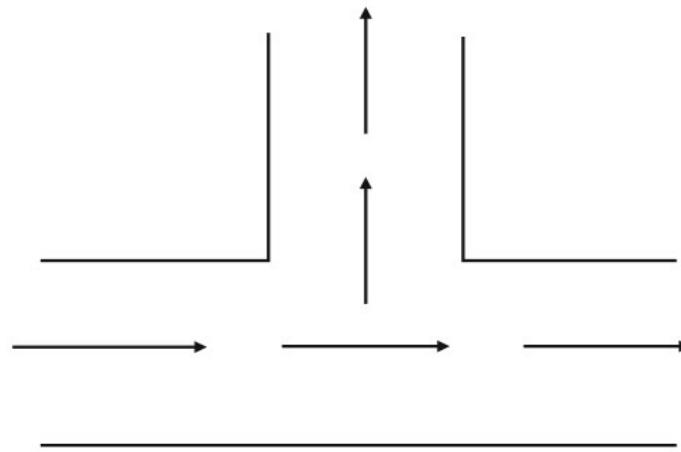
$$\zeta_a = \left[ 0.131 + 1.847 \left( \frac{D}{2R} \right)^{\frac{7}{2}} \right] \frac{\theta}{90}$$

$$\zeta_a = \left[ 0.131 + 1.847 \left( \frac{1.8}{2(0.9)} \right)^{\frac{7}{2}} \right] \frac{90}{90}$$

$$\zeta_a = \zeta_b = 1.9$$

**Au niveau du té :**

Le coefficient de perte de charge singulière pour ce type de sens d'écoulement :



*Figure 52 Singularité Té perpendiculaire*

$$\zeta_c = 1$$

$$(V) \dots J_s = \sum \zeta_i \left( \frac{V_m^2}{2g} \right)$$

$$J_s = (\zeta_a + \zeta_b + \zeta_c) \left( \frac{V_m^2}{2g} \right)$$

$$J_{s(a+c)} = (1.97 + 1) \left( \frac{3.32^2}{2(9.81)} \right)$$

$$J_{s(a+c)} = 1.26$$

$$J_{sb} = 1.97 \left( \frac{4.45^2}{2(9.81)} \right)$$

$$J_{sb} = 1.99$$

$$Js_{T2} = 1.26 + 1.99$$

$$Js_{T2} = 3.25$$

$$J_{T2} = J_{sT2} + J_{L_{T2}}$$

$$J_{T2} = 3.46$$

$$J_T = 2.75 + 3.46$$

$$J_T = 6.21$$

**(5) Courbes caractéristiques du système (à partir des sorties des pompes jusqu'à l'entrée de l'ultrafiltration)**

Pour tracer la courbe caractéristique du réseau il nous faut déterminer le coefficient de courbure  $\theta_i$  qui est en fonction de  $J_T$  et de  $Q^2$

**Equations utilisées :**

$$J_T = \theta_i \cdot Q_v^2 \quad (1)$$

$$\Rightarrow \theta_i = \frac{J_T}{Q_v^2} \quad (2)$$

**Application numérique**

$$(2) \Rightarrow \theta_1 = \frac{6,21}{7,36^2}$$

$$\theta_1 = 0,115$$

$$(1) \Rightarrow J_T = 0,115 \frac{Q_v^2}{3600^2}$$

**(a) Tableau de Pertes de charge des deux parties (aux sorties des pompes et l'entrée du système de filtration)**

QV(m <sup>3</sup> /h)	0	5000	10000	15000	20000	25000	30000
H (m)	0	0,22	0,88	1,98	3,52	5,50	7,91

**(b) Tableau des pertes de charge du réseau des pompes de refoulement de l'eau de mer**

$$P = \rho g h \Rightarrow h = \frac{P}{\rho \cdot g}$$

1,43 bar=14,3 mce

H<sub>sta</sub>= 15,5 m

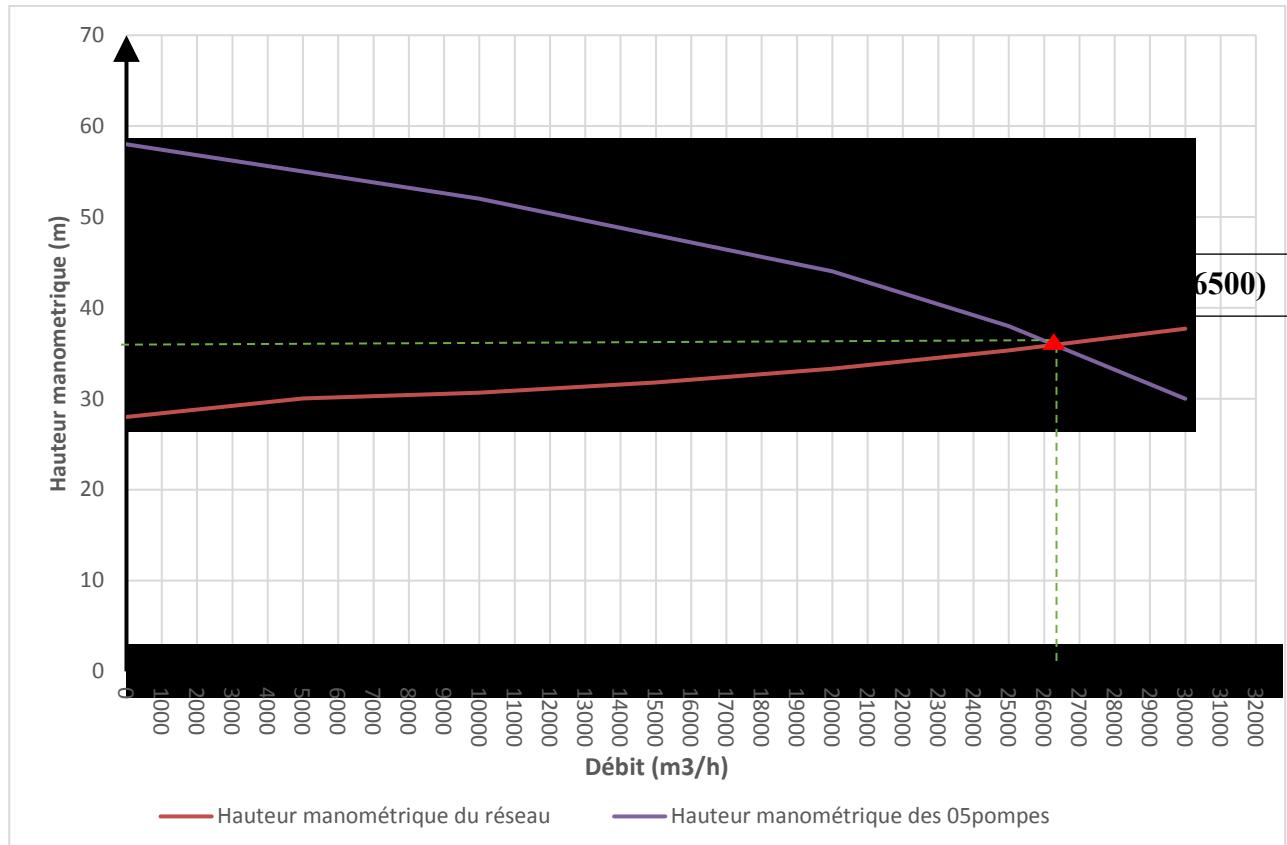
$$H = H_{eq} + H_{sta} + 14,15$$

QV(m <sup>3</sup> /h)	0	5000	10000	15000	20000	25000	30000
H (m)	28	30,02	30,68	31,78	33,32	35,3	37,71

**(c) Tableau de hauteur manométrique des 05 pompes de refoulement de l'eau de mer**

V(m <sup>3</sup> /h)	0	5000	10000	15000	20000	25000	30000
H (m)	58	55	52	48	44	38	30

**(d) Courbe caractéristique des pertes de charge du réseau des pompes de refoulement de l'eau de mer et point de fonctionnement**

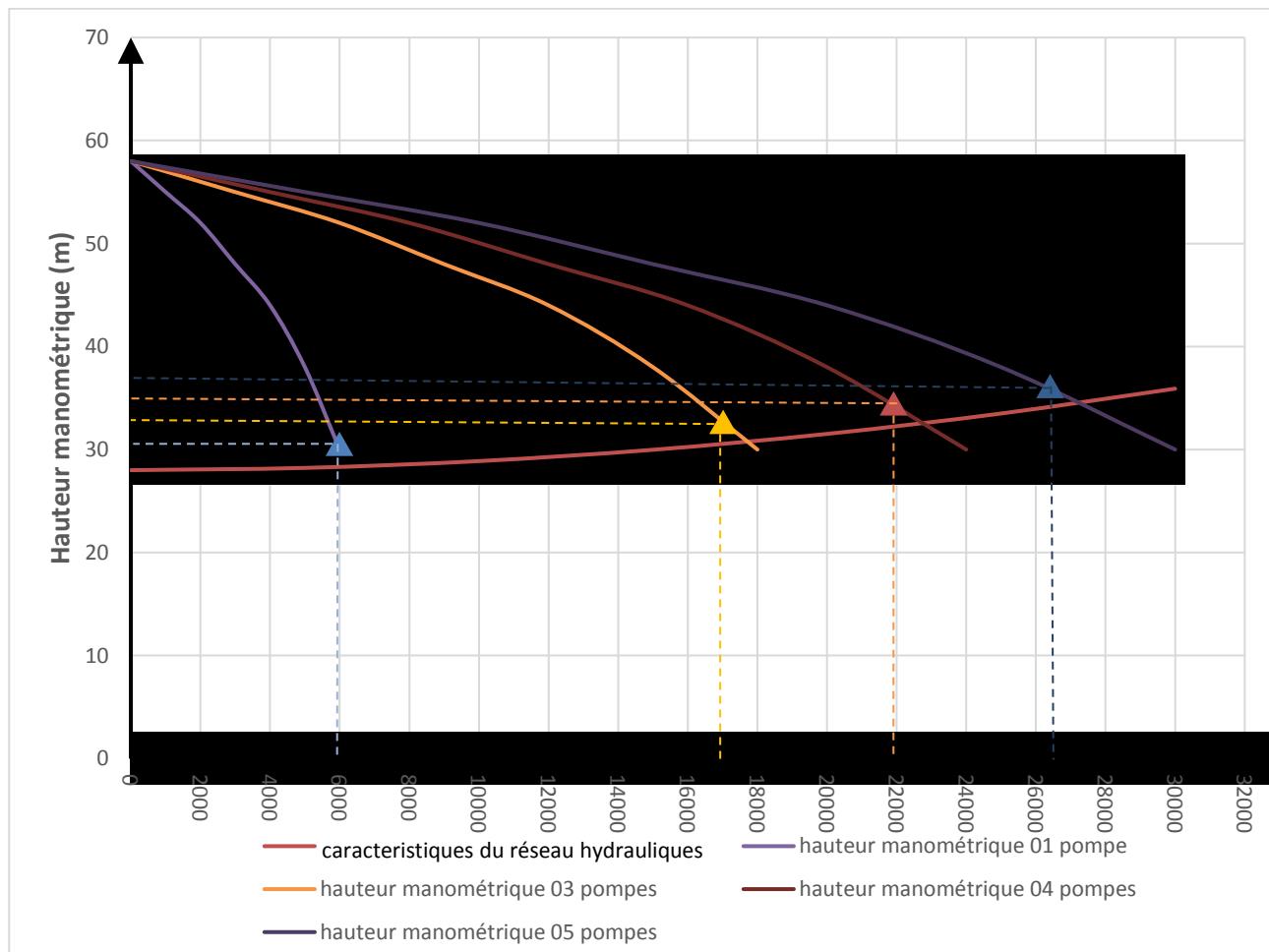


*Figure 53 Détermination du point de fonctionnement de la partie INTAKE*

**(e) Tableau des pertes de hauteur manométrique (01 pompe, 03 pompes, 04 pompes, 05 pompes)**

QV( $m^3/h$ ) 1 pompe	QV( $m^3/h$ ) 3 pompes	QV( $m^3/h$ ) 4 pompes	QV( $m^3/h$ ) 5 pompes	H (m) réseau intake	H (m) pompes
0	0	0	0	28	58
1000	3000	4000	5000	30,02	55
2000	6000	8000	10000	30,68	52
3000	9000	12000	15000	31,78	48
4000	12000	16000	20000	33,32	44
5000	15000	20000	25000	35,3	38
6000	18000	24000	30000	37,71	30

**(f) Courbes et points de fonctionnements suivant le nombre de pompes**



*Figure 54 Courbes et points de fonctionnements suivant le nombre de pompes*

## **2. La station de pompage de l'alimentation de l'osmose inverse**

Dans cette partie, on va entamer les calculs de la station de pompage (point 1) jusqu'à l'entrée des trains de l'osmose inverse (point 2).

Puisque on a deux conduites en parallèle avec les mêmes dimensions, on fait les calculs dans une seule conduite.

### **(1) Les équipements majeurs de cette partie :**

- 9 pompes de l'alimentation de l'osmose inverse dont 8 en service et une en veille
- 9 conduites dont on connaît la longueur et la hauteur avec un diamètre de 400mm
- 9 clapets anti-retour, un dans chaque conduite
- 9 Té perpendiculaires qui relient entre les conduites de refoulements et le collecteur
- 2 collecteurs chacun relie 4 pompes, avec un diamètre de 800mm
- 9 coudues à 90° arrondies dans chaque collecteur

### **(1) Calcul des pertes de charge totales**

- ✓ Données de calculs pour le point 1 :

$$Qv_1=1060 \text{ m}^3/\text{h} \text{ soit } Qv_1=0.29 \text{ m}^3/\text{s}$$

La rugosité de paroi  $\epsilon = 0,01 \text{ mm}$

Diamètre de la conduite  $D=400 \text{ mm}$  soit  $D=0,4 \text{ m}$

Longueur de la conduite  $L= 4 \text{ m}$

- ✓ *Données de calculs pour le point 2*

$$Qv_2=4240 \text{ m}^3/\text{h} \text{ soit } Qv_2= 1,17 \text{ m}^3/\text{s}$$

Diamètre du collecteur  $D= 800 \text{ mm}$  soit  $D=0,8 \text{ m}$

La masse volumique  $\rho=1030 \text{ kg/m}^3$

La pesanteur  $g = 9,81 \text{ m/s}^2$

La viscosité dynamique pour  $T=20^\circ\text{C}$   $\mu=1,002 \cdot 10^{-3}$

#### **(a) Calcul des pertes de charges linéaires**

#### **Equations utilisées**

$$(II).... V_{m1} = \frac{4.Q_v}{\pi.D^2}$$

$$(IV) ... R_{ej} = \frac{\rho V_{mj} D_j}{\mu}$$

**CHAPITRE03- CALCUL DES PERTES DE CHARGES ET POINT DE FONCTIONNEMENT**

---

$$(III) \dots J_L = \lambda_j \frac{V_m^2}{2g} \frac{L_j}{D_j}$$

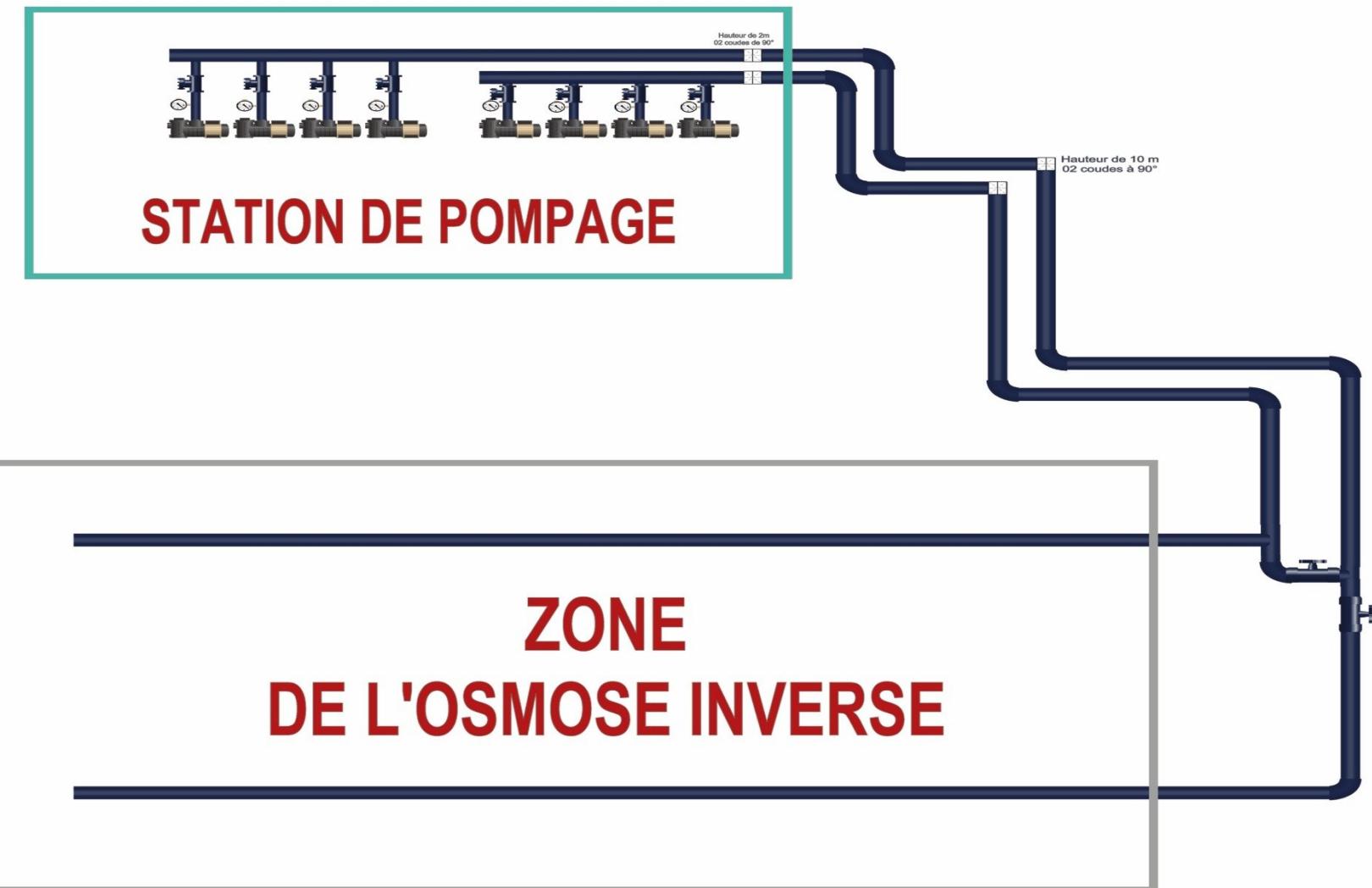


Figure III - Schéma de la partie osmose inverse

$$V_{m1} = \frac{4 \cdot 0,29}{\pi(0,4)^2}$$

$$V_{m1} = 2,30 \text{ m/s}$$

$$V_{m2} = \frac{4 \cdot 1,17}{\pi(0,8)^2}$$

$$V_{m2} = 2,32 \text{ m/s}$$

$$R_{ej1} = \frac{1030 \cdot 2,30 \cdot 0,4}{0,001}$$

$$R_{ej1} = 9,47 \cdot 10^5$$

$$R_{ej2} = \frac{1030 \cdot 2,32 \cdot 0,8}{0,001}$$

$$R_{ej2} = 1,91 \cdot 10^6$$

La rugosité de paroi  $\epsilon = 0,001 \text{ mm}$

Calculons la rugosité relative au point 1 :  $\frac{\epsilon}{D} = \frac{0,001}{400} = 2,5 \cdot 10^{-6}$

En utilisant le diagramme de Moody pour  $\begin{cases} R_{e1} = 9,47 \cdot 10^5 \\ \frac{\epsilon}{D} = 2,5 \cdot 10^{-6} \end{cases}$

On obtient  $\lambda_1 = 0,011$

Calculons la rugosité relative au point 2 :  $\frac{\epsilon}{D} = \frac{0,001}{800} = 1,25 \cdot 10^{-6}$

En utilisant le diagramme de Moody pour  $\begin{cases} R_{e1} = 1,91 \cdot 10^6 \\ \frac{\epsilon}{D} = 1,25 \cdot 10^{-6} \end{cases}$

On obtient  $\lambda_2 = 0,010$

$$J_{L1} = 0,011 \frac{2,30^2}{2 \cdot 9,81} \frac{4}{0,4} = 0,029 \text{ m}$$

$$J_{L2} = 0,010 \frac{2,32^2}{2 \cdot 9,81} \frac{170}{0,8} = 0,58 \text{ m}$$

$$J_{LT} = J_{LT_1} + J_{LT_2}$$

$$J_{LT} = 0,61$$

### (a) Calcul des pertes de charge singulières

Entre les pompes de refoulements et la zone de filtration par osmose inverse on a trois singularités qui sont

- Huit (8) coudes à 90°
- Quatre (4) Clapet anti-retour
- Deux (2) Té

Cas d'un coude à 90° :

$$D = 0.8 \text{ m}$$

$$\alpha = 90^\circ$$

$$R = 0.4 \text{ m}$$

D'après la formule de Weisbach, on a

$$\zeta_a = \left[ 0,131 + 1,847 \left( \frac{D}{2R} \right)^{\frac{7}{2}} \right] \frac{\theta}{90}$$

Application numérique

$$\zeta_a = \left[ 0,131 + 1,847 \left( \frac{0,8}{2(0,4)} \right)^{\frac{7}{2}} \right] \frac{90}{90}$$

$$\zeta_a = 1,97$$

#### Clapet anti-retour

Le tableau suivant donne des valeurs expérimentales moyennes de  $\zeta_b$ , en fonction de  $\alpha$  = angle formé par le clapet mobile et l'axe de la conduite, en degrés

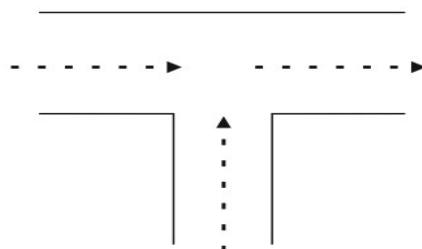
$\alpha$	20	30	40	50	60	70	75
$\zeta_b$	1.7	3.2	6.6	14	30	62	90

On a un angle de 20°  $\Rightarrow \zeta_b = 1.7$

#### Au niveau du Té

Pour ce type de sens d'écoulement on 'a

$$\zeta_c = 1$$



**Figure 55 Singularité Té perpendiculaire**

$$(V) \dots J_s = \sum \zeta_i \left( \frac{V_m^2}{2g} \right)$$

$$J_s = (\zeta_a + \zeta_b + \zeta_c) \left( \frac{V_m^2}{2g} \right)$$

$$J_{s(a+c)} = (1,97 \cdot (8) + 1 \cdot (2)) \left( \frac{2,32^2}{2(9,81)} \right)$$

$$J_{s(a+c)} = 4,87$$

$$J_{s(b)} = 1,7 \cdot \left( \frac{2,30^2}{2(9,81)} \right)$$

$$J_{s(b)} = 0,45$$

$$J_{s_T} = J_{s(a+c)} + J_{s(b)}$$

$$J_{s_T} = 5,32$$

Donc :

$$J_T = J_{L_T} + J_{s_T}$$

$$J_T = 5.93$$

**(2) Courbes caractéristiques du système (à partir des sorties des pompes jusqu'à l'entrée de l'osmose inverse)**

Pour tracer la courbe caractéristique du réseau il nous faut déterminer le coefficient de courbure  $\theta$  qui est en fonction de  $J_T$  et de  $Q_v^2$

**Équations utilisées :**

$$J_T = \theta i \cdot Q_v^2 \quad (1)$$

$$\Rightarrow \theta i = \frac{J_T}{Q_v^2} \quad (2)$$

Application numérique

$$(2) \Rightarrow \theta_2 = \frac{5,93}{1,17^2}$$

$$\theta_2 = 4,331$$

$$(1) \Rightarrow J_T = 4,331 \cdot \frac{Q_v^2}{3600^2}$$

**(a) Tableau des Pertes de charge dans la conduite de l'alimentation de l'osmose inverse (aux sorties des pompes et l'arrivée de la zone RO)**

4.Qv (m/h)	0	1000	2000	4000	6000	8000	9200
H <sub>eq</sub> (m)	0	0.33	1,33	5,34	12,03	21,38	28,28

**(a) Tableau des pertes de charge du réseau de l'alimentation de l'osmose inverse**

16.3 bar = 163 mce

H<sub>sta</sub> = 10m

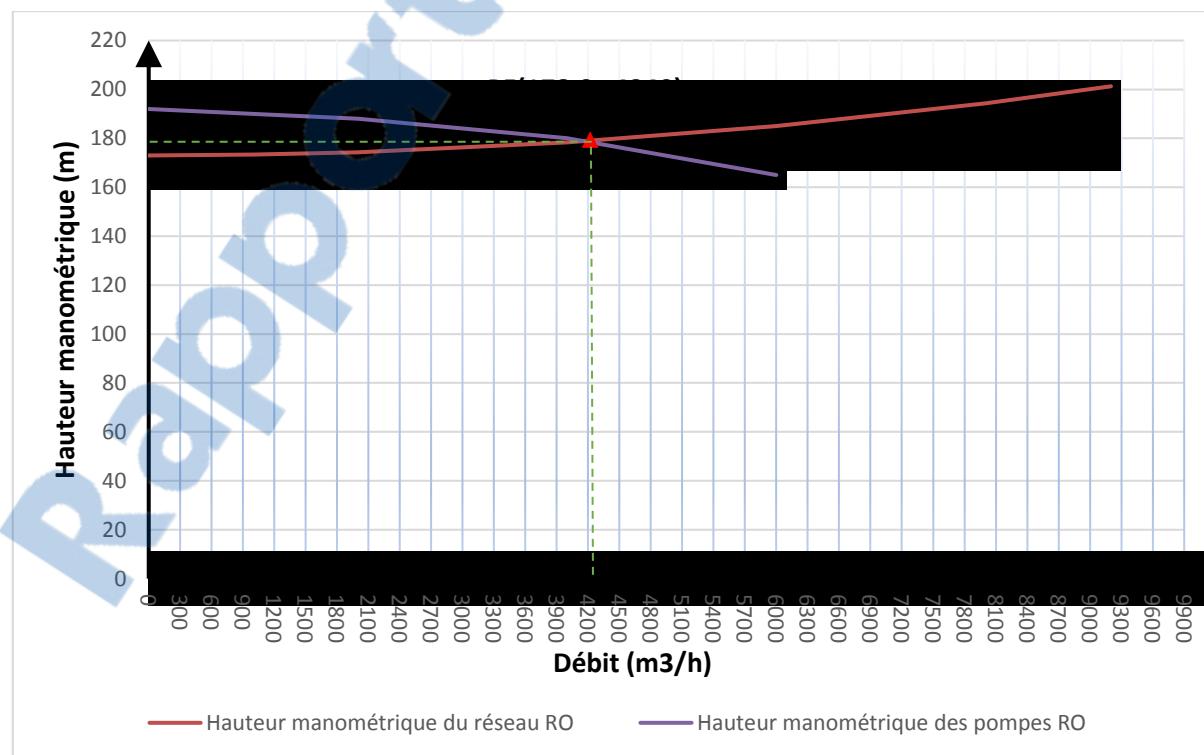
$$H = H_{eq} + H_{sta} + 163$$

Qv (m/h)	0	1000	2000	4000	6000	8000	9200
H(m)	0	173,33	174,33	178,34	185,03	194,33	201,28

**(b) Tableau des hauteurs manométriques des 04 pompes de l'alimentation de l'osmose inverse**

Qv (m/h)	0	1000	2000	4000	6000	8000	9200
H(m)	192	190	188	180	165	/	/

**(c) Courbe caractéristiques des pertes de charges du réseau et des pompes de l'alimentation de l'osmose inverse**



**Figure 56 Détermination du point de fonctionnement de la partie osmose inverse**

### **3. La station de pompage de l'alimentation de l'ERS :**

Cette partie commence de la station de pompage (point 1), jusqu'à l'entrée des ERI (point 2).

#### **(1) Les équipements majeurs de cette partie :**

- 7 pompes de l'alimentation de l'ERS dont 6 en service et une en veille
- 7 conduites dont on connaît la longueur et la hauteur avec un diamètre de 500mm
- 7 Té perpendiculaires qui relient entre les conduites de refoulements et le collecteur
- Un collecteur qui relie les 7 conduites de refoulement avec un diamètre de 1200mm
- 5 coudes à 90° arrondies dans le collecteur

✓ Données de calculs pour le point 1 :

$$Q_{v1}=1720 \text{ m}^3/\text{h} \text{ soit } Q_{v1}=0.47 \text{ m}^3/\text{s}$$

La rugosité de paroi  $\epsilon= 0.01 \text{ mm}$

Diamètre de la conduite  $D=500 \text{ mm}$  soit  $D=0.5\text{m}$

Longueur de la conduite  $L= 8 \text{ m}$

✓ *Données de calculs pour le point 2*

$$Q_{v2}=10320 \text{ m}^3/\text{h} \text{ soit } Q_{v2}= 2.86 \text{ m}^3/\text{s}$$

Diamètre du collecteur  $D= 1200 \text{ mm}$  soit  $D=1.2 \text{ m}$

La masse volumique  $\rho=1030 \text{ kg/m}^3$

La pesanteur  $g = 9.81 \text{ m/s}^2$

La viscosité dynamique pour  $T=20^\circ\text{C}$   $\mu=1,002 \cdot 10^{-3}$

Longueur de la conduite  $L= 188 \text{ m}$

#### **(1) Calcul des pertes de charge totales**

##### **(a) Calcul des pertes de charge linéaires**

$$(II)....V_{m1} = \frac{4.Q_v}{\pi.D^2}$$

$$(IV)...R_{ej} = \frac{\rho V_{mj} D_j}{\mu}$$

$$(III)...J_L = \lambda_j \frac{V_m^2}{2g} \frac{L_j}{D_j}$$

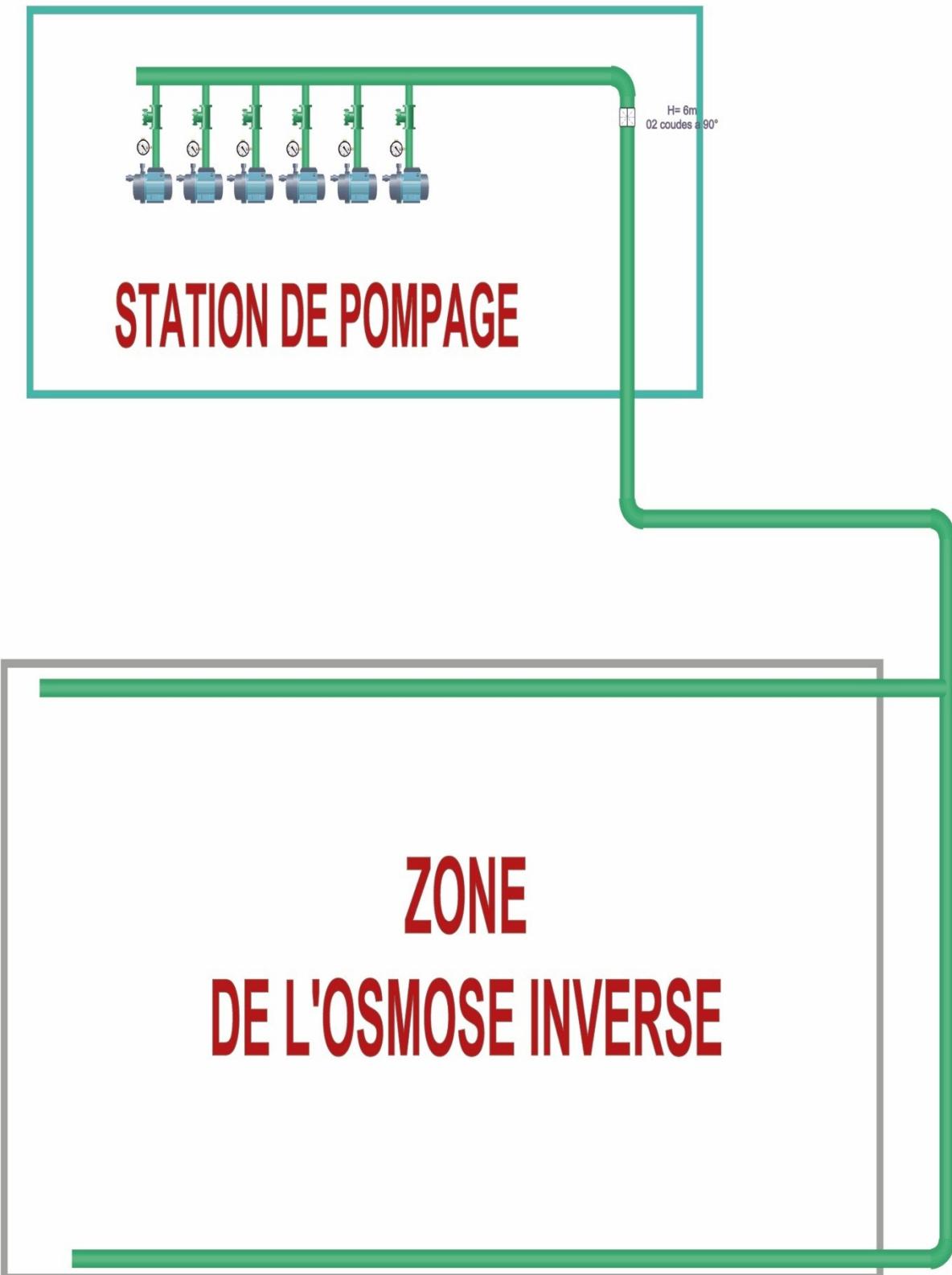


Figure IV – Schéma de la station de pompage de l'ERS

$$V_{m1} = \frac{4 \cdot 0,47}{\pi(0,5)^2}$$

$$V_{m1} = 2,39 \text{ m/s}$$

$$V_{m2} = \frac{4 \cdot 2,86}{\pi(1,2)^2}$$

$$V_{m2} = 2,53 \text{ m/s}$$

$$R_{ej1} = \frac{1030 \cdot 2,39 \cdot 0,5}{0,001}$$

$$R_{ej1} = 1,23 \cdot 10^6$$

$$R_{ej2} = \frac{1030 \cdot 2,53 \cdot 1,2}{0,001}$$

$$R_{ej2} = 3,12 \cdot 10^6$$

La rugosité de paroi  $\epsilon = 0,001 \text{ mm}$

Calculons la rugosité relative au point 1 :  $\frac{\epsilon}{D} = \frac{0,001}{500} = 2 \cdot 10^{-6}$

En utilisant le diagramme de Moody pour  $\begin{cases} R_{e1} = 1,23 \cdot 10^6 \\ \frac{\epsilon}{D} = 2 \cdot 10^{-6} \end{cases}$

On obtient  $\lambda_1 = 0,011$

Calculons la rugosité relative au point 2 :  $\frac{\epsilon}{D} = \frac{0,001}{1200} = 8,33 \cdot 10^{-7}$

En utilisant le diagramme de Moody pour  $\begin{cases} R_{e2} = 3,12 \cdot 10^6 \\ \frac{\epsilon}{D} = 8,33 \cdot 10^{-7} \end{cases}$

On obtient  $\lambda_2 = 0,0097$

$$J_{L1} = 0,011 \frac{2,39^2}{2 \cdot 9,81} \frac{8}{0,5} = 0,051 \text{ m}$$

$$J_{L2} = 0,0097 \frac{2,53^2}{2 \cdot 9,81} \frac{188}{1,2} = 0,49 \text{ m}$$

Donc  $J_{LT} = J_{LT_1} + J_{LT_2}$

$$J_{LT} = 0,541$$

### (a) Calcul des pertes de charge singulières

Entre les pompes de refoulement et la zone de filtration, on a trois singularités qui sont

- Cinq coudes à 90°
- Cinq clapets anti-retours
- Un Té

Cas d'un coude à 90° :

$$D = 1.2 \text{ m}$$

$$\alpha = 90^\circ$$

$$R = 0.6 \text{ m}$$

D'après la formule de Weisbach, on a

$$\zeta_a = \left[ 0,131 + 1,847 \left( \frac{D}{2R} \right)^{\frac{7}{2}} \right] \frac{\theta}{90}$$

Application numérique

$$\zeta_a = \left[ 0,131 + 1,847 \left( \frac{1.2}{2(0.6)} \right)^{\frac{7}{2}} \right] \frac{90}{90}$$

$$\zeta_a = 1,97$$

Clapet anti-retour

Le tableau suivant donne des valeurs expérimentales moyennes de  $\zeta_b$ , en fonction de  $\alpha$  = angle formé par le clapet mobile et l'axe de la conduite, en degrés

$\alpha$	20	30	40	50	60	70	75
$\zeta_b$	1,7	3,2	6,6	14	30	62	90

On a un angle de 20°  $\Rightarrow \zeta_b = 1.7$

Au niveau du Té

On a le même type que le précédent

Donc

$$\zeta_c = 1$$

**Equations de calcul**

$$(V) \dots J_s = \sum \zeta_i \left( \frac{V^2 m}{2g} \right)$$

$$J_s = (\zeta_a + \zeta_c) \left( \frac{V^2 m}{2g} \right)$$

$$J_{s(a+c)} = (1,97 \cdot (5) + 1) \left( \frac{2,53^2}{2(9,81)} \right)$$

$$J_{s(a+c)} = 3,54$$

$$J_{s(b)} = 1,7 \cdot \left( \frac{2,39^2}{2(9,81)} \right)$$

$$J_{s(b)} = 0,49$$

$$J_{s_T} = J_{s(a+c)} + J_{s(b)}$$

$$J_{s_T} = 4,03$$

Donc :

$$J_T = J_{L_T} + J_{s_T}$$

$$J_T = 4,57$$

**(2) Courbes caractéristiques du système (à partir des sorties des pompes jusqu'à l'entrée de l'osmose inverse)**

Pour tracer la courbe caractéristique du réseau il nous faut déterminer le coefficient de courbure  $\theta$  qui est en fonction de  $J_T$  et de  $Qv^2$

**Équations utilisées :**

$$J_T = \theta_i \cdot Q_v^2 \quad (1)$$

$$\Rightarrow \theta_i = \frac{J_T}{Q_v^2} \quad (2)$$

Application numérique

$$(2) \Rightarrow \theta_3 = \frac{4,57}{2,86^2}$$

$$\theta_1 = 0,558$$

$$(1) \Rightarrow J_T = 0,558 \frac{Q_v^2}{3600^2}$$

**(a) Tableau des pertes de charge dans la conduite du système ERS**

Qv (m/h)	0	3000	6000	9000	12000	13200
H(m)	0	0,38	1,55	3,48	6,2	7,50

**(a) Tableau des pertes de charges du réseau du système de l'ERS**

2.93 bar = 29.3 mce

$H_{sta} = 6 \text{ m}$

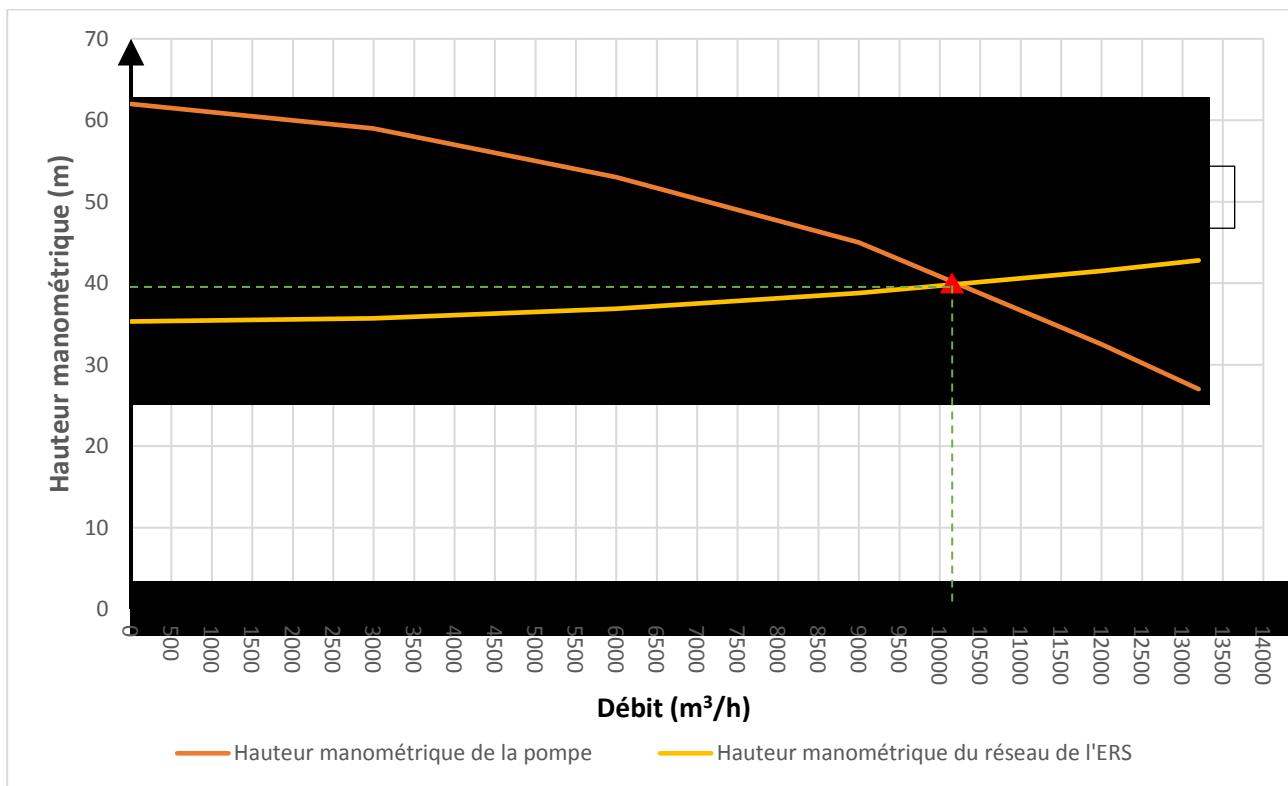
$$H = H_{eq} + H_{sta} + 163$$

Qv (m/h)	0	3000	6000	9000	12000	13200
H(m)	35,3	35,68	36,85	38,78	41,5	42,8

**(b) Tableau des pertes de charges des 06 pompes qui alimentent le système ERS**

Qv (m/h)	0	3000	6000	9000	12000	13200
H(m)	62	59	53	45	32,5	27

**(c) Courbe des pertes de charge et des pompes de refoulement du système ERS**



**Figure 57 Détermination du point de fonctionnement du système ERS**

## **B. Phénomènes et problèmes rencontrés dans la station**

### **1. La turbidité**

La turbidité est une caractéristique optique de l'eau, à savoir sa capacité à diffuser ou absorber la lumière incidente. La turbidité est donc un des facteurs de la couleur de l'eau.

La turbidité est due à la présence dans l'eau de particules en suspension minérales ou organiques, vivantes ou détritiques. Ainsi, plus une eau est chargée en biomasse phytoplanctonique ou en particules sédimentaires, plus elle est turbide.

#### **c) Les causes de la turbidité**

Les conséquences de la turbidité concernent la pénétration de la lumière et des ultra-violets dans l'eau, et donc la photosynthèse et le développement des bactéries. Par ailleurs, la couleur de l'eau affecte aussi sa température et donc sa teneur en oxygène, son évaporation et sa salinité.

La turbidité dans les plans d'eau de surface est généralement attribuable à des matières organiques et inorganiques. Elle est causée par :

- des pluies abondantes, des inondations et l'écoulement printanier,
- des glissements de terrain et l'érosion des berges,
- les fleurs d'eau,
- l'activité humaine et animale, ou la présence de bateaux dérangeant le lit d'eau,
- l'activité humaine perturbant la terre (par exemple la construction),
- la pollution par les eaux d'orage provenant de régions urbaines.

#### **d) Comment mesure-t-on la turbidité ?**

On mesure la turbidité en unités de turbidité néphalométriques (uTN) à l'aide d'un turbidimètre.

Cet instrument envoie un rayon de lumière à travers un échantillon d'eau et mesure la quantité de lumière qui passe à travers l'eau par rapport à la quantité de lumière qui est réfléchie par les particules dans l'eau. La turbidité peut s'échelonner de moins d'une uTN à plus de 1 000 uTN. À 5 uTN, l'eau est visiblement trouble ; à 25 uTN, elle est noirâtre.

#### **e) Solution proposée**

Les stations de dessalement en général se construisent sur des zones rocheuses

Lors des pluies abondantes, la mer de SOUK EL TLETA connaît une augmentation au niveau de la turbidité, alors que cette dernière n'a que des inconvénients envers les membranes de l'ultrafiltration, nous avons pensé à suggérer comme proposition, l'allongement de la conduite de l'aspiration de l'eau de mer. Effectivement ce canal devait connaître une longueur d'environ 2 km afin d'éviter une aspiration d'une eau turbide, alors qu'à l'état actuel il connaît une longueur de 950m.

## 1. L'effet de siphon

Lors d'une manipulation au niveau des trains de l'ultrafiltration, nous avons remarqué un phénomène en ce qui concerne les pressions de l'eau prétraitée après l'ultrafiltration dite perméat, cette pression avait des valeurs négatives, ce qui nous a conduit à penser au phénomène du siphon (Syphon effect ).

### a) Opération et observation

Nous avons choisi un train au hasard afin de pouvoir remarquer ce phénomène, dans ce cas là, nous avons pris le train 2G.

#### (1) Dans le cas d'une pression négative



Figure 58 Vanne ouverte à 100%



Figure 59 Manomètre du perméat



Figure 60 débitmètre du perméat

## ***CHAPITRE03- CALCUL DES PERTES DE CHARGES ET POINT DE FONCTIONNEMENT***

---

**Remarque :** Nous remarquons une pression négative au niveau de la sortie du perméat, ainsi qu'un débit de 410.39 m<sup>3</sup>/h.

**(2) Dans le cas d'élimination de cette pression négative**

Nous allons essayer de fermer la vanne progressivement, afin d'augmenter cette pression au fur et à mesure jusqu'à une pression nulle.



*Figure 61 Vanne légèrement ouverte*



*Figure 62 Manomètre du perméat*



*Figure 63 Débitmètre du perméat*

**Commentaires :**

Nous remarquons qu'en fermant la vanne, on a pu obtenir une pression nulle, mais le plus étonnant c'est de voir à quel point le débit a diminué.

**b) Hypothèse et calcul :**

Après avoir vérifié l'hypothèse de l'effet de siphon nous allons entamer la partie calcul

**(3) Calcul de la pression transmembranaire**

La **pression transmembranaire** (soit la perte de charge dans les pores de la membrane) en filtration tangentielle est mesurée comme suit

$$PTM = \frac{P_1 + P_2}{2} - P_3$$

Avec

- P1 : pression liquide en entrée de module en bar.
- P2 : pression rétentat en sortie de module en bar.
- P3 : pression perméat en bar.
- PTM : pression transmembranaire en bar.

• **Application numérique**

✓ En cas de pression négative

$$PTM = \frac{1,1 + 0,4}{2} - (-0,5)$$

$$PTM = \frac{1,1 + 0,4}{2} + 0,5$$

$$\mathbf{PTM = 1,25\text{bar}}$$

✓ En cas de pression nulle

$$PTM = \frac{1,1 + 0,4}{2} + 0$$

$$\mathbf{PTM = 0,75\text{ bar}}$$

**(4) Calcul de la densité du flux**

La **densité de flux** est le débit de perméat rapporté à la surface de la membrane. Le débit de perméat est mesuré au moyen d'un débitmètre ou encore d'un récipient gradué associé à un chronométrage.

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

Avec

- Q : débit de perméat en  $\text{kg.s}^{-1}$  (ou  $\text{m}^3.\text{s}^{-1}$ ),
- S : surface de la membrane en  $\text{m}^2$ ,
- J : densité de flux en  $\text{kg.s}^{-1}.\text{m}^{-2}$  (ou  $\text{m}^3.\text{s}^{-1}.\text{m}^{-2}$ ).

✓ En cas de pression négative

$$J = \frac{410,39}{144 \cdot 50}$$

$$J = \frac{0,113}{7200}$$

$$J = 1,58 \cdot 10^{-5} m^3 \cdot s^{-1} \cdot m^{-2}$$

✓ En cas de pression nulle

$$J = \frac{215,75}{144 \cdot 50}$$

$$J = \frac{0,059}{7200}$$

$$J = 8,32 \cdot 10^{-6} m^3 \cdot s^{-1} \cdot m^{-2}$$

#### (5) Calcul de la perméabilité de la membrane

Par application de la loi de Darcy, le flux de perméat dans le cas d'un solvant pur et pour des pressions inférieures à  $10 \cdot 10^5$  Pa s'exprime ainsi :

$$J = L_p \cdot PTM$$

Avec  $L_p$  : perméabilité de la membrane en  $m \cdot Pa^{-1} \cdot s^{-1}$ .

$$L_p = \frac{J}{PTM}$$

- **Application numérique**

✓ En cas de pression négative

$$L_p = \frac{1,58 \cdot 10^{-5}}{1,25}$$

$$L_p = 1,26 \cdot 10^{-5} m \cdot Pa^{-1} \cdot s^{-1}$$

✓ En cas de pression nulle

$$L_p = \frac{8,32 \cdot 10^{-6}}{0,75}$$

$$L_p = 1,10 \cdot 10^{-5} m \cdot Pa^{-1} \cdot s^{-1}$$

(6) **Calcul de la résistance hydraulique**

$$J_{eau} = \frac{PTM}{\mu_{eau} \cdot R_h}$$
$$\Rightarrow R_h = \frac{1}{\mu_{eau} \cdot J_{eau}}$$

Avec  $J_{eau}$  : densité de flux ( $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ ),

$R_h$  : résistance hydraulique de la membrane ( $\text{m}^{-1}$ ),

$P_{TM}$  : pression transmembranaire en Pa,

$\mu_{eau}$  : viscosité dynamique de l'eau (Pa.s) à la température considérée.

**Application numérique**

✓ En cas de pression négative

$$R_h = \frac{1,25}{0,001 \cdot 1,58 \cdot 10^{-5}}$$
$$R_h = 79,11 \cdot 10^6 \text{ m}^{-1}$$

✓ En cas de pression nulle

$$R_h = \frac{0,75}{0,001 \cdot 8,32 \cdot 10^{-5}}$$
$$R_h = 90,14 \cdot 10^6 \text{ m}^{-1}$$

**C. Conclusions**

La filtration membranaire est un procédé de séparation, performant, sûr, facile à conduire mais pas simple à mettre au point et dimensionner. La cause de ces difficultés est le colmatage qui reste difficile à éviter ou limiter et complexe à décrire. La stratégie générale à adopter pour développer ce procédé dans les meilleures conditions est donc basée sur un aller-retour entre des essais (de l'échelle du laboratoire vers l'industrielle) et leurs expertises qui nécessite des connaissances fondamentales et théoriques des phénomènes de transfert membranaire.

## **Conclusion générale :**

Pour un dimensionnement d'une station de dessalement, il faut une étude approfondie de tous les côtés, commençant par l'aspect géologique et géographique, bien que la qualité de l'eau soit un aspect très important et un paramètre de précision à prendre en compte, en contrepartie, il faut être au courant de tous les phénomènes climatiques, ainsi des risques de catastrophes naturelles qui peuvent se passer sur le site.

Du point économique, c'est bien de veiller à avoir une rentabilité, mais ce qui est encore meilleur, c'est une rentabilité à long terme et éviter que les choses sur lesquelles on économise ne causent de dégâts autre part encore plus graves et parfois irréparables.

Il faut aussi concevoir un système de transport de l'eau stratégique et fiable, pour cela il faut prendre plusieurs paramètres en compte, minimiser les pertes de charges est une étape très importante, cela réduira l'énergie que fournira une pompe pour refouler de l'eau vers une partie, ça a un retour de rentabilité ainsi qu'une durée de vie plus longue, pour cela il faut éviter les singularités de trop, ainsi que des conduites avec des parois très rugueuses, il ne faut pas beaucoup jouer sur les hauteurs, ces dernières ont une grande influence sur les pertes de charges.

Un système stratégique est un système qui peut être maintenu, réparé, et remis en marche facilement, car la maintenance joue un rôle extrêmement important dans le bon fonctionnement de la station.

Pour un bon transport de l'eau d'une zone à l'autre, il faut un bon choix de pompes, qui peuvent être choisies en fonction des pertes de charge causées par le réseau de conduites.

## Annexes

Points	
<b>Ecran a barre grossier ( CBS)</b>	
Situation	Admission de l'eau de mer
Type	Écran de barre avec corbeille
Taille de la maille	20 mm
Quantité	1 en service, un en veille
<b>Ecrans à bande fines ( TBS)</b>	
Situation	Admission de l'eau de mer
Type	Traveling band screen
Taille de la maille	200 micron
Quantité	1 en service, 1 en veille
<b>Spray water pumps for TBS</b>	
Situation	Admission de l'eau de mer
La capacité nominale	20 m <sup>3</sup> /h
Pression de refoulement	2.5 bar
Type	Aspiration centrifuge
Moyen	L'eau de mer
Matière de construction	Duplex en acier inoxydable
Source d'alimentation	400 V / 50 Hz / 3 Phases
Protection	IP55 / CLASS F
Quantité	1 en service, 1 en veille
<b>Pompes d'admission de l'eau de mer</b>	
Situation	Admission de l'eau de mer
La capacité nominale	5300 m <sup>3</sup> /h
Pression de refoulement	3.5 bar
Type	Horizontale centrifuge
Matière de construction	Duplex en acier inoxydable
Source d'alimentation	690 V / 50 HZ / 3 Phases
Protection	IP55 / Class F
Quantité	5 en service, 1 en veille
<b>Membranes de l'ultrafiltration</b>	
Situation	Prétraitement

Flux nominal	631,100 m <sup>3</sup> /jour
La pression d'alimentation maximale	3.5 bar
Type	Fibre creuse pressurisée
Taille du port de la membrane	0.015-0.020 micron
Construction de fibres	PES modifié
Construction extérieure	uPVC
Flux de conception	50.0 – 70 LMH
Zone de membrane par module	70 m <sup>2</sup>
Dimension de la membrane du module	8'' de diamètre x 80 de longueur
Nombre de modules par train	144 modules installés / train
Type de lavage à contre-courant	Air et eau
Quantité de trains d'ultrafiltration	40 trains en service, 5 trains en veille
<b>Réservoir de l'UF et lavage à contre-courant</b>	
Situation	Réservoir de l'eau filtrée
La capacité nominale	11000 m <sup>3</sup>
Moyen	L'eau de mer filtrée
Matière de construction	Béton armé, Doublure époxy adaptée à l'application marine.
Quantité	1 en service
<b>Pompes du lavage à contre-courant de l'UF</b>	
Situation	La station de pompage de l'eau filtrée
La capacité nominale	1420 m <sup>3</sup> /h
Pression de refoulement	2.5 bar
Type	Aspiration finale centrifuge
Matière de construction	Duplex en acier inoxydable
Source d'alimentation	400 V / 50Hz / 3 Phases
Protection	IP55 / Class F
Quantité	5 en services, 1 en veille
<b>Pompes du CIP de l'UF</b>	
Situation	La station de pompage de l'eau filtrée
La capacité nominale	850m <sup>3</sup> /h
Pression de refoulement	2.5 bars
Type	Aspiration finale centrifuge
Matière de construction	acier inoxydable AISI 316L

Source d'alimentation	400V / 50Hz / 3 Phase
Protection	IP55 – Class F
Quantité	1 en service, 1 en veille
<b>Réservoirs du CIP de l'UF</b>	
Situation	La station de pompage de l'eau filtrée
La capacité nominale	30 m <sup>3</sup>
Moyen	Produits chimiques pour le nettoyage de l'UF
Matière de construction	Plastique renforcé en fibre
Quantité	2 en service
<b>Cartouches filtres du CIP de l'UF</b>	
Situation	Station de pompage de l'eau filtrée
La capacité nominale	850 m <sup>3</sup> /h
Moyen	Produits chimique pour le nettoyage de l'UF
Matière de construction	FRP
Quantité	1 en service
<b>Pompes d'alimentation de l'osmose inverse</b>	
Situation	Station de pompage de l'eau filtrée
La capacité nominale	1060 m <sup>3</sup> /h
Pression de refoulement	4.0 — 18.00 bars
Type	Centrifuge horizontal
Matière de construction	Duplex en acier inoxydable
Source d'alimentation	690V / 50Hz / 3 Phase
Protection	IP55 – Class F
Quantité	8 en services, 1 en veille
<b>Pompes d'alimentation de l'ERS</b>	
Situation	Station de pompage de l'eau filtrée
La capacité nominale	1720 m <sup>3</sup> /h
Pression de refoulement	5 bars
Type	Centrifuge horizontale
Matière de construction	Duplex en acier inoxydable
Source d'alimentation	400V / 50Hz / 3 Phase
Protection	IP55 – Class F
Quantité	6 en services, 1 en veille

<b>Pompes HP de l'osmose inverse</b>	
Situation	System de l'osmose inverse
La capacité nominale	710 m <sup>3</sup> /h
Pression de refoulement	50 bars
Type	Centrifuge, multi-étages
Matière de construction	Super duplex en acier inoxydable
Source d'alimentation	11000V / 50Hz / 3 Phase
Protection	IP55 – Class F
Quantité	12 en services, 1 en veille
<b>Pompes booster ERS</b>	
Situation	System de l'osmose inverse
La capacité nominale	860 m <sup>3</sup> /h
Pression de refoulement	6.0 bars
Type	Centrifuge horizontal
Matière de construction	Super duplex en acier inoxydable
Source d'alimentation	400V / 50Hz / 3 Phase
Protection	IP55 – Class F
Quantité	12 en services, 1 en veille
<b>Système de l'osmose inverse de l'eau de mer</b>	
Flux nominal	16833 m <sup>3</sup> /day
Récupération	45%
Flux de conception	14.1 LMH
Conception des solides dissous totaux	37,500 mg/litre
Température de conception	18 — 27.0 °C
Nombre de tubes de pression / train	192 nos
Nombre d'étages	1 étage
<u>Eléments de membrane</u>	
Configuration	Enroulé en spirale
Type	Polyamide composite à film mince
Rejet de sel par élément	99.8% (nominal)
Perméat nominal	6,500 gpd
Production/élément	
Dimension	Diamètre 8" x longueur 40"
Region ( par élément)	400 ft <sup>2</sup>

Pression maximale appliquée	1000 psig
<u>Boitier de membrane</u>	
Construction extérieure	Plastique renforcé de verre, post-durci à haute température
Configuration	Diamètre 8" x 7 éléments
Arrangement de portage	Multi-ports
Evaluation de pression	1,000 psig
Quantité des trains de l'osmose inverse	12 trains en service, 1 train en veille
<b>Système de récupération d'énergie</b>	
Situation	System de l'osmose inverse
Type	Type isobarique
Flux d'alimentation pour l'ERD	860 m <sup>3</sup> /h
Efficacité de récupération d'énergie	≥ 90%
Matériel de construction	Adapté à l'application de l'eau de mer
Quantité	1 poste/ train de RO, !!!!!!
<b>Réservoir de chasse d'eau</b>	
Situation	Poste de traitement
La capacité nominale	1000 m <sup>3</sup>
Moyen	Perméat de l'osmose inverse
Matière de construction	Béton armée
Quantité	1 en service
<b>Les pompes du CIP de l'osmose inverse</b>	
Situation	Station de CIP de l'osmose inverse
La capacité nominale	850 m <sup>3</sup> /h
Pression de refoulement	4.0 bars
Type	Aspiration final centrifuge
Matière de construction	Acier inoxydable AISI 316L
Source d'alimentation	400V / 50Hz / 3 Phase
Protection	IP55 – Class F
Quantité	1 en service, 1 en veille
<b>Les réservoirs du CIP de l'osmose inverse</b>	
Situation	La station de pompage de l'osmose inverse
La capacité nominale	80 m <sup>3</sup>
Moyen	Les produits chimiques de l'osmose inverse

Matière de construction	Plastic renforcée en fibre (FRP)
Quantité	1 en service
<b>Réservoirs de préparation chimique pour le CIP de l'osmose inverse</b>	
Situation	Station de pompage de l'osmose inverse
La capacité nominale	2 m <sup>3</sup>
Moyen	Produits chimique de l'osmose inverse
Matière de construction	Plastique renforcée en fibre (FRP)
Quantité	1 en service
<b>Réervoir mixeur de préparations chimiques du CIP de l'osmose inverse</b>	
Situation	Station de pompage de l'osmose inverse
Type	Monté sur le dessus
Matière de construction	acier inoxydable AISI 316L
Source d'alimentation	400V / 50Hz / 3 Phase
Protection	IP55 – Class F
Quantité	1 en service
<b>Pompes de transferts chimiques du CIP de l'osmose inverse</b>	
Situation	Station de pompage de l'osmose inverse
La capacité nominale	2 m <sup>3</sup> /h
Type	Pompe à membrane d'air
moyen	Produits chimique de l'osmose inverse
Matière de construction	PP
Quantité	1 en service
<b>Cartouches filtres du CIP de l'osmose inverse</b>	
Situation	Station de CIP de l'osmose inverse
La capacité nominale	850 m <sup>3</sup> /h
Moyen	Produit chimique de nettoyage de RO
Matière de construction	FRP
Evaluation par micron (nominal)	5 micron
Quantité	1 en service

<b>Réservoir du contact au chlore</b>	
Situation	Poste de traitement
Rétention nominale	30 min
La capacité nominale	4000 m <sup>3</sup>
Moyen	Eau de perméat de RO mélangée
Matière de construction	Béton armé, doublure époxy
Quantité	1 en service
<b>Réservoir de stockage de l'eau traitée</b>	
Situation	Réservoir de stockage de l'eau traitée
Rétention nominale	180 min
La capacité nominale	25000 m <sup>3</sup>
Moyen	Eau de produit traitée
Matière de construction	Béton armé
Quantité	1 en service (divisé en deux compartiments)
<b>Pompes de l'eau traitée</b>	
Situation	Station de pompage de l'eau traitée
La capacité nominale	695 m <sup>3</sup> /h
Pression de refoulement	30 bars
Type	Centrifuge, aspiration finale
Matière de construction	acier inoxydable AISI 316L
Source d'alimentation	690V / 50Hz / 3 Phase
Protection	IP55 – Class F
<b>29. Pompes de transfert de l'hypochlorite de sodium</b>	
Situation	Zone chimique de prétraitement
La capacité nominale	5 m <sup>3</sup> /h
Type	Pompe à membrane d'air
Moyen	L'hypochlorite de sodium
Matière de construction	PP
Quantité	1 en service

<b>Réservoir de stockage de l'acide hydrochlorique</b>	
Situation	Zone chimique de prétraitement
La capacité nominale	18 m <sup>3</sup>
Moyen	Acide hydrochlorique (35 à 38%)
Matière de construction	FRP
Quantité	1 en service
<b>Pompes de dosage de l'acide hydrochlorique</b>	
Situation	Zone chimique de prétraitement
La capacité nominale	800 l/h pour CIP de UF, 200 l/h pour la neutralisation
Type	Pompe doseuse
Moyen	Acide hydrochlorique (35 à 38%)
Matière de construction	uPVC
Source d'alimentation	400V / 50Hz / 3 Phase
Protection	IP55 – Class F
Quantité	1 en service 1 en veille pour le CIP de UF 1 en service pour la neutralisation
<b>Pompes de transfert de l'acide hydrochlorique</b>	
Situation	Zone chimique de prétraitement
La capacité nominale	5 m <sup>3</sup> /h
Type	Pompe à membrane d'air
Moyen	Acide hydrochlorique (35 à 38%)
Matière de construction	PP
Quantité	1 en service
<b>Réservoir épurateur d'acide hypochlorique</b>	
Situation	Zone chimique de prétraitement
La capacité nominale	0.1 m <sup>3</sup>
Moyen	Eau + fumée d'acide chlorhydrique
Matière de construction	FRP
Quantité	1 en service

<b>Réservoir de stockage de l'hydroxyde de sodium</b>	
Situation	Zone chimique de prétraitement
La capacité nominale	10 m <sup>3</sup>
Moyen	Hydroxyde de sodium (35 à 50%)
Matière de construction	FRP
Quantité	1 en service
<b>Pompes de dosage de l'hydroxyde de sodium</b>	
Situation	Zone chimique de prétraitement
La capacité nominale	150 l/h pour CIP de l'UF, 80 l/h pour la neutralisation
Type	Pompe doseuse
Moyen	Hydroxyde de sodium (35 à 50%)
Matière de construction	uPVC
Source d'alimentation	400V / 50Hz / 3 Phase
Protection	IP55 – Class F
Quantité	1 en service pour la neutralisation
<b>Pompes de transfert de l'hydroxyde de sodium</b>	
Situation	Zone chimique de prétraitement
La capacité nominale	5 m <sup>3</sup> /h
Type	Pompe à membrane d'air
Moyen	Hydroxyde de sodium (35 à 50%)
Matière de construction	PP
Quantité	1 en service
<b>Réservoir de stockage antitartrare</b>	
Situation	Zone CIP de l'UF
La capacité nominale	7 m <sup>3</sup>
Moyen	Solution antitartrare
Matière de construction	FRP
Quantité	1 en service

<b>Pompes de dosage antitartrre</b>	
Situation	Zone CIP de l'UF
La capacité nominale	25 l/h
Pression de refoulement	Pompe doseuse
Type	Solution antitartrre
Matière de construction	uPVC
Source d'alimentation	400V / 50Hz / 3 Phase
Protection	IP55 – Class F
Quantité	1 en service 1 en veille
<b>Réservoir de stockage de méta-bisulfite de sodium</b>	
Situation	Zone CIP de l'UF
La capacité nominale	3 m <sup>3</sup> chacun
Moyen	Solution de méta-bisulfite de sodium
Matière de construction	FRP
Quantité	1 en service 1 en veille
<b>Pompes de dosage de méta-bisulfite de sodium</b>	
Situation	Zone du CIP de l'ultrafiltration
La capacité nominale	750L/h Pour l'alimentation de l'ERS
Pression de refoulement	1000L/h pour l'alimentation de l'UF
Type	Pompe doseuse
Moyen	Solution de méta-bisulfite de sodium
Matière de construction	UPVC
Source d'alimentation	400V/50Hz/3Phases
Protection	IP55-Class F
Quantité	1 en service 1 en veille pour l'alimentation du collecteur de l'ERS 1 en service 1 en veille pour l'alimentation du collecteur de l'UF

<b>Réservoir de mixage du méta-bisulfite de sodium</b>	
Situation	Zone du CIP de l'osmose inverse
Type	Monté au-dessus
Matière de construction	Acier inoxydable AISI316L
Source d'alimentation	400V/50Hz/3Phases
Protection	IP55-Class F
Quantité	2 postes en service dans chaque réservoir
<b>Réservoir de stockage de l'hypochlorite de sodium pour le post traitement</b>	
Situation	Zone de post chloration
La capacité nominale	35 m <sup>3</sup>
Moyen	Hypochlorite de sodium (12%)
Matériel de construction	FRP
Quantité	1 en service
<b>Pompes de dosage de l'hypochlorite du sodium</b>	
Situation	Zone de post chloration
La capacité nominale	180 L/h
Type	Pompe doseuse
Moyen	Hypochlorite de sodium (12%)
Matière de construction	UPVC
Source d'alimentation	400 V/50Hz/3Phases
Protection	IP55-Class F
Quantité	1 en service 1 en veille
<b>Pompes de transfert d'hypochlorite de sodium</b>	
Situation	Zone de post chloration
La capacité nominale	5m <sup>3</sup> /h
Type	Pompe à membrane d'air
Moyen	Hypochlorite de sodium (12%)
Matériel de construction	UPVC
Quantité	

<b>Système de dosage de CO<sub>2</sub> (se reporter au Vol.4. Système de CO<sub>2</sub> liquide pour plus de détail)</b>	
Situation	Zone du systeme de CO <sub>2</sub>
Capacité	100-700 kg/h pour chaque système
Quantité	1 en service 1 en veille
<b>Système de dosage de la chaux (se reporter au Vol.5. Système de la chaux pour plus de détail)</b>	
Situation	Zone de la chaux
Capacité	360 m <sup>3</sup> /h
Quantité	1 en service
<b>Compresseur d'air d'instrument et de traitement</b>	
Situation	Plateforme de l'osmose inverse
Capacité	2300 Nm <sup>3</sup> /h
Quantité	2 en service 1 en veille
<b>Pompes de l'eau de service</b>	
Situation	Zone de chasse d'eau de l'osmose inverse
La capacité nominale	100 m <sup>3</sup> /h
Pression de refoulement	4 bars
Type	Aspiration finale centrifuge
Moyen	Perméat de l'osmose inverse
Matériel de construction	Acier inoxydable SS316L
Source d'alimentation	400 V/50Hz/3Phases
Protection	IP55-Class F
Quantité	2 en service 1 en veille
<b>Pompes de l'eau potable</b>	
Situation	Station de pompage de l'eau traitée
La capacité nominale	10 m <sup>3</sup> /h
Pression de refoulement	5 bars
Type	Centrifuge multi étages
Moyen	Eau potable

Matériel de construction	Acier inoxydable SS316L
Source d'alimentation	400 V/50 Hz/ 3 Phases
Protection	IP55 – Class F
Quantité	1 en service 1 en veille
<b>Pit de neutralisation</b>	
Situation	Zone de neutralisation Pit
Capacité nominale	250 m <sup>3</sup>
Moyen	Eaux usées du CIP de l'UF et RO
Matériel de construction	Béton armé, doublure d'epoxy
Quantité	1 en service
<b>Pompes de neutralisation</b>	
Situation	Zone de neutralisation Pit
La capacité nominale	150 m <sup>3</sup> /h
Pression de refoulement	1bar
Type	Centrifuge, de type vertical
Matière de construction	PP
Source d'alimentation	400 V/ 50Hz/ 3 PHASES
Protection	IP55- Class F
Quantité	1 en service, 1 en veille

## Références bibliographiques

---

<sup>1</sup> Michel RUMEAU, « MEMBRANES, transferts », EncyclopædiaUniversalis [en ligne], consulté le 29 novembre 2015. URL <http://www.universalis.fr/encyclopedie/membranes-transferts/> [archive]

<sup>2</sup> (en) J. Rouquerol et al., « Recommendations for the characterization of porous solids (Technical Report) », Pure & Appl. Chem, vol. 66, 1758–1739 .p , 1994

<sup>3</sup> Yves BRIAND, Philippe BRION, René LAFONT, Jean-Claude MEUNIER, Pierre VIGNAIS, « PROTÉINES », EncyclopædiaUniversalis [en ligne], consulté le 15 novembre 2015. URL <http://www.universalis.fr/encyclopedie/proteines/> [archive]

<sup>4</sup> Le dessalement de l'eau de mer et des eaux saumâtres [archive] sur Éduscol.

<sup>5</sup> articleElwatan [archive]

<sup>6</sup> Ressources Nationales de Chimie-osmose inverse- sur Eduscol

<sup>7</sup> Cours de mécanique des fluides – Mr SEBBANE Omar

<sup>8</sup> Cours de mécanique des fluides – Mr SEBBANE Omar

<sup>9</sup> Mémoire Master GM KHEDIM- 2013/2014

<sup>10</sup> Fichier type pompe

<sup>11</sup> [https://www.thermexcel.com/french/ressourc/mot\\_pump.htm](https://www.thermexcel.com/french/ressourc/mot_pump.htm)

<sup>12</sup> Cours de l'hydraulique

<sup>13</sup> Mémoire calculs de la station de pompage de l'eau de mer HONAINE 2014/2015