

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université A. MIRA-BEJAIA



Faculté de Technologie
Département de Génie Electrique

Projet de Fin d'Etude

Pour l'obtention du diplôme de Master en Electromécanique

Thème

Contribution à l'étude des problèmes de cavitation dans les pompes centrifuges et à sa détection par intelligence artificielle au niveau de sonatrach Bejaïa

Préparé par :

Mr HARAOUI Mas-nsen

Mr KORICHE Ferhat

Dirigé par :

Mr DJERMOUNI Kamel

Année Universitaire : 2024/2025

Résumé

Dans le cadre de notre projet de fin d'études, nous avons travaillé sur l'étude du phénomène de cavitation dans les pompes centrifuges, un problème critique pouvant nuire au rendement et à la durabilité des équipements. L'objectif principal était de détecter ce phénomène en combinant une analyse théorique avec une application pratique sur le site SP2 de Biskra (SONATRACH). Un programme MATLAB a été développé pour calculer le NPSH disponible, puis enrichi par un modèle d'intelligence artificielle de type réseau de neurones MLP, capable d'identifier automatiquement les cas de cavitation. Des solutions de maintenance préventive ont également été proposées pour améliorer la fiabilité du système.

Abstract

As part of our final-year project, we focused on the study of cavitation in centrifugal pumps—a critical phenomenon that can negatively impact performance and cause severe damage to Equipment. The main objective was to detect cavitation by combining a theoretical analysis with practical application at the SP2 pumping station in Biskra (SONATRACH). A MATLAB program was developed to calculate the available NPSH, and enhanced with an artificial intelligence model using a Multilayer Perceptron (MLP) neural network to automatically identify cavitation cases. Preventive maintenance solutions were also proposed to improve the system's reliability and operational efficiency.

الملخص

في إطار مشروع تخرجا، عملنا قمنا بدراسة ظاهرة التجويف في المضخات الطاردة المركزية، وهي مشكلة حرجة قد تؤثر على الأداء وعلى م坦ة المعدات. الهدف الرئيسي كان يتمثل في الكشف هذه الظاهرة من خلال الجمع بين تحليل نظري وتطبيق عملي في موقع محطة ضخ ببسكرة (سوناطراك). تم تطوير باستخدام برنامج برمجي لحساب الارتفاع الصافي الايجابي للشفط المتناح، ثم تم تعزيزه بنموذج ذكاء اصطناعي من نوع الشبكات العصبية، قادر على التعرف تلقائياً على حالات التجويف. كما تم اقتراح حلول خاصة بالصيانة الوقائية بهدف تحسين موثوقية النظام.

REMERCLEMENT

Nous remercions tout d'abord notre dieu qui nous a donné la force et la puissance Pour terminer ce modeste travail.

Tous nos remerciements vont à notre encadreur **Mr Djermouni Kamel** qui a accepté de suivre cette étude et qui nous a guides tout au long de ce travail.

Nous tiendrons aussi à remercier tous les enseignants du département génie électrique qui ont contribué de près ou de loin à notre formation durant tout le cursus universitaire.

Dédicace

Je dédie ce modeste travail aux personnes qui sont les plus chères sur cette terre mon père et ma mère pour leur amour, dévouement, confiance, encouragement et soutien pendant toutes mes années d'études.

A mes chers frères, A mes chères sœurs et mes amis avec lesquels j'ai partagé cinq ans de ma vie universitaire.

A tous les amis que j'ai eu la chance d'avoir et qui occupent tous une place dans mon cœur.

Nomenclature

P [Bar]	la pression
V [m/s]	la vitesse
ρ [Kg/m³]	la masse volumique
g [m/s²]	la gravité
z [m]	Altitude
W [J]	le travail spécifique
U [m/s]	vitesse périphérique
C_u []	Composante tangentielle de la vitesse absolue
H [m]	la hauteur manométrique
g [m/s²]	l'accélération gravitationnelle
S [m/s]	la section
ΔP [Bar]	les pertes de charges
V [m/s]	la vitesse absolue
Q_v [m³/H]	le débit volumique
S [m²]	la section de refoulement
V [m/s]	la vitesse de passage
H_{TA} []	la charge totale du liquide à l'aspiration
H_{TR} []	la charge totale du fluide à l'orifice du refoulement
η [%]	le rendement
P [W]	la puissance utile (puissance hydraulique)
P_a [W]	la puissance absorbée
P_{ref} [Bar]	la pression de refoulement
P_{asp} [Bar]	la pression d'aspiration
$H_{mt}^{théorique}$ [m]	la hauteur manométrique théorique
ΔP_f^{pompe} [Bar]	les pertes de charges de la pompe
P_{abs} [W]	la puissance fournie au fluide
P_{hydro} [W]	la puissance absorbée par la pompe
P_{atm} [Bar]	la pression atmosphérique
u_{asp}^2 [m/s²]	la vitesse à l'aspiration

Δp_f^{asp} [Bar] la perte de charge totale sur le circuit d'aspiration

P_{vap} [Bar] la pression de vapeur

P_v [Pa] Pression de vapeur du liquide

P_a [Pa] Pression d'aspiration de la pompe

H_a [m] Hauteur d'aspiration

P_f [Pa] La perte de charge

Liste des figures**CHAPITRE I : Généralités sur les pompes centrifuge**

Figure I.1	Pompe centrifuge mono- étage	6
Figure I.2	Pompe centrifuge multi-étage	6
Figure I.3	Roue à simple aspiration	7
Figure I.4	Roue à double aspiration	7
Figure I.5	Roue pompe centrifuge	9
Figure I.6	Rôle de la volute	11
Figure I.7	Rôle de diffuseur	12
Figure I.8	Principaux éléments d'une pompe de surface	13
Figure I.9	Principaux éléments d'une pompe submersible	14
Figure I.10	Courbe caractéristique d'une pompe centrifuge	17
Figure I.11	Rendement d'une pompe centrifuge	18
Figure I.12	Notation pour le calcul du NPSH disponible	19
Figure I.13	NPSH requis et disponible	20
Figure I.14	Courbes caractéristiques fournies par le constructeur d'une pompe centrifuge	21

CHAPITRE II : Etude du phénomène de cavitation

Figure II.1	Diagramme de changement de phase	26
Figure II.2	Cavitation à bulles suivie d'un nuage de cavitation	27
Figure II.3	Représentation typique d'une poche de cavitation en régime stationnaire; point de détachement, zone de pression de vapeur, point de fermeture et longueur	27
Figure II.4	La cavitation de tourbillon marginal	29

CHAPITRE III : Etude expérimentale

Figure III.1	Pompe cavité	35
Figure III.2	Pompes de type booster	36
Figure III.3	Structure organisationnelle de l'entreprise SONATHRACH	37
Figure III.4	Réseaux de pipes principales	38
Figure III.5	Organigramme de DRGB	39
Figure III.6	Architecture d'un réseau de neurones avec une couche cachée (6-10-1)	45
Figure III.7	Organigramme des programmes de détection de cavitation basse sur l'intelligence artificiel	47
Figure III.8	Analyse de l'erreur de prédiction du réseau de neurone pour la détection de la cavitation	48
Figure III.9	Courbe MCE -réseau de neurone	49
Figure III.10	Organigramme des causes possible de la chute de pression absorbée et des solutions technique associé	53
Figure III.11	Courbes caractéristique (HMT- Q_V , η - Q_V) de la pompe centrifuge type DVDS 14.14.18 / 1ét	56
Figure III.12	Courbes caractéristique(P_{arbre} - Q_V) de la pompe centrifuge type DVDS 14.14.18 / 1ét	57
Figure III.13	Courbes caractéristique($NPSH_{disponible}$ - Q_V) de la pompe centrifuge type DVDS 14.14.18 / 1ét	57
Figure III.14	Courbe caractéristique NPSH en fonction de débit	58

Liste des tableaux**CHAPITRE III : Etude expérimentale**

Tableau III.1	Paramètres d'entrée du réseau de neurones pour la détection de la cavitation	43
Tableau III.2	Paramètres de sortie du réseau de neurones pour la détection de la cavitation	43
Tableau III.3	Variation de la hauteur manométrique et de rendement du moteur en fonction du débit volumique	55
Tableau III.4	Variation de la puissance d'arbre en fonction du débit volumique	55
Tableau III.5	Variation du NPSH disponible en fonction du débit volumique	55

Sommaire**Nomenclature****Liste des figures****Liste des tableaux****Introduction générale.....** 1**CHAPITRE I: Généralités sur les pompes centrifuges**

I.1 Introduction.....	3
I.2 Description d'une pompe centrifuge.....	4
I.2.1 Définition	4
I.2.2 Principe de fonctionnement d'une pompe centrifuge	5
I.2.3 Classification des pompes centrifuges	5
I.3 Pourquoi pompe centrifuge.....	8
I.4 Constitution d'une pompe centrifuge.....	8
I.4.1 Roue (impeller)	8
I.4.2 Corps de pompe (volute ou diffuseur)	10
I.4.3 Arbre (shaft).....	12
I.4.4 Garniture d'étanchéité (sealing système).....	13
I.4.5 Palier (bearings)	13
I.4.6 Dispositif d'amorçage	13
I.4.7 Moteur d'entrainement (drive système).....	13
I.4.8 Différence entre pompe de surface et submersible	14
I.5 Théorie fondamentale de la pompe centrifuge.....	14
I.5.1 Débit volumique.....	14
I.5.2 Hauteur manométrique.....	15
I.5.3 Puissance P.....	15
I.5.4 Types de pertes	15
I.5.5 Rendement η	16
I.6 Prédétermination des courbes caractéristique	16
I.6.1 Théoriques.....	16
I.6.2 Réelle	21
I.7 Les facteurs de dysfonctionnement des pompes centrifuges	22
I.8 Avantages et inconvénients des pompes centrifuges	23
I.8.1 Avantages des pompes centrifuges	23
I.8.2 Inconvénients des pompes centrifuges.....	24

I.9 Les applications de pompage les plus courantes	24
I.10 Conclusion	24
CHAPITRE II: Etude du phénomène de cavitation	
II.1 Introduction	25
II.2 Définition.....	25
II.3 Causes de cavitation	26
II.4 Classification de la cavitation.....	26
II.4.1 Cavitation à bulle.....	26
II.4.2 Cavitation a poche	27
II.4.3 Cavitation de tourbillon marginal.....	28
II.4.4 Cavitation de tourbillon d'ogive.....	28
II.4.5 Cavitation du tourbillon de coque	28
II.4.6 Super cavitation	29
II.5 Effet de la cavitation.....	29
II.5.1 Effets mécaniques.....	29
II.5.2 Effets hydrodynamiques	29
II.5.3 Effets acoustiques	30
II.5.4 Effets environnementaux ou fonctionnels	30
II.6 Effet de la cavitation sur la roue de pompe centrifuge	30
II.6.1 Cavitation l'entrée de la roue (pompe centrifuge).....	30
II.6.2 Cavitation dans les parties situées à l'amont de la roue	31
II.6.3 Cavitation dans les diffuseurs	31
II.7 Utilisation de la cavitation.....	31
II.8 Impact de cavitation sur la durée de vie des équipements de pompage industriel	32
II.9 Solutions innovantes contre la cavitation dans les pompes industrielles	32
II.9.1 Net Positive Suction Head (<i>NPSH</i>)	32
II.9.2 Net Positive Suction Head requis (<i>NPSH_{requis}</i>)	33
II.9.3 Net Positive Suction Head disponible (<i>NPSH_{disponible}</i>)	33
II.9.4 La relation entre le phénomène de cavitation et le <i>NPSH</i>	33
II.9.5 Optimisation la géométrie des aubes de l'impulseur.....	34
II.9.6 Utilisation de matériaux résistants à la cavitation	34
II.10 Conclusion	34

CHAPITRE III : Etude expérimentale

III.1 Introduction	35
III.2 Présentation de l'entreprise	36
III.2.1 Structure organisationnelle de la SONATRACH.....	37
III.2.2 Branche de Transport par Canalisation (TRC).....	38
III.2.3 Organigramme de DRGB	38
III.2.4 Les différentes stations de pompage	39
III.3 Présentation de l'installation expérimentale	40
III.3.1 Description de la pompe utilisée	40
III.3.1.1 Les principales caractéristiques de la pompe	40
III.3.1.2 Les autres caractéristiques.....	40
III.4 Etude de cavitation	41
III.4.1 Calcul de NPSH disponible.....	41
III.4.2 Application de l'intelligence artificielle à la prédition de la cavitation	41
III.4.2.1 Présentation de l'intelligence artificielle	41
III.4.2.2 Surveillance révolutionnaire des pompes au moyen de l'IA.....	41
III.4.2.3 Réseaux de neurones artificiels (ANN).....	42
III.4.2.4 Type de réseau utilisé : MLP (Perceptron multicouche).....	42
III.4.2.6 L'architecture du programme.....	43
III.4.2.7 Performances du réseau.....	48
b) Analyse de l'évolution de l'erreur du réseau Neurone	49
III.4.2.8 Exemples de fonctionnement du programme	50
III.4.3 Maintenance préventive	51
III.4.3.1 Causes de cavitation	52
III.4.3.2 Analyse des causes de la chute de pression absorbée et solutions correctives ..	53
III.4.3.3 Tracement des graphes	55
III.5 Conclusion.....	59
Conclusion générale	60
La liste bibliographique	

Références Bibliographies**Bibliographies**

- [1] B. Masse, « Pompes et installations de pompage », Éditions Techniques de l'Ingénieur, France, 2017.
- [2] Denis Pépin, Banar Alfred, Atgauste Énrouf.
- [3] "The History of Pumps", TFPumps. Disponible sur : <https://tfpumps.com/the-history-of-pumps/>, consulté en mars 2025.
- [4] KSB Fluid Experts. Disponible sur : <https://www.ksb-fluidexperts.fr/>, consulté en mars 2025.
- [5] Tapflo France. Disponible sur : <https://tapflo.fr>, consulté en mars 2025.
- [6] YouTube, diverses vidéos pédagogiques sur les pompes centrifuges, consultées en mars 2025.
- [7] Atlas Copco, « Cavitation in Centrifugal Pumps », Suède. Disponible sur : <https://www.atlascopco.com/fr-fr/construction-equipment/resources/blog/cavitation-in-centrifugal-pump>, consulté en mars 2025.
- [8] Debem. Disponible sur : <https://www.debem.com/en/>, Italie, consulté en mars 2025.
- [9] Séminaire sur la pompe centrifuge, IAP99, Algérie, 1989.
- [10] CNAM – Hydraulique, « Caractéristiques des pompes centrifuges », France. Disponible sur : <https://gkip.cnam.fr/...>, consulté en mars 2025.
- [11] Jeau Héng, « La nouvelle usine – Gestion industrielle et pratique de la maintenance préventive », Dunod, France, 2002.
- [12] Cowseal. Disponible sur : <https://cowseal.com>, consulté en mars 2025.
- [13] InoxMIM, « Pompes centrifuges – Fonctionnement et applications », Espagne. Disponible sur : <https://www.inoxmim.com/fr/...>, consulté en mars 2025.
- [14] B. Djebabla, B. Djellali, « Mémoire de Master 2 Maintenance », Université d'Annaba, Algérie, 2021.
- [15] Suoto Pump, « The Advantages of Centrifugal Pumps », Chine. Disponible sur : <https://www.suotopump.com/fr/...>, consulté en avril 2025.
- [16] Wassermann Pump, « The Advantages and Disadvantages of Centrifugal Pumps », Allemagne. Disponible sur : <https://fr.wassermannpump.net/...>, consulté en avril 2025.
- [17] White, F.M., « Fluid Mechanics », 7th Edition, McGraw-Hill, États-Unis, 2011.
- [18] R. Berrahmoune, « Analyse de l'altération des performances des pompes centrifuges sous l'influence de l'érosion de cavitation », Mémoire de fin d'études, Algérie, 1993.

- [19] Brennen, C. E., « Cavitation and Bubble Dynamics », Oxford University Press, Royaume-Uni, 1995.
- [20] Thèse doctorale « Développement d'un modèle de cavitation à poche sur hydrofoils et hélices », [Auteur, université et pays à préciser].
- [21] Techno-Science, « Cavitation ». Disponible sur : <https://www.techno-science.net/...>, consulté en avril 2025.
- [22] Jean-François Lapray, « Cours sur les pompes centrifuges », Université de Grenoble, France.
- [23] Yves Lecoffre, « La cavitation : traqueuse de bulles », Durand, France, 1994.
- [24] Le Garrec, « Le NPSH », France. Disponible sur : <https://www.legarrec.com/...>, consulté en mai 2025.
- [25] Gülich, J. F., « Centrifugal Pumps », 2e éd., Springer, Allemagne, 2010.
- [26] Stepanoff, A. J., « Centrifugal and Axial Flow Pumps: Theory, Design, and Application », Krieger Publishing, États-Unis, 1993.
- [27] IBM France. Disponible sur : <https://ibm.fr>, consulté en mai 2025.
- [28] Mémoire de fin d'étude, « Dimensionnement d'une électropompe avec armoire de commande pour transfert d'eau au niveau de SONATRACH », université Abderrahmane mira, Bejaïa, Algérie.
- [29] Mémoire de fin d'étude, « Étude d'une station de pompage SP2 commandée par automate programmable S7300 », université de Biskra, Algérie.
- [30] Wix. Disponible sur : <https://fr.wix.com/>, consulté en juin 2025.
- [31] Abel Pumps. Disponible sur : <https://abelpumps.com/fr/>, Allemagne, consulté en juin 2025.

Introduction générale

Introduction générale

Dans les installations industrielles, les pompes centrifuges occupent une place essentielle dans le transport des fluides, notamment dans les secteurs de l'énergie, de la chimie et de l'industrie pétrolière. Au sein du complexe portuaire de Sonatrach à Béjaïa, ces équipements sont indispensables au bon déroulement des opérations de chargement, de déchargement et de transfert des hydrocarbures. Toutefois, leur fonctionnement est souvent perturbé par un phénomène physique redouté : la cavitation.

Ce phénomène se manifeste par la formation de bulles de vapeur dans le liquide pompé, suivie de leur implosion brutale lorsqu'elles atteignent des zones de pression plus élevée. Il peut entraîner des vibrations anormales, une baisse de performance hydraulique, l'érosion des surfaces internes des pompes, et à terme, une défaillance prématuée de l'équipement. La cavitation constitue donc une menace réelle pour l'intégrité des installations, la sécurité des opérations et la continuité de la production.

Dans ce contexte, ce mémoire vise à étudier en profondeur les problèmes de cavitation rencontrés sur les pompes centrifuges en service à l'établissement de Sonatrach Bejaïa. L'objectif est d'identifier les causes principales de ce phénomène, d'en évaluer les impacts sur le rendement des pompes, et de proposer des solutions techniques, organisationnelles et préventives pour limiter ses effets. Cette démarche repose à la fois sur une approche théorique et sur une application pratique en milieu industriel.

Plus précisément, cette étude s'appuie sur un diagnostic technique des équipements concernés, une analyse des conditions opératoires, et une proposition de recommandations basées sur les normes industrielles et les retours d'expérience. Une attention particulière est portée à la mise en place d'une maintenance préventive adaptée, ainsi qu'à l'intégration des technologies modernes, notamment l'intelligence artificielle. L'utilisation d'un réseau de neurones MLP (Multi layer perceptron) permet ici de prédire la cavitation à partir de paramètres physiques mesurés, renforçant ainsi les capacités de détection et de prévention.

Ce travail a été mené à la suite d'un stage pratique effectué à la station de pompage n°2 (SP2) de Biskra, en collaboration avec la société de maintenance industrielle MEI. Cette immersion sur le terrain a permis de compléter l'approche théorique par une analyse concrète du fonctionnement des pompes en condition réelle.

Le mémoire est structuré en trois chapitres :

- Le premier chapitre présente les généralités sur les pompes centrifuges.
- Le deuxième chapitre est consacré à l'étude du phénomène de cavitation.
- Le troisième chapitre aborde l'étude expérimentale, incluant les calculs de NPSH, la maintenance préventive, ainsi que la mise en œuvre d'un programme de détection intelligent basé sur l'IA.

L'ensemble de ce travail vise à proposer des solutions concrètes pour améliorer la fiabilité, l'efficacité et la durabilité des systèmes de pompage dans un contexte industriel sensible.

CHAPITRE I

Généralités sur les pompes centrifuges

I.1 Introduction

Parlons d'abord sur les turbopompes , tel que ce sont des appareils qui modifient la teneur en énergie d'un fluide qui les traverse grâce à l'action dynamique d'un rotor (roue à aube, hélice) tournant autour d'un axe fixe. Parmi les turbomachines hydrauliques, on trouve les turbines, qui soustraient de l'énergie du liquide pour convertir en énergie mécanique, et les turbopompes, qui accroissent l'énergie du liquide par un échange inverse.

Les turbopompes provoquent d'abord un accroissement considérable de l'énergie cinétique du liquide pompé à l'aide de rotors ou d'hélices tournant à grande vitesse et ensuite convertissent en grande partie cette énergie cinétique en énergie de pression, ce qui va permettre le refoulement du liquide. On les peut classer en trois catégories : les pompes centrifuges, les pompes hélices et les pompes hélico-centrifuges ou à écoulement mixte [1].

On classe les turbopompes en trois types principaux suivant la direction du liquide à l'intérieur de la roue :

- Pompes centrifuges ;
- Pompes à hélice (pompe axiales) ;
- Pompes à tourbillon.

Les pompes centrifuges ont une longue histoire marquée par plusieurs évolutions technologiques. Leur principe remonte à l'Antiquité avec des dispositifs rudimentaires comme la vis d'Archimède, mais leur véritable invention est attribuée à Denis Papin en 1689 [2].

Au XIXe siècle, avec la révolution industrielle, des améliorations notables apparaissent, notamment grâce à John Appold qui optimise la conception des impulseurs en 1851. Le XXe siècle voit l'essor des pompes modernes grâce aux avancées en hydraulique, en électricité et en matériaux résistants à l'usure [3].

Aujourd'hui, les pompes centrifuges bénéficient des outils de simulation numérique (CFD), de l'intelligence artificielle et de systèmes de surveillance avancés. Les recherches actuelles visent à améliorer leur rendement et à limiter des phénomènes indésirables comme la cavitation, notamment dans les domaines de l'énergie et du traitement de l'eau [4].

L'évolution continue des pompes centrifuges témoigne de leur importance croissante dans les industries modernes et des défis technologiques à relever pour optimiser leur performance [5].

Les pompes centrifuges occupent une place essentielle dans de nombreux secteurs industriels, notamment dans le domaine du pompage des liquides, de l'approvisionnement en eau, de l'industrie chimique et énergétique. Elles sont privilégiées en raison de leur capacité à fournir un débit élevé, leur fiabilité et leur efficacité énergétique [6].

Malgré leurs nombreux avantages, les pompes centrifuges sont sujettes à divers phénomènes pouvant affecter leurs performances, tels que les pertes hydrauliques, l'usure des composants et la cavitation, qui peut engendrer une diminution de l'efficacité et des dommages structurels. L'optimisation du fonctionnement de ces pompes est donc un enjeu majeur pour améliorer leur rendement, réduire leur consommation énergétique et prolonger leur durée de vie [7].

Dans ce premier chapitre, nous allons présenter les notions de base relatives aux pompes centrifuges. Cela inclut leur principe de fonctionnement, les principaux composants qui les constituent, les paramètres hydrauliques associés à leur utilisation, ainsi que les différents types de pompes selon les applications. Cette mise en contexte est essentielle pour mieux comprendre les conditions d'apparition de la cavitation et l'importance de la prévenir, sujet central de ce projet de fin d'études.

I.2 Description d'une pompe centrifuge

I.2.1 Définition

Une pompe centrifuge est un dispositif mécanique conçu pour déplacer des liquides en utilisant la force centrifuge. Elle convertit l'énergie mécanique en énergie cinétique, permettant ainsi le transfert efficace de liquides d'un point à un autre. Les pompes centrifuges sont largement utilisées dans diverses industries pour une large gamme d'applications comme le transfert de liquides corrosifs, la distribution d'eau potable, le traitement des eaux usées, le refroidissement des moteurs et bien plus encore.

On peut distinguer 3 principales « familles » de pompes centrifuges :

- les pompes centrifuges monocellulaires, verticales ou horizontales ;
- les pompes centrifuges multicellulaires, verticales ou horizontales ;
- les pompes centrifuges à amorçage automatique [4].

I.2.2 Principe de fonctionnement d'une pompe centrifuge [4]

Le fonctionnement d'une pompe centrifuge est relativement simple mais efficace. Voici les principales étapes de son fonctionnement :

- **Aspiration** : la pompe aspire le liquide à partir d'une source, que ce soit un réservoir, un puits, ou une autre source d'approvisionnement en liquide. Cela se fait généralement à travers une entrée appelée l'aspiration.
- **Centrifugation** : Une fois que le liquide est aspiré, il est dirigé vers le corps de la pompe. À l'intérieur, un rotor muni d'aubes est actionné. Lorsque le rotor tourne, les aubes projettent le liquide vers l'extérieur grâce à la force centrifuge. Cela crée une pression accrue à l'intérieur de la pompe.
- **Refoulement** : La pression générée pousse le liquide hors de la pompe par une sortie appelée le refoulement. De là, le liquide est acheminé vers la destination souhaitée, que ce soit un réservoir de stockage, un système de distribution, ou un autre point d'utilisation.

I.2.3 Classification des pompes centrifuges [8]

On classe les pompes centrifuges d'après le principe de fonctionnement.

a) Disposition de l'axe

- les pompes à axe horizontale ;
- les pompes à axe vertical (pompes immergées).

b) Nombres de roue

Le nombre de roues correspondant au nombre d'étages - monocellulaire ou monétagée (Figure I.1)

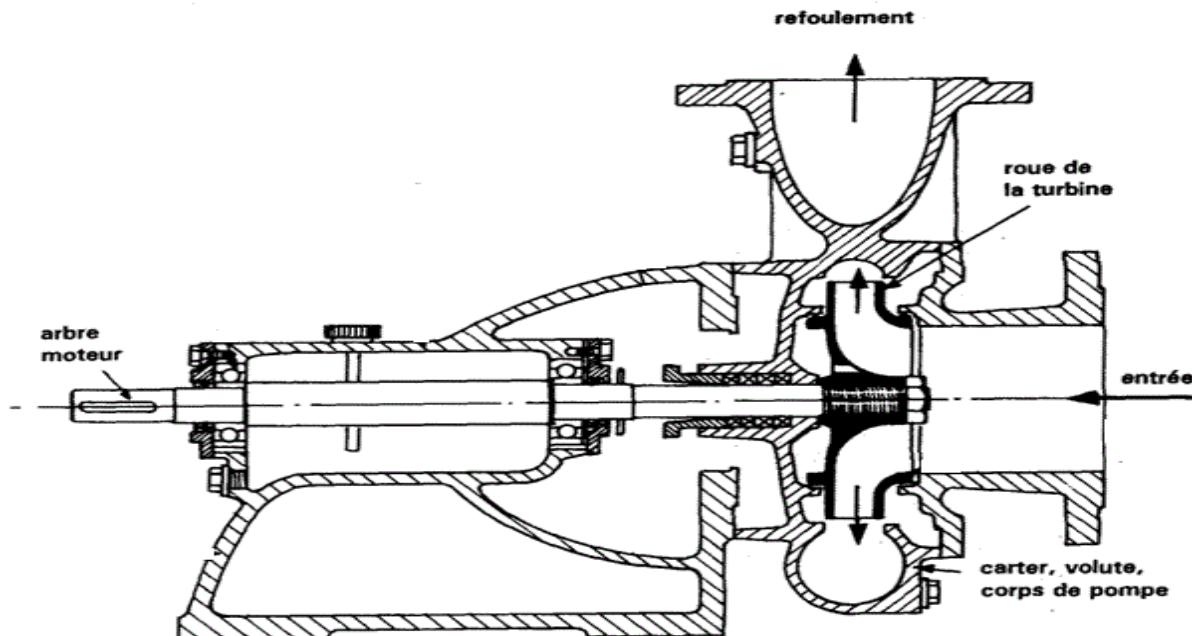


Figure I.1 Pompe centrifuge mono- étage

✓ multicellulaire ou multi-étages (Figure I.2)

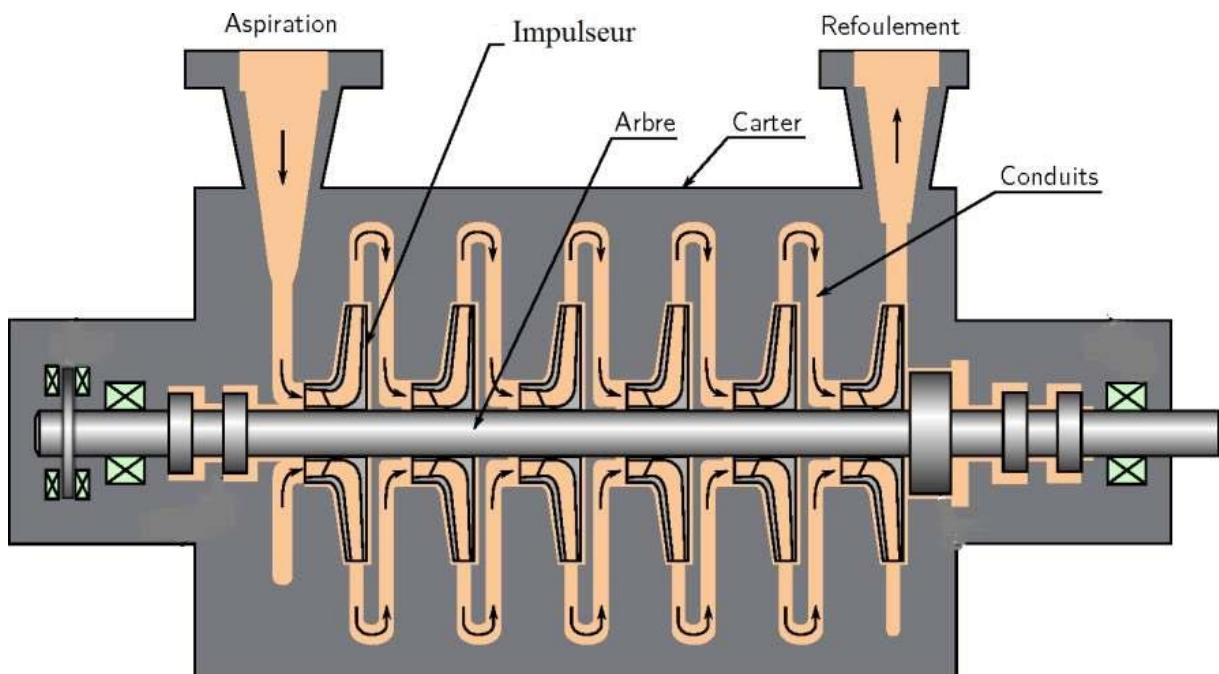


Figure I.2 Pompe centrifuge multi-étage

c) La forme de la roue

- ✓ simple aspiration (Figure I.3)

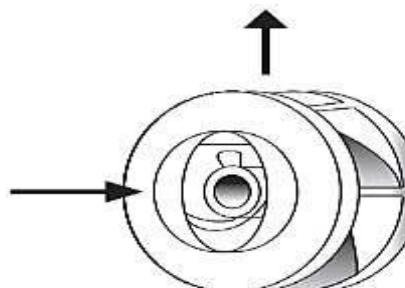
**Simple entrée**

Figure I.3 Roue à simple aspiration

- ✓ double aspiration (Figure I.4)

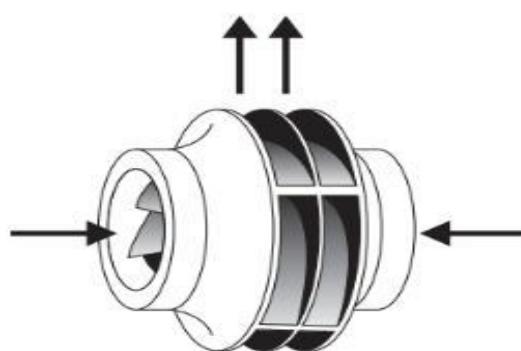
**Double entrée ou à 2 ouïes**

Figure I.4 Roue à double aspiration

d) La pression engendrée

- ✓ Faible pression ;
- ✓ Forte pression.

e) Moyen d'accouplement

- ✓ Par chaîne ;
- ✓ Par engrenage ;
- ✓ Par bride ;
- ✓ Par courroie.

f) Moyen d'entraînement

- ✓ Par moteur électrique ;
- ✓ Par moteur diesel ou essence ;
- ✓ Par turbine à vapeur ou à gaz.

g) Type du récupérateur

- ✓ Volute ;
- ✓ Diffuseur.

h) Usage

- ✓ Pompe à usage normale ;
- ✓ Pompe à boue ;
- ✓ Pompe à acide ;
- ✓ Pompe à mazout et essence.

I.3 Pourquoi pompe centrifuge

Puisque :

- ❖ Ont des capacités de transport élevé : sont capables de déplacer de grands volumes de fluide ;
- ❖ Adopté aux fluides plus et très visqueux (surtout s'il réchauffé) ;
- ❖ Moins de maintenance ;
- ❖ Facilite la régulation.

I.4 Constitution d'une pompe centrifuge

Les principaux éléments constituants de la pompe centrifuge sont :

I.4.1 Roue (impeller) [4]

La roue est une constituante essentielle d'une pompe centrifuge, est la partie tournante qui transmet l'énergie mécanique du moteur au fluide. Son rôle principal est de :

- Accélérer le fluide grâce à la force centrifuge ;
- Convertir l'énergie mécanique en énergie cinétique et partiellement en pression ;
- Assurer un débit et une hauteur de refoulement adaptés à l'application.



Figure I.5 Roue pompe centrifuge

a) Types de roues

Il existe aussi plusieurs types de roues selon leur conception :

- **Roue fermée** : Composée de pales enfermées entre deux disques. Elle est la plus efficace et utilisée pour les liquides propres.
- **Roue semi-ouverte** : Comporte un seul disque avec des aubes visibles, utilisée pour des liquides légèrement chargés.
- **Roue ouverte** : Sans disque de confinement, elle est adaptée aux liquides très chargés en particules.

b) Relation de Bernoulli appliquée à la roue

Dans un écoulement en rotation :

$$P + \left(\frac{1}{2}\right) \rho V^2 + \rho g z = \text{constant} \quad (\text{I.1})$$

Cette équation permet de calculer la pression et la vitesse aux différentes sections.

c) Equations fondamentales

La dynamique de la roue s'exprime avec plusieurs équations fondamentales :

- **Équation de conservation de la quantité de mouvement (Théorème d'Euler)**

Le travail spécifique W transmis au fluide par la roue est donné par :

$$W = U_2 C_{u2} - U_1 C_{u1} \quad (\text{I.2})$$

Avec :

- $U = r \omega$: vitesse périphérique en [m/s] ;
- C_{u1} : composante tangentielle de la vitesse absolue ;
- Indices 1 et 2 désignent respectivement l'entrée et la sortie de la roue.

➤ **Hauteur manométrique (H)**

L'énergie transmise se traduit par une augmentation de pression et de hauteur d'élévation :

$$H = \frac{W}{g} \quad (\text{I.3})$$

Où g est l'accélération gravitationnelle.

I.4.2 Corps de pompe (volute ou diffuseur) [4]

Enveloppe qui guide et dirige le fluide après qu'il ait traversé la roue, transformant une partie de l'énergie cinétique en énergie de pression.

a) Volute (corps spiralé)

- Collecte le fluide provenant de la roue ;
- Convertit l'énergie cinétique en pression en augmentant la section d'écoulement ;
- Réduit les pertes d'énergie dues aux turbulences.

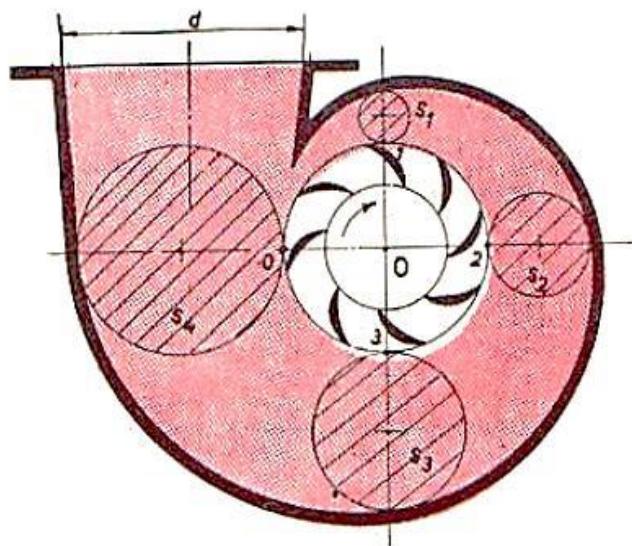


Figure I.6 Rôle de la volute

La section S recueille les liquides des aubes de 0 à 1.

La section S recueille les liquides des aubes de 0 à 2 d'où $S_2=2S_1$.

Ainsi de suite jusque S_4 qui recueilli la totalité des liquides. Le diamètre d est déterminé en vue d'être raccordé sur une tuyauterie normalisée.

b) Diffuseur

- Contient plusieurs aubes fixes autour de la roue ;
- Diminue la vitesse du fluide tout en augmentant la pression ;
- Améliore le rendement en réduisant les pertes de charge.

Pour éviter les pertes de charges exagérées dans les tuyauteries, on limite la vitesse de circulation du fluide à une valeur voisine de 2 m/s. Mais comme la vitesse absolue à la sortie de la roue (au point M2) est de l'ordre de 50 m/s (Figure I.7), on doit prévoir un diffuseur réduisant progressivement la vitesse pour permettre la récupération de l'énergie cinétique [8].

La chute de vitesse crée une élévation de la pression donnée par la relation de Bernoulli.

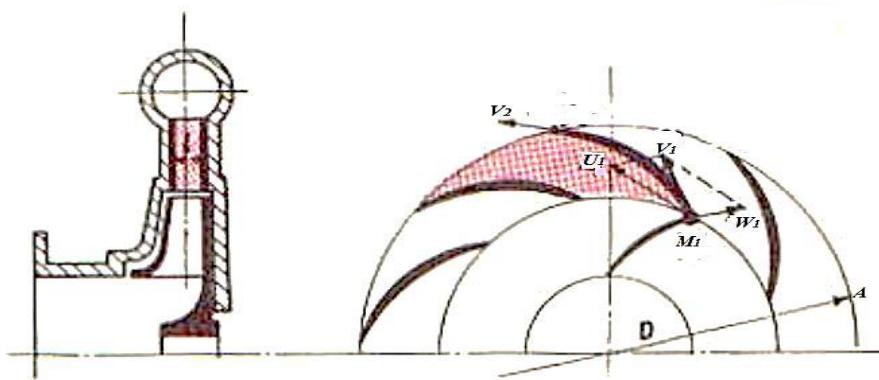


Figure I.7 Rôle de diffuseur

$$\Delta P = \left(\frac{P}{2}\right) ((V_2^2) - (V_3^2)) \quad (I.4)$$

V_2 : La vitesse absolue à la sortie de la roue au point M2.

V_3 : La vitesse absolue à la sortie du diffuseur.

b.1) Type de diffuseurs

- Diffuseur à ailettes directrices composé de deux flasques munis d'ailettes ce genre de diffuseur se rencontre peu sur les pompes monocellulaires mais bien sur les pompes multicellulaires.
- Diffuseur lisse (sans ailettes). Les ailettes ne sont pas toujours nécessaires car une particule liquide quittant la roue avec une vitesse de direction V s'incurve automatiquement suivant une spirale.

D'où l'emploi de diffuseurs lisses moins coûteux qui se rencontrent sur certaines pompes monocellulaires [9].

✓ **Remarque :** absence de diffuseur.

Certaines pompes (bon marché) n'ont pas de diffuseur mais présentent alors une volute à vitesse variable ou en colimaçon dans laquelle s'opère à la fois le recueillement et chute de vitesse du liquide.

I.4.3 Arbre (shaft) [9]

Supporte et entraîne la roue, transmettant l'énergie mécanique du moteur à la roue.

Généralement en acier inoxydable, alliages spéciaux pour la résistance à la corrosion et à la fatigue.

I.4.4 Garniture d'étanchéité (sealing système)

Empêche les fuites de fluide entre l'arbre en rotation et le corps de la pompe [9].

I.4.5 Palier (bearings)

Soutiennent l'arbre et réduisent la friction lors de la rotation. On distingue Paliers à billes, à rouleaux, hydrodynamiques [9].

I.4.6 Dispositif d'amorçage

Remplit la pompe de fluide avant son démarrage pour éviter la cavitation [9].

I.4.7 Moteur d'entrainement (drive système)

Fournit l'énergie mécanique nécessaire pour entraîner l'arbre et la roue. Peut-être un moteur électrique, une turbine ou un moteur thermique [9].

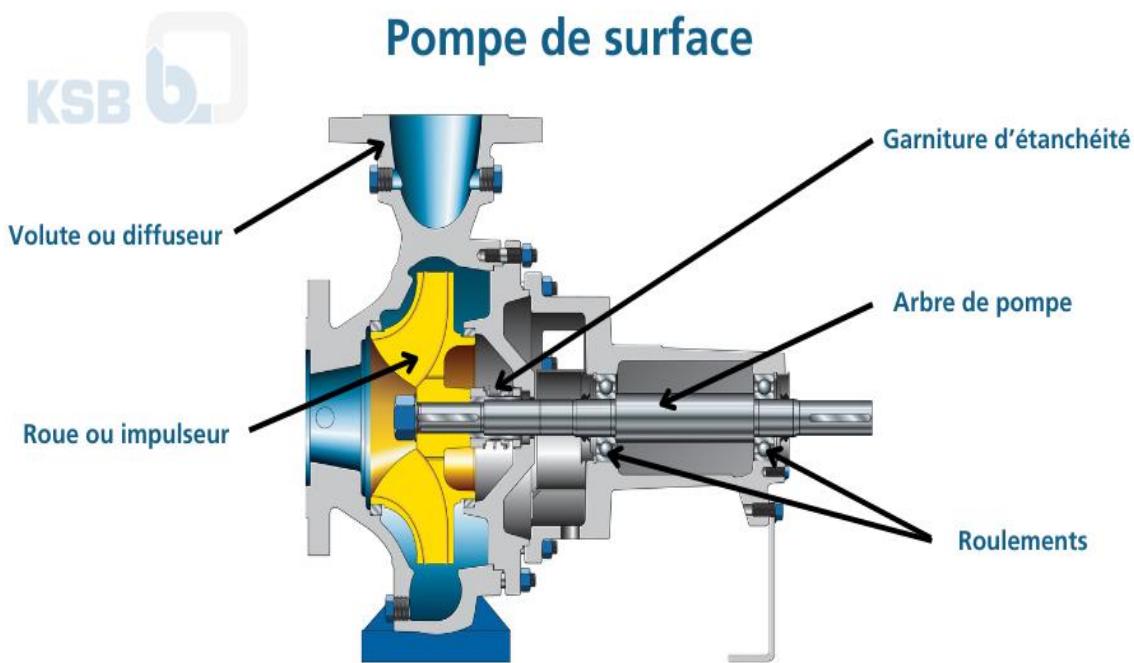


Figure I.8 Principaux éléments d'une pompe de surface

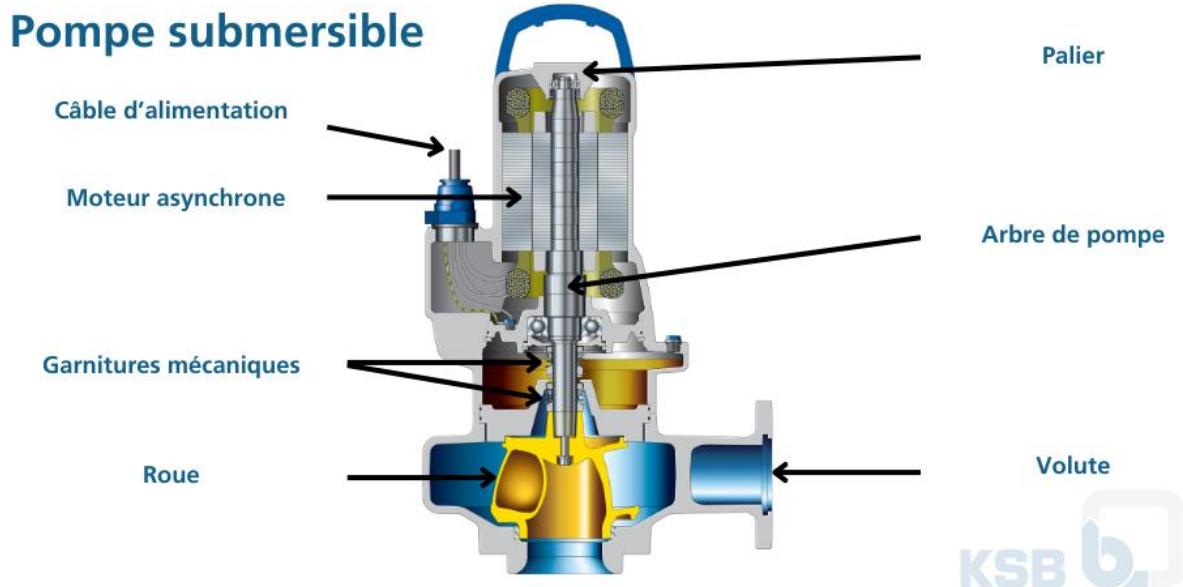


Figure I.9 Principaux éléments d'une pompe submersible

I.4.8 Différence entre pompe de surface et submersible [4]

- **Pompe de surface** : elle est installée hors de l'eau, souvent sur le sol ou sur un support. Utilisé pour récupération l'eau de pluie, irrigation, suppression.
- **Pompe submersible** : elle est immergée directement dans le liquide à pomper.

Généralement est utilisé pour les puits profonds, forage, eaux usées, drainage.

I.5 Théorie fondamentale de la pompe centrifuge

Les principaux paramètres qui caractérisent une pompe sont :

- ✓ La hauteur manométrique ;
- ✓ Le débit volumique ;
- ✓ Le rendement η .

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

I.5.1 Débit volumique

Le débit volumique « Q_v » caractérise la quantité de liquide qui passe à travers une section donnée (section de refoulement) « S » par unité de temps « t ». Cette quantité de liquide est aussi caractérisée par la vitesse de passage à travers cette section.

$$Q_v = V \cdot S \quad (I.5)$$

I.5.2 Hauteur manométrique

On appelle hauteur manométrique H d'une pompe, l'énergie fournie par la pompe à l'unité de poids du liquide qui la traverse. Si H_{TA} est la charge totale du liquide à l'aspiration et H_{TR} la charge totale du fluide à l'orifice du refoulement, la Hauteur manométrique de la pompe est :

$$H_m = H_{TA} - H_{TR} \quad (\text{I.6})$$

Cette différence de pression entre la pression amont et la pression en aval en fonction du débit constitue la caractéristique de la pompe. La hauteur manométrique est généralement exprimée en hauteur de colonne d'eau (mètre de colonne d'eau : mce).

Pour déterminer la hauteur manométrique il faudra bien faire attention de considérer les pressions totale P_A (avant la pompe) et P_R (après la pompe).

H_m est calculé à partir de la formule suivante :

$$H_m = (P_R - P_A) / \rho g \quad (\text{I.7})$$

I.5.3 Puissance P

La puissance utile est la puissance absorbée : la puissance disponible au niveau de l'arbre d'entrainement de la roue de la pompe est la puissance absorbée P_A de cette pompe. La puissance transmise au fluide est appelée puissance hydraulique utile P_u . Le rapport de la puissance utile P_u et la puissance absorbée P_A est le rendement global de la pompe η_g .

I.5.4 Types de pertes

a) Pertes mécaniques

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

b) Pertes par fuites

- ✓ Fuite d'une garniture d'ouïe mono étage ;

- ✓ Fuite sur barrage arrière d'une roue équilibrée ;
- ✓ Fuite au piston d'équilibrage ;
- ✓ Fuite à l'extrémité des aubes ;
- ✓ Fuite externes.

c) Pertes hydrauliques

- ✓ Les pertes hydrauliques sont constituées par :
- ✓ Les pertes dans le conduit d'amenée ;
- ✓ Les pertes dans les roues ;
- ✓ Les pertes dans les diffuseurs lisses ;
- ✓ Les pertes dans les canaux de retour ;
- ✓ Les pertes dans la volute.

I.5.5 Rendement η

Le rendement η d'une pompe est le rapport de la puissance totale utile P (puissance hydraulique) communiquée au liquide pompé à la puissance P_a absorbée par la pompe (en bout d'arbre) ou par le groupe (aux bornes du moteur).

Si Q_v est le débit volumique du liquide, ρ sa masse volumique, et H la hauteur manométrique de la pompe, la puissance P et le rendement η sont donnée par :

$$P = Q_v \cdot \rho \cdot g \cdot H \quad (I.8)$$

Et

$$\eta = \rho \cdot g \cdot H / P_a \quad (I.9)$$

I.6 Prédétermination des courbes caractéristique [10]

I.6.1 Théoriques

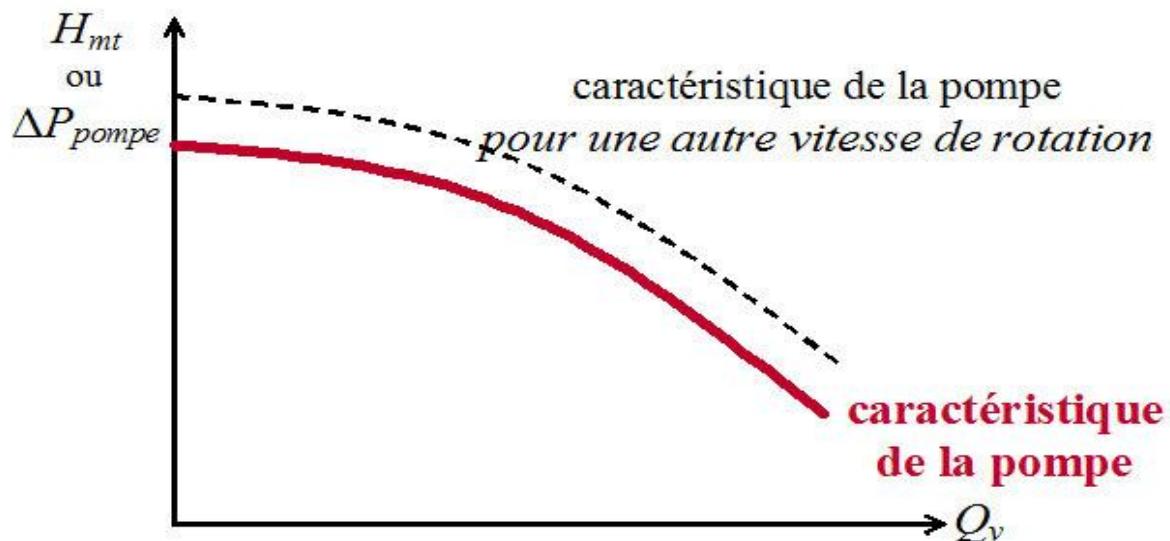
Pour caractériser une pompe centrifuge, on s'appuie sur trois courbes caractéristiques.

a) Hauteur manométrique

Selon l'équation de Bernoulli généralisée (utilisée ici un peu abusivement car l'écoulement dans une pompe centrifuge n'a rien d'irrotationnel, mais ceci permet de comprendre le principe), si les conduites d'aspiration et de refoulement d'une pompe ont le même diamètre, on peut écrire :

$$P_{ref} - P_{asp} = \rho \cdot g \cdot H_{mt}^{théorique} - \Delta P_f^{pompe} = \rho \cdot g \cdot H_{mt} \quad (I.10)$$

On en déduit que la hauteur manométrique totale (vraie) décroît avec le débit, du fait des pertes par frottement dans la pompe. La courbe donnant cette hauteur manométrique totale en fonction du débit est appelée caractéristique de la pompe et a l'allure représentée sur la figure ci-dessous.



b) Rendement

Le rendement η d'une pompe est défini comme le rapport de la puissance fournie au fluide P_{hydro} et de la puissance absorbée par la pompe.

$$P_{abs} : \eta = \frac{P_{hydro}}{P_{abs}} \quad (I.11)$$

La puissance fournie au fluide étant la suivante :

$$P_{hydro} = Q_v \cdot \rho \cdot g \cdot H = Q_v \cdot \Delta P_{pompe} \quad (I.12)$$

Puisque la hauteur manométrique totale H_{mt} décroît avec le débit Q_v , la courbe η vs Q_v présente un maximum, comme illustré sur la figure ci-dessous.

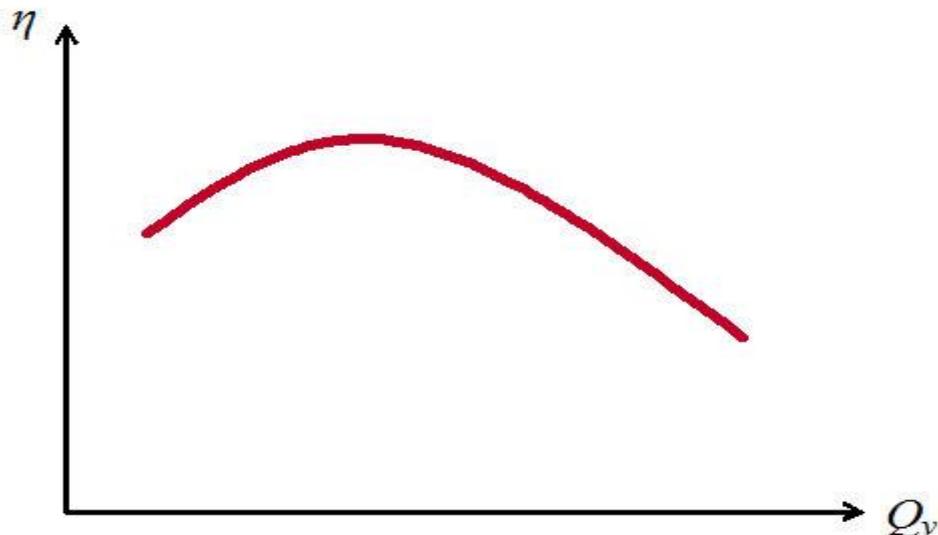


Figure I.11 Rendement d'une pompe centrifuge

c) Net Positive Suction Head (NPSH)

Si l'on appelle Δ la dépression locale maximale qui peut avoir lieu dans la pompe, pour éviter le phénomène de cavitation, il faut que la pression d'aspiration P_{asp} soit telle que $P_{asp} - \Delta > P_{vap}$ (où P_{vap} est la pression de vapeur saturante, à la température considérée). On définit le NPSH (*net positive suction head*) selon :

$$NPSH = \frac{P_{asp}}{\rho \cdot g} - \frac{P_{vap}}{\rho \cdot g} \quad (I.13)$$

Considérons le circuit représenté ci-contre, pour lequel on suppose que la surface du réservoir est à la pression atmosphérique et que le niveau dans le réservoir est à peu près constant (donc vitesse nulle à la surface libre). L'équation de Bernoulli pour un fluide réel fournit :

$$\frac{P_{atm}}{\rho \cdot g} + \frac{0^2}{2 \cdot g} = \frac{P_{asp}}{\rho \cdot g} + h + \frac{u_{asp}^2}{2 \cdot g} + \frac{\Delta P_f^{asp}}{\rho \cdot g} \quad (I.14)$$

Δp_f^{asp} étant ici la perte de charge totale sur le circuit d'aspiration.

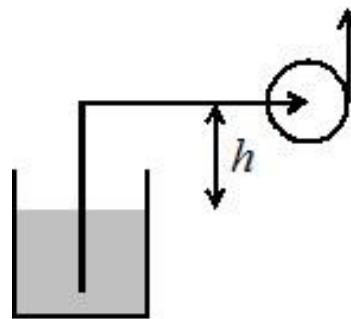


Figure I.12 Notation pour le calcul du NPSH disponible

Ainsi :

$$\frac{P_{asp}}{\rho \cdot g} = \frac{P_{atm}}{\rho \cdot g} - h - \frac{u_{asp}^2}{2 \cdot g} - \frac{\Delta p_f^{asp}}{\rho \cdot g} \quad (I.15)$$

La condition précédente $P_{asp} - \Delta > P_{vap}$ devient alors :

$$\frac{P_{atm}}{\rho \cdot g} - h - \frac{u_{asp}^2}{2 \cdot g} - \frac{\Delta p_f^{asp}}{\rho \cdot g} - \frac{\Delta}{\rho \cdot g} > \frac{P_{vap}}{\rho \cdot g} \quad (I.16)$$

On nomme le terme de gauche $NPSH_{disponible}$ et celui de droite $NPSH_{requis}$.

En pratique le $NPSH_{requis}$ est donné par le fournisseur de la pompe parce qu'il la caractérise.

Alors que le $NPSH_{requis} = \frac{P_{asp}}{\rho \cdot g} - \frac{P_{vap}}{\rho \cdot g}$ caractérise le circuit sur lequel est installée la pompe (le circuit d'aspiration en l'occurrence) et doit donc être calculé par l'utilisateur.

Le $NPSH_{disponible}$ dépend du circuit d'aspiration et du débit, tandis que le $NPSH_{requis}$ dépend de la pompe et du débit. Pour un circuit d'aspiration et une pompe donnés, il existe un débit maximum admissible, comme la montre la figure ci-contre.

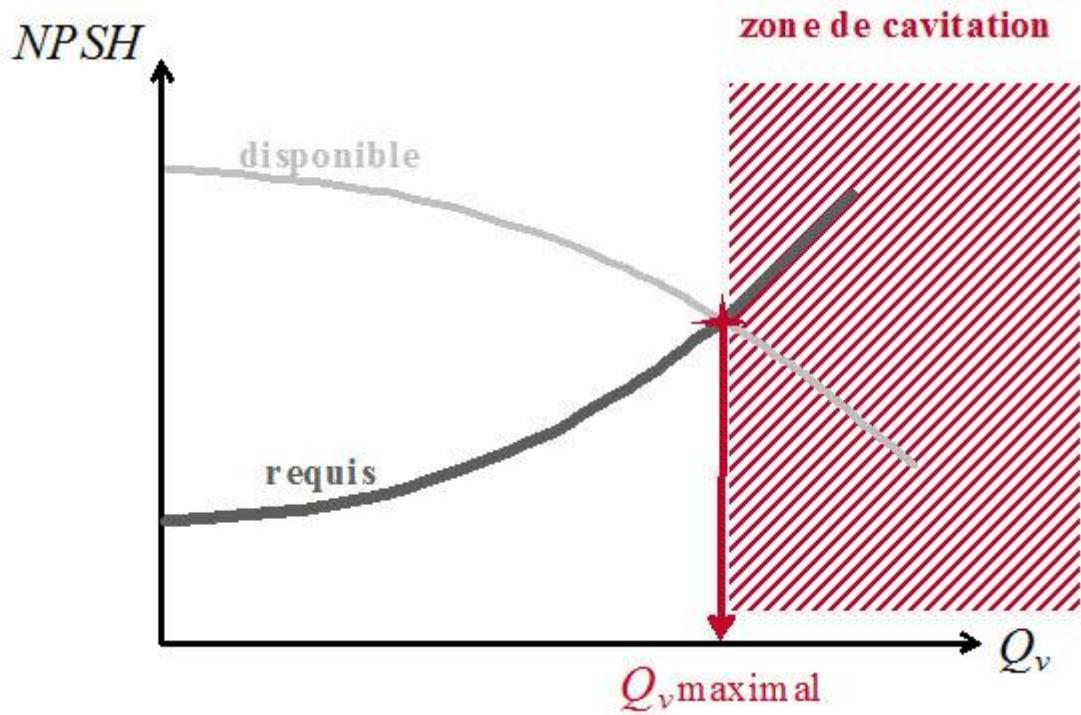


Figure I.13 NPSH requis et disponible

I.6.2 Réelle

Le fabricant d'une pompe $NPSH_{requis}$ doit donc fournir des séries de courbes telles que celles présentée sur la figure ci-contre. En effet, une caractéristique, une courbe η vs Q_v , ou une courbe vs Q_v , sont valables pour une pompe donnée, fonctionnant à une vitesse de rotation donnée, mais aussi pour un fluide donné (masse volumique et viscosité).

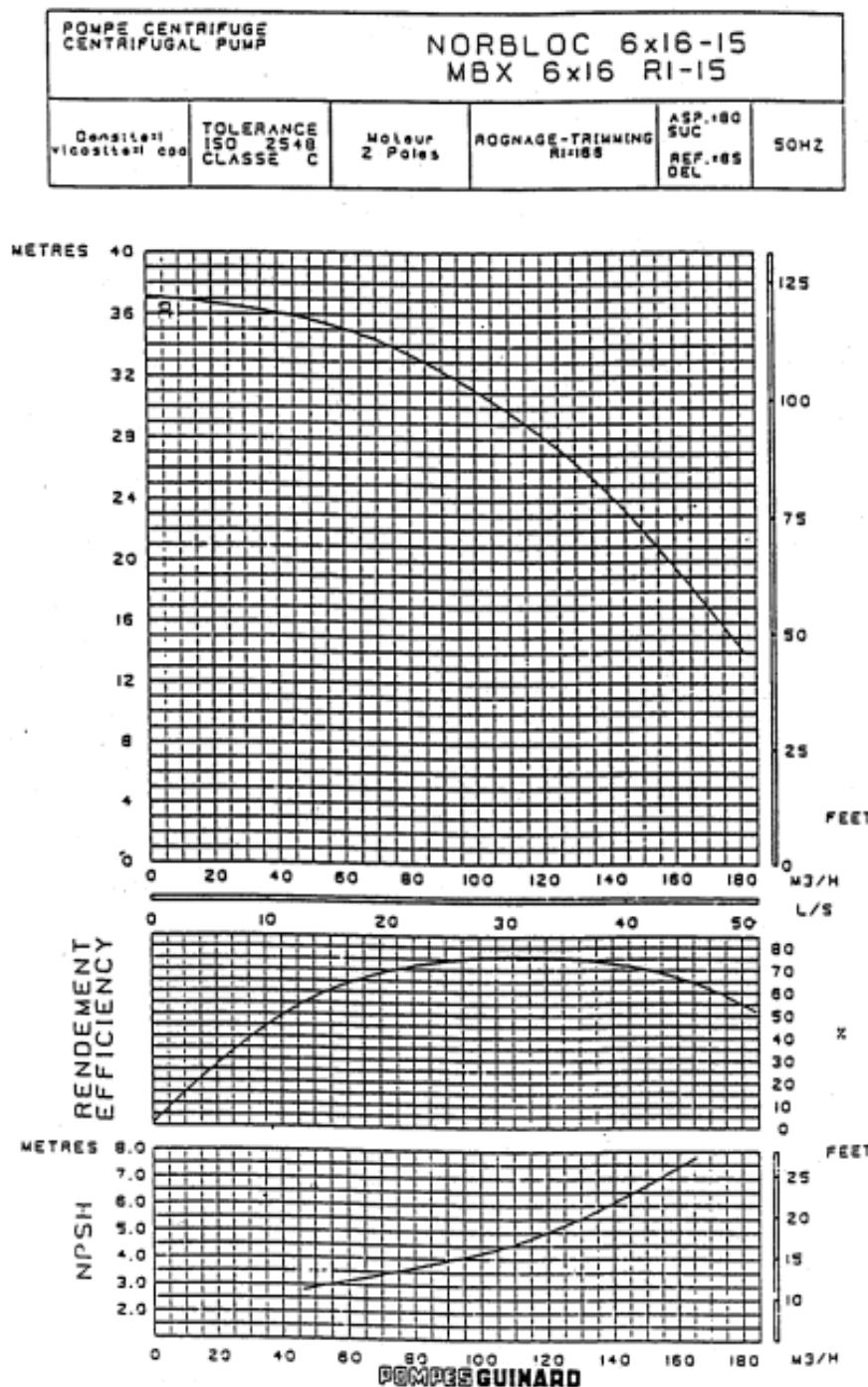


Figure I.14 Courbes caractéristiques fournies par le constructeur d'une pompe centrifuge

I.7 Les facteurs de dysfonctionnement des pompes centrifuges

Les ruptures du fonctionnement d'une pompe peut être causée par plusieurs facteurs ; à savoir :

➤ Cavitation

Lorsque l'on aspire un liquide dans un conduit on crée une dépression, si cette baisse de pression fait descendre la pression du liquide au-dessous de sa pression de vapeur saturante, le liquide se met en ébullition. (Production de vapeur), on appelle ce phénomène la cavitation. Ce phénomène s'accompagne souvent par de bruits violents et de vibrations importantes. Les effets de la cavitation sont nombreux selon le produit (température, tension de vapeur, densité) et le type de pompe (caractéristiques de fonctionnement et matériaux constitutifs) [11].

➤ Surchauffe

Une production excessive de chaleur dans une pompe centrifuge peut entraîner une défaillance prématuée des roulements, des joints et d'autres composants. La surchauffe peut résulter de divers facteurs, tels qu'une lubrification insuffisante, un refroidissement inadéquat des roulements ou le fonctionnement de la pompe dans des conditions de faible débit [12].

➤ Contamination

Une pompe peut être contaminée par les débris présents dans le fluide pompé ou lorsque les raccords de la pompe sont manipulés avec des mains sales. Une forme moins évidente de pollution se produit lorsque de l'air ou d'autres gaz sont piégés dans la pompe [13].

➤ Problèmes liés aux accouplements

Un désalignement, une capacité de couple inadéquate ou une sélection incorrecte de l'accouplement peuvent entraîner des défaillances de l'accouplement de la pompe [14].

➤ Problèmes de conception ou d'installation :

Des erreurs dans la conception du système de tuyauterie, une installation incorrecte ou un ancrage inadéquat peuvent entraîner des contraintes excessives sur la pompe, conduisant à des défaillances mécaniques [14].

➤ Usure des roulements

Une lubrification insuffisante, une mauvaise qualité de l'huile, des impuretés ou un désalignement entre la pompe et le moteur peuvent entraîner une usure prématuée des roulements, provoquant des vibrations excessives et une surchauffe [12].

➤ Obstructions et débris

La présence de débris dans la pompe ou dans les conduites d'aspiration peut provoquer des blocages, une réduction du débit et des dommages aux composants internes [12].

I.8 Avantages et inconvénients des pompes centrifuges**I.8.1 Avantages des pompes centrifuges [15]**

- La structure est simple et compact. Pour un même volume de refoulement, la pompe centrifuge occupe une petite surface, est légère et consomme moins de matière. Les pompes centrifuges et les pompes alternatives ne sont pas aussi élevées que les pompes alternatives en termes d'exigences de base, de sorte que les coûts de fabrication et d'installation sont moindre ;
- Il peut fonctionner à grande vitesse et peut être directement connecté à un moteur 2-pôle ou 4-pôle. La structure de transmission est simple et facile à installer ;
- Il n'y a pas de vanne dans la pompe centrifuge, elle convient donc au transport de suspension, et la conception spéciale peut également transporter des suspensions de gros solides ;
- La pompe peut être constituée de matériaux chimiquement résistants, adaptés au transport de solutions corrosives ;
- En raison de sa structure simple, peu de pièces, peu de pannes, durabilité, faible coût de maintenance, gestion pratique et fonctionnement fiable ;
- Le volume de sortie peut être ajusté arbitrairement ou même complètement fermé par la soupape de décharge, et il n'y aura aucun danger d'augmentation infinie de la tête de pression ;
- Les pompes centrifuges sont les plus appropriées lorsque la quantité de liquide à transporter est importante et que la hauteur de pression ne doit pas nécessairement être importante ;
- La décharge liquide est même sans phénomène d'impulsion.

I.8.2 Inconvénients des pompes centrifuges [16]

- Avant l'opération, le système doit être rempli de liquide ;
- Il n'est pas adapté à la fourniture de petits débits et de grandes têtes de pression, a une faible efficacité et est limité ;
- Lorsque la conception n'est pas parfaite ou que l'opération est incorrecte, comme dans le lait, il est facile de produire de la mousse, ce qui affectera la production du processus suivant ;
- Installation incorrecte. Il y aura un phénomène de "liaison d'air" ;
- Par rapport à la pompe centrifuge et à la pompe alternative, l'efficacité est également inférieure à celle de la pompe alternative.

I.9 Les applications de pompage les plus courantes [4]

Les pompes centrifuges sont polyvalentes et trouvent leur utilité dans de nombreuses applications industrielles :

- **L'approvisionnement en eau** : les pompes centrifuges sont utilisées pour pomper l'eau des puits et des réservoirs vers les systèmes de distribution d'eau potable.
- **Traitement des eaux usées** : cruciales pour le transfert des eaux usées vers les stations de traitement, les pompes centrifuges sont indispensables.
- **Industrie chimique : les produits chimiques dangereux** : sont souvent pompés à l'aide de ce type d'équipement spécialement conçu pour résister à ces substances.
- **Applications alimentaires et pharmaceutiques** : dans ces domaines, des pompes centrifuges conformes aux normes d'hygiène requises sont utilisées pour le transfert de liquides sensibles.

I.10 Conclusion

Les pompes centrifuges, largement utilisées dans l'industrie, sont efficaces pour le transport de liquides, mais peuvent rencontrer des problèmes de cavitation. Ce phénomène nuit à leur performance et peut causer des dommages importants. Ce chapitre a ainsi posé les bases nécessaires pour mieux comprendre et étudier la cavitation dans les chapitres suivants.

CHAPITRE II

Etude du phénomène de cavitation

II.1 Introduction

La cavitation reste aujourd’hui encore, un sujet de préoccupation majeure pour qui s’intéressent aux pompes roto dynamiques par exemple les pompes centrifuges, qu’il soit utilisateur, installateur ou bien entendu constructeur. L’évolution rapide de l’industrie des pompes, les récents progrès réalisés dans l’étude et la compréhension des nombreux mécanismes qui régissent le phénomène de cavitation, rend nécessaire la mise à jour des connaissances sur le sujet.

Dans ce chapitre, nous allons décrire en détail les mécanismes de formation de la cavitation, ses principales causes, les types de cavitation existants, ainsi que ses effets sur les composants des pompes. Cette étape est fondamentale pour comprendre l’impact réel de la cavitation sur les installations hydrauliques et poser les bases des méthodes de détection, de diagnostic et de prévention qui seront abordées ultérieurement.

II.2 Définition

La cavitation est un phénomène physique qui se produit lorsqu’un liquide est soumis à une chute locale de pression atteignant ou descendant en dessous de sa pression de vapeur saturante, entraînant ainsi la formation de bulles de vapeur. Lorsque ces bulles se déplacent vers une zone de plus haute pression, elles implosent violemment, générant des ondes de choc, des bruits, des vibrations, et souvent des dommages mécaniques aux surfaces voisines [17].

Contrairement à l’ébullition, qui, elle se fait à pression constante par élévation de température du liquide considéré [18], voir le diagramme (Figure II.1).

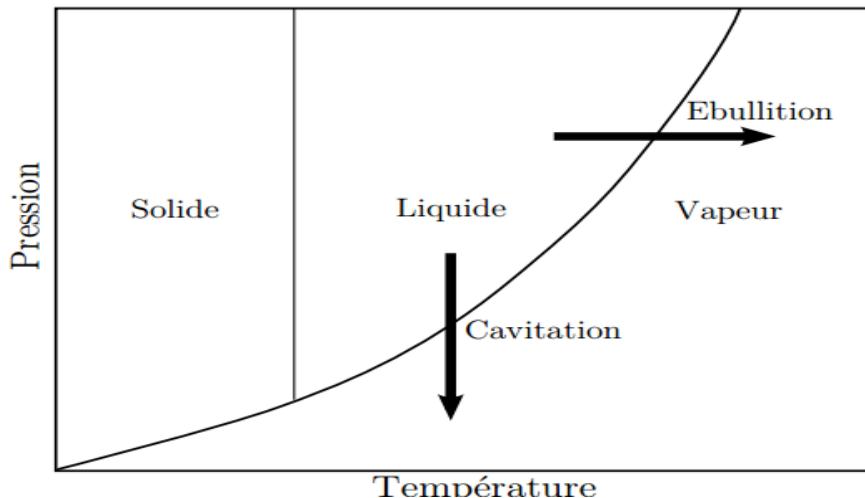


Figure II.1 Diagramme de changement de phase

II.3 Causes de cavitation [19]

Les principales causes à l'origine de l'apparition de la cavitation sont :

- la dépression due à une survitesse locale de l'écoulement provoquée par exemple par des réductions géométriques.
- les fluctuations turbulentes de la pression, le cisaillement élevé et les vortex provoquées par des instabilités de l'écoulement.
- la rugosité de paroi et la présence de germes de cavitation.

II.4 Classification de la cavitation

La classification de la cavitation se fait généralement en fonction du mécanisme physique de formation des bulles, du comportement dynamique du fluide, ou encore selon le type d'écoulement ou de machine concernée. Voici les principales catégories de cavitation :

II.4.1 Cavitation à bulle

La cavitation à bulles se produit lorsque la pression locale d'un liquide chute en dessous de sa pression de vapeur saturante, entraînant la formation de bulles. Ces bulles peuvent croître et imploser violemment, générant des ondes de choc et des micros jets capables d'endommager les surfaces avoisinantes. Ce phénomène est particulièrement pertinent dans des contextes tels que les pompes, les turbines, les hélices marines et les applications biomédicales, canalisations [20].

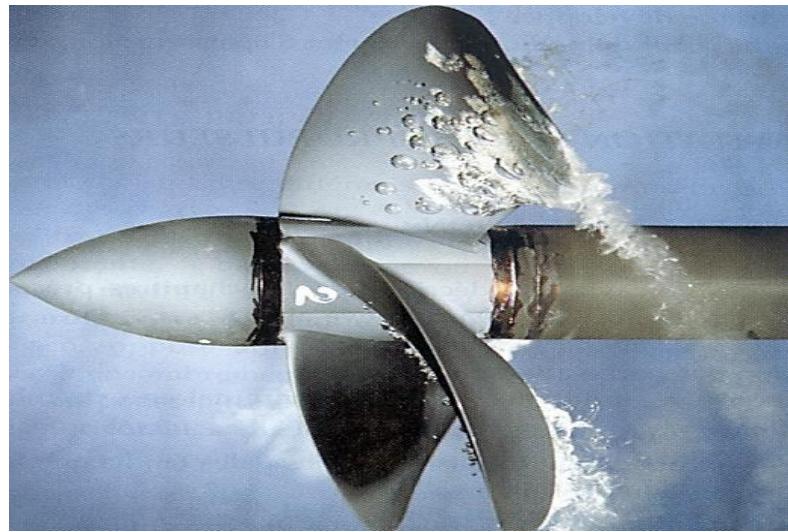


Figure II.2 Cavitation à bulles suivie d'un nuage de cavitation

II.4.2 Cavitation à poche

La cavitation à poche est moins bruyante et moins destructive que la cavitation à bulles (pas d'implosion). Un des effets néfastes de la cavitation à poche est la perte de performances du propulseur. De plus, la cavitation à poche peut être à l'origine de problèmes de vibration dont les conséquences peuvent aller jusqu'à l'endommagement de la structure. Ces vibrations peuvent avoir plusieurs causes comme la fluctuation temporelle des efforts sur les pales due au fait que la pale peut très bien ne pas caviter que lorsqu'elle est en position haute ou la pression ambiante est moins élevée ou être due au fait que la poche de cavitation est très instable. Dans les deux cas, les fréquences sont bien sûr très différentes [20].

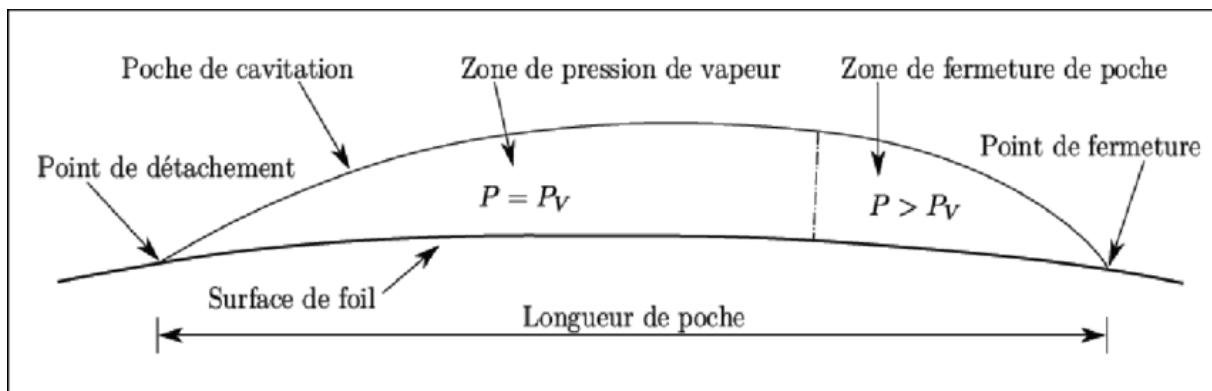


Figure II.3 Représentation typique d'une poche de cavitation en régime stationnaire; point de détachement, zone de pression de vapeur, point de fermeture et longueur

II.4.3 Cavitation de tourbillon marginal

La cavitation de tourbillon marginal est le type de cavitation qui apparaît généralement en premier. Le tourbillon marginal existe à cause de la portance développée sur la pale. Ce tourbillon s'explique assez facilement. Reprenons le cas d'une aile portante. Les pressions sous l'aile, soit à l'intrados (pressure Sidé), sont généralement supérieures à la pression de référence alors qu'au-dessus de l'aile, à l'extrados (section Sidé), elles sont inférieures à la pression ambiante. L'écoulement ne pouvant s'effectuer au travers de l'aile, les deux écoulements intrados et extrados se rejoignent au bord de fuite. C'est ce qui se passe tout le long de l'envergure. Mais à l'extrémité, le fluide peut contourner l'aile de l'intrados vers l'extrados. L'écoulement s'enroule et forme le tourbillon marginal dans l'eau, la dépression au sud du tourbillon peut être assez importante pour que la cavitation apparaisse. De plus, on peut voir la trajectoire des pales d'hélice en observant la cavitation de tourbillon marginal [20].

II.4.4 Cavitation de tourbillon d'ogive

Le tourbillon d'ogive est le fruit de conjonction en rotation du tourbillon en emplanture de chaque pale. Le tourbillon d'emplanture est dû au fait que deux couches limites d'épaisseurs différentes, celle de la ligne d'arbre et celle de la pale, se côtoient avec un angle vif (90°). L'intersection des efforts de cisaillement cause l'enroulement de l'écoulement et la formation d'un tourbillon. Vient se combiner aux tourbillons des autres pales en extrémités de l'ogive qui peut alors caviter si la dépression est importante. Une des manières de limiter les risques d'apparition et de développement de ce type de cavitation est de relier les pales au moyen d'un congé de raccordement [20].

II.4.5 Cavitation du tourbillon de coque

Ce type de cavitation est moins souvent observé mais s'il se manifeste il s'avère très dérangeant. Le tourbillon de coque prend son origine au sommet de l'hélice et va interagir avec la couche limite développée sur la voute de la coque. Le mécanisme n'a pas été étudié en détail mais on sait que le tourbillon ne se développe que si la couche limite de la voute est relativement proche de l'hélice. La dépression au sommet de l'hélice peut aspirer la couche limite si elle est assez proche. Le sens du tourbillon est alors probablement aléatoire mais une fois enclenché il se stabilise [20].

II.4.6 Super cavitation

La super cavitation est l'utilisation des effets de cavitation pour créer une grande bulle de gaz à l'intérieur d'un liquide, permettant à un objet de voyager à grande vitesse dans ce liquide en étant complètement enveloppé par la bulle. La cavité (c'est-à-dire la bulle) réduit le frottement sur l'objet et fait de la super cavitation une technologie très attrayante et pour cause : le frottement dans l'eau est environ 1 000 fois plus grand que dans l'air. La super cavitation sont assez étudiées en magnétohydrodynamique (MHD) [21].

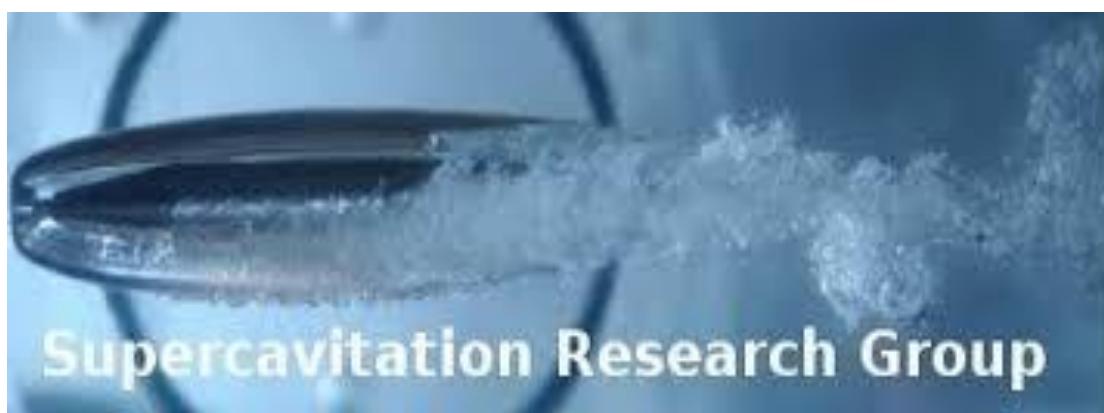


Figure II.4 La cavitation de tourbillon marginal

II.5 Effet de la cavitation [22]

II.5.1 Effets mécaniques

- **Érosion des matériaux :** L'implosion des bulles de cavitation libère une énergie intense sous forme de micro jets et d'ondes de choc pouvant atteindre plusieurs centaines d'atmosphères. Cela provoque :
- → *Des cratères, piqûres ou fissures* sur les surfaces métalliques (hélices, turbines, corps de pompe, etc.).
- → *Un vieillissement prématué* des composants.
- **Fatigue des matériaux :** Les cycles répétés de cavitation entraînent des microfissures puis des ruptures à long terme, surtout dans les pièces soumises à contrainte.

II.5.2 Effets hydrodynamiques

- **Chute de performance**
- La cavitation modifie l'écoulement du fluide et perturbe le fonctionnement optimal de la machine :

- Diminution du rendement hydraulique (pompes, turbines) ;
- Perte de portance (dans les profils d'aile ou les hélices) ;
- Instabilités de fonctionnement (pompes centrifuges notamment).

➤ **Désamorçage des pompes**

Si la cavitation est intense, elle peut interrompre le transfert de fluide et entraîner un désamorçage.

II.5.3 Effets acoustiques

➤ **Bruits et vibrations**

L'effondrement des bulles génère des bruits impulsifs caractéristiques (claquements, grésillements) souvent audibles dans les installations hydrauliques.

→ Ces bruits peuvent être un indicateur de dégradation mécanique.

➤ **Augmentation du niveau vibratoire**

Peut provoquer le desserrage de composants, voire des dommages structurels si le phénomène persiste.

II.5.4 Effets environnementaux ou fonctionnels

➤ **Pollution acoustique sous-marine**

Dans les hélices de navires, la cavitation est une source majeure de bruit sous-marin, affectant la faune marine et la furtivité (navires militaires).

➤ **Dégradation de la qualité du fluide**

En cas de cavitation de gaz (faux cavitation), la présence de bulles peut altérer les propriétés du fluide, perturber les mesures ou réactions chimiques.

II.6 Effet de la cavitation sur la roue de pompe centrifuge

II.6.1 Cavitation l'entrée de la roue (pompe centrifuge)

On observe des cavitations de la fuite marginale provenant de la bague d'étanchéité d'aspiration de la pompe. Cette cavitation peut être à l'origine de bruit, mais elle est rarement érosive, car ces cavités implosent dans la zone de basse pression à l'entrée de la pompe. Une autre manifestation de la cavitation s'observe en sur débit dans la zone de l'arrondi du flasque intérieur de la roue, juste avant l'entrée dans le canal inter-aube. Comme précédemment, cette cavitation ne présente pas généralement de conséquence fâcheuse pour la roue.

II.6.2 Cavitation dans les parties situées à l'amont de la roue

Dans les zones de fonctionnement à débit réduit (au-dessous de 0.7 des écoulements de recirculation provenant de la roue remontent à l'amont. Pour des valeurs de NPSH très basses, on peut parfois observer des collapses de ces cavités qui engendrent toujours bruits et vibration. Dans certains cas, des érosions par cavitation se produisent sur les composants amont de la pompe.

II.6.3 Cavitation dans les diffuseurs

Cette cavitation s'observe principalement lorsque la pompe fonctionne au-dessus du débit d'adaptation des canaux du diffuseur. La figure 10c montre le type de cavitation que l'on peut rencontrer dans cette configuration .comme les pompes à diffuseur sont utilisées dans les canaux des diffuseurs, alors alimentés par un fluide avec une forte sur incidence, sont élevées et collapse des poches de cavitation provoquent des érosions souvent très fortes et rapides. Ces cavitations sont encore aggravées dans les cas où le constructeur est amené à utiliser le diffuseur comme un organe de réglage de la courbe hauteur /débit, en (désadaptant) son point de calcul vers les faibles débits, pour respecter des formes particuliers de fonctionnement de la pompe rendent nécessaires [22].

II.7 Utilisation de la cavitation

La cavitation trouve des applications dans certains procédés industriels qui nécessitent la concentration d'énergie sur de petits domaines afin de produire localement des pics de pression élevés. La cavitation est ainsi utilisée pour plusieurs applications :

- ✓ limitation de débit de liquide ;
- ✓ Aide forage pétrolier ;
- ✓ Générateur de microbulles ;
- ✓ Catalyseur de réaction chimique ;
- ✓ Le nettoyage des surfaces par ultrasons ou par jets capillaires ;
- ✓ La production d'émulsion ;
- ✓ Le massage thérapeutique ;
- ✓ Le dégazage des liquides ;
- ✓ Création de jets d'encre.

Notons aussi que la super cavitation est utilisée en marine (hélices marines, pompes de fusée, petites turbines) [23].

II.8 Impact de cavitation sur la durée de vie des équipements de pompage industriel

La cavitation peut réduire la durée de vie d'une pompe industrielle de plus de 80 %, qui peut avoir une durée de vie de 10 à 15 ans. Toutefois, en présence de cavitation sévère et persistante, cette durée peut chuter à moins de 2 ans [24].

- **Exemple** : Une pompe destinée à fonctionner 12 ans dans une station de pompage de pétrole brut pourrait tomber en panne après seulement 2 ans si elle subit une cavitation chronique non corrigée.

II.9 Solutions innovantes contre la cavitation dans les pompes industrielles

II.9.1 Net Positive Suction Head (NPSH)

Le NPSH (charge totale nette à l'aspiration), est défini par la différence entre la pression disponible à l'entrée de la pompe et la pression de vapeur du liquide.

Est une mesure pouvant calculer la hauteur manométrique d'aspiration disponible dans le but d'éviter la vaporisation au plus bas niveau de la pompe. En un point précis d'un circuit hydraulique, la valeur NPSH mesure la différence entre la pression absolue totale du liquide et sa pression de vapeur.

Le NPSH est une donnée primordiale pour anticiper tout problème de cavitation qui peut endommager le corps de la pompe et réduire son rendement.

Permettant de s'assurer du bon fonctionnement de la pompe, le NPSH prévient et aide à déterminer les éventuels effets néfastes de la cavitation.

La masse volumique et la viscosité du liquide sont prises en compte avec la géométrie de la canalisation, selon la perte de charge le NPSH peut varier.

$$NPSH = H_a - \frac{P_V}{\rho \cdot g} = \frac{P_a}{\rho \cdot g} + \frac{V_a^2}{2 \cdot g} + Z_a - \frac{P_V}{\rho \cdot g} \quad (\text{II.1})$$

P_V : Pression de vapeur du liquide [Pa] ;

P_a : Pression d'aspiration de la pompe [Pa] ;

H_a : Hauteur d'aspiration [m] ;

V_a^2 : vitesse [m /s];

Z_a : Altitude [m] ;

g : accélérations due à la pesanteur [m/s²] ;

ρ : masse volumique [kg/m³].

II.9.2 Net Positive Suction Head requis ($NPSH_{requis}$)

Le $NPSH_{requis}$ désigne le NPSH minimal disponible que doit avoir la pompe industrielle sous peine de cavitation.

C'est la hauteur minimale de liquide (supposé à sa température d'ébullition), nécessaire au-dessus de l'aspiration pour empêcher la cavitation.

Cela dépend :

1. Du type de pompe ;
2. Du point de fonctionnement.

II.9.3 Net Positive Suction Head disponible ($NPSH_{disponible}$)

Est spécifiquement au site en question et est déterminée par le dimensionnement du système. Il est important de noter que la pression disponible à l'entrée de la pompe est ce que reste après soustraction de toutes les pertes décrites plus haut.

$$NPSH = \frac{P_a}{\rho.g} + \frac{V_a^2}{2.g} - \frac{P_V}{\rho.g} \quad (Z_a = 0 \text{ coté d'aspiration}) \quad (\text{II.2})$$

En pratique, pour qu'une pompe fonctionne sans cavitation, il faut vérifier que le $NPSH_{disponible}$ est supérieure du $NPSH_{requis}$.

Alors :

$NPSH_{disponible} > NPSH_{requis} \rightarrow$ Sans cavitation

$NPSH_{disponible} < NPSH_{requis} \rightarrow$ Avec cavitation

II.9.4 La relation entre le phénomène de cavitation et le NPSH

Le phénomène de cavitation est le terme utilisé pour définir le phénomène physique qui se crée dans une pompe quand le NPSH est insuffisamment disponible. La pression du liquide est alors réduite à une valeur égale ou inférieure à sa pression de vapeur, où les bulles et les poches de vapeur se forment.

Pour éviter les effets indésirables de la cavitation, il faut s'assurer que le NPSH disponible dans le système est plus élevé que celui de la pompe.

II.9.5 Optimisation la géométrie des aubes de l'impulseur

L'augmentation du profil d'incidence, la réduction de l'angle d'entrée des aubes, ainsi que l'utilisation de bords d'attaque arrondis permettent de minimiser les zones de basse pression responsables de la formation des bulles de cavitation. L'intégration de pales logarithmiques ou hydrodynamiques, ou encore le recours à des aubes à forme 3D optimisée par calculs CFD (Computational Fluid Dynamics), contribue aussi à une distribution de pression plus uniforme [25].

II.9.6 Utilisation de matériaux résistants à la cavitation

Des alliages tels que le duplex inoxydable, le bronze d'aluminium, ou encore des revêtements céramiques (comme le carbure de tungstène), offrent une excellente résistance à l'érosion par implosion des bulles. Ces matériaux augmentent significativement la durée de vie des composants critiques, même dans des conditions hydrauliques sévères. De plus, des solutions modernes intègrent des technologies de surface, comme le rechargeement laser, pour renforcer localement les zones exposées à la cavitation [26].

En combinant modification géométrique et choix de matériaux avancés, on obtient des pompes capables de résister à la cavitation tout en maintenant un haut rendement hydraulique.

II.10 Conclusion

Ce chapitre a expliqué le phénomène de la cavitation, ses mécanismes de formation et ses effets néfastes sur les pompes centrifuges. La cavitation peut provoquer des dommages tels que des vibrations, de l'usure et une perte de performance, rendant sa gestion essentielle pour assurer la longévité des équipements. Cette compréhension de la cavitation prépare le terrain pour aborder les méthodes de détection et de prévention dans les chapitres suivants.

CHAPITRE III

Etude expérimentale

III.1 Introduction

La cavitation provoque une altération des caractéristiques, des dégâts mécaniques, du bruit et des vibrations qui peuvent endommager détruire complètement la pompes, alors, il faut trouver des solutions pour éviter ce phénomène.

Dans ce chapitre, une étude expérimentale est réalisée pour évaluer le risque de cavitation dans une pompe centrifuge, dans une optique de maintenance préventive. Le travail repose sur deux approches complémentaires : un calcul théorique du NPSH disponible pour vérifier s'il est supérieur au NPSH requis, et le développement d'un programme basé sur un réseau de neurones artificiels. Ce programme utilise des données physiques mesurées (débit, pression, température, etc.) pour détecter automatiquement la présence ou non de cavitation, et ainsi anticiper les défaillances.

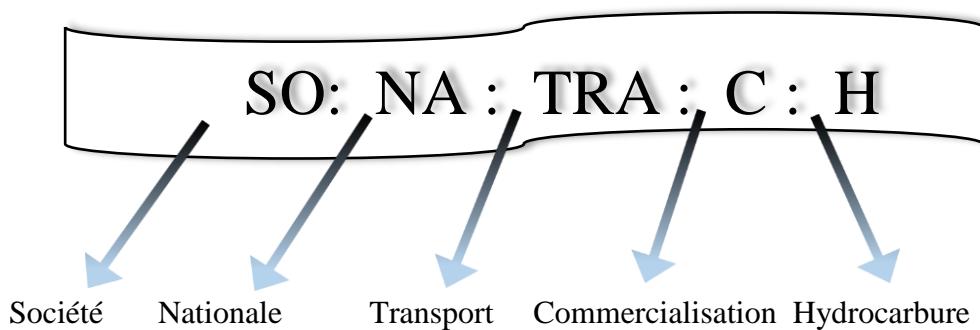


Figure III.1Pompe cavité



Figure III.2 Pompes de type booster

III.2 Présentation de l'entreprise [28]



SONATRACH, société nationale de recherche, d'exploitation, du transport et la commercialisation des hydrocarbures, elle a été créée le 31 décembre 1963.

La volonté de récupération et nationalisation de la production des hydrocarbures a été effectuée le 24 février 1971 par la signature d'une ordonnance définissant le cadre d'activité des sociétés étrangères en Algérie.

Dans le but d'assurer une meilleure efficacité organisationnelle et économique la SONATRACH fut divisée en 18 entreprises nationales, parmi lesquelles on cite : NAFTAL, ENIP, ENAC, NAFTEC...etc. Les activités de base de la SONATRACH ont été fixés en 1992, afin d'atteindre ses objectifs nationaux et consolider ces positions internationales.

Elle est principale intervenant dans le secteur des hydrocarbures en Algérie. Elle est classée 12eme compagnie pétrolière mondiale et 1 ère firme du continent africain. SONATRACH est également le 3eme exportateur mondial de gaz naturel et le second concernant les gaz de pétrole liquéfiés.

III.2.1 Structure organisationnelle de la SONATRACH [28]

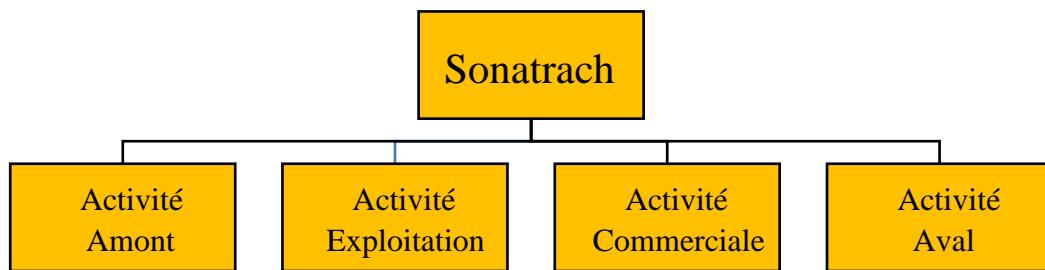


Figure III.3 Structure organisationnelle de l'entreprise SONATHRACH

Amont : L'activité Amont regroupe les activités d'exploration, de production, de Recherche et les métiers de services pétroliers.

- ❖ Activité exploitation : La branche TRC se charge de l'acheminement des hydrocarbures à partir des forages, situés au sud du pays vers les terminaux marins pour L'exportation, ou vers les usines de liquéfaction, à travers un réseau de pipes.
- ❖ Commercialisation : L'activité commercialisation supervise la distribution, l'exportation et le transport maritime.
- ❖ Aval : L'activité aval a pour missions essentielles d'exploiter les unités existantes de Liquéfaction de gaz naturel et de séparation de GPL, de mettre en œuvre les plans De développement de l'aval pétrolier et gazier.

III.2.2 Branche de Transport par Canalisation (TRC) [28]

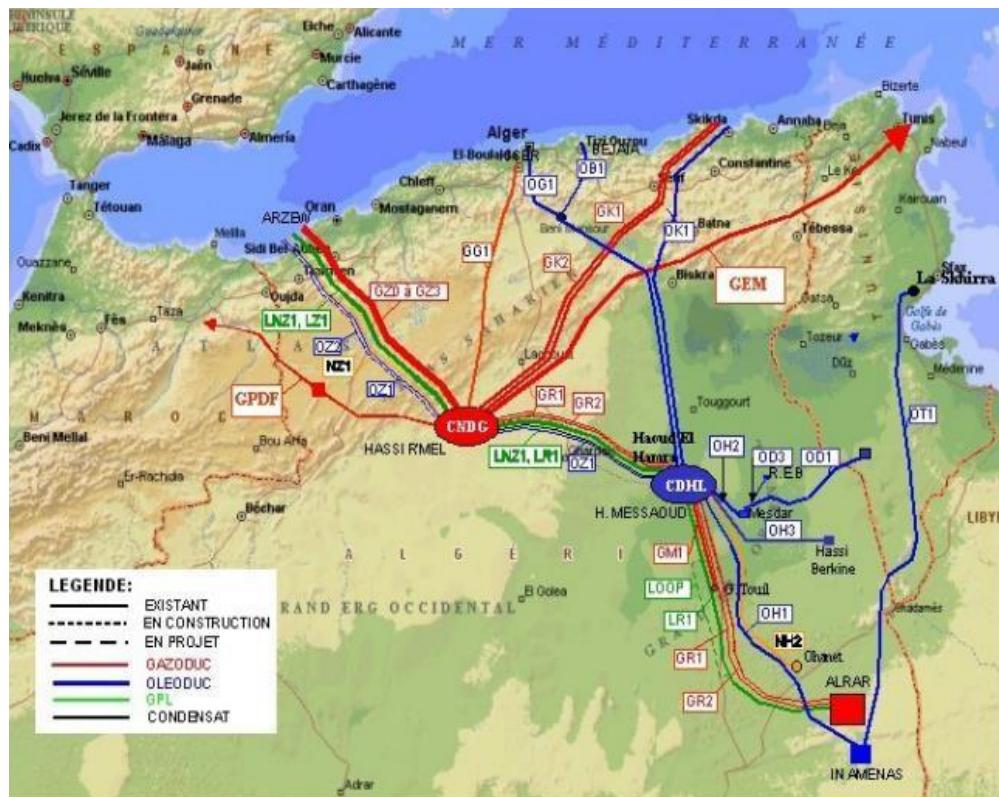


Figure III.4 Réseaux de pipes principales

La TRC se compose de :

- ❖ Cinq régions de transport :
 - RTO : Région de transport ouest (Arzew) ;
 - RTE : Région de transport est (Skikda) ;
 - RTC : Région de transport centre (Bejaia) ;
 - RTI : Région de transport In-Amenas ;
 - RTH : Région de transport Haoud-el-Hamra.
- ❖ Une direction maintenance ayant pour mission d'assurer la maintenance des équipements de toutes les régions.

III.2.3 Organigramme de DRGB [28]

La direction régionale de transport de Bejaia (RTC) est l'une des cinq directions régionales de transport des hydrocarbures de la SONATRACH (TRC).

Elle a pour mission :

- Le transport, le stockage et la livraison des hydrocarbures liquides et gazeux.

- La gérance et l'exploitation des différents ouvrages, les stations de pompage et terminaux ainsi que d'un port pétrolier, d'un gazoduc, et de deux oléoducs.



Figure III.5 Organigramme de DRGB

III.2.4 Les différentes stations de pompage [29]

L'oléoduc OB1-24 est constitué des plusieurs stations de pompage et des stations satellites. Ces stations sont :

- SPA : Station de pompage située à Haoud el Hamra (Hassi Messaoud) : Centre dispatching d'hydrocarbures liquide ;
- SP1 : Station de pompage (station satellite) située à Touggourt (Ouargla) ;
- SPB : Station de pompage (station satellite) située à Ou mâche (Biskra) ;
- SP2 : Station de pompage n°2 située à El Out aya (Biskra) ;
- SPC : Station de pompage (station satellite) située à Ain El Khadra (M'sila) ;
- SP3 : Station de pompage n°3 située à M'sila ;
- SBM : Station de pompage située à Béni Mansour ;

- Terminal arrivée et le port pétrolier (Bejaïa).

III.3 Présentation de l'installation expérimentale

III.3.1 Description de la pompe utilisée

Les essais sont portés avec une pompe centrifuge de type DVDS 14.14.18 / 1ét.

Comme nous l'avons mentionné dans le deuxième chapitre qu'y a plusieurs types de pompes centrifuges, parmi eux celle d'un étage que l'on trouve dans la station de pompage de Biskra (SP2).

Cette pompe est destinée à assurer le transfert du pétrole brut depuis la station de pompage SP2 de Biskra vers les installations de traitement ou les points de stockage (RTC Bejaïa), en maintenant un débit élevé et une pression adaptée aux exigences du transport en pipeline.

III.3.1.1 Les principales caractéristiques de la pompe

- Les principales caractéristiques de la pompe sont :
- Le débit nominal $Q_n = 2310 \text{ m}^3/\text{h}$;
 - Hauteur manométrique nominal $H_n = 236.3 \text{ m}$;
 - Le rendement $\eta = 87\%$;
 - $NPSH_{requie} = 15.8 \text{ m}$;
 - Puissance d'arbre $P_a = 1367 \text{ KW}$;
 - La densité du pétrole brut $\rho = 850 \text{ Kg/m}^3$;
 - La température $T = 20^\circ\text{C}$;
 - Viscosité cinématique $V = 2.687 \text{ m}^2/\text{s}$;
 - Puissance nominal $P_n = 1700 \text{ KW}$;
 - Tension nominal $V_n = 6600 \text{ V}$;
 - La longueur de pipeline (Biskra M'sila) $L = 110 \text{ km}$;
 - Diamètre d'entrée (aspiration) $D_e = 14 \text{ pouce} = 355 \text{ mm}$;
 - Diamètre de sortie (refoulement) $D_s = 14 \text{ pouce} = 355 \text{ mm}$.

III.3.1.2 Les autres caractéristiques

- Suppression $P_{suppression} = 21.63 \text{ bar}$;
- Pression d'entrée $P_e = 5.4 \text{ bar}$;

- Pression de sortie $P_s=31$ bar.

III.4 Etude de cavitation

III.4.1 Calcul de NPSH disponible

$$NPSH_{disponible} = \frac{P_a}{\rho \cdot g} + \frac{V_a^2}{2 \cdot g} - \frac{P_v}{\rho \cdot g} - \frac{P_f}{\rho \cdot g} + H_s \quad (\text{III.1})$$

$$P_f = f \frac{V_a^2}{2 \cdot g} \cdot \frac{L}{D} = 19345,32 \text{ Pa.}$$

$$H_s = 0.$$

$P_v = 5000 \text{ Pa}$, tellement le pétrole a $T=20^\circ\text{C}$ sa pression de vapeur égale à 5000 Pa .

$P_{abs} = P_{asp} + P_{atm} = 640400 \text{ Pa}$, (pression atmosphérique à Biskra égale à 100400 Pa)

Alors :

$$NPSH_{disponible} = 76,37 \text{ m} = 6,3 \text{ bar.}$$

A partir de ca on conclut que : $NPSH_{disponible} > NPSH_{requis}$, alors il n'y a pas de cavitation.

III.4.2 Application de l'intelligence artificielle à la prédition de la cavitation

III.4.2.1 Présentation de l'intelligence artificielle [30]

L'intelligence artificielle est un concept général, un terme générique qui englobe un large éventail de domaines et de techniques spécialisés.

L'IA ne constitue pas une technologie unique, mais plutôt un ensemble varié de technologies et de méthodologies visant à accroître les capacités d'analyse et de raisonnement des machines. L'intégration de l'IA dans les processus et les flux de travail des entreprises permet non seulement de renforcer leur efficacité, mais aussi de mieux comprendre le fonctionnement de cette technologie pour l'exploiter de manière optimale.

III.4.2.2 Surveillance révolutionnaire des pompes au moyen de l'IA [31]

Dans le domaine de la fabrication de pompes, ABEL s'est imposée comme un constructeur de premier plan.

Tel que les pompes ABEL HMT sont des pompe à piston et membrane Triplex à simple effet, à fonctionnement lent et conçue pour pouvoir tourner à sec sans s'endommager. Elles sont utilisable avec jusqu'à 25.0 MPa et des débits pouvant aller jusqu'à $240 \text{ m}^3/\text{h}$.

Forte de décennies d'expérience et d'une expertise considérable, ABEL a acquis un savoir-faire unique qui l'a placée à la pointe de l'industrie.

Aujourd'hui, un niveau inégalé de surveillance des pompes a été atteint, marquant une avancée historique.

En tant que pionnier de l'industrie des pompes, ABEL a mis au point une innovation majeure : l'utilisation de l'intelligence artificielle (IA) pour détecter de manière prédictive différents profils de défaillance sur les pompes.

III.4.2.3 Réseaux de neurones artificiels (ANN) [30]

Le réseau neuronal, ou réseau de neurones artificiels, est essentiel au fonctionnement de l'intelligence artificielle. Ce composant de l'apprentissage profond imite la fonctionnalité de traitement des données du cerveau humain. Il se compose de plusieurs couches de neurones artificiels, appelés nœuds, qui sont utilisés pour traiter tout type de données.

Dans le domaine industriel, comme celui de la cavitation dans les pompes centrifuges, les réseaux de neurones peuvent être utilisés pour anticiper les conditions de fonctionnement dangereuses, en se basant sur des paramètres comme le débit, le NPSH requis, la pression, ou la température. Cela permet de mettre en place des stratégies de maintenance intelligente et de réduire considérablement les risques de panne.

III.4.2.4 Type de réseau utilisé : MLP (Perceptron multicouche)

Pour répondre à notre besoin spécifique, nous avons opté pour un réseau de type MLP (Multi layer Perceptron), architecture simple et efficace pour des tâches de régression supervisée.

III.4.2.5 Description des données d'entrée et sorties utilisées dans le programme

❖ Entrées du réseau (inputs)

Ce sont les paramètres mesurés en temps réel sur la pompe. Leur objectif est de fournir des informations pertinentes pour détecter si les conditions favorisent l'apparition de la cavitation.

Tableau n⁰ III.1 Paramètres d'entrée du réseau de neurones pour la détection de la cavitation

Entrée	symbole	objectif
Débit volumique	Q	Indique la quantité de fluide traversant la pompe ; un débit trop élevé ou trop faible peut favoriser la cavitation.
Hauteur statique	H_s	Assurer une pression suffisante à l'entrée de la pompe.
NPSH disponible	$NPSH_{dispo}$	Vérifie si la pression à l'aspiration est suffisante pour éviter la cavitation.
NPSH requis	$NPSH_{requis}$	Minimum requis pour éviter la cavitation selon le fabricant.
Pression à l'aspiration	P_{inlet}	Une pression trop basse favorise l'évaporation du fluide (origine de la cavitation).
Température du fluide	T	Influence la pression de vapeur : plus elle est élevée, plus la cavitation est probable.
Densité du fluide	ρ	Utilisée pour estimer les forces hydrauliques et l'énergie nécessaire.
Pertes de charges	P_f	Les réduire pour éviter la baisse de pression.

❖ **Sorties du réseau (outputs):**

Tableau n⁰ III.2 Paramètres de sortie du réseau de neurones pour la détection de la cavitation

Sortie	Valeur	Objectif
Etat de cavitation	0 ou 1 (binaire)	Indiquer si la pompe est en situation de cavitation (1) ou non (0). Permet une alerte rapide.

III.4.2.6 L'architecture du programme

a) Etapes fonctionnels du programme

➤ **Initialisation**

- Nettoyage de l'espace MATLAB (clc, clear) ;
- Définition des constantes physiques (rho, g, PV, etc.).

➤ **Saisie manuelle des données utilisateur (TEST MANUEL)**

- C'est ici que l'utilisateur entre :
 - ✓ Débit (Q) ;
 - ✓ Vitesse (V) ;
 - ✓ Pertes de charge (P_f) ;
 - ✓ Hauteur statique (H_s) ;
 - ✓ Pression entrée + pression atmosphérique ;
 - ✓ Température ou autres si nécessaire.
- Ces données sont les entrées du test manuel

➤ **Prétraitement**

- Conversion des pressions ;
- Calcul de la pression absorbée (Pa).

➤ **Calcul du NPSH disponible**

➤ **Données d'entraînement (jeu de référence)**

Inputs_train = [2100 2370 2600 2400; 76.3 77.0 62.5 13.2]; % Débit et NPSH dispo
Outputs_train = [0 0 1 1]; % 1 = cavitation, 0 = pas de cavitation

➤ **Création et entraînement du réseau MLP**

```
Net = patternnet(10);  
Net = train(net, inputs_train, outputs_train);
```

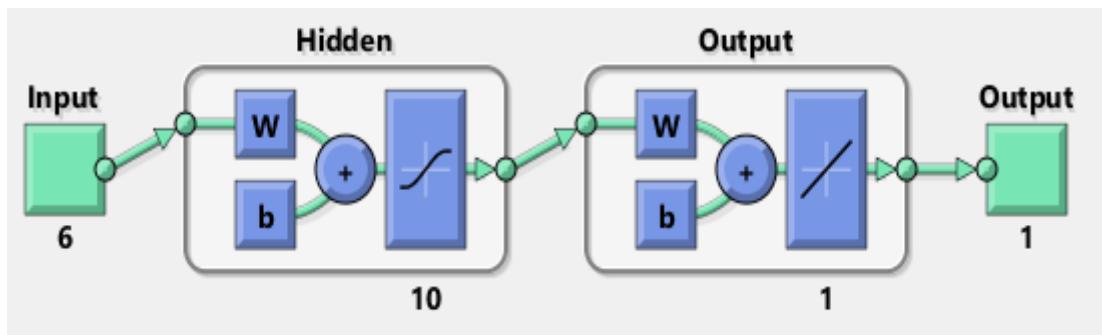


Figure III.6 Architecture d'un réseau de neurones avec une couche cachée (6-10-1)

- Type : patternnet de MATLAB = MLP ;
- 6 neurones en entrée ;
- Neurones dans la couche cachée : 10 (modifiable) ;
- 1 neurone en sortie ;
- Fonction d'activation : sigmoïde (logsig) :

La fonction sigmoïde, ou logsig dans MATLAB, est une fonction mathématique qui transforme une valeur en un nombre compris entre 0 et 1. Elle est utilisée dans la couche cachée, car elle permet d'introduire la non-linéarité, ce qui rend le réseau capable d'apprendre des relations complexes entre les entrées et la sortie.

- Fonction de sortie : softmax (sortie binaire arrondie à 0 ou 1) :

La fonction softmax transforme les valeurs en sortie du réseau en probabilités, dont la somme est égale à 1. MATLAB arrondit ensuite cette probabilité à 0 ou 1 pour la décision finale.

- Fonction de perte : erreur de classification (cross-entropy) :

C'est une fonction qui mesure la différence entre la sortie du réseau (prédiction) et la valeur réelle (cavitation ou pas). C'est la fonction la plus adaptée pour les problèmes de classification binaire.

- Algorithme d'entraînement : trainlm (Levenberg-Marquardt) :

C'est un algorithme d'optimisation rapide et puissant pour entraîner les réseaux de neurones de petite ou moyenne taille.

➤ Test manuel = prédiction avec les valeurs saisies

- Les données qu'on a saisies sont injectées dans le réseau ;

- Le résultat (0 ou 1) indique s'il y a cavitation.

➤ **Affichage du résultat (message clair)**

```
Input_test = [Q; NPSH_disponible];
```

```
Y = net (input_test);
```

```
Resultat = round(y);
```

```
Fprintf ('Résultat du réseau (binaire) : %d\n', resultat);
```

```
If resultat == 1
```

```
    Fprintf ('?? Cavitation détectée !\n');
```

```
Else
```

```
    Fprintf ('? Pas de cavitation.\n');
```

Affichage en binaire (1 = cavitation, 0 = pas de cavitation)

b) Organigramme du programme

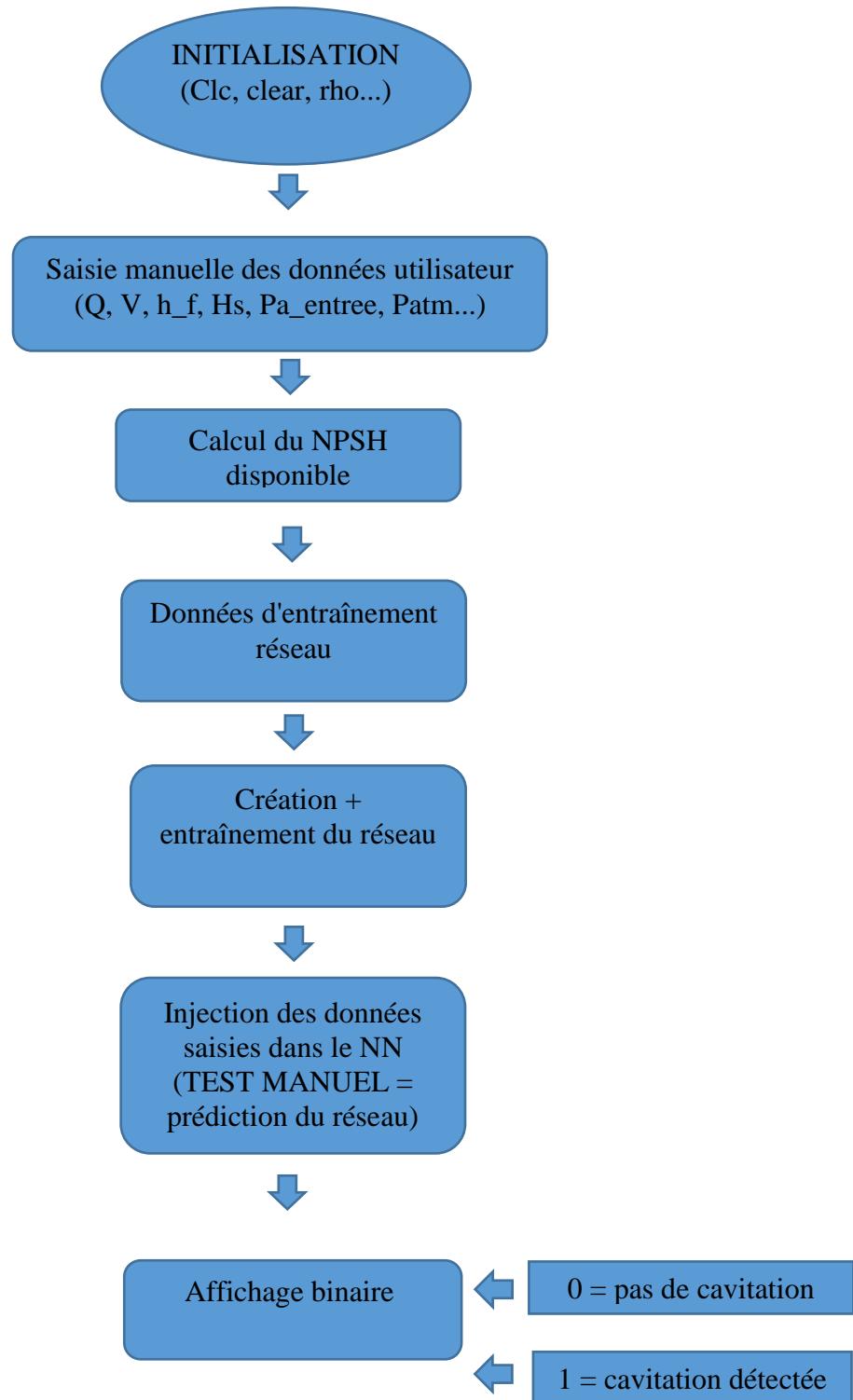


Figure III.7 Organigramme des programmes de détection de cavitation basée sur l'intelligence artificiel

III.4.2.7 Performances du réseau

a) Histogramme des erreurs de prédition

Ce graphique permet de visualiser la répartition des erreurs entre les sorties prédites par le réseau et les valeurs cibles. Il offre un aperçu clair sur la capacité du modèle à produire des résultats proches de la réalité.

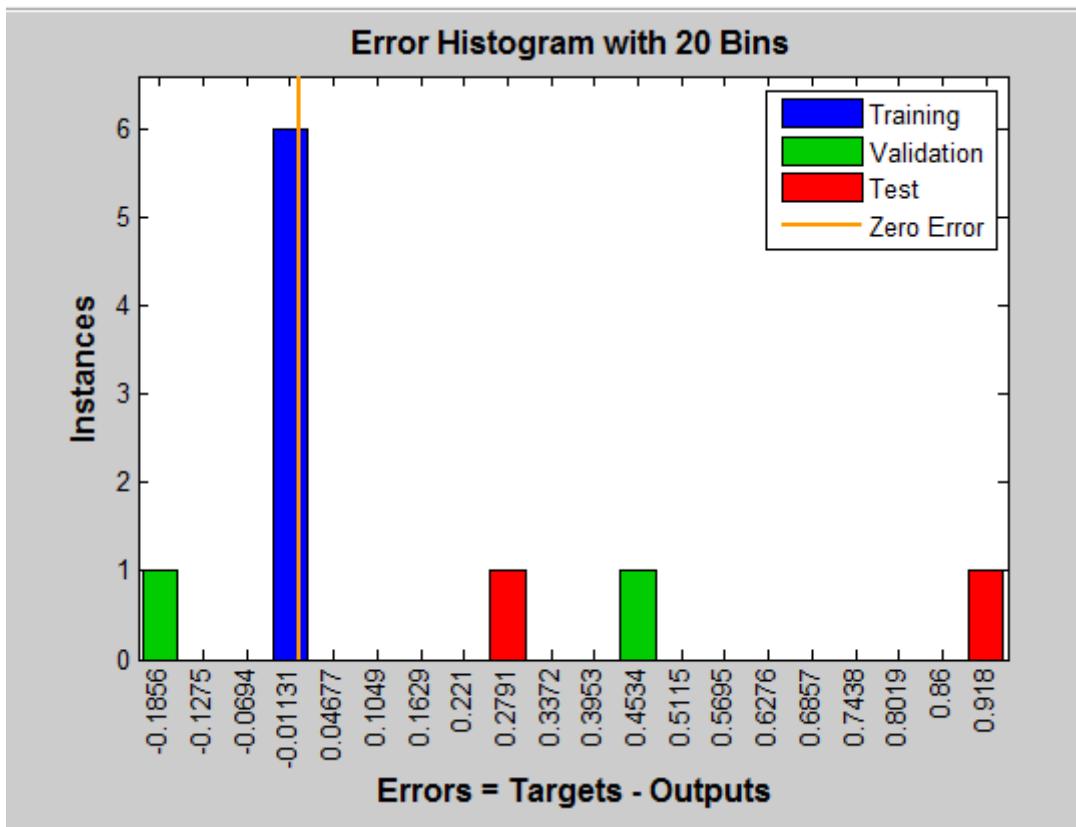


Figure III.8 Analyse de l'erreur de prédition du réseau de neurone pour la détection de la cavitation

• Interprétation

L'histogramme des erreurs visualise la différence entre les valeurs cibles et les sorties du réseau de neurones. La majorité des erreurs se concentrent autour de zéro, ce qui montre que le réseau est globalement bien entraîné. Cependant, la présence d'erreurs légèrement négatives et positives indique quelques cas de mauvaise prédition, notamment dans les situations limites. Cette représentation permet de confirmer la stabilité générale du modèle, tout en soulignant la nécessité d'enrichir le jeu de données pour améliorer la précision et la généralisation.

b) Analyse de l'évolution de l'erreur du réseau Neurone

Ce graphique illustre la variation de l'erreur quadratique moyenne (MSE) sur les ensembles d'entraînement, de validation et de test au fil des époques. On observe que le modèle atteint sa meilleure performance de validation dès la première époque, ce qui révèle un apprentissage trop rapide et un sur apprentissage presque immédiat.

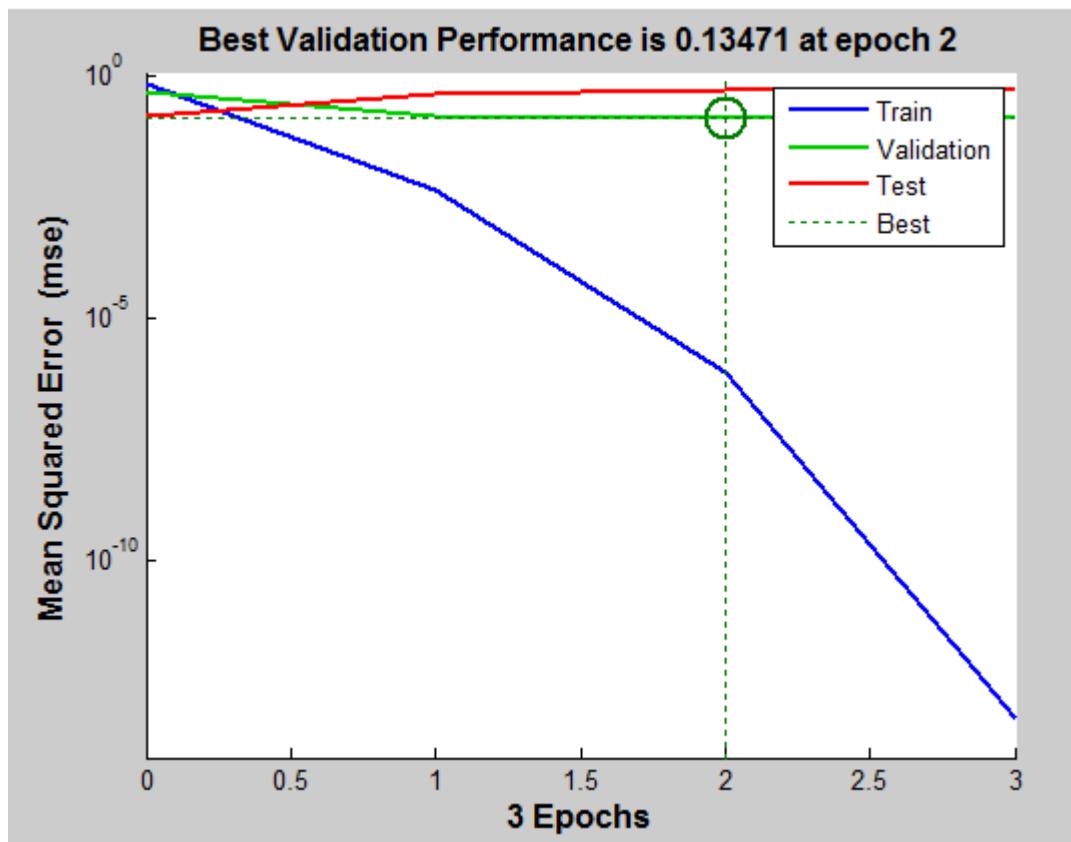


Figure III.9 Courbe MCE -réseau de neurone

- **Interprétation**

Le réseau Neurone parvient à réduire fortement l'erreur sur les données d'entraînement, mais cette performance ne se généralise pas aux ensembles de validation et de test. Cela indique un manque de capacité de généralisation du modèle, probablement dû à une architecture trop complexe ou à un manque de régularisation.

III.4.2.8 Exemples de fonctionnement du programme

- **Exemple 01 : (cavitation détecté)**

Ces données (Q , H , P_e , P_a , h_r et v) seront saisis manuellement comme données d'entrée.

Résultat du programme :

```

New to MATLAB? Watch this Video, see Demos, or read Getting Started.
Débit (en m3/h) : 2600
Vitesse du fluide (en m/s) : 2.8
Pertes de charge (en m) : 1.5
Hauteur statique (en m) : 0
Pression d'entrée (en bar) : 0.3
Pression atmosphérique (en bar) : 1

NPSH disponible = 13.89 m
?? Cavitation probable (calcul théorique)

Résultat IA (binaire) : 1
? L'IA a correctement détecté l'état de cavitation
? Cavitation détectée par le réseau IA !
>> |

```

- **Analyse**

Le réseau MLP a pris (Q , H , P_e , P_a , h_r et v)

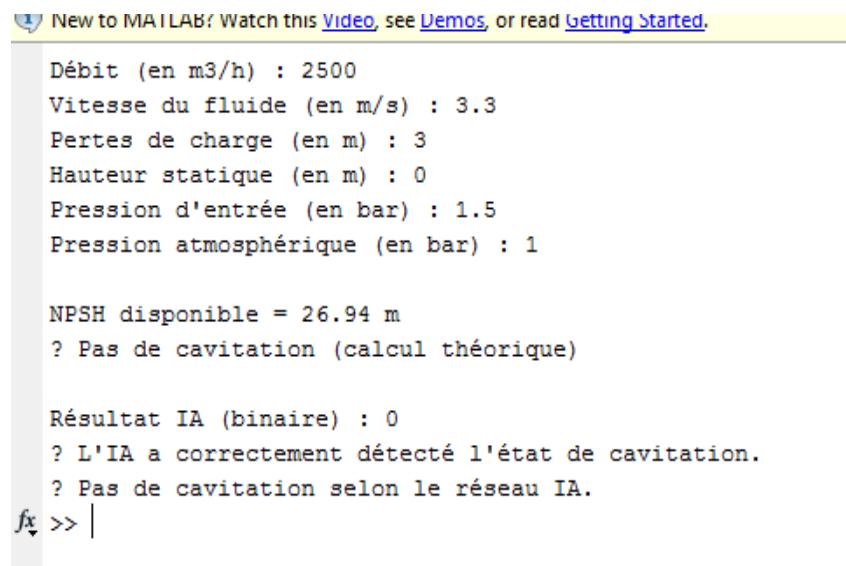
Comme entrées alors :

Il a prédit la sortie = 1, donc : cavitation détectée (1 = cavitation détectée).

- **Exemple 02 : (pas de cavitation)**

Ces données (Q , H , P_e , P_a , h_r et v) seront saisis manuellement comme données d'entrée

Résultat du programme



```
New to MATLAB? Watch this video, see Demos, or read Getting Started.
```

```
Débit (en m3/h) : 2500
Vitesse du fluide (en m/s) : 3.3
Pertes de charge (en m) : 3
Hauteur statique (en m) : 0
Pression d'entrée (en bar) : 1.5
Pression atmosphérique (en bar) : 1

NPSH disponible = 26.94 m
? Pas de cavitation (calcul théorique)

Résultat IA (binaire) : 0
? L'IA a correctement détecté l'état de cavitation.
? Pas de cavitation selon le réseau IA.
fx >> |
```

- Analyse

Le réseau MLP a pris (Q , H , P_e , P_a , h_r et v) comme entrées alors : Il a prédit la sortie = 0, donc : Aucune cavitation détectée (0 = Pas de cavitation).

III.4.3 Maintenance préventive

La maintenance préventive est l'acte qui consiste à effectuer des activités de maintenance planifiées pour aider à prévenir les défaillances. En d'autres termes, il s'agit de réparer les choses avant qu'elles ne tombent en panne.

La maintenance préventive est essentielle pour toute machine industrielle, mais elle revêt une importance capitale lorsqu'il s'agit des pompes à membrane. Pourquoi ? Parce que ces pompes, souvent soumises à des conditions de travail difficiles, doivent être entretenues régulièrement pour garantir une performance optimale et prolonger leur durée de vie. Sans un programme de maintenance adapté, les utilisateurs s'exposent à des pannes soudaines, des coûts de réparation élevés et une perte d'efficacité [5].

L'objectif principal de la maintenance préventive est d'anticiper les problèmes avant qu'ils ne deviennent critiques. Cela implique une approche proactive pour contrôler l'état des composants, identifier les signes d'usure, et effectuer des interventions au bon moment. Ne pas attendre la panne, c'est préserver la productivité tout en limitant les coûts d'exploitation [27]. À travers les actions qui peut :

- Garanti un NPSH disponible toujours supérieur au NPSH requis ;
- Réduit les pertes de charge sur la ligne d'aspiration ;

- Maintenu la géométrie des aubes intacte ;
- Détecte les fuites ou micro-fuites dans les tuyauteries ;
- Préserves les caractéristiques physiques du fluide (viscosité, température).

III.4.3.1 Causes de cavitation

➤ Pression d'aspiration trop faible

Lorsque la pression absolue à l'entrée de la pompe est inférieure à la pression de vapeur du fluide, cela provoque l'apparition de bulles de vapeur c'est la cavitation.

➤ Température trop élevée du fluide

Une augmentation de la température réduit la pression de vapeur du liquide, facilitant ainsi l'évaporation partielle et donc la cavitation.

Sur 110km le frottement de fluide contre les parois du tuyau généré de la chaleur surtout à débit élevé. Ce phénomène est connu sous le nom de chauffage par dissipation visqueuse.

- **Exemple réel (valeur observé) :** dans les pipelines comme ce de l'Algérie, d'Iran et de Texas la température peut passer **20°C** au départ à **60°C**, **70°C** de pipelines.

➤ Vitesse d'écoulement excessive à l'aspiration

Une vitesse trop élevée dans la tuyauterie d'aspiration provoque une chute de pression statique, augmentant le risque de cavitation.

➤ Perte de charge excessive dans la ligne d'aspiration

Due à :

- Longueurs importantes de canalisation ;
- Coudes, vannes, filtres, rétrécissements ;
- Rugosité excessive des parois.

➤ Altitude élevée du site d'installation

À haute altitude, la pression atmosphérique est plus faible, ce qui réduit la pression absolue disponible à l'entrée de la pompe.

III.4.3.2 Analyse des causes de la chute de pression absorbée et solutions correctives

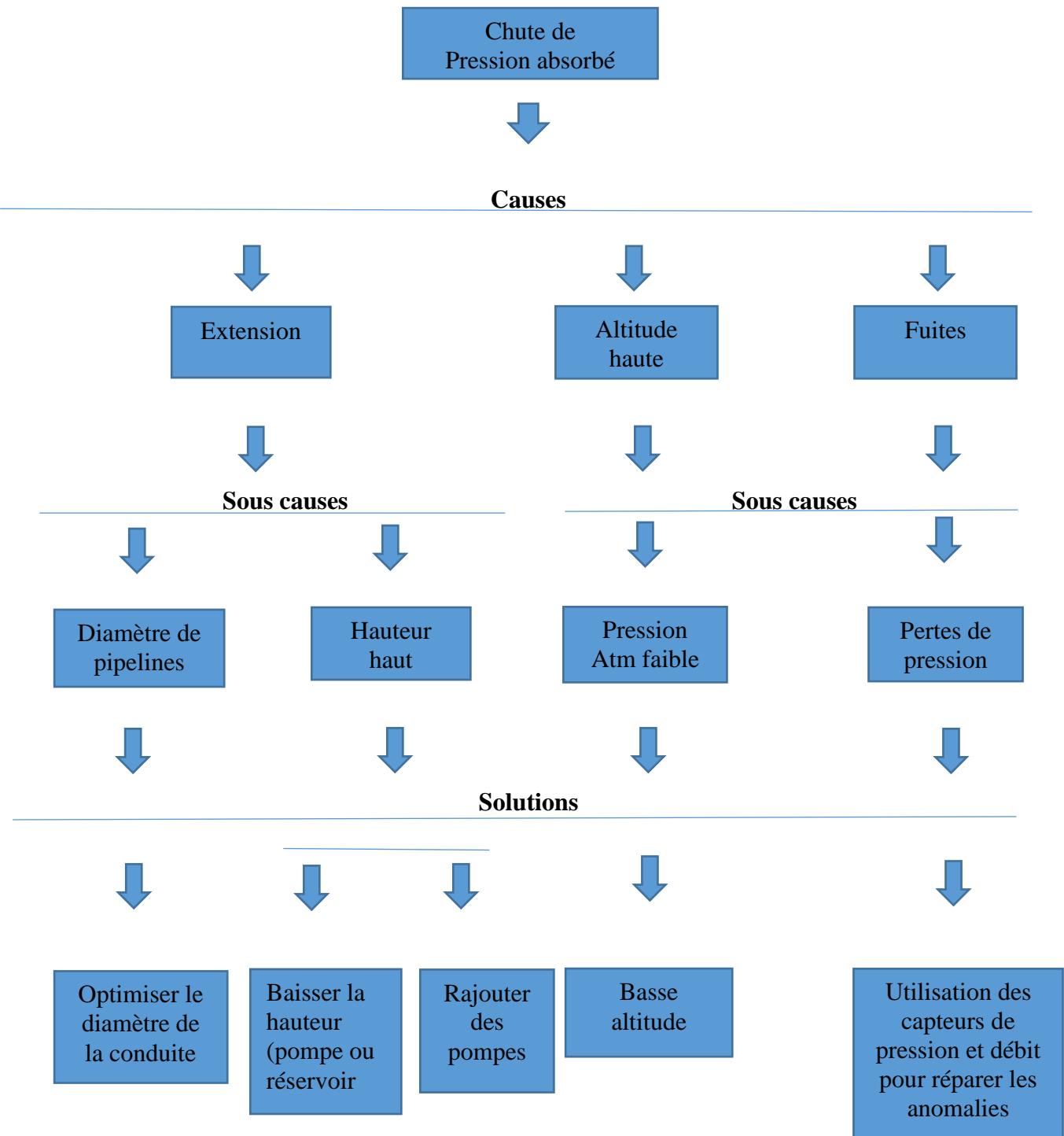


Figure III.10 Organigramme des causes possible de la chute de pression absorbée et des solutions technique associé

- **Interprétation générale de l'organigramme**

Ce schéma illustre les principales causes possibles d'une chute de la pression absorbée (Pa) dans une pompe centrifuge, ainsi que les solutions techniques associées à chaque cause. Une baisse de la pression absorbée est critique, car elle peut entraîner une cavitation, nuire à la performance de la pompe, ou provoquer des pannes.

➤ **Extension du réseau (pipeline trop long)**

- **Cause :** L'allongement de la canalisation augmente les pertes de charge.
- **Sous-cause**
 - Diamètre insuffisant des pipelines → résistance accrue ;
 - Hauteur géométrique trop élevée entre le réservoir et la pompe.
- **Solutions**
 - Optimiser le diamètre de la conduite pour réduire les pertes ;
 - Réduire la hauteur géométrique (soit abaisser le réservoir, soit rehausser la pompe) ;
 - Ajouter des pompes intermédiaires pour compenser la chute de pression.

➤ **Altitude élevée du site**

- **Cause :** Plus on monte en altitude, plus la pression atmosphérique diminue ;
- **Effet :** La pression absolue d'aspiration devient plus faible → risque de cavitation plus élevé ;
- **Solution proposée :** Installer le système à basse altitude si possible (ou compenser avec pressurisation).

➤ **Présence de fuites dans le circuit**

- **Cause :** Des fuites sur la ligne d'aspiration entraînent des pertes de charge imprévues ;
- **Conséquences :** Baisse de la pression disponible à l'entrée de la pompe ;

- **Solution :** Utiliser des capteurs de pression et de débit pour détecter et localiser les anomalies à temps, et intervenir en maintenance.

III.4.3.3 Tracement des graphes

a) Tableau Résolution de la pompe de type DVDS 14.14.18 / 1ét

Tableau n° III.3 Variation de la hauteur manométrique et de rendement du moteur en fonction du débit volumique

Débit ppe [m^3 /h]	2714.000	2339.000	2188.000	1498.000	816.000	52.000
H.M.T [mce]	217.400	240.100	252.600	291.700	309.200	328.300
Rendement moteur [%]	97.023	97.129	97.163	97.179	96.954	96.774

Tableau n° III.4 Variation de la puissance d'arbre en fonction du débit volumique

Débit ppe [m^3 /h]	2683.976	2312.349	2162.345	1478.949	804.545	51.235
P/arbre [KW]	1892.692	1734.282	1679.669	1361.837	1040.694	913.999

Tableau n° III.5 Variation du NPSH disponible en fonction du débit volumique

Débit ppe [m^3 /h]	2714	2339	2188	1498
$NPSH_d$ [m]	75.38	76.24	76.55	77.69

b) Graphes

b).1 Graphes (HMT- Q_V , η - Q_V)

Les deux courbes suivantes représentent l'évolution :

- ✓ De la hauteur manométrique totale de la pompe en fonction de débit. Elle caractérise le comportement hydraulique de la pompe ;
- ✓ De rendement [η] de la pompe en fonction de débit [Q_V]. Elle permet d'identifier la zone de fonctionnement optimal de la pompe, généralement autour du point de rendement maximal, qui correspond au débit nominal. Cette courbe est essentielle pour évaluer l'efficacité énergétique de la pompe selon les différentes conditions de service.

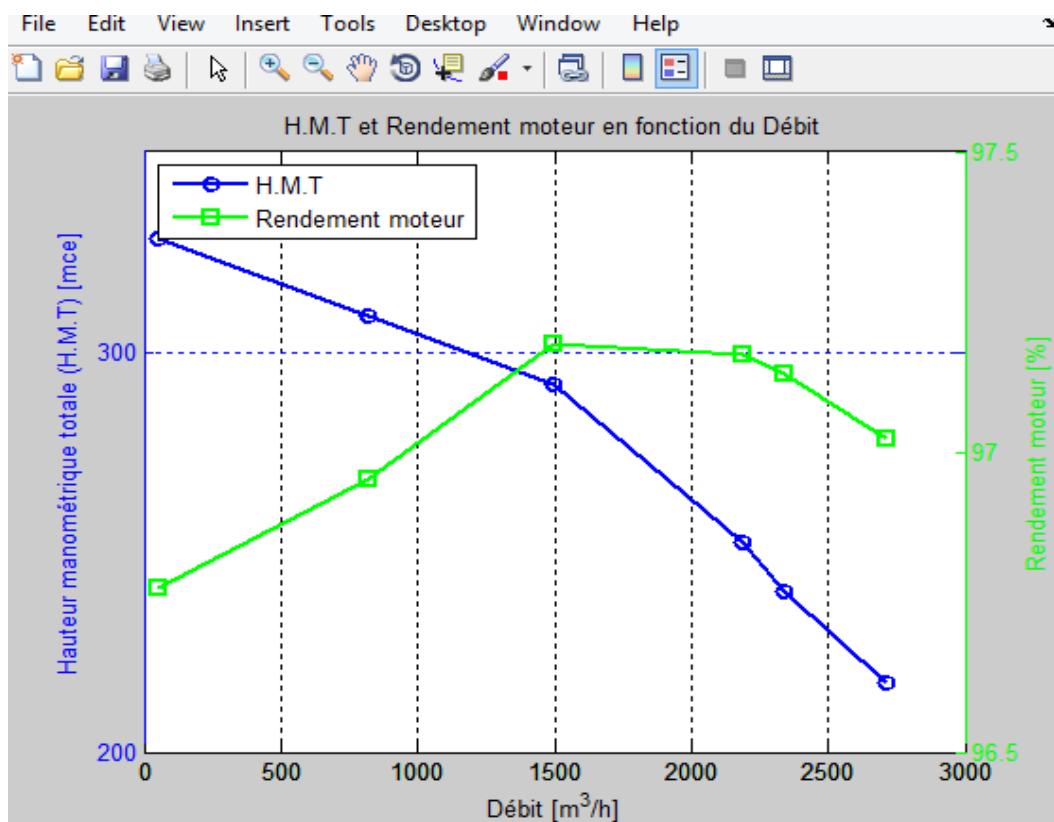


Figure III.11 Courbes caractéristique (HMT- Q_V , η - Q_V) de la pompe centrifuge type DVDS

14.14.18 / 1ét

b).2 Graphes (p_{arbre} - Q_V)

La courbe suivante représente l'évolution de la puissance absorbée à l'arbre de la pompe [p_{arbre}] en fonction du débit [Q_V]. Cette courbe permet d'analyser la quantité d'énergie mécanique nécessaire pour faire fonctionner la pompe à différentes débit

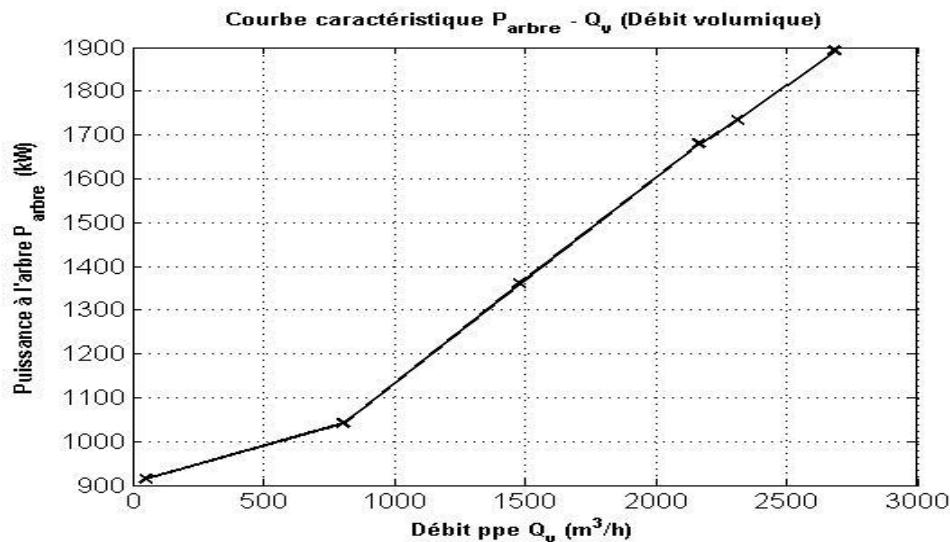


Figure III.12 Courbes caractéristique(p_{arbre} - Q_V) de la pompe centrifuge type DVDS 14.14.18 / 1ét

b).3 Graphe ($NPSH_{disponible}$ - Q_V)

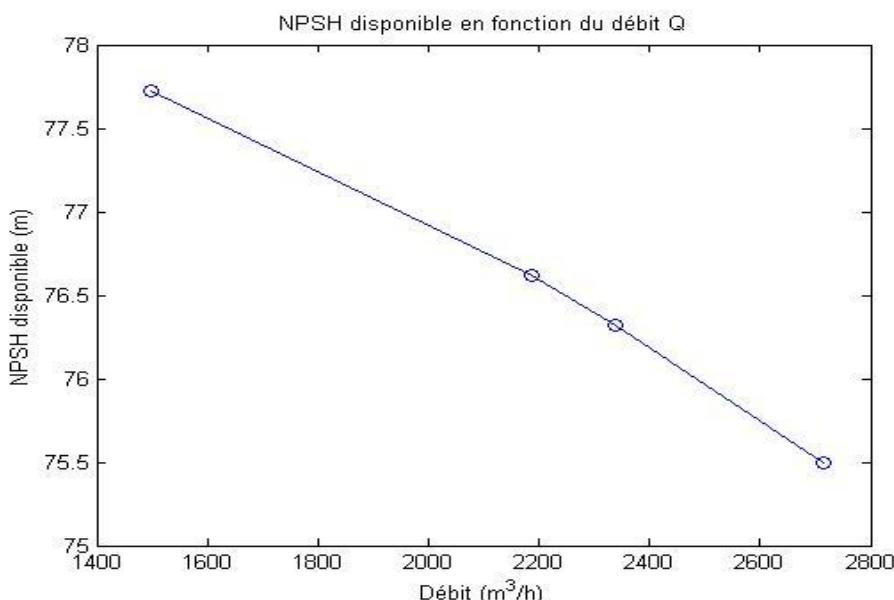


Figure III.13 Courbes caractéristique($NPSH_{disponible}$ - Q_V) de la pompe centrifuge type DVDS 14.14.18 / 1ét

b).4 Graphes NPSH requis et disponible en fonction de débit

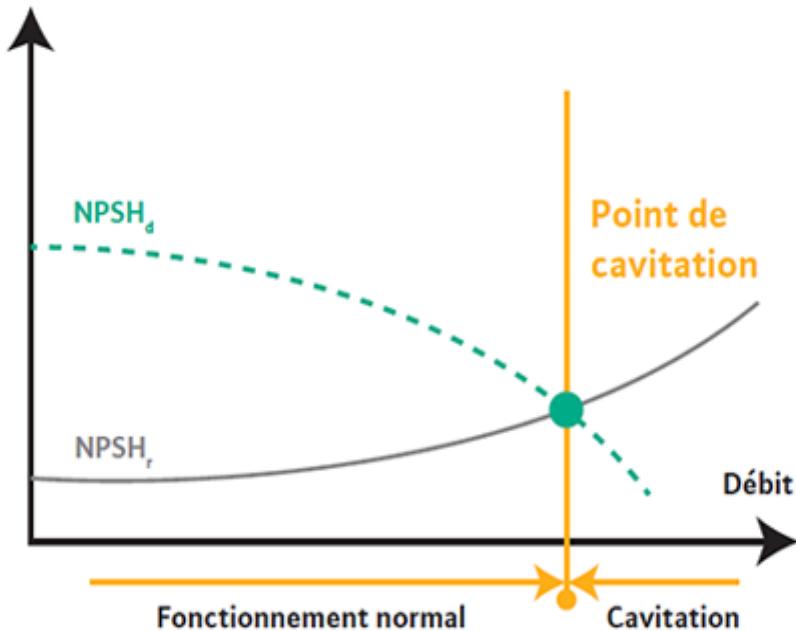


Figure III.14 Courbe caractéristique NPSH en fonction de débit

c) Interprétations des graphes

c).1 Graphes (HMT-Q_V , η -Q_V)

➤ Pour HMT

On observe une diminution progressive de HMT lorsque le débit augmente, ce qui s'explique par l'augmentation des pertes de charge dans la pompe.

- A faible débit : la hauteur manométrique est maximale. Cela s'explique par le fait que l'énergie transmise par la pompe n'est pas perdue dans la circulation de fluide.
- A débit nominal : La pompe atteint son point de fonctionnement optimal, avec un bon équilibre entre le débit, la hauteur et le rendement.
- A débit élevé : La hauteur diminue de manière plus marquée. Cela peut entraîner une baisse d'efficacité, des risques de cavitation, et une sollicitation excessive des composants hydrauliques.

➤ Pour η

On observe que Le rendement augmente avec le débit jusqu'à un certain point, puis diminue lorsque le débit continue d'augmenter.

-A faible débit : Le rendement est bas. Cela s'explique par des pertes internes importantes (recirculation, turbulence, etc.) et une mauvaise utilisation de l'énergie fournie.

-A débit nominal : Le rendement atteint son maximum. C'est à ce point que la pompe fonctionne dans ses meilleures conditions d'efficacité. Ce point correspond souvent au point de fonctionnement recommandé.

-A débit élevé : Le rendement diminue à nouveau. L'augmentation du débit entraîne des pertes par frottement et des déséquilibres hydrauliques (chocs, cavitation potentielle), ce qui réduit l'efficacité énergétique.

c).2 Graphe (p_{arbre} - Q_V)

On observe que la puissance absorbée par l'arbre augmente de manière progressive avec le débit. Cela s'explique par le fait que, pour pomper un plus grand volume de fluide, la pompe doit fournir davantage de travail, donc consommer plus d'énergie.

c).3 Graphe ($NPSH_{disponible}$ - Q_V)

La courbe de NPSH disponible montre généralement une diminution progressive lorsque le débit augmente. Cette baisse est liée aux pertes de charges croissantes dans la conduite d'aspiration.

c).4 Graphes NPSH requis et disponible en fonction de débit

On remarque dans la figure (III.6) que les deux courbes se croisent dans un point critique cela signifie que le NPSH requis devient égale à celui de disponible, la pompe est à la limite de cavitation (après le point d'intersection la pompe sera cavité).

III.5 Conclusion

L'étude a permis de confirmer l'absence de cavitation dans les conditions actuelles, grâce au calcul rigoureux du NPSH disponible. Le réseau de neurones développé a validé ce diagnostic, démontrant ainsi sa capacité à détecter de manière fiable les situations à risque. Ce système intelligent s'impose comme un outil performant de maintenance préventive, offrant une surveillance continue du fonctionnement des pompes et contribuant à réduire significativement les arrêts imprévus au sein des installations.

Conclusion générale

Conclusion générale

Ce mémoire a permis d'aborder de manière progressive et complémentaire l'étude des pompes centrifuges, du phénomène de cavitation, ainsi que l'intégration de méthodes intelligentes pour sa détection. À travers les trois chapitres développés, nous avons pu poser les bases théoriques du fonctionnement des pompes, identifier les mécanismes à l'origine de la cavitation, et surtout, analyser son impact direct sur les performances et la durabilité des équipements industriels.

L'étude expérimentale réalisée sur le terrain, notamment au sein de la station de pompage n°2 (SP2) de Biskra, a permis de confronter les données théoriques aux réalités opérationnelles. Elle a mis en évidence l'importance du suivi rigoureux des paramètres de fonctionnement, tels que le NPSH disponible, la pression d'aspiration, la température ou encore la vitesse d'écoulement. En parallèle, la mise en place d'un système de détection automatisée basé sur un réseau de neurones MLP (Perceptron multicouche) a démontré la pertinence de l'intelligence artificielle dans la maintenance prédictive des installations hydrauliques.

En conclusion, ce travail confirme que la lutte contre la cavitation ne repose pas uniquement sur la conception hydraulique, mais aussi sur la surveillance continue, la maintenance préventive et l'exploitation des outils numériques modernes. Des perspectives d'amélioration peuvent être envisagées, notamment en enrichissant la base de données du réseau de neurones, en intégrant des capteurs temps réel, et en développant des systèmes d'aide à la décision plus robustes pour une exploitation fiable, durable et sécurisée.