

**RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE**  
**MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR**  
**ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE**  
**UNIVERSITÉ ABDERRAHMANE MIRA BEJAIA**



**FACULTÉ DE TECHNOLOGIE**  
**DÉPARTEMENT DE GÉNIE MÉCANIQUE**

MEMOIRE

PRÉSENTÉ POUR L'OBTENTION DU DIPLÔME DE

**MASTER**

FILIÈRE : GÉNIE MÉCANIQUE

SPÉCIALITÉ : INSTALLATIONS ÉNERGÉTIQUES ET TURBOMACHINES

PAR :

**MADI NADJIM**

**AIT ATMANE TAIB**

**Thème**

---

**Etude énergétique de la station des traitements des eaux du  
complexe CEVITAL, BEJAIA**

---

Soutenu le 28/06/2018 devant le jury composé de:

Mr.	BENSLIMANE	Président
Mr.	DJERRADA	Rapporteur
Mr.	BOUTALBI	Examineur

---

ANNÉE UNIVERSITAIRE 2017-2018

# Remerciements

*Nous remercions Dieu, tout-puissant, de nous avoir donné la volonté et la santé pour réaliser ce travail.*

*Nous tenons à remercier vivement et chaleureusement notre promoteur monsieur A. DJERRADA, encadreur de ce mémoire, pour nous avoir soutenu tous le long de travail, en lui témoignant notre reconnaissance pour son caractère sérieux, sa patience et ses conseils, ainsi que notre Co-encadreur au CEVITAL monsieur H. ALOUI et toute l'équipe qui travaille au service de l'énergie, sans oublier le docteur M. AMOKRANE pour son aide précieux.*

*Nous tenons à exprimer nos sincères remerciements aux membres de jurys de bien vouloir accepter d'évaluer notre travail. Qu'il trouve ici l'expression de notre profonde gratitude.*

*Nos remerciements s'adressent à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à l'accomplissement de ce travail.*

## *Dédicace*

*Avant tous, je remercie Dieu le tout puissant de m'avoir donné le courage et la patience pour réaliser ce travail malgré toutes les difficultés rencontrées.*

*A la mémoire de mon frère DADA Mourad qui a offert sa vie pour notre bonheur,*

*Tu resteras toujours près de mon cœur,*

*Dieu tout puissant l'accueille dans son vaste paradis.*

*A mes chers parents qui m'ont toujours soutenu et orienté vers le bon chemin. Je leurs dois un grand merci et je leurs éprouve un sentiment de gratitude et d'amour,*

*je prie Dieu de garder le prestige de vivre avec eux une longue vie.*

*A mes frères Babi et Yacine.*

*A mes sœurs Yasmina, Lynda, Dalila, Nabila et Sabrina.*

*A ma belle-sœur Ghania et mon beau-frère Rafik.*

*A mes neveux AMINE, Adel, Iyad et Sif Eddine.*

*A mes princesses Amel, Milina et Cerine.*

*A tous les membres de ma grande famille MADI et ZIDAT.*

*A tous les enseignants qui m'ont aidé de près ou de loin durant toutes mes années d'études.*

*A mon binôme Taib et tous sa famille*

*A tous mes amis(es) sans exception.*

*A tous mes collègues sans exception et a toute la promotion de Master IET (2015).*

*ET à tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin à accomplir ce travail.*

*Nadjim*

## DEDICACE

Avant tout, je remercie DIEU le tout puissant de m'avoir donné le courage et la patience pour réaliser ce travail malgré toutes les difficultés rencontrées.

A mes très chers parents

Et mes très chères sœurs

A mes très chers frères

A mes chères tantes

A ma petite sirène

Pour les sacrifices déployés à nos égards, pour leur patience, Leur amour et leur  
Confiance en nous.

Ils ont tout fait pour mon bonheur et ma réussite.

Qu'ils trouvent dans ce modeste travail, le témoignage de ma Profonde affection  
et de mon attachement indéfectible.

Nulla dédicace ne puisse exprimer ce que nous leur devons  
Que dieu leur réserve la bonne santé et une longue vie.

À mes amis

En témoignage de nos sincères reconnaissances pour les efforts Qu'ils  
ont consentis pour me soutenir au cours de mes études.

Que dieu nous garde toujours unis.

À Toute personne qui m'a aidé à accomplir ce travail.

À mes camarades NADJIM, FOOTIK, OMAR(CASE), SAID, ASMB judo, ... et  
toutes leurs familles

## SOMMAIRE

<b>Introduction générale</b>	1
<b>Présentation générale de l'entreprise</b>	3
<b>Chapitre I : Généralité sur le traitement des eaux et la description de la station de CEVITAL</b>	
I-1-Introduction	8
I-2-Généralités	8
I-3-Description de processus de l'installation	13
I-4-Identification des actionneurs de la station	19
I-5-Conclusion	24
<b>Chapitre II : Généralités et l'étude des pompes centrifuges</b>	
II-1-Introduction	25
II-2-Généralité	25
II-3-Définition des pompes centrifuges	27
II-4-Composants d'une pompe centrifuge	27
II-5-Principe de fonctionnement	30
II-6-Classification des pompes centrifuges	30
II-7-Caractéristiques générales des pompes centrifuges	32
II-8-Représentation graphique	33
II-9-Calcul des paramètres de la pompe	36
II-10-Similitude dans les pompes	39
II-11-Méthodologie de dimensionnement de la roue	41
II-12-Conclusion	44
<b>Chapitre III : Fonctionnements des membranes</b>	
III-1- Introduction	45
III-2- Généralité sur les membranes	45
III-3- phénomène de polarisation de concentration	58
III-4-Conclusion	62

## **Chapitre IV : Calculs et vérifications**

IV-1- Étude et dimensionnement de la pompe Multicellulaire KSB	63
IV-2- Calcul de la partie membranaire	77
IV-3- Conclusion	82
<b>Conclusion générale</b>	<b>83</b>

## **Reference bibliographique**

# Liste des figures

<b>Figure I.1:</b> Classification des impuretés	9
<b>Figure I.2 :</b> Coupe schématique d'un filtre à sable à pression	10
<b>Figure I.3 :</b> Face externe des filtres à cartouches utilisées au niveau de Cevital	11
<b>Figure I.4 :</b> Principe des phénomènes d'osmose et d'osmose inverse	12
<b>Figure I.5 :</b> Exemple d'un osmoseur industriel	13
<b>Figure I.6 :</b> Schéma d'un filtre	14
<b>Figure I.7 :</b> Vue globale de la station	18
<b>Figure I.8 :</b> Pompe doseuse	20
<b>Figure I.9 :</b> Pompes à haute pression (HP)	21
<b>Figure I.10 :</b> Structure d'une vanne	21
<b>Figure I.11 :</b> Réservoir de stockage d'eau	23
<b>Figure II.1:</b> Schéma de principe de transfert de l'eau filtré vers les membranes à l'aide des pompes centrifuges multicellulaires dans la station CEVITAL	25
<b>Figure II.2.</b> Pompe centrifuge	26
<b>Figure II.3 :</b> Représentation schématique d'une pompe centrifuge	27
<b>Figure II.4.</b> Types des roues des pompes	28
<b>Figure II.5 :</b> Pompes multicellulaires à arbre horizontal	31
<b>Figure II.6:</b> Différents branchements possibles d'une pompe	34
<b>Figure II.7:</b> Caractéristiques d'une pompe	35
<b>Figure II.8:</b> Courbe caractéristique de la conduite	38
<b>Figure II.9:</b> Point de fonctionnement ensemble circuit-pompe	38
<b>Figure II.10 :</b> Classification des pompes en fonction de la vitesse spécifique	40
<b>Figure II.11 :</b> Evolution standard selon Cordier	43
<b>Figure III.1:</b> Procédé de séparation membranaire	46
<b>Figure III.2 :</b> Schéma d'une membrane organique	47

<b>Figure III.3 :</b> Schéma d'une membrane organique	48
<b>Figure III.4:</b> Domaines d'applications des différentes techniques à membranes	51
<b>Figure III.5:</b> Principe de l'ultrafiltration	52
<b>Figure III.6 :</b> Principe de l'osmose inverse	53
<b>Figure III.7 :</b> Face externe d'un module d'osmose inverse utilisée au niveau de Cevital	53
<b>Figure III.8 :</b> Schéma de la filtration frontale	54
<b>Figure III.10 :</b> Schéma du module plan	56
<b>Figure III.11:</b> Module tubulaire	56
<b>Figure III.12:</b> Module fibres creuses	57
<b>Figure III.13 :</b> Structure interne d'une membrane spirale	58
<b>Figure III.14 :</b> Représentation schématique du phénomène de polarisation de concentration	59
<b>Figure III.15 :</b> Colmatage externe et interne d'une membrane	60
<b>Figure III.16 :</b> Mécanismes de colmatage pour des membranes poreuses	60
<b>Figure IV.1 :</b> Roue d'une pompe centrifuge	69
<b>Figure IV.2 :</b> Triangle des vitesses à l'entrée de la roue	72
<b>Figure IV.3 :</b> Bilan de matière de perméateur	78
<b>Figure IV.4 :</b> Ligne d'osmose inverse de CEVITAL	82

# Liste des tableaux

<b>Tableau III-1:</b> Caractéristiques de procédés de séparation	50
<b>Tableau IV.1:</b> Classification des pompes selon la vitesse spécifique	64

# NOMENCLATURE

Symboles	Significations	Unités(SI)
b	Largeur	m
C	Vitesse absolue d'écoulement	m/s
Cr	Composante radiale de la vitesse absolue	m/s
Cu	Composante circonférentielle de la Vitesse absolue	m/s
D	Diamètre de la roue	m
Ds	Diamètre spécifique de la pompe	m
H.M.T	Hauteur manométrique totale	m
$H_{th\infty}$	Hauteur d'élévation a nombre d'aubes infini	m
$H_{thZ}$	Hauteur d'élévation a nombre d'aubes fini	m
$h'_1$	Pertes de charge à l'aspiration	m
$h'_2$	Pertes de charge au refoulement	m
g	Accélération de la pesanteur	$m/s^2$
m.C.E	Mètre colonne d'eau	bar
N	Vitesse de rotation	tr/mn
$N_s$	La vitesse spécifique de la pompe	tr/mn
N.P.S.H	Charge nette à l'aspiration	m
$P_{ab}$	Puissance absorbée	w
$P_f$	Puissance fournie	w
$P_M$	Puissance mécanique	w
Q	Le débit volumétrique	$m^3/s$
U	Vitesse tangentielle de la roue	m/s
V	Vitesse moyenne d'écoulement	m/s
W	Vitesse relative d'écoulement	m/s
$\rho$	Masse volumique de l'eau	$kg/m^3$
$\eta_H$	Rendement hydraulique	/
$\eta_v$	Rendement volumétrique	/
$\eta_m$	Rendement mécanique	/

$\eta_g$	Rendement global	/
Z	Nombre d'aubes	/
$\Sigma h'$	Les pertes de charge totales	m
$\mu$	Facteur de glissement	/
$\lambda$	Coefficient de perte de charge linéaire	/
$\xi$	Coefficient de perte de charge singulière	/
$K_0$	Coefficient d'aspiration	/
$M_t$	Couple de rotation	N.m
$\tau$	Contrainte admissible des torsions	N/m <sup>2</sup>
Re	Limite minimale apparente d'élasticité	N/m <sup>2</sup>
$V_0$	Vitesse absolue de l'entrée	m/s
$V_{1m}$	Composante méridienne de la vitesse absolue	m/s
$\delta$	L'angle d'attaque	Degré
$\beta_2$	L'angle d'aube à la sortie de la roue	Degré
$\beta_1$	Angle d'aube à l'entrée	Degré
TDS	Total solide dissous	kg/m <sup>3</sup>
P	Pression	Pa
$M_a$	Débit massique de l'alimentation	kg/m <sup>3</sup>
$M_p$	Débit massique de perméat	kg/m <sup>3</sup>
$M_c$	Débit massique de concentrât	kg/m <sup>3</sup>
$\pi$	Pression osmotique moyenne	Pa
$\Delta p$	Différence de pression à travers la membrane	Pa
J	Flux de perméat	m/s
A	Perméabilité de la membrane à l'eau	m <sup>2</sup> Kpa
S	Surface de la membrane	m <sup>2</sup>
$C_{SP}$	Concentration d'un soluté dans le perméat	kg/m <sup>3</sup>
$C_{SA}$	Concentration d'un soluté dans l'alimentation	kg/m <sup>3</sup>
$T_R$	Taux de rétention (sélectivité)	/
$R_m$	Résistance d'une membrane	Pa/s.m <sup>-1</sup>
$e_m$	Epaisseur de la membrane	m
Y	Taux de conversion	/
T	Température du fluide	K

C	Concentration d'un soluté	$\text{kg/m}^3$
R	Constante universelle $R = 8,314 \times 10^3$	$\text{Jmol}^{-1}\text{K}^{-1}$

## Abréviation:

DS1.....groupe de dosage de l'hypochlorite de sodium  
DS2.....groupe de dosage de flocculent  
DS3.....groupe de dosage de séquestrant  
DS4.....groupe de dosage de méta bisulfite de sodium  
UF .....ultrafiltration  
MF.....microfiltration  
NF.....nanofiltration  
OI.....osmose inverse  
CIP.....Cleaning in place

***INTRODUCTION  
GÉNÉRALE***

# Introduction générale

Le monde actuel vit un progrès technologique considérable grâce à l'industrie énergétique selon ses différentes formes (hydraulique, nucléaire, solaire ; thermique, pétrolier ...).

Depuis plus de 16 ans le complexe CEVITAL affirme son savoir-faire, et innove pour maintenir la qualité de ses produits, et satisfaire une large clientèle, ce qui le pousse à étendre ses unités de production, élargissant par conséquent ses besoins en matières premières.

En effet, au niveau de CEVITAL, l'alimentation de l'eau se fait grâce à un mélange de deux grandes sources, la première est issue d'un puits artésien(forage) situé à Ibouacène (Bejaia) et la deuxième provient d'une station d'épuration Tichy Haff (ADE), ce mélange est chargé d'impuretés ce qui nécessite une préfiltration par des filtres à sable et une filtration membranaire (osmose inverse).

CEVITAL a opté pour l'installation d'une station de traitement des eaux en utilisant la technologie d'osmose inverse, ce qui fait que l'on dispose d'une eau de qualité, pure et déminéralisée car tout le fonctionnement du complexe, et son système de production repose sur la possibilité de fournir de la vapeur d'eau pour diverses raisons (stérilisation, conditionnement...etc.), et même pour la production de l'énergie électrique nécessaire à son fonctionnement, vue l'utilisation de deux turbines à vapeur présentes au sein du complexe.

Le traitement de l'eau brute dans la station nécessite des pompes à haute pression qui ont pour fonction d'élever un débit  $Q$  à une hauteur  $H$  et assurer le bon fonctionnement des membranes en refoulant une certaine pression supérieure à la pression osmotique, par conséquent ces pompes occupent une place très importante au sein de complexe. Caractérisées par la continuité de leurs fonctionnements, elles ont un rôle primordial dans la production, d'où la nécessité de maintenir un bon fonctionnement et un suivi quotidien de ces pompes.

A cet effet, le présent mémoire est réparti en quatre chapitres décrivant les volets principaux:

Après une description du procédé industriel où s'est déroulée notre stage, on présente dans le premier chapitre les généralités sur le traitement des eaux ainsi que la description du processus de filtration et des différents équipements (instruments et actionneurs) constituant la station.

Dans le deuxième chapitre, nous rappelons les notions fondamentales des pompes, une présentation des différents éléments constitutif de la pompe, roues mobiles et fixes, volute, divergents et leurs rôles. Finalement, on termine ce chapitre par une analyse de fonctionnement et de l'installation d'une pompe sur un réseau et la détermination des paramètres de la pompe.

Le troisième chapitre est consacré à la présentation des généralités sur les membranes ainsi que leur classification, ensuite les différents procédés de séparation membranaire sont décrits. Les différents types de membranes sont présentés, ainsi que leurs caractéristiques et leur nettoyage.

Le quatrième chapitre est réparti en deux volets;

- Le premier volet est consacré sur le dimensionnement de la pompe multicellulaire d'où on a calculé les paramètres principaux de la pompe et les paramètres à l'entrée et à la sortie de la roue avec une méthode de calcul approximative.
- Dans le deuxième volet, nous avons essayé de faire un bilan massique de perméateur afin de calculer la pression osmotique de la solution pour calculer la surface d'échange de toute la ligne de traitement membranaire afin de trouvé la surface d'une seule membrane et la comparé avec celle du constructeur.

Finalement, nous terminons notre travail par une conclusion générale.

# **Présentation générale de l'entreprise**

# Présentation générale de l'entreprise

## Historique :

**ceVital** est parmi les entreprises algériennes qui ont vu le jour dès l'entrée de notre pays en économie de marché. Elle a été créée par des fonds privés en 1998. Son complexe de production se situe dans le port de Bejaia et s'étend sur une superficie de 45000m<sup>2</sup>. **ceVital** Contribue largement au développement de l'industrie agroalimentaire nationale, elle vise à satisfaire le marché national et exporter le surplus, en offrant une large gamme de produits de qualité.

En effet les besoins du marché national sont de 1200T/J d'huile l'équivalent de 12 litres par personne et par an. Les capacités actuelles de **ceVital** sont de 1800T/j, soit un excédent commercial de 600T/J.

Les nouvelles données économiques nationales dans le marché de l'agroalimentaire, font que les meilleurs sont ceux qui maîtrisent d'une façon efficace et optimale les coûts, les charges et ceux qui offrent le meilleur rapport qualité/prix. Ceci est nécessaire pour s'imposer sur le marché que **ceVital** négocie avec les grandes sociétés commerciales internationales, ces produits se vendent dans différentes villes africaines (Lagos, Niamey, Bamako, Tunis, Tripoli...).

## Mission et objectifs et valeurs de l'entreprise :

- **Valeurs de l'entreprise :**

- **Ecoute et Respect**
- **Intégrité et Transparence**
- **Solidarité et Esprit d'équipe**
- **Initiative et persévérance**
- **Courage et Engagement de performance**

- **Missions et objectifs :**



L'entreprise a pour mission principale de développer la production et d'assurer la qualité et le conditionnement des huiles, des margarines et du sucre à des prix nettement plus compétitifs et cela dans le but de satisfaire le client et le fidéliser.

Les objectifs visés par *ceYital* peuvent se présenter comme suit :

- L'extension de ses produits sur tout le territoire national.
- L'importation de graines oléagineuses pour l'extraction directe des huiles brutes.
- L'optimisation de ses offres d'emploi sur le marché du travail.
- L'encouragement des agriculteurs par des aides financières pour la production locale de graines oléagineuses
- La modernisation de ses installations en termes de machine et technique pour augmenter le volume de sa production.
- Le positionnement de ses produits sur le marché étranger par leurs exportations.

### Activités de *ceYital* :

Lancé en Mai 1998, le complexe *ceYital* a débuté son activité par le conditionnement d'huile en Décembre 1998. En Février 1999, les travaux de génie civil de la raffinerie ont débuté, cette dernière est devenue fonctionnelle en Août 1999. L'ensemble des activités de *ceYital* est concentré sur la production et la commercialisation des huiles végétales, de margarine et de sucre et se présente comme suit :

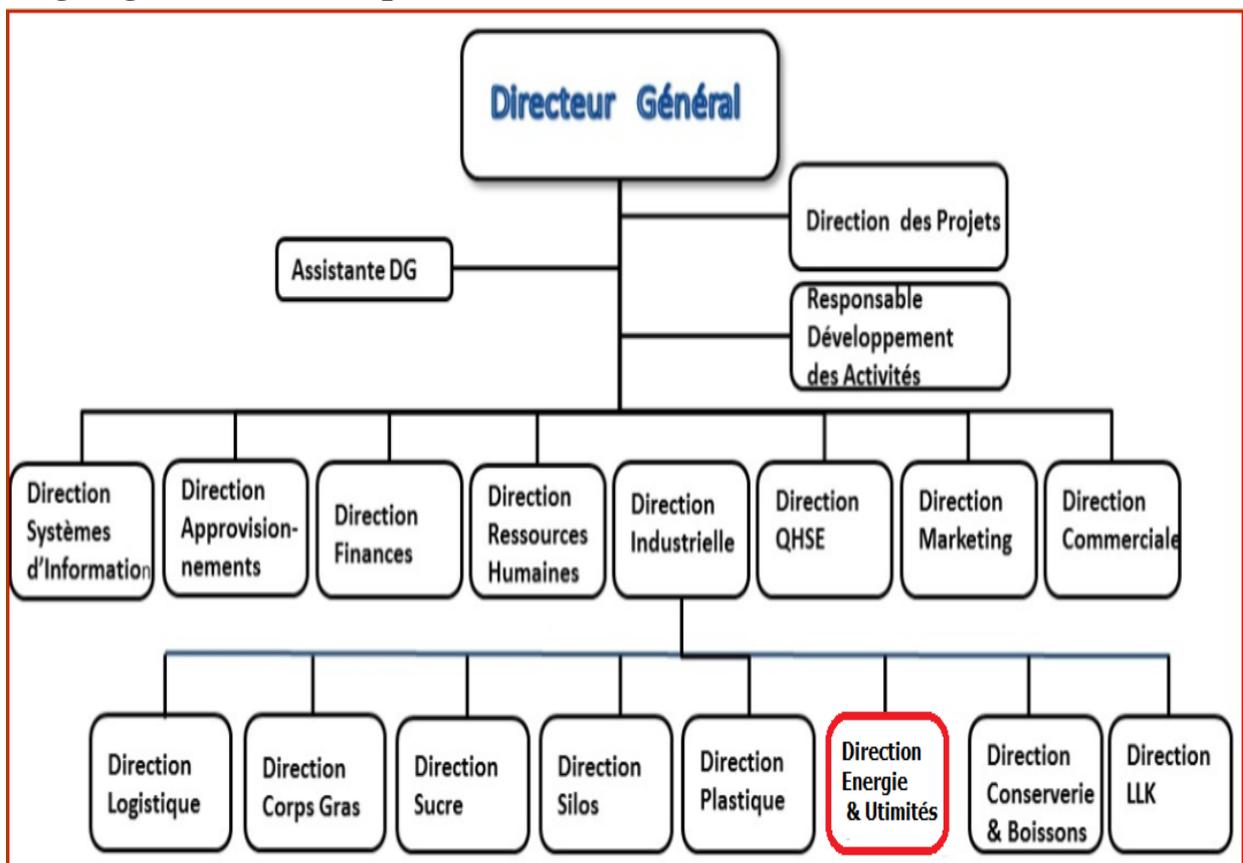
- Raffinage des huiles (1800 tonnes/jour);
- Conditionnement d'huile (1400 tonnes/heure);
- Production de margarine (600 tonnes/jour) ;
- Fabrication d'emballage (PET): Poly-Ethylène-Téréphtalate (9600 unités/heure) ;
- Raffinage du sucre (2000 tonnes/jour);
- Raffinage du sucre (3000 tonnes/jour);
- Stockage des céréales (120000 tonnes);
- Minoterie et savonnerie en cours d'étude.

## Situation géographique :

**ceVital** est implanté au niveau du nouveau quai du port de Bejaia à 3 Km du sud-ouest de cette ville, à proximité de la RN 26. Cette situation géographique de l'entreprise lui a beaucoup profité étant donné qu'elle lui confère l'avantage de proximité économique. En effet elle se trouve proche du port et l'aéroport, et il s'étend sur une superficie de 14 Hectares.



## Organigramme du complexe **ceVital** :



## Les unités de production :

Le complexe **ceYital** est composé de plusieurs unités de production Agro-alimentaire :

### Raffinerie d'huile :

Elle a été mise en chantier en mai 1998, l'adaptation d'une technologie de dernière génération lui a permis de rentrer en production en un temps record soit août 1999. Elle est considérée parmi les plus modernes au monde.

Actuellement sa capacité de production est de 1800 tonnes par jour. Cette raffinerie est conçue pour traiter toutes les qualités d'huile comestible tel que : le colza, le tournesol, le soja, le palme...etc.



### Margarinerie :

Mise en chantier en mars 2000, puis rentrée en production en juillet 2001. Cette margarinerie construite par le groupe lui-même représente une offensive considérable sur le marché à grand public. Sa capacité de production est de 100T/J pour chaque chaîne de production qui sont au nombre de six.



### Raffinerie de sucre :

Elle est mise en chantier en octobre 2000, devenue fonctionnelle en octobre 2002. Elle est dotée d'un équipement industriel très modernisé qui répond aux besoins du marché, sa capacité de production actuelle est de 1600T/J dépassant ainsi les 500000T/an. Cette dernière couvrira les besoins nationaux en sucre blanc.

Une nouvelle raffinerie de sucre d'une capacité de 3000T/J est actuellement mise en service en période de démarrage et d'essais.



## Stockage de la matière première :

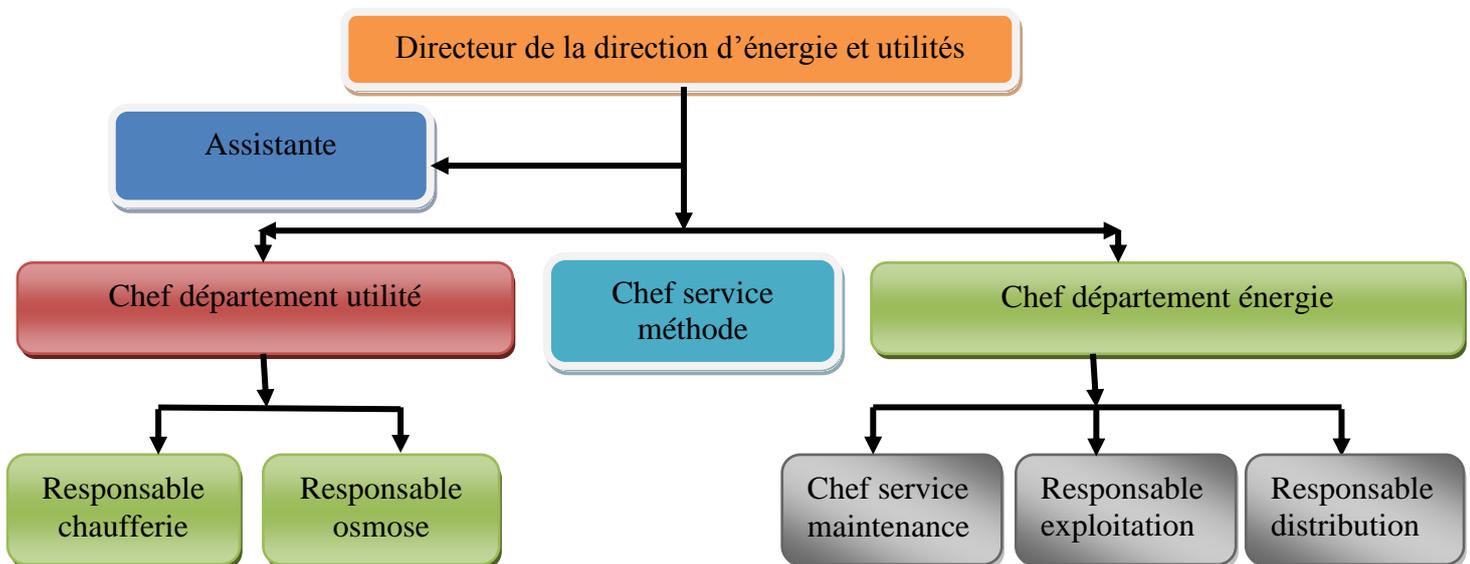
Les silos de stockage sont opérationnels depuis juin 2003, ce sont de gigantesques récipients cylindriques construits en béton, destinés au stockage des céréales et des graines oléagineuses. Au nombre de 24, la capacité de stockage de chaque cellule est de 5000 tonnes, Ce qui offre une capacité de 120000 tonnes (la plus grande capacité de stockage en Afrique.

## Unité Energie et utilités :

La direction Energie est constituée de deux départements qui sont :

- Département énergie (production, maintenance et distribution de l'énergie électrique) : on distingue :
  - ✓ Le poste 60kV ;
  - ✓ Le poste 30kV ;
  - ✓ La cogénération.
- Département chaufferie (production et distribution de la vapeur)

Les différents départements de la direction Energie sont représentés dans l'organigramme suivant :



**Organisation de la direction énergie électrique et utilités.**

# Chapitre I:

**Généralités sur le  
traitement des eaux et la  
description de la station  
de CEVITAL**

# Chapitre I. Généralités sur le traitement des eaux et la description de la station de CEVITAL.

---

## I.1 Introduction

L'eau réunit un ensemble exceptionnel de propriétés physiques et chimiques, elle peut devenir solvant, fluide thermique ou simplement liquide facile à manipuler, mais elle peut causer des problèmes sur les équipements de fabrication ainsi sur la qualité du produit fabriqué si elle est utilisée directement sans traitement.

L'extension des besoins en eau fait que CEVITAL dispose de ses propres forages, mais l'inconvénient de celui-ci est que l'eau brute est fortement polluée, ce qui nécessite une filtration avant son utilisation.

Nous parlerons dans ce chapitre de l'importance de cette ressource, ainsi que les éléments de traitements des eaux, enfin nous terminerons par la description de notre processus et l'identification des différents éléments et équipements de la station.

## I.2 Généralités

### I.2.1 L'eau dans l'industrie

L'eau est omniprésente dans l'industrie. Il n'y a pas de produit qui n'est pas au moins rincé avec de l'eau au cours de sa production, et elle est une composante essentielle de la production de bien des produits alimentaires et chimiques, par exemple. Les qualités thermodynamiques de l'eau en font un fluide caloporteur de choix : elle a une enthalpie d'évaporation et une chaleur spécifique très élevée [1].

Dans certains cas, l'industrie doit utiliser de l'eau non potable, provenant des forages, de nappes phréatiques, de rivières, ou de lacs. Dans le cas de CEVITAL, l'eau provient des forages réalisés à la commune d'OUED-GHIR-Bejaia.

### I.2.2 Différents procédés de traitements des eaux

- Traitement avec les Adoucisseurs d'eau
- Traitement par désinfectants Ultra-violet

### I.2.3 Polluants :

L'eau étant un solvant, n'existe pratiquement pas sous forme de H<sub>2</sub>O. Afin de pouvoir analyser les traitements de purification envisageable, il est indispensable de classier les impuretés.

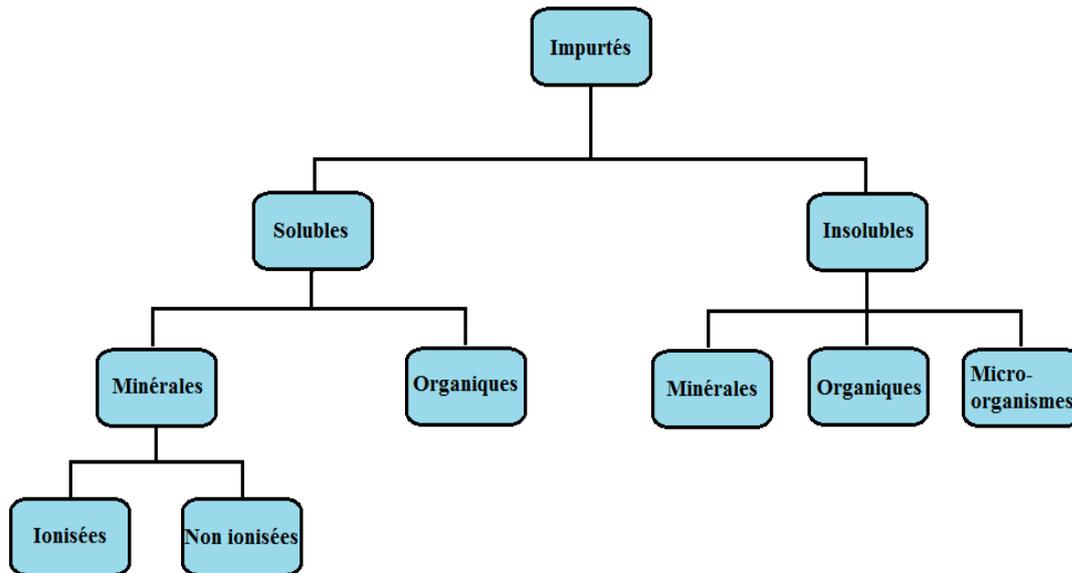


Figure I.1: Classification des impuretés [2].

### I.2.4 Filtration

On entend par filtration, une méthode pour éliminer des impuretés de l'eau en la faisant passer à travers un media filtrant. Aujourd'hui, la filtration regroupe un grand nombre de technologies, dont les technologies de filtrations membranaires qui permettent même de déminéraliser l'eau, et la filtration particulaire qui regroupe l'ensemble des méthodes de filtration permettant d'enlever de l'eau les particules d'une taille supérieure à environ 1  $\mu\text{m}$  [1].

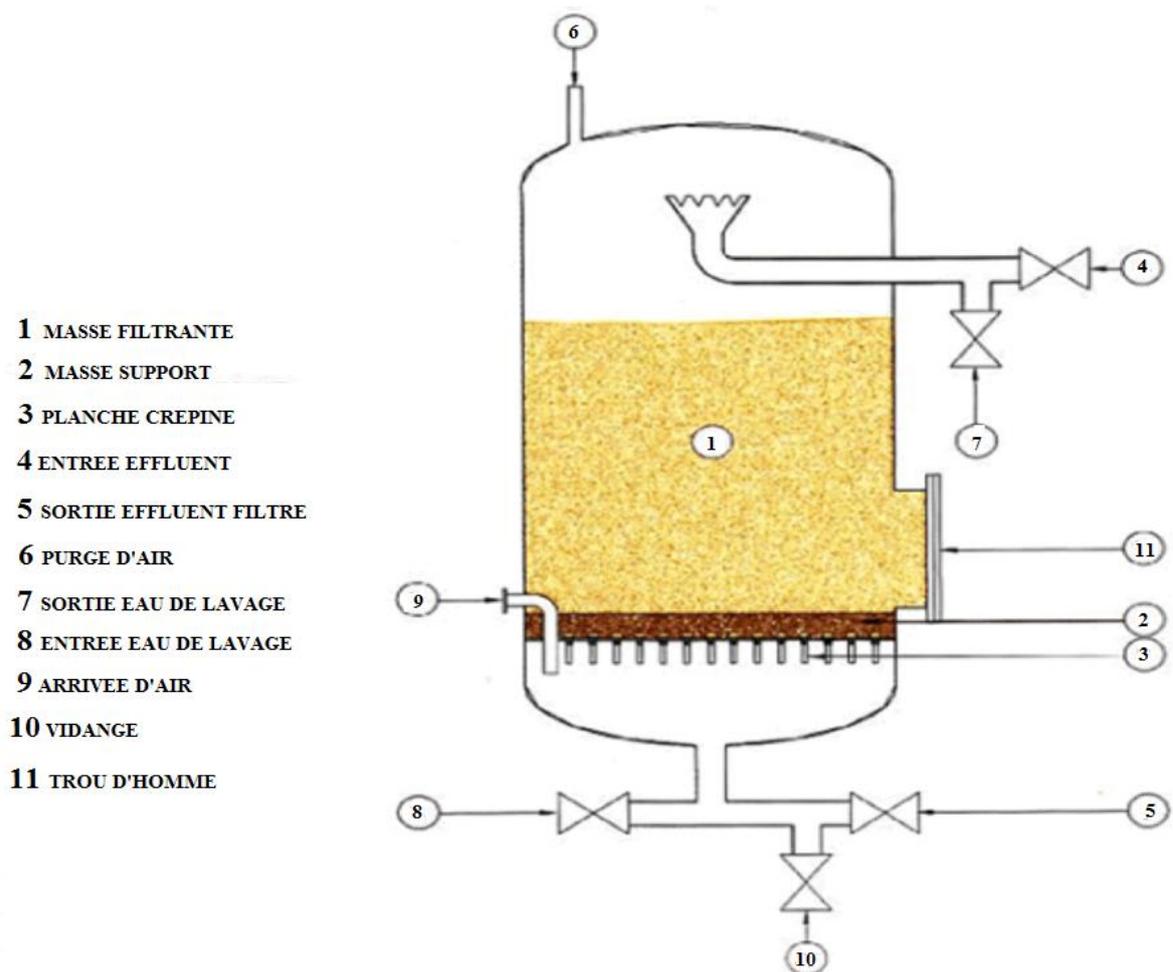
### I.2.5 Différents types de filtres

- Les filtres-presses.
- Les filtres à poche ou à panier.
- Les filtres à cartouches lavables et filtres autonettoyants.
- Les filtres à sable.

## I.2.6 Filtres à sables

On parle généralement de filtres à sable même si le media filtrant n'est pas forcément du sable. Il peut aussi s'agir d'antracite ou de sable vert « Glaucosite », ou un autre media filtrant.

Les filtres avec une couche de sable vert permettent de réduire les concentrations de fer et de manganèse dissous, ainsi que d'hydrogène sulfuré à moins de 0.01 ppm. Les filtres à sable contiennent aussi souvent du gravier. Celui-ci n'est en général pas un media filtrant, mais sert à former une couche poreuse au fond du filtre. Ils sont aussi économiquement intéressants pour des débits d'au moins quelques m<sup>3</sup>/h d'eau très chargée en particules [2].



**Figure I.2 :** Coupe schématique d'un filtre à sable à pression.

### I.2.7 Filtres à cartouches lavables et filtres autonettoyants

Sous tous ces noms, on trouve une très grande variété de technologies, et souvent des nouveaux filtres autonettoyants sont présentés comme la solution à tous les problèmes de filtration. S'ils présentent un avantage en termes de coûts de fonctionnement, il faut être conscient de leurs désavantages, qui limitent leurs applications :

- ✓ Le coût d'investissement est généralement élevé.
- ✓ Les filtres autonettoyants ont un seuil de filtration de quelques dizaines de mm, ce qui est insuffisant pour certaines applications, comme la préfiltration pour un osmoseur.
- ✓ L'installation est relativement complexe.
- ✓ Lors du nettoyage périodique, ces filtres rejettent une eau fortement chargée en particules, qu'il est souvent impossible de conduire à l'égout sans un traitement particulier : cela complique encore l'installation [1].



**Figure I.3** : Face externe des filtres à cartouches utilisées au niveau de Cevital.

### I.2.8 Membranes

La membrane est définie comme une couche mince semi-perméable qui joue le rôle d'une barrière sélective qui sépare les substances dissoutes ou non, sous l'action d'une force chimique (concentration ...) ou physique (pression). En général, les constituants qui sont plus petits que

les pores de la membrane sont capables de passer à travers la membrane sous l'effet d'une pression appliquée tandis que les substances et les molécules de taille plus importante sont retenues par la membrane.

## I.2.9 Classification des membranes

Il existe différents types de membranes :

- Les membranes minérales (ou inorganique).
- Les membranes organiques.
- Les membranes composites.
- Les membranes échangeuses d'ions.

## I.2.10 Phénomènes d'osmose direct et d'osmose inverse

L'osmose inverse est un procédé de filtration tangentielle qui permet l'extraction d'un solvant, le plus souvent l'eau, par perméation sélective à travers une membrane dense sous l'action d'un gradient de pression. Elle s'oppose au phénomène naturel d'osmose qui tend à transférer le solvant d'une solution diluée vers une solution concentrée mises en contact par une membrane sélective sous l'action du gradient de concentration (Figure I-4). Lorsqu'une pression est appliquée sur le compartiment le plus concentré, le flux de solvant diminue jusqu'à s'annuler pour une pression égale à la pression osmotique de la solution. Lorsque la pression appliquée est supérieure à cette pression osmotique, le flux s'inverse : c'est le phénomène d'osmose inverse.

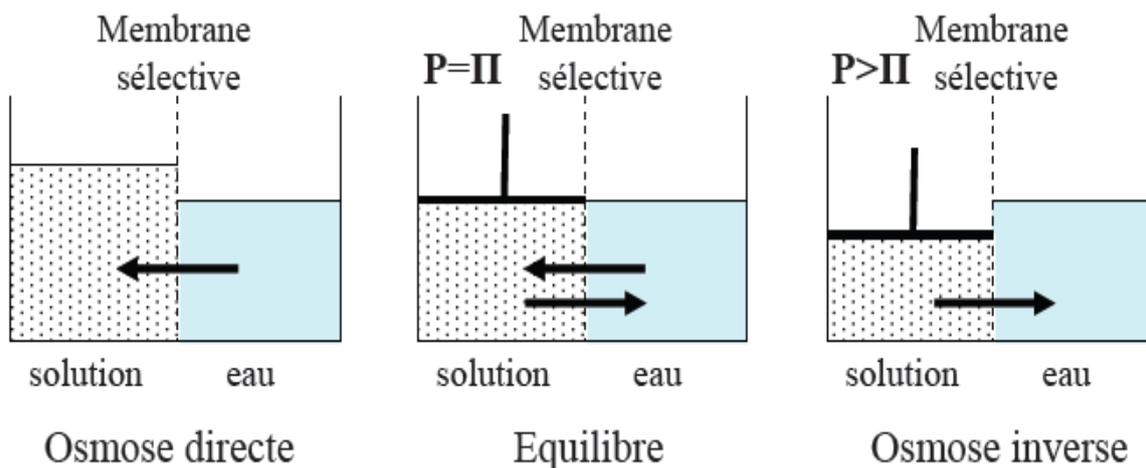


Figure I.4 : Principe des phénomènes d'osmose et d'osmose inverse.

## I.2.11 Principe de fonctionnement d'osmose inverse

L'eau aspirée subit tout d'abord un prétraitement par chloration avec de l'hypochlorite de sodium, ensuite une injection de coagulant flocculant est effectuée afin d'agglomérer les

particules en suspension sous forme de floes et permettre leur décantation. L'eau décantée passe dans les filtres à sables pour éliminer les particules en suspension. Le chlore résiduel est éliminé par une déchloration au bisulfite de sodium, ainsi le micro filtres, les pompes à haute pression et les membranes d'osmose inverse (OI) s'en trouvent protégés.

Afin d'éviter la précipitation des sels sur les surfaces des membranes, une injection d'acide chlorhydrique est effectuée. L'eau prétraitée arrive au système d'osmose inverse pour réduire la salinité de l'eau. L'étape finale dans la chaîne de traitement consiste en une désinfection et une correction du pH.

### I.2.12 Unité osmose de CEVITAL

La vapeur d'eau utilisée par la cogénération et les différentes unités de production du complexe, provient intégralement de l'unité osmose qui est constituée de quatre compartiments destinés à produire l'eau évaporée dans les chaudières [3].



**Figure I.5 :** Exemple d'un osmoseur industriel.

Cette unité utilise l'osmose inverse comme technique de filtration, ce qui nécessite l'utilisation des grands osmoseurs industriels (Figure I.5) munis de membranes filtrantes.

## I.3 Description du processus de l'installation

### I.3.1 Fonctionnement d'un filtre

Le fonctionnement des cinq filtres est identique, nous allons donc décrire le fonctionnement d'un seul filtre.

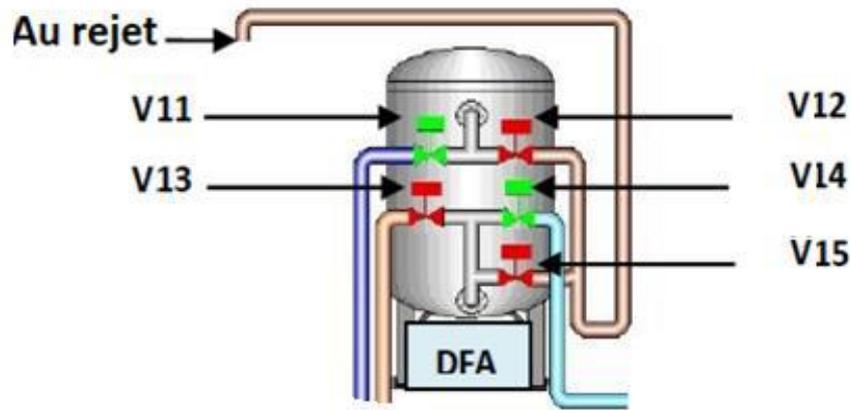


Figure I.6 : Schéma d'un filtre[2].

### a) Filtration

La filtration se fait par l'ouverture des vannes (V11 et V14), l'ouverture sera détectée par des détecteurs de fin de courses, avec un débit qui varie selon l'état du filtre, en fonctionnement normal il est d'environ 40m<sup>3</sup>/h.

### b) Contre-lavage

Le contre-lavage se fait par l'ouverture des vannes (V12 et V13), l'ouverture sera détectée par des détecteurs de fin de courses, avec un débit très supérieur à celui de la filtration. Il est d'environ 110m<sup>3</sup>/h.

### c) Rinçage

Le rinçage se fait par l'ouverture des vannes (V11 et V15).

## I.3.2 Procédure de pré filtration

Arrivée à la station, l'eau brute est détectée par le transmetteur de flux et un transmetteur de pression. Ceci enclenchera l'ouverture des vannes de la filtration à partir d'une pression de 6bar.

La pompe d'alimentation sera enclenchée puis les pompes doseuse par l'injection du flocculant et de l'hypochlorite de sodium, l'eau sera ainsi distribuée dans les cinq filtres à sables. L'eau ainsi filtrée est acheminée vers le réservoir d'eau filtre qui possède un transmetteur de niveau[2].

Lorsque le réservoir atteint 90% de sa capacité, la filtration s'arrête en arrêtant les pompes doseuses et les pompes d'alimentation si celles-ci sont enclenchées puis en fermant les vannes.

Chaque groupe de dosage est équipé d'un transmetteur de niveau qui indique le niveau des produits chimiques contenus dans les réservoirs. Ces réservoirs sont remplis manuellement dès que le niveau atteint 20% de leurs capacités. Dans le cas contraire, ils continueront à diminuer jusqu'à atteindre 10%, l'arrêt de la filtration est enclenché afin de protéger les pompes doseuses.

### **I.3.3 Procédure du contre lavage**

Un basculement des vannes de l'installation permet de passer en mode contre-lavage. De l'eau est prélevée et mise sous pression au sens contraire de la filtration avec un débit largement supérieur à celui de la filtration afin de laver le media filtrant et d'éviter le colmatage des filtres. Si la différence de pression du filtre (**DPT $\geq$ P consigne**), l'ouverture des vannes du contre-lavage du filtre sera enclenchée. Pendant que le filtre effectue son contre-lavage durant 15 minutes, le reste des filtres continuent la filtration. Le contre-lavage fonctionne filtre par filtre.

A la fin de la durée destinée au contre-lavage et au rinçage du premier filtre, les vannes de ce dernier se ferment pour passer à la filtration, pendant que le deuxième filtre passe en contre lavage à son tour et ainsi de suite jusqu'au cinquième filtre, l'eau qui y est issue est directement rejetée[2].

La station passe en contre lavage si l'un des deux critères suivant est vérifié :

#### **a) Critère de perte de charge**

Un transmetteur de pression différentielle est mis entre chaque entrée et sortie des cinq filtres, afin de mesurer la perte de charge dans ces derniers, si la différence de pression (**DPT**) atteint 1.5 bar, les filtres entre en contre lavage.

#### **b) Critère chronométrique**

La procédure de filtration est fixée par l'opérateur selon la qualité de l'eau du forage. En général elle prend une durée de 45 heures, les filtres passent par la suite en contre lavage à la fin de ce compte à rebours, et ce même si un contre lavage par le premier critère s'est produit durant cette période.

### **I.3.4 Procédure du lavage final (rinçage)**

Le contre lavage se fait à contre-courant et avec un énorme débit, ce qui déstabilise le lit de filtration. Donc avant d'entamer de nouveau la filtration, la réorganisation du lit doit être faite, et cela avec de l'eau brute suivant le même cheminement que la filtration, mais l'eau qui y est issue est rejetée (vannes de rinçage). Le rinçage s'effectue en une durée de 10 minutes, dans laquelle la pompe de contre lavage est à l'arrêt.

---

**Remarque**

Le fonctionnement de la station dépend aussi de la présence de l'air comprimé pour la commande des vannes pneumatiques, donc sa pression est obligatoirement mesurée et la pression de 6 bar est le seuil minimal de fonctionnement.

**I.3.5 Description de l'unité de traitement par osmose inverse (filtration membranaire)**

Après la procédure du prétraitement on entame la procédure de traitement par osmose inverse. L'unité d'osmose inverse produit 200m<sup>3</sup>/h d'eau déminéralisée. Cette dernière est constituée d'une ligne de 100m<sup>3</sup>/h de produit ayant en commun la partie prétraitement et filtration. Le réservoir intermédiaire pour l'eau filtrée permet de faire fonctionner la ligne d'osmose.

L'eau provenant du réservoir d'eau filtrée est détectée par le transmetteur de flux et de pression ce qui enclenche la pompe d'alimentation puis les pompes doseuses par l'injection du Meta-bisulfite, qui a pour rôle d'éliminer le chlore injecter auparavant (procédure de prétraitement) et le séquestrant, qui a pour rôle d'éviter le colmatage des membranes. Chaque groupe de dosage est équipé d'un transmetteur de niveau qui indique le niveau des produits chimiques contenus dans les réservoirs. Ces réservoirs sont remplis manuellement dès que le niveau atteint 20% de leurs capacités. Dans le cas contraire, ils continueront à diminuer jusqu'à atteindre 10%, l'arrêt de la filtration est enclenché afin de protéger les pompes doseuses [3].

L'eau poursuit son cheminement vers la ligne d'osmose. Le système d'osmose inverse est la section principale dans tout le système de traitement proposé. L'eau est pressurisée et envoyée aux modules d'osmose par les pompes à haute pression après l'ouverture des vannes.

L'enclenchement de ces deux pompes s'effectue 2 minutes après le démarrage des pompes doseuses. Dans les modules (vessels +membranes), l'eau est séparée en eau déminéralisée (eau osmosée) et en concentrée (eau de décharge), cette dernière sera acheminée vers les rejets.

L'eau osmosée est acheminée vers le réservoir d'eau osmosée qui lorsque le réservoir atteint 80% de sa capacité, la filtration s'arrête en fermant les vannes d'entrées, et arrêtant les pompes doseuses et pompes d'alimentation si celles-ci sont enclenchées [3].

**I.3.6 Système de lavage des membranes (C.I.P)**

Lorsque la pression exercée ou la pression différentielle sur les membranes ou la conductivité augmente, pour les mêmes conditions d'exercices (salinités, température de l'eau .... Etc.), il est nécessaire de laver les membranes avec une solution acide ou basique suivant la

---

nature des membranes, l'eau osmosée est acheminée vers les membranes, ceci après ouverture des vannes du CIP.

### **I.3.7 Description de l'unité de traitement par osmose inverse (filtration membranaire)**

Après la procédure du prétraitement on entame la procédure de traitement par osmose inverse. L'unité d'osmose inverse produit 200m<sup>3</sup>/h d'eau déminéralisée. Cette dernière est constitué d'une ligne de 100m<sup>3</sup>/h de produit ayant en commun la partie prétraitement et filtration. Le réservoir intermédiaire pour l'eau filtrée permet de faire fonctionner la ligne d'osmose.

L'eau provenant du réservoir d'eau filtrée est détectée par le transmetteur de flux et de pression ce qui enclenche la pompe d'alimentation puis les pompes doseuses par l'injection du méta-bisulfite, qui a pour rôle d'éliminer le chlore injecté auparavant (procédure de prétraitement) et le séquestrant, qui a pour rôle d'éviter le colmatage des membranes. Chaque groupe de dosage est équipé d'un transmetteur de niveau qui indique le niveau des produits chimiques contenus dans les réservoirs. Ces réservoirs sont remplis manuellement dès que le niveau atteint 20% de leurs capacités. Dans le cas contraire, ils continueront à diminuer jusqu'à atteindre 10%, l'arrêt de la filtration est enclenché afin de protéger les pompes doseuses.

L'eau poursuit son cheminement vers la ligne d'osmose. Le système d'osmose inverse est la section principale dans tout le système de traitement proposé. L'eau est pressurisée et envoyée aux modules d'osmose par les pompes à hautes pression après l'ouverture des vannes.

L'enclenchement de ces deux pompes s'effectue 2 minutes après le démarrage des pompes doseuses. Dans les modules (vessels +membranes), l'eau est séparée en eau déminéralisée (eau osmosée) et en concentrée (eau de décharge), cette dernière sera acheminée vers les rejets.

L'eau osmosée est acheminée vers le réservoir d'eau osmosée qui lorsque le réservoir atteint 80% de sa capacité, la filtration s'arrête en fermant les vannes d'entrées, et arrêtent les pompes doseuses et pompes d'alimentation si celles-ci sont enclenchées.

### **I.3.8 Système de lavage des membranes (C.I.P)**

Lorsque la pression exercée ou la pression différentielle sur les membranes ou la conductivité augmente, pour les mêmes conditions d'exercices (salinités, température de l'eau .... Etc.), il est nécessaire de laver les membranes avec une solution acide ou basique suivant la nature des membranes, l'eau osmosée est acheminée vers les membranes, ceci après ouverture des vannes du CIP.

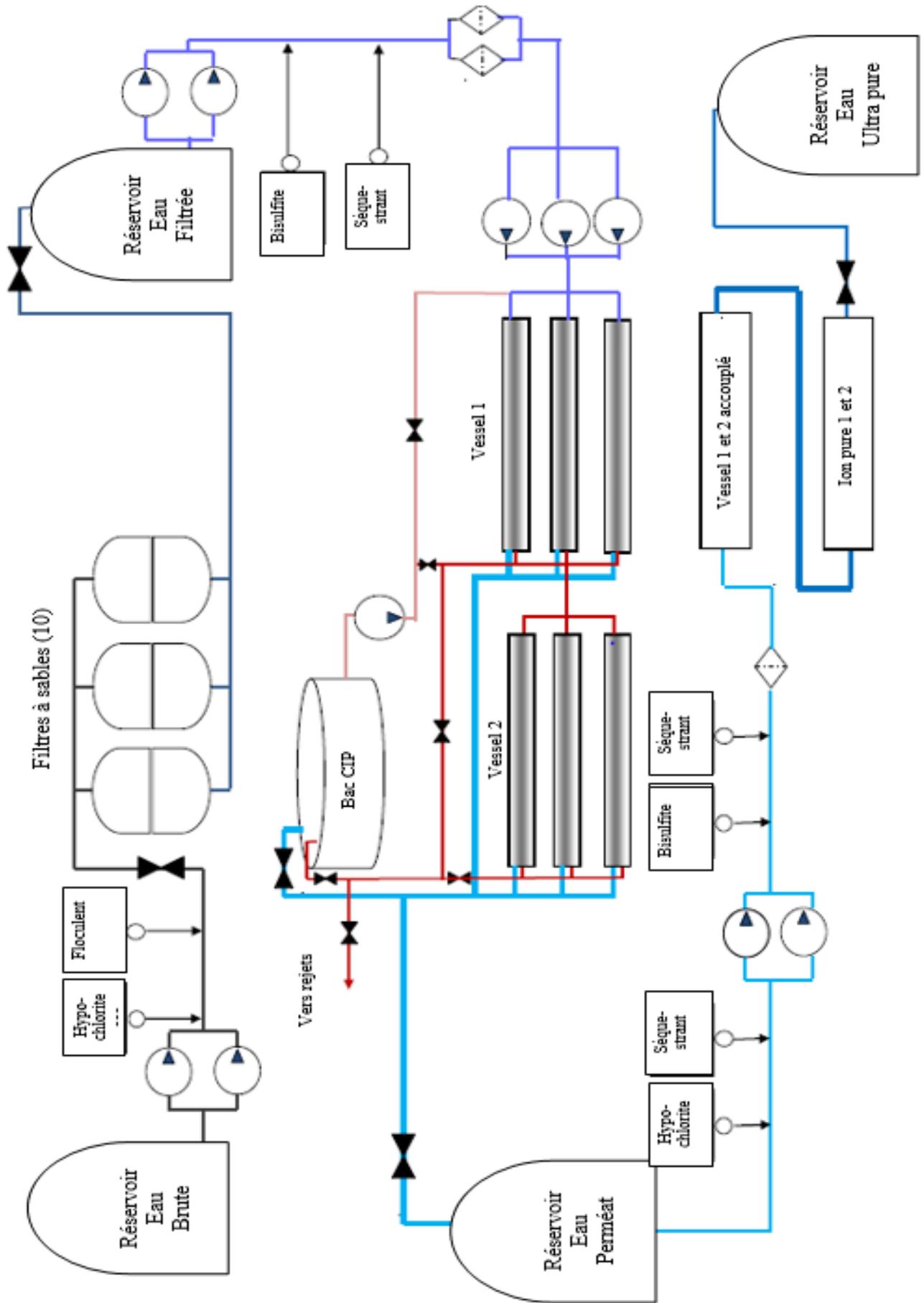


Figure I.7 : Vue globale de la station.

## I.4 Identification des actionneurs de la station

Au niveau de la station, il existe plusieurs types d'actionneurs selon l'utilisation. Elle est composée de :

- Moteurs
- Pompes
- Les vannes
- Les évents
- Filtre-régulateur
- Les mélangeurs statiques

### I.4 .1 Les moteurs

Les fabrications industrielles font appel à une grande variété de machines alimentées par des énergies diverses. Toutefois, l'énergie électrique est prépondérante car, pour des raisons techniques la plupart des dispositifs mécaniques mis en œuvre dans l'industrie sont entraînés par des moteurs électriques [2].

Les moteurs existants dans la station sont destinés à entraîner des pompes, on en distingue donc deux types :

1. Deux moteurs asynchrones triphasés pour la filtration qui ont les caractéristiques :

- Une tension d'alimentation 400/690 V.
- Intensité de 98/57 A.
- Puissance utile de 55 kW.
- Facteur de puissance de 0.87.
- Rendement de 93.58%.
- Vitesse nominal 1459 tr/min.
- Indice de protection IP55.

Et deux autres moteurs asynchrones triphasés pour le rétro-lavage :

- Une tension d'alimentation 380/660 V.
- Intensité de 20.8/12 A.
- Puissance utile de 11 kW.
- Facteur de puissance de 0.86.
- Rendement de 91.2%.
- Vitesse nominal 2940 tr/min.
- Indice de protection IP55.

2. Quatre moteurs monophasés pour les différents groupes de dosages :

- Une tension d'alimentation 100-240 V.
- Puissance maximal 24 W.
- Indice de protection IP65.

## I.4.2 Pompes

Pour refouler les différents liquides existants, on utilise des pompes différentes dont on cite les types suivants :

### a) Pompes d'alimentation :

Ce type de pompe est utilisé pour alimenter la station (les filtres) en eau brute, ce sont des pompes centrifuges à un étage avec orifice d'aspiration axial avec un débit de 537,4 m<sup>3</sup>/h. Elle est auto-régulatrice et génère un débit et non une pression [3].

### b) Pompes de dosages :

Elles sont utilisées pour doser les produits chimiques (hypochlorite de sodium, floculant et coagulant, méta-bisulfite de sodium et le séquestrant) avec une pression maximale de 3 bars et un débit maximale de  $7,5 \times 10^{-3}$  m<sup>3</sup>/h.



Figure I.8 : pompe doseuse

### c) Pompes à haute pression (HP) :

Les pompes à haute-pression d'alimentation des modules d'osmose inverse sont destinées à envoyer l'eau sous haute pression du réservoir d'eau filtré vers la membrane. Avec un débit qui est de 165 m<sup>3</sup>/h et une hauteur de 47m [3].

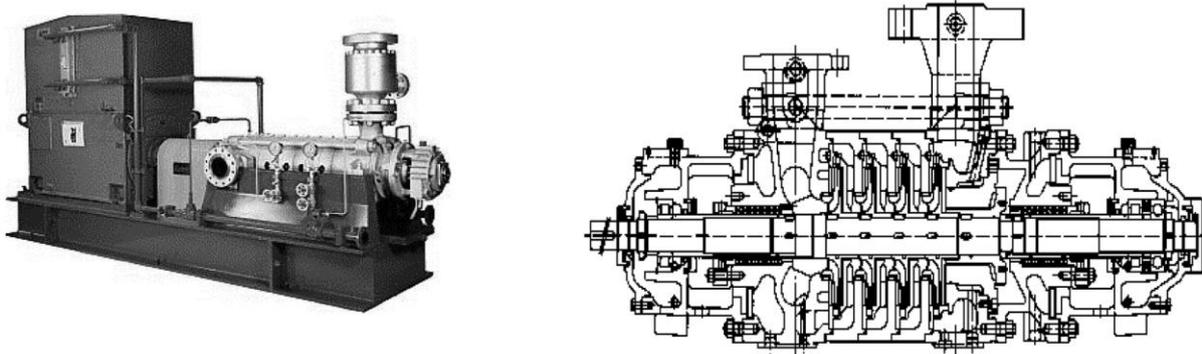


Figure I.9 : Pompes à haute pression (HP)

### I.4.3 Vannes

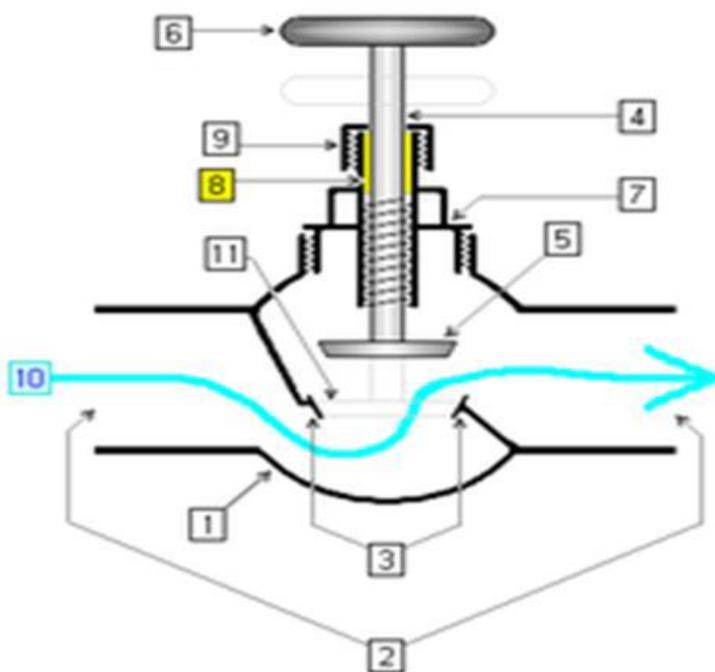
Comme n'importe quel actionneur elle agit sur une grandeur qui sera toujours pour une vanne de deux voies, la grandeur réglée sera une pression, un débit, un niveau, une température, un rapport de concentration [2].

#### 1) Structure de la vanne

Quel que soit le fabricant, le type de vanne ou sa génération, une vanne est toujours décomposable technologiquement en deux parties :

- La vanne (Corps de vanne, siège, clapet).
- L'actionneur (Arcade, servomoteur).

La figure I.10 décrit la structure générale d'une vanne



1. Corps
2. Voie ou passage
- 3 Portée ou siège
4. Axe ou tige
5. Opercule, obturateur ou rotor.
6. Volant ou actionneur
7. Chapeau ou bonnet
8. Garniture de presse-étoupe
9. Écrou de presse étoupe
10. Sens d'écoulement du fluide
11. Position de l'opercule lorsque la vanne est fermée

Figure I.10 : Structure d'une vanne.

## 2) Choix de la vanne

Le choix de la technologie de la vanne va faire intervenir de très nombreux critères [2] :

- La nature du fluide traité ;
- L'agressivité mécanique et/ou chimique du fluide ;
- La température de fonctionnement ;
- La pression du fluide en amont et en aval ;
- Les dispositifs anti cavitation ;
- Les dispositifs limitant le bruit ;
- Le niveau d'étanchéité souhaité entre siège et clapet ;
- Circulation du fluide en un seul sens ou deux sens ;
- La force ou le moment à développer pour mouvoir le clapet ;
- Le poids, l'encombrement ;
- Raccordement aux conduites ;
- La maintenance (facilité de montage/démontage) ;
- Le prix.

### I.4.4 Identification des instruments de la station

L'installation est équipée d'un ensemble d'instruments qui sont très importants, parmi lesquels on peut citer :

- 1) Débitmètre ;
- 2) Débitmètre électromagnétique ;
- 3) Débitmètre magnétique ;
- 4) Transmetteur de niveau ;
- 5) Indicateur de pression ;
- 6) Indicateur et transmetteur de pression ;
- 7) Transmetteur de pression ;
- 8) Transmetteur de pression différentielle ;
- 9) Transmetteur de température ;
- 10) Transmetteur de ph et redox ;
- 11) Conductimètre ;
- 12) Pressostat;

### I.4.5 Réservoir d'eau filtrée

L'eau ainsi filtrée est stockée dans un réservoir en acier d'une capacité de 2000 m<sup>3</sup>. En fonctionnement normal de la station, le réservoir est rempli à raison de 475 m<sup>3</sup>/h [3].



**Figure I.11** : Réservoir de stockage d'eau.

### I.4.6 Groupes de dosages

Sur chaque groupe de dosage désigné par (**DS1, DS2, DS3 et DS4**) on effectue un contrôle de niveau de produit à doser, et on s'assure du bon fonctionnement des pompes de dosages.

#### a) Groupe de dosage de l'hypochlorite de sodium (DS1)

A l'entrée des filtres à sable, de l'hypochlorite de sodium est dosée et injecte a l'eau brute arrivée du forage, afin de prévenir toute prolifération de bactéries au niveau de l'unité. De même le dosage en continu du chlore permet la régénération du manganèse.

#### b) Groupe de dosage du flocculant (DS2)

Le flocculant améliore le rendement du filtre, facilite le nettoyage de l'eau, améliore l'efficacité de sa désinfection. Cette méthode de traitement est préconisée quand la filtration n'empêche pas la formation de particules flottantes (l'eau trouble). La floculation est un procédé chimique qui permet de rassembler toutes les particules les plus infimes pour qu'elles forment de plus grosses particules et qu'elles soient ensuite filtrées.

**c) Groupe de dosage du Séquestrant (DS3)**

Avant les filtres à cartouche, une quantité préétablie de produit séquestrant est dosée dans l'eau d'alimentation pour permettre la dispersion des carbonates de calcium, des sulfates de calcium...Etc. il retarde ainsi leur précipitation, et de cette manière, les membranes s'entassent moins rapidement et le nombre de CIP (lavage sur place) diminue. Cette opération évite le colmatage des membranes.

**d) Groupe de dosage du Méta bisulfite de sodium (DS4)**

Il est utilisé comme agent de nettoyage pour les membranes d'osmose inverse utilisées dans le traitement de l'eau potable et pour les systèmes de dessalement. Il est également utilisé pour éliminer le chlore de l'eau potable après le traitement.

**I.5 Conclusion**

L'utilisation de l'eau dans l'industrie ne peut s'effectuer qu'après une filtration, en effet l'eau provenant des forages est fortement contaminée par la présence des polluants (sable, micro-organisme...). Dans notre cas l'eau brute arrivée d'OUED-GHIR est fortement concentrée en fer qui contamine les filtres des osmoseurs, détruisant les membranes qui les constituent. CEVITAL a opté pour l'installation que nous avons décrit précédemment qui utilise des filtres à sable pour diminuer la concentration du fer présent dans l'eau ainsi que les membranes osmoseur qui élimine toute les bactéries, chlore, métaux, produits chimique présent dans l'eau, qui sera la problématique posée, nous sommes donc chargés de faire l'étude sur les pompes qui assurent la circulation de l'eau dans les différents organes de la station et les membrane qui protègent les équipements de l'industrie.

## Chapitre II:

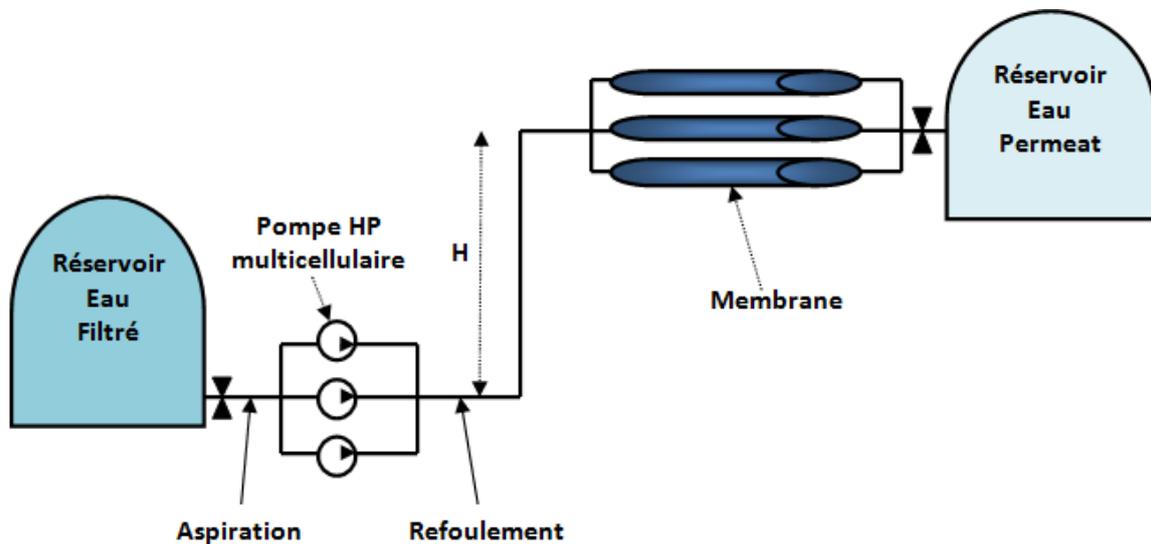
### **Généralités et l'étude des pompes centrifuges**

## Chapitre II. Généralités et l'étude des pompes centrifuges.

### Introduction :

Une bonne filtration de l'eau est garantie par le bon fonctionnement des membranes, et cela est assuré par une haute pression fournie par les pompes centrifuges.

Les pompes centrifuges occupent une place très importante au sein de la station de traitement des eaux de CEVITAL, pour cela on a essayé dans ce chapitre de faire une étude sur les pompes centrifuges multicellulaires utilisées dans le complexe pour refouler de l'eau avec une haute pression pour un bon fonctionnement des membranes, notre travail se base sur l'étude des caractéristiques et de la fiabilité de ces pompes au sein de l'entreprise.



**Figure II.1:** Schéma de principe de transfert de l'eau filtrée vers les membranes à l'aide des pompes centrifuges multicellulaires dans la station CEVITAL.

### II.1 Généralités :

Les pompes sont des appareils permettant un transfert d'énergie entre le fluide et un dispositif mécanique convenable. Suivant les conditions d'utilisation, ces machines

communiquent au fluide soit principalement de l'énergie potentielle par accroissement de la pression en aval, soit principalement de l'énergie cinétique par la mise en mouvement du fluide.

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

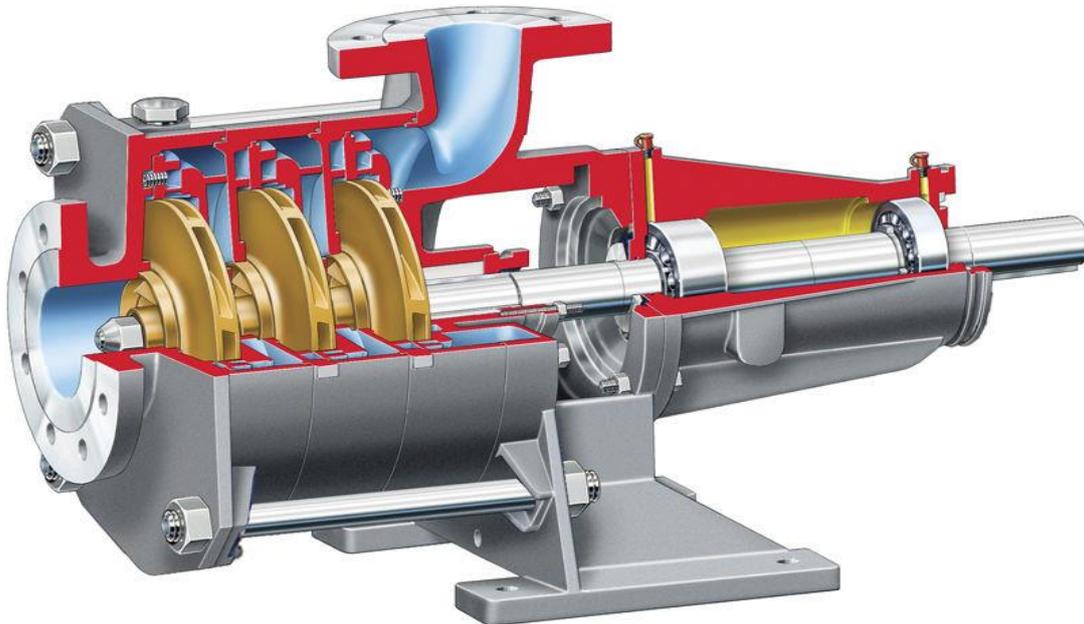
- a) les propriétés du fluide : masse volumique, viscosité, compressibilité.
- b) les caractéristiques de l'installation : longueur, diamètre, rugosité, singularités etc.
- c) les caractéristiques de l'écoulement: vitesse, débit, hauteur d'élévation, pression etc.

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.

Dans le domaine de pompage de l'eau (alimentation en eau potable, traitement et évacuation des eaux usées). Les pompes les plus fréquemment utilisées sont les pompes centrifuges [4].



**Figure II.2.** Pompe centrifuge [5].

Dans notre cas on s'intéresse aux pompes centrifuges .

## II.2 Définition des pompes centrifuges :

Les pompes centrifuges sont les plus utilisées dans des systèmes de tuyauterie. Les concepts de construction de base et les principaux fonctionnements de ces pompes sont nombreux. La figure II.3 représente les différents éléments constituant une pompe centrifuge. Comme toute turbomachine, la pompe centrifuge est constituée de deux parties décrites comme suit :

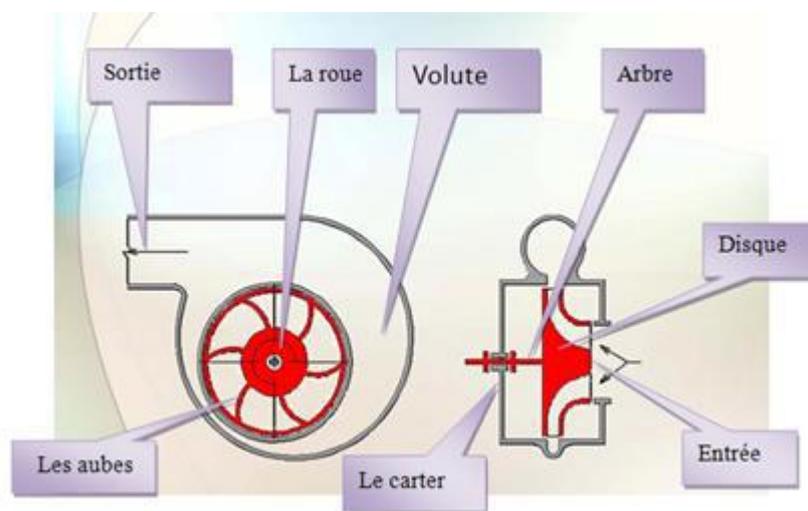
- Une partie mobile.
- Une partie fixe.

Toute machine qui communique de l'énergie mécanique à un liquide peut être regroupée sous l'appellation de pompe. Cette énergie se manifeste essentiellement sous deux formes:

\*Cinétique pour le débit.

\*potentielle pour la pression.

Une pompe n'est finalement qu'un ascenseur de l'énergie. Le liquide qui rentre par la bride d'aspiration ou de gavage avec un certain niveau d'énergie en ressort avec un niveau plus élevé [5].



**Figure II.3** : Représentation schématique d'une pompe centrifuge [5].

## II.3 Composants d'une pompe centrifuge :

D'une façon générale, une pompe comporte :

- Un organe mobile : la roue encore appelé turbine, ou impulseur ou rotor.
- Des organes fixes à savoir :
- Un diffuseur encore appelé stator.

- Des canaux de retour.

### II.3.1. Roue (rotor) :

Les roues de pompes centrifuges sont les pièces maitresses qui déterminent leurs caractéristiques.

La Figure II.4 représente plusieurs types de roue. Le rapport de la section de sortie de l'aube à celle de l'entrée joue un rôle décisif sur les caractéristiques des pompes centrifuges.

Les schémas **A** et **B** de la Figure II.4 représentent des rotors ouverts. Tandis que les schémas **C** et **D** représentent des rotors couverts ou fermés. Les premiers ont un rendement inférieur aux secondes puisqu'ils donnent lieu plus facilement à des pertes par retour d'eau.

Cependant ces rotors sont moins exposés au colmatage par la boue ou par les herbes. En revanche, les rotors fermés sont nettement plus robustes, ils risquent moins l'usure par les matières solides en suspension ou les autres corps étrangers entraînés par l'eau. Les rotors ouverts sont moins couteux, ils sont donc généralement utilisés dans les pompes bon marché et de faible rendement.

De plus les schémas **A** et **C** de la Figure II.4 représentent des rotors de pompes à une roue à un simple effet. Tandis que les schémas **B** et **D** sont relatifs à une pompe à double effet à deux roues dans laquelle l'eau est aspirée symétriquement des deux côtés du rotor.

Le principal avantage de la disposition à double effet réside dans l'atténuation ou à la disparition de la poussée axiale qui s'exerce sur l'arbre de la pompe. Par contre, les pompes à double effet sont plus complexes et plus couteuses. Elles sont par suite rarement employées dans les équipements de petite ou moyenne capacité [6].

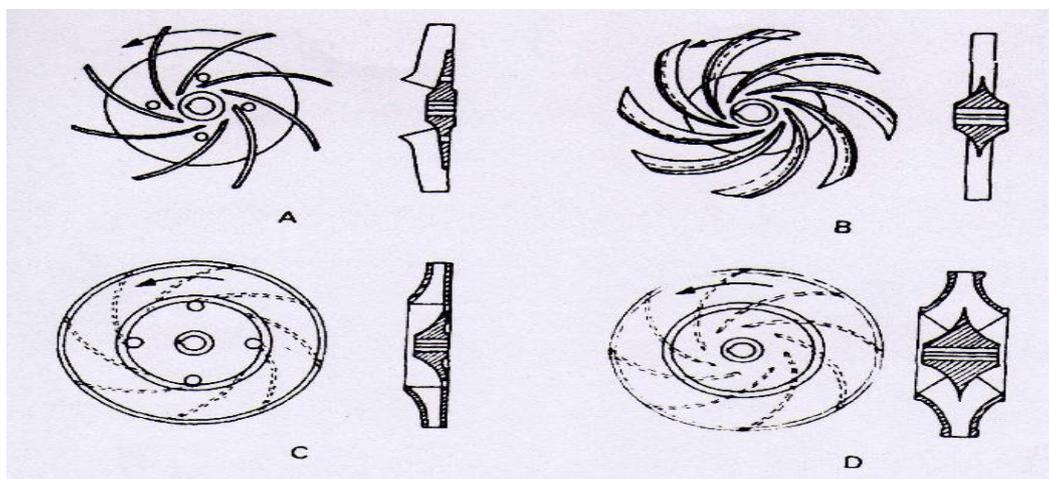


Figure II.4. Types des roues des pompes [6].

La forme des aubes de la roue ou du rotor joue également un rôle important. Certains facteurs tendent à adoucir la courbure de la caractéristique hauteur en fonction de débit  $H(Q)$  pour une vitesse de rotation donnée. Tandis que d'autres facteurs tendent à augmenter la pente de cette courbure.

Bien que les caractéristiques les plus plates correspondent à des aubes de courbure concave, on constate que les aubes à courbure convexe permettent effectivement d'obtenir une hauteur manométrique maximale dans les conditions de fonctionnement nominales.

D'une manière générale, plus la caractéristique hauteur d'eau-débit est plate, plus le rendement est élevé, d'autre part la vitesse de rotation du rotor doit être d'autant plus importante que la hauteur de refoulement est élevée. Ainsi, pour une vitesse de rotation donnée, on a toujours tendance à utiliser les pompes à caractéristiques  $H(Q)$  les moins aplaties pour les hauteurs de refoulement élevées. Ceci est bien entendu au prix d'une légère baisse du rendement de la pompe.

### **II.3.2. Distributeur :**

Le rôle du distributeur, situé en amont de la roue, est d'assurer quelque fois une entrée radiale et permettre une accélération et une meilleure orientation des filets fluide à l'entrée de la roue.

### **II.3.3. Diffuseur (l'aube) :**

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.

### **II.3.4. Volute :**

Une volute est un entonnoir incurvé qui augmente dans la taille et qui permet le ramaçage du liquide à la sortie de la roue et son orientation vers la sortie. À mesure que sa taille augmente, elle contribue à transformer une partie de l'énergie cinétique en énergie de pression.

Lorsque la volute ou colimaçon ne permettrait pas une transformation suffisante de l'énergie cinétique en énergie potentielle. On aura intérêt à prévoir entre la roue et la volute proprement dite un diffuseur à ailettes fixes, dont les espaces entre ailettes constituent des divergents élémentaires [6].

### **II.3.5. Divergent (sortie) :**

Le diffuseur est un cône divergent, il permet de transformer une fraction de l'énergie cinétique du fluide en énergie potentielle et la liaison de la pompe à la conduite de refoulement.

### **II.4 Principe de fonctionnement :**

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 [6].

### **II.5 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.

#### **II.5.1 Forme de la roue:**

Il existe essentiellement trois types de pompes :

- a) Les pompes centrifuges proprement dite, ou à écoulement radial ;
- b) Pompes hélico centrifuges ;
- c) Pompes à écoulement axial.

#### **II.5.2 Nombre de roues:**

On peut diviser les pompes en deux catégories :

- a) 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) [7].

## b) 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 (plusieurs étages) 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).

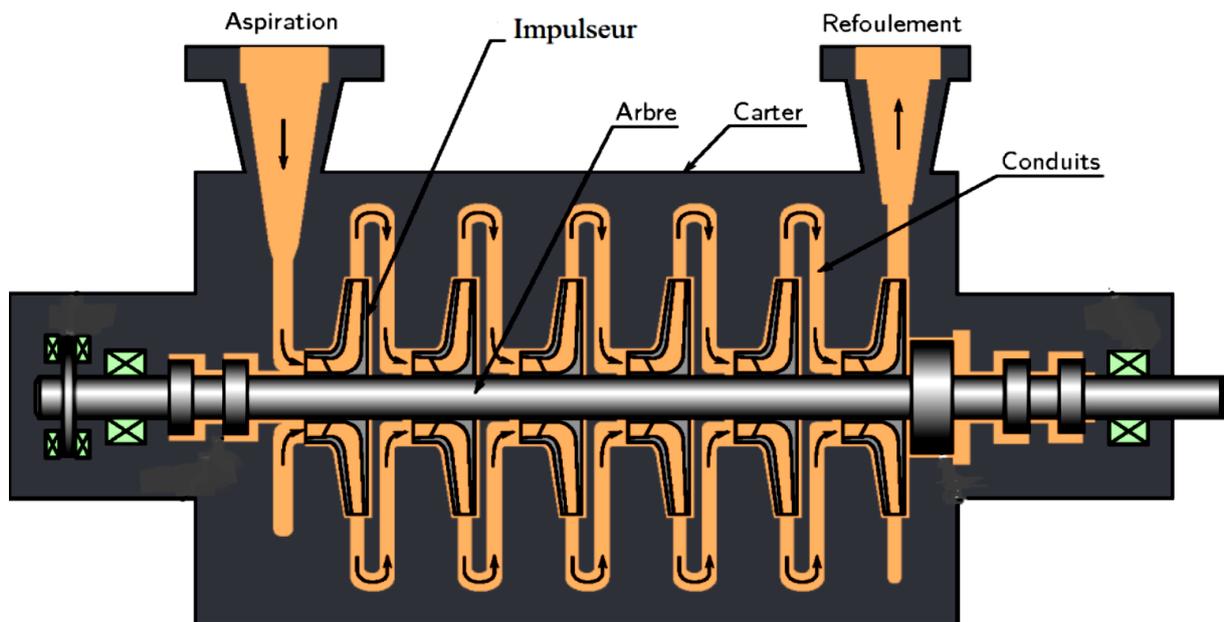


Figure II.5 : Pompes multicellulaires à arbre horizontal.

### II.5.3 La position de l'axe :

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

## a) Pompes à axe horizontal (Figure II.5).

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.

## b) Pompes à axe vertical :

Ces pompes verticales sont submergées ou immergées, elles sont spécialement conçues pour l'équipement des puits profonds [6].

## II.6 Caractéristiques générales des pompes centrifuges

Une pompe centrifuge est une machine tournante destinée à communiquer au liquide pompé une énergie suffisante pour provoquer son déplacement dans un réseau hydraulique comportant en général une hauteur géométrique d'élévation de niveau ( $Z$ ), une augmentation de pression ( $p$ ) et toujours des pertes de charges,

Le calcul des pompes centrifuges s'effectue par l'analyse dimensionnelle et par le théorème d'Euler [6].

**Débit :** Le débit  $Q$  fourni par une pompe centrifuge est le volume refoulé pendant l'unité de temps. Il s'exprime en mètres cubes par seconde ( $m^3/s$ ) ou plus pratiquement en mètres cubes par heure ( $m^3/h$ ).

**Hauteur manométrique :** 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. Si  $H_{TA}$  est la charge totale du fluide à l'orifice d'aspiration et  $H_{TR}$  la charge totale du fluide à l'orifice de refoulement, la hauteur manométrique de la pompe est :

$$HMT = HTR \pm HTA \quad (II. 1)$$

La hauteur varie avec le débit et est représentée par la courbe caractéristique  $H = f(Q)$  de la pompe considérée [9].

**Le rendement :** Le rendement ( $\eta$ ) d'une pompe est le rapport de la puissance utile  $P$  (puissance hydraulique) communiquée au liquide pompé à la puissance absorbée  $P_a$  par la pompe (en bout d'arbre) ou par le groupe (aux bornes du moteur). Si  $Q$  est le débit volume du fluide,  $\rho$  sa masse volumique et  $HMT$  la hauteur manométrique de la pompe, la puissance  $P$  et le rendement ( $\eta$ ) sont respectivement donnés par les équations (II.2) et (II.3) [9] :

$$P = \rho g H Q \quad (II. 2)$$

$$\eta = \frac{\rho g H Q}{P_a} \quad (II. 3)$$

Le rendement de la pompe varie avec le débit et passe par un maximum pour le débit nominal autour duquel la pompe doit être utilisée [4].

## II.7 Représentation graphique :

Hauteur manométrique totale :

La hauteur manométrique totale d'élévation est la somme des termes suivants :

1-La hauteur géométrique d'élévation  $H_g$  entre le plan d'eau de pompage et le plan le plus haut à atteindre. Cette hauteur géométrique se décompose en deux [6]:

- Hauteur géométrique d'aspiration,  $H_a$ , qui, pour une pompe horizontale, est la distance entre le plan de pompage et l'axe de la pompe et, pour une pompe verticale, la distance entre le plan de pompage et le plan médian de la première roue, c'est-à-dire celle située à l'altitude la plus basse.
- Hauteur géométrique de refoulement,  $H_r$ , qui est la distance séparant le point le plus haut à atteindre, soit de l'axe horizontal, pour un groupe horizontal, soit du plan de la première roue pour un groupe vertical.

Ces termes s'ajoutent algébriquement et on a [6] :

Pour une élévation avec aspiration :

$$H_g = H_r \pm H_a \quad (\text{II. 5a})$$

Pour une élévation avec aspiration sous pression :

$$H_g = H_r - H_a \quad (\text{II. 5b})$$

2-Les Pertes de charge totales  $H_f$ , tant à l'aspiration qu'au refoulement. Leur calcul ne présente aucune difficulté et les formules suivantes représentent les différents cas qu'on peut rencontrer:

1er cas :

$$HMT = H_h + H_{f_{asp}} + H_{f_{ref}} + Pr \quad (\text{II. 6a})$$

2 ème cas:

$$HMT = H_h + H_{f_{asp}} + H_{f_{ref}} \quad (\text{II. 6b})$$

3 ème cas :

$$HMT = H_h + H_{f_{asp}} + H_{f_{ref}} + (P_2 - P_1) \quad (\text{II. 6c})$$

(A condition que  $P_1$  soit  $>$  à la pression atmosphérique)

4 ème cas:

$$HMT = H_h + H_{f_{asp}} + H_{f_{ref}} + Pr + (P_{atm} - P_1) \quad (\text{II. 6d})$$

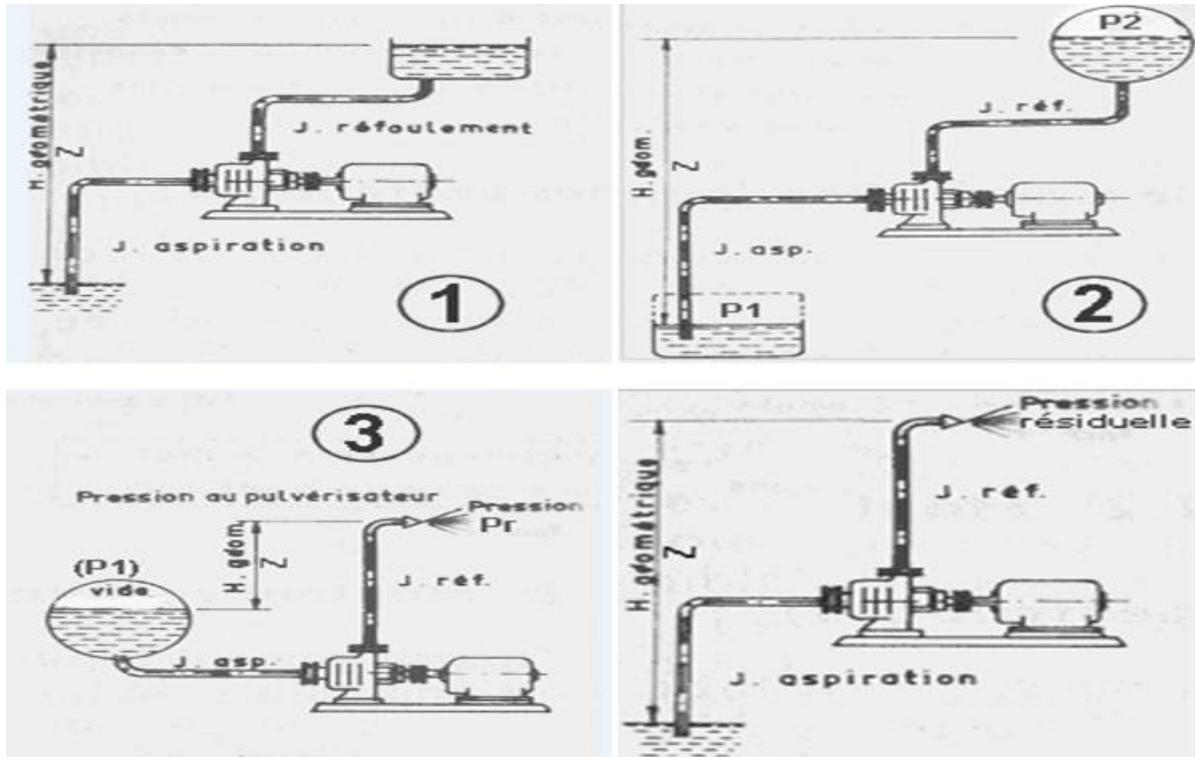
(A condition que  $P_1$  soit  $<$  à la pression atmosphérique).

$H_h$  : Charge hydraulique en Pa avec  $H_h$  (en Pa) =  $9,81.H_g . \rho$ .

$\rho$  : Masse volumique du liquide en  $\text{kg/m}^3$ .

$9.81 \text{ m/s}^2$  : Accélération à la pesanteur.

$H_g$  = Hauteur géométrique (d'aspiration ou de refoulement ou les deux) en mètre d'eau, mCE.



**Figure II.6:** Dégénérents branchements possibles d'une pompe [9]

**Remarque :** La densité est un facteur important à considérer lors du dimensionnement d'une pompe. La densité d'un liquide peut affecter la pression de sortie d'une pompe. Sur une hauteur verticale identique, un liquide plus lourd que l'eau exige une plus grande force pour véhiculer le fluide [6].

$H_{f_{asp}}$  : Pertes de charge de la conduite d'aspiration en Pa .

$H_{f_{ref}}$  : 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).

### Courbes caractéristiques :

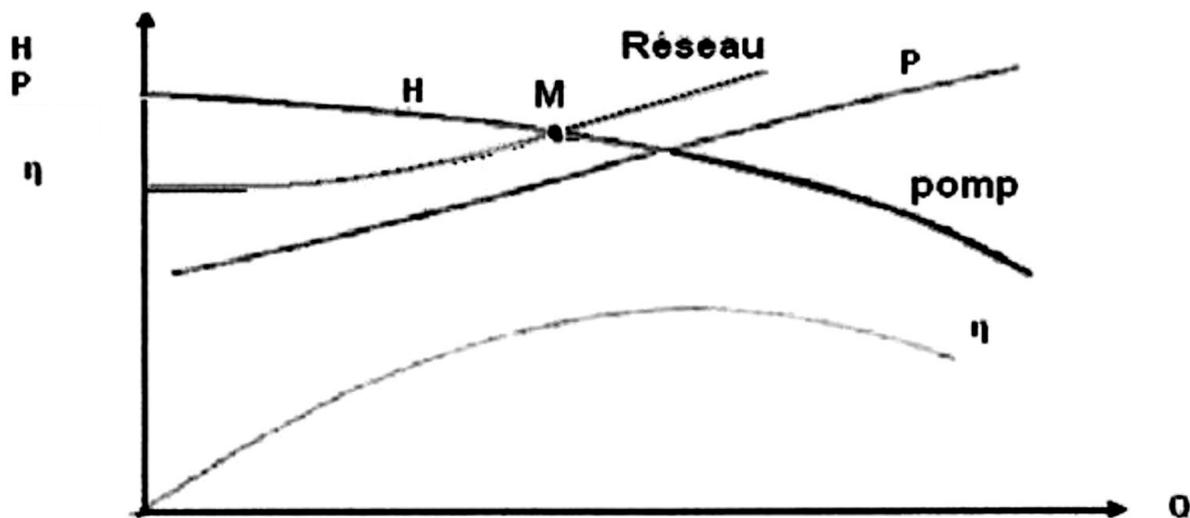
Les courbes principales qui caractérisent une pompe sont au nombre de trois [6] :

- La courbe hauteur - débit
- La courbe de puissance absorbée
- La courbe de rendement

Afin de caractériser une pompe, la hauteur manométrique, la puissance et le rendement sont tracés en fonction du débit.

Le point de fonctionnement (M) se situe à l'intersection de la caractéristique de la pompe et de celle du réseau (Figure II.7) [6] :

$$H_{\text{pompe}} = \Delta H_{\text{réseau}}(Q)$$



**Figure II.7:** Caractéristiques d'une pompe [6].

Idéalement, la caractéristique du circuit coupe la courbe de la pompe pour un débit qui correspond à son rendement maximal. Une dispersion de 25% autour de ce point est cependant acceptable [4]

Les pertes de charge représentent les pertes de pression dues aux différents obstacles s'opposant au déplacement du fluide pompé. On distingue les pertes de charge linéaires produites par le frottement du fluide sur les parois des conduites et les pertes de charge singulières produites par tout phénomène local tel que changement de section ou de direction dans la conduite, vanne, etc [6].

Les pertes de charge linéaires sont données par la formule de Darcy-Weisbach:

$$\Delta H = \lambda \frac{LV^2}{D2g} \quad (\text{II. 7})$$

Les pertes de charge singulières sont ramenées à une longueur de tuyauterie ayant une perte de charge équivalente. Ces pertes de charges étant de la forme :

$$\Delta H = \frac{KV^2}{2g} \quad (\text{II. 8})$$

Donc, la caractéristique du réseau est une parabole [6].

$$H_{\text{réseau}} = H_{\text{géo}} + \alpha Q^2 \quad (\text{II. 9})$$

### II.8.1. Calcul des paramètres de la pompe :

a) **Débit** : d'après les considérations précédentes, nous avons :

$$Q = Q_{\text{cond}} = Q_p \quad (\text{II. 10})$$

b) **La hauteur manométrique de la pompe :**

La hauteur créée par la pompe est obtenue par application de l'équation de Bernoulli entre l'entrée et la sortie, ce qui se traduit par :

$$H_p = \text{HMT} = \frac{P_M - P_V}{\rho \cdot g} \quad (\text{II. 11})$$

$P_M$  : Pression à la sortie donnée par le manomètre

$P_V$  : pression d'aspiration à l'entrée de la pompe mesurée par le vacuomètre.

### II.8.2. Calcul des paramètres de la conduite d'aspiration :

L'équation de Bernoulli entre la surface libre du réservoir d'aspiration et l'entrée de la pompe donne :

$$H_1 = \frac{P_V}{\rho g} = H_{g1} + \frac{V_1^2}{2 \cdot g} + \sum h' \quad (\text{II. 12})$$

$H_1$  : Hauteur de charge de la conduite d'aspiration

$P_V$  : Pression d'aspiration à l'entrée de la pompe mesurée par le vacuomètre ;

$V_1$  : vitesse d'écoulement à l'entrée de la pompe ;

$\sum h'$  : Somme des pertes de charge à l'aspiration.

Cette équation permet la détermination des paramètres de la Conduite d'aspiration qui sont la hauteur géométrique et la vitesse d'écoulement ( $H_{g1}$  et  $V_1$ ).

**II.8.3. Calcul des paramètres de la conduite de refoulement :**

L'équation de Bernoulli appliquée à la sortie de la pompe et la surface libre du réservoir de refoulement aboutit à :

$$H_2 = \frac{P_M}{\rho g} = H_{g2} + \frac{V_2^2}{2 \cdot g} + \sum h'_2 \quad (\text{II. 13})$$

Avec :  $P_M$ : Pression à la sortie donnée par le manomètre ;

$V_2$ : La vitesse d'écoulement à la sortie de la pompe ;

$\sum h'_2$ : Somme des pertes de charge au refoulement.

En combinant les expressions précédentes,

On obtient :

$$H_p = H_g + \sum h' \quad (\text{II. 14})$$

Avec :

$H_g$  : hauteur géométrique totale ;

$\sum h'$  : Les pertes de charge totale ;

$H_p$  : La hauteur de charge créée par la pompe.

$\sum h'$  Sont fonctions de la vitesse dans la conduite ou du débit

$$\sum h' = \left( \sum_{i=0}^n \xi_i + \lambda \cdot \frac{l}{D} \right) \frac{V^2}{2 \cdot g} = KQ^2 \quad (\text{II. 15})$$

Avec :

$\sum_{i=0}^n \xi_i$ : Somme des coefficients des pertes de charge singulières de différentes singularités;

$l$  : longueur de la conduite ;

$\lambda$  : Coefficient des pertes de charge linéaires dans les conduites.

Dans le cas le plus habituel où l'écoulement dans les conduites est turbulent, la caractéristique résistante du circuit est représentée par : [6]

$$H_{\text{cond}} = H_g + KQ^2 \quad (\text{II. 16})$$

$K$  : coefficient de la parabole caractéristique du circuit. En réalité, il n'est pas constant car en régime laminaire la perte de charge traduite en hauteur est linéaire en fonction de  $Q$ . En

régime turbulent, il faudra estimer la rugosité des tubes du circuit et le nombre de Reynolds correspondant [6].

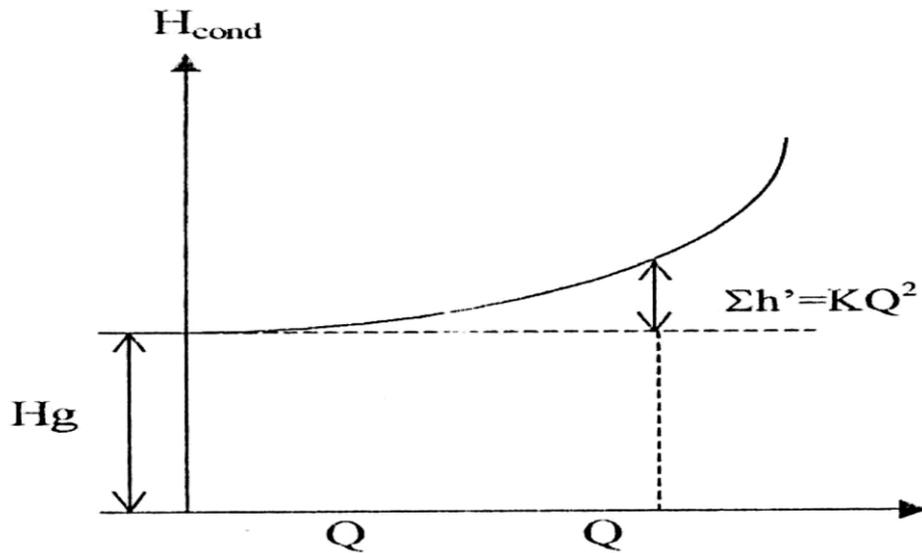


Figure II.8: Courbe caractéristique de la conduite [6].

**II.8.4. Point de fonctionnement :**

Le point de fonctionnement de l'ensemble Circuit-pompe se trouve à l'intersection de la caractéristique de la pompe.

$H_p = f(Q)$  et de la caractéristique du circuit.

$H_c = f(Q)$

C'est à dire au point M de la figure (II.9) [6] :

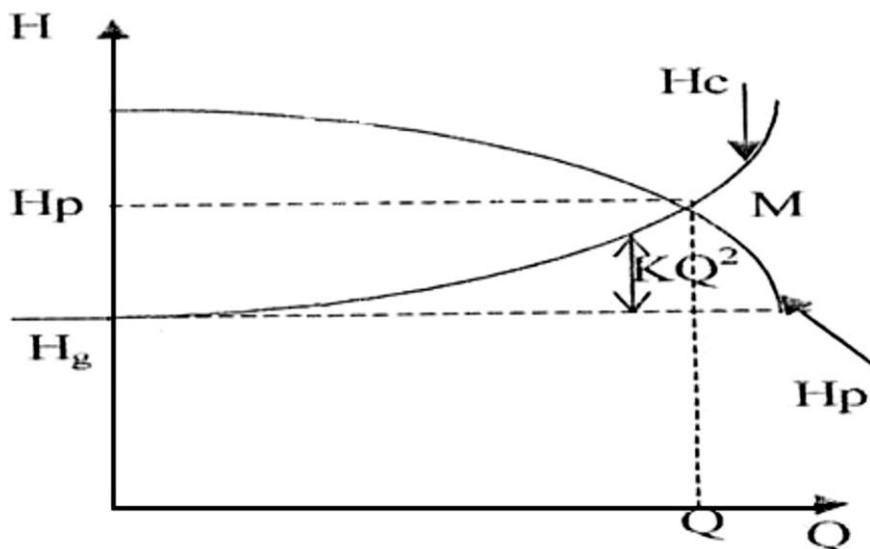


Figure II.9: Point de fonctionnement ensemble circuit-pompe [6]

**Remarque :**

Lorsque 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 [6].

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.

**II.9 Similitude dans les pompes :**

On a recours, dans bien des domaines, aux modèles réduits pour l'étude du comportement des objets réels dans le milieu où ils seront appelés à évoluer.

Pour cela, la maquette d'étude est placée dans le même milieu et, pour que son comportement soit identique à celui, futur, de l'objet réel, il faut que ses dimensions obéissent à certaines règles, établies selon la théorie propre à chaque cas particulier examiné.

Pour obtenir les dimensions finales de l'objet, on multiplie les dimensions de la maquette par un facteur K d'homothétie : L'objet est dit semblable à sa maquette.

Ces principes s'appliquent aux pompes centrifuges, dont les dimensions principales :

- Diamètre de la roue,
- Largeur de la roue,
- Diamètres des orifices d'entrée et de sortie de l'eau, présentent entre elles un rapport K constant, les angles  $\alpha$  et  $\beta$  étant, par ailleurs, conservés [7],

**II.9.1 Lois de similitude applicables aux pompes centrifuges :**

Considérons:

- Une pompe, dont la roue, de diamètre extérieur  $D_2$  et de largeur  $b_2$ , tourne à une vitesse de rotation  $N$  et présente un débit  $Q$  pour une hauteur nette hydraulique  $H$ , et une puissance absorbée  $P$ ;

**II.9.1.1 Vitesse spécifique  $N_s$  :**

Pour illustrer commodément tout un groupe de pompes semblables entre elles, il est fait appel à la notion de vitesse spécifique, qui découle des considérations ci-dessus, et qui peut être définie comme suit :

La vitesse spécifique est le nombre de tours par minute auquel devrait tourner la roue d'une pompe centrifuge qui débiterait 1 m<sup>3</sup>/s à 1 mètre de hauteur [6],

Sa valeur résulte à partir des rapports des hauteurs et des débits, définis précédemment et donnée par :

$$\frac{n_2 \cdot Q^{1/2}}{H^{3/4}} = \frac{n'_2 \cdot Q'^{1/2}}{H'^{3/4}} = \text{cste} \tag{II. 17}$$

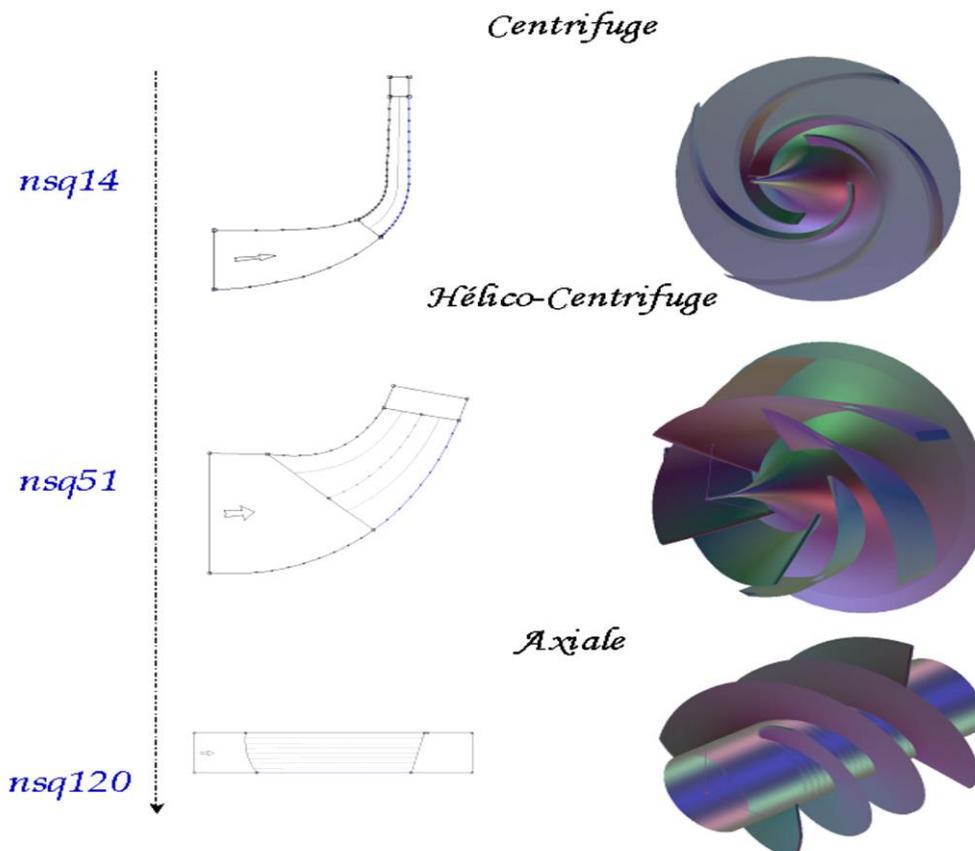
Cette constante est appelée vitesse spécifique et est notée par :

$$N_s = \frac{N \cdot Q^{1/2}}{H^{3/4}} \tag{II. 18}$$

N : est exprimé en tr/mn ; Q en m<sup>3</sup>/s; H en m

**Remarque :**

La vitesse spécifique est utilisée pour caractériser le type de pompe; plus exactement l'aspect de la roue (radial, axial, mixte...).



**Figure II.10 :** Classification des pompes en fonction de la vitesse spécifique [10]

### II.9.1.2 Diamètre spécifique $D_s$ :

C'est le diamètre de la pompe qui fournit une hauteur de 1m et délivre un débit de  $1m^3/s$  [6].

En utilisant les rapports respectifs des hauteurs et des débits, on obtient:

$$\frac{H^{1/4} \cdot D_2}{Q^{1/2}} = \frac{H'^{1/4} \cdot D'_2}{Q'^{1/2}} = \text{cste} \quad (\text{II. 19})$$

Cette constante est appelée diamètre spécifique et est représentée par :

$$D_s = D \cdot \frac{H^{3/4}}{Q^{1/2}} \quad (\text{II. 20})$$

D : diamètre de la roue en m ; H en m ; Q en  $m^3/s$

## II.10 Méthodologie de dimensionnement de la roue

Dans ce paragraphe, nous présentons le problème inverse, à savoir l'ensemble des relations ou des choix arbitraires permettant, à partir d'un cahier des charges donné (hauteur  $H_a$ , débit  $q_v$ , vitesse de rotation  $n$ ), de définir les principaux paramètres géométriques de la roue, à savoir. [11]

Entrée d'aubage : angle  $\beta_{10}$ , rayon à la ligne moyenne  $R_1$ , largeur  $b_1$ ,

Sortie d'aubage : angle  $\beta_{2\infty}$ , rayon de sortie  $R_2$ , largeur  $b_2$ ,

Bride d'aspiration : rayon  $R_0$

### II.10.1 Détermination de l'entrée d'aubage

L'angle d'entrée d'aubage  $\beta_{10}$  est généralement choisi arbitrairement entre  $60^\circ$  et  $75^\circ$ , il représente l'angle formé entre le plan méridien et la tangente à la ligne moyenne de l'aube. En se plaçant sur la ligne moyenne et en supposant que le fluide n'est soumis à aucune pré-rotation, la propriété du triangle des vitesses permet d'écrire:

$$\text{tg}\beta_1 = \frac{U_1}{C_1} \quad (\text{II. 21})$$

Avec :  $U_1 = \omega * R_1$

$C_1$ : la vitesse absolue égale à la vitesse débitante :  $C_{ri}$

L'équation de continuité permet d'écrire au régime d'adaptation :

$$\text{tg}\beta_1 = \text{tg}\beta_{10}$$

$$C_1 = \frac{qva}{S_1} \quad (\text{II. 22})$$

Avec  $S_1$  la section d'entrée d'aubage définie par :

$$S_1 = 2\pi R_1 b_1 \quad (\text{II. 23})$$

On démontre, sur la base de développements théoriques, que la section d'entrée des pompes de bonne capacité d'aspiration, bien dimensionnées vis-à-vis de la cavitation peut se déterminer à partir de la relation :

$$S_1 = S_{1\text{opt}} = \pi R_{\text{opt}}^2 \quad (\text{II. 24})$$

Avec:

$$R_{\text{opt}}^2 = 2.25 \left( \frac{qva}{N} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (\text{II. 25})$$

On obtient les autres paramètres géométriques de l'entrée d'aubage:

$$R_1 = \frac{qvatg\beta_{10}}{\pi\omega R_{\text{opt}}^2} \quad (\text{II. 26})$$

Et d'après (II.23)

$$b_1 = \frac{S_1}{2\pi R_1} \quad (\text{II. 27})$$

### II.10.2 Calcul du rayon extérieur $R_2$

Le choix du rayon extérieur s'effectue à partir d'une valeur de référence communément utilisée pour la construction des machines de compression. Cette valeur standard qui dépend de la vitesse angulaire spécifique  $\omega$  a été introduite par Cordier. [12]

Le diagramme de Cordier est un diagramme statistique issu de résultats expérimentaux sur lequel sont portées les vitesses angulaires spécifiques de diverses pompes en fonction de leur rayon spécifique (encombrement spécifique) :

$$\Lambda = \frac{R_2(gH)^{1/4}}{\sqrt{qv}} \quad (\text{II. 28})$$

Pour chacun des points représentatifs, les courbes d'iso-rendement permettent de définir la zone de dimensionnement idéal concernant le rendement. Pour une vitesse spécifique donnée, on définit ainsi le rayon spécifique le mieux adapté puis l'encombrement « idéal ».

$$\Lambda R_2 = \frac{\Lambda \sqrt{qv}}{(gH)^{1/4}} \quad (\text{II. 29})$$

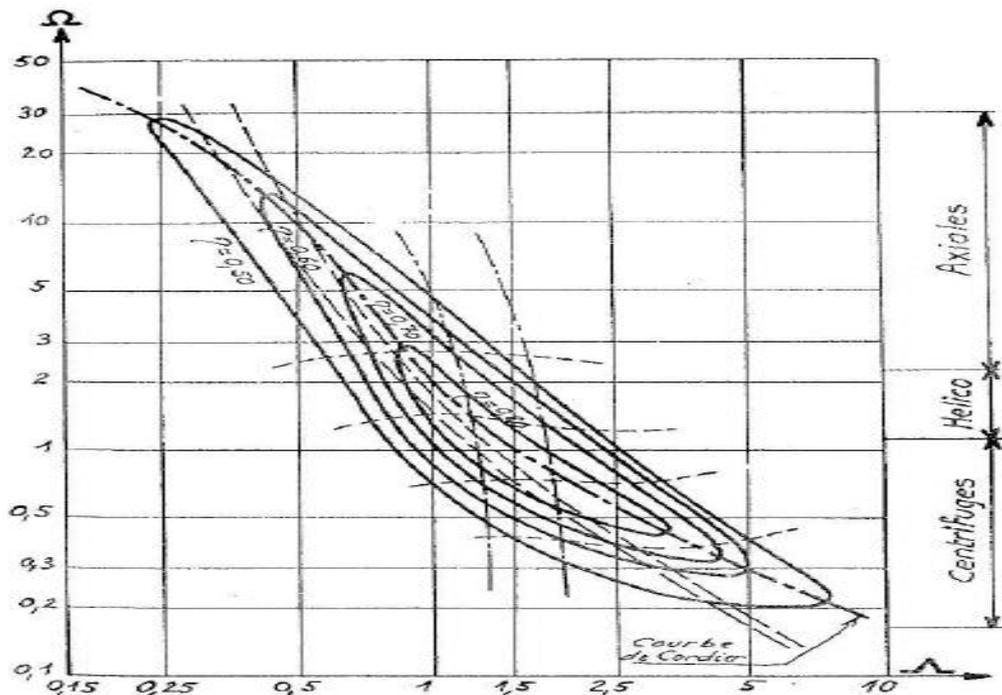


Figure II.11 : Evolution standard selon Cordier [14]

### II.10.3 Choix de l'angle de sortie $\beta_{2\infty}$

Lorsque le fluide pénètre dans la roue sans pré-rotation, la hauteur théorique est donnée par l'équation d'Euler :

$$H_{th} = \frac{U_2 C_{u2}}{g} \text{ et } H_{th\infty} = \frac{U_2 C_{u2\infty}}{g}$$

On constate, d'après cette relation, que la hauteur d'élévation théorique d'une machine de compression (ventilateur, pompe, compresseur) ne dépend que de la vitesse périphérique  $U_2$  et de la composante giratoire de la vitesse absolue  $C_{u2}$ . Le rapport entre  $U_2$  et  $C_{u2}$  peut être choisi dans des limites assez larges, il est intimement lié à l'angle de sortie d'aubage  $\beta_{2\infty}$ .

Les pompes à liquide sont construites exclusivement avec des aubes couchées vers l'arrière, et notamment des angles  $\beta_{2\infty}$  compris entre  $50^\circ$  et  $70^\circ$  (valeur qui sera choisie arbitrairement). [13]

### II.10.4 Détermination de la largeur $b_2$

Le dernier paramètre géométrique définissant la roue, à savoir la largeur de sortie  $b_2$ , s'effectue sur la base d'une méthodologie que nous pouvons résumer ainsi : On estime d'abord le rendement hydraulique  $\eta_H$  de la roue à partir de la formule empirique de Lomakine au point de rendement maximal :

$$\eta_H = 1 - \frac{0.42}{[\log_{10} d_{red} - 0.172]^2} \quad (II.30)$$

Avec

$$d_{red} = 4250 \sqrt[3]{\frac{qV}{N}} \quad (II.31)$$

Ou en déduit la hauteur théorique et la hauteur théorique infinie (H est donné par le cahier des charges) :

$$H_{tH} = \frac{H}{\eta_H} \quad \text{et} \quad H_{tH\infty} = \frac{H_{tH}}{\mu}$$

Ou  $\mu$  est le facteur de glissement.

La composante giratoire est déduite de  $H_{tH\infty}$  par la relation d'Euler :

$$Cu_{2\infty} = \frac{gH_{tH\infty}}{U_2} \quad (II.32)$$

Les triangles des vitesses en sortie de roue permettent de calculer la vitesse débitante  $Cr_2$  puis la largeur  $b_2$  :

$$Cr_2 = \frac{U_2 - Cu_{2\infty}}{\text{tg}\beta_{2\infty}} \quad (II.33)$$

$$b_2 = \frac{A}{2\pi R_2 Cr_2} \quad (II.34)$$

### II.11 Conclusion :

Les expressions précédentes établissent, pour une famille de pompe donnée, caractérisée par des coefficients  $N_s$  et  $D_s$ , une relation directe entre, d'une part, la hauteur  $H$  et le débit  $Q$  demandés et, d'autre part, les grandeurs de dimensionnement que sont le diamètre  $D$  et la vitesse de rotation  $N$ .

## Chapitre III:

### **Fonctionnements des membranes**

---

# Chapitre III. Fonctionnements des membranes.

---

## III.1 Introduction

Les membranes occupent une grande importance dans l'industrie, nous avons choisi Cevital comme terrain d'étude pour la réalisation de ce travail.

Dans ce chapitre nous présentons les différents aspects des membranes, à savoir leurs classifications, leurs principes de mise en œuvre, les différentes configurations des modules membranaires et les procédés Baro membranaires d'une manière générale. Ensuite, nous détaillons les modèles théoriques de transfert de matière et les facteurs limitants (polarisation de concentration, colmatage).

### III.1.1 Eau est traitée en différentes étapes:

- Le pompage: l'eau est pompée dans le fleuve ou dans la nappe souterraine.
- Le dégrillage et le tamisage: cette étape permet d'enlever les plus gros déchets (particules supérieures à 1mm.)
- La coagulation et la floculation: des réactifs [sulfates d'aluminium  $Al_2(SO_4)_3$ , chlorures ferriques  $FeCl_3$ ...] sont versés dans l'eau afin que les fines particules en suspension s'agglomèrent en gros flocons appelés " flocs " qui produiront des boues.
- La décantation : à ce stade, les particules de boues se déposent au fond des bassins de décantation.
- La désinfection (ozonation) : l'eau est désinfectée par ajout de (eau de Javel) à l'ozone, à la fois bactéricide et antiseptique.
- La chloration : afin de préserver la qualité sanitaire de l'eau durant son passage dans les canalisations, on ajoute environ 0,5g de chlore pour  $1m^3$  d'eau.
- La filtration sur membrane : une autre filière de traitement d'eau plus simple existe ; elle permet d'éviter les étapes de floculation, décantation, ozonation [15].

### III.2 Généralités sur les membranes :

Les procédés à membranes, industrialisés à partir des années soixante, se développent encore à un rythme rapide. Il existe maintenant une grande variété de membranes adaptées à divers procédés de séparation. Cette diversité est à l'origine des applications dans des domaines très différents.

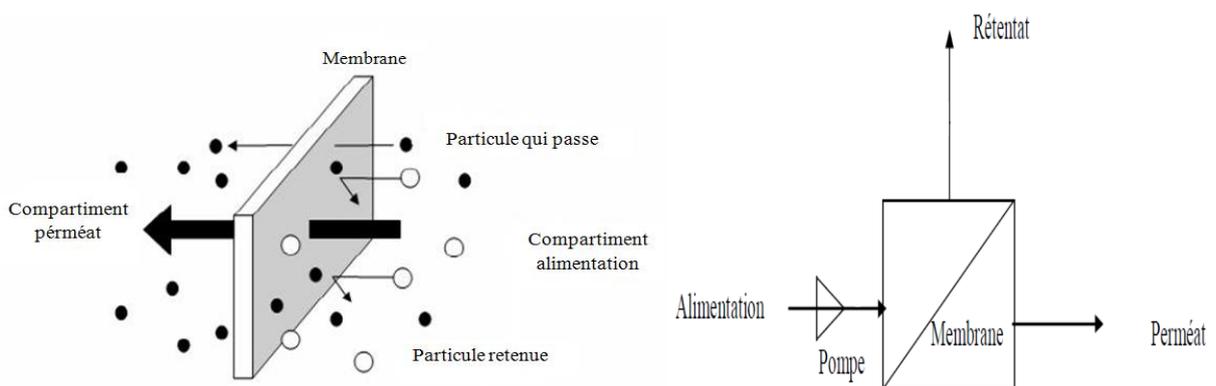
### III.2.1 Définition de la membrane :

La membrane est définie comme une barrière séparant deux compartiments et permettant le passage préférentiel d'au moins une espèce parmi les autres sous l'action d'une force de transfert chimique (concentration ...) ou physique (pression). En général, les constituants qui sont plus petits que les pores de la membrane sont capables de passer à travers sous l'effet d'une pression appliquée tandis que les substances et les molécules de taille plus importante sont retenues. La technologie de la filtration sur membrane peut être appliquée pour la séparation fluide / fluide ou particules / fluide en vue de récupérer les espèces valorisables (eau, lactose, sels minéraux...).

Les membranes ont des structures poreuses ou denses permettant de laisser passer de manière sélective les composants d'une solution sous l'action d'une différence de pression entre l'amont et l'aval de la membrane. Deux fractions sont obtenues : le rétentat, en amont de la membrane, qui contient les éléments retenus par la membrane, et le perméat, en aval, qui contient les éléments qui ont traversé la membrane. Les performances d'une membrane sont définies par sa sélectivité et sa perméabilité [15].

Le procédé de séparation membranaire est illustré schématiquement (Figure III-1). Le résultat d'une opération membranaire est la séparation du fluide à traiter en deux parties de concentrations différentes :

- Le Rétentat qui contient les molécules ou particules retenues par la membrane,
- Le Perméat qui contient les molécules qui traversent la membrane.



**Figure III.1:** Procédé de séparation membranaire [15]

### III.2.2 Classification des membranes : Matériaux membranaires.

Les membranes sont des matériaux poreux ou denses composés de matières minérales ou organiques ou hybrides, homogènes ou plus généralement composites. Il existe différents types de membranes :

#### III.2.2.1 Les membranes minérales (ou inorganique).

Elles sont composées d'un support macroporeux à base d'alumine ou de carbone sur lequel sont déposées un nombre variable de couches d'oxydes minéraux (aluminium,  $ZrO_2$ ,  $TiO_2$ ...). Le rôle de ces couches filtrantes de faible épaisseur est d'assurer la séparation des solutés grâce à un rayon de pore adapté, alors que le support assure la résistance mécanique. Ces membranes peuvent travailler dans des conditions plus sévères que les membranes organiques grâce à leur résistance mécanique, chimique et thermique (jusqu'à  $P=40$  bar,  $T=120^\circ C$  et pH allant de 1 à 14. D'une manière générale les membranes minérales sont essentiellement sous forme tubulaire [15].



**Figure III.2:** Schéma d'une membrane organique [15]

#### III.2.2.2 Les membranes organiques.

Elles sont fabriquées à base d'acétate de cellulose ou à partir de polymères de synthèse. Les membranes organiques sont les plus utilisées malgré leurs résistances thermiques et chimiques relativement limitées car elles sont nettement moins chères que les membranes minérales [15].

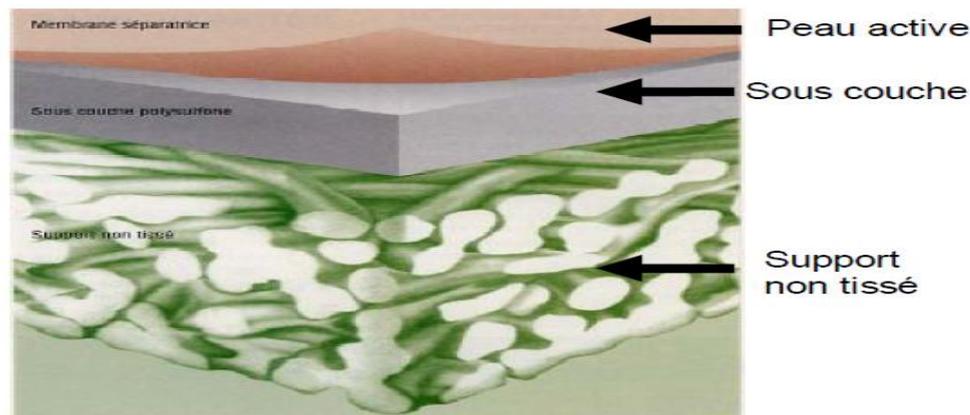


Figure III.3: Schéma d'une membrane organique [15]

### III.2.3 Caractéristiques des membranes.

#### III.2.3.1 Sélectivité d'une membrane.

La sélectivité d'une membrane pour une substance donnée dépend de sa nature et de sa structure, de l'environnement chimique à proximité de la membrane et des propriétés chimiques de la substance à séparer. La sélectivité s'exprime par un taux de rétention  $T_R$  défini par [16] :

$$T_R = 1 - \frac{C_{SP}}{C_{SA}} \quad (\text{III. 1})$$

Il y a deux valeurs extrêmes du  $T_R$  (valeurs exprimées en pourcentages) :

$T_R=0\%$  signifie que le soluté n'est pas du tout retenu par la membrane;

$T_R=100\%$  signifie que le soluté est entièrement retenu par la membrane.

$C_{SP}$  et  $C_{SA}$  sont successivement les concentrations d'un soluté dans le perméat et dans l'alimentation.

#### III.2.3.2 Perméabilité d'une membrane ( $A$ ).

La perméabilité ( $A$ ) d'une membrane est une caractéristique intrinsèque de la membrane qui dépend de sa structure.

De façon pratique, la perméabilité peut être définie comme étant le rapport entre le flux de perméat ( $J_P$ ) et la différence de pression transmembranaire effective ( $P_m$ ) [16] :

$$A = \frac{J_P}{\Delta P_m} \quad (\text{III. 2})$$

La densité de flux de perméat (appelée aussi vitesse de perméation) est un débit de perméation unitaire, c'est-à-dire, le rapport entre le débit volumétrique de perméation ( $Q_P$ ) et la surface effective de la membrane ( $S$ ) :

$$J_P = \frac{Q_P}{S} \quad (\text{III. 3})$$

En remplaçant le flux de perméation  $J_P$  défini par l'équation 3, dans l'équation 2, on obtient :

$$A = \frac{Q_P}{S\Delta P_m} \quad (\text{III. 4})$$

En pratique, la perméabilité d'une membrane est déterminée comme la pente de la droite  $J_P$  en fonction de  $P_m$ .

Il faut mentionner qu'il existe des différences significatives de perméabilité entre divers coupons d'une même feuille de membrane à cause des irrégularités de fabrication.

### III.2.3.3 Résistance d'une membrane ( $R_m$ ).

La résistance hydraulique ( $R_m$ ) d'une membrane peut être définie comme étant sa résistance à l'écoulement du fluide à filtrer à travers cette membrane. La résistance d'une membrane est l'inverse de sa perméabilité [16] :

$$R_m = \frac{1}{A} = \frac{S\Delta P}{Q_P} \quad (\text{III. 5})$$

Cette relation nous permet de calculer de façon pratique la résistance d'une membrane à partir de mesures de flux de perméation et de la pression transmembranaire.

### III.2.4 Domaines de filtration des procédés membranaires à gradient de pression.

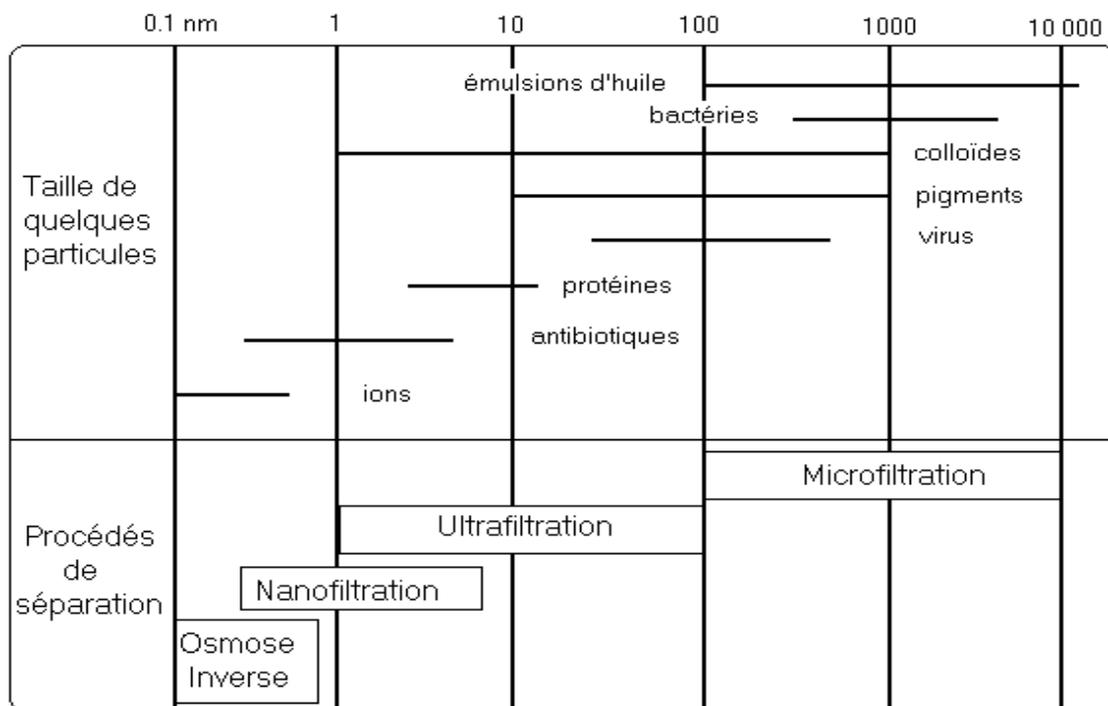
Actuellement, il y a quatre principaux procédés membranaires utilisés pour la production de l'eau : on peut citer la microfiltration, l'ultrafiltration, la nanofiltration et l'osmose inverse dans lesquels la force motrice de transport à travers la membrane est un gradient de pression.

La pression nécessaire aux différents domaines de filtration varie inversement à la taille des pores. En microfiltration, la pression est généralement de 0,1 à 2 bar, en UF de 2 à 5 bars, alors qu'en osmose inverse la pression varie entre 20 et 100 bar [19].

Le tableau donne les caractéristiques des différents procédés membranaires à gradient de pression.

**Tableau III-1:** Caractéristiques de procédés de séparation [19].

<b>Procédé</b>	<b>Origine de la sélectivité</b>	<b>Force motrice (bar)</b>	<b>Diamètre des pores (<math>\mu m</math>)</b>	<b>Seuil de coupure (kDa)</b>	<b>Consommation énergétique (<math>kWh/m^3</math>)</b>	<b>Procédés Concurrents</b>
<b>Microfiltration MF</b>	Différence de taille entre particules ou molécules à séparer	pression 0,1 à 3	0,1 à 10	-	1-10	Filtration Centrifugation Décantation
<b>Ultrafiltration UF</b>	Différence de taille entre particules ou molécules à séparer	pression 2 à 10	0,02 à 0,1	1 – 300	1-10	Evaporation Distillation Echange d'ions
<b>Nanofiltration NF</b>	Différence de taille entre particules ou molécules à séparer	pression 5 à 25	$\sim 10^{-3}$	0,2 - 1	5-50	Evaporation OI Echange d'ions Chromatographie
<b>Osмосe inverse OI</b>	Différence de solubilité et de diffusion à travers la membrane des molécules à séparer	pression 20 à 100	membrane dense	< 0,2	10-200	Evaporation Distillation Echange d'ions



**Figure III.4:** Domaines d'applications des différentes techniques à membranes [19]

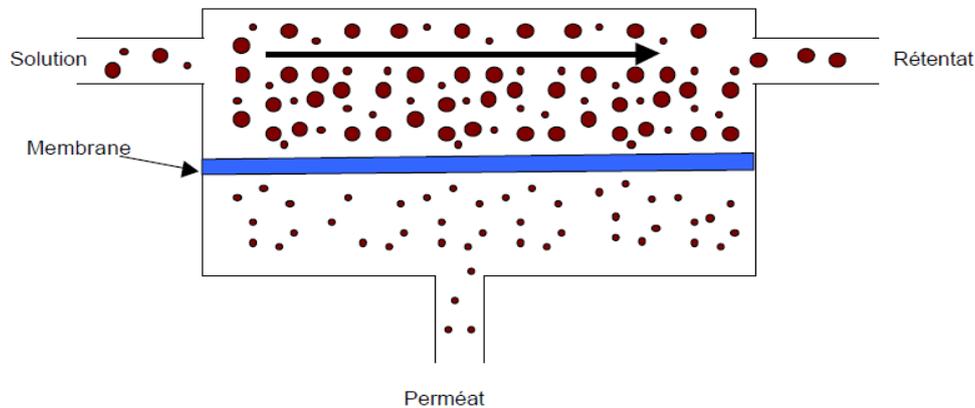
### III.2.4.1 Microfiltration (MF).

Elle peut être définie comme un procédé de séparation solide / liquide à basse pression. Les pressions appliquées sont de quelques dixièmes de bar pour éviter un colmatage important. Le mécanisme est basé exclusivement sur l'effet tamis (taille) et rend possible la rétention de particules en suspension ou de bactéries dont la taille se situe entre 0.1 et 10  $\mu\text{m}$ . Les membranes de microfiltration (diamètre de pore de 0,1 à quelques micromètres) permettent de retenir entre autres : les émulsions d'huile, les bactéries, les levures, les plus gros colloïdes, les gros pigments et les gros virus... La microfiltration est le procédé de séparation membranaire le plus utilisé actuellement à l'échelle industrielle [18].

### III.2.4.2 Ultrafiltration (UF).

L'ultrafiltration permet la séparation de macromolécules et d'espèces colloïdales. Le solvant ainsi que les solutés de faible masse molaire traversent la membrane selon un mécanisme convectif sous l'effet de la pression, tandis que les espèces de taille supérieures (colloïdes, protéines, polymères) sont retenues. Les pressions sont généralement entre 2 et 5 bars elles sont supérieures à celles rencontrées en microfiltration. Les membranes

d'ultrafiltration (diamètre de pore de 2 à 100 nanomètres) peuvent retenir des colloïdes plus petits, les pigments et les virus non retenus en MF [18].



**Figure III.5:** Principe de l'ultrafiltration [18]

#### III.2.4.3 Nanofiltration (NF).

La nanofiltration est le procédé de séparation membranaire le plus récent apparu au début des années 90, qui se situe à la transition entre l'osmose inverse et l'ultrafiltration tant au niveau de la pression transmembranaire (5 à 25 bar). Comparée à l'osmose inverse, les membranes de nanofiltration possèdent une structure moins dense qui permet d'obtenir des flux de perméation supérieurs pour des pressions inférieures. Ce procédé sera moins coûteux car il impliquera une consommation d'énergie moindre.

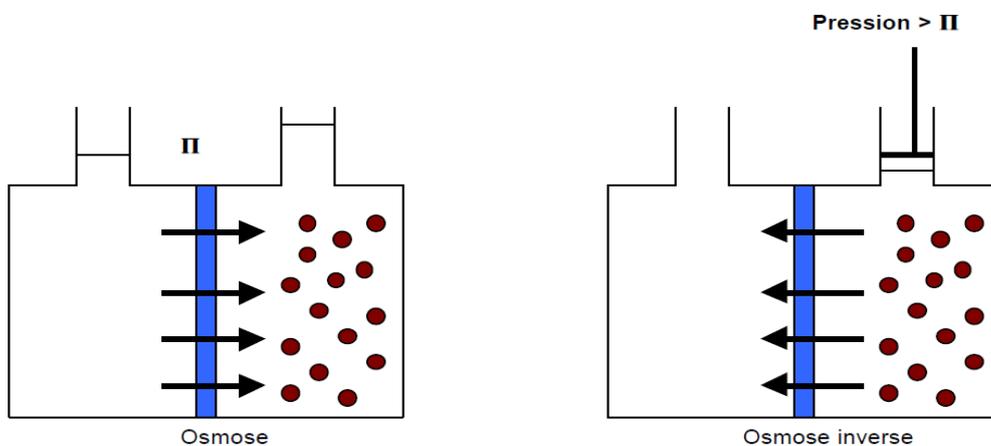
Initialement, les membranes de nanofiltration (NF) ont été développées pour l'adoucissement de l'eau. En raison de ses qualités de séparation, elle a été étendue à plusieurs autres domaines [18].

#### III.2.4.4 Osmose inverse (OI).

L'osmose inverse (OI) est un procédé déjà ancien qui met en œuvre des membranes denses qui ne laissent passer que le solvant. La séparation solvant-soluté se fait par un mécanisme de solubilisation-diffusion: le solvant s'adsorbe dans la phase membranaire puis diffuse à travers le matériau. La pression appliquée doit être supérieure à la pression osmotique exercée en amont de la membrane par la solution filtrée pour observer un flux de perméat à travers la membrane. Les pressions appliquées varient de 20 à 80 bar [18].

Les membranes d'osmose inverse (membranes denses) peuvent retenir les ions monovalents par un mécanisme différent qui fait appel à la solubilisation et la diffusion. Celui-ci considère que le taux de transmission d'un soluté à travers une membrane d'osmose inverse résulte d'un processus dans lequel le soluté se solubilise dans la phase membranaire puis diffuse à travers celle-ci pour rejoindre le compartiment perméat. Les principales applications industrielles de l'osmose inverse sont les suivantes :

- Dessalement d'eau de mer et d'eaux saumâtres,
- Elimination de pesticides et d'herbicides,
- Production d'eau ultra pure (industrie électronique, pharmaceutique...),
- Concentration d'antibiotiques [16],



**Figure III.6:** Principe de l'osmose inverse [17]



**Figure III.7 :** Face externe d'un module d'osmose inverse utilisée au niveau de Cevital.

### III.2.5 Mise en œuvre des membranes.

L'Osmose Inverse et les autres procédés de séparation par membrane, mettant en jeu un gradient de pression, peuvent être conduits selon deux modes d'écoulement en fonction des contraintes, et notamment de la qualité de l'effluent à traiter, et/ou des objectifs à atteindre: la filtration tangentielle ou la filtration frontale [18].

#### III.2.5.1 Écoulement frontal.

Ce mode de filtration consiste à amener la solution à filtrer perpendiculairement à la membrane (Figure III.8). Les molécules retenues se concentrent au niveau de la surface membranaire ce qui provoque une diminution du flux [16]. La filtration frontale est néanmoins utilisée dans des procédés de type filtre-pressé (principalement utilisés dans l'industrie pour éliminer les métaux lourds par précipitations des cations métalliques sous forme de boues d'hydroxydes) ainsi que dans les bioréacteurs à membranes immergées [18].

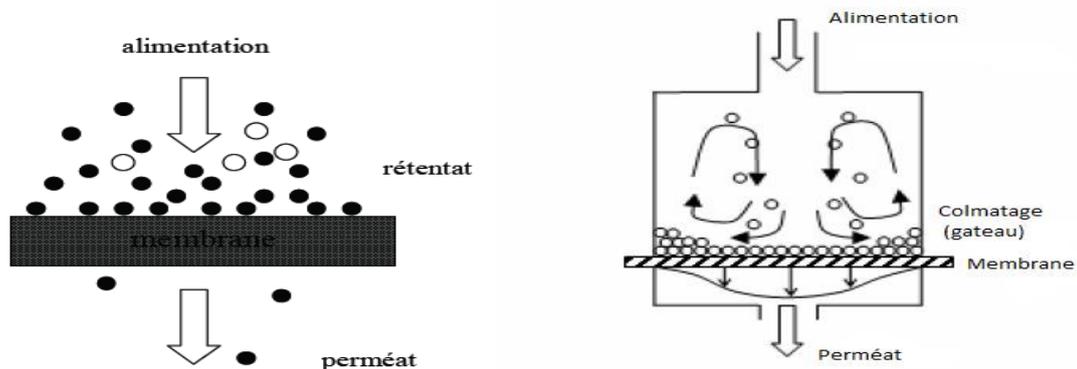


Figure III.8: Schéma de la filtration frontale [18]

#### III.2.5.2 Écoulement tangentiel.

Dans ce cas, la solution à filtrer circule parallèlement à la membrane (Figure III.9). Le fonctionnement du système de filtration s'effectue en continu : l'accumulation à la paroi des espèces retenues à la surface de la membrane est moins importante qu'en filtration frontale. La plupart des procédés de filtration mis en œuvre actuellement dans l'industrie utilise le mode tangentiel et l'essentiel de notre étude expérimentale concernera ce mode de filtration [18].

Bien que plus coûteuse en énergie, la filtration tangentielle présente l'avantage de limiter la formation de dépôt sur la membrane grâce au cisaillement créé par l'écoulement tangential du fluide sur la surface de la membrane [18].

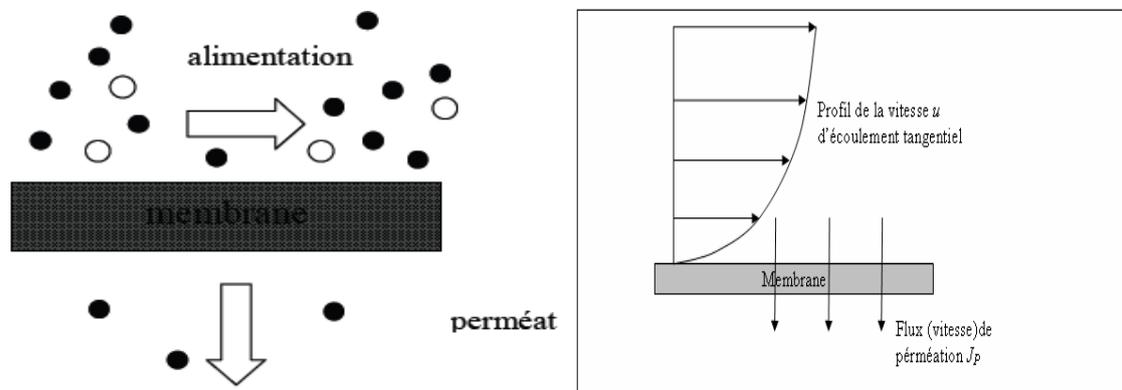


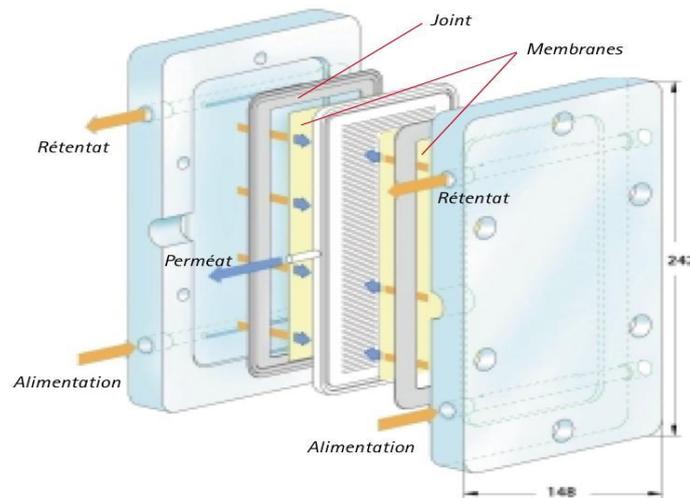
Figure III.9: Schéma de la filtration tangentielle [17]

### III.2.6 Configuration des modules et mise en forme des membranes.

Afin d'être utilisées à l'échelle industrielle ou au laboratoire, les membranes doivent être montées dans des supports appelés modules. Différentes géométries de modules ont été commercialisées: modules plans, tubulaires, fibres creuses, spiralés, (Figures III.10, III.11, III.12, III.13 respectivement). Leur utilisation est fonction de leur application, de leur facilité de montage et de nettoyage, de la maintenance [15].

#### III.2.6.1 Module plan.

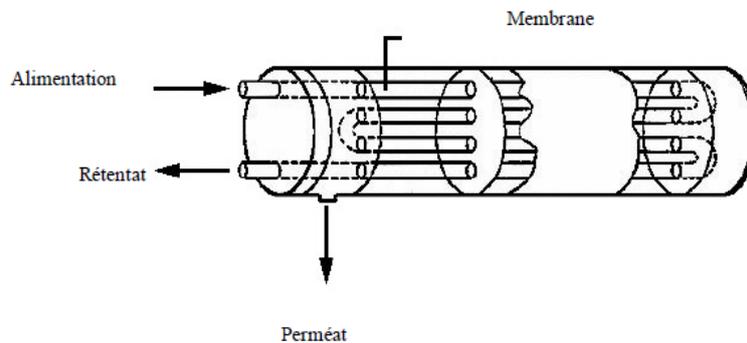
Cette configuration dérivée des filtre-presse est constituée d'un empilement de membranes sous forme de feuilles. Les membranes sont disposées parallèlement les unes aux autres et sont séparées par des grilles ou support. Le module plan est un assemblage de type filtre-presse. Dans le cas du module plan la membrane est disposée à plat sur un support permettant l'écoulement et la collecte du perméat. L'écoulement de l'alimentation est tangential à la membrane et l'épaisseur de la veine liquide est assurée par l'épaisseur du joint qui rend étanche le montage (Figure III.10). Ce type de module est peu compact, mais facilement démontable pour le changement d'une ou plusieurs membranes [18].



**Figure III.10:** Schéma du module plan.

### III.2.6.2 Modules tubulaires.

Ils sont constitués d'une ou plusieurs membranes inorganiques ou organiques de forme tubulaire, ayant des diamètres internes entre 4 et 25 mm. Plusieurs tubes individuels peuvent être placés dans un module. Le module multicanaux fait d'assemblage de tubes parallèles dans une même matrice représente la forme optimisée actuelle (Figure III.11) [18].

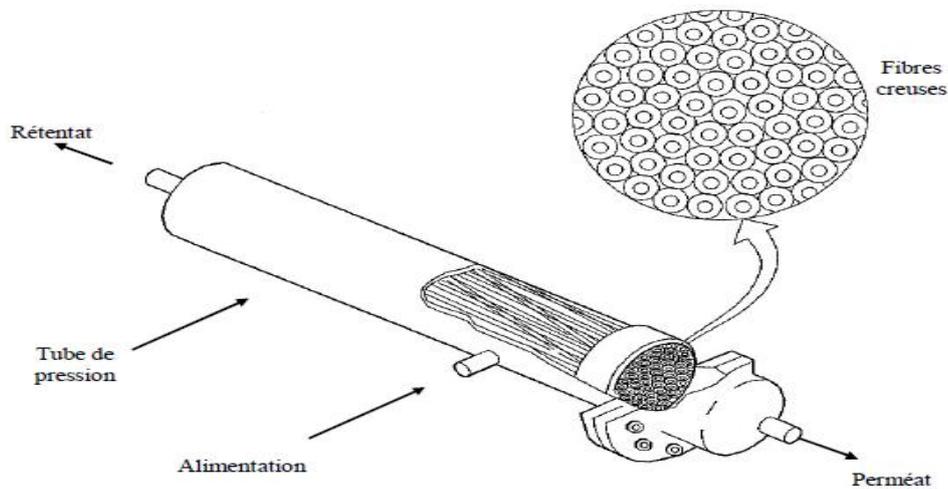


**Figure III.11:** Module tubulaire [18]

### III.2.6.3 Modules fibres creuses.

Ils contiennent plusieurs milliers de fibres dont le diamètre est de l'ordre de 1 mm. Les faisceaux ainsi obtenus sont encollés aux extrémités de façon à assurer l'étanchéité entre le compartiment (perméat) et l'alimentation. L'alimentation peut se faire à l'intérieur (interne-externe) ou à l'extérieur (externe-interne) des fibres creuses, selon que la peau active est à l'intérieur ou à l'extérieur de la fibre creuse. Les membranes sont composées de différentes couches : un support et une sous-couche poreuse qui assurent la résistance mécanique de la

membrane, et à la surface une peau active qui détermine les propriétés de la membrane (flux, sélectivité). La composition de la sous-couche et la composition de la peau active peuvent être différentes (Figure III.12) [18].

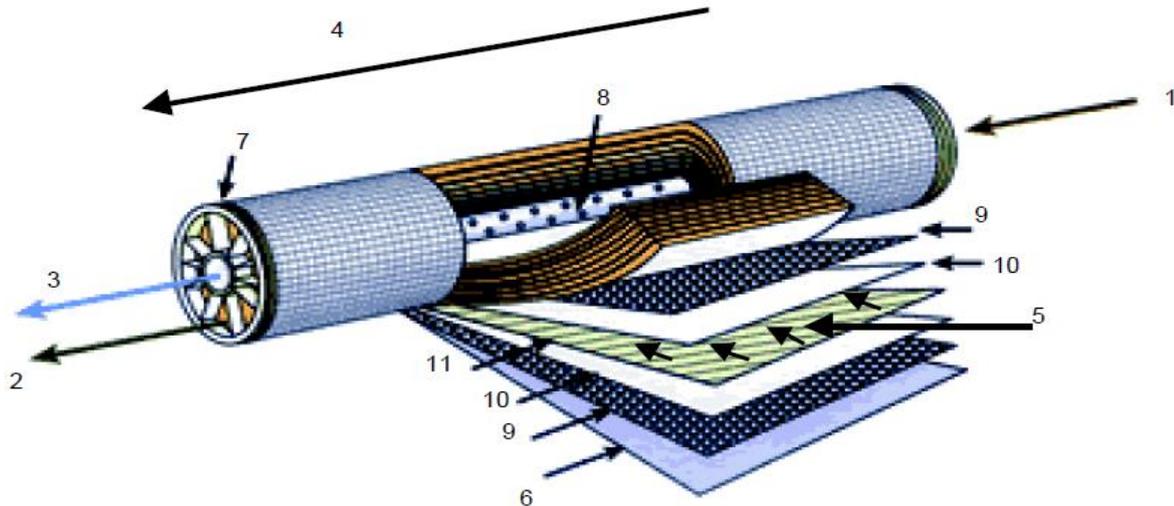


**Figure III.12:** Module fibres creuses [18]

#### III.2.6.4 Module spiral.

C'est un module particulier de membranes planes qui sont enroulées autour d'un axe creux collecteur de perméat. L'ensemble est introduit dans une enveloppe cylindrique dont les sections donnent accès à l'entrée de l'alimentation et à la sortie du rétentat. Le module spiral est composé de membranes planes collées dos à dos renfermant un espaceur perméat assurant l'écoulement du perméat dans le tube collecteur qui constitue l'axe central de la membrane [18].

Du côté rétentat, les membranes sont séparées par des espaceurs qui jouent le rôle de promoteur de turbulence et sont enroulées autour du tube collecteur (Figure III.13). Un grillage extérieur maintient l'ensemble enroulé. Le nombre de membranes collées dos à dos varie suivant les tailles des modules et des fabricants. Un module spiral est beaucoup plus compact qu'un module plan. Ce type de module sera décrit en détail dans le chapitre matériels et méthodes [19].

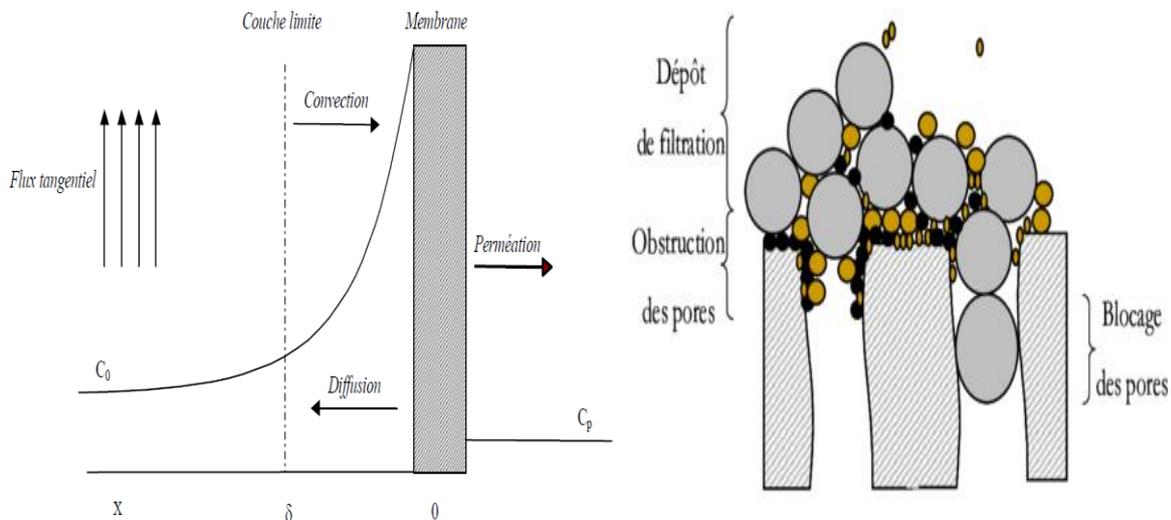


**Figure III.13 :** Structure interne d'une membrane spirale [19]

- 1 Entrée d'eau.
- 2 Sortie de concentrat.
- 3 Sortie de perméat.
- 4 Sens d'écoulement de l'eau brute.
- 5 Sens d'écoulement du perméat.
- 6 Matériau de protection.
- 7 Joint d'étanchéité entre module et enveloppe.
- 8 Perforations collectant le perméat.
- 9 Espaceur.
- 10 Membrane.
- 11 Collecteur de perméat.

### III.3.1 Phénomène de polarisation de concentration.

Lors de la filtration, les espèces retenues (ions, macromolécules, colloïdes, particules) s'accumulent progressivement à la surface de la membrane sous l'effet de la pression. Le gradient de pression mis en jeu entraîne le solvant et le soluté par convection de la solution d'alimentation vers la membrane. Elle représente une barrière physique qui provoque une surconcentration dans le rétentat à la paroi de la membrane. Il s'établit alors un gradient de concentration entre la surface membranaire et le sein de la solution d'alimentation. Cette différence de concentration induit un flux diffusionnel dans le sens opposé au flux convectif (Figure III.14). Ce phénomène appelé polarisation de concentration est réversible et disparaît lors de l'annulation de la pression transmembranaire [17].



**Figure III.14:** Représentation schématique du phénomène de polarisation de concentration.

Cela facilite le colmatage des membranes en déplaçant les équilibres d'adsorption vers des conditions plus propices à un plus grand dépôt à la surface des membranes. La présence de la couche de polarisation de la concentration a aussi comme effet d'augmenter le gradient de pression osmotique de part et d'autre de la membrane. La pression osmotique peut être estimée par la relation suivante [17]:

$$\Delta\pi = RTC \tag{III. 6}$$

Où R et la constante des gaz parfait, T la température et C concentration du soluté.

**III.3.1.1 Taux de conversion (rendement) :**

Le taux de conversion (Y) et le pourcentage de la solution d'alimentation qui est converti en eau pure, il est exprimé comme suit :

$$Y = \frac{Q_P}{Q_A} \tag{III. 7}$$

Où  $Q_A$  est le débit volumique d'alimentation et  $Q_P$  le débit volumique de perméat [17].

**III.3.2 Phénomène de colmatage.**

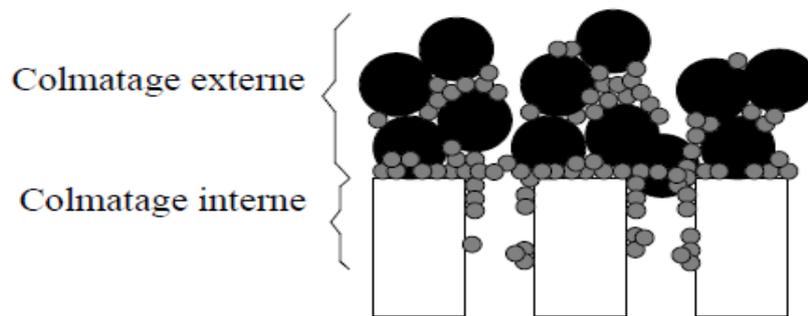
Le colmatage des membranes est un des verrous rencontrés en filtration membranaire des eaux de surface. Il s'agit d'un problème majeur lié à l'utilisation des techniques membranaires.

L'accumulation de matière peut se faire à la surface d'une membrane, les particules peuvent bloquer ses pores, et, dans le cas d'une membrane ayant des pores suffisamment

grands par rapport aux substances présentes dans l'eau à traiter, il peut y avoir une adsorption et / ou dépôt de substances colmatantes sur la paroi interne de pores [16].

### III.3.2.1 Différents mécanismes de colmatage.

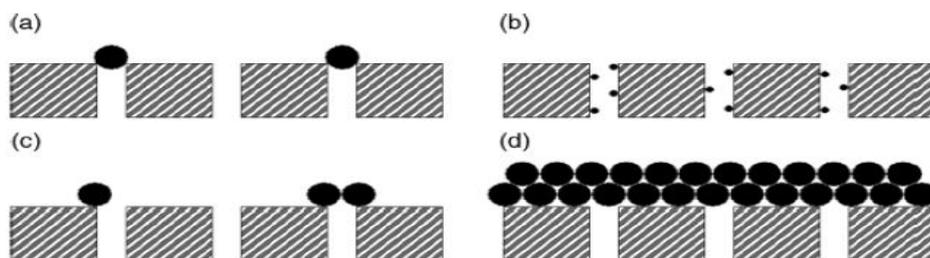
Le colmatage peut être défini comme la conséquence des phénomènes résultant du passage de la matière d'une phase liquide (solution à filtrer) à une phase solide (la membrane), formant ainsi un dépôt sur/ou dans la membrane. On distingue le colmatage externe sur la surface de la membrane, du colmatage interne situé dans les pores de la membrane.



**Figure III.15** : Le colmatage externe et interne d'une membrane

Il existe plusieurs mécanismes de colmatage:

- **Blocage complet** : les particules de taille supérieure au diamètre des pores bloquent les pores en surface et forment une monocouche. La surface couverte est proportionnelle au volume filtré.
- **Blocage standard** : il se caractérise par un dépôt de particules dont la taille est inférieure à celle des pores. La décroissance du volume poreux de la membrane est proportionnelle au volume filtré.
- **Blocage intermédiaire** : dans ce cas, les particules ne bloquent pas nécessairement toute la surface filtrante. Elles peuvent se superposer.
- **Formation de gâteau** : des particules plus larges que les pores forment un gâteau à la surface de la membrane qui peut piéger des particules plus petites.



**Figure III.16**: mécanismes de colmatage pour des membranes poreuses (a) blocage complet (b) blocage standard (c) blocage intermédiaire (d) filtration sur gâteau.

Pour minimiser le colmatage de la membrane deux voies ont été adoptées : (i) injection continue de fines bulles d'air à travers le module de la membrane par un diffuseur d'air placé juste au-dessous du module membranaire, (ii) introduction d'une relaxation et d'un contre-lavage périodiques après chaque cycle de filtration continue qui dure 8,75 min, 0,75 min de contre-lavage et 0,25 min de relaxation [20].

### **III.3.3 Types de nettoyage:**

Trois types de nettoyage sont de façon générale pratiqués [15]:

- le nettoyage mécanique, un nettoyage partiel, mais rapide.
- le nettoyage chimique, qui implique un arrêt de production périodique, génère des coûts en solutions de lavage et en traitement des effluents;
- le nettoyage enzymatique.

#### **III.3.3.1 Nettoyage mécanique.**

Le principe consiste à décoller et retirer la matière accumulée sur la membrane par des forces mécaniques, d'origine hydrodynamique. La procédure généralement utilisée est le rétrolavage [15]:

Une partie du perméat est retourné à contre-courant à travers la membrane. Une telle pratique nécessite une membrane qui soit en mesure de supporter physiquement un gradient de pression inversé. Une autre pratique consiste à utiliser des écoulements pulsés, ce qui permet d'augmenter périodiquement la vitesse tangentielle à la surface de la membrane. Enfin, par injection continue ou occasionnelle d'air (ou de gaz) à travers la membrane, la matière déposée en surface peut éventuellement se décoller.

Très efficace dans le cas de dépôts faiblement liés au support, ce type de nettoyage ne concerne que les configurations tubulaires ou spiralées. Toutefois il ne permet pas de se libérer totalement du nettoyage ou de la désinfection par voie chimique, mais vise à réduire leur fréquence.

#### **III.3.3.2 Nettoyage chimique.**

Il se compose d'une séquence de lavage acide et basique, ainsi que de phases de rinçage. La durée d'une séquence de nettoyage peut aller de 30 à 60 min. Les nettoyages sont généralement effectués à la température la plus élevée que la membrane peut supporter sans dégradation, pour une meilleure efficacité, soit de 60 à 80 °C. Les principales étapes de nettoyage se déroulent ainsi [15] :

- le premier rinçage a pour but d'éliminer les composants solubles accrochés à la membrane. On utilise donc l'effet mécanique d'un écoulement tangentiel à haute vitesse ainsi que l'effet solvant de l'eau.
- le premier nettoyage à base d'acide, a pour objectif de solubiliser les couches d'entartrage contenant calcium, tartre et minéraux, et ainsi d'éviter la formation d'hydroxydes insolubles donc très difficiles à éliminer.
- un deuxième rinçage permet d'éviter la neutralisation de la deuxième solution de nettoyage.
- le deuxième nettoyage, alcalin, a principalement pour effet d'hydrolyser la matière organique et biologique.

La séquence de nettoyage dépend bien évidemment du contexte d'utilisation. L'agent de nettoyage doit à la fois être efficace pour éliminer l'agent colmatant et inoffensif vis-à-vis des membranes et du procédé.

### **III.3.3.3 Nettoyage enzymatique.**

Ce type de nettoyage constitue une alternative aux traitements chimiques. Il peut être appliqué dans les cas de membranes sensibles aux réactifs chimiques, au pH ou à la température élevée, ainsi que dans les cas de colmatage avancé. Bien que peu énergivores et biodégradables, les enzymes requièrent des temps de traitement plus longs que les traitements chimiques et sont aussi plus coûteux. Pour ces raisons, ils sont peu souvent adoptés [15].

## **III.4 Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons posé les aspects théoriques sur les membranes et exposé les principes de base de la filtration membranaire. Les différentes classes de membranes disponibles sur le marché ont toutes d'abord été présentées. Nous avons décrit par la suite le principe de différentes techniques de séparation membranaire. Les quatre procédés de séparation ont été présentés à savoir la microfiltration, l'ultrafiltration, la nanofiltration et l'osmose inverse.

## Chapitre IV :

### **Calculs et vérifications**

## Chapitre IV. Calculs et vérification.

Ce chapitre se compose de deux parties de calculs à savoir :

### IV.1 Etude et dimensionnement de la pompe multicellulaire KSB du complexe CEVITAL

Le but de ce calcul est la vérification des dimensions des roues de la pompe par une méthode de calcul approximative. Donc, dans ce chapitre, on abordera le calcul des paramètres principaux nécessaires à la réalisation d'une roue à partir des conditions de service où devrait évoluer notre pompe.

**Les données prises sur la pompe multicellulaire :**

- ✓ Le débit volumétrique :  $Q_v = 0.04657 \text{ [m}^3/\text{s]} = 167.652 \text{ [m}^3/\text{h]}$ .
- ✓ La hauteur de refoulement :  $H = 47 \text{ m}$ .
- ✓ La vitesse de rotation :  $N = 2982 \text{ [tr/min]}$ .
- ✓ La masse volumétrique :  $\rho = 1020 \text{ [kg/m}^3]$ .
- ✓ Puissance de la pompe :  $P_a = 500 \text{ kw}$
- ✓ Nombre d'étage de la pompe HGM :  $i = 3$
- ✓ Température de fluide brut :  $T = 30 \text{ }^\circ\text{C}$
- ✓ Pression d'épreuve hydraulique :  $P = 42 \text{ bar}$

#### IV.1.1 Détermination des paramètres principaux

##### IV.1.1.1 Vitesse spécifique $N_s$

$$N_s = N \cdot \frac{Q_v^{1/2}}{\left(\frac{H}{i}\right)^{3/4}} \quad (\text{IV. 1})$$

$N$  : vitesse de rotation exprimé en tr/mn.

$Q_v$  : Débit volumétrique exprimé en  $\text{m}^3/\text{s}$ .

$H$  : hauteur manométrique exprimé en m.

$i$  : nombre d'étage (3 étage pour la pompe étudiée).

$$N_s = 2982 \cdot \frac{(0.0465)^{1/2}}{\left(\frac{47}{3}\right)^4}$$

➤  $N_s = 81.66 \text{ tr/min}$

**Tableau IV.1:** Classification des pompes selon la vitesse spécifique.

$N_s$	Type de pompe
$N_s < 80 \text{ tr/min}$	pompes centrifuges à vitesses faibles
80 à 150 tr / min	pompes centrifuges à vitesses moyennes
150 à 300 tr /min	pompe centrifuges à vitesses rapides
300 à 600 tr / min	pompes hélico-centrifuges
600 à 1200 tr / min	pompes axiales

➤ Pour la pompe étudiée il s'agit d'une pompe centrifuge à vitesse moyenne.

#### IV.1.1.2 Calcul des rendements de la pompe

##### a) Rendement hydraulique ( $\eta_H$ ) :

Le rendement hydraulique caractérise les pertes de charge créées dans l'impulseur et qui s'exprime par l'expression suivante [21] :

$$\eta_H = 1 - \frac{0.42}{[\log_{10} d_{\text{red}} - 0.172]^2} \quad (\text{IV.2})$$

$d_{\text{red}}$  : est exprimé en mm

Le diamètre réduit est donné par la formule de SOUKHANOV [21] :

$$d_{\text{red}} = 4250 \sqrt[3]{\frac{Q_v}{N}} \quad (\text{IV. 3})$$

$Q_v$  : débit exprimé en m<sup>3</sup>/s.

$N$  : vitesse de rotation exprimé en tr/min.

$$d_{\text{red}} = 4.25 \times 1000 \sqrt[3]{\frac{0.0465}{2982}} = 106.18 \text{ mm}$$

$$\eta_H = 1 - \frac{0.42}{[\log_{10}(106.18) - 0.172]^2}$$

$$\eta_H = 0.9792$$

➤  $\eta_H = 97.92\%$

### b) Rendement volumétrique ( $\eta_v$ )

Les rendements volumétriques sont dus à l'existence des fuites à l'extérieur de la pompe, à travers les jeux entre le rotor et le corps de la pompe. On propose la formule suivante pour le calcul du rendement volumétrique [22]:

$$\eta_v = \frac{0.42}{[1 + 0.68(N_s)^{(-2/3)}]} \quad (\text{IV. 4})$$

$$\eta_v = \frac{0.42}{[1 + 0.68(81.66)^{(-2/3)}]}$$

$$\eta_v = 0.9651$$

➤  $\eta_v = 96.51\%$

### c) Rendement mécanique $\eta_m$

Le rendement mécanique caractérise les pertes d'énergie dues au frottement mécanique dans les garnitures, paliers à butées. On le calcul avec la manière suivante [22] :

$$\eta_m = \frac{1}{1 + \left(\frac{820}{N_s^2}\right)} \quad (\text{IV. 5})$$

$$\eta_m = \frac{1}{1 + \left(\frac{820}{81.66^2}\right)}$$

$$\eta_m = 0.8905$$

➤  $\eta_m = 89.05\%$

#### d) Rendement global $\eta_g$

Il caractérise le rendement total de la pompe, il est calculé par la formule suivante [21] :

$$\eta_g = \eta_h \times \eta_v \times \eta_m \quad (\text{IV. 6})$$

$$\eta_g = 0.9792 \times 0.9651 \times 0.8907$$

$$\eta_g = 0.8415$$

➤  $\eta_g = 84.15\%$

#### IV.1.1.3 La puissance consommée par la pompe $P_{ab}$

C'est la puissance nécessaire pour assurer la charge totale de la pompe, Elle est déterminée comme suit : [23]

$$P_{ab} = \frac{\rho \cdot g \cdot H \cdot Q_v}{\eta_g} \quad (\text{IV. 7})$$

$$P_{ab} = \frac{1020 \times 9.81 \times 47 \times 0.0465}{0.8415}$$

$$P_{ab} = 25987.58 \text{ w}$$

➤  $P_{ab} = 25.988 \text{ kw}$

#### IV.1.1.4 La puissance du moteur ( $P_m$ )

La puissance du moteur est prise avec un coefficient de réserve  $K_r$ , qui tient compte de la puissance consommée par la pompe  $P_{ab}$ , on prend [21]:

$$P_m = P_{ab} \cdot K_r \quad (\text{IV. 8})$$

$K_r = 1.25$  pour  $P_{ab} < 20$  kw.

$K_r = 1.2$  pour  $20 < P_{ab} < 50$  kw.

$K_r = 1.1$  pour  $P_{ab} > 300$  kw.

Pour la pompe étudiée  $20 < 25.988 < 50$  ; donc la puissance du moteur électrique avec une réserve de 20%.

Donc  $K_r = 1.2$

$$P_m = 25.988 \times 1.2$$

$$\triangleright P_m = 31.1856 \text{ kw}$$

La puissance du moteur est celle que doit fournir le moteur pour que la pompe fonctionne et surtout assurer son démarrage.

## IV.1.2 Calcul préalable de l'arbre

### IV.1.2.1 Diamètre de l'arbre ( $d_a$ )

L'arbre de la pompe en fonctionnement est soumis à l'action de toute une série de forces extérieures dont la principale qui permet de dimensionner cet arbre est due au couple de torsion. Le couple de torsion agissant sur l'arbre à section circulaire.

On détermine le diamètre de l'arbre approximativement en se basant sur les calculs de résistance [23] :

$$d_a = \left( \frac{M_t}{0.2\tau} \right)^{1/3} \quad (\text{IV. 9})$$

$M_t$  : Couple de rotation en [N.m].

$\tau$  : Contrainte admissible des torsions en [N.m<sup>2</sup>], choisi selon les recommandations des résistances des matériaux.

**IV.1.2.2 Calcul de couple de rotation  $M_t$** 

$$M_t = \frac{P_m}{\omega} \quad (\text{IV. 10})$$

$$\omega = \frac{\pi \cdot N}{30}$$

$$\omega = \frac{\pi \cdot 2982}{30}$$

$$\omega = 312.17 \text{ rd/s}$$

$$M_t = 99.8994 \text{ N.m}$$

**IV.1.2.3 Calcul de la contrainte admissible  $\tau$** 

La contrainte admissible à la torsion est exprimée [22] :

$$\tau = \frac{Re}{N} \quad (\text{IV. 11})$$

N : Coefficient de sécurité (en prend  $n = 4$ ).

Re : Limite minimale apparente d'élasticité. Comme matière de l'arbre prenons l'acier XC42.

$$Re = 335 \text{ N/mm}^2 = 335 \cdot 10^6 \text{ N/m}^2 \text{ [24]}$$

AN:

$$\tau = \frac{335 \cdot 10^6}{4}$$

$$\tau = 83,75 \cdot 10^6 \text{ N/m}^2$$

$$d_a = \left( \frac{99.8994}{0,2 \cdot 83,75 \cdot 10^6} \right)^{1/3}$$

$$\text{➤ } d_a = 0.01814 \text{ m}$$

#### IV.1.2.4 Diamètre moyen de la roue $d_m$

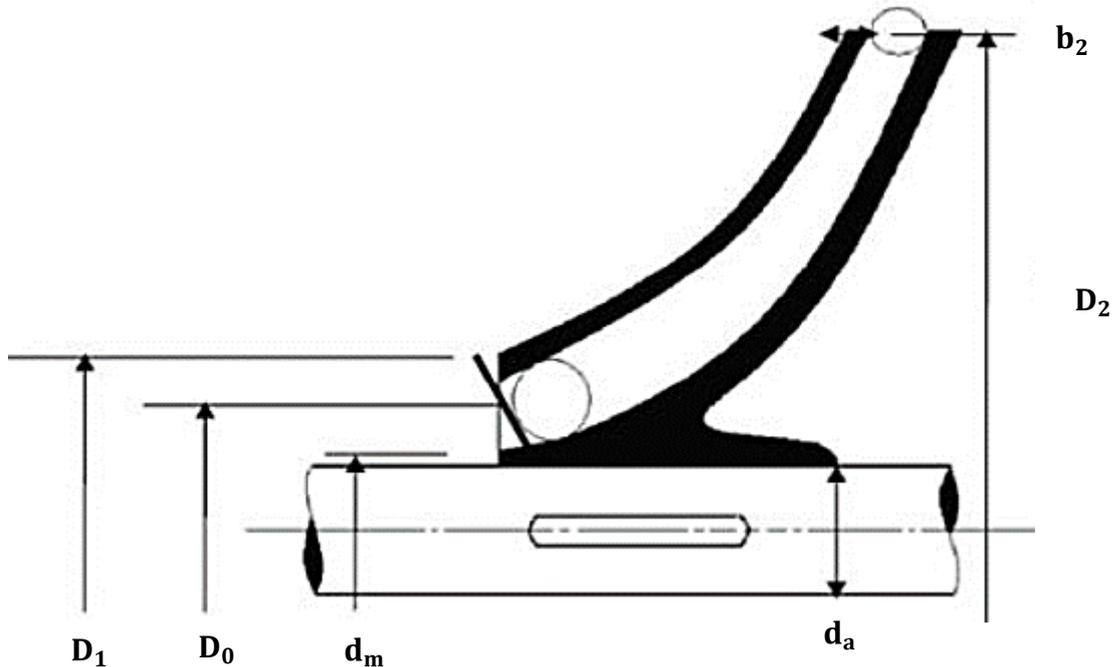


Figure IV.1 : Roue d'une pompe centrifuge.

$D_0$  : Diamètre de l'arrête d'entrée

$d_m$ : Diamètre du moyeu de la roue

Le diamètre de l'arbre dans le tronçon où les roues sont montées de 63,5 mm. La forme du moyeu dépend principalement du mode d'accouplement de la roue avec l'arbre, on admet généralement dans le cas d'un clavetage libre.

On le calcule à l'aide de la formule suivante[22] :

$$d_m = (1.2 \text{ à } 1.25) d_a \quad (\text{IV. 12})$$

$$d_m = (1.25) \times 0.01814$$

$$\text{➤ } d_m = 0.02268 \text{ m}$$

### IV.1.3 Détermination des paramètres à l'entrée de la roue

#### IV.1.3.1 Le débit qui traverse la roue $Q_c$

Le but de ce calcul est de déterminer le débit qui circule dans la pompe, en tenant compte des fuites à l'intérieur de la pompe [23].

$$Q_c = \frac{Q_v}{\eta_v} \quad (\text{IV. 13})$$

$$Q_c = \frac{0.04657}{0.9651}$$

$$\triangleright Q_c = 0.04825 \text{ m}^3/\text{s}$$

### IV.1.3.2 Diamètre maximal de l'arrête d'entrée $D_1$

L'objectif de ce calcul consiste à déterminer le diamètre maximal de l'arrête d'entrée, afin de déterminer la section de l'anneau de la roue,  $D_1$  est défini par la formule [22] :

$$D_1 = \sqrt{\frac{4 \cdot Q_c}{\pi \cdot V_0} + [d_m]^2} \quad (\text{IV. 14})$$

$V_0$  : Vitesse absolue de l'entrée.

$$V_0 = (0.06 \text{ à } 0.08) \sqrt[3]{Q_c \cdot n^2} \quad (\text{IV. 15})$$

$$V'_0 = (0.06) \sqrt[3]{0.04825 \times 2982^2} = 4.5254 \text{ m/s}$$

$$V''_0 = (0.08) \sqrt[3]{0.04825 \times 2982^2} = 6.338 \text{ m/s}$$

$$V_0 = \frac{4.5254 + 6.338}{2} = 5.2967 \text{ m/s}$$

Donc :

$$D_1 = \sqrt{\frac{4 \times 0.04825}{\pi \cdot 5.2967} + [0.02268]^2}$$

$$\triangleright D_1 = 0.11 \text{ m}$$

D'où la vitesse absolue à l'entrée de la roue [21] :

$$V_0 = \frac{4 \cdot Q_c}{\pi(D_1^2 - d_m^2)} \quad (\text{IV. 16})$$

$$V_0 = \frac{4 \times 0.04825}{\pi(0.11^2 - 0.02268^2)}$$

$$\triangleright V_0 = 5.3025 \text{ m/s}$$

### IV.1.3.3 Diamètre moyen de l'arrête d'entrée $D_0$

C'est un diamètre du point sur l'extrémité d'entrée de l'aube, on prend en générale l'expression suivante pour le calcul du diamètre  $D_0$ [22] :

$$D_0 = (0.7 \text{ à } 0.9) D_1 \quad (\text{IV. 17})$$

On prend la valeur moyenne :

$$D_0 = 0.088 \text{ m} = 8,8 \text{ cm}$$

### IV.1.3.4 Largeur de la fente à l'entrée ( $b_1$ )

On calcul la largeur de la fente à l'entrée de la roue  $b_1$ , sans tenir compte de l'épaisseur de l'aube [22].

$$b_1 = \frac{Q_c}{\pi \cdot D_0 \cdot V'_{1m}} \quad (\text{IV. 18})$$

$V'_{1m}$  : Composante méridienne de la vitesse absolue sans tenir compte de l'épaisseur de l'aube, pour notre cas  $V'_{1m} = V_0 = 5.3025 \text{ m/s}$

$$b_1 = \frac{0.04825}{\pi \times 0.088 \times 5.3025}$$

$$\triangleright b_1 = 0.033 \text{ m}$$

### IV.1.3.5 Angle d'aube $\beta_1$ à l'entrée

A cause de l'épaisseur des aubes, la section du courant du liquide à l'entrée diminue, donc la vitesse du liquide augmente [23].

$K_1$  : le coefficient de rétrécissement du courant qui tient en compte cette augmentation.

Donc :

$$V_{1m} = K_1 \cdot V_0 \text{ ; } K_1 = 1.1 \text{ à } 1.15 \text{ ; on prend } K_1 = 1.15$$

$$\text{Donc } V_{1m} = 1.15 \times 5.3025 = 6.0979 \text{ m/s}$$

L'angle d'entrée de la circonférentielle ou à l'entrée du rotor sur les aubages  $\beta_{1-0}$  est:

$$\text{tg}\beta_{1-0} = \frac{V_{1m}}{U_1} \quad (\text{IV. 19})$$

$U_1$ : la vitesse tangentielle l'entrée de la roue.

$$U_1 = \frac{\pi \cdot N}{30} \cdot \frac{D_0}{2} \tag{IV. 20}$$

$$U_1 = \frac{\pi \cdot 2982}{30} \cdot \frac{0.088}{2}$$

$$U_1 = 13.74 \text{ m/s}$$

$$\text{tg}\beta_{1-0} = \frac{6.0979}{13.74} = 0.4438$$

$$\beta_{1-0} = 23.93^\circ$$

l'angle d'aube à l'entrée  $\beta_1 = \text{tg}\beta_{1-0} + \delta$

$\delta$  : est l'angle d'attaque pour le calcul ;  $\delta = 3$  à  $8$

On prend  $\delta = 4$

$$\text{Donc : } \beta_1 = 23.93 + 4 = 27.93^\circ$$

$$\text{➤ } \beta_1 = 27.93^\circ$$

#### IV.1.4 Détermination des paramètres du rotor à la sortie de la roue

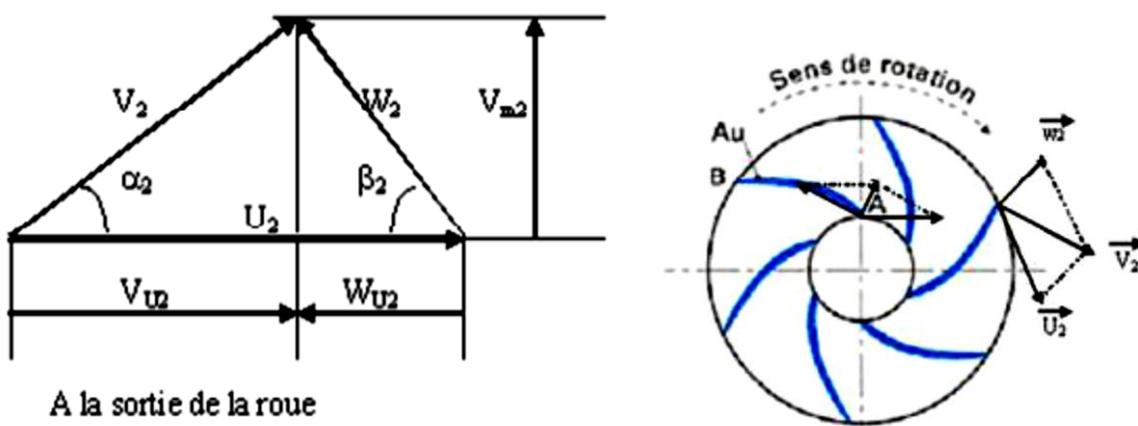


Figure IV.2 : Triangle des vitesses à l'entrée de la roue.

#### IV.1.4.1 Charge théorique en tenant compte du nombre d'aubes $H_{thZ}$

$$H_{thZ} = \frac{H}{\eta_H} \quad (IV.21)$$

$$H_{thZ} = \frac{47}{0.8415}$$

➤  $H_{thZ} = 55.85 \text{ m}$

#### IV.1.4.2 Vitesse circonférentielle à la sortie du rotor $U_2$

On peut déterminer la vitesse circonférentielle  $U_2$  en prenant l'approximation de la formule suivante [21] :

$$U_2 = \sqrt{2 \cdot g \cdot H_{thZ}} \quad (IV.22)$$

$$U_2 = \sqrt{2 \times 9.81 \times 55.85}$$

➤  $U_2 = 33.10 \text{ m/s}$

#### IV.1.4.3 Diamètre extérieur de la roue $D_2$

On utilise l'expression suivante pour déterminer le diamètre de la roue  $D_2$  [22] :

$$D_2 = \frac{2U_2}{\omega} \quad (IV.23)$$

$$\omega = \frac{\pi \cdot n}{30} = \frac{\pi \cdot 2982}{30} = 312.27 \text{ rad/s}$$

Donc

$$D_2 = \frac{2 \times 33.10}{312.27}$$

➤  $D_2 = 0.212 \text{ m}$

Pour valider ce résultat on propose une autre formule définie par [21] :

$$D_2 = \frac{84.5 K_u \sqrt{H}}{N} \quad (IV.24)$$

Avec :

$$K_u = \frac{U_2}{\sqrt{2gH}} \quad (\text{IV. 25})$$

$$D_2 = 0.212 \text{ m}$$

Donc la valeur de 0.212 m est vérifiée.

#### IV.1.4.4 L'angle d'aube à la sortie de la roue $\beta_2$

On propose la formule suivante pour le calcul de l'angle  $\beta_2$  [21]:

$$\sin\beta_2 = \frac{\sin\beta_1 \times K_1 \times V_{2M} \times \omega_1}{K_2 \times V_{1M} \times \omega_2} \quad (\text{IV. 26})$$

$$V_{1M} = V_0 : \text{pour angle d'entrée radiale } \alpha = 90^\circ$$

$$V_{2M} = V_0 \cdot 0.8 : \text{La composante méridienne à la sortie de la roue } V_{2M} = 5.3025 \times 0.8$$

$$V_{2M} = 4.242 \text{ m/s}$$

$$\frac{\omega_1}{\omega_2} = 1.1 : \text{Le rapport des vitesses relative, pour des pertes d'énergie minimale}$$

$$K_1 = 1.15 : \text{Coefficient de rétrécissement de l'aube}$$

$$K_2 = 1.1 : \text{Coefficient de rétrécissement de l'aube à la sortie}$$

$$\sin\beta_2 = \frac{\sin 27.93 \times 1.15_1 \times 4.242 \times 1.1}{1.1 \times 5.3025}$$

$$\triangleright \beta_2 = 25.53^\circ$$

#### IV.1.4.5 Nombre d'aubes Z [22]

$$Z = 6.5 \cdot \frac{D_2 + D_1}{D_2 - D_1} \sin \frac{\beta_1 + \beta_2}{2} \quad (\text{IV. 27})$$

$$Z = 6.5 \cdot \frac{0.212 + 0.11}{0.212 - 0.11} \sin \frac{27.93 + 25.53}{2}$$

$$\triangleright Z = 9.22 \approx 9 \text{ aubes}$$

Pour vérifier la valeur de nombre d'aubes [21] :

$$Z = \frac{\text{valeur de } \beta_1 \text{ en degré}}{3} \quad (\text{IV.28})$$

$$Z = \frac{27^\circ}{3} = 9 \text{ aubes}$$

Donc la valeur de Z est vérifiée.

#### IV.1.5 Calcul des vitesses relatives à l'entrée et à la sortie de la roue :

D'après triangle de vitesse :

$$\cos\beta_1 = \frac{U_1}{W_1} \quad \rightarrow \quad W_1 = \frac{U_1}{\cos\beta_1}$$

A.N :

$$W_1 = \frac{13.74}{\cos 27.93}$$

$$\rightarrow W_1 = 15.55 \text{ m/s}$$

$$\frac{1}{2g} W_2^2 = 0.2(H_{\text{thz}} - H)$$

$$\text{Donc : } W_2 = \sqrt{2g \cdot 0.2(H_{\text{thz}} - H)}$$

$$W_2 = \sqrt{2 \times 9.81 \times 0.2(55.85 - 47)}$$

$$\rightarrow W_2 = 9.89 \text{ m/s}$$

#### Validation des résultats obtenus sur les pompes:

Vue l'absence de la documentation nécessaire sur la pompe HGM, on a proposé de calculer quelques paramètres avec deux méthodes différents d'où on a trouvé les mêmes valeurs, ainsi pour le calcul de nombre d'aubes qui résume presque tous les paramètres ( $D_2, D_2, \beta_1$  et  $\beta_2$ ) on a arrivé à trouver un nombre de Z vérifié sur le terrain .

## IV.2 Calcul de la partie membranaire :

Le but de ce calcul est d'utiliser les données prises sur la ligne 1 de l'osmose inverse CEVITAL pour calculer la pression osmotique de la solution afin de la comparer avec la pression de l'alimentation, et aussi de calculer la surface de la membrane pour la vérifier avec celle de constructeur, et on termine par calculer le taux de conversion de la membrane étudiée.

### Les données de la ligne 1 de l'osmose inverse du CEVITAL :

Débit d'alimentation :  $Q_a = 134.64 \text{ m}^3/\text{h}$

Débit de perméat :  $Q_p = 97.992 \text{ m}^3/\text{h}$

Pression d'alimentation :  $P_f = 3800 \text{ kPa}$ .

la pression des rejets :  $P_b = 3500 \text{ kPa}$ .

Pression de perméat :  $P_p = 101 \text{ kPa}$ .

Conductivité électrique de l'eau :  $25.2 \text{ mS/cm}$ .

### IV.2.1 Calcul du total des solides dissous TDS

Les solides dissous représentent une mesure des ions totaux dans une solution, les solides dissous d'un échantillon d'eau, basé sur la valeur calculée de la conductivité électrique, peuvent être calculés en utilisant l'équation suivante [25] :

$$\text{TDS (mg/l)} = 0.5 \times 1000 \times \text{conductivité (mS/cm)} \quad (\text{IV. 29})$$

$$\text{TDS (mg/l)} = 0.5 \times 1000 \times 25.2 = 12600 \text{ mg/l}$$

$$\text{TDS} = 12600 \text{ mg/l} = 12.6 \text{ kg/m}^3$$

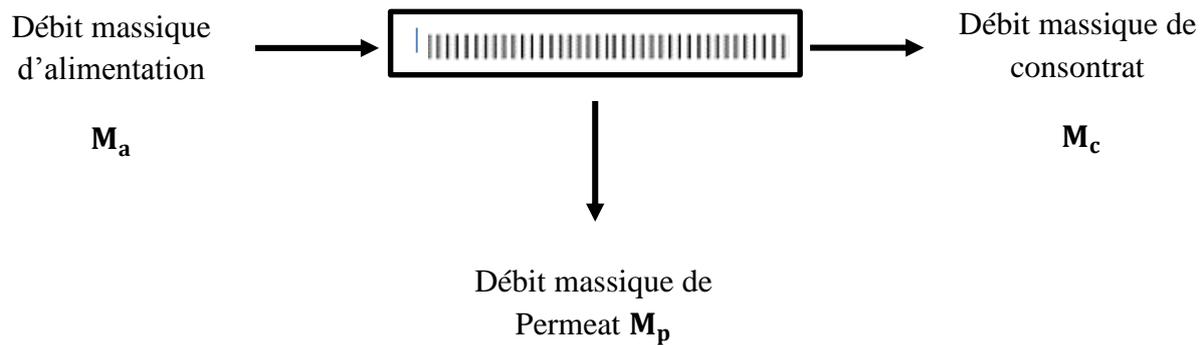
La totalité des solides dessous représente la concentration total des solides dissous  $C_S$  donc :

$$\text{TDS} = C_S = 12.6 \text{ kg/m}^3$$

### IV.2.2 Le bilan de matière du perméateur

La masse du perméateur à l'équilibres est donnée par [26]:

$$M_a = M_p + M_c \quad (\text{IV. 30})$$



**Figure IV.3 :** Le bilan de matière de perméateur.

**a) Calcul du débit massique d'alimentation :**

$$M_a = \rho \times Q_a \quad (\text{IV. 31})$$

$\rho$  : la masse volumique de l'eau : on prend  $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$

$$M_a = 1000 \times \frac{134.64}{3600} = 37.447 \text{ kg/s}$$

$$M_a = 37.447 \text{ kg/s.}$$

**b) Calcul du débit massique de perméat :**

$$M_p = \rho \times Q_p \quad (\text{IV. 32})$$

$$M_p = 1000 \times \frac{97.992}{3600} = 27.22 \text{ kg/s}$$

$$M_p = 27.22 \text{ kg/s}$$

Donc le débit massique de consoutrat est donné par :

$$M_c = M_a - M_p$$

$$M_c = 37.477 - 27.2 = 10.247 \text{ kg/s}$$

$$M_c = 10.247 \text{ kg/s}$$

- Supposons que la concentration du courant  $X_d$  de perméat soit égale à 72.5 ppm ou  $0,0725 \text{ kg/m}^3$  [26].

- Cette valeur est utilisée pour calculer la concentration de la solution  $X_b$  en résolvant l'équilibre de l'équation, qui est donnée par :

$$M_a C_S = M_c X_b + M_p X_d \quad (\text{IV. 33})$$

$$X_b = \frac{M_a C_S - M_p X_d}{M_c} \quad (\text{IV. 34})$$

$$X_b = \frac{37.447 \times 12.6 - 27.2 \times 0.0725}{10.247} = 45.85 \text{ kg/m}^3$$

$$X_b = 45.85 \text{ kg/m}^3$$

### IV.2.3 Concentration moyenne de l'alimentation

Elle est calculée par la formule suivante [26]:

$$C = \frac{M_a C_S + M_c X_b}{M_a + M_c} \quad (\text{IV. 35})$$

$$C = \frac{(37.447 \times 12.6) + (10.247 \times 45.85)}{(37.447 + 10.247)} = 26.20 \text{ kg/m}^3$$

$$C = 19.74 \text{ kg/m}^3$$

### IV.2.4 La pression osmotique de chaque flux

La concentration de divers courants est utilisée pour calculer la pression osmotique de chaque flux [26]:

$$\pi_f = 75.84 C_S = 955.58 \text{ kPa}$$

$$\pi_b = 75.84 X_b = 3477.53 \text{ kPa}$$

$$\pi_d = 75.84 X_d = 5.4984 \text{ kPa}$$

### IV.2.5 Pression osmotique moyenne de l'alimentation

Elle est calculée par :

$$\pi = \frac{\pi_f + \pi_b}{2} \quad (\text{IV. 36})$$

$$\pi = 2216.55 \text{ Kpa} = 22.16 \text{ bar}$$

### IV.2.6 Pression osmotique nette à travers la membrane

$$\Delta\pi = \pi - \pi_d \quad (\text{IV. 37})$$

$$\Delta\pi = 2216.55 - 5.4984 = 2211.06 \text{ kPa}$$

$$\Delta\pi = 2211.06 \text{ kPa}$$

### IV.2.7 Différence de pression nette à travers la membrane

Elle est donnée par :

$$\Delta p = \frac{P_f + P_b}{2} - P_p \quad (\text{IV. 38})$$

$$\Delta p = \frac{3800 + 3500}{2} - 101 = 3549 \text{ kPa}$$

$$\Delta p = 3549 \text{ kPa} = 35.5 \text{ bar}$$

### IV.2.8 Surface de la membrane

- L'équation du flux de perméat est utilisée pour calculer la surface de la membrane, où [46] :

$$J = \frac{Q_p}{S} = A(\Delta p - \Delta\pi) \quad (\text{IV. 39})$$

J : flux de perméat exprimé en m/s

A : la perméabilité de la membrane à l'eau (m/s Kpa).

S : la surface de la membrane exprimée en m<sup>2</sup>.

-La membrane étudiée est DOW FILMTEC BW30XFR.

Pour trouver la valeur de la perméabilité de la membrane à l'eau on propose d'étudier le cas de constructeur :

Pour le cas du constructeur on a :

Surface de la membrane  $S = 37 \text{ m}^2$

Débit de perméat :  $Q_p = 43 \frac{\text{m}^3}{\text{jour}} = 4.98 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$

Différence de pression  $(\Delta p - \Delta \pi) = 15 \text{ bar} = 1500 \text{ kPa}$

Donc la perméabilité est donnée par :

$$A = \frac{Q_p}{S(\Delta p - \Delta \pi)} \quad (\text{IV. 40})$$

$$A = \frac{4.98 \times 10^{-4}}{37 \times 1500} = 8.9 \times 10^{-9} \text{ m/s kPa}$$

Donc la perméabilité à l'eau de la membrane étudiée est :

$$A = 8.9 \times 10^{-9} \text{ m/s kPa}$$

Donc la surface d'échange de la ligne 1 d'osmose inverse est donnée par :

$$S = \frac{Q_p}{A(\Delta p - \Delta \pi)}$$

$$S = \frac{4.98 \times 10^{-4}}{8.9 \times 10^{-9}(3549 - 2211.06)}$$

$$S = 2266.41 \text{ m}^2$$

La ligne 1 de l'osmose inverse est composé de 15 vissels et chaque vissel est composé de 4 membranes (Figure VI.4)



**Figure IV.4 :** la ligne d'osmose inverse de CEVITAL.

Donc pour calculer la surface d'échange d'une seule membrane on a :

$$S_M = \frac{S}{15 \times 4} = \frac{S}{60}$$

$$S_M = \frac{2266.41}{60}$$

$$S_M = 37.77 \text{ m}^2$$

On remarque que la valeur surface de la membrane étudiée est proche de la valeur de la surface du constructeur actuellement installée qui est de  $37 \text{ m}^2$  ;

$$37 \text{ m}^2 \approx 37.77 \text{ m}^2$$

### IV.2.9 Taux de conversion des membranes Y

Le taux de conversion exprime le rendement de la membrane, il est donné par :

$$Y = \frac{Q_p}{Q_p + Q_c} \quad (\text{IV. 41})$$

$Q_p$  : débit de permeat exprimé en  $m^3/s$

$Q_c$  : débit de contrat exprimé en  $m^3/s$

$$Y = \frac{97.99}{97.99 + 36.89}$$

$$Y = 0.7265$$

Donc le taux de conversion est de 72.65%, ce qui représente un taux fortement appréciable.

#### Validation des résultats:

La surface calculée de la membrane utilisée dans le complexe de CEVITAL semble très proche par rapport à celle du constructeur, ce qui donne une validation à nos résultats.

### IV.2.3 Conclusion

La pompe multicellulaire du complexe refoule une pression d'alimentation de 38 bar, en calculant la pression osmotique qu'il faut exercer sur la solution (environ de 22 bar), on conclure qu'il y'a une perte d'énergie au sein de la station, pour cela on propose de diminuer la pression d'alimentation (jusqu'à 30 bar) pour un meilleur rendement économique de l'entreprise.

# **Conclusion Générale**

## Conclusion générale

Ce travail a fait pour objet la synthèse par la pompe multicellulaire HGM et la caractérisation de la membrane utilisé dans le complexe pour l'osmose inverse.

Dans la première partie, nous avons décrit la station de CEVITAL, qui concerne sur l'importance de traitement des eaux, ainsi que leurs éléments, enfin nous somme terminer par la description de notre procès et l'identification des différent éléments et équipement de la station.

On a parlé sur les notions fondamentales des pompes, une présentation des différents éléments constitutif de la pompe, on a terminé par une analyse de fonctionnement et de l'installation d'une pompe sur un réseau et la détermination des paramètres de la pompe.

On a décrit la présentation des généralités sur les membranes ainsi que les classifications et leur différent procédé de séparation membranaire sont décrits. Les différents types de membranes sont présentés, ainsi que leurs caractéristiques et leur nettoyage.

Dans la deuxième partie, notre travail nous avons dimensionner la pompe multicellulaire et on a calculé les paramètres principaux de la pompe et les paramètres à l'entrée et à la sortie de la roue avec une méthode de calcul approximative.

Ensuite, nous avons essayé de faire un bilan massique de perméateur afin de calculer la pression osmotique de la solution pour calculer la surface d'échange de toute la ligne de traitement membranaire afin de trouvé la surface d'une seule membrane et la comparé avec celle du constructeur.

Nous constatons que la pression d'alimentation de l'eau brute utilisée dans le complexe pour alimenter les membranes est de 38 bar, alors que la pression osmotique calculée est de 22 bar, donc pour un meilleur rendement économique de l'entreprise on propose de diminuer la pression d'alimentation jusqu'à 30 bar.

Ce travail nécessite d'être poursuivi pour une meilleure approche des phénomènes de l'osmose inverse.

Les résultats obtenus, semblent que la technique de l'osmose inverse apporte une contribution à la réduction de la pollution de l'eaux.

# **Bibliographie**

## **Bibliographie**

- [1] Enrico Riboni, Chézard-Saint-Martin, « Purification de l'eau dans l'industrie », Suisse, 2008.
- [2] « Etude Et Automatisation De La Nouvelle Station De Préfiltration De L'unité De Traitement Des Eaux CEVITAL », Master électromécanique, université de Bejaia 2013.
- [3] Documentation CEVITAL.
- [4] DUPONT. A, « Hydraulique urbaine, Ouvrages de transport-élévation et distribution des eaux », tome II, Ed. Eyrolles, Paris 1969.
- [5] JEAN LAPRAY. F, « Technique de l'ingénieur », machine hydraulique et thermique. Edition PYC. France 2002.
- [6] « Etude d'un écoulement dans une conduite d'aspiration d'une pompe centrifuge », Master hydraulique, université de Tlemcen, 2013
- [7] DUPONT, A., « Hydraulique urbaine ». Tome2: Ouvrages de transport - Elévation et distribution des eaux 6<sup>o</sup>ed. Ed. Eyrolles. Paris 477p1988.
- [8] LEBLOND.A, Décembre : « Hydraulique Notions simples sur les pertes de charge ».  
Ecole nationale supérieur du pétrole et des moteurs. Paris 1966.
- [9] WARD. D, « Pompes et amorceurs », Centre de Secours de Divonne-les Bains. Ed .Eyrolles .Paris, 2002.
- [10] Miguel ASUAJE thèse de doctorat « METHODOLOGIE ET OPTIMISATION DANS LA CONCEPTION ET L'ANALYSE DES PERFORMANCES DES TURBOMACHINES A FLUIDE INCOMPRESSIBLE » L'ÉCOLE NATIONALE SUPÉRIEURE D'ARTS ET MÉTIERS, spécialité mécanique, soutenue en 2003
- [11] KARASSIK: « Pump Handbook »1976 - Ed. McGraw Hill Co - New York
- [12] G.T. CSANADY: « Theory of turbo machinery »1964 - Ed. McGraw Hill Co - New York.

- 
- [13] F. LEBOEUF, R. VOUILLARMET, P. FERRAND « Aérothermodynamique des turbomachines » Cours de l'Ecole Centrale de Lyon.
- [14] HAMKINS C. P Corrélation of a one dimensionna centrifugal pump performance analysis methods. ASME –paper 84-Wa -/FM-10-1984.
- [15] Mallevialle J., Odendaal P.E., Wiesner M.R., The emergence of membranes in water and waste water treatment, In: Water Treatment Membrane Process, Chapitre 1, McGraw-Hill, 1996 10 p.
- [16] Abdenabi ABIDI Thèse de Doctorat « ÉTUDE DE MÉCANISMES DE TRANSFERT DES ORTHOPHOSPHATES À TRAVERS UNE MEMBRANE DE NANOFILTRATION EN MODE BATCH. EFFET DE LA MATRICE EXPÉRIMENTALE SUR LA SÉLECTIVITÉ ET MODÉLISATION PHÉNOMÉNOLOGIQUE », Génie des Procédés, Université Mohamed Khider – Biskra Mai 2014.
- [17] Amokrane Mounir, Thèse de Doctorat « Etude thermodynamique des écoulements d'eau salée en vue d'une application à un procédé de purification par osmose inverse ", Génie Mécanique, Université A. Mira de Bejaia janvier 2016.
- [18] Nechad Amel, Mémoire de Magister "élaboration d'une membrane de filtration d'eau à base de polyéthylène basse densité et de gypse de Bouzggai", Génie Chimique, Université Hassiba benbouli Chlef 2008/2009.
- [19] Amine Charfi , Thèse de Doctorat "Etude d'un procédé membranaire de traitement des eaux usées : effet des paramètres biotiques et abiotiques sur le colmatage de la membrane " , UNIVERSITE DE CARTHAGE, décembre 2014.
- [20] Ahlem Romdhane, Thèse de Doctorat," Procédés de séparation membranaire pour la production en continu de nanocristaux de polysaccharides : approche expérimentale et modélisation", Génie des procédés. Université de Grenoble, Décembre 2014.
- [21] : ADAM T. TROSKOLANSKI, LES TURBOPOMPES (Théorie, tracé et construction), EDITIONS EYROLLES 61, boulevard Saint-Germain, 75005 Paris 1977.
- [22] : Calcul hydraulique sur la roue de la pompe centrifuge, ministère de l'éducation et des sciences de la fédération Russie, "Université Technique d'Etat de Komsomolsk-on Amur",2015.
- [23] : Daniel THIN, Les pompes et leurs application, 1964 France.
- [24] : C 40 (XC 42) métaux détail service, [www.metaux-detail.com](http://www.metaux-detail.com).

[25]: LENNTECH Copyright © 1998-2018 Lenntech B.V. All rights reserved  
<https://www.lenntech.fr/applications/ultrapure/conductivite/eau-conductivite.htm>.

[26]: Hisham T. El-Dessouky et Hisham M. Ettouney, Fundamentals of Salt Water Desalination  
Department of Chemical Engineering College of Engineering and Petroleum Kuwait University  
2002.

# Annexe A

## FICHE DE QUART OSMOSE INVERSE

N° Réf	F-7-ENG-015
Date de la révision	12-mars-15
Version	1



DATE : 03 avril 2018.

NOM & PRENOME DE L'OPERATEUR Mr : OUKACHEBI A / Halim.

Mr : KHOUALENE Djamel.

PARTIE OSMOSE												
Ligne d'osmose	P <sub>exe</sub>	P <sub>int</sub>	Δp Total	Δp 1 <sup>er</sup> étage	Δp 2 <sup>ème</sup> étage	P . sortie 2 <sup>ème</sup> étage	Conductivité Perméat	Débit D'alimentation	Débit PERMEAT	Taux Conversion	Volume Produit	Volume Rejets
Linge 1	38	35	5.4	2.7	2.7	32.3	42.23	134.64	97.992			
Linge 2	35	29.4	5.9	4.4	1.5	33.5	25.0	128.58	88.98			
Linge 3	34.9	30.9	6.2	4.0	2.2	32.7	46.8	104.98	70.72			
Linge 3	<40 bar		< 8 bar				< 50μs/cm		100m <sup>3</sup> /h	71%		
PARTIE ULTRA-PURE												
	P <sub>exe</sub>	Δp Total	P . sortie 2 <sup>ème</sup> étage	Conductivité Perméat		Débit Perméat	Débit de Concent	Cl <sub>2</sub>	Fe <sup>2-</sup>	Taux de conversion %		
Linge d'osmose Accouplée	38.2	1.0	37.2	2.7		26.1	5.4	/	/			
Normes	< 40 bar	< 3 bar		< 4 μs/cm		30 m <sup>3</sup> /h	5 m <sup>3</sup> /h	0 mg/l	0 mg/l			
Linge Ultra - pure	Pression Entrée	Conductivité Eau Osmosée	Δp Total	Conductivité Rejets	Conductivité eau pure	Débit eau pure	Débit Concentrât	Courant	PH	Taux de conversion		
Linge 1	2.1	2.2	0.3	27.1	0.09	11.0	1.2	0.4	7.9			
Linge 2	2.1	2.2	0.3	24.2	0.07	10.7	1.3	0.2	7.9			
Normes	2<p<7 bar	< 4 μs/cm	< 0.6 bar		< 0.5 μs/cm	23 m <sup>3</sup> /h	1.5 m <sup>3</sup> /h	6.5 A	7.9			
FONCTIONNEMENT												
	Temps de fonctionnement (h)		Temps Arrêt (h)	Heur début Cip		Heur fin Cip		Causes arrêt				
Linge osmose 1	06		00									
Linge osmose 2	06		00									
Linge osmose 3	1h30		05h30					Manque d'eau				
Linge Ultra - pure 1	03		03					Manque d'eau				
Linge Ultra - pure 2	03		03					Manque d'eau				

**Tableau (annexe A) : FICHE DE QUART OSMOSE INVERSE.**

## Annexe B



**Figure (annexe. B): Membrane DOW FILMTEC™ BW30XFR-400/34 Element.**

## Annexe C



Figure (annexe. c): pompe multicellulaire KSB HGM 4/6.

# ANNEXE D



Product Data Sheet

## DOW FILMTEC™ BW30XFR-400/34 Element

### Description

Ideal for: reverse osmosis plant managers and operators dealing with challenging waters and wastewaters and seeking consistent high performance, long element life, increased productivity and higher water quality coupled with excellent fouling resistance.

With proven performance, DOW FILMTEC™ BW30XFR-400/34:

- Delivers the highest quality permeate water while minimizing CAPEX and OPEX
- Offers the most effective cleaning performance, robustness and durability due to its widest cleaning pH range (1 – 13) and chemical tolerance, and the support of Dow representatives



### Product Type

Spiral-wound element with polyamide thin-film composite membrane

### Product Specifications

DOW FILMTEC™ Element	Active Area		Feed Spacer Thickness (mil)	Permeate Flow Rate		Typical	Minimum Salt Rejection (%)
	(ft <sup>2</sup> )	(m <sup>2</sup> )		(GPD)	(m <sup>3</sup> /d)	Stabilized Salt Rejection (%)	
BW30XFR-400/34	400	37	34-LDP	11,500	43	99.65	99.4

1. Permeate flow and salt (NaCl) rejection based on the following standard test conditions: 2,000 ppm NaCl, 225 psi (15.5 bar), 77°F (25°C), pH 8, 15% recovery.
2. Flow rates for individual elements may vary but will be no more than  $\pm 15\%$ .
3. Stabilized salt rejection is generally achieved within 24-48 hours of continuous use; depending upon feedwater characteristics and operating conditions.
4. Sales specifications may vary as design revisions take place.
5. Active area guaranteed  $\pm 3\%$ . Active area as stated by Dow Water & Process Solutions is not comparable to nominal membrane area often stated by some manufacturers. Measurement method described in Form No. 609-00434.

ANNEXE D : description de la membrane -DOW FILMTEC™ BW30XFR-400/34-donnée par le constructeur

## **Résumé:**

Les membranes représentent un intérêt considérable dans le domaine industriel notamment pour le traitement des eaux de forage. L'étude réalisée sur l'industrie CEVITAL est présentée en plusieurs parties. La première partie décrit la station étudiée au niveau de complexe CEVITAL en donnant des généralités sur la procédure de traitement des eaux.

La seconde partie se focalise sur la description de la pompe centrifuge multicellulaire qui alimente le réseau membranaire.

La partie suivante détaille les membranes en donnant leurs classifications, procédées de séparation, domaines de filtration, etc.

La dernière partie est dédiée à l'étude et le dimensionnement de la pompe multicellulaire KSB HGM  $\frac{3}{4}$  ainsi que le calcul sur la membrane (concentration, pression osmotique, perméabilité, taux de conversion).

**Mots-clés:** membranes, traitement des eaux, pompe multicellulaire, pression osmotique, perméabilité, taux de conversion.

## **Abstract:**

Membranes represent a considerable interest in the industrial field, particularly for the treatment of drilling water. The study carried out on the CEVITAL industry is presented in several parts. The first part describes the station studied at the level of complex CEVITAL giving generalities on the procedure of water treatment.

The second part focuses on the description of the multicellular centrifugal pump that feeds the membrane network.

The following section details the membranes by giving their classifications, separation procedures, filtration domains, etc.

The last part is dedicated to the study and design of the multicellular pump KSB HGM  $\frac{3}{4}$  as well as the calculation on the membrane (concentration, osmotic pressure, permeability, conversion rate).

**Keywords:** Membranes, water treatment, multicellular pump, osmotic pressure, permeability, conversion rate.