

Table des matières

Introduction générale

Liste des figures

Liste des équations

Liste des courbes

Nomenclatures

Liste des abréviations

Chapitre 01 : Types de dessalement.....1

Introduction 2

I. Dessalement 2

II. Procédés de dessalement 3

II.1 Procédé thermique 4

II.1.1 Distillation à effet simple 4

II.1.2 Distillation à effets multiples 5

II.1.3 Distillation par détente à étages multiples..... 6

II.1.4 Distillation par compression de vapeur 6

II.2 Procédés à membrane 8

II.2.1 Définition des membranes..... 8

II.2.2 Procédé d'électrodialyse..... 11

II.2.3 Procédé d'osmose inverse 12

III. Comparaison entre différentes technologies 16

Conclusion..... 16

Chapitre 02 : Description de la station de dessalement Honaine17

Introduction 18

I. Eau en Algérie..... 18

II. Dessalement en Algérie 19

III.	Présentation de l'usine de dessalement d'eau de mer de Honaine	20
III.1	Introduction	20
III.2	Description de société	20
III.3	Situation géographique	21
III.4	Processus du dessalement appliqué dans la station du dessalement de Honaine	22
III.4.1	Captage de l'eau de mer	22
III.4.2	Prétraitements	25
III.4.3	Etape osmose inverse	30
III.5	Stockage et distribution de l'eau produite	36
	Conclusion	36
	Chapitre 03 : Rappel sur les pompes et les conduits.....	37
	Introduction	38
I.	Pompe	39
II.	Types des pompes	40
II.1	Pompe volumétrique	40
II.1.1	Pompes volumétriques rotatives	40
II.1.2	Pompes volumétriques alternatives	44
II.2	Turbopompes.....	47
II.2.1	Classification des pompes turbopompe	47
III.	Pompes centrifuges	50
III.1	Composants d'une pompe centrifuge	50
III.2	Evolution du fluide à l'intérieur de la roue.....	52
III.3	Equation fondamentale des turbopompes	54
III.4	Théorie des pompes centrifuges	58
III.5	Problèmes de fonctionnement de la pompe	62
III.6	Courbes caractéristique de la pompe centrifuge	64
III.6.1	Courbe hauteur-débit	64

III.6.2	Courbe Puissance-débit	65
III.6.3	Courbe Rendement-débit	65
III.6.4	Courbe NPSH-débit	66
III.7	Couplage des pompes	66
IV.	Calculs des conduites	67
IV.1	Propriétés du fluide	67
IV.1.1	Pression	67
IV.1.2	Viscosité	67
IV.1.3	Masse volumique	67
IV.2	Dynamique des fluides incompressibles	67
IV.2.1	Débit	67
IV.3	Régimes d'écoulements	70
IV.3.1	Régime laminaire	70
IV.3.2	Régime transitoire	70
IV.3.3	Régime turbulent	70
IV.3.4	Nombre de Reynolds	71
IV.4	Équation de conservation de la masse ou équation de continuité	71
IV.4.1	Conservation du débit	72
IV.4.2	Expression du débit en fonction de la vitesse.....	72
IV.4.3	Vitesse	73
IV.5	Equation de Bernoulli	74
IV.5.1	Cas des fluides parfaits.....	74
IV.5.2	Cas d'échanges d'énergie	75
IV.5.3	Cas de pertes de charge	76
IV.6	Pertes de charges.....	76
IV.6.1	Pertes de charge linéaires	78
IV.6.2	Diagramme universel de Moody	80

IV.7 Pertes de charge singulière	82
IV.8 Courbe de réseau.....	82
V. Point de fonctionnement	84
Conclusion	85
Chapitre 04 : Calculs de la station de pompage de Honaine	86
Introduction	87
I. Calcul de la station de pompage	88
I.1 Données du calcul	88
I.2 Calcul de la première partie	89
I.2.1 Pertes de charge linéaires pour un conduit.....	89
I.2.2 Pertes de charge singulières, pour un conduit	91
I.3 Calcul de la deuxième partie	92
I.3.1 Pertes de charge linéaires.....	93
I.3.2 Pertes de charge singulières	95
1. Calcul de la perte de charge du té	95
II. Les courbes	96
1. Première partie	96
2. Deuxième partie	97
II.1 Courbes de réseaux	99
II.2 Courbes des pompes	103
II.3 Courbe de point de fonctionnement	107
III. Interprétation du résultat	112
Conclusion	113

Conclusion générale

Bibliographie

Annexes

Liste des figures

Chapitre 01 : Types de dessalement

Figure 1-1: Schéma général d'une installation de dessalement	3
Figure 1-2: Distillateur simple effet	4
Figure 1-3: Distillation à effet multiple	5
Figure 1-4: Distillation par détente à étages multiples	6
Figure 1-5: Distillation par copression de vapeur	7
Figure 1-6: Membrane à module plaque	8
Figure 1-7: Membrane à module tubulaire	9
Figure 1-8: Membrane à module à fibre creuses	9
Figure 1-9: Membrane à module spirale	10
Figure 1-10 : Coupe de membrane	10
Figure 1-11 : Dessalement au procédé électrodialyse	12
Figure 1-12: Principe de fonctionnement de l'osmose inverse	13
Figure 1-14: Installation hybride	15
Figure 1-15: Humidification solaire	15

Chapitre 02 : Description de la station de dessalement Honaine

Figure 2-1 : Distribution de l'eau douce dans le monde	18
Figure 2-2 : Stations de dessalement en Algérie	19
Figure 2-3 : Présentation de l'AEC	21
Figure 2-4 : Présentation de la station de dessalement	22
Figure 2-5 : Tamis auto nettoyage	23
Figure 2-7 : Photo au niveau de la station de pompage	23
Figure 2-8 : Diagramme de processus de dessalement de l'eau de mer	24
Par osmose inverse au niveau de la station de dessalement d'eau de mer "Honaine"	24
Figure 2-9 : Citernes de l'hypochlorite de sodium et chlorure ferrique	25
Figure 2-10 : Module de filtration à sable et anthracite	26
Figure 2-11 : Filtres à sable et anthracite	27
Figure 2-13 : Cartouches filtrantes	29
Figure 2-12 : Filtre à cartouche	29
Figure 2-13 : Pompage intermédiaire	30
Figure 2-13 : Châssis à membrane	30
Figure 2-15 : Pompe à haut pression	31

Figure 2-14 : Phénomène de l'osmose et l'osmose inverse.....	31
Figure 2-16 : Système d'échange de pression	32
Figure 2-17 : Système de pompage haute pression, pompes Booster et récupérateurs d'énergie	34
Figure 2-18 : Chambres de reminéralisations.....	35
Figure 2-19 : Chambres de reminéralisations à l'intérieur.....	35
Figure 2-20 : Réservoir de CO₂	35
Figure 2-21 : Collecteur de distribution.....	36

Chapitre 03 : Rappel sur les pompes et les conduits

Figure 3-1: Roue à godet chinoise	38
Figure 3-2: Illustration de Jacob Leupold	38
Figure 3-3 : Illustration de la vis d'Archimède.....	39
Figure 3-4: Types des pompes	40
Figure 3-5: Types des pompes à palettes	41
Figure 3-6 : Pompes à engrenage	42
Figure 3-7 : Pompe hélicoïdale	43
Figure 3-8 : Pompe péristaltiques	43
Figure 3-9: Pompe à vis (exemple 3 vis).....	44
Figure 3-10 : Pompe à piston	45
Figure 3-11: Pompe à membrane	46
Figure 3-12: Pompe doseuse	47
Figure 3-13: Composants d'une pompe centrifuge.....	51
Figure 3-14: Types de roue	51
Figure 3-15: Direction de vitesse dans la pompe	53
Figure 3-16: Triangle de vitesse dans la roue	53
Figure 3-17: Sortie de la pompe.....	57
Figure 3-18: Choix de pompe.....	58
Figure 3-19: Rendement en fonction de débit.....	59
Figure 3-20: Hauteur manométrique en fonction de débit	61
Figure 3-21: NPSH disponible pour la pompe en aspiration	62
Figure 3-22 : NPSH disponible pour la pompe en charge.....	62
Figure 3-23 : Problème de cavitation	64
Figure 3-24: Courbe de la hauteur en fonction du débit	64

Figure 3-25: Courbe de la puissance en fonction de débit	65
Figure3-26 : Courbe de rendement en fonction de débit.....	65
Figure 3-27: Courbe de NPSH en fonction de débit	66
Figure 3-28: Couplage de deux pompes en série	66
Figure 3-29: Couplage de deux pompes en parallèles	66
Figure3-30: Répartition de la vitesse entre deux plaques	68
Figure 3-31: Représentation de l'écoulement	72
Figure 3-32: Conservation d'énergie	72
Figure 3-33: Représentation de vitesse	73
Figure 3-34: Vitesse moyenne	74
Figure 3-35: Théorème de Bernoulli.....	74
Figure 3-36: Types de rugosité de parois	77
Figure 3-37: Diagramme de Moody ($k=\epsilon$)	81
Figure 3-38: Courbe de réseau en fonction de débit	83
Figure 3-39:Couplage de réseau en parallèle	84
Figure 3-40:Couplage en série	84
Figure 3-41 : Point de fonctionnement	85

Chapitre 04 : Calculs de la station de pompage de Honaine

Figure 4-1:Diagramme de la station de dessalement au niveau de captage	88
Figure 4-2: Partie une pour un conduit.....	89
Figure 4-3:Partie une pour dix conduits en parallèle	89
Figure4- 4: Schématisation de la deuxième partie de la station de pompage.....	93

Liste des équations

Chapitre 03: Rappels sur les pompes et les conduits

Equation 3-1: Mouvement du couple moteur transmis par l'arbre à la roue mobile.....	54
Équation 3-2: Puissance fournie au liquide par la roue.....	54
Équation 3-3: Puissance	55
Équation 3-4: Hauteur d'élévation théorique	55
Équation 3-5: Hauteur d'élévation théorique	56
Équation 3-6 : Coefficient de pression ψ	56
Équation 3-7: Coefficient de vitesse φ	57
Équation 3-8: Vitesse de rotation	58
Équation 3-9: Puissance utile	59
Équation 3-10: Puissance absorbée	59
Équation 3-11: Rendement totale	59
Figure 3-19: Rendement en fonction de débit	59
Équation 3-12: Hauteur manométrique totale	61
Équation 3-13: Expression de la pression	67
Équation 3-14: Formule de la viscosité dynamique	68
Équation 3-15: Formule de la viscosité cinématique	68
Équation 3-16: Débit massique	69
Équation 3-17: Débit volumique.	69
Équation 3-18: Nombre de Reynolds.	71
Équation 3-19: Débit volumique en fonction de vitesse	73
Équation 3-20 : Vitesse moyenne.....	73
Équation 3-21: Equation de Bernoulli en terme pression.....	75
Équation 3-22: Equation de Bernoulli en terme hauteur	75
Équation 3-23: Equation de Bernoulli avec échange d'énergie	76
Équation 3-24 : Equation de Bernoulli avec les pertes de charge	76
Équation 3-25: Pertes de charge linéaires	78
Équation 3-26: Coefficient de perte de charge en régime laminaire.....	78
Équation 3-27 : Formule de Blasius	79
Équation 3-28 : Formule de Von Karman	79
Équation 3-29: Formule de Nikuradse	79
Équation 3-30 : Formule de Colebrook	80



Équation 3-31 : Pertes de charge singulières	82
Équation 3-32: Formule de courbe de réseaux.....	83
Chapitre 04 : Calcule de station de pompage de la station de dessalement Honaine	
Équation 4-1: Fonction de la première partie	97
Équation 4-2: Fonction de la deuxième partie.....	97

Liste des courbes

Chapitre 04 : Calcul de la station de pompage Honaine

Figure 4-1: Courbe de perte de charge entre la sortie de la pompe et l'entrée du collecteur....	98
Figure 4-2: Courbe de perte de charge entre collecteur et l'entrée de système de filtration pour une pompe en marche.	99
Figure 4-3: Courbe de réseau pour un conduit	100
Figure 4-4: Courbe de réseau pour six conduits.....	101
Figure 4-5: Courbe de réseau pour huit conduits	102
Figure 4-6: Courbe de réseau pour dix conduits	103
Figure 4-7: Courbe caractéristique de la pompe	104
Figure 4-8: Courbe de six pompes en parallèle.....	105
Figure 4-9: Courbe de huit pompes en parallèle	106
Figure 4-10: Courbe de huit pompes en parallèle	107
Figure 4-11: Courbes donnant le point de fonctionnement pour une pompe en marche	108
Figure 4-12: Courbe point du fonctionnement pour dix pompes en parallèle en marche.....	109
Figure 4-13: Courbe point du fonctionnement pour huit pompes en parallèle en marche..	110
Figure 4-14: Courbe point du fonctionnement pour six pompes en parallèle en marche	111

NOMENCLATURES

Grandeurs	Désignations	Unités
C	Couple moteur	mN
C ₀	Concentration molaire du soluté	mol. m ⁻³
g	Gravité	m/s ²
H _h	Charge hydraulique du fluide	m
H _{MT}	Hauteur manométrique totale	m
H _{TA}	Hauteur totale d'aspiration	m
H _{TR}	Hauteur totale de refoulement	m
H _{geo}	Hauteur géométrique	m
J _L	Pertes de charge linéaires	m
J _s	Pertes de charge singulières	m
NPSH	Net Positive Suction Head	m ou Pa
P	Puissance	W
P _u	Puissance utile	W
P _{abs}	Puissance absorbée	W
P _i	Puissance absorbée par la roue	W
p ₁	Pression de fluide à l'entrée de la pompe	Pa
p ₂	Pression de fluide à sortie de la pompe	Pa
Q _v	Débit volumique	m ³ /s
Q _m	Débit-massique	Kg/s
R	Constante des gaz parfaits	KJ. mol ⁻¹ . K ⁻¹
Re	Nombre de Reynolds
S	Section	m ²
T	Température	K
U _m	Vitesse moyenne du fluide	m/s

Lettre grec	Désignations	Unités
ψ	Coefficient de pression
φ	Coefficient de vitesse
λ	Coefficient de pertes de charge linières
ξ	Coefficient de pertes de charge singulières
π	Pression osmotique	Pa
ρ	Masse volumique de fluide	Kg/m ³
η_g	Rendement globale de la pompe
ϵ ou k	Rugosité de paroi	mm
ω	Vitesse de rotation	rd/sec
μ	Viscosité dynamique	N. $\frac{s}{m^2}$
ϑ	Viscosité cinématique	m ² /s

Liste des abréviations

MED	Distillation Multi-Effet
MSF	Distillation par détente à étages multiples
VC	La distillation par compression de vapeur
OI	Osmose inverse
ED	Procédé d'Electrodialyse
MEC	Membrane de transfert de cations
MEA	Membrane de transfert d'anions
MD	Distillation à membrane
AEC	Algerian Energy compagny
ADE	Algérienne des eaux
SDI	Indice d'encrassement de membrane
PRV	Conduites en Polyester Renforcé de Verre

INTRODUCTION GENERALE

L'eau est une ressource naturelle vitale pour la survie de l'humanité et de toutes les espèces vivantes.

La disponibilité de l'eau potable permet les problèmes majeurs dans le monde. Par conséquence, l'humanité développe des solutions connues comme le dessalement d'eau de mer.

Plusieurs méthodes physiques permettent l'obtention de l'eau douce à partir l'eau de mer. Celles qui ont eu un grand succès à nos jours sont la distillation et l'osmose inverse. Ces deux techniques sont implémentées à l'échelle industrielle pour des grandes capacités de production et ont connu des développements technologiques considérables afin de les rendre plus compétitifs. Les autres techniques telles que la congélation, l'humidification sont en cours de développement.

Devant l'augmentation rapide des besoins en due l'accroissant démographique et le développement industriel, l'Algérie lance un programme nationale de dessalement d'eau de mer au zone côtière dans le but d'alimenter tous le pays par l'eau dessalée.



Figure :Station de dessalement en Algerie (Djeddi M. «Alderian Energy Company Spa »l'Université des Sciences et des Technologies Houari Boumediene Mai 2014)

Permit plusieurs station de dessalement, nous sommes intéressés plus particulièrement à la station de dessalement de Honaine. Cette station utilise le procédé d'osmose inverse. Elle peut produire 200000 m³/jour pour alimenter vingt trois communes de wilaya de Tlemcen ainsi que les agglomérations urbaines du Grand-

Tlemcen. L'exploitation de ces ressources nécessite aujourd'hui des installations de grande taille, pour l'extraction, la transformation et le transfert des eaux de différents points, dans les installations industrielles, l'élément le plus intéressant sont les réseaux des conduites et les pompes.

Notre travail se compose de plusieurs parties :

Le premier chapitre traite les types de dessalement d'eau de mer. Ce chapitre donne une vue générale sur les procédés de dessalements d'eau de mer. Ces procédés trouvent plus d'avantages que d'inconvénients dans le monde.

Le deuxième chapitre a pour but d'écrire et d'expliquer le principe de fonctionnement de la station de dessalement d'eau de mer de Honaine.

Dans le troisième chapitre nous avons rappelé les connaissances théoriques sur les pompes et les conduites qui composent la station de pompage.

Le quatrième chapitre est réservé aux calculs de la station de pompage de dessalement d'eau de mer de Honaine. Il s'agit des calculs de pertes de charge des conduits pour trois situations de pompage (six pompes, huit pompes et dix pompes) et finalement déterminer le point de fonctionnement de cette station de pompage et vérifier les conditions de bon fonctionnement.

Chapitre 01

Types de dessalement

Introduction :

L'eau potable est en effet un bien indispensable à la survie, pourtant sa disponibilité n'est pas assurée partout, et la situation ne s'améliore dans la mesure où la population augmente en même temps que la pollution et le réchauffement climatique.

La surface terrestre est recouverte à 71% par des étendues d'eau. Mais plus de 97% du volume d'eau présent sur notre planète sont salés ou saumâtres. Sur les 3% d'eau douce restants, 2,1% sont gelés dans les glaciers ou autour des pôles, réservoirs très difficilement utilisables et mobilisables. Il ne reste donc que 0,9% de la réserve en eau pour couvrir les besoins humains (consommation, agriculture...).

Cette eau présente sous forme de fleuves, rivières ou de nappes souterraines n'est pas également répartie sur le globe.

L'humanité connaissait l'importance de l'eau potable donc il recherche des solutions pour protéger cette énergie. Le dessalement d'eau de mer est une réponse de plus en plus fréquente au problème croissant de la diminution des ressources d'eau, qui affecte un grand nombre de régions du monde [4]

I. Dessalement :

L'humanité connaît le dessalement à partir du quatrième siècle avant J-C. Le philosophe grec 'Aristote' remarquait qu'après la vaporisation d'eau de mer et une fois condensée ne reproduit pas l'eau de mer. Onze siècle plus tard d'Adélaide de Beth', un philosophe et naturaliste a décrit une expérience dans les questions naturelles « Au soleil, après la vaporisation sur une roche, l'eau de mer se transforme en sel. Cette transformation explique que la mer soit plus salée l'été que l'hiver, que la mer méridionales le soit davantage que les mers septentrionales ». Ce chimiste nous explique dans un premier temps le principe de la vaporisation qui se produit naturellement et son facteur extérieur sur les roches qui se trouvent aux bordures des mers grâce à l'activité du soleil .Donc la salinité d'eau de mer augmente en fonction de la proportion du sel retenu dans les roches à cause du phénomène de vaporisation.

Ce procédé a souvent été utilisé par les marins grecs qui eux dessalaient l'eau de mer dans leur croisades ; Ce qui leur permettait d'avoir des réserves d'eau potable. Ces marins utilisaient le procédé le plus simple. Ils utilisaient des casseroles et mettaient l'eau en ébullition et ainsi le sel restait au fond de ces enceintes et donc l'eau est dessalée.

Après des millions d'années, l'osmose inverse fut découverte en 1850. Ce procédé ne s'appliquera pour le dessalement d'eau de mer qu'en 1960. La première usine de dessalement en Europe été construite en 1964 aux îles canaries à cause de expansion du tourisme balnéaire et la forte demande en eau [1].

II. Procédés de dessalement :

Cependant avec les avancées techniques et le développement technologique existent différentes techniques, certaines sont plus adaptées à un environnement donné que d'autres. Actuellement on utilise cinq techniques regroupées en deux familles : les procédés de distillation et les procédés membranaires.

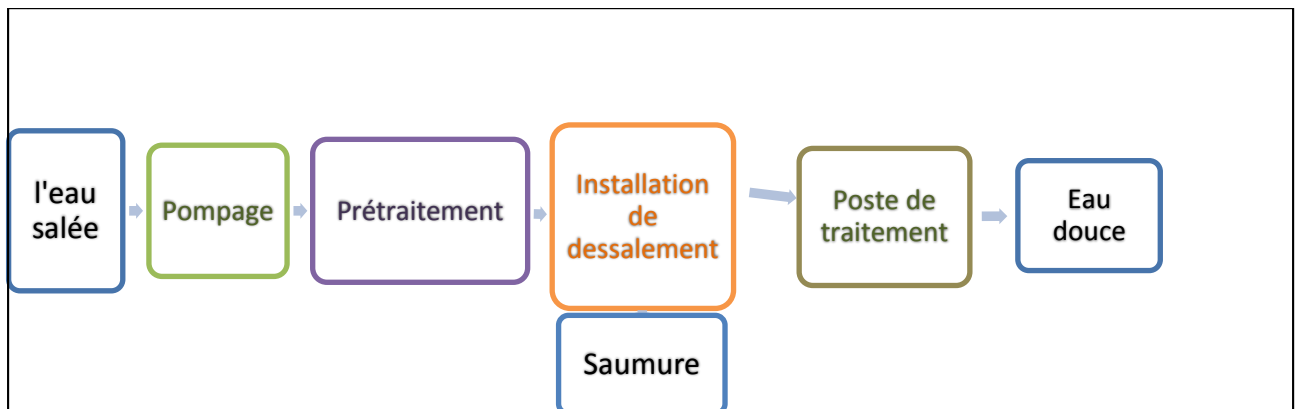


Figure 1-1: Schéma général d'une installation de dessalement

➤ **Pompage d'eau de mer :**

Il est effectué soit par l'aspiration directe ou par puits côtiers (bâche). Ce dernier système permet d'obtenir une eau non turbide, ce qui facilite les prétraitements.

- **Prétraitement:**

Chloration : Bloque l'accroissement des organismes vivants. Evite l'obstruction des conduites.

Filtration : Protège les pompes et assure le bon fonctionnement des pulvérisateurs.

Antitartre : La distillation favorise la précipitation du carbonate de calcium qui se dépose sur la paroi des échangeurs et réduit le transfert de chaleur.

- **Installation de dessalement**

Procédés de distillation : L'eau de mer chauffée produit de la vapeur d'eau qu'il suffit de condenser pour obtenir de l'eau pure.

Procédés membranaires : L'eau et les sels dissous sont séparés au moyen des membranes sélectives.

- Post-traitement :

Permet de potabilité l'eau en deux étapes (en sortie de l'unité de dessalement, l'eau n'est pas potable car elle est déminéralisée) :

Correction de la corrosivité : Le traitement consiste à ajouter du $Ca(OH)_2$ ou du $CaCO_3$.

Désinfection finale : Bien que certains procédés (osmose inverse) retiennent tous les microorganismes, il est nécessaire d'assurer une désinfection à la sortie de l'usine.

II.1 Procédé thermique (distillation):

Environ la moitié de l'eau dessalée dans le monde est produite au moyen de la chaleur servant à distiller de l'eau douce à partir de l'eau de mer. Le procédé par distillation reproduit le cycle naturel de l'eau puisqu'il consiste à chauffer de l'eau salée. La production de vapeur d'eau est à son tour condensée pour former de l'eau douce.

Dans l'usine, l'eau est chauffée jusqu'à ébullition pour produire la quantité maximale de vapeur. Pour que le procédé soit économiquement rentable, la pression appliquée sur l'eau à bouillir est ajustée pour maîtriser le point d'ébullition.

II.1.1 Distillation à effet simple :

Son principe est simple : il reproduit le cycle naturel de l'eau.

1. Dans une enceinte fermée, un serpentin de réchauffage porte à ébullition l'eau de mer.
2. La vapeur produite se condense au contact d'un deuxième serpentin alimenté par l'eau de mer froide.
3. Un groupe électropompe soutire l'eau condensée, un deuxième l'eau de mer on centrée ou saumure.

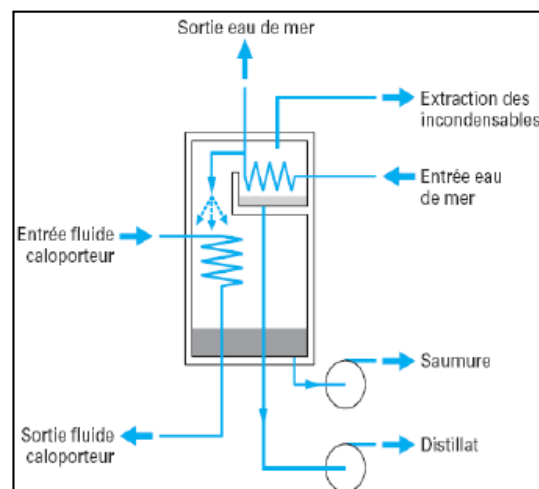


Figure 1-2: Distillateur simple effet.[2]

Cette première solution est simple à mettre en œuvre mais n'offre qu'un rendement réduit, aussi elle n'est utilisée que dans les navires disposant d'une source d'énergie thermique.[2]

II.1.2 Distillation à effets multiples ou Distillation Multi-Effet (MED) :

L'évaporateur MED est constitué de plusieurs cellules simples consécutives, dans lesquelles on diminue la pression et la température du premier (chaud) au dernier (le froid). Chaque cellule contient un faisceau de tubes. Le sommet du faisceau est arrosé avec l'eau de mer qui coule autour des tubes par gravité. La chaleur cédée lors de la condensation réchauffe l'eau de mer à l'extérieur des tubes qui s'évapore en partie. Après l'évaporation, l'eau de mer se concentre en donnant de la saumure au fond de la cellule.

La vapeur créée par l'évaporation de l'eau de mer est utilisée comme moyen de chauffage pour l'effet suivant où le processus se répète.

Dans la dernière cellule, la vapeur produite se condense dans un échangeur thermique. Cet échangeur, est rafraîchi par l'eau de mer. À la sortie du condenseur final, la partie de l'eau de mer réchauffée est utilisée pour alimenter l'unité, l'autre partie est rejetée à la mer. La saumure et le distillat sont collectés dans chaque cellule d'où ils sont extraits par des pompes centrifuges. Cette solution apporte une amélioration du rendement par rapport à la première. Une amélioration significative de l'efficacité du système est apportée par la compression de vapeur.

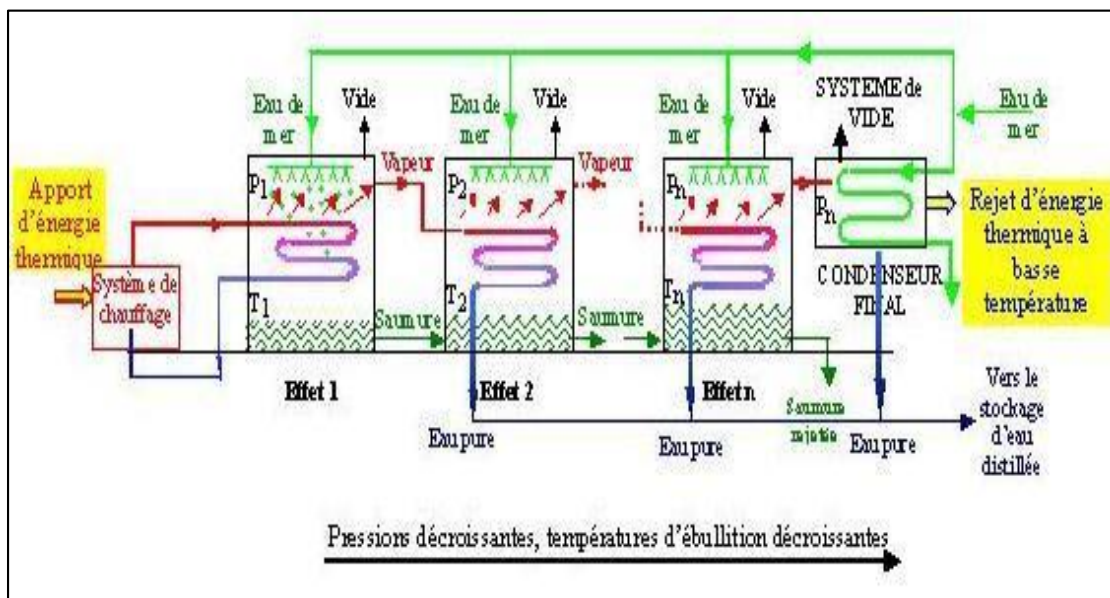


Figure 1-3: Distillation à effet multiple [14]

Dans cette catégorie, on distingue deux de procédés : les uns utilisent des tubes verticaux, les autres des tubes horizontaux. L'avantage revient aux tubes horizontaux pour une puissance de pompage moindre et un coefficient global d'échange thermique plus important [14].

II.1.3 Distillation par détente à étages multiples ou Distillation Multi stage Flashe (MSF)

Cette technologie est apparue en 1960 pour faire face aux problèmes d'entartrage que connaissent les procédés de distillation à multiples effets. L'eau salée est introduite à T_0 en serpente à travers les différentes chambres en condensant de la vapeur au passage. Elle passe ensuite dans un réchauffeur où elle atteint T_{max} puis elle est introduite dans les chambres où elle se vaporise puis se condense sur le serpentin. L'eau condensée est récupérée alors que la saumure est évacuée. [14]

On remarque lors du phénomène de flash que des gouttelettes d'eau salée peuvent être entraînées avec la vapeur, elles sont séparées grâce à un dévésécuteur constitué par une sorte de grillage qui limite le passage des gouttelettes qui retombent alors au fond de l'enceinte. Une usine MSF comporte 15 à 25 étages.

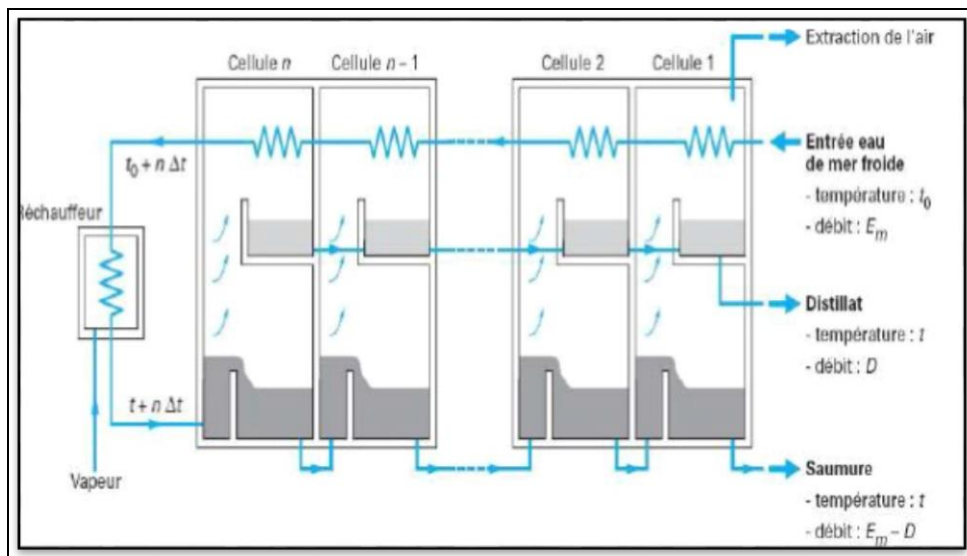


Figure 1-4: Distillation par détente à étages multiples [14]

II.1.4 Distillation par compression de vapeur ou Vapeur Compression (VC) :

Dans ce procédé, l'eau à dessaler est portée à ébullition dans une enceinte isolée thermiquement. La vapeur produite est aspirée par un compresseur qui élève sa température de saturation. Cette vapeur traverse ensuite un faisceau tubulaire et se condense en provoquant l'ébullition de l'eau salée.

Les unités VC sont souvent utilisées pour les stations de villégiature, les zones industrielles et de forage ne pouvant avoir un accès facile à de l'eau douce. Leur simplicité et facilité d'exploitation se prêtent bien à de petite installation [14].

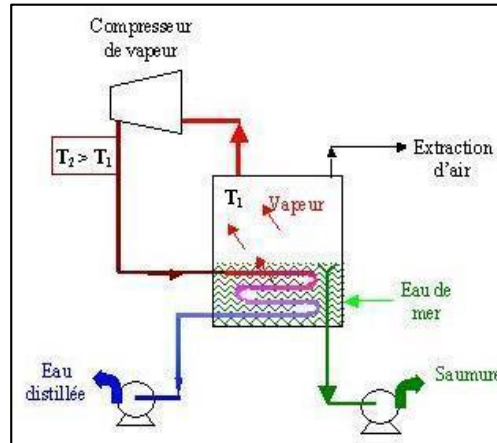


Figure 1-5: Distillation par copression de vapeur [14]

➤ **Avantage des procédés thermiques :**

- ✓ Technologie maîtrisée depuis plusieurs années et couronnées de succès.
- ✓ Nécessite un prétraitement minimal par rapport au procédé OI
- ✓ Produit une eau très faible en total des solides dissous
- ✓ Consomme beaucoup moins de vapeur en fonctionnement normal
- ✓ Procédé MSF dispose de la plus grande capacité installée parmi tous les processus de dessalement grâce à l'évolutivité, à la fiabilité et à la robustesse du procédé
- ✓ Sources d'énergies renouvelables thermiques telles que l'énergie solaire et l'énergie géothermique [1].

➤ **Inconvénients des procédés thermiques :**

- ✓ Consommation d'énergie relativement élevée (par rapport à l'OI), recommandé pour les installations de petite capacité en zones rurales.
- ✓ Nécessite quasiment la même énergie pour le dessalement de l'eau de mer et de l'eau saumâtre.
- ✓ Consommateur d'énergie électrique sont nécessaires pour faire fonctionner le compresseur de vapeur.
- ✓ Les besoins en produits chimiques pour la reminéralisations sont élevés comparé au procédé OI.
- ✓ Le compresseur nécessite une maintenance intensive et des techniciens qualifiés
- ✓ Les besoins élevés en eau de refroidissement font que ces installations sont adaptées aux zones côtières uniquement [2].

II.2 Procédés à membrane :

Les membranes jouent un rôle très important pour séparer les sels à partir du processus de l'électrodialyse et l'osmose inverse.

II.2.1 Définition des membranes :

Les membranes, qui permettent la pressurisation de l'eau, sont emprisonnées dans des modules pour augmenter la surface de contact avec les eaux douces et salées. Les membranes épaisses comme feuille de papier sont agencées en modules. Elles sont le plus souvent fabriquées en acétate de cellulose ou en polymères de synthèse.

Elles sont caractérisées par leurs qualités de stabilité chimique (pH, oxydants, chlore), de stabilité thermique (important facteur pour les utilisations biologiques où il y a stérilisation en autoclave), de stabilité microbiologique (dégradation bactérienne pour les membranes en acétate de cellulose) et de résistance mécanique. Leur coût intervient dans 40 à 50 % de l'investissement d'une unité d'osmose inverse. Pour être mises en œuvre les membranes doivent être montées dans des supports appelés modules. Une enceinte résistant à la pression est toujours nécessaire [3].

II.2.1.1 Types de module :

Pratiquement, les membranes sont assemblées sous forme de modules regroupant généralement plusieurs membranes. Actuellement, quatre principaux types de module sont commercialisés :

Module à plaque :

Assemblage de membranes planes et de cadres séparateurs plans ou de plaques, ainsi que de dispositifs d'amenée et d'évacuation des fluides et éventuellement d'électrodes. Ce type de membrane présente l'avantage d'une accessibilité aisée et de n'avoir qu'un faible volume mort.

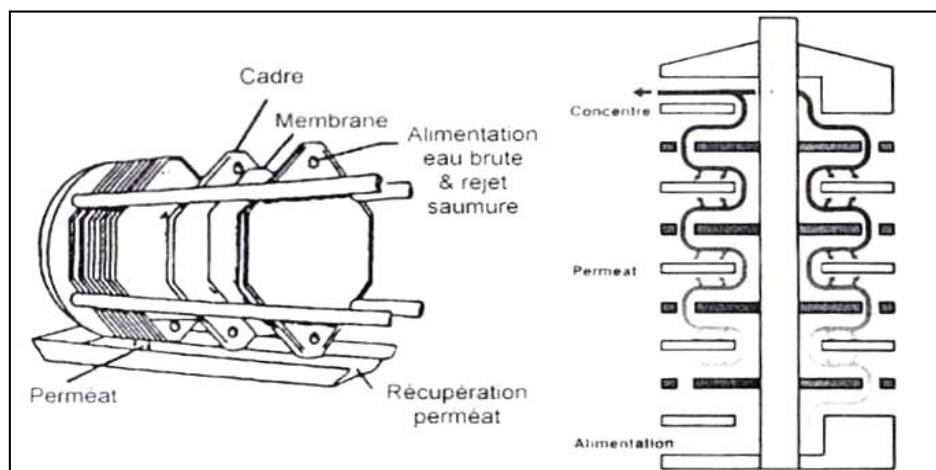


Figure 1-6: Membrane à module plaque (deux exemples) [3]

- Module tubulaire :

Un module tubulaire contient plusieurs tubes qui peuvent être en série ou en parallèle. L'eau à traiter circule à l'intérieur des tubes et le perméat est recueilli à l'extérieur des tubes.

Les tubes constituent des canaux d'écoulement tangentiel. L'écoulement à l'intérieur des tubes est turbulent.

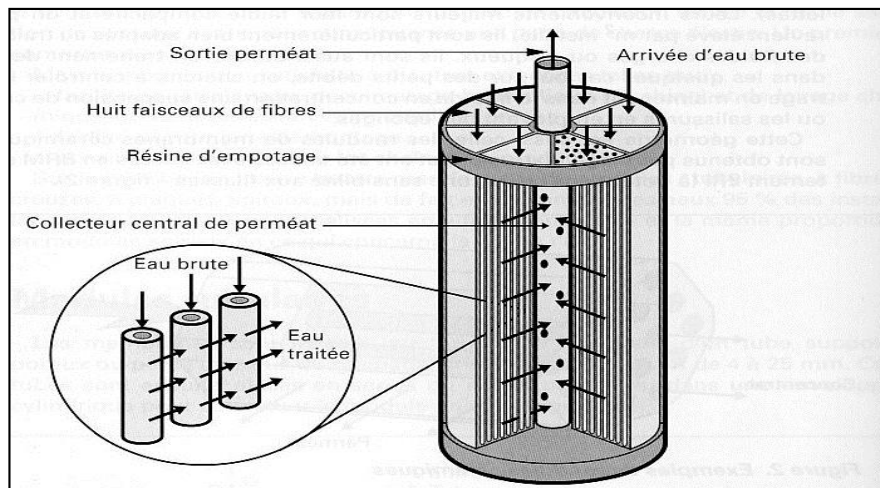


Figure 1-7: Membrane à module tubulaire [3]

- Module à fibres creuses :

Les fibres en U sont mises en faisceau et assemblées de façon à réaliser l'étanchéité aux deux extrémités du module. Le liquide à traiter circule perpendiculairement à l'axe des fibres tandis que le concentrât est recueilli dans une enceinte qui enveloppe le faisceau et permet son évacuation à une des extrémités du module. Le perméat s'écoule à l'intérieur de chacune des fibres puis dans un collecteur.

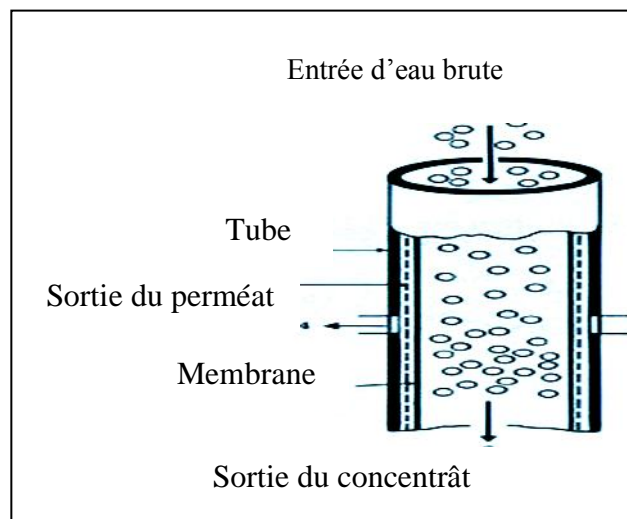


Figure 1-8: Membrane à module à fibre creuses [3]

- Module spiral :

Les membranes de modules spirales forment de mille feuilles de forme cylindrique de diamètre ne dépassant pas 40 cm et de longueur 1m. Le module spiral contient 30 m² de membranes.

L'eau de mer entre par le tube troué et l'eau douce uniquement dans les espaces créés par les petites grilles d'espacement. Toutes les couches sont enroulées autour du tube et il y a un trou dans celui-ci quand il est en contact avec les grandes grilles d'espacement. Ainsi l'eau de mer va envahir les espaces créés par les grandes grilles d'espacement.

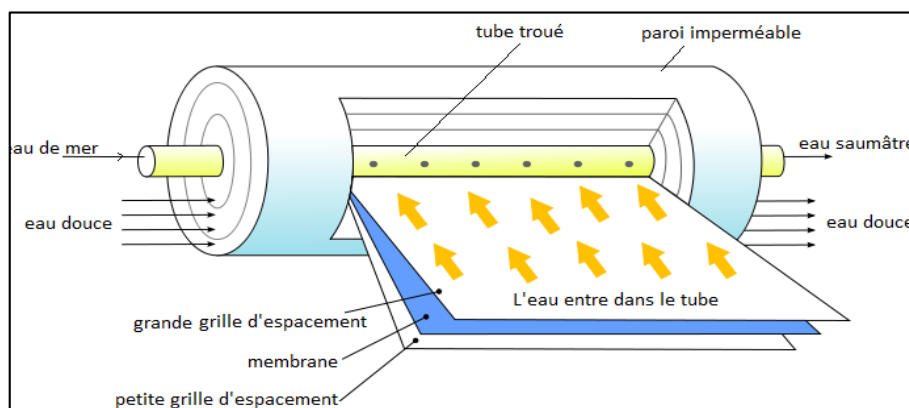


Figure 1-9: Membrane à module spirale [3]

II.2.1.2 Rôle de membrane :

Les membranes d'osmose inverse agissent comme un filtre retenant la majorité des particules dissoutes dont la taille est supérieure à 1 Angström (bactéries, virus, matières organiques), ainsi que les ions monovalents et bivalents. Lorsque les membranes filtrent deux solutions aqueuses de concentration saline différente, les molécules d'eau passent spontanément de la solution la moins concentrée en sel à la plus concentrée afin d'équilibrer le rapport en ions. Il s'agit du phénomène d'osmose naturelle.

Pour inverser le processus, on applique à la solution concentrée une pression supérieure à la pression osmotique. Avec des pressions d'alimentation

généralement comprises entre 60 et 70 Bar, l'osmose inverse peut traiter 40 à 60 % d'eau de mer ou saumâtre en eau douce. La solution saline obtenue est séparée en

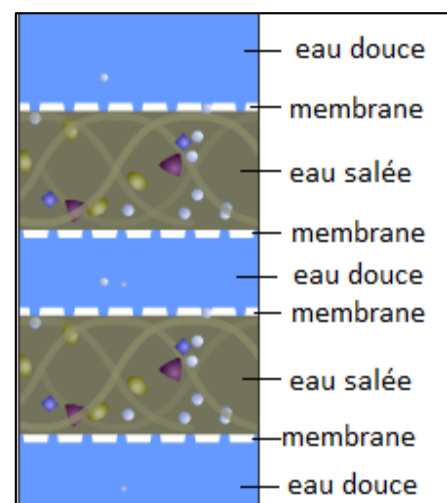


Figure1- 10 : Coupe de membrane [14]

deux : le perméat, constitué par de l'eau douce exempte de particules et impuretés, et le concentra, qui est de la saumure enrichie de matières dissoutes [14].

II.2.1.3 Durée de vie des membranes :

Il est très difficile de déterminer exactement la durée de vie des membranes d'osmose inverse. En effet, la durée de vie dépend de la nature de la membrane mais aussi de ses conditions d'utilisation, notamment:

La pression de fonctionnement, la température de l'eau, le pH de l'eau et surtout la qualité du prétraitement

II.2.1.4 Problèmes techniques :

- Colmatage :

Le colmatage peut être défini comme l'ensemble des phénomènes qui interviennent dans la modification des propriétés de filtrations d'une membrane, excepté la compaction et la modification chimique. Il s'agit de phénomènes physiques, chimiques, biologiques, qui se produisent à l'interface membrane-solution ou dans le volume poreux, dont la conséquence est une obstruction des pores entraînant à la fois des variations de perméabilité et de sélectivité.

- Entartrage :

L'entartrage des membranes est dû à la précipitation de certains sels dissous si leur produit de soluté a été dépassé. Ce phénomène peut avoir dans la teneur en sels dissous qui augmente au fur et à mesure de la traversée des éléments successifs logés dans le corps de pression, augmentation due à la perméation d'une partie de l'eau.

- Dégradation :

La dégradation de la structure membranaire peut être provoquée par la présence de résiduels d'oxydants ayant servis au prétraitement de l'eau d'alimentation, on peut déduire l'importance des prétraitements qui doivent être avant tout bien conçus et bien dimensionnés, sans parler également d'un bon dimensionnement de l'osmoseur (surface membranaire-vitesse tangentielle).

II.2.2 Procédé d'électrodialyse (ED) :

Le procédé d'électrodialyse a été introduit sur le marché au début des années 1960. L'unité ED de base se compose de plusieurs centaines de cellules reliées entre elles par des électrodes à un bloc l'extérieur qui constitue la pile. L'eau d'alimentation passe simultanément à travers toutes les cellules en fournissant un courant continu d'eau dessalée et de saumure concentrée qui dépend de la conception du système. Les

deux compartiments sont alimentés avec une solution saline MX (M^+ , X^-) de concentration C_0 . Sous l'effet du courant, les cations M^+ , qui migrent vers la cathode, traversent les MEC et sont stoppés par les MEA. De la même manière, les anions X^- , qui migrent vers l'anode, traversent les MEA et sont stoppés par les MEC.

On obtient ainsi, en sortie d'empilement, deux solutions : une solution MX « déminéralisée », appelée diluât, dont la concentration est inférieure à la concentration d'entrée, et une solution MX « concentrée », appelée concentrât, dont la concentration est supérieure à la concentration d'entrée. Des produits chimiques peuvent être ajoutés au circuit pour réduire le pouvoir d'entartrage [1].

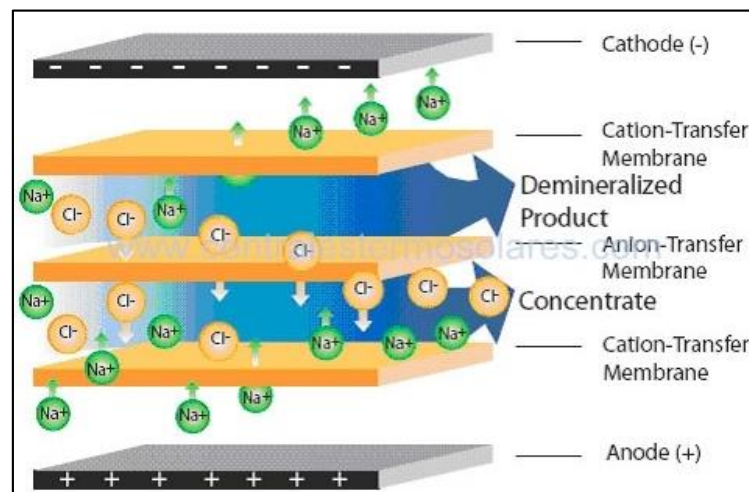


Figure 1-11 : Dessalement au procédé électrodialyse (exemple Na Cl [1])

II.2.3 Procédé d'osmose inverse :

Le procédé OI consiste à séparer les substances dissoutes d'une solution salée pressurisée en la faisant diffuser à travers une membrane. En pratique, l'eau d'alimentation est pompée dans une cuve étanche où elle est pressurée contre la membrane. À mesure qu'une fraction de l'eau diffuse à travers la membrane, la teneur en sels de la fraction restante augmente. Dans le même temps, une partie de cette eau d'alimentation est rejetée, sans diffuser à travers la membrane. Sans ce rejet régulateur, l'eau d'alimentation pressurisée continuerait à accroître sa concentration en sels, ce qui engendrerait des problèmes tels que la précipitation des sels sursaturés et une pression osmotique accrue à travers la membrane [2].

➤ Un système OI se compose des éléments de base suivants :

- Prétraitement
- Pompes à haute pression
- Bloc membrane

- Post-traitement

➤ **Le principe de l'osmose inverse :**

A: Le niveau est identique dans les deux compartiments: L'eau circule de 1 vers 2.

B: A l'équilibre, une différence de niveau s'établit, c'est la pression osmotique π .

C: On applique une pression $P > \pi$, l'eau circule en sens inverse, c'est-à-dire de 2 vers 1 et les sels restent bloqués dans le compartiment 2.

Avec π : pression osmotique ou différence de pression de part et d'autre de la membrane.

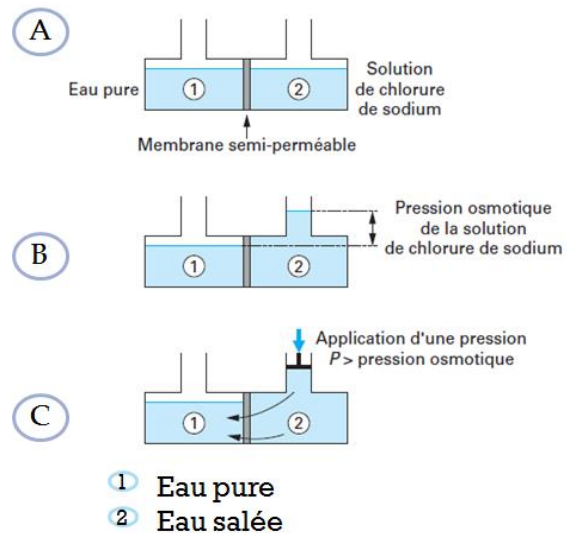


Figure 1-12: Principe de fonctionnement de l'osmose inverse [1]

Avantages de procédé à membrane :

- ✓ Technologie éprouvée qui a fait ses preuves avec succès.
- ✓ Peut être utilisée pour le dessalement de l'eau de mer, des eaux saumâtres même à forte salinité.
- ✓ Consomme moins d'énergie que les procédés thermiques.
- ✓ Coût d'investissement plus faible que les procédés thermiques.
- ✓ Nécessite moins d'eau d'alimentation que les procédés thermiques.
- ✓ Le développement de nouvelles membranes à haute productivité, qui s'encrassent moins et consomment moins d'énergie, conduisent à des améliorations futures du procédé qui le rendent plus attractif
- ✓ Membrane ED est plus résistante et a une durée de vie supérieure à celle d'une membrane OI.
- ✓ Démarrage et arrêt rapides [2].

Inconvénients :

- ✓ Un système élaboré de prétraitement est nécessaire contrairement aux procédés thermiques.
- ✓ Utilisation un peu plus complexe par rapport aux procédés MSF et DME, exigeant un haut niveau de connaissances de la part des exploitants.

- ✓ Encrassement rapide des membranes
- ✓ Le rejet de sel de procédé ED (50 – 90%) n'est pas aussi bon qu'avec le procédé OI (90-99%)
- ❖ Il ya d'autre procédé pour faire le dessalement d'eau de mer. Ces procédés sont moins rentables que l'osmose inverse ou la distillation, à savoir :

➤ Congélation :

Le dessalement par congélation est basé sur le changement de phase liquide-solide de l'eau de mer. Selon la thermodynamique, la glace formée à partir de l'eau de mer est pure. Elle peut être séparée de la solution concentrée, puis fondue afin d'obtenir une eau douce.

➤ Distillation à membrane :

La distillation membranaire est une technologie émergente pour le dessalement. Elle diffère des autres technologies membranaires : la force agissante pour le dessalement est la différence de la pression de vapeur d'eau à travers la membrane, plutôt que la pression totale. Les membranes de MD sont hydrophobes, ce qui permet à la vapeur d'eau (mais pas à l'eau liquide) de passer.

Le gradient de pression de vapeur est créé par chauffage de l'eau, élevant ainsi sa pression de vapeur. Le besoin majeur en énergie est pour l'énergie thermique [14].

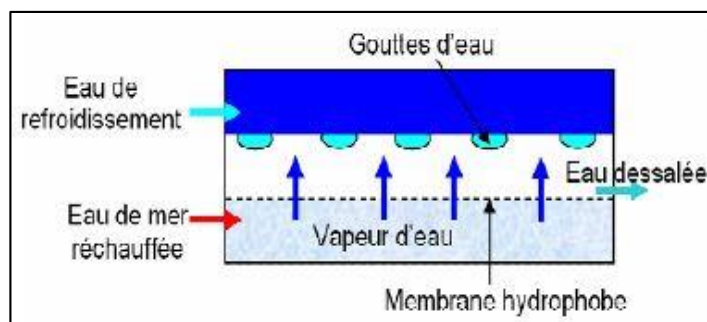


Figure 1-13: Distillation à membrane [14]

➤ Procédés hybrides :

Le concept de dessalement par voie hybride combine deux ou trois procédés pour fournir une meilleure solution technico-économique.

Les trois éléments qui sont intégrés sont :

- une unité de distillation en général « multi flash » (MSF)

- une unité d'osmose inverse OI
- une centrale thermique

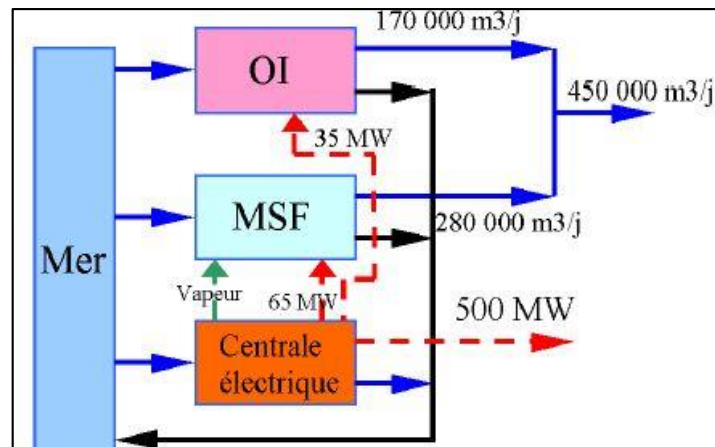


Figure 1-14: Installation hybride [2]

Il est donc possible de satisfaire, à moindre coût, les demandes en eau et en électricité. En effet, contrairement à l'électricité, l'eau peut être stockée pendant les périodes de faible demande électrique, tout ou partie de l'excès de production d'électricité est utilisé pour le dessalement par osmose inverse. La production peut varier rapidement, cela permet d'ajuster la production aux besoins [2].

➤ Humidification solaire :

L'utilisation de l'énergie solaire directe pour dessaler l'eau salée a été envisagée, et divers dispositifs ont été mis au point, ils reproduisent généralement une partie du cycle hydrologique naturel puisque les rayons du soleil chauffent l'eau salée avec production de vapeur d'eau (humidification). La vapeur d'eau est alors condensée sur une paroi froide et le condensat recueilli sous forme d'eau douce. Une application de ce type d'unités d'humidification solaire a servi à dessaler de l'eau salée dans de petits villages où l'énergie solaire est abondante et la main-d'œuvre bon marché, mais où l'électricité est rare et d'un coût élevé [1].

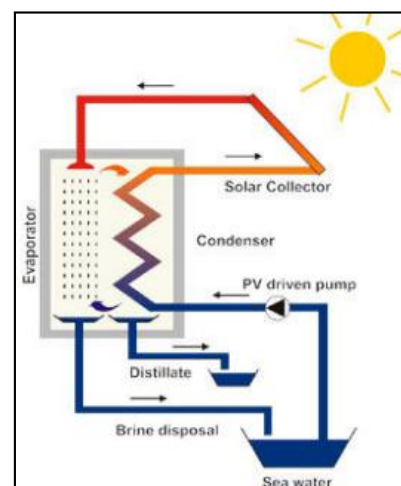


Figure 1-15: Humidification solaire [1]

III. Comparaison entre différentes technologies :

	MSF	MED	MVC	OI	ED
Température de fonctionnement (°C)	<120	<70	<70	<45	<45
Principale source d'énergie	Thermique	Thermique	Mécanique (via électricité)	Mécanique (via électricité)	Mécanique (via électricité)
Consommation thermique (kWh/m³)	12	6	Pas applicable	Pas applicable	Pas applicable
Avantages	Technique éprouvée	20 % moins cher que le MSF	Simplicité	Modularité	Modularité
Inconvénients	Investissement consommation	Capacité plus faible que MSF	Capacité limitée	Fragilité	Fragilité

Tableau 1: Comparaison entre les différents types de dessalement [14]

Conclusion :

Le dessalement d'eau de mer est la réponse la plus simple au problème de démunitions des ressources d'eau. Les usines de distillation sont pratiquement toutes couplées à des centrales énergétiques, d'ailleurs leurs exploitations requièrent pratiquement les mêmes compétences que celles des centrales classiques.

Au contraire, l'osmose inverse s'impose lorsque l'on a besoin d'eau sans devoir augmenter en parallèle la puissance électrique disponible. Très souple et modulaire, elle peut s'adapter à court et long termes à la demande en eau. Son exploitation requiert des compétences voisines de celles des unités de traitement des eaux : physico-chimie, biologie.

Chapitre 02

Description de la station de dessalement
de Honaine

Introduction :

L'eau douce ne représente que 2,5 % du volume total d'eau sur la planète avec une distribution inégale. Certaines régions possèdent une capacité énorme d'eau douce, c'est le cas par exemple du Canada, du Chili, de la Nouvelle-Zélande ou de la Norvège où les disponibilités en eau dépassent les 50 000 m³ par personne et par an. D'autres, au contraire, souffrent de pénuries, chaque année, plus graves ; c'est le cas des pays du Maghreb, du Golfe ou de l'Asie Centrale où les disponibilités en eau sont inférieures à 1 000 m³ par personne et par an. Ces régions sont en voie de développement, et sont d'autant plus exposées que la croissance de la population créée est rapide [11].

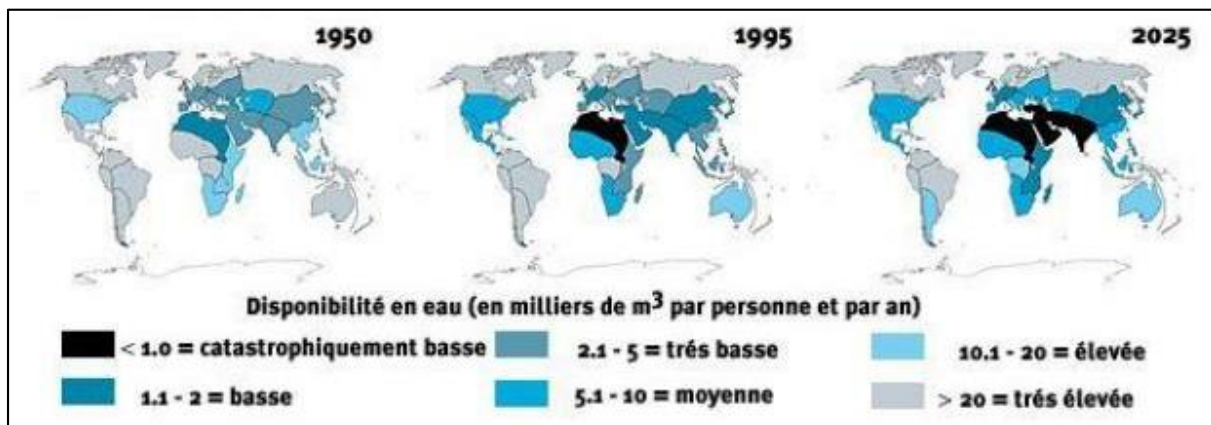


Figure 2-1 : Distribution de l'eau douce dans le monde [11]

Dans cette figure on remarque que l'Algérie représente le secteur le plus soif dans le monde. Il faut trouver des solutions pour éviter ce scénario.

I. Eau en Algérie

L'Algérie dispose de ressources naturelles limitées, irrégulières et très inégalement réparties. A l'exception des eaux souterraines du Sahara, l'eau potable est principalement située dans le Nord du pays. 90 % de la totalité des écoulements superficiels se trouvent sur la région littorale et les 10 % restant se partagent entre les Hauts Plateaux et les bassins sahariens. La demande globale en eau a considérablement et rapidement croissante grâce à l'augmentation de la population. La part que prend l'alimentation en eau potable s'est considérablement accrue en volume et en proportion. De 16 % de la consommation globale en 1975, elle est passée à 35 % actuellement.

L'alimentation en eau potable a acquis une nette priorité par rapport aux autres utilisations, priorité qui a été consacrée dans la législation algérienne relative à l'eau. La nécessité de dessaler l'eau de mer se fait de plus en plus pressante. L'Algérie est lancée depuis peu, mais de façon intense, dans le dessalement de l'eau de mer. Cette solution s'est imposée afin de faire face à ces besoins.[11]

II. Dessalement en Algérie :

L'Algérie engage un important programme d'investissement pour le dessalement d'eau de mer dans le but de protéger la demande domestique d'eau potable de population algérienne et les villes côtières. D'autre part, l'utilisation de nouvelle technologie qui permet d'obtenir l'eau potable de qualité et les coûts de production maîtrisés.

L'Algérie a mis, à ce jour en service, 14 stations de dessalement d'eau de mer de capacité $2,4 \cdot 10^6$ m³ produit par jours d'eau potable.

Les Station de Dessalement en Algerie				
Projet s	Capacité (M3)	CAPEX MUSD	Mise en service	Partenaires
Kahrma	96 000	400	Depuis 2006	Black & Veatch "Afrique du Sud" : 05%
Hamma	200 000	258	Depuis 2008	GE Ionics "Etats-Unis" : 70%
Skikda	100 000	136	Depuis 2009	Geida (Befesa/Sadyt) "Espagne" : 51%
Beni Saf	200 000	240	Depuis 2010	Cobra/Espagne" : 51%
Souk Tlata	200 000	251	Depuis 2011	TDIC (Hyflux/Malakoff) "Singapour" : 51%
Fouka	120 000	180	Depuis 2011	AWI (Snc Lavalin/Acciona) : 51%
Mostaganem	200 000	227	Depuis 2011	Inima / Aqualia "Espagne" : 51%
Honaïne	200 000	291	Depuis 2011	Geida (Befesa/Sadyt) "Espagne" : 51%
Cap Djinet	100 000	138	Depuis 2012	Inima / Aqualia "Espagne" : 51%
Magtaa	500 000	492	4eme Trimestre 2013	Hyflux "Singapour" : 47%, ADE "10%
Ténès	200 000	231	3eme trimetre 2014	Befesa "Espagne" : 51%
Oued Sebt	100 000	En cours de développement		
El Tarf	100 000			
Bejaia	100000			

Figure 2-2 : Stations de dessalement en Algérie [3]

La station de dessalement de Kahrama à Arzew le seul usine qui produit l'eau potable à partir du procédé MSF « distillation multi flache » avec 4,71% de production générale. Les autres stations utilisent le procédé de l'osmose inverse.

Pour notre étude on choisira la station de dessalement de Honaine [3].

III. Présentation de l'usine de dessalement d'eau de mer de Honaine :

III.1 Introduction :

Au Nord-Ouest Algérien, la Wilaya de Tlemcen a fait l'objet de l'installation d'une station de dessalement d'eau de mer, dans la région de Honaine. Sa capacité de production est de 200.000m³/j, assurant l'approvisionnement en eau potable de 23 communes ainsi que les agglomérations urbaines du Grand-Tlemcen (Tlemcen, Mansourah et Chetouane), soit une population d'environ 555.000 habitants. La station de dessalement de l'eau mer de Honaine est la deuxième station de dessalement dont dispose la wilaya après celle de Souk Tleta, entamée en 2006 par le groupement espagnol GEIDA. Elle a été opérationnelle en 2011, avec un montant d'investissement de 250millions de dollars. Cette importante station est gérée par des actionnaires qui sont Algerian Energy compagny (AEC) à hauteur de 49 % et Geida (Espagne) à hauteur de 51 %. Les eaux produites sont, ensuite, transférées à l'algérienne des eaux (ADE) [15].

III.2 Description de société :

- **GEIDA** est un groupement d'investisseurs dans les projets de construction et d'exploitation d'usines de dessalement d'eau de mer en Algérie. Elle est composée à part égale par deux sociétés TEDAGUA et COBRA.



- **TEDAGUA** est née au 1983 à Las Palmas (Îles Canaries). Elle a pour but de concevoir, de fabriquer, d'exploiter et d'entretenir des stations de dessalement, des systèmes de purification et d'assainissement des eaux.



TEDAGUA a évolué avec un marché qui a subi, ces vingt dernières années, une augmentation de la demande en eau dans tous les secteurs.

- **COBRA** Fondée en 1944, COBRA développe son activité dans des secteurs aussi diverses que les réseaux de distribution d'énergie et d'eau, la Télécommunication ou encore les Chemins de fer, en fournissant des services spécialisés d'ingénierie, d'exploitation, d'installation et de maintenance.



Le prestige atteint par COBRA en 60 ans d'existence, est le résultat de la haute qualité de ses réalisations et de son engagement indéfectible à la clientèle. L'objectif stratégique prioritaire de la société est l'observation rigoureuse des règlements environnementaux et de sécurité [4].

- **Algerian Energy Company SPA (AEC)**

Une Entreprise Publique Économique, est créée le 23 mai 2001 sous forme de société par actions de droit algérien, par SONATRACH et SONEGAS. Cette compagnie a principalement le rôle de développer des projets en partenariat avec des sociétés étrangères dans le domaine de la production d'énergie électrique et de dessalement d'eau de mer [4].



Figure 2-3 : Présentation de l'AEC [15]

III.3 Situation géographique :

- La commune de Honaine sise à 60km du chef-lieu de la Wilaya, il s'étend sur une superficie totale de 6385 hectares, elle est limitée au :
- Nord-Est des Trara orientaux, limitrophe à la daïra de Béni Saf dans la wilaya d'Ain- Témouchent, limitée au Nord par la mer
- A l'ouest par les daïras de Nedroma et de Ghazaouet
- Au sud par la daïra de Remchi



Figure 2-4 : Présentation de la station de dessalement

III.4 Processus du dessalement appliqué dans la station du dessalement de Honaine :

Le processus du dessalement d'eau de mer comporte quatre étapes principales :

- 1- La captation de l'eau de mer
- 2- Le prétraitement
- 3- L'osmose inverse
- 4- L'expédition

III.4.1 Captage de l'eau de mer :

La capture de l'eau de mer de HONAINE, se fera directement de la mer au moyen de deux tuyauteries prenant appui sur le fond marin, d'un diamètre de 1200 mm chacune. Le captage est effectué en zone profonde d'environ 7m, éloigné de la côte, protégé des pollutions et des forts courants et il n'est pas influencé par les rejets. La pression d'entrée de l'eau de mer est de 2 à 4 bars.

Le captage va être effectué au moyen d'une tour de captage en béton armé. Cette tour a été conçue pour capter l'eau brute nécessaire à une production de 200.000 m³/jour, en tenant compte de la consommation interne de l'usine de désalinisation. L'eau de mer, par le biais de l'émissaire de captage, entre dans la cuve d'eau de mer où elle sera préfiltrée à travers des grilles à gros et des tamis autonettoyants qui présentent un maillage de 1mm [15].



Figure 2-5 : Tamis auto nettoyage

Le débit nécessaire de fournir à l'usine est de $18,934 \text{ m}^3/\text{h}$, le débit d'eau qui doit être capté par la tour de captage est plus grand, car il comprend le débit nécessaire au nettoyage des tamis autonettoyants. Les matériaux extraits des tamis rotatifs sont dirigés vers un bac où se trouvent des pompes d'extraction de matériaux en suspension. Le groupe de pompage d'eau de mer comprend 11 (10+1) pompes, avec une capacité de pompage de $18930 \text{ m}^3/\text{h}$ chaque une. Les dix pompes à eau d'eau de mer seront installées en parallèle, l'une d'entre elles étant en réserve.

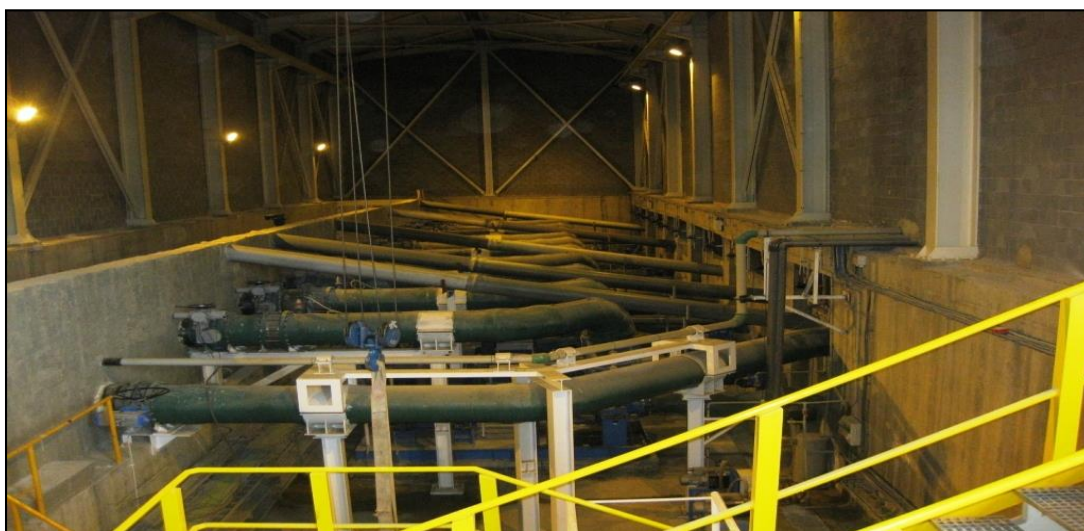


Figure 2-7 : Photo au niveau de la station de pompage

Pour protéger la tuyauterie d'eau de mer au niveau des filtres à sable, on installera un équipement anti-coup de bélier et des vannes papillon.

Les pompes d'eau de mer sont à aspiration à vide, il est donc nécessaire d'installer un groupe de vide pour l'amorçage des pompes.



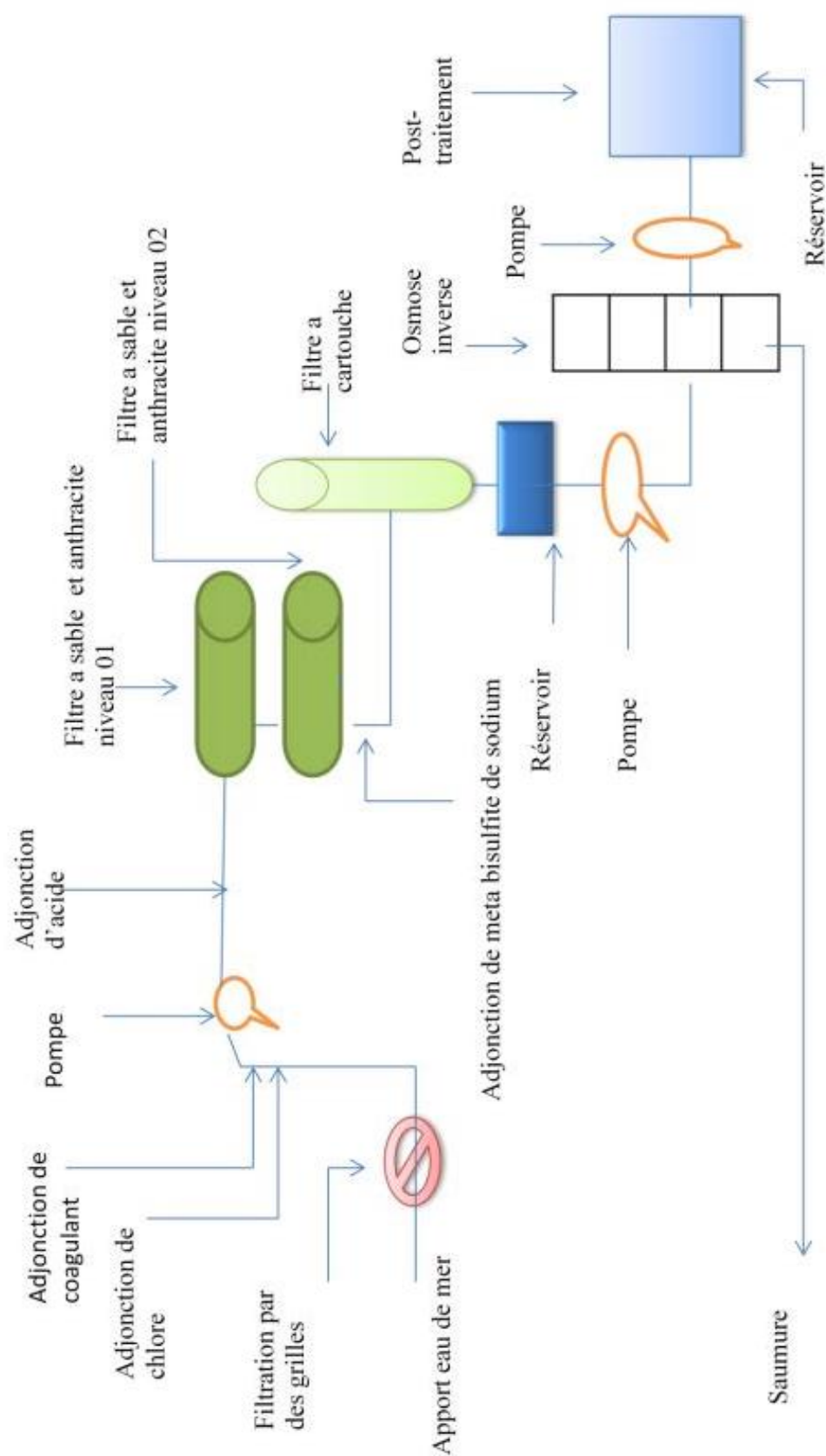


Figure 2-8 : Diagramme de processus de dessalement de l'eau de mer

Par osmose inverse au niveau de la station de dessalement d'eau de mer "Honaine"[4]

III.4.2 Prétraitements :

C'est la deuxième étape du processus de dessalement dont le but est d'éliminer :

- Les solides en suspension
- Les matières organiques
- Les micro-organismes

Elle est aussi nécessaire pour éviter la détérioration des pompes, l'incrustation, l'encrassement et la dégradation des membranes d'osmose inverse par les microorganismes. Cette étape comporte deux types de prétraitements :

III.4.2.1 Prétraitement chimique :

Cette opération s'effectue au niveau de la tour de captage de l'eau de mer ou dans l'aspiration des pompes à eau de mer ou dans l'impulsion de ces dernières. Elle consiste à l'injection d'hypochlorite de sodium $NaOCL$, de chlorure ferrique $FeCl_3$

III.4.2.1.1 Traitement par l'hypochlorite de sodium :

Cette étape se fait grâce à deux citernes $NaOCL$ d'une capacité de 140 m^3 chacun, munies des pompes destinées à injecter l'hypochlorite de sodium au niveau du système de pompage de l'eau de mer soit au réservoir de captage ou du refoulement des pompes d'eau de mer. L'injection d'hypochlorite s'effectue au moyen de 4+1 pompe dosage, l'une d'elle étant en réserve [15].

III.4.2.1.2 Traitement par le chlorure ferrique:

D'autres citernes de $FeCl_3$ de 70 m^3 munies à 4+1 pompes sont utilisées pour injecter le $FeCl_3$ au niveau du système de pompage de l'eau de mer. Une injection éventuelle d'acide sulfurique pour ajuster le pH est possible lors du traitement. Cette injection a pour but d'éliminer les matières en suspension et les matières colloïdales présentes dans l'eau de mer [15].



Figure 2-9 : Citernes de l'hypochlorite de sodium et chlorure ferrique

III.4.2.2 Prétraitement physique :

C'est un traitement destiné à éliminer fondamentalement les éléments solides, les algues et la matière organique, par le passage de l'eau de mer à travers des filtres à sable et anthracite et à travers des filtres à cartouches. Le mouvement de l'eau dans ces filtres est vertical, pénétrant par la partie supérieure du filtre et descendant à travers les couches filtrantes qui retiennent les matières solides dans sa partie inférieure. Des collecteurs munis de buses recueillent l'eau filtrée [15].

III.4.2.2.1 Filtration à sable et anthracite :

Une distribution de 80 filtres, bicouches sable-anthracite avec une granulométrie différente. Ils sont divisés en deux étapes. La première étape est constituée de 48 filtres et la deuxième étape contient 32 filtres.

Ce système élimine la plupart des particules en suspension, huile et graisses qui restent dans l'eau de mer et produit une eau filtrée à basse turbidité prête pour l'étape d'osmose inverse. Le mouvement de l'eau dans ces filtres est vertical, pénétrant par la partie supérieure du filtre et descendant à travers les couches filtrantes qui retiennent les matières solides dans sa partie inférieure. Des collecteurs munis de buses recueillent l'eau filtrée [15].

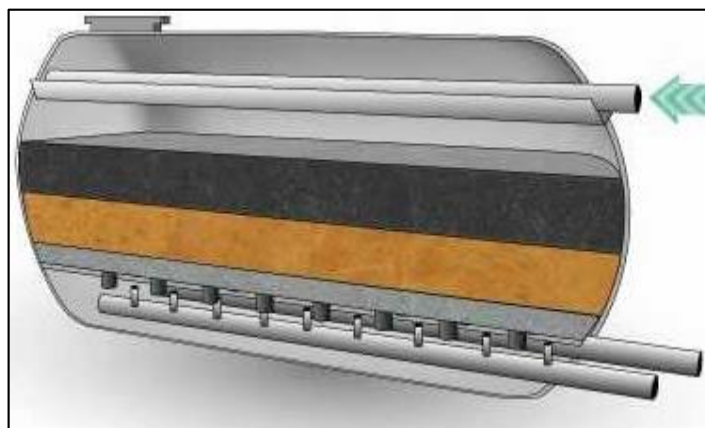


Figure 2-10 : Module de filtration à sable et anthracite

La disposition des filtres est cylindrique horizontale. Ils sont de 3,7m de diamètre et de 11m de longueur. La vitesse de filtration en fonction normale lors de la première étape est 8,8m/h et lors de la seconde étape de 13,2m/h. Le réglage du filtre sera réalisé par un contrôle de la hauteur de la lame d'eau sur le lit filtrant à l'aide d'un capteur de niveau résistant qui agira sur la commande électrique de la soupape de sortie de l'eau filtrée, en maintenant le niveau constant à l'intérieur du filtre [15].



Figure 2-11 : Filtres à sable et anthracite

➤ **Remarque :**

Les filtres sont soumis à un système de lavage.

- a. **Aération :** le nettoyage sera réalisé en introduisant de l'air à une vitesse de $50 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{h}$ et pendant une période de 7 minutes.
- b. **Temps d'attente :** après l'étape d'aération on laisse le filtre au repos pendant 3 minutes.
- c. **Rinçage :** la saleté détachée des grains de sables est entraînée vers les conduites d'eau de lavage.
- d. **Vidange :** finalement, une étape de vidange est réalisée, permettant à l'eau d'alimentation d'entrer, pour éliminer la saumure qui aurait pu retenu à l'intérieure du filtre.

L'eau qui vient du nettoyage des filtres et qui conduit tous les solides qui ont été retenus, est conduite à travers des galeries inférieure des filtres à sable jusqu'à une tuyauterie qui est connecté avec le réservoir de la saumure .Dans ce réservoir, l'eau de nettoyage se mélange avec le reste des effluents de l'usine, en diminuant comme cela sa concentration en solides avant d'être réserver à la mer.

III.4.2.2.2 Injection du méta bisulfite de sodium ($\text{Na}_2\text{O}_5 \text{ S}_2$) :

L'utilisation du méta bisulfite de sodium permet d'éliminer le chlore résiduel contenu dans l'eau de mer avant son arrivée aux membranes d'osmose inverse, évitant leur détérioration par oxydation. L'injection de la solution de $\text{Na}_2\text{O}_5 \text{ S}_2$ se fait avant la filtration à sable ou à cartouche pour donner un maximum de temps de contact possible. L'équipement est composé de deux réservoirs d'accumulation – dissolution de capacité 13m^3 chacun, et 4+1 pompes doseuses. Les tuyauteries d'injection du produit sont en polyéthylène [15].

III.4.2.2.3 Injection d'inhibiteur anti-scalant :

Afin d'éviter les précipitations des sels de sulfate de calcium et de strontium, d'hydroxyde ferrique et de fluorure de calcium, dans les membranes, on dosera un inhibiteur dont l'action est destinée à empêcher la formation des réseaux cristallins, en maintenant les ions dispersés et en permettant de dépasser la limite de produit de solubilité de ces sels.

L'addition de produit est réalisée au cours de fonctionnement, en amont des filtres à cartouches, pour fournir le plus de temps de contact possible [15].

III.4.2.2.4 Injection d'hydroxyde de sodium :

L'addition de ce produit a pour objet de la réduction du bore. L'équipement est composée de réservoirs pour la préparation de la solution du soude et de deux pompes doseuses, plus une de réserve. L'addition de produit est effectuée en cours de fonctionnement et en amont des filtres à cartouches, pour fournir le plus du temps de contact possible. Les pompes doseuses seront réglables de 10% à 100% de leur capacité maximale. La régulation du positionneur est automatique avec actionnement depuis le panneau du contrôle.

III.4.2.2.5 Injection de dioxyde de Carbone CO₂ :

Il est destiné à réduire le pH d'eau de mer et à éviter les précipitations de carbonates et de bicarbonates. Les installations sont composés d'un dépôt de stockage, où le dioxyde de carbone fabriqué dans le générateur de CO₂ est stocké. La réduction de *pH* rend l'action bactéricide du chlore plus effectif.

Le point d'injection de ce produit peut se situer au refoulement des pompes d'eau de mer, à travers un système de bougie poreuse.

III.4.2.2.6 Filtre à cartouche:

C'est une microfiltration assurée par des cartouches en polypropylène de 25 micron et d'un diamètre de 61mm, dans des réservoirs métalliques. Son rôle est la protection des pompes à haute pression. Il y- aura 22 filtres avec 290 cartouches chacune.

En amont et en aval de ce procéder, on dispose d'un capteur pour mesurer l'indice d'encrassement(SDI).La valeur de SDI sera toujours la valeur exigée par le fabricant des membranes afin de ne pas les endommager. Les tuyauteries et les collecteurs d'entrer et de sortie des filtres sont en polyptère renforcé de fibres de verre et sont d'un diamètre tel que la vitesse de passe ne dépasse pas les 2,5m/s. Les filtres sont pourvu d'éliment de sécurité contre les surpressions moyennant des disques de rupture

calibrés de sorte à ne jamais atteindre une pression supérieure à celle de calcul. Les filtres seront de constructions verticales ce qui permettra de renouveler facilement les cartouches filtrantes.



Figure 2-12 : Filtre à cartouche



Figure 2-13 : Cartouches filtrantes.

➤ **Réservoir d'eau filtrée :**

L'eau filtrée produite est stockée dans un réservoir fermé. Cette eau est utilisée pour alimenter les unités d'osmose inverse. Une autre partie est utilisée pour le rinçage et le nettoyage des filtres à sable. Ces derniers subissent l'accumulation des matières solides qui provoquent une augmentation de la résistance à l'écoulement ainsi que la diminution de la production d'eau filtrée.

➤ **Pompage intermédiaire :**

L'eau provenant de l'étape de filtration passe par un réservoir intermédiaire. La présente conception prévoit l'installation de deux groupes de pompage intermédiaire, tous deux composés de 5 pompes. Elles sont munies de variateur de fréquence pour une plus grande capacité de régulation, améliorant l'adaptabilité du système d'osmose face au changement de fonctionnement (dus à des variations de pression, de température,...) un de ces groupes pompe vers le collecteur d'alimentation les pompes haute pression, alors que l'autre le fait vers le collecteur d'alimentation aux systèmes récupérateurs d'énergie, ce qui empêche l'éventuelle interférence lors du fonctionnement des deux groupes d'équipements.



Figure 2-13 : Pompage intermédiaire

III.4.3 Etape osmose inverse :

Le dessalement de l'eau de mer est réalisé par son passage à travers le système d'osmose inverse, étape clé du processus suscitée. Cette étape est constituée de 10 unités appelées « Rack ». Chaque unité est composée de :

III.4.3.1 Un châssis à membrane :

Composé de 222 modules et chaque module à 7 membranes. Ces membranes sont de type spiral [15].



Figure 2-13 : Châssis à membrane

III.4.3.2 Pompe à haute pression :

Les pompes haute-pression d'alimentation des modules d'osmose inverse destinés au dessalement de l'eau de mer, ainsi que les dispositifs de récupération de l'énergie

hydraulique du concentrât qui y sont associés, représentent des postes très importants dans la conception des usines de dessalement, tant du point de vue de l'investissement, que de celui de l'énergie électrique nécessaire à leur fonctionnement.

Elle permet de fournir une pression jusqu'à 70 bars en vue d'alimenter l'osmose inverse [15].

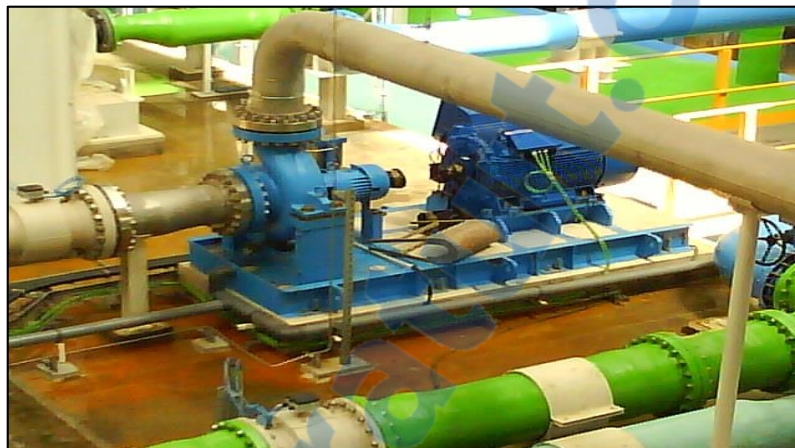


Figure 2-15 : Pompe à haut pression

✓ **La pression osmotique :**

L'osmose est le transfert de solvant à travers une membrane sous l'effet d'un gradient de concentration c'est à dire migration de liquide diluée vers le liquide concentré.

Si on applique une pression sur la solution concentrée, la quantité d'eau transférée par osmose va diminuer. Avec une pression suffisamment forte, le flux d'eau va même s'annuler : cette pression est nommée la pression osmotique Π (différence de pression de part et d'autre de la membrane). Si on dépasse la valeur de la pression osmotique, on observe un flux d'eau dirigé en sens inverse du flux osmotique : c'est le phénomène d'osmose inverse [3].

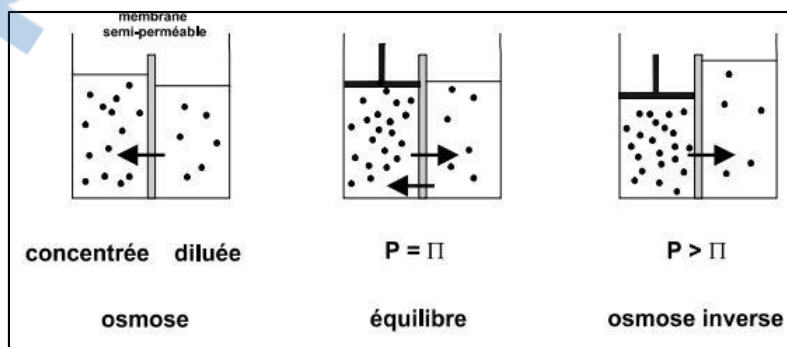


Figure 2-14 : Phénomène de l'osmose et l'osmose inverse [3]

- La pression osmotique des électrolytes est donnée par la relation suivante :

$$\Pi = iC_0RT$$

- i : nombre d'espèces d'ions constituant le soluté
- C_0 : concentration molaire du soluté [mol. m^{-3}]
- T : température [K]
- R : constante des gaz parfaits [$8,31 \text{ KJ. mol}^{-1}. K^{-1}$]

III.4.3.3 Système d'échange de pression

Grâce à un rotor, un système d'échange de pression s'effectue entre la saumure provenant des membranes à haute pression et l'eau de mer à basse pression, une récupération importante d'énergie permet la réduction de coût de dessalement de l'eau de mer [15].

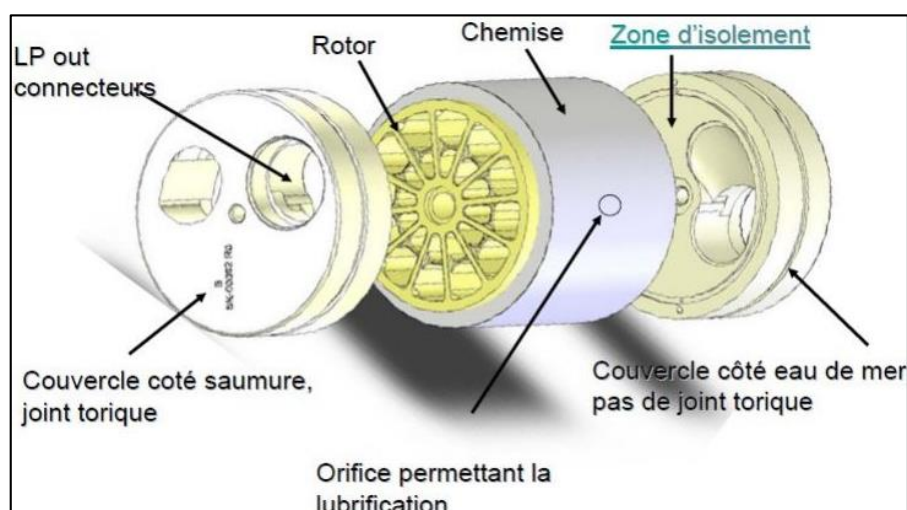


Figure2-16 : Système d'échange de pression (Djeddi M. «Alderian Energy Company Spa »l'Université des Sciences et des Technologies Houari Boumediene Mai 2014)

III.4.3.4 Pompage de recirculation ou booster :

Les chambres hyperboliques élèvent une partie de l'eau d'alimentation de membranes jusqu'à une pression légèrement inférieure à celle du rejet de la saumure. Pour augmenter cette pression jusqu'à l'entrée aux membranes, on utilise ces pompes de recirculation. Les pompes sont des types centrifuges horizontaux, et construites en acier inoxydable.

Système de pompage haute pression, pompes Booster et récupérateurs d'énergie :

L'équipement de pompage et de récupération d'énergie est composé de pompes à haute pression pour une partie de l'eau vers les membranes, d'un récupérateur d'énergie de la saumure avec des chambres hyperboliques et de pompes de recirculation ou booster pour élever la pression du reste de l'eau vers les membranes.

Les groupes de pression ont la mission fondamentale de fournir la pression nécessaire permettant de parvenir à vaincre la pression osmotique de l'eau d'appoint et les pertes de charge du système.

L'eau de rejet des modules osmoseurs, est utilisé pour alimenter la chambre hyperbolique, réalisant de la sorte une économie énergétique maximale de l'unité, car ces groupes sont ceux qui consomment le plus.

L'eau provenant de chaque groupe de filtres à cartouche se divise en deux collecteurs différents d'une capacité permettant d'alimenter chacun, la moitié de la station (aux pompes correspondantes de haute pression et aux systèmes de récupération d'énergie). Les pompes sont en fonctionnement face à un collecteur d'alimentation commun, de sorte qu'il alimente en parallèle tous les bâtis de la station.

Les pompes de rechange étant installées également en parallèle, comme les autres, le pourcentage de pompes de rechange installées passe de 10 à 25% dans le cas des pompes de haute pression et à 50% dans le cas des pompes booster.

Les tuyauteries d'aspiration des pompes sont en polyester renforcés de fibre de verre. Le rejet de l'équipement d'osmose inverse (saumure) est transporté jusqu'à l'ensemble de chambres hyperboliques, moyennant une tuyauterie en acier inoxydable de même qualité que celle du refoulement [4].

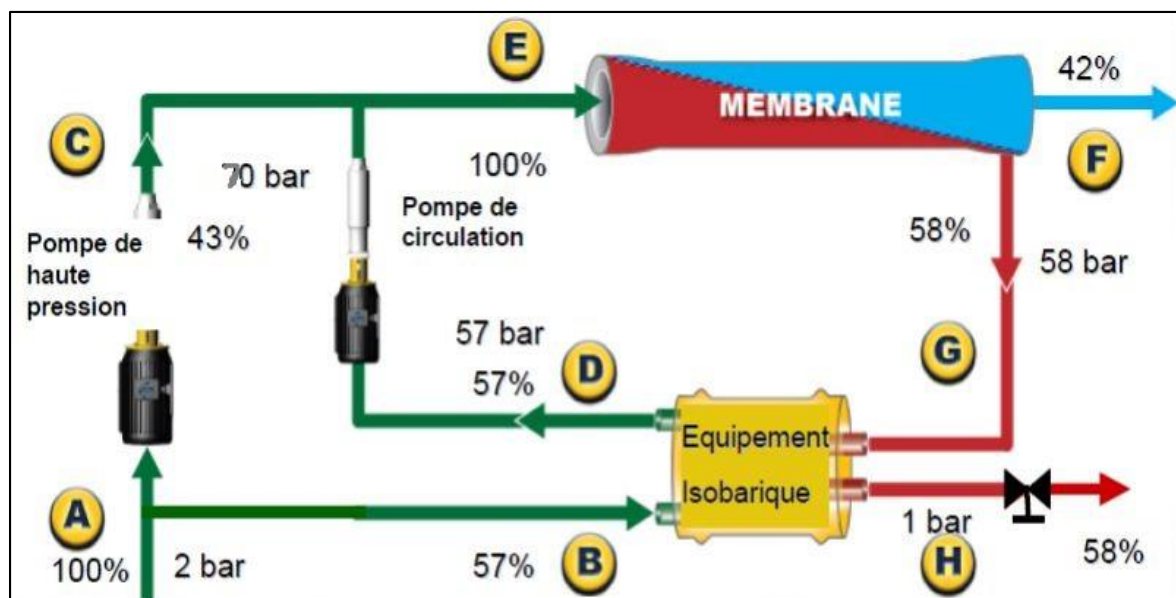


Figure2-17 : Système de pompage haute pression, pompes Booster et récupérateurs d'énergie

III.4.3.5 Réservoir d'eau traitée :

L'eau issue du traitement de l'osmose inverse est indemne de tous les minéraux, c'est-à-dire non consommable. Une reminéralisation est nécessaire pour rendre cette eau potable. L'injection automatique de CO_2 pour réduire le pH proche de 5 permet de rendre plus efficace le processus de reminéralisation. Ce dernier est réalisé dans des tours ou chambres en nombre de dix de volume totale $20\,000\text{m}^3$, à l'intérieur desquelles est situé le lit de calcite (carbonate de calcium) de 2,86 m de hauteur, équipées par des tuyaux de distribution.

A travers ce lit de calcite l'eau traitée passe et atteindra le fond (réservoir) par un canal à l'intérieur de la tour. Après et à l'aide d'un doseur automatique, il y aura un ajout d'hypochlorite de sodium à partir des deux citernes avec lequel le pH augmentera. Une fois passée la réaction de reminéralisation, on aura amélioré la dureté et l'alcalinité de l'eau. Il existera un résiduel de CO_2 en équilibre avec HCO_3 qui déterminera le pH de l'eau traitée [15].



Figure 2-18 : Chambres de reminéralisations

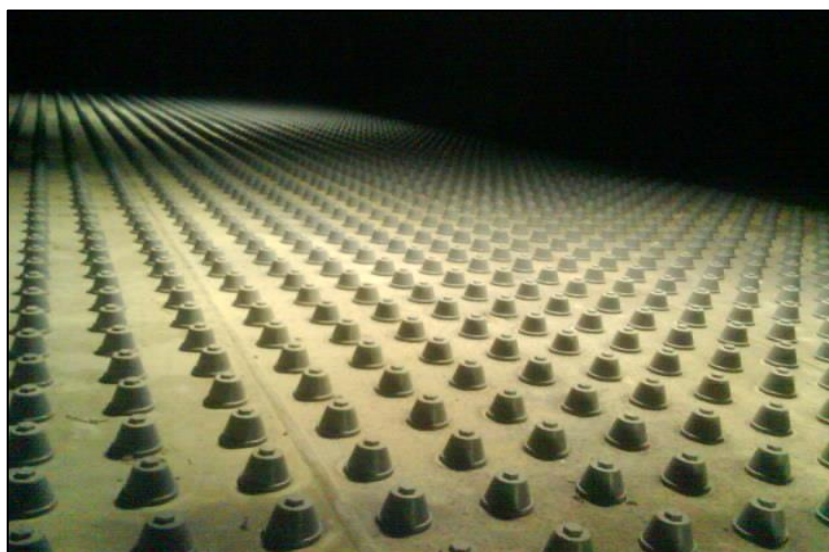


Figure 2-19 : Chambres de reminéralisations à l'intérieur



Figure 2-20 : Réservoir de CO_2

III.5 Stockage et distribution de l'eau produite :

Le système de stockage et impulsion de l'eau commercialisable pour objet de pomper l'eau produite vers le réseau de distribution à travers le réseau de transport d'eau externe géré par l'Algérienne Des Eaux (A.D.E).

Le système d'impulsion et stockage d'eau produite est composé par :

- Un réservoir d'eau reminéralisée.
- Un système de pompage d'eau reminéralisée.
- Un hangar de livraison.

Le réservoir d'eau reminéralisée a une capacité de 5000 m³ et il est fabriqué en béton armé. L'eau commercialisable est pompée vers le réseau de distribution par 10+1 pompes chacune d'une capacité de pompage de 833 m³/h [15].



Figure 2-21 : Collecteur de distribution

Conclusion :

Le dessalement est un enjeu particulièrement important pour l'avenir des régions sujettes aux pénuries d'eau. C'est une méthode d'avenir pour pallier aux problèmes d'eau douce.

La station de dessalement de l'eau de mer à Honaine-Tlemcen, constitue l'un des plus grands projets réalisés par le gouvernement algérien en matière d'approvisionnement en eau potable, avec une capacité de 200.000 m³/ jour.

Dans la station de dessalement, les étapes de prétraitements utilisées garantissent le bon entretien de l'équipement de la station, produisant une eau douce de bonne qualité.

Chapitre 03



**Rappels sur les pompes
et les conduites**

Introduction :

Depuis les tous premiers temps, les hommes ont recherché des moyens techniques pour amener les fluides (notamment l'eau) à un niveau plus élevé. Cette opération était utilisée pour irriguer les champs et remplir les fossés qui entouraient les villes et les châteaux fortifiés.

Cependant, nos ancêtres préhistoriques ont rapidement eu l'idée de transformer des cuves d'argile en bols. Il s'agit de la première étape vers l'invention du seau. Plusieurs seaux étaient ensuite suspendus sur une chaîne ou une roue. Les hommes ou les animaux utilisaient leur énergie pour mettre ces bols à eau en mouvement et soulever l'eau. Des fouilles archéologiques ont mis à découvert des transporteurs de seaux de ce type en Égypte et en Chine à partir d'environ 1000 avant JC. L'illustration suivante est une reconstitution d'une roue à godets chinoise. Il s'agit d'une roue reliée à des godets en argile illustre Une roue de godets chinoise qui versent l'eau lorsqu'ils atteignent le sommet.



Figure 3-1:Roue à godet chinoise [6]

Une amélioration ingénieuse de ce concept a été élaborée en 1724 par Jacob Léopold qui inséra des tuyaux courbés dans une roue. La rotation de la roue forçait l'eau à être soulevée au niveau de l'axe central de la roue. Le flux d'eau dans une rivière sert également d'entraînement pour cette installation de levage. Une caractéristique particulièrement remarquable de cette conception est la forme des tuyaux courbés. Elle est semblable à la forme des pompes centrifuges actuelles.

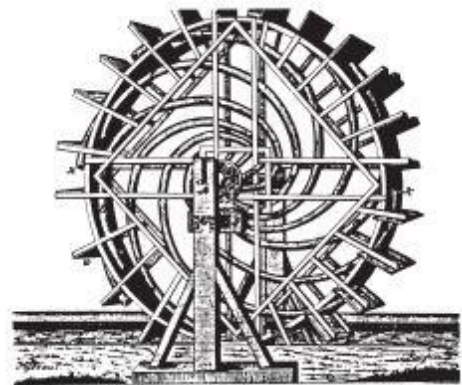


Figure 3-2: Illustration de Jacob Leupold[6]

Archimède (287-212 avant JC), le plus grand mathématicien et scientifique des temps anciens, a décrit la vis qui sera appelée ultérieurement par son nom en 250 avant JC. Elle soulevait de l'eau en faisant tourner une spirale/vis sans fin dans un tuyau. Cependant, une partie de l'eau retombait toujours, car on ne connaissait pas encore de joint

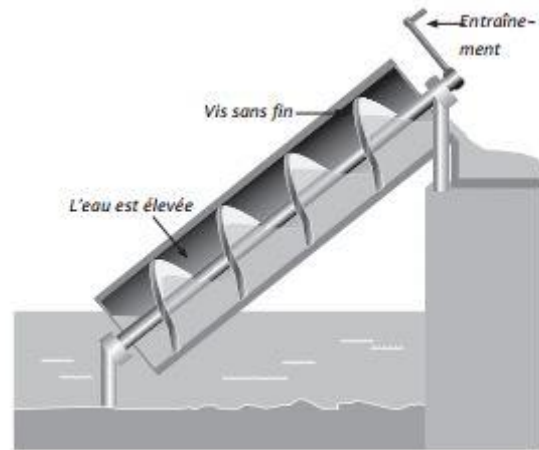


Figure 3-3 : Illustration de la vis d'Archimède[6]

d'étanchéité efficace. Par conséquent, une relation était observée entre l'inclinaison de la vis et le débit. Lors de l'utilisation, on peut choisir entre un débit plus important ou une hauteur de refoulement plus élevée. Plus l'inclinaison de la vis est raide, plus la hauteur de refoulement est élevée lorsque le débit diminue.

Les informations rassemblées à partir de diverses sources historiques ont révélé que ces pompes à vis étaient actionnées à une inclinaison comprise entre 37° et 45° . Elles produisaient des hauteurs de refoulement comprises entre 2 m et 6 m et des débits maximums d'environ $10\text{m}^3/\text{h}$ [6].

I. Pompe :

Les pompes sont des éléments essentiels dans la vie et le confort des êtres humains. Ils déplacent les fluides qu'ils soient chauds ou froids, propres ou sales d'un point A, à un point B. Elles permettent, notamment, de prendre un liquide à la pression p_1 et de le porter à la pression p_2 (avec $p_2 > p_1$). La pompe doit fournir une certaine énergie. Cette dernière se manifeste sous deux formes:

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

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

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

II. Types des pompes :

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

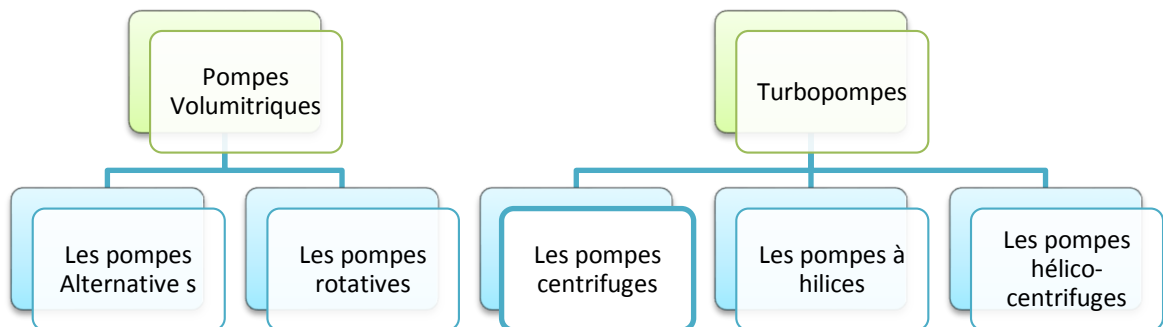


Figure 3-4: Types des pompes

II.1 Pompe volumétrique :

Ce sont les pompes à piston, à diaphragme, à noyau plongeur et les pompes rotatives telles les pompes à vis, à engrenages, à palettes, etc. Lorsque le fluide véhiculé est un gaz, ces pompes sont appelées compresseurs.

- Principe et caractéristiques générales :

Une pompe volumétrique se compose d'un corps de pompe parfaitement clos à l'intérieur du quelle se déplace un élément mobile et le fonctionnement repose sur le principe suivant :

1- Exécution d'un mouvement cyclique.

2- Pendant un cycle de volume déterminé, un volume V_0 de fluide emprisonné dans un espace donné (le récipient de départ) est contraint à se déplacer de l'entrée vers la sortie de la pompe par un système mécanique. Ce volume prélevé dans la conduite d'aspiration en gendre une dépression qui fait avancer le fluide vers la pompe par aspiration. Cet effet confère aux pompes volumétriques d'être auto-amorçant.

II.1.1 Pompes volumétriques rotatives :

Ces pompes sont constituées par une pièce mobile animée d'un mouvement de rotation autour d'un axe, qui tourne dans le corps de pompe et crée le mouvement du liquide pompé par déplacement d'un volume depuis l'aspiration jusqu'au refoulement. Le principal avantage des machines rotatives c'est qu'elles se prêtent facilement à la mécanisation et aux grandes vitesses de fonctionnement.

II.1.1.1 Pompes à palettes :

Un corps cylindrique fixe communique avec les orifices d'aspiration et de refoulement. A l'intérieur se trouve un cylindre plein, le rotor, tangent intérieurement au corps de la pompe et dont l'axe est excentré par rapport à celui du corps. Le rotor est muni de 2 à 8 fentes diamétralement opposées deux à deux, dans lesquelles glissent des palettes que des ressorts appuient sur la paroi interne du stator. Le mouvement du rotor fait varier de façon continue les différentes capacités comprises entre les cylindres et les palettes en créant ainsi une aspiration du liquide d'un côté et un refoulement de l'autre. Ce sont des pompes caractérisées par des débits allant jusqu'à 100 m³/h et des pressions au refoulement de 4 à 8 bars. Elles conviennent aux liquides peu visqueux [5].

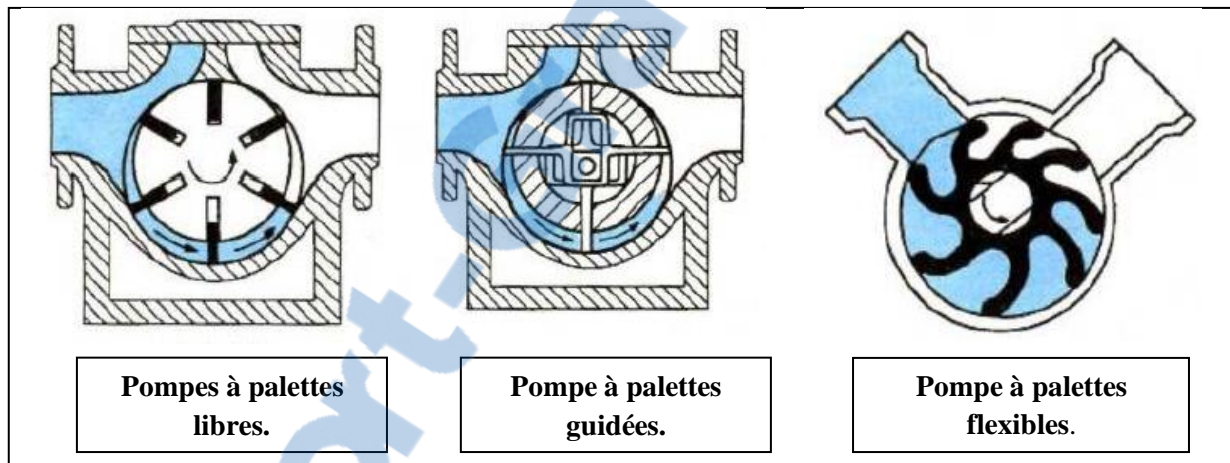


Figure 3-5: Types des pompes à palettes [5]

➤ Avantages et Inconvénients des pompes à palettes :

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> - Pompage de produits moyennement abrasifs, ainsi que de particules solides molles - Mouvement réversible - Débit régulier - Silencieuse - Étanchéité par garniture mécanique. - Maintenance simple 	<ul style="list-style-type: none"> - Petits débits - Pressions de refoulement faibles - pas de fonctionnement à sec - Usure du corps par frottement des palettes - difficile pompage des produits visqueux

II.1.1.2 Pompes à engrenages :

Elle est constituée par deux engrenages tournant à l'intérieur du corps de pompe. Le principe consiste à aspirer le liquide dans l'espace compris entre deux dents consécutives et à le faire passer vers la section de refoulement. Ce sont des pompes qui peuvent atteindre des pressions au refoulement de l'ordre de 5 à 30 bars. Les débits peuvent atteindre 300 m³/h. La hauteur manométrique maximale est de 50 à 200 mce[5].

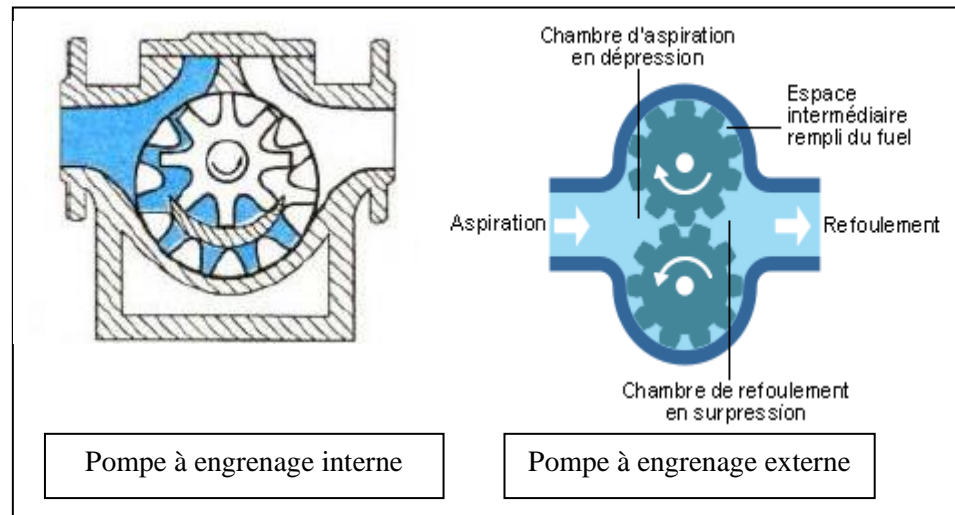


Figure 3-6 : Pompes à engrenage [5]

➤ Avantages et Inconvénients des pompes à engrenages [5] :

	Avantages	Inconvénients
Pompes à engrenages extérieurs	<ul style="list-style-type: none"> - Débit régulier - Mouvement uniforme et réversible - Pas de clapets nécessaires 	<ul style="list-style-type: none"> - Pièces d'usure sont nombreuses (coussinets, 2 ou 4 boîtiers d'étanchéité) - Elles n'admettent pas le passage de particules solides - Elles supportent mal les produits abrasifs
Pompes à engrenages intérieures	<ul style="list-style-type: none"> - Débit régulier - Mouvement réversible - Un seul boîtier d'étanchéité est nécessaire - Bas NPSH requis 	<ul style="list-style-type: none"> - Pouvoir d'aspiration faible - Elles n'admettent pas le passage de particules solides - Le porte-à-faux peut créer une surcharge sur l'arbre

II.1.1.3 Pompes à rotor hélicoïdal :

Elles sont composées de deux engrenages hélicoïdaux : le rotor tourne à l'intérieur du stator. Le mouvement tournant excentré du rotor permet de véhiculer le produit pompé. Ces pompes peuvent atteindre des pressions au refoulement de 20 à 60 bars. Le débit est de 500 m³/h [5].

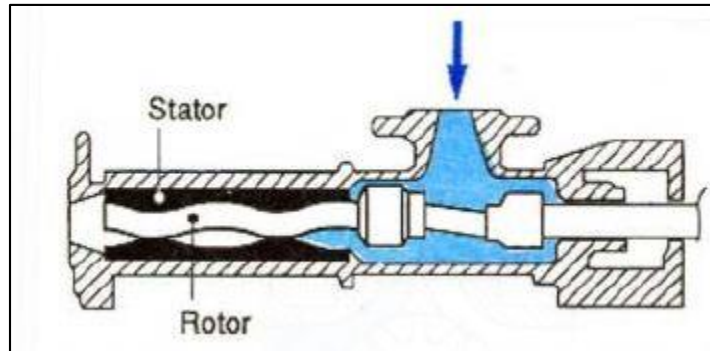


Figure 3-7 : Pompe hélicoïdale[5]

➤ Avantages et Inconvénients de pompes à engrenages [5] :

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> - Passage de particules solides, de produits abrasifs et de boues - Débit régulier - Mouvement réversible 	<ul style="list-style-type: none"> - Pas de fonctionnement à sec - Maintenance assez difficile et coûteuse - Encombrement important.

II.1.1.4 Pompes péristaltiques

L'effet de pompage est obtenu par la compression d'un tube en élastomère par des galets fixés sur le rotor. Les galets, en se déplaçant, entraînent le liquide jusqu'au refoulement. Elles permettent de pomper des liquides très abrasifs et chargés à un débit pouvant aller à 50 m³/h. La pression au refoulement est de 15bars. La hauteur manométrique maximale est de 160mce [5].

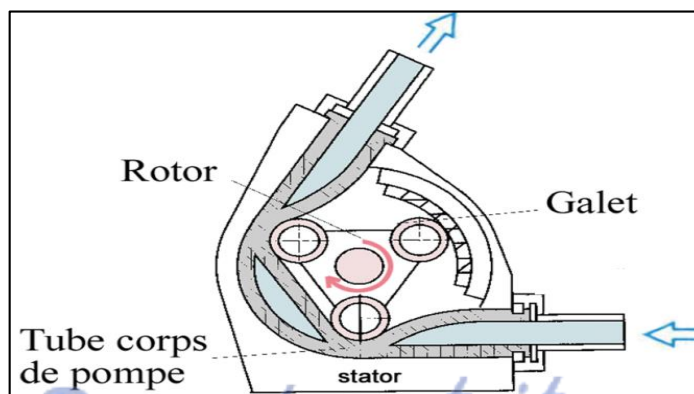


Figure 3-8 : Pompe péristaltiques [5]

➤ **Avantages et Inconvénients de pompe péristaltique :**

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> - Pompage de produits chargés et abrasifs - Fonctionnement à sec possible - Silencieux, auto-amorçant 	<ul style="list-style-type: none"> - Débit limité - Refoulement très saccadé - Température d'utilisation assez faible - Maintenance préventive : risque de rupture du tube

II.1.1.5 Pompe à vis [5]:

Elles sont formées de deux ou trois vis suivant les modèles. Dans le cas d'une pompe à trois vis, la vis centrale seule est motrice, les deux autres sont entraînées par la première. Dans le cas d'une pompe à deux vis, celles-ci sont souvent toutes deux entraînées par un jeu de pignons extérieurs. Ces pompes peuvent d'atteindre des pressions assez élevées 100 bar [5].

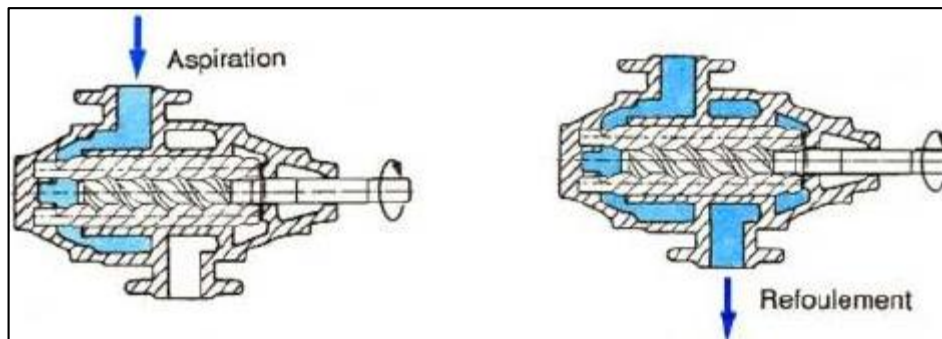


Figure 3-9: Pompe à vis (exemple 3 vis) [5]

- **Avantages et Inconvénients des pompes à vis :**

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> - Débit régulier - Mouvement réversible - Silencieux 	<ul style="list-style-type: none"> - Elles n'admettent pas le passage de particules solides.

II.1.2 Pompes volumétriques alternatives :

Ces pompes sont caractérisées par le fait que la pièce mobile est animée d'un mouvement alternatif. Les principaux types des pompes sont les suivants : à membrane ou à piston.

Les pompes volumétriques alternatives usuelles font appel à deux principes :

1. Déplacement d'un piston animé d'un mouvement alternatif
2. Déformation d'une membrane

II.1.2.1 Pompes à piston :

Le principe est d'utiliser les variations de volume occasionné par le déplacement d'un piston dans un cylindre. Ces déplacements alternatifs dans un sens ou dans l'autre produisent des phases d'aspiration et de refoulement. Ces pompes peuvent atteindre des pressions de refoulement jusqu'à 25 bars.

Elles peuvent être à simple effet, dans ce cas, le piston n'a qu'une seule phase active (premier temps : aspiration, deuxième temps : refoulement) sur les deux que comporte le cycle.

Elles peuvent être à double effet, dans ce cas, le piston est actif dans les deux phases, celles-ci étant à la fois phase d'aspiration et phase de refoulement. Cela permet un débit deux fois plus important et une régularité plus grande dans le débit.[5].

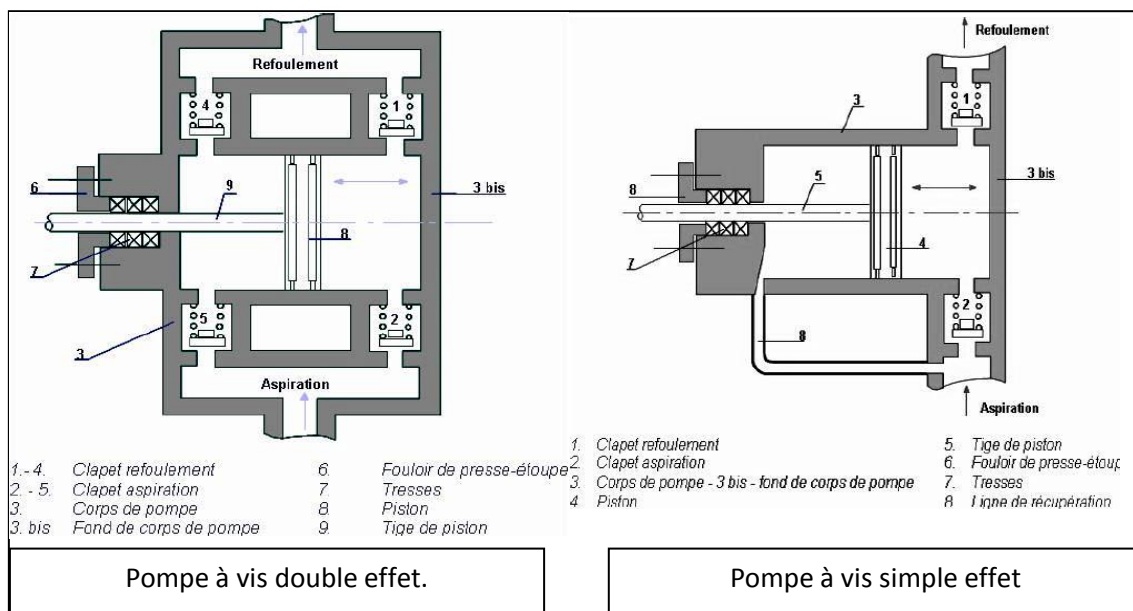


Figure 3-10 : Pompe à piston [5]

➤ Avantages et Inconvénients des pompes à piston :

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> - Fonctionnement à sec sans dommage - Bon rendement - Pression au refoulement très importante - débit réglable 	<ul style="list-style-type: none"> - Débit limité en moyenne de 80m³/h - Viscosités assez faibles - Pompage de particules solides impossible - Pompe ne fonctionne bien que si l'étanchéité est parfaite entre le cylindre et le piston - Pulsations importantes au refoulement

II.1.2.2 Pompes volumétriques alternatives à membrane

Le déplacement du piston est remplacé par les déformations alternatives d'une membrane en matériau élastique (caoutchouc, élastomère, ect).

Ces déformations produisent les phases d'aspiration et de refoulement que l'on trouve dans toute pompe alternative. Actuellement, les pompes à membranes sont constituées de deux membranes, ce qui permet d'avoir des pompes à double effet [7].

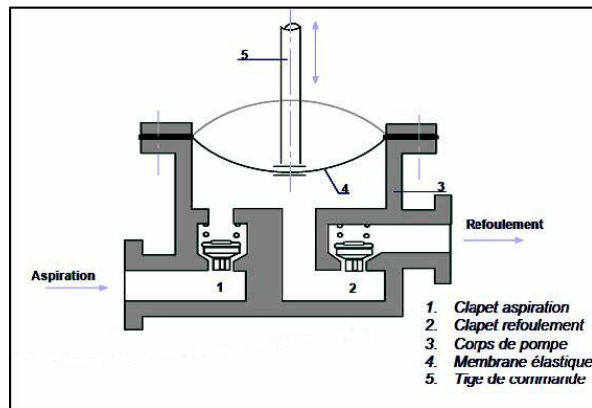


Figure 3-11:Pompe à membrane

➤ Avantages et Inconvénients des pompes à membrane:

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> - Fonctionnement à sec sans dommage - Propreté absolue du liquide pompé (chargé, abrasif, acide, visqueux ou non). - Bon rendement (90 %) 	<ul style="list-style-type: none"> - Débit limité au moyenne de 80m³/h - Viscosités assez faibles - Pompage de particules solides impossible - Bon fonctionnement que si l'étanchéité est parfaite entre le cylindre et le piston - Pulsations importantes au refoulement (système amortisseur indispensable). - Températures inférieures à 150°C

➤ Pompes doseuses :

Elles sont essentiellement à piston ou à membrane. L'introduction d'un débit bien déterminé de liquides est rendu possible grâce à un dispositif précis de réglage de la course du piston et de sa fréquence. Elles ont des débits relativement faibles et peuvent mettre en œuvre des pressions au refoulement allant jusqu'à 300 bars.

Elles sont auto-amorçages mais n'acceptent que des viscosités faibles [5].

- ✓ **Principales applications sont :**
- le dosage fin de produits chimiques
 - l'injection de carburant pour les véhicules automobiles

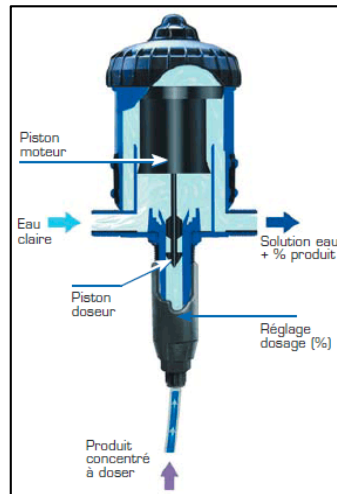


Figure 3-12: Pompe doseuse

II.2 Turbopompes

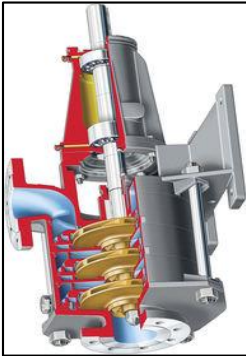
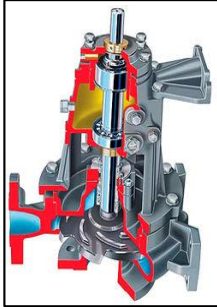

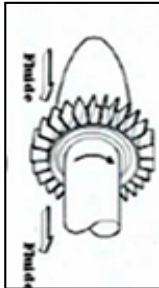
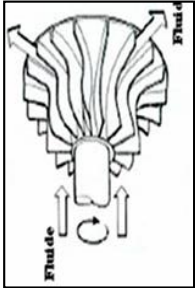
Les turbopompes se composent de deux parties principales :

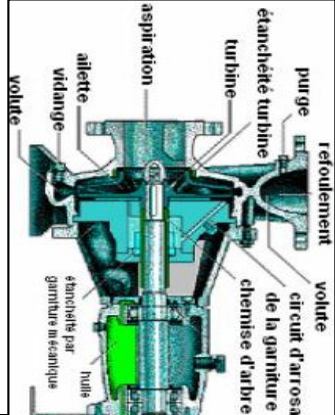
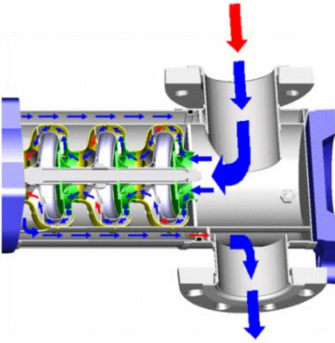
Rotor : qui communique au liquide un mouvement de rotation par l'intermédiaire d'aubes ou d'ailettes et qui est fixé sur un arbre supporté par des paliers et couplé au moyen d'un dispositif rigide ou flexible.

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

II.2.1 Classification des pompes turbopompe :

Les pompes centrifuges sont classées selon la trajectoire du fluide, le nombre des roues et la position de l'axe de la pompe, la pression engendrée, la destination [18]

le nombre d'étages		La trajectoire des fluides		
Pompe multicellulaire	Pompe monocellulaire	Ecoulement diagonal	Ecoulement axial	Ecoulement radial
<p>C'est pompes composées des étages placés en série. Chaque étage correspond à une pompe élémentaire. On peut ainsi assembler une vingtaine d'étage, et dépasser une pression de refoulement de 400 bars, pour un débit de $1000 \text{ m}^3/\text{h}$. Un piston, ou un disque d'équilibrage reprend l'ensemble des poussées axiales.</p> 	<p>Elle se compose d'une roue et d'une volute ou corps de pompe, qui joue le rôle du diffuseur de la pompe.</p> 	<p>Le fluide se déplace sur des surfaces de révolution coaxiales à l'axe de la roue. Exemple : la pompe hélico-centrifuge.</p> 	<p>Le fluide se déplace dans des cylindres coaxiaux à l'axe de la roue. Exemple : la pompe axiale.</p> 	<p>Le fluide se déplace dans des plans normaux à l'axe de la roue. Exemple: la pompe centrifuge.</p> 

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

➤ **Avantages et Inconvénients de turbopompe [10]:**

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

III. Pompes centrifuges :

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

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

III.1 Composants d'une pompe centrifuge :

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

Elle se compose de trois organes principaux, qui sont:

1. Distributeur
2. Rotor (roue)
3. Récupérateur

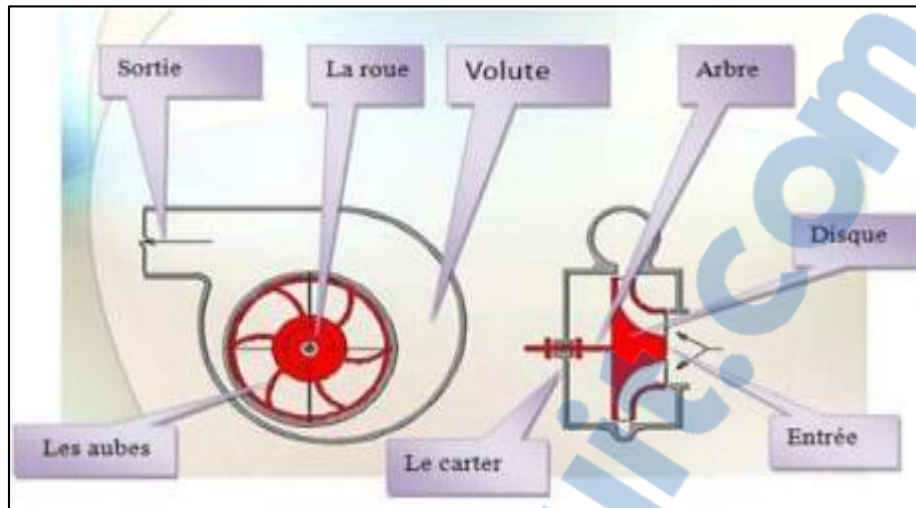


Figure III3-13: Composants d'une pompe centrifuge

- **Distributeur** : Le rôle du distributeur, situé en amont de la roue, est de permettre une accélération et une meilleure orientation des filets fluides à l'entrée de la roue. Il se réduit à une simple tuyauterie pour les pompes monocellulaires.
- **Roue (rotor)** : C'est l'organe principal de la pompe. Elle comporte des aubes ou ailettes qui grâce à leur interaction avec le liquide véhiculé transforment l'énergie mécanique en une énergie cinétique. Elles peuvent être :
 - Ouvertes sans flasque : les aubes sont reliées seulement au moyeu
 - Semi-ouvertes avec un seul flasque arrière
 - Fermées avec deux flasques ou trois

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

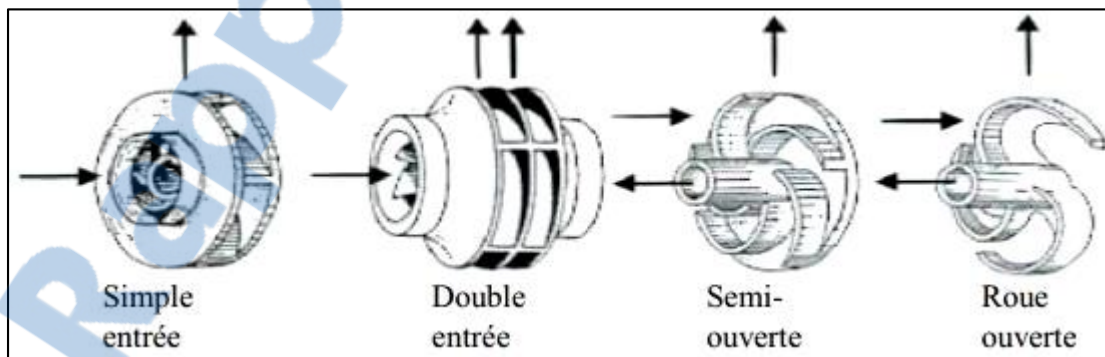


Figure 3-14: Types de roue

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

- Diffuseur : Avec ou sans aubages, cet organe permet de transformer une partie d'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.
- Volute : Un collecteur du liquide venant du diffuseur, elle assure la transformation de l'énergie cinétique en énergie de pression, et la canalisation du liquide vers la section de sortie de la pompe.

III.2 Evolution du fluide à l'intérieur de la roue:

Le liquide arrive à la roue de la pompe parallèlement à son axe de rotation et se dirige vers les canaux formés par les aubes. Après avoir parcouru ces canaux, le liquide sort de la roue.

A l'intérieur de la roue le liquide est soumis à des mouvements:

- Mouvement d'entraînement (mouvement de rotation avec le rotor de la pompe)
 - Mouvement relatif (déplacement de liquide par rapport à la surface intérieure de la roue)
- ✓ Le mouvement de la particule est caractérisé par :
- a_1 : vitesse d'entraînement \vec{U}
 - b_1 : vitesse relative \vec{W}

La vitesse absolue \vec{V} qui est la somme de ces deux vitesses.

$$\vec{V} = \vec{U} + \vec{W}$$

Avec :

$$U = \omega \cdot r$$

$$\omega = \frac{2 \cdot \pi \cdot n}{60}$$

r : rayon du point considéré en (m)

n : nombre de tours par minute

Quand l'eau remplit l'espace compris entre deux aubages successifs, elle est animée du fait de la rotation, d'une vitesse relative W par rapport à ces aubages et qui se comporte avec la vitesse tangentielle (d'entraînement) précédente pour donner une vitesse absolue V .

Grâce à ces vitesses on peut construire les triangles des vitesses à l'entrée et à la sortie de la roue mobile tout en supposant que la vitesse relative est tangente à la surface d'aubes, tandis que la vitesse d'entraînement est tangente à la circonférence de la roue.

On désigne par l'indice (1) toutes les grandeurs qui se rapportent à l'entrée de la roue, et par l'indice (2) les grandeurs qui se rapportent à la sortie de la roue.

Soit r_1 et r_2 les rayons de la roue, donc nous aurons :

$$U_1 = r_1 \omega \text{ et } U_2 = r_2 \omega$$

Avec : $U_2 > U_1$

- V_{m1} et V_{m2} : sont respectivement les composantes radiales absolues à l'entrée et à la sortie des particules dans la roue
- α_1 et α_2 : angles des vitesses absolues à l'entrée et à la sortie de la roue
- β_1 et β_2 : angles des vitesses relatives à l'entrée et à la sortie de la roue ou angle d'inclinaison des aubes

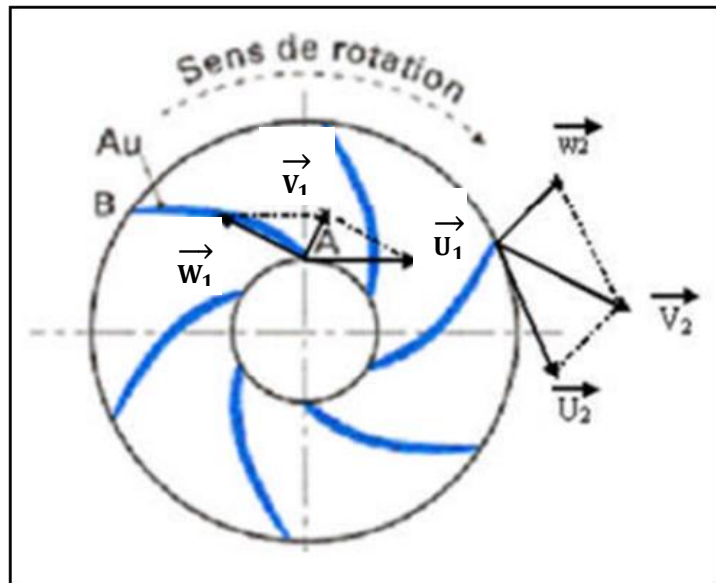


Figure 3-15: Direction de vitesse dans la pompe

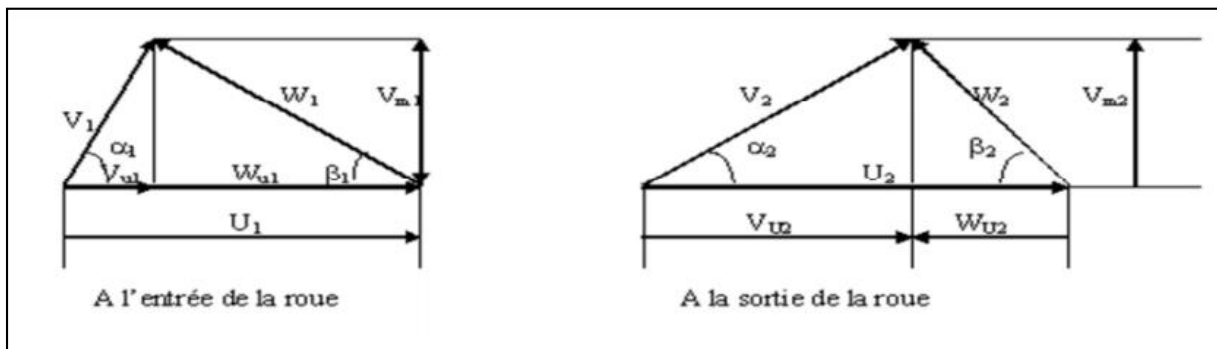


Figure 3-16: Triangle de vitesse dans la roue

- \vec{U}_1 : vitesse d'entraînement dirigée suivant la tangente à la roue
- \vec{W}_1 : vitesse relative par rapport à la roue

- \vec{V}_u : vitesse périphérique (projection de la vitesse absolue V sur la tangente de la roue)
- \vec{V}_m : vitesse méridienne (projection de la vitesse absolue V sur le plan méridien)
- \vec{V}_r : vitesse radiale (projection de la vitesse absolue V sur le rayon) [16]

III.3 Equation fondamentale des turbopompes [16] :

➤ Equation d'Euler :

On suppose que l'écoulement absolu est permanent, nous avons appliqué le théorème de quantité de mouvement au fluide contenu dans une surface de référence cylindrique contenant la roue de nombre infini des aubes d'épaisseur nulle, le changement géométrique de la vitesse absolue de V_1 en V_2 et le changement de mouvement des vitesses dans le sens périphérique de $r_1 V_1 \cos \alpha_1$ en $r_2 V_2 \cos \alpha_2$.

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

$$C = \rho Q_v (r_2 V_2 \cos \alpha_2 - r_1 V_1 \cos \alpha_1) \quad [\text{mN}]$$

Equation 3-1: Mouvement du couple moteur transmis par l'arbre à la roue mobile

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

$$\begin{aligned} P &= C \cdot \omega = \rho Q_v \omega (r_2 V_2 \cos \alpha_2 - r_1 V_1 \cos \alpha_1) \\ P &= \rho Q_v (\omega r_2 V_2 \cos \alpha_2 - \omega r_1 V_1 \cos \alpha_1) \end{aligned} \quad [\text{W}]$$

Equation 3-2: Puissance fournie au liquide par la roue

Avec :- $\omega r_1 : U_1$

- $\omega r_2 : U_2$

Alors:

$$P = \rho Q_v (U_2 V_2 \cos \alpha_2 - U_1 V_1 \cos \alpha_1)$$

Equation : Puissance fournie au liquide par la roue

Après élimination des fonctions trigonométriques de cette dernière

$$- U_1 V_1 \cos \alpha_1 = \frac{1}{2} (U_1^2 + V_1^2 - W_1^2)$$

$$- U_2 V_2 \cos \alpha_2 = \frac{1}{2} (U_2^2 + V_2^2 - W_2^2)$$

On obtient :

$$P = \bar{\omega} Q_v \left[\frac{V_2^2 - V_1^2}{2g} + \frac{U_2^2 - U_1^2}{2g} + \frac{W_2^2 - W_1^2}{2g} \right]$$

Equation : Puissance fournie au liquide par la roue

- $\bar{\omega}$: Le poids spécifique du mètre cube de liquide refoulé
- $\frac{V_2^2 - V_1^2}{2g}$: accroissement unitaire de l'énergie cinétique du liquide du au changement de vitesse V_1 à V_2
- $\frac{U_2^2 - U_1^2}{2g}$: accroissement unitaire de l'énergie de pression produit par la force centrifuge
- $\frac{W_2^2 - W_1^2}{2g}$: accroissement unitaire de l'énergie relative au passage par les canaux divergents de la roue

Comptent des relations de la figure de diagrammes de vitesse :

- $V_1^2 = V_{u1}^2 + V_{m1}^2$
- $V_2^2 = V_{u2}^2 + V_{m2}^2$
- $W_1^2 = W_{u1}^2 + W_{m1}^2$
- $W_2^2 = W_{u2}^2 + W_{m2}^2$

L'équation devient :

$$P = \bar{\omega} Q_v \left[\frac{V_{u2}^2 - V_{u1}^2}{2g} + \frac{U_2^2 - U_1^2}{2g} + \frac{W_{u2}^2 - W_{u1}^2}{2g} \right]$$

Équation 3-3: Puissance

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

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

$$P = \bar{\omega} Q_v H_{th\infty}$$

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

$$H_{th\infty} = \left[\frac{V_{u2}^2 - V_{u1}^2}{2g} + \frac{U_2^2 - U_1^2}{2g} + \frac{W_{u2}^2 - W_{u1}^2}{2g} \right]$$

Équation 3-4: Hauteur d'élévation théorique

- $\frac{V_{u2}^2 - V_{u1}^2}{2g}$: hauteur dynamique d'élévation (effet du changement des vitesses absolues)
- $\frac{U_2^2 - U_1^2}{2g} + \frac{\omega_{u2}^2 - \omega_{u1}^2}{2g}$: hauteur potentielle d'élévation (effet de l'action des forces centrifuges et de la réduction de la vitesse relative de \vec{W}_1 à \vec{W}_2)

Pour un débit donné et une vitesse de rotation donnée cette énergie ne dépend que des angles d'entrée et de sortie du fluide mais non pas du trajet suivi à l'intérieure de la roue.

En générale il n'y a pas de roue directrice modifiant la direction d'amenée du liquide avant l'entrée de la roue donc l'arrivée du liquide à l'entrée de la roue et radial

$$- \alpha = 90^\circ$$

$$- \cos 90^\circ = 0$$

$$\text{D'où : } U_1 V_1 \cos \alpha_1 = 0$$

$$\text{Et } U_2 V_2 \cos \alpha_2 = V_{u2}$$

V_{u2} : composante tangentielle de V_2

L'équation devient plus simple :

$$H_{th\infty} = \frac{V_{u2}^2}{U_2} \frac{U_2^2}{g}$$

Équation 3-5: Hauteur d'élévation théorique pour $\alpha = 90^\circ$

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

➤ **Coefficient de pression ψ**

$$H_n = \eta_h H_{th}$$

$$H_n = \eta_h \frac{V_{u2}^2}{U_2} \frac{U_2^2}{g}$$

On note :

$$H_n = \psi \frac{U_2^2}{g}$$

Avec :

$$\psi = \eta_h \frac{V_{u2}^2}{U_2}$$

Équation 3-6 : Coefficient de pression ψ

➤ **Coefficient de vitesse φ :**

A la sorti de la pompe le débit Q_v proportionnel à la vitesse radial V_{r2}

$$Q_v = \pi D_2 b_2 V_{r2}$$

$$Q_v = 4 \frac{b_2}{D_2} \frac{V_{r2}}{U_2} \frac{\pi D_2^2}{4} U_2 = \varphi \frac{\pi D_2^2}{4} U_2$$

Avec :

$$\varphi = 4 \frac{b_2}{D_2} \frac{V_{r2}}{U_2}$$

Équation 3-7: Coefficient de vitesse φ

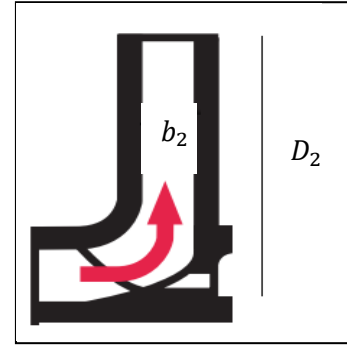


Figure 3-17: Sortie de la pompe

➤ Comparaison entre les pompes volumétriques et les Pompes centrifuges [17].

	Pompes centrifuges	Pompes volumétriques
Mécanique	- Met le liquide en mouvement, ce qui crée une pression à la sortie (une pression apparaît, entraînant un débit).	- Isole une certaine quantité de liquide et la transfère de l'orifice d'aspiration à celui de refoulement (un débit est créé, entraînant une pression).
Performance	- Le débit dépend de la pression variable.	- Le débit est constant quelle que soit la pression.
Viscosité	- Le rendement diminue avec l'augmentation de la viscosité à cause des pertes par frottement dans la pompe	- Le rendement augmente avec la viscosité.
Rendement	- Rendement optimal en un point. À des pressions différentes, le rendement diminue	- Le rendement augmente avec la pression.
Conditions d'entrée	- Le liquide doit être dans la pompe pour créer un différentiel de pression - Auto-amorçage d'une pompe à sec impossible	- Une pression négative est créée à l'orifice d'entrée. - Auto-amorçage d'une pompe à sec possible

➤ Choix de la pompe :

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

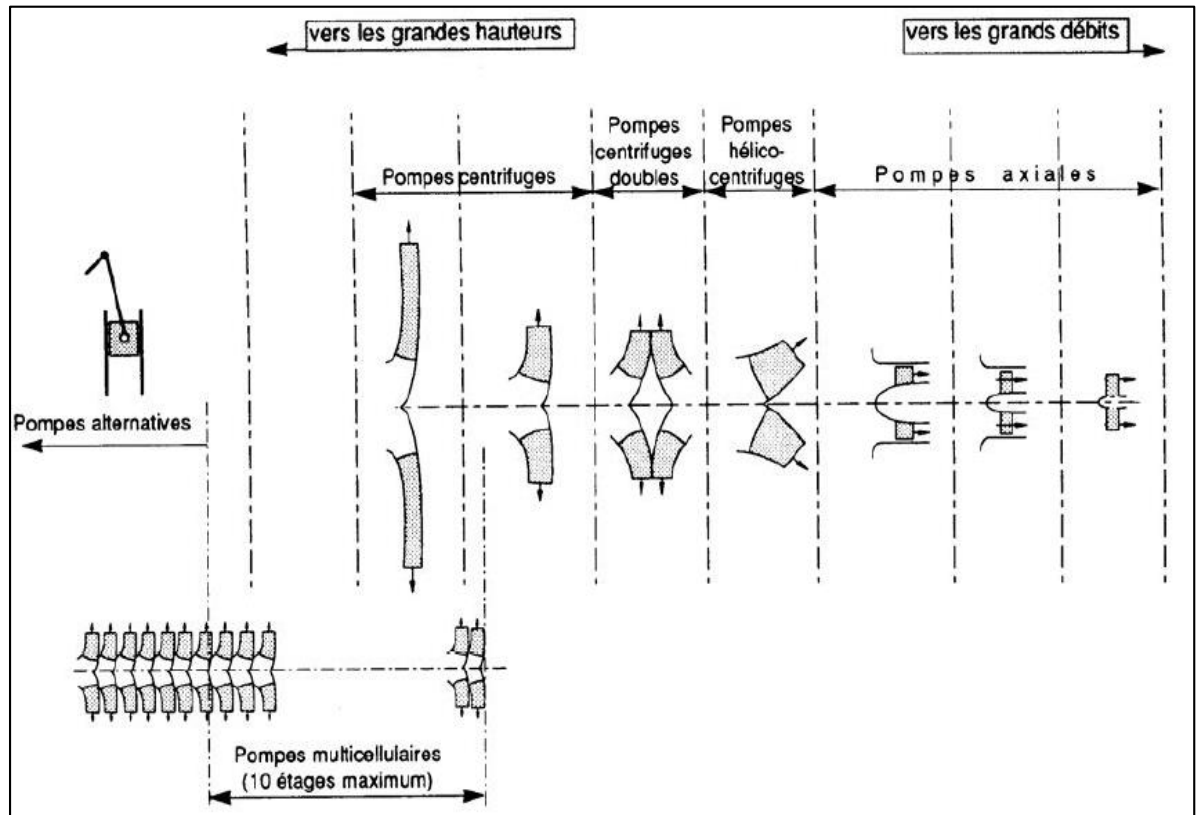


Figure3-18: Choix de pompe

III.4 Théorie des pompes centrifuges : [10]

✓ Vitesse de rotation ω :

C'est le nombre de tours qu'effectue la pompe par unités de temps.

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

Équation 3-8: Vitesse de rotation

✓ Débit Q :

Quantité de liquide débitée par la pompe dans l'unité de temps, on exprimée en $[m^3/h]$.

✓ Puissance :

➤ Puissance utile (P_u) : travail réalisé par la pompe :

$$P_u = \rho \cdot g \cdot Q_v \cdot H_{MT} \quad [W]$$

Équation 3-9: Puissance utile

Avec :

- ρ : masse volumique de fluide [Kg/m^3]
- g : gravité [m/s^2 ou N/Kg]
- Q_v : débit volumique [m^3/s]
- H_{MT} : hauteur manométrique d'une pompe [m]

➤ Puissance absorbée (P_a) : fournie sur l'axe de la pompe.

$$P_a = C \cdot \omega = C \cdot 2 \cdot \pi \cdot n / 60 \quad [W]$$

Équation 3-10: Puissance absorbée

Avec

- C : couple moteur [N.m]
- ω : vitesse de rotation [rad/s]
- n : nombre de rotation

✓ Rendement globale de la pompe η_g :

$$\eta_g = P_u / P_a \quad \text{ou} \quad \eta_g = \eta_h \cdot \eta_v \cdot \eta_m$$

Équation 3-11: Rendement totale

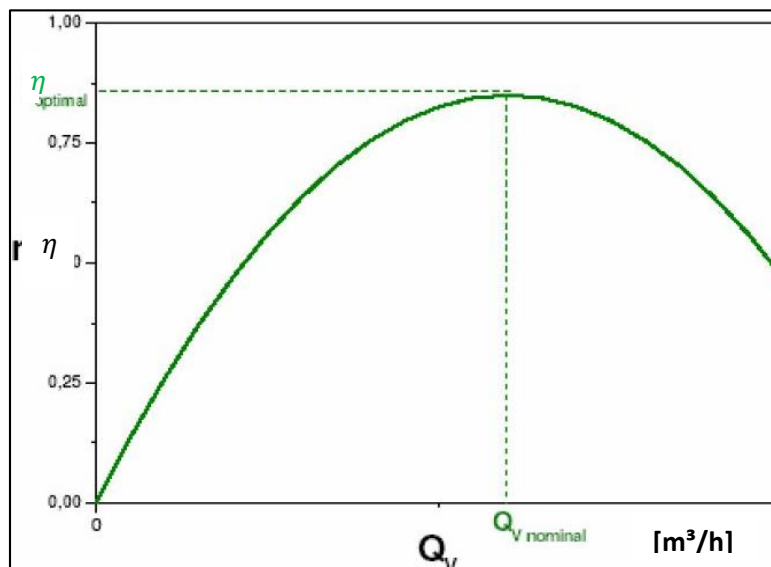


Figure 3-19: Rendement en fonction de débit

Avec

➤ **η_h : rendement hydraulique :**

$$\eta_h = h_n / h_{th}$$

- h_n : hauteur recueillie en [m] $h_n = h_{th} - \sum J$
- $\sum J$: pertes de charge de la roue [m]
- h_{th} : hauteur théorique[m]

➤ **η_v : rendement volumétrique :**

$$\eta_v = Q_v / (Q_v + Q)$$

- Q_v : débit de l'eau
- Q : débit des pertes de fuite dans le joint à l'extérieur de la roue

➤ **η_m : rendement mécanique :**

$$\eta_m = P_i / P$$

- P_i : puissance absorbée par la roue
- P : puissance fournie

✓ **Pertes de charge dans la pompe :**

Les pompes produisent des pertes naturelles en cours de fonctionnement, résultant de l'interaction entre le fluide et le mécanisme frictionnel qui se produit à l'intérieur et à l'extérieur de ses composantes. Les différents types de pertes qui se produisent dans les pompes, classées pertes intérieures ou extérieures.

➤ **Pertes intérieures :**

- Pertes de charge : produites par la viscosité et la turbulence du fluide.
- Pertes par fuites : produites par l'écart qui existe obligatoirement entre les pièces en mouvement et les pièces fixes.
- Pertes par friction intérieure : une roue (impulser) de pompe centrifuge comporte des surfaces inactives, indépendantes de son travail de transmission d'énergie au fluide, produisant une augmentation de la friction visqueuse. Ce qui entraîne des pertes par friction intérieure dans le fluide.

➤ **Pertes extérieures :**

- Fuites extérieures : elles se produisent là où l'arbre traverse le carter de la machine. Une partie du débit qui arrive à la pompe est détournée de son arrivée à l'entraînement et il y a déperdition.
- Pertes par friction extérieure : produites par la friction mécanique dans la garniture de l'arbre ou le roulement de la pompe.[10]

✓ **Hauteur manométrique totale (H_{MT}) :**

C'est la somme de la hauteur géométrique dans les niveaux du liquide et les pertes de charge causées par de frottements intérieurs qui se forment au passage du liquide dans les tuyaux, dans la pompe et les accessoires hydrauliques.

$$H_{MT} = H_{TR} \pm H_{TA}$$

Équation 3-12: Hauteur manométrique totale

La hauteur varie avec le débit et est représentée par la courbe caractéristique $H = f(Q)$

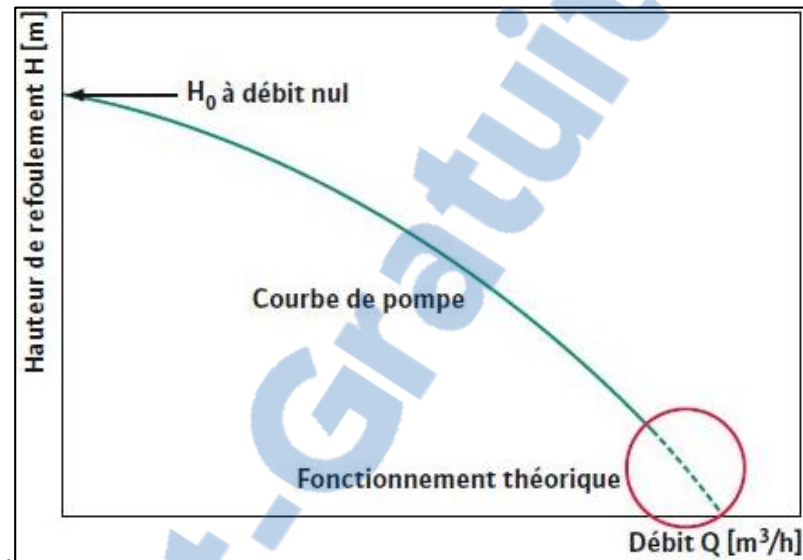


Figure 3-20: Hauteur manométrique en fonction de débit

✓ **NPSH :**

Le NPSH est une valeur importante de la pompe centrifuge (Net Positive Suction Head). Il indique la pression minimale requise par ce type de pompe afin de fonctionner sans cavitation, c'est-à-dire la surpression nécessaire pour empêcher l'évaporation du fluide et le conserver à l'état de liquide.

Le NPSH dépend, d'une part de la construction de la pompe : type de roue, vitesse de rotation. D'autre part des conditions de fonctionnement : la température du fluide, la charge d'eau et la pression atmosphérique.

On distingue le NPSH de l'installation $NPSH_{disponible}$ et le NPSH de la pompe $NPSH_{requis}$.

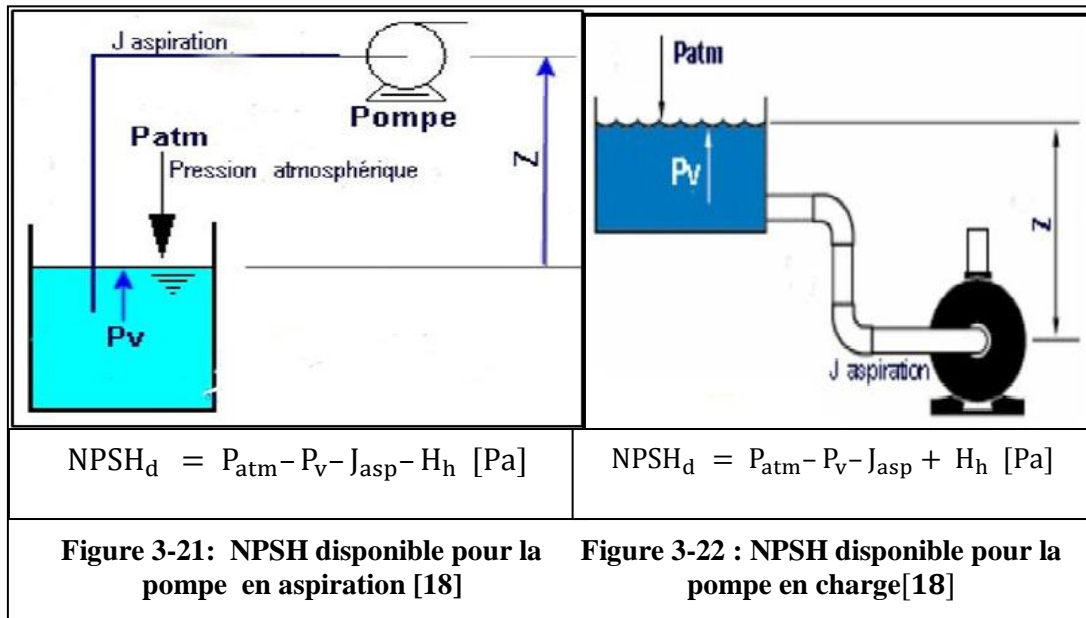
- P_{atm} : pression atmosphérique (dépend de l'altitude) en [Pa]
- P_v : pression absolue [Pa] de vaporisation
- J_{asp} : pertes de charge de la conduite d'aspiration en [Pa]
- H_h : charge hydraulique du fluide

$$H_h = \rho \cdot g \cdot Z$$

[pa]

- Z : hauteur géométrique (d'aspiration ou de refoulement ou les deux) en mètre d'eau
- P : masse volumique de liquide
- g : pesanteur [m/s^2]

Une pompe fonctionne dans des conditions d'aspiration d'autant meilleures que la différence $NPSH_d - NPSH_r$ est grande. On estime nécessaire de se réserver une marge de sécurité d'au moins 0,5 [m] et donc d'avoir : $NPSH_d > NPSH_r + 0.5m$ [18]



III.5 Problèmes de fonctionnement de la pompe :

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

➤ Surcharge :

Une pompe est choisie d'après certaines conditions spécifiques telles que débits, pression, vitesse... qu'elle peut fonctionner de temps à autrement surcharge.

Mais si on oublie que ce service devrait être rendu occasionnellement, et qu'on la fait tourner 24 heures par jour sous ce régime, on obtient une rupture de l'arbre ou des paliers grillés.

➤ Mauvais graissage :

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

➤ **Fluide inadapté :**

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

➤ **Fonctionnement à vide :**

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

➤ **Mauvais alignement :**

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

➤ **Fuite :**

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

➤ **La cavitation :**

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

Pour éviter la cavitation, le fluide pompé doit être soumis à une pression statique minimale. Cette hauteur d'eau d'entrée minimale dépend de la température et de la pression du fluide pompé[10].

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

- Augmentation de la pression statique
- Diminution de la température du fluide
- Choix de pompe avec hauteur d'entrée d'eau minimale[8].





Figure 3-23 : Problème de cavitation

III.6 Courbes caractéristique de la pompe centrifuge :

L'installation de la pompe dans un système de pompage exige, la connaissance de ses paramètres nominaux, débit nominal Q_v et la hauteur nominale H_n assurés à la vitesse de rotation nominale .

Dans ce but, le fonctionnement des pompes est caractérisé par un ensemble de courbes appelées caractéristiques, dont les plus utilisées sont :

1. Hauteur-débit
2. Puissance-débit
3. Rendement-débit
4. (NPSH) –débit

III.6.1 Courbe hauteur-débit :

On trace cette courbe réelle à partir de la courbe théorique par soustraction des pertes d'énergies. Cette courbe montre la variation de la pression ou hauteur en fonction du débit, ce qui permet aux exploitants d'obtenir la pression désirée par une simple manœuvre de lavanne de refoulement, ce qui change le débit [18].

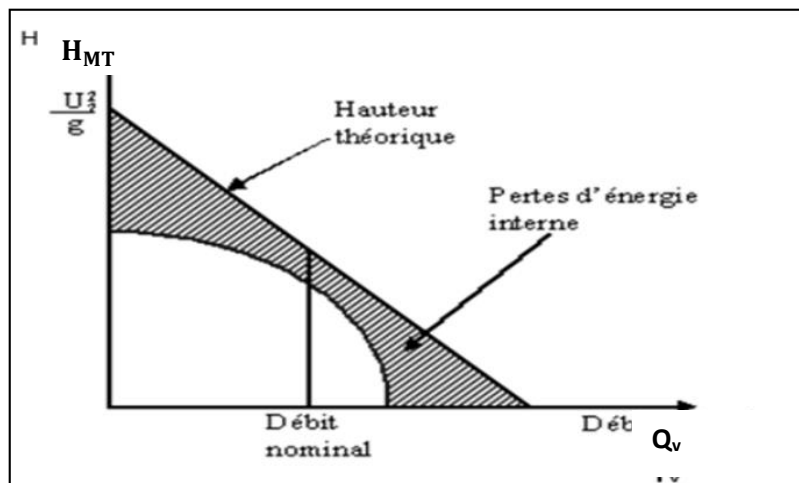


Figure 3-24: Courbe de la hauteur en fonction du débit [18]

III.6.2 Courbe Puissance-débit :

Dans les pompes à faible et moyenne vitesse spécifique, les courbes P représente la puissance absorbée par l'arbre de pompe, ce qui permet de faire le choix de la courbure quiconvient, les courbes $P = F(Q_v)$.

Sont régulièrement montantes et atteignent par fois un maximum [18].

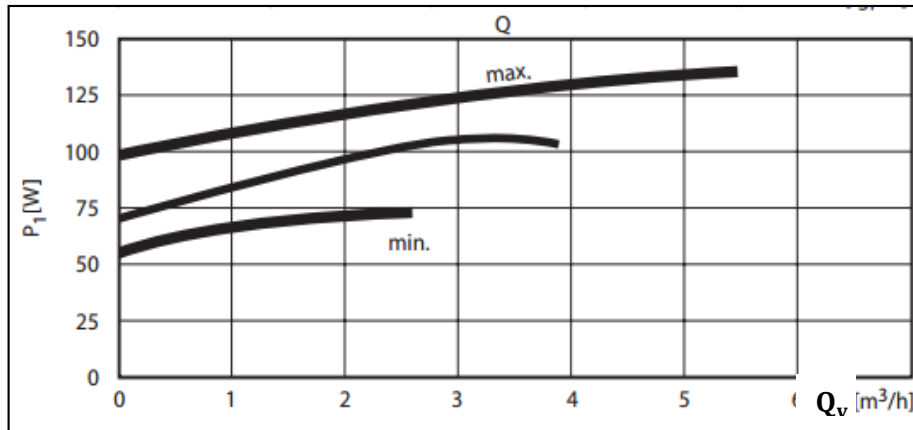


Figure 3-25: Courbe de la puissance en fonction de débit [18]

III.6.3 Courbe Rendement-débit :

Le rendement d'une machine est le rapport de sa puissance restituée sur sa puissance fournie. Sur la courbe de pompe, le rendement instantané varie également entre zéro et une valeur maximale. Lorsque la pompe fonctionne avec vanne fermée, on obtient une forte pression, mais le rendement de la pompe est nul car aucun débit d'eau ne circule. Bien que le débit d'eau soit important, il n'y a pas de pression et le rendement est nul. Le meilleur rendement total de la pompe se trouve au centre la courbe de pompe. Le rendement (ou performance) d'une pompe dépend de sa conception [18].

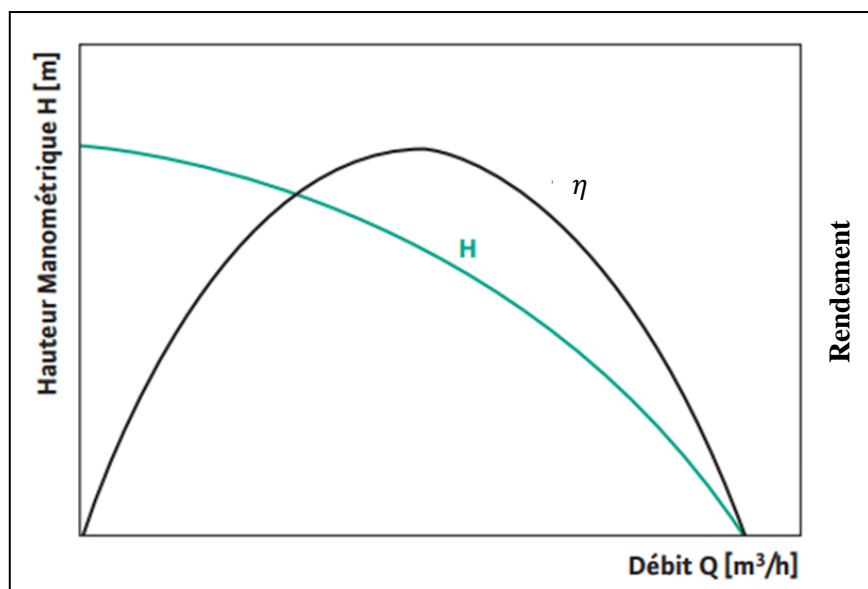


Figure3-26 : Courbe de rendement en fonction de débit[18]

III.6.4 Courbe NPSH-débit :

Pour qu'une pompe fonctionne normalement (sans cavitation) , il faut que le NPSH disponible(calculé) soit supérieur au NPSH requis (indiqué par le constructeur) [18].

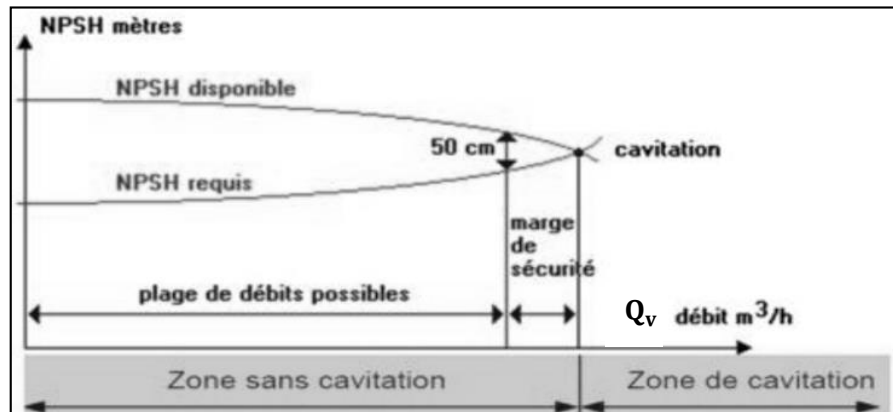


Figure 3-27: Courbe de NPSH en fonction de débit [18]

III.7 Couplage des pompes :

- Couplage en parallèle (Figure 3-28) :

Si les pompes fonctionnent en parallèle, les courbes de pompe sont ajoutées l'une à l'autre. le débit est cumulatif. Ainsi, le débit maximum de deux pompes de même taille double [10].

- Couplage en série (Figure 3-29):

Si deux pompes sont connectées l'une derrière l'autre, les courbes de pompe s'ajoutent. Ainsi, la hauteur de refoulement si $Q = 0$ est doublée pour deux pompes de même dimension. À l'inverse, deux pompes ne peuvent pas transporter une quantité plus importante de fluide qu'une seule pompe. Mais on peut déplacer à une hauteur plus élevée [10].

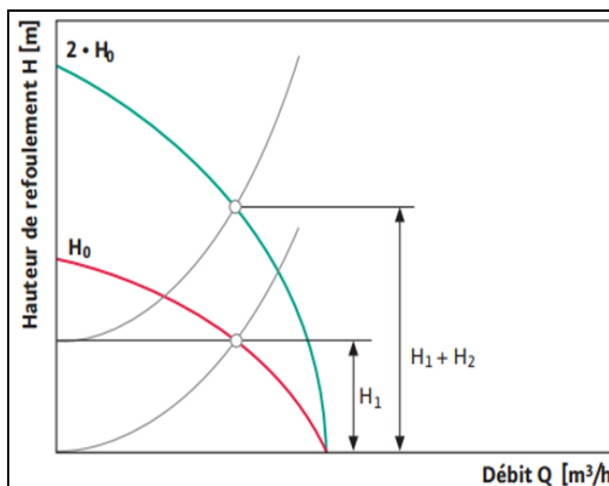


Figure 3-29: Couplage de deux pompes en série [10]

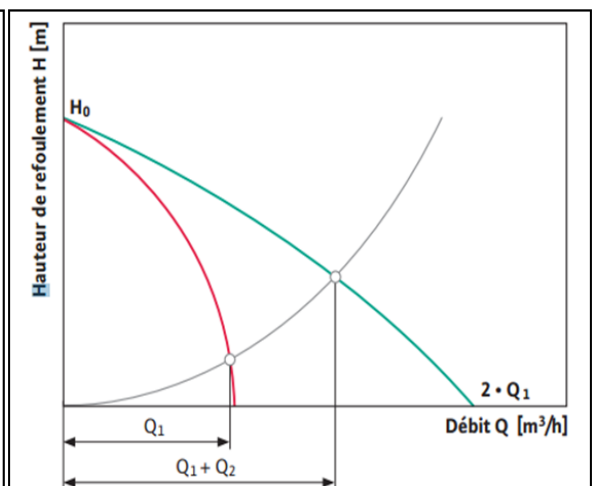


Figure 3-28: Couplage de deux pompes en parallèles [10]

IV. Calculs des conduites :

Les conditions d'écoulement à l'intérieur des conduites sont infectées directement par le débit, la vitesse du fluide, le diamètre de la canalisation. Elles sont également conditionnées par la résultante des pertes de charge, pertes locales provoqué par les raccords, coudes, divergents et convergents des canalisations, et les commandes des appareils et les pertes provoquées par la longueur de conduit. Le dimensionnement des canalisations est également asservi au matériau constituant la conduite, sa nature (fonte, acier, ciment poli, béton, matière plastique), la qualité de sa paroi intérieure et son degré d'incrustation.

Les équations théoriques sont donc corrigées pour tenir compte de ces influences multiples et en perpétuelle évolution de certains de ces matériaux.

IV.1 Propriétés du fluide :

IV.1.1 Pression :

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

$$P = F/A$$

Équation 3-13: Expression de la pression

Avec :

F : force [N]

A : surface [m²]

1. Pression absolue:

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

2. Pression relative :

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

IV.1.2 Viscosité :

La viscosité peut être considérée comme le frottement interne qui résulte du glissement d'une couche de fluide sur une autre. Un liquide très visqueux est un liquide qui présente un frottement interne élevé.

On appelle fluide parfait un fluide dont la viscosité serait nulle (fluide inexistant dans la nature). La viscosité existe dès qu'il y a mouvement relatif entre particules, que ce soit en régime laminaire ou turbulent. [9]

1. Viscosité dynamique :

Considérons un fluide placé entre deux plaques planes, parallèles, distantes de L et horizontales. L'une est fixe et l'autre est en mouvement uniforme de vitesse U_0 . Pour générer une vitesse de la plaque supérieure (surface A), il faut exercer une force F .

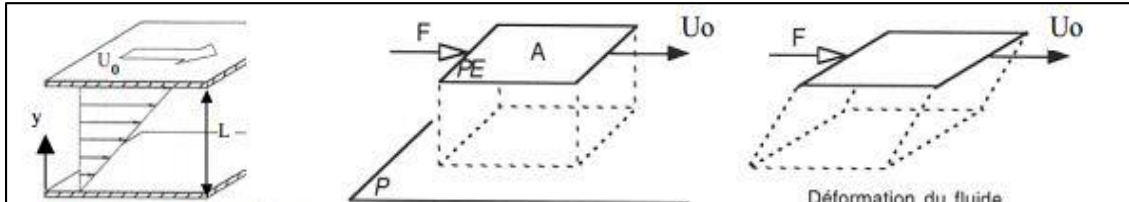


Figure 3-30: Répartition de la vitesse entre deux plaques [13]

Cette force est la résultante des forces de frottements visqueux.

Donc Il y a une proportionnalité entre le rapport de la Force F et la surface A avec le rapport entre la vitesse U_0 et la longueur L :

$$\frac{F}{A} = \mu \frac{U_0}{L} = \frac{\partial U}{\partial y}$$

Équation 3-14: Formule de la viscosité dynamique

➤ $\mu [N \cdot \frac{s}{m^2}]$ appelé la viscosité dynamique ou absolue

2. Viscosité cinématique :

Le coefficient de viscosité cinématique est défini à partir du coefficient de viscosité dynamique μ par la relation :

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad [m^2/s]$$

Équation 3-15: Formule de la viscosité cinématique

Avec :

ρ : masse volumique du fluide [kg/m^3]

- **Remarque :**

Il y a une autre unité pour mesurer la viscosité :

La viscosité dynamique $\mu [N \cdot \frac{s}{m^2}]$ ou $[Pa \cdot s]$ cette unité ayant remplacé le

Poiseuille [Pl] qui a la même valeur et aussi on trouve le **Poise [Po]** :

$$1 [Pa \cdot s] = 10 Po.$$

La viscosité cinématique $\nu [m^2/s]$ cette unité était exprimée en **Stokes** $[St]$ ou $[cSt]$:

$$1St = 1cm^2/s = 10^{-4}m^2/s$$

$$\mu_{eau} \text{ à } 20^\circ C = 10^{-3}pa.s$$

$$\nu_{eau} \text{ à } 20^\circ C = 10^{-6}m^2/s$$

IV.1.3 Masse volumique :

La masse volumique ρ est le rapport : $Masse / Volume \left[\frac{Kg}{m^3} \right]$

Pour les liquides, le volume est pratiquement insensible aux variations de pression et, dans la majorité des cas, il augmente faiblement quand la température augmente. Contrairement aux liquides, les gaz sont fortement compressibles. La variation de masse volumique dépend de la température et de la pression.

IV.2 Dynamique des fluides incompressibles :

IV.2.1 Débit :

Le débit est la quantité de fluide qui traverse une section droite de la conduite par la durée de cet écoulement.

1. Débit massique :

$$Q_m = \frac{M}{\Delta t} \quad \left[\frac{Kg}{s} \right]$$

Équation 3-16: Débit massique

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

Δt : temps d'écoulement le fluide $[s]$

2. Débit volumique :

$$Q_v = \frac{V}{\Delta t} \quad \left[\frac{m^3}{s} \right]$$

Équation 3-17: Le débit volumique.

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

Δt : temps d'écoulement le fluide $[s]$

3. Relation entre le débit massique Q_v et le débit volumique Q_m :

La masse volumique est donnée par la relation :

$$\rho = \frac{M}{V} \left[\frac{Kg}{m^3} \right]$$

↓

$$\rho = Q_m / Q_v \quad \text{Donc} \quad Q_m = \rho Q_v$$

IV.3 Régimes d'écoulements :

En écoulement de fluide réel, on distingue trois grands types de d'écoulement : le régime laminaire , Le régime transitoire et le régime turbulent.

IV.3.1 Régime laminaire :

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

La vitesse est nulle pour les particules voisines de toute surface matérielle immobile et maximale pour les points les plus éloignés. Dans ce type d'écoulement, en régime permanent, les trajectoires (qui sont alors confondues avec les lignes de courant) ne se coupent jamais au cours de l'écoulement [12].

IV.3.2 Régime transitoire :

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

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

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

- disjonction électrique
- manœuvre rapide d'ouverture ou de fermeture d'un robinet-vanne
- fin de remplissage d'une conduite
- implosion d'une poche de cavitation
- arrêt et démarrage d'une pompe

Dans le cas d'une station de pompage, les régimes transitoires les plus dangereux sont consécutifs à une disjonction électrique (ou panne de courant).[13]

IV.3.3 Régime turbulent:

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

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

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

IV.3.4 Nombre de Reynolds Re :

Un nombre sans dimension :

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

Équation 3-18: Nombre de Reynolds.

ρ : masse volumique [Kg/m³]

U_m : vitesse moyenne du fluide [m/s]

D : diamètre de la canalisation [m]

μ : viscosité dynamique de fluide [N.s/m²]

Lorsque les forces de viscosité sont grandes par rapport aux forces d'inertie (faible nombre de Reynolds), l'écoulement est stabilisé : c'est un écoulement laminaire.

Si, par contre, les forces d'inertie l'emportent sur les forces de viscosité (fort nombre de Reynolds), l'écoulement devient turbulent [13].

Quel que soit le fluide :

Ecoulement dans conduite circulaire	Ecoulement entre deux plaques parallèles	Ecoulement autour d'une sphère
$Re > 4000$ turbulent $Re < 2000$ laminaire $2000 < Re < 4000$ Transitoire. L : diamètre de la conduite.	$Re < 500$ laminaire Sinon turbulent L : distance entre les deux plaques.	$Re < 1$ laminaire Sinon turbulent L : diamètre de la sphère.

IV.4 Équation de conservation de la masse ou équation de continuité :

➤ Définitions :

1. Ligne de courant :

Les lignes de courant sont des lignes imaginaires de l'écoulement indiquant la direction du mouvement du fluide. Elles sont tangentes en chaque point aux vecteurs-vitesses des particules du fluide.

2. Tube de courant :

C'est l'ensemble de lignes de courant s'appuyant sur une courbe fermée.

3. Filet de courant:

Tube de courant s'appuyant sur un petit élément de surface ΔS .

La section de base ΔS du tube ainsi définie est suffisamment petite pour que la vitesse du fluide soit la même en tous ses points (répartition uniforme)[12].

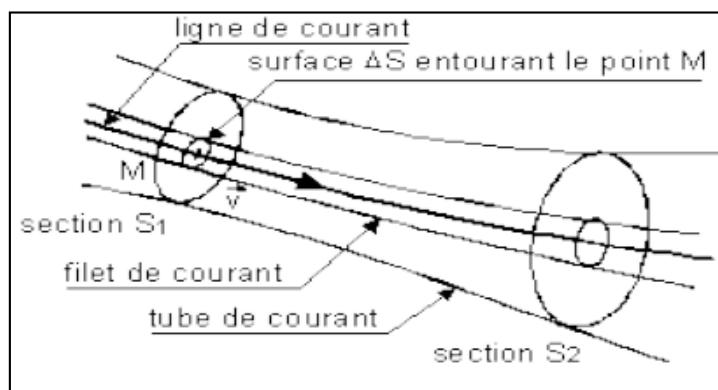


Figure 3-31: Représentation de l'écoulement [12]

IV.4.1 Conservation du débit :

Considérons un tube de courant entre deux sections S_1 et S_2 . Pendant l'intervalle de temps Δt , infiniment petit, la masse Δm_1 de fluide ayant traversé la section S_1 est la même que la masse Δm_2 ayant traversé la section S_2 . donc :

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

Dans le cas d'un régime stationnaire et le fluide est incompressible: $\rho_1 = \rho_2$

On a alors :

$$Q_{v1} = Q_{v2}$$

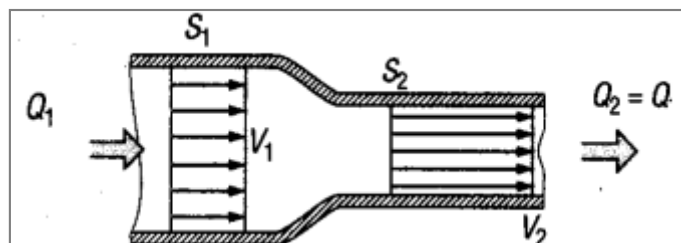


Figure 3-32: Conservation d'énergie [12]

IV.4.2 Expression du débit en fonction de la vitesse U:

Le débit volumique Q_v d'un fluide incompressible à travers une section S quelconque d'un tube de courant est indépendant de la section considérée.

C'est aussi la quantité de liquide traverse une section S avec vitesse V , pendant un unité du temps. Il en résulte la relation importante :

$$Q_v = U.S$$

Équation 3-19: Débit volumique en fonction de vitesse

IV.4.3 Vitesse :

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

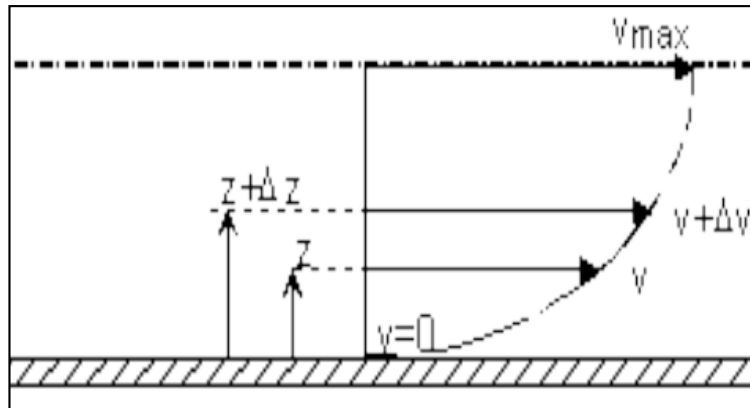


Figure 3-33: Représentation de vitesse [12]

Si on représente par un vecteur, la vitesse de chaque particule située dans une section droite perpendiculaire à l'écoulement d'ensemble, la courbe lieu des extrémités de ces vecteurs représente le profil de vitesse.

Le mouvement du fluide peut être considéré comme résultant du glissement des couches de fluide les unes sur les autres.

La vitesse de chaque couche est une fonction de la distance z de cette couche au plan fixe : $U = U(Z)$ [12]

IV.4.3.1 Vitesse moyenne :

Le débit-massique ou le débit-volumique s'obtient en intégrant la relation précédente :

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

$$U_m = Q_v/S$$

Équation 3-20 : Vitesse moyenne

La vitesse moyenne U_m apparaît comme la vitesse uniforme à travers la section S qui assurerait le même débit que la répartition réelle des vitesses.

Si l'écoulement est isochore, cette vitesse moyenne est inversement proportionnelle à l'aire de la section droite. Équation de continuité :

$$Q_v = U_{m1}S_1 = U_{m2}S_2 = cts$$

$$U_{m1}/U_{m2} = S_2/S_1$$

Plus la section est faible et plus la vitesse moyenne s'accroît.

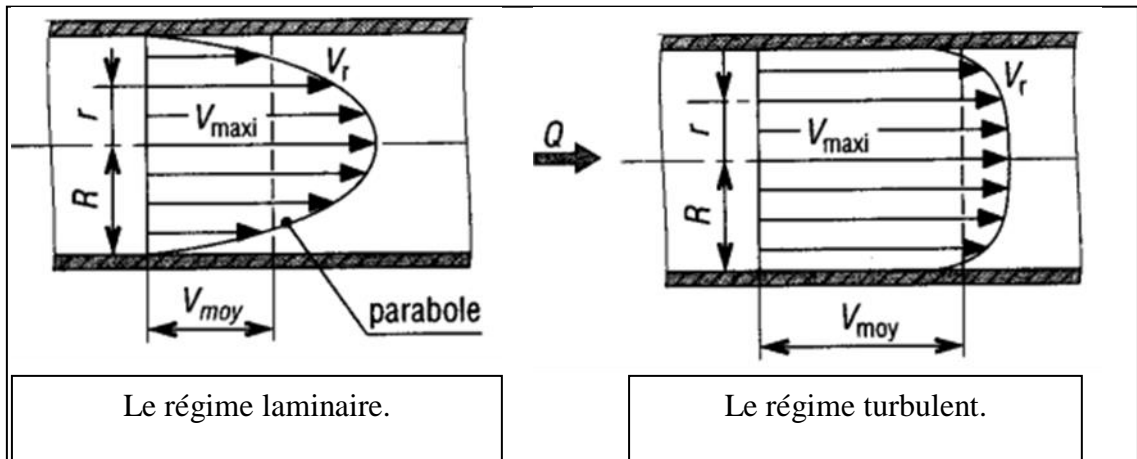


Figure 3-34: Vitesse moyenne [12]

IV.5 EQUATIONS DE BERNOULLI

IV.5.1 Cas des fluides parfaits

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

Le tube de courant est énergétiquement isolé et il y a conservation de l'énergie entre sa section d'entrée \$S_1\$, sa section de sortie \$S_2\$.

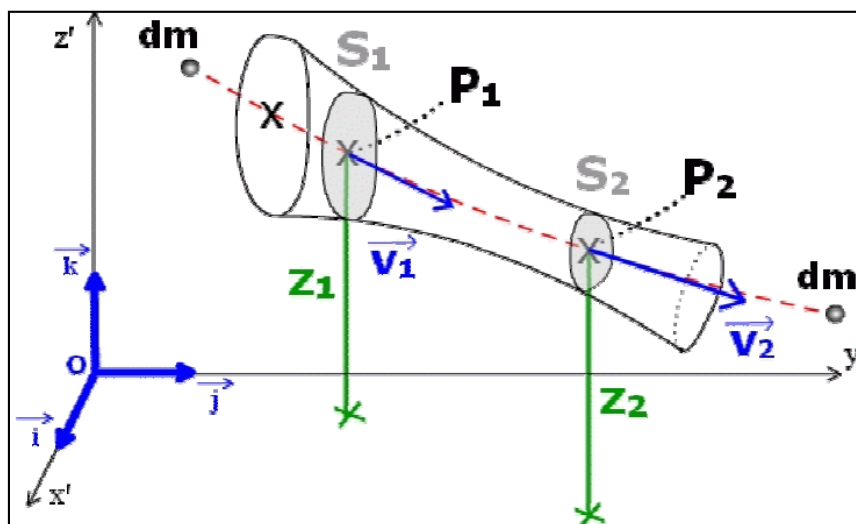


Figure 3-35: Théorème de Bernoulli

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

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

En trouve :

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

Équation 3-21: Equation de Bernoulli en terme pression

Avec :

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

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

En divisant tous les termes de la relation précédente par le produit ρg , on écrira tous les termes dans la dimension d'une hauteur (pressions exprimées en mètres de colonne de fluide).

$$\frac{p}{\rho g} + \frac{U^2}{2g} + z = H = \text{cst1}$$

Équation 3-22: Equation de Bernoulli en terme hauteur

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

Tous les termes s'expriment en mètre [m]

IV.5.2 Cas d'échanges d'énergie :

Une machine placée dans le tube de courant et échangeant de l'énergie avec le fluide modifie les caractéristiques de l'écoulement.

Si $W_{1/2}$ est l'énergie échangée entre la machine et le fluide, l'équation de Bernoulli s'écrit :

$$\frac{p_1}{\rho g} + \frac{U_1^2}{2g} + z_1 + W_{1-2} = \frac{p_2}{\rho g} + \frac{U_2^2}{2g} + z_2$$

Équation 3-23: Equation de Bernoulli avec échange d'énergie [13]

Remarque :

Lorsque la machine est motrice (pompe, etc.), elle fournit de l'énergie au fluide ($W_{1-2} > 0$) qui s'ajoute à celle de la section d'entrée S_1 .

Si la machine est réceptrice (turbine, moteur hydraulique, etc.), elle prend de l'énergie au fluide ($W_{1-2} < 0$) qui se retranche de celle en S_1 .

IV.5.3 Cas de pertes de charge :

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

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

Équation 3-24 : Equation de Bernoulli avec les pertes de charge [13]

IV.6 Les pertes de charges :

Lorsqu'on considère un fluide réel, les pertes d'énergie spécifiques ou bien les pertes de charge dépendent de la forme, des dimensions et de la rugosité de la canalisation, de la vitesse d'écoulement et de la viscosité du liquide mais non de la valeur absolue de la pression qui règne dans le liquide.

La différence de pressions : $p = p_1 - p_2$ entre deux points (1) et (2) d'un circuit hydraulique a pour origine :

- ✓ Les frottements du fluide sur la paroi interne de la tuyauterie ; on les appelle pertes de charge régulières ou systématiques (linéaire).
- ✓ La résistance à l'écoulement provoquée par les accidents de parcours (coudes, élargissements ou rétrécissement de la section, organes de réglage, etc.) : ce sont les pertes de charge accidentelles ou singulières.

Le problème du calcul de ces pertes de charge met en présence les principales grandeurs suivantes :

- Le fluide est caractérisé par :
 - sa masse volumique ρ
 - sa viscosité cinématique ν
- Un tuyau est caractérisé par
 - Sa section (forme et dimension) en général circulaire (diamètre D), sa longueur
 - Sa rugosité k (hauteurs moyennes des aspérités de la paroi)

Ces éléments sont liés par des grandeurs comme la vitesse moyenne d'écoulement V_m ou le débit Q_v et le nombre de Reynolds Re qui joue un rôle capitale dans le calcul des pertes de charge [13].

➤ **Rugosité absolue et rugosité relative :**

Une surface rugueuse peut être considérée comme étant constituée par une série de protubérances élémentaires. Elles sont caractérisées par une certaine hauteur ε (désignée parfois par k)

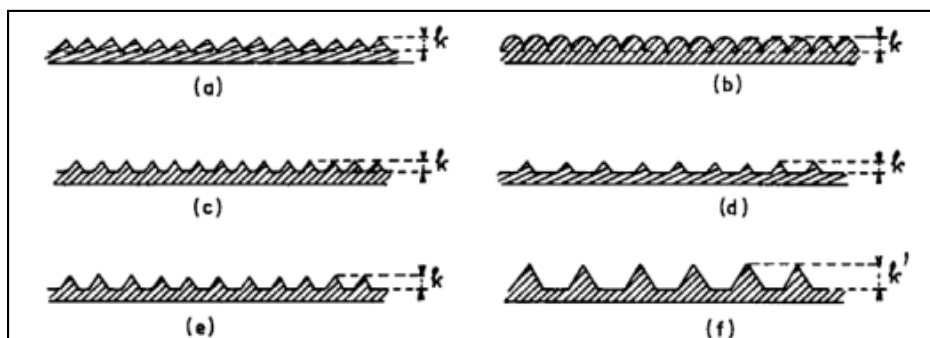


Figure 3-36: Types de rugosité de parois

La rugosité absolue correspond à la notion habituelle de présence plus ou moins importante d'aspérités sur une surface. Elle est déterminée par la mesure de l'épaisseur des rugosités des parois des tuyaux

La rugosité relative est le rapport de la rugosité absolue ε au diamètre de la conduite D (ε/D)[13].

➤ **Les tuyaux lisses et tuyaux rugueux :**

Lorsque les rugosités de la paroi sont moins hautes que l'épaisseur du film laminaire, la nature des irrégularités n'a pas d'influence sur la turbulence et l'on dit que l'écoulement se fait en tuyau lisse.

Lorsque au contraire les irrégularités de la paroi pénètrent dans la région turbulente de l'écoulement elles en accentuent la turbulence et font par conséquent varier la perte d'énergie, on dit alors que l'écoulement a lieu en écoulement rugueux par suit, l'écoulement turbulent pourra s'effectuer en tuyaux lisses écoulement turbulent lisse, ou en tuyaux rugueux en écoulement turbulent rugueux.

IV.6.1 Pertes de charge linéaires :

Les pertes de charge linières résultent du frottement exercé entre le fluide et la surface intérieure de la canalisation. Elles sont proportionnelles à la longueur L de la conduite et au carré de la vitesse moyenne V du fluide, inversement proportionnelle au diamètre d et fonction de la rugosité moyenne R de la canalisation. Défini par équation suivant :

$$\Delta H_L = \lambda \frac{U_m^2 L}{2g D} \quad [\text{m}]$$

Équation 3-25: Pertes de charge linéaires [13]

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

Avec :

λ : coefficient de perte de charge. Il est sans dimension et est fonction du nombre de Reynolds et de la rugosité

L : longueur de la conduite [m]

D : diamètre [m]

U_m : vitesse moyenne [m/s]

J_L : perte de charge part unité de longueur

IV.6.1.1 Détermination de λ :

➤ **En régime laminaire** : ($Re < 2000$)

Seules les forces de viscosité interviennent. La vitesse est très faible et l'état de surface de la paroi n'intervient pas dans le calcul du coefficient λ . Le coefficient λ est fonction du nombre de Reynolds Re . On détermine ainsi :

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

Équation 3-26: Coefficient de perte de charge en régime laminaire [13]

➤ **En régime turbulent : ($Re > 4000$)**

Les phénomènes d'écoulement sont beaucoup plus complexes et la détermination du coefficient de perte de charge λ résulte de mesures expérimentales. C'est ce qui explique la diversité des formules anciennes qui ont été proposées pour sa détermination.

En régime turbulent l'état de la surface devient sensible et son influence est d'autant plus grande que le nombre de Reynolds Re .

Tous les travaux ont montré l'influence de la rugosité et on s'est attaché par la suite à chercher la variation du coefficient en fonction du nombre de Reynolds Re et de la rugosité ε du tuyau [13].

➤ **Régime turbulent en tuyau lisse : $Re > 4000$**

Dans cette zone, la turbulence est encore modérée. L'épaisseur de la sous-couche limite est suffisante pour englober toutes les aspérités de la conduite qui se comporte dès lors comme un tuyau lisse.

Deux expressions empiriques sont souvent utilisées:

Formule de Blasius: $4000 < Re < 5 \cdot 10^5$

$$\lambda = \frac{0,316}{Re^{0.25}}$$

Équation 3-27 : Formule de Blasius [13]

Formule implicite de Von Karman :

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

Équation 3-28 : Formule de Von Karman [13]

➤ **Régime turbulent en tuyau rugueux :**

La turbulence devient très importante et λ ne dépend plus que de $\frac{\varepsilon}{D}$

Formule de Nikuradse :

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \log\left(\frac{\varepsilon}{3.71 D}\right)$$

Équation 3-29: Formule de Nikuradse [13]

➤ **Régime turbulent en tuyau lisse ou rugueux en zone de transition :**

Tous les résultats de ces travaux sont résumés dans la formule de Colebrook qui s'est fortement inspiré des résultats de Von Karman et de Nikuradse.

Formule de Colebrook :

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \log_{10} \left(\frac{\varepsilon}{3.71 D} + \frac{2.51}{Re \sqrt{\lambda}} \right)$$

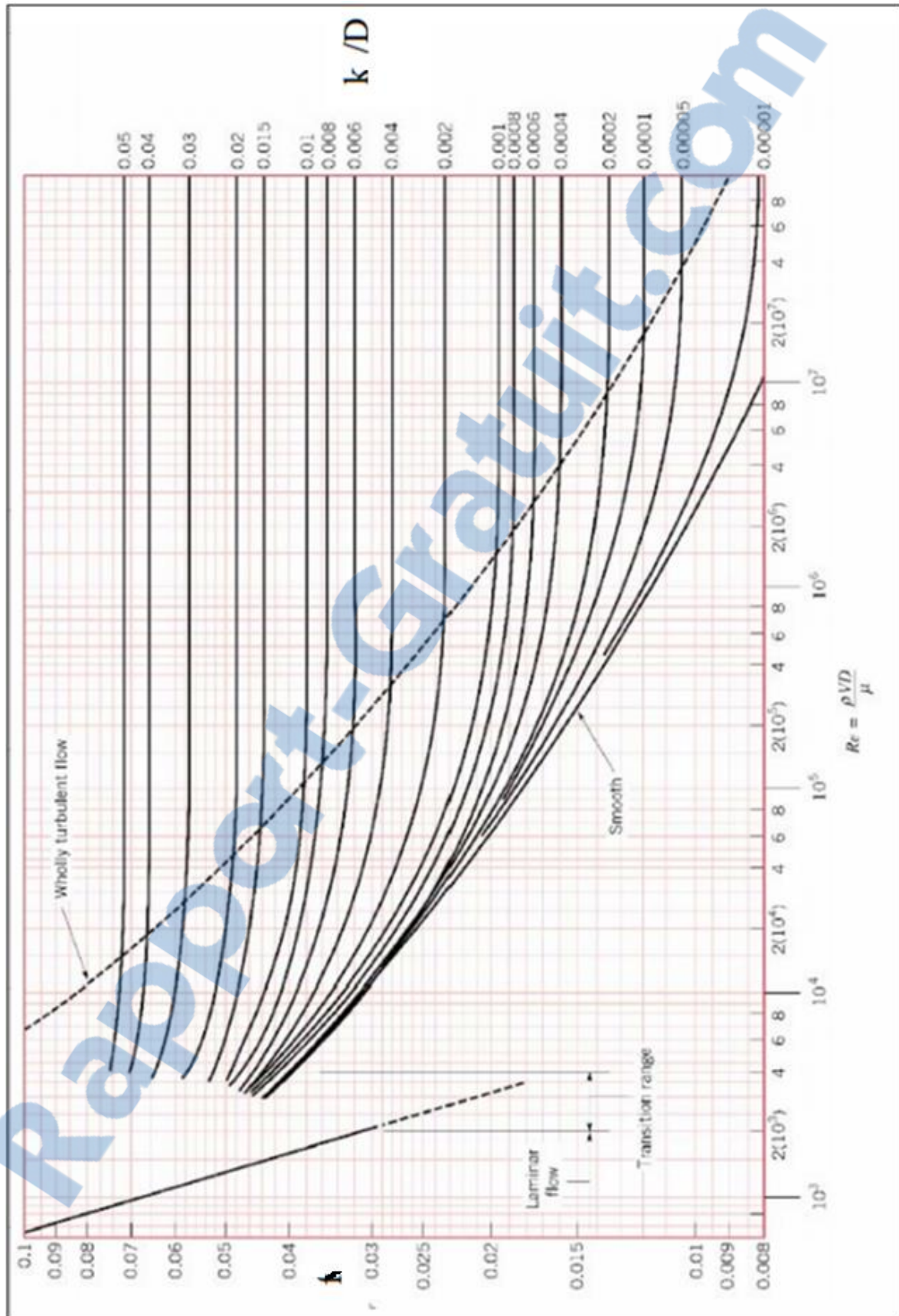
Équation 3-30 : Formule de Colebrook [13]

Pour : $4000 < Re < 10^8$

Cette relation implicite est difficile à exploiter analytiquement et est le plus souvent représentée sur un graphique.

IV.6.2 Diagramme universel de Moody (Figure 3-37) :

En se basant sur les expériences de Nikuradse , sur l'analyse mathématique de Prandtl et de Von Karman , sur les observations de Colebrook et White et sur un grand nombre d'expérience en conduites industrielles, Moody a établi un diagramme logarithmique , qui donne λ en fonction du nombre de Reynolds et de la rugosité relative ε/D .

Figure 3-37: Diagramme de Moody ($k=\epsilon$) [13]

IV.7 Pertes de charge singulière

La perte de charge singulière, localisée dans une section de la conduite, est provoquée par un changement de direction et d'intensité de la vitesse.

L'écoulement uniforme est perturbé et devient localement un écoulement non uniforme. La turbulence joue un rôle considérable, alors que les forces de viscosité sont négligeables. La perte de charge n'a donc lieu qu'en régime turbulent.

Une telle non-uniformité de la vitesse peut être provoquée par :

- un branchement de section de la conduite
 - un changement de direction (coude)
 - un branchement ou raccordement
 - un dispositif de mesure et contrôle de débit...
- Les pertes de charges singulières se traduisent par la relation :

$$\Delta H_S = \xi \frac{V^2}{2g} [\text{m}]$$

Équation 3-31 : Pertes de charge singulières [13]

ξ : Coefficient de perte de charge singulière fonction des caractéristiques géométriques des obstacles (sans unité)

IV.8 Courbe de réseau (Figure 3-38) :

La courbe caractéristique de réseau est la représentation graphique de la hauteur manométrique totale de l'installation, nécessaire à l'installation en fonction du débit.

Elle se compose d'une composante statique et d'une composante dynamique.

La composante statique est composée de deux parties indépendantes du débit :

- H_{geo} : hauteur géométrique [m]
- $(p_a - p_e) / (\rho \cdot g)$: différence de hauteur manométrique entre les réservoirs d'entrée et de sortie de l'installation

La différence de hauteur manométrique est nulle lorsque les deux réservoirs sont ouverts.

La composante dynamique est composée de :

- La perte de charge H_V : qui augmente de manière proportionnelle du débit

La différence des hauteurs dynamiques $(V_a - V_e)^2 / (2g)$ dans les sections d'entrée et de sortie de l'installation. Il suffit d'un point à $Q = 0$ et d'un point à $Q > 0$ pour calculer cette parabole.

$$H_{MT} = \alpha \cdot Q_v^2 + \text{composante statique}$$

Équation 3-32: la formule de courbe de réseaux

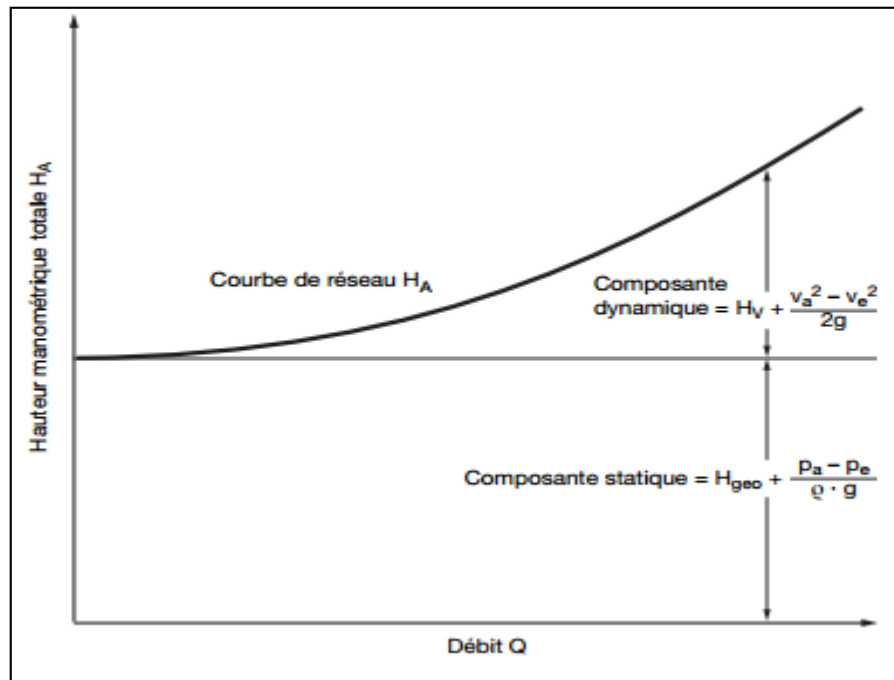


Figure 3-38: Courbe de réseau en fonction de débit [10]

Couplage des réseaux de conduites :

- Pour le montage en série (Figure 3-40) :

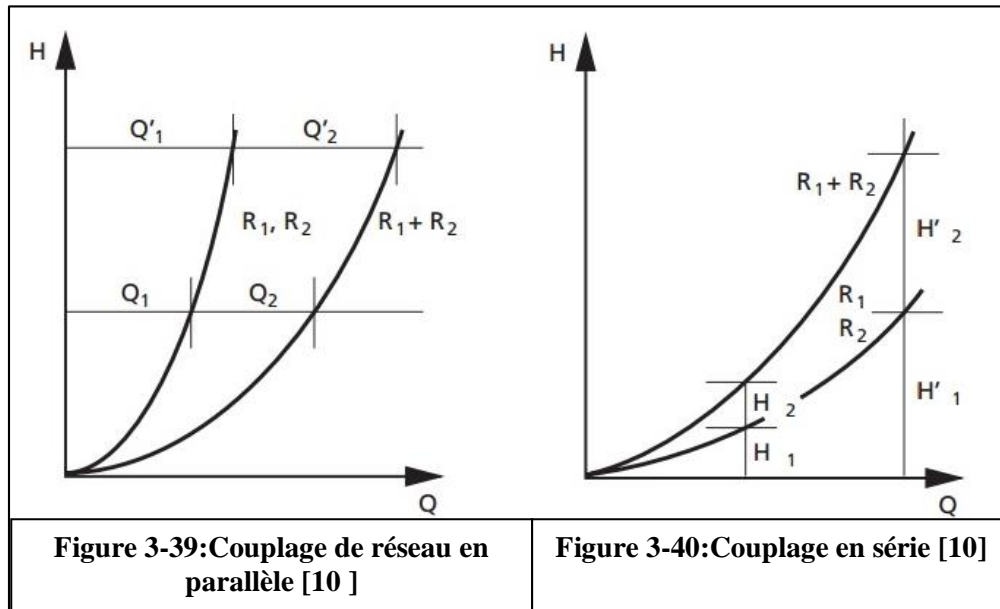
les courbes caractéristiques de réseau, calculées séparément H_1 , H_2 , etc., sont représentées en fonction de Q et les hauteurs manométriques correspondantes additionnées afin d'obtenir la courbe caractéristique de réseau

$$H = f(Q)$$

- Pour le montage en parallèle (Figure IV-39) :

les courbes caractéristiques de réseau, H_1 , H_2 , et, des différentes branches de tuyauterie sont calculées indépendamment à partir du point de dérivation (ou jusqu'au point de dérivation) et représentées en fonction de Q . Les différents débits Q_1, Q_2 , etc., de toutes les branches en parallèle sont additionnés pour chaque hauteur manométrique H , afin d'obtenir la courbe caractéristique de réseau d'ensemble $H = f(Q)$





V. Point de fonctionnement :

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

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.

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 [10].

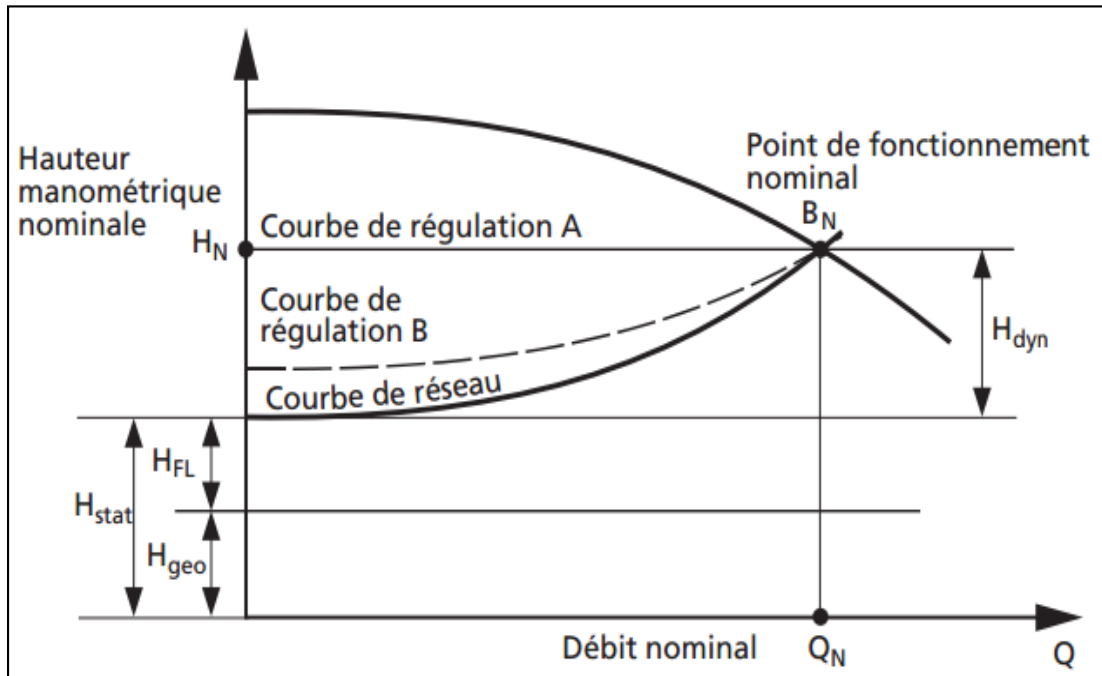


Figure 3-41 : Point de fonctionnement [10]

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

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

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

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

Conclusion :

Les pompes sont des appareils mécaniques servant à véhiculer des liquides d'un point A, à un point B. Elles permettent, notamment, de prendre un liquide à la pression p_1 et de le porter à la pression p_2 (avec $p_2 > p_1$).

Pour véhiculer un liquide d'un endroit à un autre, la pompe doit fournir une certaine pression appelée hauteur manométrique totale, cela dépend des conditions d'aspiration et de refoulement.

Pour transférer le liquide, il faut utiliser des réseaux des conduits. ces conduites impacte sur la vitesse de liquide et par conséquent sur la pression de refoulement.

Chapitre 04



**Calcul de la station
de pompage de Honaine**

Introduction :

Le principal rôle dans le dessalement des eaux consiste à approvisionner les populations et à gérer la ressource au maximum de leurs capacités. La croissance de population a abouti à une demande des ressources hydriques et conséquemment d'une grande partie de l'énergie produite sert à extraire et à distribuer l'eau.

L'usine de dessalement de l'eau de mer de Honaine a assuré depuis le début de mois de juillet 2012 à une capacité de production près de $80.000\text{m}^3/\text{jour}$ d'eau potable au profit de plusieurs communes au centre de la wilaya de Tlemcen et à cause la croissance d'effectifs la production de l'eau potable augmente jusqu'à $200.000\text{m}^3/\text{jour}$. Pour produire $200.000\text{m}^3/\text{jour}$ d'eau potable nous avons besoin de $432000\text{m}^3/\text{jour}$ d'eau de mer (eau brute) à l'usine de dessalement d'eau de mer ce qui est énorme.

A cet effet le débit d'eau brute ne peut être pris en charge par une seule pompe et une seule conduite et pour cela une étude préalable doit s'effectuer pour répartir le débit global sur un certain nombre de pompes et de conduites. Les firmes client de ce projet proposent une gamme de conduites en Polyester Renforcé de Verre (PRV) et un modèle précis de pompes (SULZER) qui seront utilisées dans ce projet.

Les pompes SULZER munies d'un moteur électrique avec variateur de vitesses. La pression de refoulement de la pompe augmentera en augmentant la vitesse de rotation de l'arbre, ce qui induit un changement dans la plage de fonctionnement donc un débit nominal plus grand ce qui est très intéressant du point de vue économique car la demande en eau potable va accroître au fil des années. Il nous faudra donc un débit plus important d'où l'intérêt du variateur de vitesse, pour combler les besoins en eau potable. Les courbes caractéristiques sont données par le constructeur (Voir annexe IV.1).

Les conduites sont en Polyester Renforcé de Verre, un matériau composite très connu et très utilisé dans des industries de pointe.

Avec une gamme de fabrication très large de DN100 à DN4000 et de longueur standard de 3, 6 ou 12m permet de construire des réseaux totalement homogènes avec une rugosité absolue $\varepsilon = 0.029\text{ mm}$. Les tuyaux et raccords en PRV sont utilisés, en écoulement gravitaire et/ou en pression.

I. Calcul de la station de pompage :

Pour pré dimensionner les conduites il faut déterminer la point de fonctionnement pour cela on doit calculer les pertes de charge de réseaux de refoulement d'eau de mer jusqu'au système de filtration.

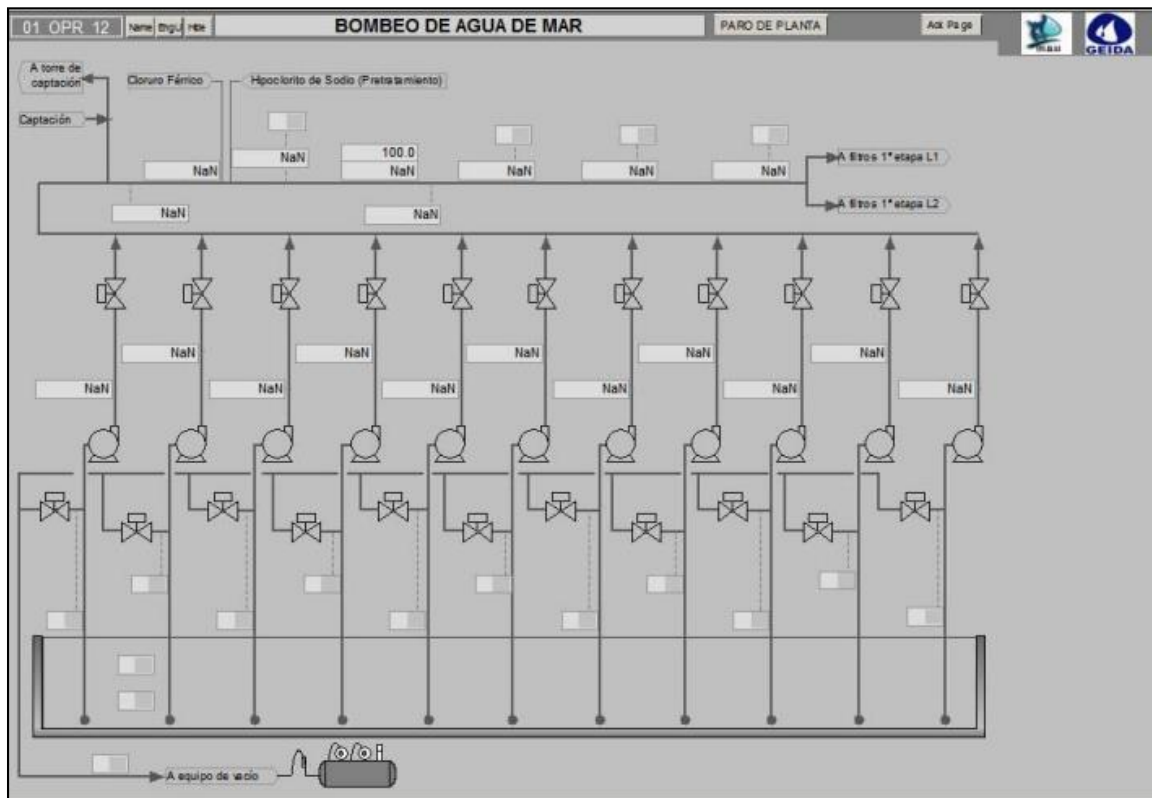


Figure 4-1: Diagramme de la station de dessalement au niveau de captage

I.1 Données du calcul :

- Le système de refoulement d'eau de mer se composé de :
 - 10+1 pompes SULZER, 10pompes en fonctionnement et 1 pompe de secoure
 - 10+1 conduits de refoulement placés en parallèle de Ø 600 mm, 10 conduites en fonctionnement et 1 conduite de secoure
 - Deux débitmètres, une vanne à papillon, deux coudes, un clapet anti retour et un convergent, vannes à boule et vannes à soupape
 - Un collecteur de Ø 1400 mm
- Pour faciliter notre calcul nous allons diviser la station de pompage en deux parties :
 - **Première partie : figure 4-2 et 4-3**

À partir de refoulement de la pompe jusqu'à l'entrée du collecteur

- **Deuxième partie : figure 4-4**

Début de collecteur jusqu'à l'entrée de système de filtration

I.2 Calcul de la première partie :

Cette partie se compose des éléments suivant :

Conduite de diamètre $\varnothing 600mm$ et 5,5m de longueur

Deux débitmètres, un élargissement brusque, une vanne à papillon, un clapet anti-retour et deux coudes identiques

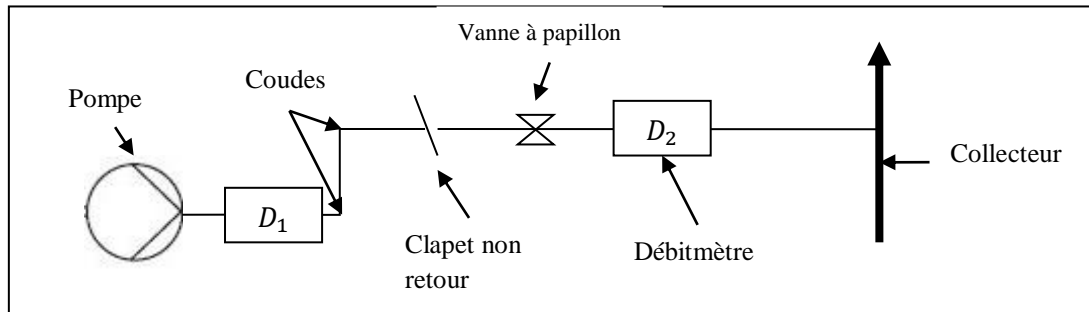


Figure 4-2: Partie une pour un conduit

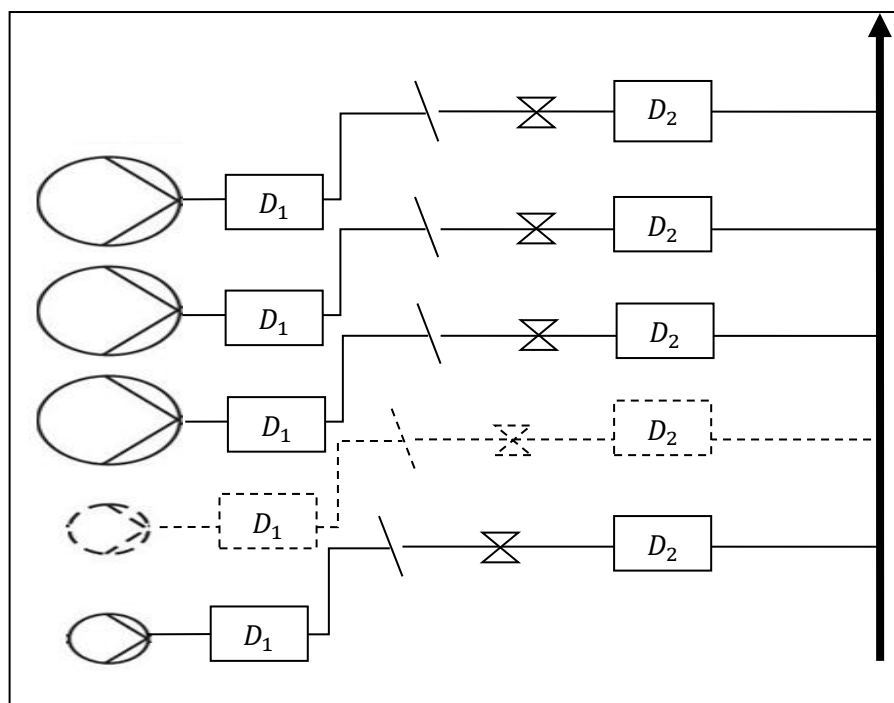


Figure 4-3 :Partie une pour dix conduits en parallèle

I.2.1 Pertes de charge linéaires pour un conduit sont données par :

$$J_{L1} = \frac{\lambda L}{D} \frac{U^2}{2g}$$

➤ Calcul de la vitesse moyenne U_1 [m/s] : $Q_{v1} = U_1 \cdot S_1$ et $U_1 = Q_{v1}/S_1$

$$Q_{v1} = 1800 \text{ m}^3/\text{h} = 0,5 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$S_1 = \pi D^2/4 \quad \Rightarrow \quad S_1 = 0,28 \text{ m}^2$$

Donc la vitesse moyenne : $U_1 = 1,76 \text{ m/s}$

➤ Déterminons λ_1 :

Calcul du nombre de Reynolds : $Re_1 = \rho \cdot U_1 \cdot D_1 / \mu$

Avec :

ρ : masse volumique de l'eau à température $24^\circ = 1025 \text{ kg/m}^3$.

$D_1 = 0,6 \text{ m}$.

$U_1 = 1,76 \text{ m/s}$.

μ : viscosité dynamique de l'eau à la température $24^\circ = 0,001 \text{ Pa.s}$

$Re_1 = 1,32 \cdot 10^6 \Rightarrow$ Régime d'écoulement du fluide est turbulent

Alors λ_1 dépendra de Re et de ε/D_1

Calculons la rugosité relative ε/D_1 :

Avec ε : rugosité de la paroi du conduit (renforcée par la fibre de verre) = $0,029 \text{ mm}$.

$$\frac{\varepsilon}{D_1} = 4,83 \cdot 10^{-5}$$

Nous utilisons le diagramme de Moody, pour déterminer :

$$\left\{ \begin{array}{l} Re_1 = 1,32 \cdot 10^6 \\ \varepsilon/D_1 = 4,83 \cdot 10^{-5} \end{array} \right. \longrightarrow \lambda_1 = 0,0126$$

Donc :

$$J_{L1} = 18,23 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

I.2.2 Pertes de charge singulières, pour une conduite sont données par :

$$J_{s1} = \xi \cdot U_1^2 / 2 \cdot g$$

1- Pertes de charge d'un coude droit :

Le coefficient de perte de charge singulière d'un coude arrondi d'angle $\delta = 90^\circ$ et $r = D$ est donné par :

$$\xi = \left[0,131 + 1,847 \cdot (D/2r)^{7/2} \right] \delta / 90^\circ$$

D'où $\xi = 0,29$

Les pertes de charge pour un seul coude représentent :

$$J_{s.coude} = 0,045 \text{ m}$$

Pour deux coudes :

$$J_{s.2coudes} = 0,09 \text{ m}$$

2- Perte de charge du clapet anti retour :

D'après le tableau (Annexe p 2)

Le clapet ouvert à angle $\delta = 40^\circ$ donne :
 $\xi = 6,6$

$$J_{s.clapet.a.r} = 1,04 \text{ m}$$

3- Perte de charge du robinet papillon :

D'après le tableau (Annexe p4 ,tableau 3-4)

Le robinet papillon ouvert à la position 38% donc
 $\xi = 9,31$

$$J_{s.v.papillon} = 1,47 \text{ m}$$

4- Perte de charge d'élargissement de la conduite:

Pour l'élargissement brusque de $D_1 = 600\text{mm}$ à $D_c = 1400\text{mm}$ on utilise l'équation suivante :

$$\xi = (1 - S_1/S_2)^2 + 1/9(S_1/S_2)^2$$

D'où $\xi = 0,686$

$$J_{s.élarg} = 0,108 \text{ m}$$

5- Calcul des pertes de charge d'un débitmètre :

A partir de l'équation de Bernoulli nous allons calculer la somme des pertes de charge de la partie une :

$$\frac{P_1}{\rho g} + \frac{U_1}{2g} + Z_1 = \frac{P_2}{\rho g} + \frac{U_2}{2g} + Z_2 + \sum J_{L+S}$$

Comme :

$$U_1 = U_2, Z_1 = 0 \text{ et } Z_2 = 1 \text{ m}$$

Donc :

$$\sum J_{L+S} = (P_1 - P_2) / \rho g - Z_2$$

$$\sum J_{L+S} = 12,43 \text{ m}$$

$$\sum J_{L+S} = J_{L1} + J_{s.c} + J_{s.c.a.r} + J_{s.r.p} + J_{s.élarg} + J_{s.débimètres} + J_{s.2v.s} + J_{s.5v.b}$$

On a:

$$\begin{cases} \sum J_{L1} = 18,23 \cdot 10^{-3} \text{ m} \\ \Rightarrow \sum J_{L1+S} = 2,73 \text{ m} \\ \sum J_S = J_{s.c} + J_{s.c.a.r} + J_{s.r.p} + J_{s.élarg} + J_{s.2v.s} + J_{s.5v.b} = 2,709 \text{ m} \end{cases}$$

Par conséquent les pertes de charge des deux débitmètres

$$J_{s.2 \text{ Débitmètres}} = 9,69 \text{ m}$$

\Rightarrow pour un débitmètre

$$J_{s.\text{Débitmètre}} = 4,84 \text{ m}$$

I.3 Calcul de la deuxième partie :

La deuxième partie est composée des éléments suivants :

Un collecteur de diamètre $\varnothing 1400 \text{ mm}$, un té et deux débitmètres.

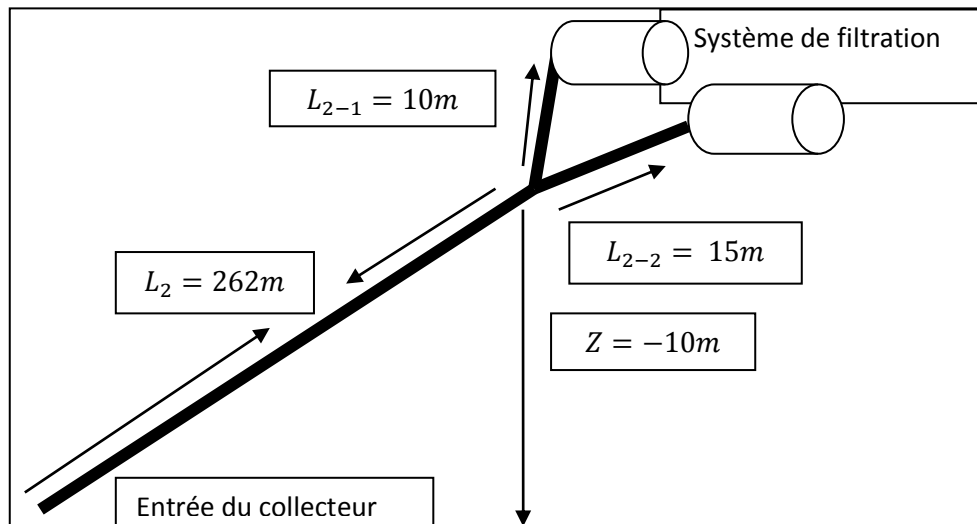


Figure4- 3: Schématisation de la deuxième partie de la station de pompage

I.3.1 Pertes de charge linéaires:

$$J_{L2} = \frac{\lambda_2 L_2}{D_c} \frac{U_2^2}{2g}$$

➤ Calcul de la vitesse U [m/s] :

$$Q_{v2} = U_2 \cdot S_c$$

⇓

$$U_2 = Q_{v2} / S_c$$

Nous avons procédé au calcul pour trois situations différentes : pour 6 pompes ,8 pompes et 10 pompes :

$$S_c = \frac{\pi D_c^2}{4} \Rightarrow S_c = 1,53 \text{ m}^2$$

➤ Déterminons λ_2 :

- Calcul de nombre de Reynolds :

$$Re_2 = \rho \cdot U_2 \cdot D_c / \mu$$

Avec :

ρ : masse volumique de l'eau à température 24°= 1025kg/m³

D_c : 1,4 m

U_2 : vitesse du l'eau dans le collecteur

μ : viscosité dynamique de l'eau à la température 24°= 0,001 pa.s

- Le régime d'écoulement du fluide est turbulent
- Calcul du coefficient ε/D_c :

Avec :

ε : rugosité de paroi du conduit (renforcé par la fibre de verre) : 0,029mm

$$\frac{\varepsilon}{D_c} = 2,07 * 10^{-5}$$

- Nous utilisons le diagramme de Moody :

Nombre du Pompes	6	8	10
Q_2 [m³/s]	3	4	5
U_2 [m/s]	1,94	2,59	3,25
Re_2	$2,78 \cdot 10^6$	$3,72 \cdot 10^6$	$1,66 \cdot 10^7$
λ_2	0,0116	0,0114	0,0112
J_{L_2}	0,41	0,73	1,12

- Les pertes de charge linéaires de L_{2-1} :

$$J_{L_{2-1}} = \lambda_{2-1} \cdot \frac{L_{2-1}}{D_c} \cdot \frac{U_2^2}{2g}$$

- Pour la ligne de $L_{2-1} = 10m$

Nombre du Pompes	6	8	10
Q_{2-1} [m³/s]	1,5	2	2,5
U_{2-1} [m/s]	0,94	1,29	1,62
Re_{2-1}	$1,34 \cdot 10^6$	$1,84 \cdot 10^6$	$2,3 \cdot 10^7$
λ_{2-1}	0,0124	0,0118	0,0116
$J_{L_{2-1}}$ [m]	0,004	0,007	0,011

➤ Pour la ligne de $L_{2-2} = 15m$

Nombre du Pompes	6	8	10
$J_{L_{2-2}}$	0,006	0,01	0,016

I.3.2 Pertes de charge singulières :

1. Calcul de la perte de charge du té :

$$J_s = \xi \cdot U^2 / 2 \cdot g$$

➤ Pour la ligne de L_{2-1} :

$$\xi_{2-1} = 0,015 \quad (\text{Annexe p3 tableau 3-2})$$

Nombre du Pompes	6	8	10
1. U_2 [m/s]	1,94	2,59	3,25
2. $J_{s.t1}$	$2,87 \cdot 10^{-3}$	$5,13 \cdot 10^{-3}$	$8,1 \cdot 10^{-3}$
3.			

➤ Pour la ligne de L_{2-2} :

$$\xi_{2-2} = 0,438 \quad (\text{Annexe p3 tableau 3-2})$$

Nombre du Pompes	6	8	10
U_2 [m/s]	1,94	2,59	3,25
$J_{s.t2}$	0,084	0,15	0,24

2. Calcul de la perte de charge du débitmètre :

A partir de l'équation de Bernoulli nous avons calculé la somme des pertes de charge de la deuxième partie :

$$\frac{P_2}{\rho g} + \frac{U_2}{2g} + Z_1 = \frac{P_3}{\rho g} + \frac{U_3}{2g} + Z_3 + \sum J_{L+S}$$

Car :

$$U_1 = U_2, Z_2 = 0 \text{ et } Z_3 = 10 \text{ m}$$

Donc :

$$\sum J_{2(L+S)} = (P_2 - P_3)/\rho g + (Z_2 - Z_3)$$

Nombre du Pompes	6	8	10
$\sum J_{2(L+S)}$	2,73	2,74	2,93

On a :

$$\sum J_{2(L+S)} = J_{L2} + J_{L2-2a} + J_{S.t} + J_{2Débitmètres} + J_{L2-2b}$$

Nombre du Pompes	6	8	10
$J_{L2} + J_{L2-1} + J_{S.t} + J_{L2-2}$	0,5	0,9	1,39

Les pertes de charge de deux débitmètres :

Nombre du Pompes	6	8	10
$\sum J_{2Débitmètres}$	2,23	1,84	1,54

II. Les courbes :

Pour tracer la courbe du réseau J_{L+S} il faut déterminer la pente θ de la courbe (θQ_v^2) qui est en fonction J_{L+S} et de Q_v^2 . Notre réseau est divisé en deux parties comme c'était convenu auparavant.

1. La première partie :

$$J_{1(L+S)} = \theta_1 \cdot Q_v^2$$

$$\Rightarrow \theta_1 = \frac{J_{1(L+S)}}{Q_v^2}$$



$$\theta_1 = 12,43 / (1800 / 3600)^2$$

$$\theta_1 = 49,72 \left[\frac{s^2}{m^5} \right]$$

Donc :

$$J_{1(L+S)} = 49,72 \cdot Q_v^2$$

Équation 4-1: Fonction de la première partie

2. La deuxième partie :

$$J_{2(L+S)} = \theta_2 \cdot Q_v^2$$

$$\Rightarrow \theta_2 = \frac{J_{2(L+S)}}{Q_v^2}$$



$$\theta_2 = 2,93 / (18000 / 3600)^2$$

$$\theta_2 = 0,12 \left[\frac{s^2}{m^5} \right]$$

Donc :

$$J_{2(L+S)} = 0,12 \cdot Q_v^2$$

Équation 4-2 : Fonction de la deuxième partie.

Nous utilisons le MATLAB pour tracer les courbes des équations 4-1 et 4-2.

1- Tableau de perte de charge un seul conduit : la figure 4-4

$Q_v \left[\frac{m^3}{h} \right]$	0	180	360	540	720	900	1080	1260	1440	1620	1800
H[m]	0	0,124	0,497	1,12	2	3,1	4,48	6,1	8,01	10,07	12,43

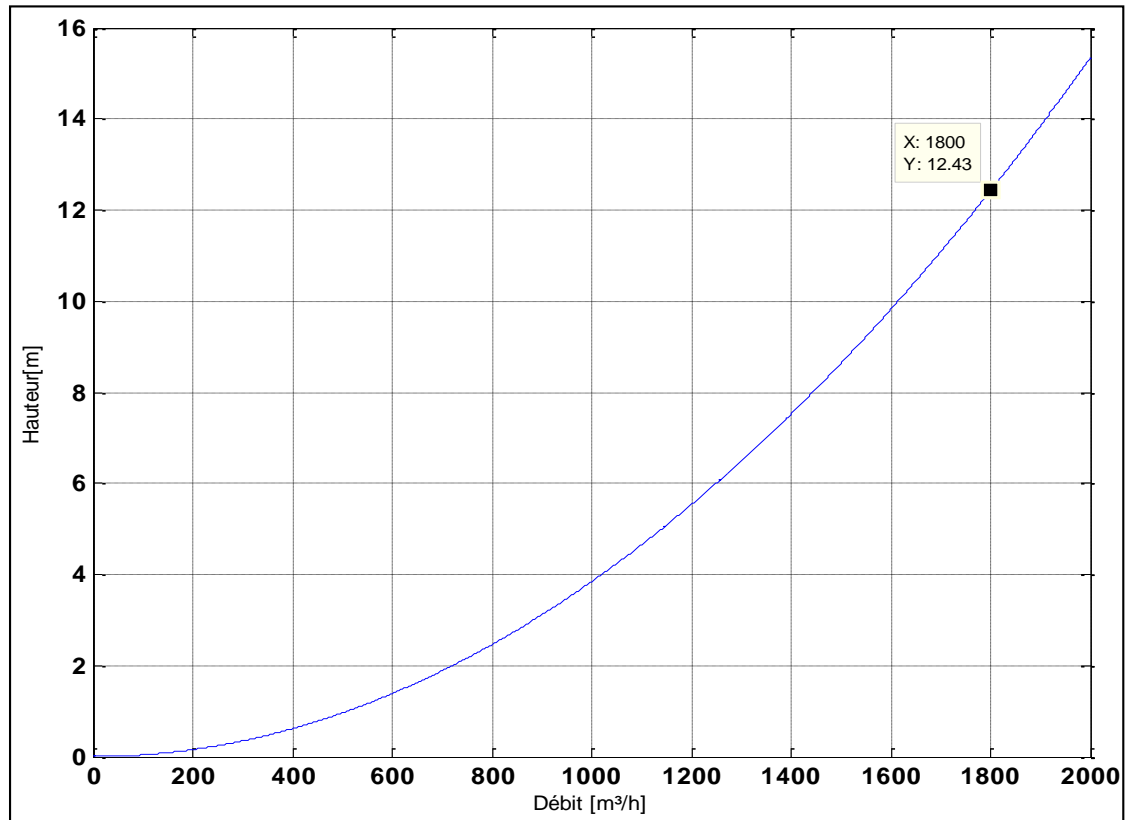


Figure 4-4: courbe de perte de charge entre la sortie de la pompe et l'entrée du collecteur

2- Le tableau de pertes de charge de la deuxième partie (entre l'entrée du collecteur et l'entrée du système de filtration) : la courbe 4-5

$Q_v [\frac{m^3}{h}]$	0	1800	3600	5400	7200	9000	10800	12600	14400	16200	18000
$H_2 [m]$	0	0,03	0,12	0,27	0,48	0,75	1,08	1,47	1,92	2,43	3

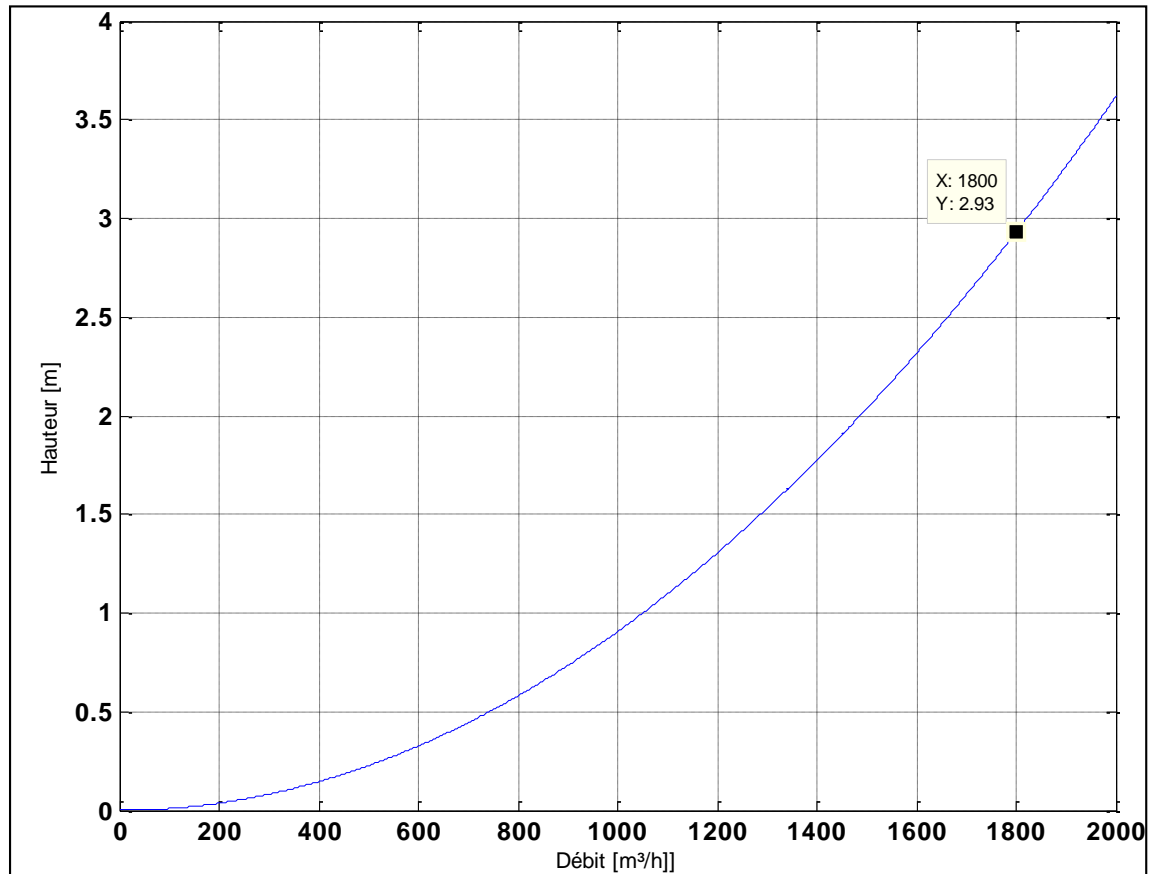


Figure 4-5: courbe de perte de charge entre collecteur et l'entrée de système de filtration pour une pompe en marche.

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

- Les calculs sont représentés au tableau suivant :

$Q_v[\frac{m^3}{h}]$	0	1800	3600	5400	7200	9000	10800	12600	14400	16200	18000
$H_T[m]$	64	64,15	64,62	64,39	66,48	67,85	69,56	71,57	73,93	76,5	79,46

II.1 Les courbes de réseaux :

Nous avons tracé les courbes de réseau pour quatre situations de débit de la sortie de pompe jusqu'à l'entrée de système de filtration.

On a la hauteur géométrique égale 12m et la pression de l'entrée du système de filtration qui doit être égale à 5,2 bar l'équivalent de 52 mce qui sont des charges supplémentaires pour la pompe on aura donc :

$$H_T = H_{geo} + H_{nr} + 52$$

$$H_T = H_{nr} + 64$$

1^{er} Cas : pour un conduit à partir de la sortie de pompe jusqu'à l'entrée de système de filtration.

$$H_{1r} = 61,44 \cdot Q_v^2 + 64$$

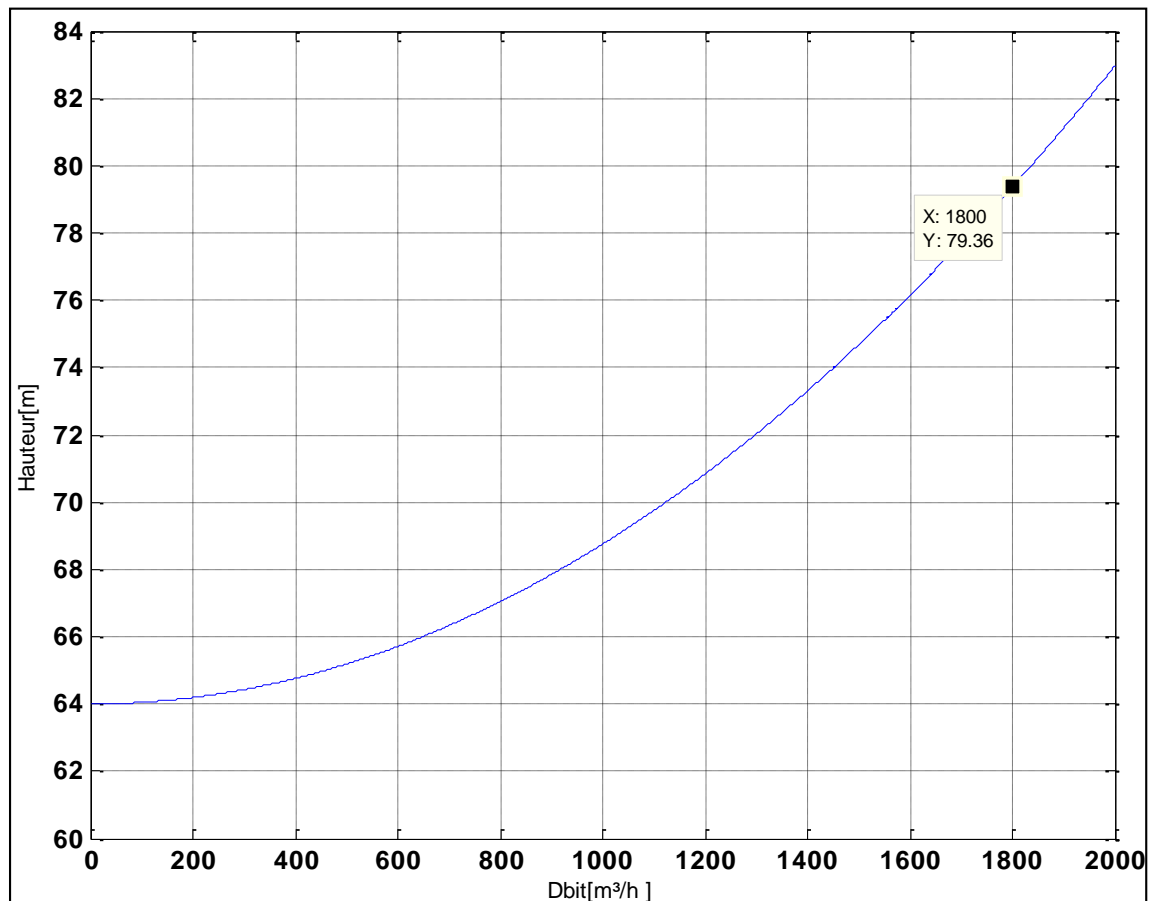


Figure 4-6: courbe de réseau pour un conduit

2^{eme} Cas : pour six conduits placée en parallèles à partir de la sortie de pompe jusqu'à l'entrée de système de filtration.

$$H_{6r} = 1,71 \cdot Q_v^2 + 64$$

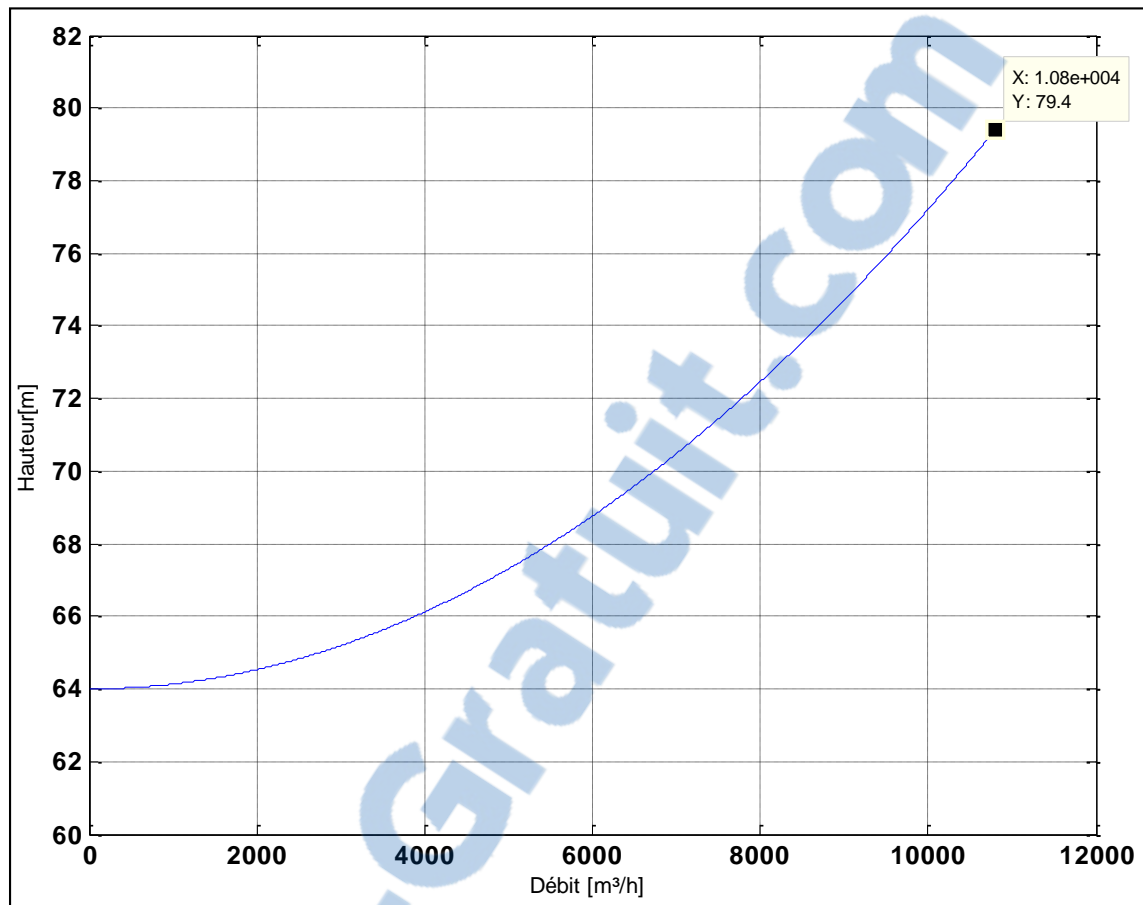


Figure 4-7: courbe de réseau pour six conduits

3^{ème} Cas : pour huit conduits placée en parallèles à partir de la sortie de pompe jusqu'à l'entrée de système de filtration.

$$H_{8r} = 0,96 \cdot Q_v^2 + 64$$

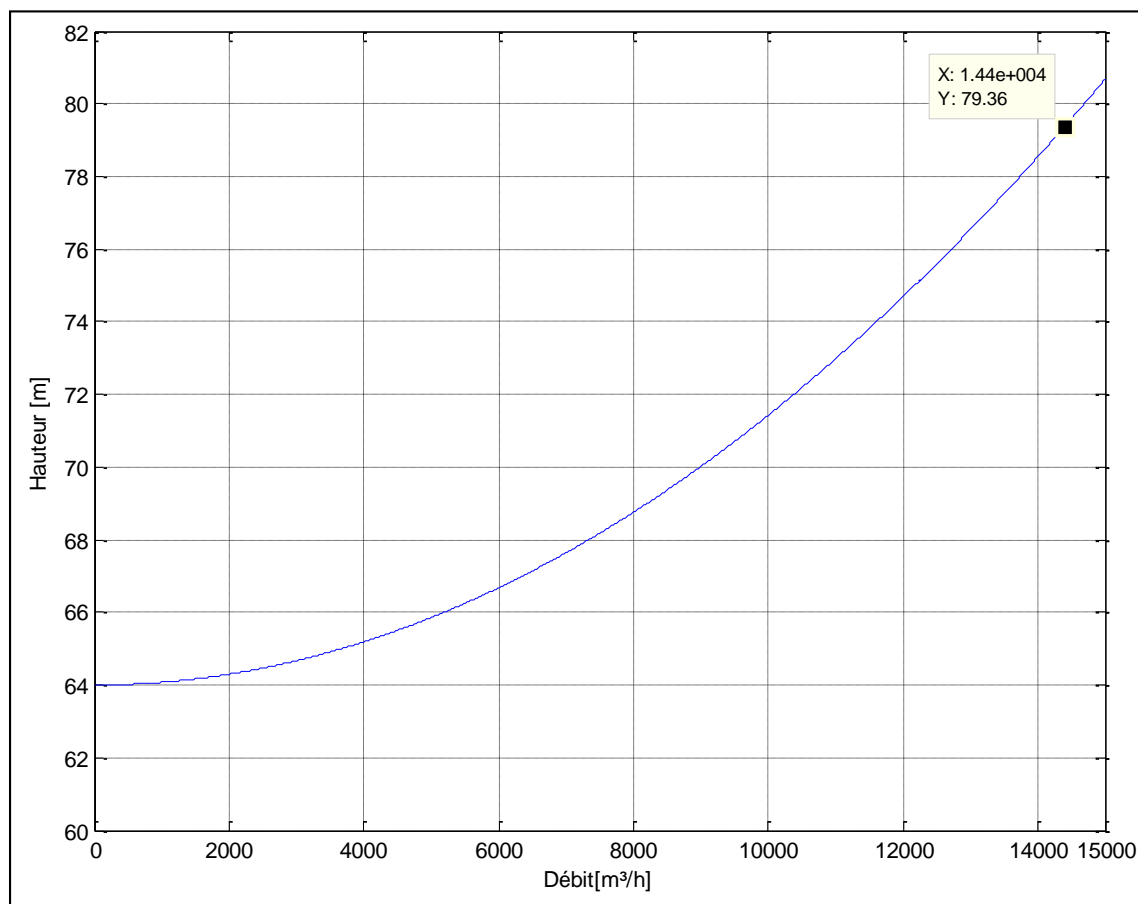


Figure 4-8: courbe de réseau pour huit conduits

4^{eme} Cas : pour dix conduits placée en parallèles à partir de la sortie de pompe jusqu'à l'entrée de système de filtration.

$$H_{10r} = 0,61 \cdot Q_v^2 + 64$$

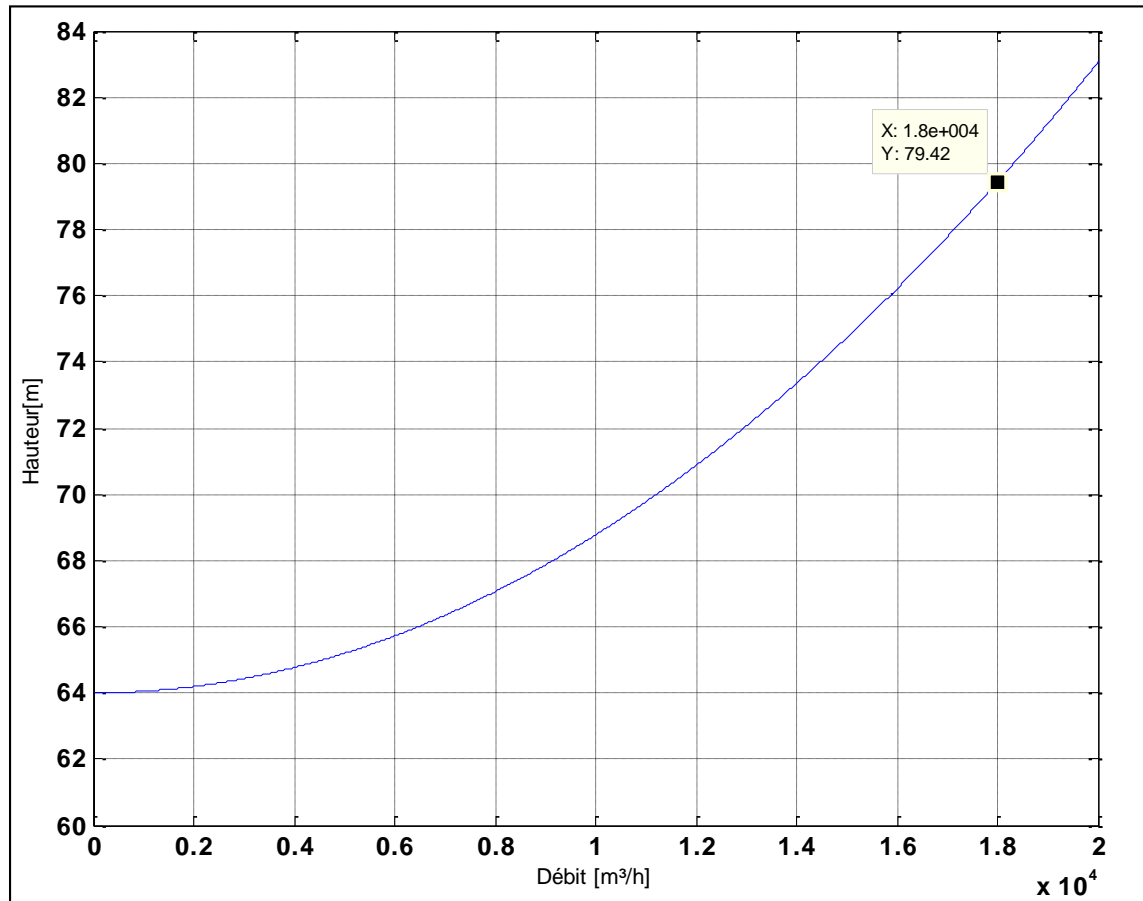


Figure 4-9: courbe de réseau pour dix conduits

II.2 Les courbes des pompes :

Nous avons tracé les courbes des pompes pour quatre situations défierent 18000m³/h, 14400 m³/h, 10800 m³/h de débit à la sortie de pompe jusqu'à l'entrée de système de filtration.

A partir de la courbe de pompe de constructeur nous avons le tableau suivant :

$Q_v[\frac{m^3}{h}]$	0	180	360	540	720	1080	1260	1440	1620	1800
H_{Pompe} [m]	81,6	81,4	81,2	80,8	80,7	80,4	80,2	80,05	79,9	79,40

1^{er} Cas : pour une pompe

$$H_{1p} = 61,44 \cdot Q_v^2 + 81,6$$



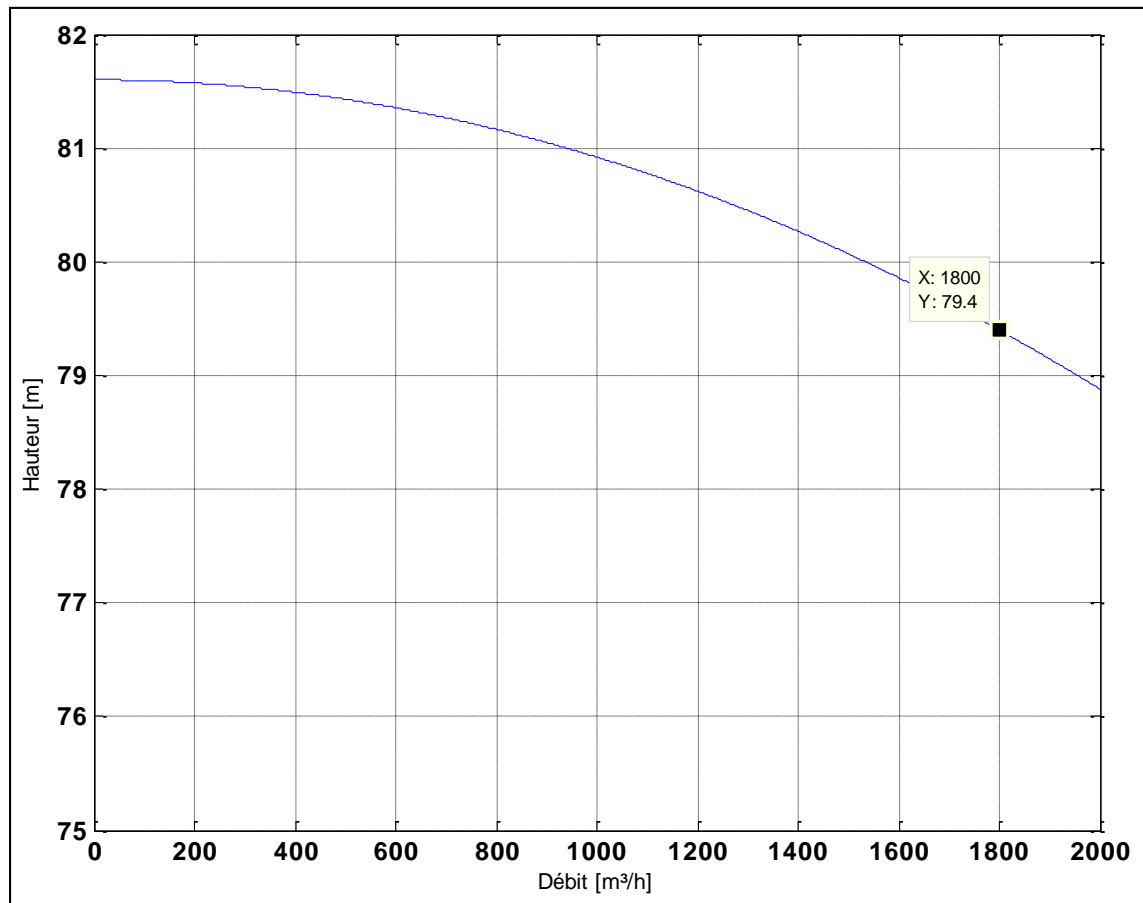


Figure 4-10: courbe caractéristique de la pompe

1- Nous avons placé des pompes en parallèles :

$Q_v [\frac{m^3}{h}]$	0	1800	3600	5400	7200	9000	10800	12600	14400	16200	18000
$H_{Pompes} [m]$	81,6	81,4	81,2	80,8	80,7	80,6	80,4	80,2	80,05	79,9	79,40

2^{eme} Cas : pour six pompes placées en parallèles :

$$H_{6p} = -0,24 \cdot Q_v^2 + 81,6$$

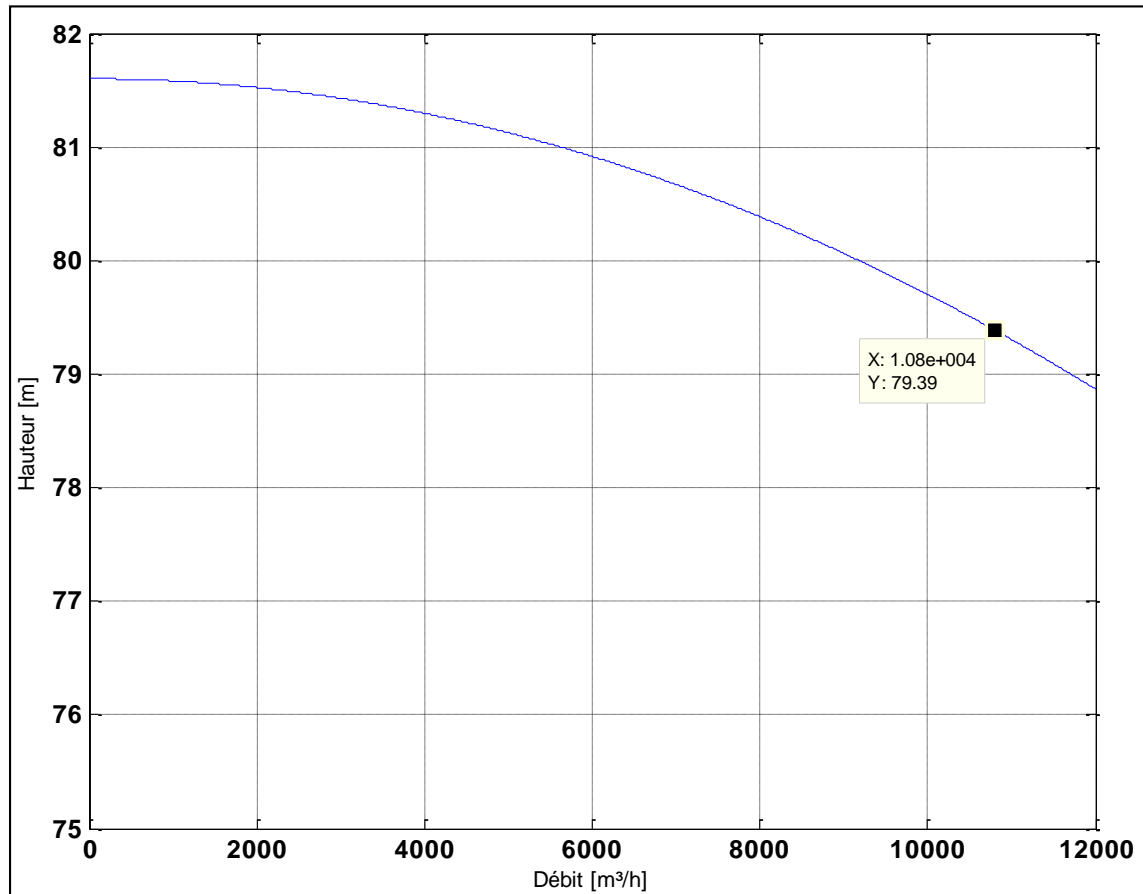


Figure 4-11: courbe de six pompes en parallèles

3^{eme} Cas : pour huit pompes placées en parallèles :

$$H_{8p} = -0,14 \cdot Q_v^2 + 81,6$$

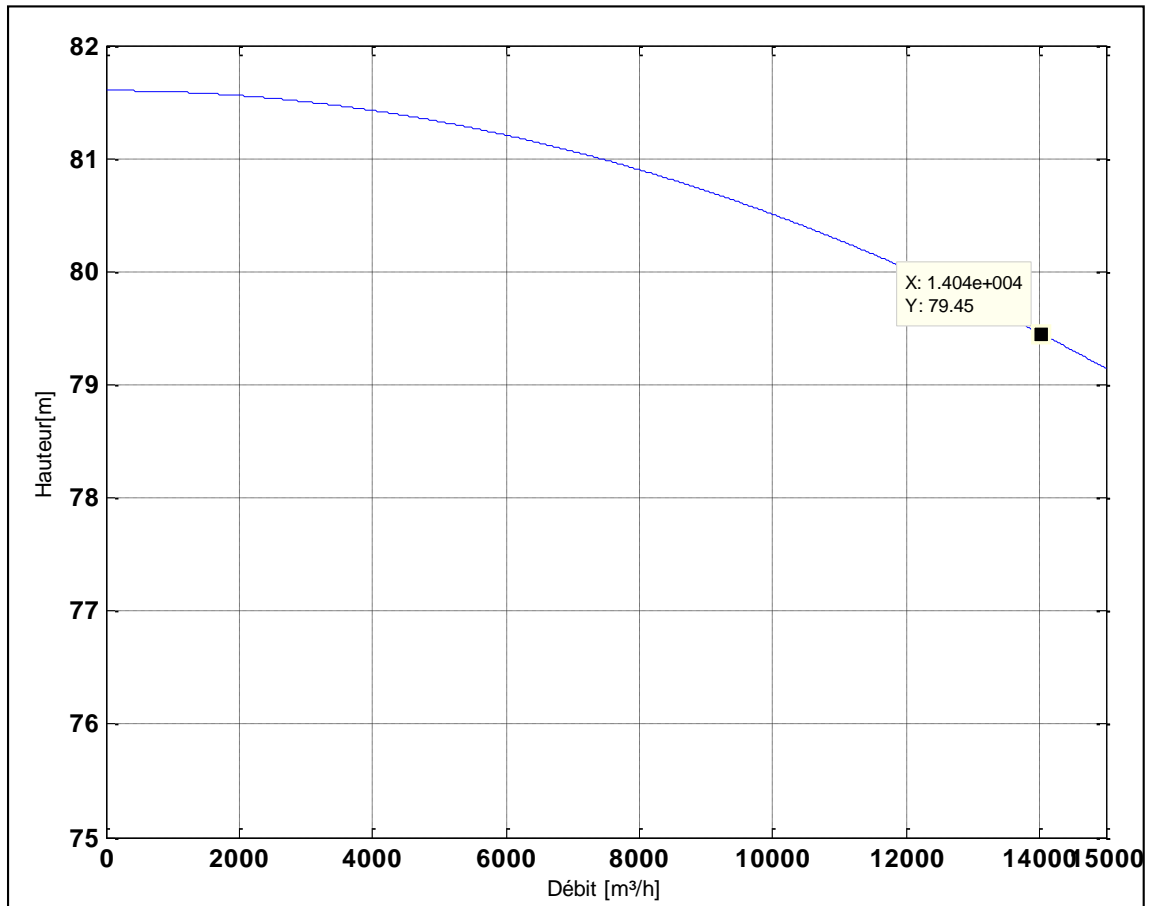


Figure 4-12: courbe de huit pompes en parallèles

4^{eme} Cas : pour dix pompes placées en parallèles :

$$H_{10p} = -0,088Q_v^2 + 81,6$$

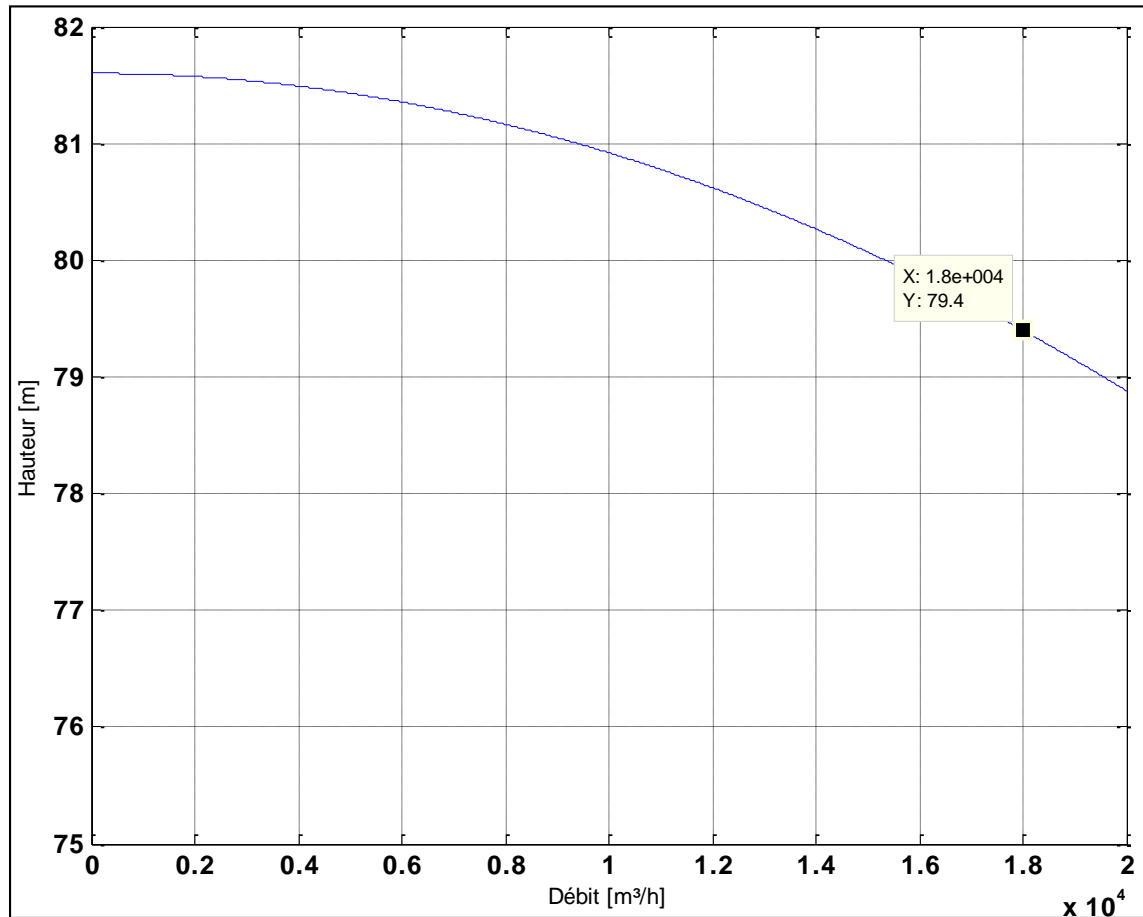


Figure 4-13: courbe de huit pompes en parallèles

II.3 Courbe de point de fonctionnement :

- Pour une pompe :

A partir les équations suivant :

$$H_p = -8,8Q_v^2 + 81,6$$

$$H_r = 61,44 Q_v^2 + 64$$

Nous avons tracés la courbe suivant :

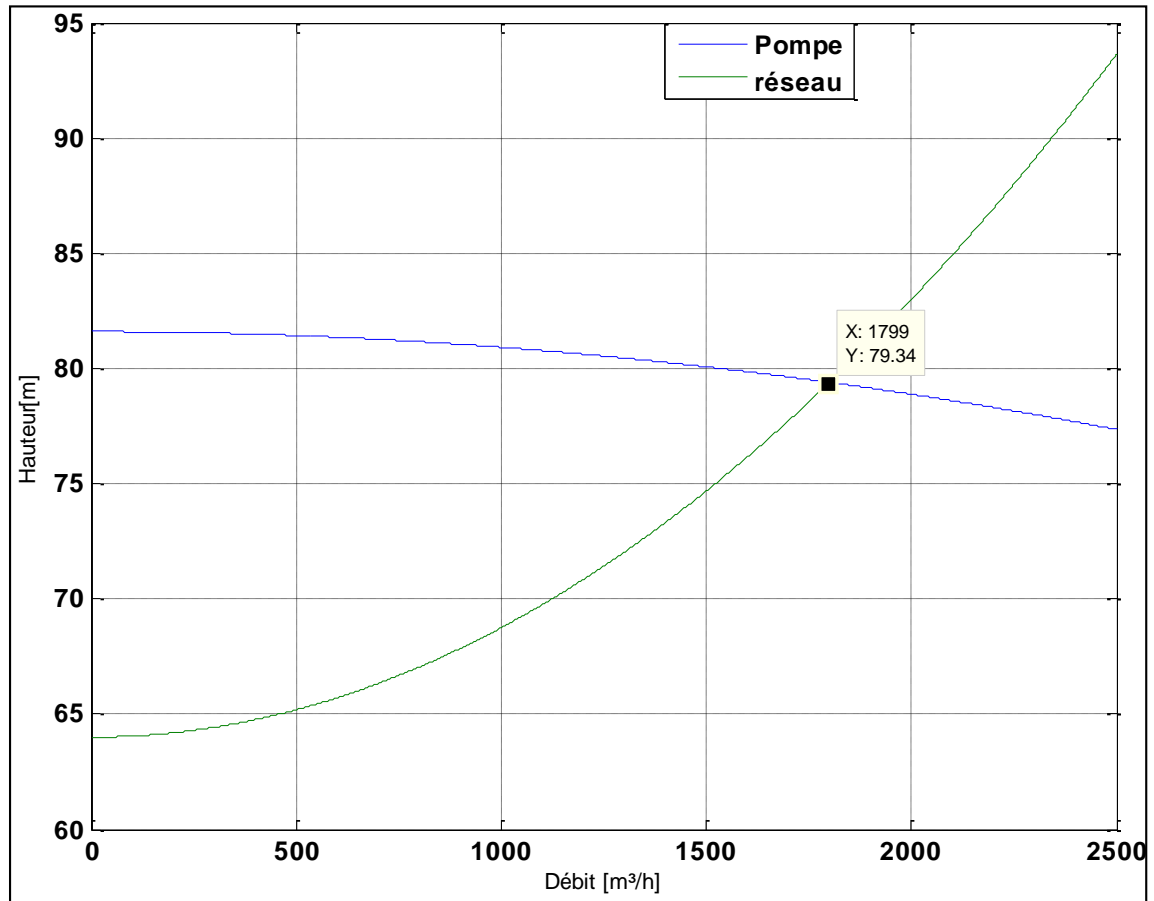


Figure 4-14: courbes donnant le point de fonctionnement pour une pompe en marche

Le point de fonctionnement :

$$Q_v = 1799 \text{ m}^3/\text{h} \Rightarrow H_T = 79,34 \text{ m}$$

- Pour dix pompes :

A partir les équations suivant :

$$H_p = -0,088 Q_v^2 + 81,6$$

$$H_r = 0,61 Q_v^2 + 64$$

Nous avons tracés la courbe suivant :

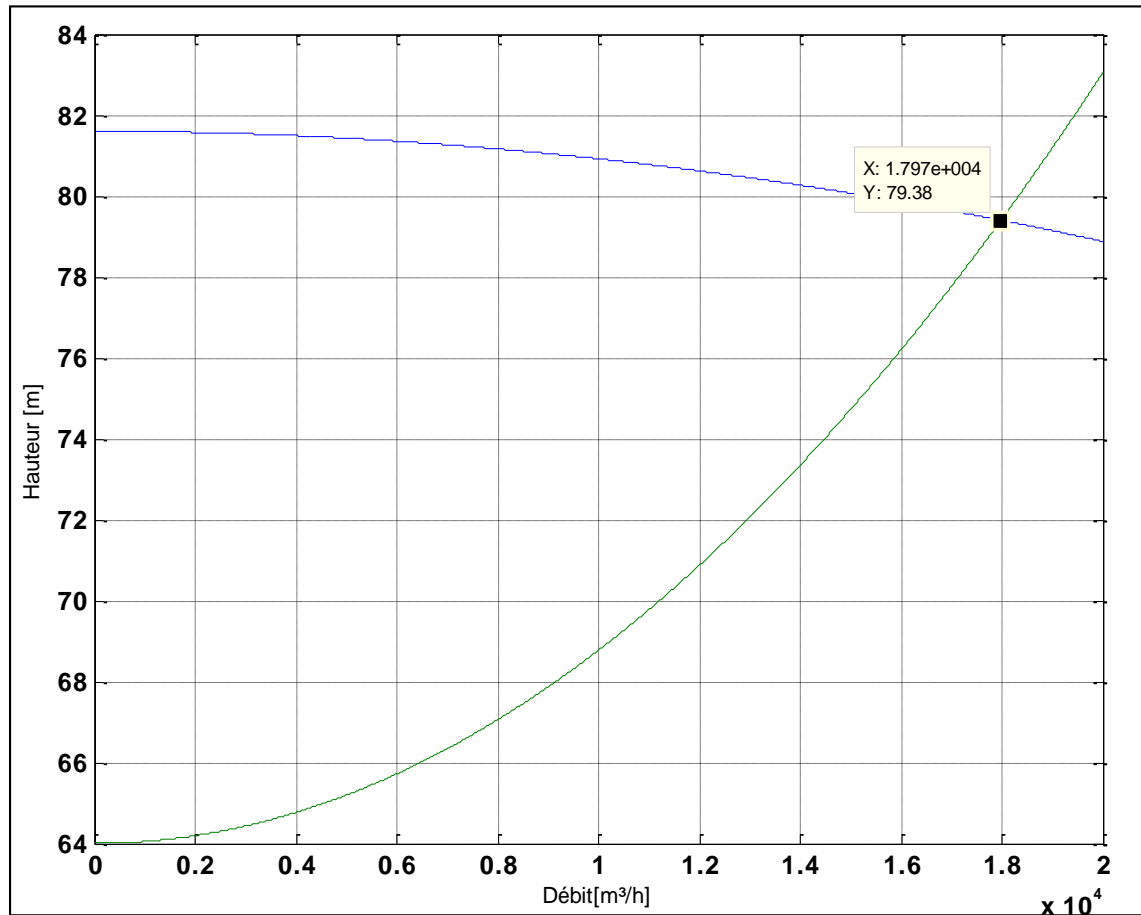


Figure 4-15: courbe point de fonctionnement pour dix pompes parallèles en marche

Le point de fonctionnement :

$$Q_v = 17970 \text{ m}^3/\text{h} \Rightarrow H_T = 79,38 \text{ m}$$

- **Pour huit pompes :**

A partir les équations suivant :

$$H_p = -0,14 Q_v^2 + 81,6$$

$$H_r = 0,96 Q_v^2 + 64$$

Nous avons tracés la courbe suivant :

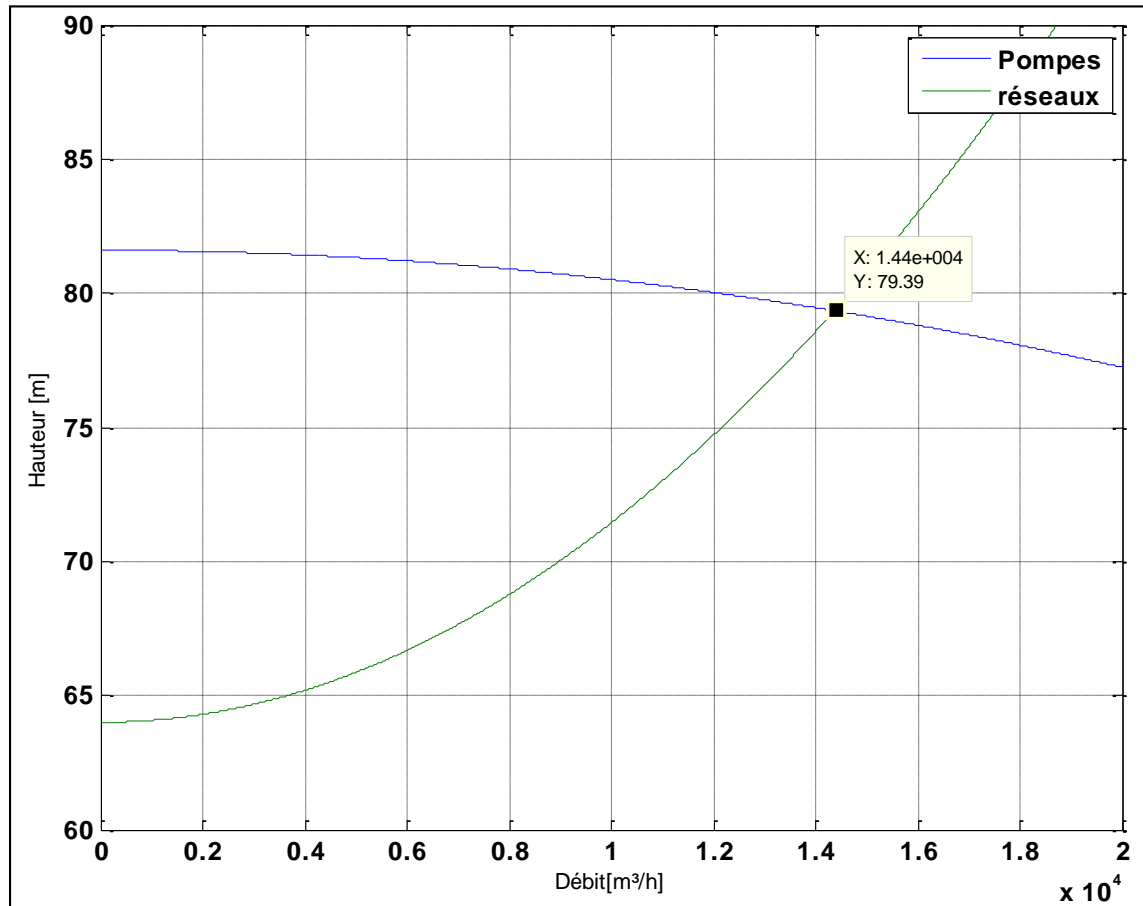


Figure 4-16: courbe point de fonctionnement pour huit pompes parallèles en marche

Le point de fonctionnement :

$$Q_v = 14400 \text{ m}^3/\text{h} \Rightarrow H_T = 79,39 \text{ m}$$

- Pour six pompes :

A partir des équations suivantes :

$$H_p = -0,24 Q_v^2 + 81,6$$

$$H_r = 1,71 Q_v^2 + 64$$

Nous avons tracé la courbe suivante :

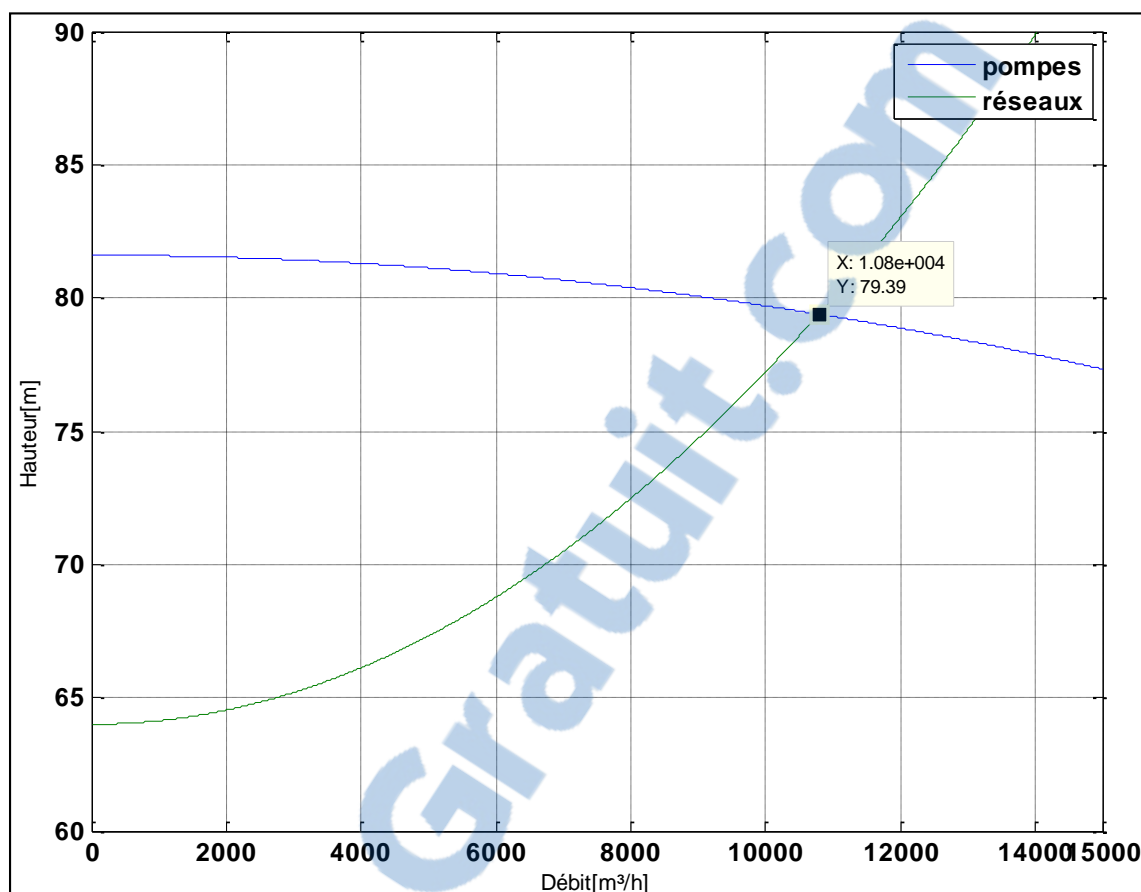


Figure 4-17: courbe point de fonctionnement pour six pompes parallèles en marche

Le point de fonctionnement :

$$Q_v = 10800 \text{ m}^3/\text{h} \Rightarrow H_T = 79,39 \text{ m}$$

Les résultats pour trois situations différentes : pour 1 pompes, 6 pompes ,8 pompes et 10 pompes

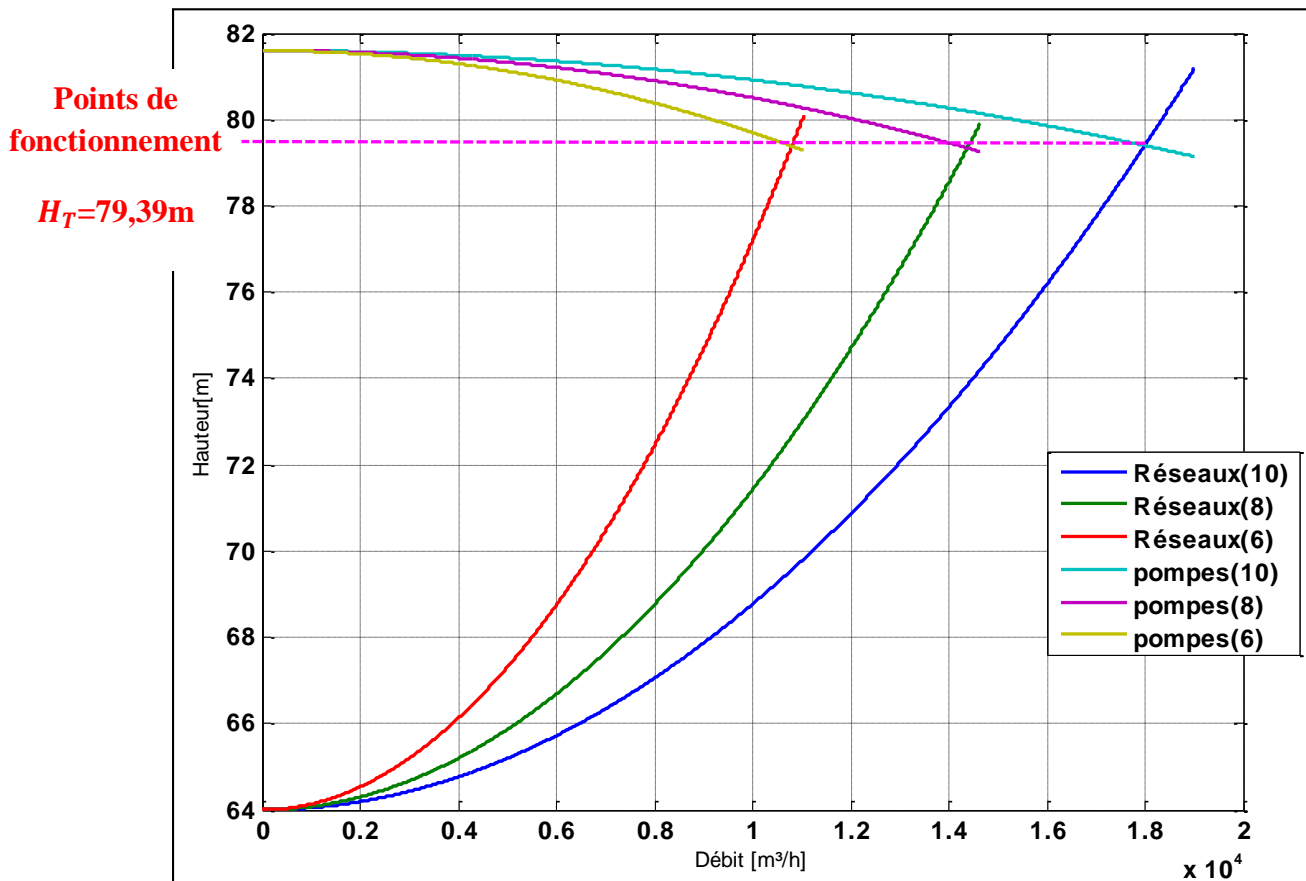


Figure 4-18 : point de fonctionnement des trois situations

III. Interprétation du résultat :

- hauteur manométrique varie selon le débit. La hauteur manométrique de réseaux augmente avec le débit.
- Dans la pompe, la hauteur manométrique diminue selon le débit.
- Une seule pompe peut refouler $1800m^3/h$ de débit à une hauteur de $79,3m$.
- Six pompes identiques placées en parallèle refoulent $10800m^3/h$ à $79,39m$ d'hauteur.
- Huit pompes identiques placées en parallèle refoulent $14400m^3/h$ à $79,39m$ d'hauteur.

- Dix pompes identiques placées en parallèle refoulent $18000\text{m}^3/\text{h}$ à 79.39 m d'hauteur.
- La hauteur manométrique totale des trois situations (6 pompes, 8 pompes, 10 pompes) reste la même ($\approx 80\text{ m}$).

Conclusion :

Nous avons fait les calculs de la station de pompage quand elle fonctionne : avec 6 pompes avec 8 pompes et avec 10 pompes selon le besoin de la population.

Les installations des pompes identiques en parallèle permettent d'augmenter le débit nécessaire à la consommation pour une hauteur de refoulement.

Le point de fonctionnement est un facteur important dans les calculs des réseaux de conduites et des pompes de point de vue économique.

Ce calcul nous permet de limiter la production d'eau potable distribué à la population c'est-à-dire limiter coûts des opérations de filtration et les coûts des équipements annexes et leurs coûts de maintenance.

Conclusion générale

Compte tenu de la situation actuelle de pression démographique et de réchauffement climatique, le dessalement est une technique intéressante au vu de l'abondance de la matière première (l'eau de mer). On assiste d'ailleurs à une très forte augmentation du volume d'eau produit par dessalement. Toutes les techniques de dessalement sont très intéressantes au vu de leurs performances.

Notre pays comme d'autres à travers le monde, a suivi cette politique de dessalement et a installé plusieurs des stations de dessalement d'eau de mer, fonctionnant par le procédé de filtration d'osmose inverse. Ce procédé est le plus réussit en Algérie grâce à leurs avantages.

Les pompes sont des machines essentielles dans le dessalement d'eau de mer. Elles élèvent le fluide d'un point à l'autre à cause de la rotation des roues.

Pour déplacer le fluide nous utilisons des conduites. Ces dernières influent sur le débit et par conséquent sur la pression de refoulement du fluide.

Le calcul du réseau des conduits et des pompes est un facteur important pour installer des usines de dessalement d'eau de mer.

Ces calculs donnent une vue sur la zone de bon fonctionnement de la pompe. Ce travail nous permet d'enrichir nos connaissances théoriques et nos connaissances sur les stations de pompage en général et sur la station de pompage de Honaine.

Nous avons vérifié nos résultats à partir des calculs avec la station de pompage de Honaine puisque le point de fonctionnement déduit à partir des calculs et celui de la station de pompage de Honaine.

Il serait intéressant d'optimiser les coûts de la station de pompage d'eau de mer pour garantir le coût minimal de la production d'eau potable en fonction du besoin de la population.

Les stages que nous avons effectué à la station de pompage de Honaine nous a permis de nous familiariser avec les réseaux de pompes et des conduites et se documenter grâce au personnels de la formation du site.

Nous espérons que ce modeste travail soit utile pour les étudiants qui s'intéressent aux stations de pompages en général.

Bibliographie

- [1] Bushnak, Adil. «Évaluation des meilleures technologies disponibles pour le dessalement en zones rurales/locales» Projet financé par l'Union européenne,2012.
- [2] Ducru, Faride Tata.« Dessalement de l'eau de mer : bilan des dernières avancées technologiques ; bilan économique ; analyse critique en fonction des contextes» Paris, 2009.
- [3]Gaston B Allard. «L'osmose inversée: description et principe de fonctionnement» centre de recherche de développement et de transfert de technologie en acériculture.Québec,Fevrier 1984
- [4]Atallah, Abderrazak. «Procédé de dessalement et qualité physico-chimique de l'eau dessalée par la station de dessalement de l'eau de mer» Mémoire de master en biologie université Aboubekr Belkaid Tlemcen , 2014.
- [5] Chargères, Bernard . «Pompe volumétrique pour le liquide.» Ingénieur de l'École Spéciale de Mécanique et d'Électricité (ESME-SUDRIA).
- [6] Principe des pompes WILO,«Principes fondamentaux de la technologie des pompes.». 2006.www.wilo.com (consulté le 22/06/2015)
- [7] Rekik, Sami. «Pompes et les moteurs hydraulique» Conception et maintenance.
- [8] ImmoD(Imagination modèle Durable). «Installation de pompage d'eau» Espace Besançon, 2010.
- [9]Gabrie, Gorlier Philippe & Germain. «La viscosité et sa mesure» 1998.
- [10]KSB Aktiengesellschaft. «Détermination des pompes centrifuges» Éditeur KSB Aktiengesellschaft Allemagne, 2005.
- [11] «La mer à boire » La cite de la mer. Technopole Cherbourg-Normandie / Avril 2012
- [12] Lallemand, André. «Écoulement des fluides,Dynamique des fluides réels» Lyon,France.
- [13] José Vazquez. «Hydraulique générale», Ecole nationale du génie de l'eau et de l'environnement de Strasbourg.
- [14]Rovel-Jean Marie. «Dessalement d'eau de mer»,article de refirence W5700,10 février 2010.

[15] «Manuel d'exploitation de l'usine de dessalement de Honaine »,10 Novembre 2010.

[16] <http://www.blackmersmartenergy.com> (consulté le 21/06/2015)

[17] Manuel de formation cours EXP-PR-EQ070 « Les équipements –les pompes » ,TOTAL ,2007.


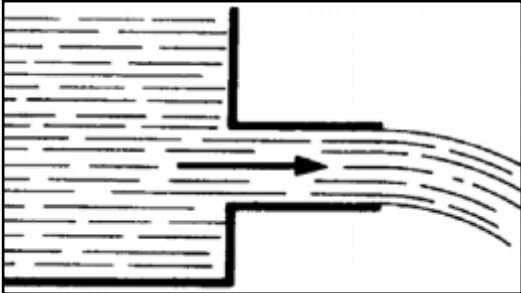

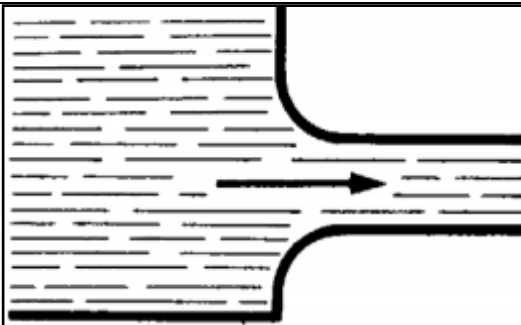
Annexes

I. Les valeurs de ξ est donnée pour les différents cas les plus classiques :

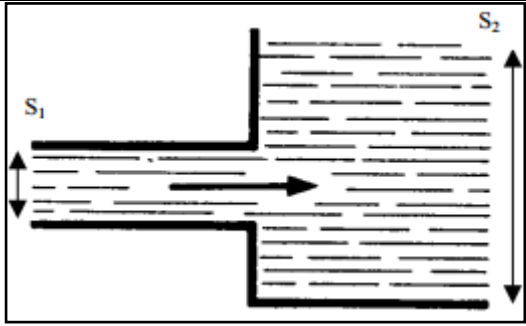
I.1 Les conduites :

Raccordement d'une conduite avec un grand réservoir.

1. Départ

	$\xi = 0.5$ Sans saillie à l'intérieur du réservoir, avec raccordement à angles vifs.
	$\xi = 1$ Sans saillie à l'intérieur du réservoir, avec raccordement à angles vifs, ajustage débitant à gueule bée.
	$\xi = 1$ Avec saillie à l'intérieur du réservoir Pour une saillie dont la longueur est compris entre 1 et 2 fois le diamètre.
	$\xi = 0.05$ Sans saillie à l'intérieur du réservoir, avec raccordement de profil arrondi Cette valeur est une moyenne, elle dépend du profil de l'arrondi.

2. Arriver :



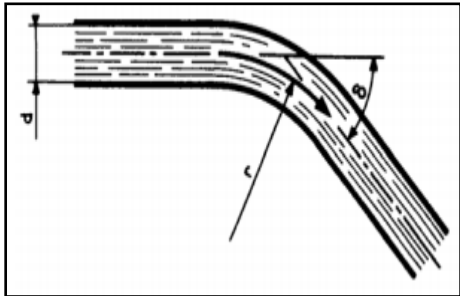
$$\xi = \left(1 - \frac{S_1}{S_2}\right)^2 + \frac{1}{9} \left(\frac{S_1}{S_2}\right)^2$$

$S_2 \gg S_1 \Rightarrow$

$$\xi = 1$$

I.2 Coude :

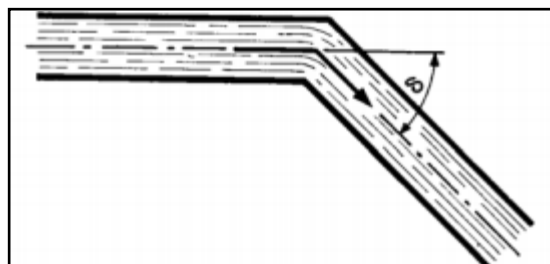
1. Arrondi :



$$\xi = \left(0.131 + 1.847 \left(\frac{d}{2r}\right)^{\left(\frac{7}{2}\right)}\right) \frac{\delta}{90^\circ}$$

Équation 3-1: Perte de charge d'un coude arrondi

2. Brusque :



ξ : Indépendant du diamètre.

$\delta(^{\circ})$	22.5	30	45	60	90
ξ	0.07	0.11	0.24	0.47	1.13

Tableau 3-1: Les pertes de charge d'un coude brusque

I.3 Tés :

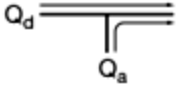
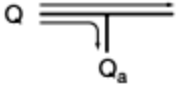
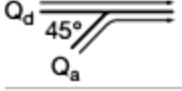

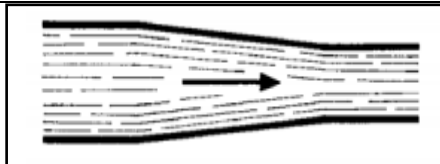
$Q_a/Q =$	0,2	0,4	0,6	0,8	1
	$\zeta_a \approx -0,4$ $\zeta_d \approx 0,17$	0,08 0,30	0,47 0,41	0,72 0,51	0,91 -
	$\zeta_a \approx 0,88$ $\zeta_d \approx -0,08$	0,89 -0,05	0,95 0,07	1,10 0,21	1,28 -
	$\zeta_a \approx -0,38$ $\zeta_d \approx 0,17$	0 0,19	0,22 0,09	0,37 -0,17	0,37 -
	$\zeta_a \approx 0,68$ $\zeta_d \approx -0,06$	0,50 -0,04	0,38 0,07	0,35 0,20	0,48 -

Tableau 3-2 Les pertes de charge d'un branchement

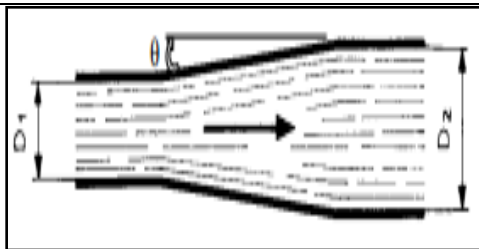
I.4 Cônes :

1. Convergent :



La perte de charge est négligeable.

2. Divergent :

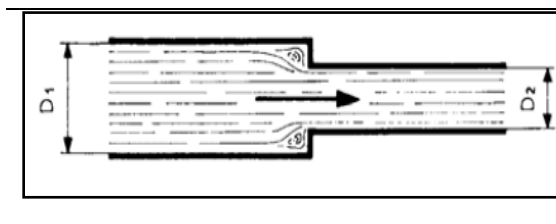


$$\xi = 3.2 \left(\tan \left(\frac{\theta}{2} \right) \right)^{1.25} \left(1 - \left(\frac{D_1}{D_2} \right)^2 \right)^2$$

Si $\theta > 20^\circ$ il y a décollement et le comportement est identique à celui d'un élargissement brusque.

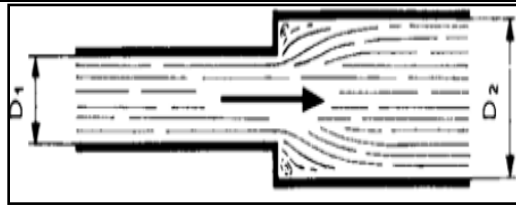
I.5 Changement brusque de diamètre :

1. Rétrécissement :



$$\xi = 0.5 \left(1 - \left(\frac{D_1}{D_2} \right)^2 \right)$$

2. Elargissement

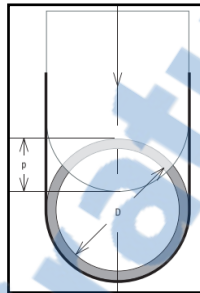


$$\xi = \left(1 - \frac{S_1}{S_2}\right)^2 + \frac{1}{9} \left(\frac{S_1}{S_2}\right)^2$$

Équation 3-33: Perte de charge d'un élargissement

II. Appareils de robinetterie:

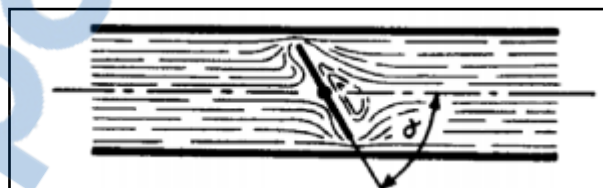
II.1 Vanne opercule :



$\frac{P}{D}$	$\frac{1}{8}$	$\frac{2}{8}$	$\frac{3}{8}$	$\frac{4}{8}$	$\frac{5}{8}$	$\frac{6}{8}$	$\frac{7}{8}$
ξ	0.07	0.26	0.81	2.06	5.52	17	98

Tableau 3-3: Les pertes de charge de vanne opercule

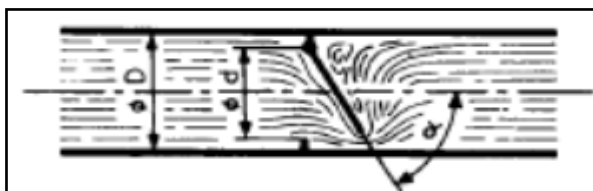
II.2 Vanne à papillon :



α°	5	10	15	20	30	40	45
ξ	0.24	0.52	0.9	1.5	3.9	11	19

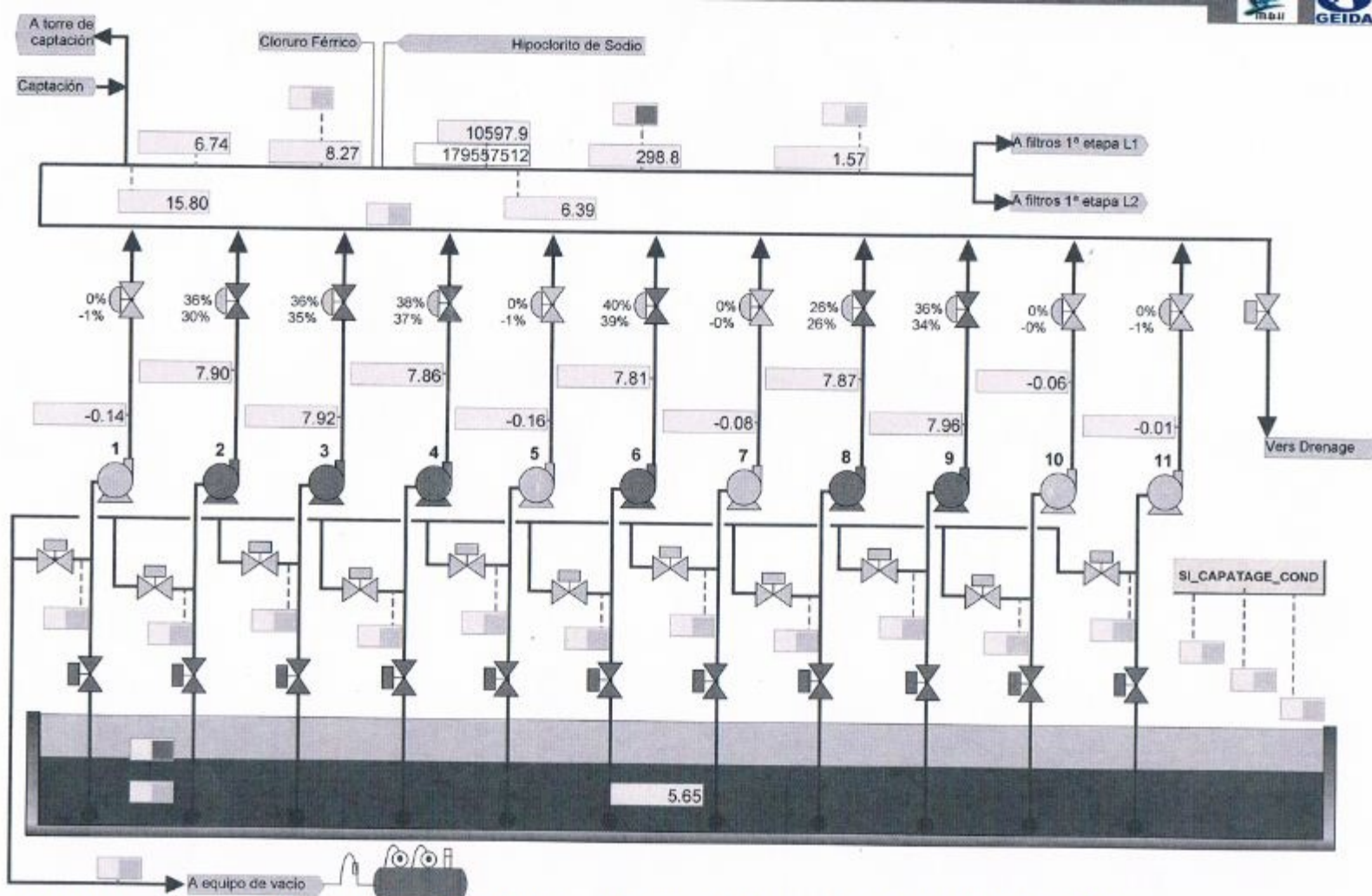
Tableau 3-4: Les pertes de charge de vanne à papillon

II.3 CLAPETS DE RETENUE :



α°	20	30	40	50	60	70	75
ξ	1.7	3.2	6.6	14	30	62	90

Tableau 3-5:Les pertes de charge de clapet de retenue



schématisation de station de pompage de Honaine pour six pompe en marche

Date: 31-Mar-15 Time: 12:52:16 Alarm: Alarm Server: HONZ5ESV01A Station: 5 Logon: Stn05

Résumé

Une des solutions pour pallier le manque d'eau potable sont les stations de dessalement d'eau de mer. Celles-ci permettent de produire de l'eau potable à partir de l'eau de mer grâce à des techniques particulières. Le marché du dessalement connaît une forte augmentation, dans les pays en situation de manque d'eau, et particulièrement ces dernières années avec l'amélioration des techniques utilisées. Ces techniques se distinguent en deux familles : la distillation thermique et à membranes. Comme les ressources naturelles d'eau sont limitées et irrégulières, l'Algérie lance un programme de dessalement d'eau de mer.

Cette étude a pour objectif de faire des calculs de réseau des conduites et des pompes de la station de pompage au niveau d'usine de dessalement Honaine (Tlemcen) à but de trouver un point de bon fonctionnement de cette dernière.

الملخص

من بين الحلول التي يتوصل إليها الإنسان للقضاء على ندرة المياه العذبة هي محطات تحلية مياه البحر بواسطة تقنيات خاصة. سوق تحلية تشهد نموا قويا في البلدان التي تعاني من نقص المياه، خصوصا في السنوات الأخيرة مع تحسن تقنيات. وتنقسم هذه التقنيات إلى عائلتين: التقطير الحراري والأغشية.

في الجزائر، الموارد الطبيعية من المياه محدودة لذلك أطلقت برنامجا لتحلية مياه البحر. وقد ركزنا في بحثنا على محطة هنين لتحلية مياه البحر. ويهدف هذا العمل إلى إجراء حسابات على الأنابيب والمضخات لتأسيس نقطة التشغيل للشبكات الهيدروليكية.

ABSTRACT

One of the solutions to mitigate the lack of drinking water are the sea water desalination stations. That-cipermettent to produce drinking water startingfrom sea water thanks to destechnic particular. The market of desalination knows a strong increase, in the countries in situation of lack of water, et particulièrement these last yearswith the improvement of the techniques used .These techniques are distinguished in two families: thermal distillation and with membranes.

As the water naturalre sources are limited and irregular, Algérie lance a programme of desalination of sea water. In ourmodestwork us nous sommesinterested in the water desalination station of mer Honaine. The purpose of this workis to make calculations on the conduits and the pumps to find the point of operation of the pumping station.