الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

UNIVERSITÉ BADJI MOKHTAR - ANNABA
BADJI MOKHTAR – ANNABA UNIVERSITY

جامعة باجي مختار – عنابـــة

Faculté : .....TECHNOLOGIE.....

Département : .....GENIE DES PROCEDES.....

Domaine : SCIENCES ET TECHNOLOGIES

Filière : INDUSTRIES PETROCHIMIQUES

Spécialité : Génie Pétrochimique

Mémoire

Présenté en vue de l'obtention du Diplôme de Master

Thème:

Etude et amélioration du mécanisme de transport de l'ammoniac unité NH_3 (ASMIDAL)

Présenté par : *Rahem Alia & Ziani Norhane*

Encadrant : *Benecedira Selma* *MCB* *UBMA*

Jury de Soutenance :

Bechar Soumia	MCB	UBMA	Président
Ghodbane Ilham	MCA	UBMA	Examinateur

Année Universitaire : 2023/2024

Dédicace

Avec tous mes sentiments de respect, avec l'expérience de ma reconnaissance, je dédie ma remise de diplôme et ma joie.

À mon paradis, à la prunelle de mes yeux, à la source de ma joie et mon bonheur, ma lune et le fil d'espoir qui allumer mon chemin, ma moitié, maman.

À celui qui m'a fait une femme, ma source de vie, d'amour et d'affection, à mon support qui était toujours à mes côtés pour me soutenir et m'encourager, à mon prince papa.

À vous mes parents ; je dis merci d'avoir fait de moi celui que je suis aujourd'hui. Aucune dédicace ne pourra exprimer mes respects ; me considérations et ma grande admiration pour vous. Puisse ce travail vous témoigne mon affection et mon profond amour.

À mes belles sœurs :Ahed, Douaa, Moka, en signe d'amour, de reconnaissance et de gratitude pour le dévouement et les sacrifices dont vous avez fait toujours preuve à mon égard.

Ma famille : Noura, Habiba, Ghzala, Ali, Djamel, Khmissi, Aziz, Djamila, Aquila, Mohamed, Wanassa.

Dédicace

En guise d'expression de ma gratitude, je dédie cet humble travail à ceux à qui, quelle que soit la terminologie qu'ils emploient, je ne pourrai jamais exprimer mon amour sincère.

• À la femme qui a souffert sans me laisser souffrir, qui n'a jamais rejeté mes demandes et qui n'a ménagé aucun effort pour me rendre heureux : ma merveilleuse mère, DJaber Salima.

• À ma chère tante, DJaber Naima, et à mon cher mari, Bilal, qui n'ont cessé de me prodiguer conseils, encouragements et soutien tout au long de mes études. Que Dieu les protège et leur donne réussite et bonheur.

À ma petite fille, Nour El-Yakine, qui est merveilleuse, je lui souhaite du succès tout au long de sa vie et la vois dans les meilleures positions, ce qui apporte joie et bonheur à tous les membres de la famille.

• À toutes les personnes qui m'ont soutenu dans ma carrière et m'ont donné des conseils pour continuer le chemin, peu importe la durée, que Dieu leur donne une vie longue et heureuse.

je reviens toujours à ma chère mère, qui a passé sa vie et a fait tout ce qui était en son pouvoir pour voir ce beau jour, et à son soutien moral, sa patience et sa compréhension tout au long de mon parcours académique. Mille remerciements et appréciations.

Remerciement

Gratitude à ma directrice de thèse Dr. Selma Bencedira. Nous la remercions pour ses Conseils, son aide et sa préparation.

Nous adressons nos sincères remerciements à tous les professeurs, conférenciers et toutes les personnes qui ont guidé nos idées par leurs mots, écrits, conseils et critiques, et qui ont été d'accord avec nous et ont répondu à nos questions au cours de nos recherches.

Nous remercions nos chers saints qui ont toujours été là pour nous remercier de leurs encouragements.

Enfin, merci pour nous. Leur soutien et leurs encouragements sont d'une grande aide.

À toutes ces personnes originales, nous adressons nos remerciements et notre gratitude.

Liste des tableaux

Tableau I.1. Présentation des ateliers du complexe Fertial-Annaba en fonction de la zone…14

Tableau II.1. Caractéristique du moteur donnée par le catalogue……44

Tableau II.2. Couple en fonction de glissement……..46

Liste des figures

Figure I.1. Carte de localisation du complexe Fertial……14

Figure I.2. Digramme de la production de l'ammoniac……16

Figure I.3. Schéma du pipe ligne……17

Figure I.4. Fonctionnement d'une pompe à piston : (a) aspiration et (b) relâchement du fluide……21

Figure I.5. Profile du débit en fonction du temps pour (a) un piston, (b) deux pistons et (c) trois pistons……21

Figure I.6.Schéma d'une pompe a engrenage……22

Figure I.7. Schéma d'une dent de la pompe a engrenage……23

Figure I.8. Fonctionnement d'une pompe a palettes……24

Figure I.9. Schéma d'une palette……24

Figure I.10. Différents écoulements dans un turbomoteur……25

Figure I.11. Schéma des éléments constitutifs d'une pompe……26

Figure I.12. Schéma représentatif de Composition du moteur asynchrone……29

Figure I.13. Stator d'un moteur asynchrone……29

Figure I.14. Retor en cage d'écureuil……30

Figure I.15. Retor en cage d'écureuil…… ;……31

Figure I.16. Représentation schématique de l'arbre du rotor……32

Figure I.17. Roulements à billes……32

Figure I.18. Ventilateur en plastique……32

Figure I.19. Courbe couple-vitesse de rotation du moteur asynchrone a cage d'écureuil……35

Figure I.20. Différents types de régime de fonctionnement d'un moteur asynchrone a cage d'écureuil en fonction de glissement et le couple……36

Figure I.21. Courbe de variation du couple électromagnétique en fonction du glissement….37

Figure I.22.classification des accouplements permanents……..38

Figure I.23. Les déplacements relatifs éventuels des arbres a accoupler……...39

Figure II.1. Représentation schématique de la pompe centrifuge 110J……43

Figure II.2. Courbe du couple en fonction de glissement…… ;…… 47

Sommaire

Introduction générale ……10
I.1Présentation de l'entreprise ASMIDAL-Fertiall ……13
I.1.1 Historique de l'entreprise ……13
I.1.2 Localisation du complexe de FERTIAL-Annaba ……13
I.1.3 Présentation du complexe Fertial-Annaba ……14
I.1.3 présentation de l'unité de fabrication de l'ammoniac ……15
I.1.3.1 Description Académique de l'Unité de Production d'Ammoniac Anhydre ……15
I.1.4 Distribution de produit de Fertial- Annaba ……17
I.1.5 Technologie de chargement ……18
I.2. Pompes Industrielles ……18
I.2.1 Caractéristiques Mécanique d'Ecoulement ……18
I.2.1.1 Débit ……19
I.2.1.2 Pression de refoulement ……19
I.2.1.3 Rendement mécanique ……19
I.2.2 Classification des pompes industriels ……20
I.2.2.1 Pompes Volumétriques ……20
II-2-2 Pompes rotatives ……22
II.2.2.1 Pompe a engrenages ……22
II.2.3 Pompes Hydraudynamiques (Turbopompes) ……24
II.2.3.1 Classification des turbo-pompe ……25
II2.3.2 Classification des pompes centrifuges ……25
II.2.3.3 Principe de fonctionnement d'une pompe centrifuge ……26
I.3. Moteur asynchrone ……27
I.3. 1. Applications ……27
I.3. 2. Caractéristiques et performances ……28
I.3. 3. Avantages et inconvénients ……28
I.3. 4. Constitution et principe de fonctionnement ……28
I.3.4.1. Stator ……29
I.3.4.2. Rotor ……30

I.3.4.3. Organes mécaniques 31
I.3.5. Caractéristiques du moteur asynchrone 33
I.3.5.1 Caractéristiques électromécaniques du moteur asynchrone 33
I.3.5.2 Vitesse nominale : Une cadence de rotation définie 33
I.3.5.3 Couple moteur : La force motrice à l'arbre 33
I.3.5.4 Intensité nominale : Un indicateur de consommation 34
I.3.5.5 Facteur de puissance (cos ϕ) et rendement (η) : Des indicateurs d'efficacité 34
I.3.5.2 Caractéristiques de fonctionnement : Caractéristique couple- Vitesse 34
I.3.6. Régimes de fonctionnement 36
I.3.7. Stabilité de fonctionnement.....36
I.3.8. Choix de l'accouplement 38
II.1 Matériel est méthode 43
II.2 Résultats et discussion 44
II.2.1 Validation de la puissance requise pour la pompe de chargement d'ammoniac 44
II.2.1.1Calcul de la puissance de la pompe 110J.....44
II.2.1.2 Calcul de la puissance du moteur.....44
II.2.2 Détermination de la caractéristique du moteur Asynchrone 45
II.2.3. Vérification de conditions de moteur 47
II.2.3.1. Conditions de surcharge 47
II.2.3.2 Conditions de démarrage 47
II.2.5 Détermination du couple résistant de la pompe 48
II.2.3. Vérification de la contrainte de torsion 49
Conclusion 50

Introduction général

Introduction générale

Le transport maritime d'ammoniac liquide joue un rôle crucial dans l'industrie chimique mondiale. L'efficacité et la sécurité du pompage de l'ammoniac de l'industrie Fertial-Annaba à bord des navires citernes sont des aspects critiques pour garantir une navigation sûre et respectueuse de l'environnement[1]. Traditionnellement, les pompes centrifuges à moteur électrique synchrone ont été employées pour cette tâche. Cependant, l'émergence des moteurs asynchrones présente des avantages potentiels en termes d'efficacité énergétique et de réduction des coûts d'exploitation.

Deux types de moteurs électriques principaux sont couramment utilisés dans les applications marines : les moteurs synchrones et les moteurs asynchrones.Les moteurs synchrones fonctionnéesont basés sur la synchronisation entre la vitesse du champ magnétique rotatif et la vitesse du rotor[1]. Ils présentent un couple de démarrage élevé et bon rendement à vitesse constante. Cependant, Ils possèdent une structure plus complexe, une maintenance plus exigeante et coût très élevé.Les moteurs asynchrones quant à eux, sont d'une structure simple, d'une maintenance aisée et coût plus faible ils fonctionnent grâce au phénomène l'induction électromagnétique crée entre le stator et le rotor[2].

Parmi les moteurs asynchrones, le moteur à cage d'écureuil se distingue par sa simplicité de conception, sa robustesse et son faible coût. Son rotor est constitué de barres conductrices en court-circuit, ce qui le rend économique à fabriquer et à entretenir.Le choix du moteur asynchrone à cage d'écureuil pour le pompage de l'ammoniac dans les navires citernes s'appuie sur plusieurs avantages clés :

- Les moteurs asynchrones à cage d'écureuil présentent généralement un rendement supérieur aux moteurs synchrones, en particulier à des vitesses variables. Cela se traduit par une consommation d'énergie réduite et des économies de coûts d'exploitation à long terme.
- La conception simple du moteur à cage d'écureuil nécessite peu d'entretien et réduit le risque de défaillances. Cela se traduit par une meilleure disponibilité du système de pompage et une réduction des coûts de maintenance.
- Les moteurs asynchrones à cage d'écureuil sont généralement moins coûteux à l'achat que les moteurs synchrones de puissance comparable. Cela permet d'optimiser les investissements initiaux dans les systèmes de pompage.
- En outre, les moteurs asynchrones à cage d'écureuil peuvent être facilement intégrés aux systèmes de contrôle existants, ce qui facilite leur adoption et leur mise en œuvre.

Ce travail vise à explorer la validation de l'utilisation des moteurs asynchrones à cage d'écureuil pour le pompage de l'ammoniac dans les navires citernes du port maritime de Annaba. En d'autre thermes, il cherche à déterminer si les moteurs asynchrones constituent

une alternative viable et avantageuse aux moteurs synchrones pour le pompage de l'ammoniac dans les navires citernes.

Le mémoire est constitué de deux principales parties. La première représente un états d'art, dans laquelle le complexe Fertial-Annaba est représenté, les procédures de fabrication de de l'ammoniac, sont transport au port de Annaba, et sont rechargement des navire-citerne sont décrits, et les technologies de rechargement de l'ammoniac sont discutés, notamment les pompes centrifuges et les moteurs a synchrone à cage d'écureuil.

La deuxième partie, qui constitue la partie pratique, qui sera concentrée sur l'analyse des performances des moteurs asynchrones en comparaison avec les moteurs synchrones, en tenant compte de divers facteurs tels que la stabilité du système et la compatibilité avec la pompe centrifuge, les caractéristiques du moteur, le couple de démarrage.

La validation de l'utilisation des moteurs asynchrones pour le pompage de l'ammoniac dans les navires citernes pourrait apporter des contributions significatives au complexe Fertial Annaba maritime et au port maritime de Annaba. Les résultats de ce mémoire fourniront des équipementiers pour la prise de décision éclairée concernant le choix des moteurs de pompage pour les navires citernes transportant de l'ammoniac.

Partie I :

Etat de l’arts

Partie I : Etat de l'are

I.1Présentation de l'entreprise ASMIDAL-Fertiall

ASMIDAL-Fertial est une entreprise publique, à caractère économique, constituée sous la forme d'une société par actions (S.P.A). Elle est spécialisée dans l'exploitation et le développement de l'industrie Algérienne des engrais et des produits phytosanitaires.

I.1.1 Historique de l'entreprise

Le complexe des engrais phosphatés et azotés d'Annaba a été établi en 1972 par la société SONATRACH dans le but de répondre aux besoins nationaux en fertilisants et d'exporter les surplus éventuels. En 1985, à la suite de la restructuration de SONATRACH, ASMIDAL a été créée pour gérer la production, la commercialisation et le développement des engrais.

En 1997, dans le cadre de son plan de restructuration, ASMIDAL a décidé de filialiser les deux plateformes de production d'Annaba et d'Arzew. Ainsi, en l'an 2000, les filiales Alzofert (Arzew) et Fertial (Annaba) ont été fondées.

Enfin, le 4 août 2005, ASMIDAL et le groupe Vilar Mir (Espagne) ont conclu un accord de partenariat concernant les deux plateformes (Arzew et Annaba), accordant une majorité de 66 % à la partie espagnole.

Cette entreprise est constituée de deux pôles industriels majeurs : Un complexe de production, situé à Annaba, présentant une capacité de 550.000 T an^{-1} engrais phosphatés et 330.000 T an^{-1} engrais azotés , ainsi qu'un complexe de production à ARZEW, avec une capacité 495.000 T an^{-1} d'engrais azotés.

I.1.2 Localisation du complexe deFERTIAL-Annaba

L'infrastructure de FERTIAL est sise au sein de la plateforme chimique localisée dans le secteur méridional-oriental de la cité d'Annaba, plus précisément sur la rue des Salines. Cette enclave industrielle est délimitée au nord-est par les eaux de la mer Méditerranée, au sud-est par le cours de l'Oued Seybouse ainsi que par la Cité Sidi Salem, au sud-ouest par la Route RN 44 et la Cité d'El Bouni, et au nord-ouest par l'Oued Boudjima et la Cité Seybouse. Un périmètre de clôture entoure intégralement ce complexe industriel, avec un poste de surveillance installé à son entrée.

Il convient de noter que la zone d'étude est géographiquement située à l'extrême nord-est de l'Algérie, au sein de la wilaya d'Annaba. La figure I.1 présente la carte de localisation du complexe Fertial.

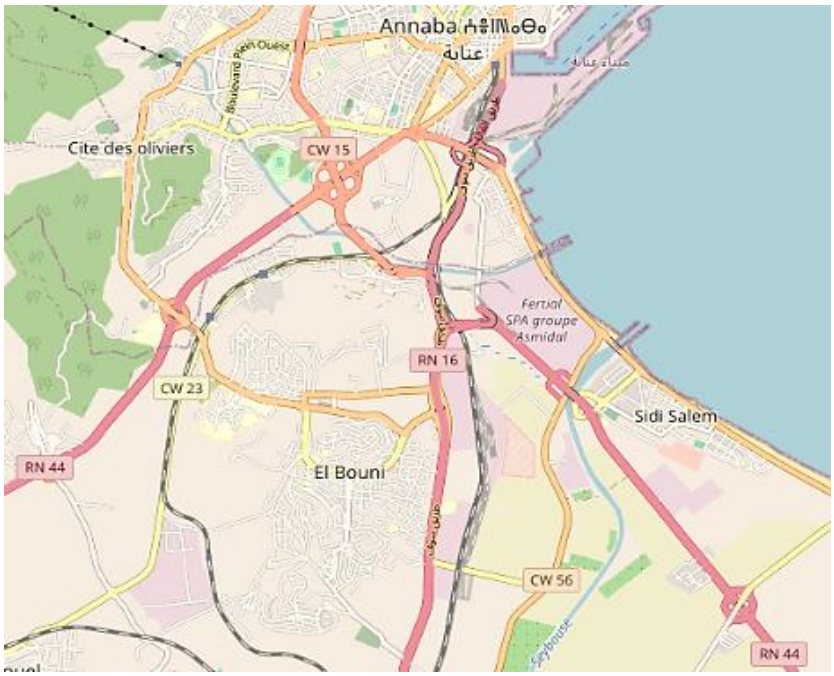


Figure I.1. Carte de localisation du complexe Fertial.

I.1.3 Présentation du complexe Fertial-Annaba

Les installations industrielles se divisent en deux zones principales, chacune ayant des fonctions spécifiques et des dates de mise en service distinctes. La zone Sud, dédiée principalement à la production d'engrais phosphatés, a vu ses premiers ateliers opérationnels dès 1972. La zone Nord, quant à elle, est spécialisée dans les engrais azotés et a intégré ses nouveaux ateliers en 1982.

Tableau I.1. Présentation des ateliers du complexe Fertial-Annaba en fonction de la zone.

Zone	Ateliers	Utilité
Sud	Ateliers de production d'engrais NPK	Production d'engrais de l'azote, du phosphate et de potassium.
	Ateliers de SSP	Production du superphosphate simple
	Centrale utilitaire 1	
Nord	Atelier de production d'acide nitrique	Production d'acide nitrique
	Ateliers de production de nitrate d'ammonium	Production de nitrate d'ammonium
	Ateliers de **production de l'ammoniac**	**Production de l'ammoniac**
	Installation de manutention et de stockage	Gestion les matières premières et les produits finis.
	Centrale utilitaire 2	Assurance des services de base pour les ateliers de cette zone

I.1.3 présentation de l'unité de fabrication de l'ammoniac

L'unité est conçue pour produire jusqu'à 1000 tonnes par jour (t/j) d'ammoniac anhydre par un procédé de reformage catalytique du gaz naturel avec de la vapeur, conformément au procédé KELLOGG.

Pour ce faire, cette unité est équipée d'importantes installations de traitement des matières premières, notamment le gaz naturel. Ces installations permettent la fabrication de l'ammoniac selon des procédés complexes mais parfaitement maîtrisés. De plus, cela est rendu possible grâce à un encadrement hautement qualifié dans les différents ateliers, fours et réacteurs.

Par ailleurs, la salle de contrôle de l'unité d'ammoniac joue un rôle central. En effet, c'est de là que toutes les commandes et instructions sont transmises pour coordonner les opérations de production via un réseau de communication interne et un système informatique avancé. En conséquence, les opérateurs peuvent suivre et contrôler tous les paramètres de production et d'intervention à l'aide d'un tableau de micro-ordinateurs, ce qui permet de surveiller toute la chaîne de production. Le produit final est ainsi obtenu par la méthode dite de Reforming Kellogg à haute pression.

Cependant, les risques en cours incluent la pollution atmosphérique par un produit irritant, dangereux et à forte concentration. De surcroît, le processus technologique employé est complexe et sophistiqué, nécessitant des connaissances techniques très poussées et une maintenance préventive rigoureuse.

I.1.3.1 Description Académique de l'Unité de Production d'Ammoniac Anhydre

Dans un premier temps, le gaz naturel d'alimentation est désulfuré afin d'éliminer toute trace de soufre avant d'être introduit dans le processus de reformage. Ensuite, le reformage catalytique du gaz avec de la vapeur se déroule en deux étapes distinctes. Au cours de la première étape, les hydrocarbures (CH_4) sont principalement transformés en H_2, CO et CO_2, avec un résidu de méthane compris entre 8 et 12 %. Puis, dans la seconde étape, de l'air est ajouté à ce flux de gaz pour obtenir du N_2, ce qui permet d'atteindre un rapport H_2/N_2 adéquat dans le gaz de synthèse.

Par ailleurs, le monoxyde de carbone (CO) est éliminé du gaz via une conversion en deux étapes : la première à haute température et la seconde à basse température, réduisant ainsi la teneur en CO à des valeurs inférieures à 0,5 %. Par la suite, le dioxyde de carbone (CO_2) et la vapeur d'eau sont retirés du gaz de procédé lors de l'étape de décarbonatation. Le CO_2 est éliminé par absorption avec une solution de monoéthanolamine (MEA), ce qui réduit sa teneur à des valeurs inférieures à 500 ppm, tandis que la vapeur d'eau est retirée par condensation et séparation. De plus, une partie du CO_2 extrait est récupérée pour être exportée vers des unités voisines en vue de la production de méthanol.

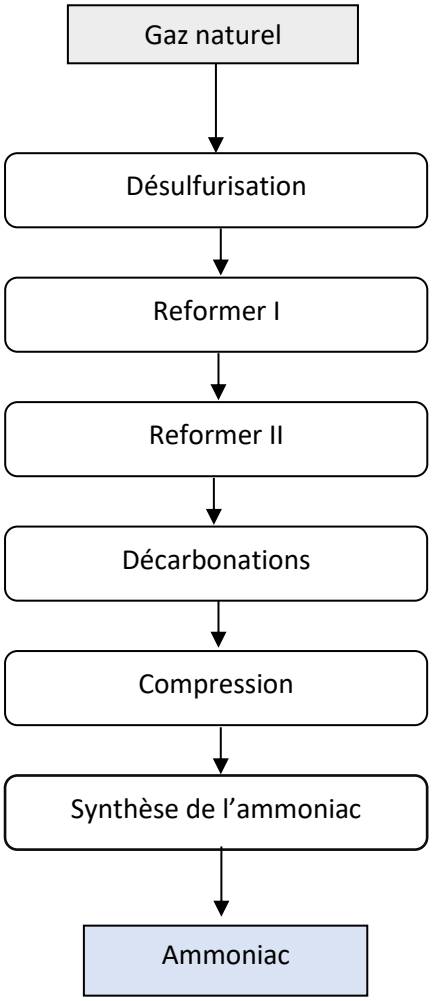


Figure I.2. Digramme de la production de l'ammoniac.

Ensuite, les résidus de CO et de CO_2 sont convertis en méthane (CH_4) via une méthanation catalytique avec de l'hydrogène (H_2), obtenant ainsi le gaz de synthèse à purifier. Ce gaz est ensuite comprimé d'environ 25 bars à une pression variant entre 110 et 140 bars, avant d'être envoyé dans le circuit de synthèse.

Dans un convertisseur catalytique fonctionnant à environ 137 bars et 440°C, l'ammoniac gazeux est produit. Par la suite, par des procédés de réfrigération, de condensation et de séparation, l'ammoniac est envoyé à une unité de stockage cryogénique d'une capacité de 20 000 tonnes, où il est distribué aux consommateurs internes et à l'expédition.

Enfin, afin d'éviter l'accumulation de gaz inertes tels que le méthane et l'argon dans le circuit de synthèse, les gaz de purge sont extraits par refroidissement dans une première phase. L'ammoniac est alors éliminé, puis récupéré et envoyé au stockage. Le gaz résiduel, contenant au maximum environ 5 % d'ammoniac, est ensuite envoyé au four pour être utilisé comme gaz combustible.

I.1.4 Distribution de produit de Fertial- Annaba

L'usine de Fertial-Annaba est reliée au port maritime de Annaba par un pipeline sophistiqué, conçu pour transférer 360 tonnes d'ammoniac liquide par jour. Ce transfert s'effectue à une température de -33°C et sous une pression de 8 bars, depuis le réservoir d'entreposage jusqu'au port de Annaba, ou inversement [1].

Le pipeline, constitué d'une conduite à simple paroi de 45,7 cm de diamètre interne et fabriqué en acier ASTM A. 33 GR6, permet de pomper l'ammoniac à un débit normal de 500 tonnes par heure, correspondant à une vitesse de 1,3 à 1,9 m s^{-1}. Le pipeline s'étend sur environ 3000 mètres et est installé sur des supports à une élévation moyenne de 10 mètres par rapport au niveau de la mer, avec des variations d'altitude allant de 3,5 à 15 mètres. Les différentes sections du pipeline sont construites en utilisant des conduites de longueurs variables, adaptées aux besoins spécifiques de chaque tronçon, incluant des coudes et des courbures. Les raccordements se font par des tubes de différentes longueurs [1].

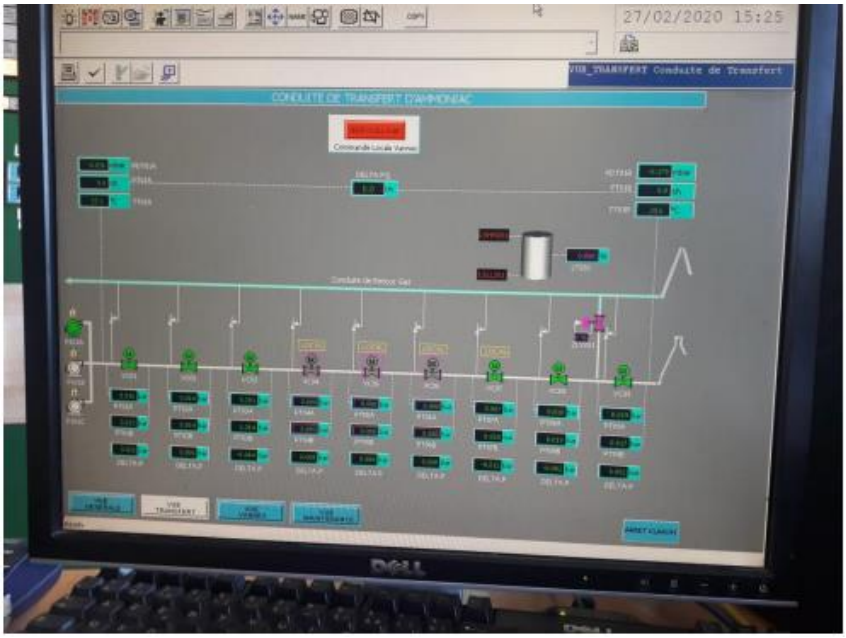


Figure I.3. Schéma du pipe ligne.

Pendant le transport de l'ammoniac liquide vers le port, la température peut augmenter, provoquant la vaporisation partielle de l'ammoniac et une augmentation de la pression. Pour contrer cet effet, le pipeline est refroidi à -33°C avant le chargement de l'ammoniac, préalablement refroidi à la même température. Le pipeline est également équipé d'un système de retour des gaz constitué de dix purges automatiques, réparties sur toute sa longueur. Ces purgeurs libèrent l'ammoniac gazeux vers le système de retour des gaz lorsque la pression atteint une certaine limite, maintenant ainsi une pression optimale. Ce système redirige les vapeurs d'ammoniac vers une conduite parallèle de 40,6 cm de diamètre interne et de même longueur que le pipeline principal. Cette conduite permet d'envoie les gaz d'ammoniac vers un système de réfrigération, grâce aune soufflante située au port, où ils sont condensés et renvoyés au réservoir d'entreposage.

Une coordination étroite entre le personnel d'exploitation est cruciale avant le lancement du transfert d'ammoniac liquide. Les informations concernant tout changement imminent dans les installations doivent être échangées à l'avance pour éviter des modifications brusques des conditions opérationnelles, garantissant ainsi la sécurité et l'efficacité du processus.

I.1.5 Technologie de chargement

Au port, un système de manutention est utilisé pour connecter directement l'ammoniac liquide du pipe ligne au poste à quai puis au citernes du navire en vue de l'exportation. Ce système permet un chargement direct sans transbordement [3], [4]. Ce système de manutention inclus principalement par quatre bras de rechargement et une pompe cryogénique et les moteurs.

Les pompes sont nécessaires pour transférer l'ammoniac liquide des réservoirs de stockage aux conduits de chargement, puis aux bras de chargement pour le transfert final aux navires. Elles permettent de maintenir la pression requise pour le transfert sûr et rapide de l'ammoniac liquide des installations de stockage aux navires. Les moteurs fournissent la puissance nécessaire pour actionner les pompes et assurer le débit requis pour un chargement efficace des navires.

I.2. Pompes Industrielles

Les pompe est une machine conçue pour faire circuler un liquide. En effet, les pompes sont des appareils qui génèrent un différence de potentiel entre les tubulures d'entrée et de sortie. d'un point de vue physique, le fonctionnement d'une pompe consiste à transformer l'énergie mécanique fournie par son moteur d'entraînement en énergie hydraulique. En termes plus simples, elle transmet au courant liquide qui la traverse une certaine puissance.

Ainsi, la réserve d'énergie reçue par le liquide à l'intérieur de la pompe permet au courant de surmonter les pertes de charge et de s'élever jusqu'à une certaine hauteur. Cependant, L'énergie requise pour faire fonctionner ces machines dépend de nombreux facteurs rencontrés dans l'étude des écoulements. C'est facteurs incluent, tout d'abord, les Propriétés du fluide, telles que la masse volumique, viscosité, compressibilité. Ensuite, les caractéristiques de l'installation, y compris la longueur, le diamètre, la rugosité et la singularité, jouent également un rôle crucial.

I.2.1 Caractéristiques Mécanique d'Ecoulement

La sélection et l'utilisation efficace des pompes dépendent de la compréhension des caractéristiques mécaniques de l'écoulement, telles que le débit, la pression de refoulement et le rendement mécanique. Ces paramètres influencent directement la performance et l'efficacité des systèmes de pompage dans diverses applications industrielles.

I.2.1.1 Débit

Le débit représente le volume de liquide sortant de l'appareil par unité de temps. En effet, le débit s'exprime couramment en litres par seconde (L s^{-1}) ou en mètres cubes par heure (m^3 h^{-1}). Cette mesure est cruciale pour déterminer la capacité de la pompe à déplacer un certain volume de fluide sur une période donnée, influençant ainsi la sélection de la pompe pour une application spécifique.

I.2.1.2 Pression de refoulement

La pression de refoulement correspond à la pression exercée à la sortie de l'appareil. Elle est généralement exprimée en bars, en kilogrammes-force par centimètre carré (kgf/cm^2), ou en hauteur de fluide (Hm). De plus, la hauteur de fluide est liée à la pression par la relation suivante :

$$H_m = \frac{P}{\rho \times g} \ (Eq.I.1)$$

Où H_m est la hauteur en mètres, P la pression en pascals (Pa), ρ est la densité du fluide en kilogrammes par mètre cube (kg/m^3), et g l'accélération due à la gravité (9,81 m s^{-2}).

Cette relation permet de comprendre comment la pression générée par la pompe peut élever le fluide à une certaine hauteur, ce qui est essentiel pour des applications telles que l'alimentation en eau des réservoirs en hauteur.

I.2.1.3 Rendement mécanique

Le rendement mécanique est défini comme le rapport entre la puissance théorique et la puissance consommée par l'arbre de la pompe. La puissance théorique (Nth) correspond à la hauteur de refoulement et s'exprime en fonction de Q, H, g, et ρ selon la formule :

$$Nth = p.g.Q.H \ (Eq.I.2)$$

Où Nth est la puissance théorique (W), Q est le débit (m^3 s^{-1}), H est la hauteur de refoulement (m) et ρ est la masse volumique du fluide (kg m^{-3}). Le rendement (η) est alors donné par la relation suivante :

$$\eta = \frac{Nth}{Nc} < 1$$

oùNc représente la puissance consommée. Ainsi, ce rendement permet d'estimer les résistances passives, telles que le frottement du mécanisme et les pertes de charge. Un rendement élevé indique une pompe efficace avec moins de pertes d'énergie. Typiquement, ce rendement varie entre 0,5 et 0,85, dépendant des conditions de fonctionnement et du type de pompe.

I.2.2 Classification des pompes industriels

Compte tenu de la diversité des applications industrielles, il est évident qu'un seul modèle de pompe ne peut résoudre tous les problèmes posés. Par conséquent, les pompes sont classées en deux grandes catégories : lespompes volumétriques et les turbopompes[5].

I.2.2.1 Pompes Volumétriques

Ces pompes déplacent un volume fixe de fluide à chaque cycle, indépendamment de la pression de refoulement. Elles sont particulièrement adaptées aux applications nécessitant une précision volumétrique, telles que le dosage de produits chimiques, on distingue :

- Appareils alternatif, avec piston, animés de faibles vitesse et employés pour débit et pression quelconques
- Appareils rotatifs, sans piston proprement dit, à vis hélicoïdale, à engrenage.

Dans le cas où le fluide et un gaz ou une vapeur, ces mêmes types de pompes portent le nom de compresseur lorsqu'elle servent essentiellement à obtenir des fortes pression, mais aussi le non de surpresseurs lorsqu'elle sont destinées à produire un débit sur une certaine pression.

- **Pompe à piston**

Ces machines ont fonctionnement alternatif, et nécessitent un joint de soupapes ou de clapets pour gérer l'aspiration et le refoulement du fluide dans un cylindre.[5]

Lors de rétraction du le piston, le volume se délatte engendrant une dépression, le fluide, contenu dans les conduites d'entrée et de sortie, est aspiré. Ce mouvement soulève les deux clapets permettant le passage du fluide sur la conduite d'aspiration (entrée) et empêchant son retour dans le cylindre sur la conduite de refoulement (sortie)(Figure I.4-a).

Lorsque le piston s'inverse, le volume se contacte provocant une surpression dans le cylindre de manière à forcer le fluide à sortir et l'abaisser les deux clapets. Cela ferme le retour vers l'amont et ouvre le passage vers l'aval, comme in illustré sur la (Figure I.5-a).

Le calcul du volume du fluide transféré par le cycle (m^3) est calculer par L'équation I.3.l est considéré comme la course totale du piston ($m^2\ s^{-1}$) et S la section du cylindre (m).

$$V_0 = l \times S\ (Eq.I.3)$$

Dans le cas où l'axe tourne à la vitesse angulaire w (s^{-1}) le débit théorique Q_{th} , mesuré en $m^2\ s^{-1}$, est bien égal à :

$$Q_{th} = V_0 \times w(Eq.I.4)$$

La pression de refoulement peut être très élevée est, théoriquement, infinie, en fonction de la résistance des matériaux et des contraintes mécaniques de la pompe.

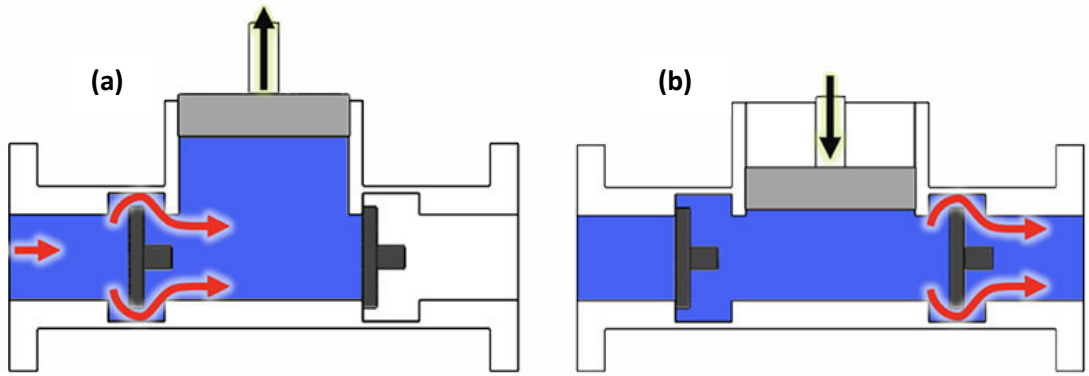


Figure I.4. Fonctionnement d'une pompe à piston **:** (a) aspiration et (b) relâchement du fluide.

Ces caractéristiques permettent à ces pompes de fonctionner efficacement dans des applications nécessitant des pressions de refoulement élevées, garantissant un contrôle précis du fluide grâce à l'action synchronisée des clapets et du piston.
Ces machines génèrent un débit pulsé, entraînant des-à-coupés deux pressions qui peuvent être :

- Soit en plaçant un réservoir anti-bélier sur la conduite de refoulement ;
- Soit en utilisant plusieurs pistons débitants en parallèle, mais fonctionnant à tour de rôle avec un déphasage $\Psi = \frac{2\pi}{n}$, ou n représente le nombre de postes.

La deuxième méthode permet d'obtenir d'une part un débit régulier; l'amplitude de l'ondulation diminue à partir de trois positions, d'autre part des machines plus compactes et mieux équilibrées.

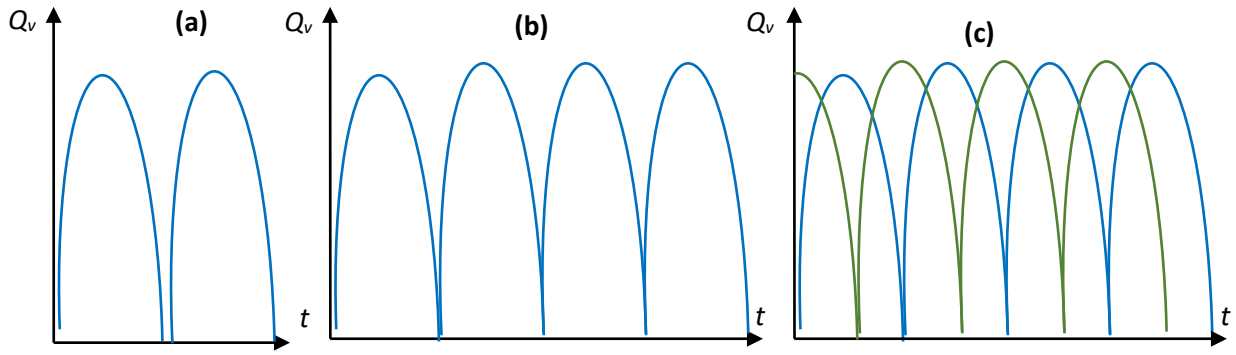


Figure I.5. Profile du débit en fonction du temps pour **(a)** un piston, **(b)** deux pistons et **(c)** trois pistons.

II-2-2 Pompes rotatives

Ces pompes fonctionnent grâce à un mouvement de rotation dont la vitesse peut varier. Elles peuvent être directement entraînées par un moteur rotatif via un simple accouplement. Ces pompes se caractérisent par un débit et un couple constants, assurant une performance stable et prévisible.
Un des avantages majeurs de ces pompes réside dans leur polyvalence : elles peuvent facilement être converties en moteurs rotatifs. En fournissant un liquide sous pression, il est

possible de récupérer de l'énergie mécanique sur l'arbre, transformant ainsi la pompe en un moteur efficace. Cette capacité bidirectionnelle offre une grande flexibilité d'utilisation dans diverses applications industrielles et mécaniques.

II.2.2.1 Pompe a engrenages

Cette pompe se compose d'engrenages rectifiés qui tournent sans jeusur un arbre. Le fluide rempli l'espace interdentaire et est transporté de l'aspiration vers le refoulement. L'axe de l'engrenage est accouplé à un moteur électrique. Lorsque l'axe de l'engrenage (1) tourne, l'engrenage (2) est entraîné dans le sens opposé. Ces pompes peuvent être conçues en plusieurs étages et sont utilisées dans la commande hydraulique des engins, ainsi que dans les pompes de graissage des véhicules. La pression générée par ces pompes varie entre 150 et 200 bars[5].

Lorsque les engrenages tournent, le fluide est emprisonné entre les dents des engrenages et la paroi de la cavité du carter. Il est ensuite tourné vers la sortie et évacué. Le fluide ne peut pas refluer vers l'entrée à cause de l'engrènement des engrenages et doit donc être évacué par la sortie. Le fluide pompé lubrifie l'engrenage et les paliers lisses associés.

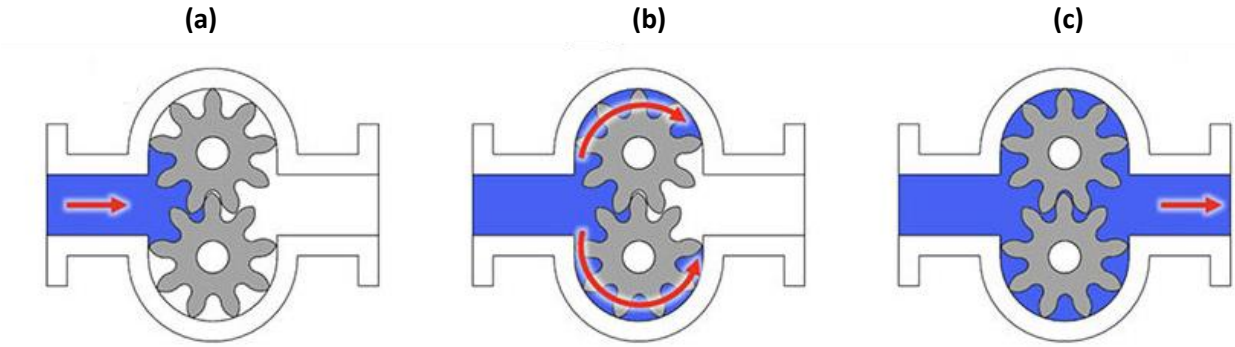


Figure I.6. Schéma d'une pompe a engrenage

Le débit théorique peut être calculé en utilisant la formule suivante :

$$Q_{th} = \frac{Z \times w \times n}{60} (Eq.I.5)$$

Ou Z est le nombre de dents entre deux roues, W est le volume caractéristique et n est la vitesse de rotation. Généralement, on prend comme volume élémentaire refoulais le volume de la dent W_b pour simplifier les calculs ($W = 2W_b$). Le volume refoulé à un tour de l'arbre du rotor est égale à la somme des dents de deux engrenages. Donc, le débit théorique devient :

$$Q_{th} = \frac{2 \times Z \times W_b \times n}{60} (Eq.I.6)$$

Pour simplifier le calcul du débit de la pompe à engrenage on suppose que le liquide s'écoule sous forme d'une bande avec une vitesse (V) et un section $(m \times d = s)$.

$$Q = V.S = \frac{\pi \times n \times D}{60} \times (2 \times d \times m) \ (Eq.I.7)$$

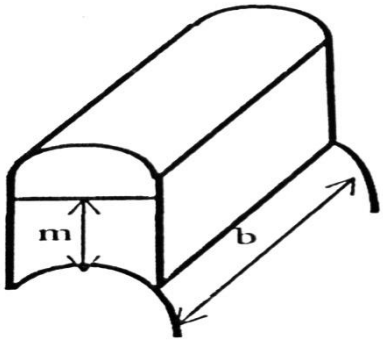


Figure I.7. Schéma d'une dent de la pompe a engrenage

Avec D est le diamètre de la roue est le double du rayons (m), m est hauteur de la tête de la dent, b est la larguer de la dent (m) est n est V est la vitesse de rotation (t/min). Le chiffre 2 qui figure dans l'équation représente le nombre de roue. La simplification de l'équation donne :

$$Q_{th} = \frac{\pi \times n}{15} \ .R \times m \ \ (Eq.I.8)$$

B- Pompe a palettes

Les pompes à palettes font partie de la famille des pompes à déplacement positif, largement utilisées dans divers domaines industriels. Dans l'aviation, elles se distinguent par leur conception robuste et leur capacité à générer un débit important de fluide sous haute pression[6].

Le rotor est mis en rotation par un moteur électrique ou un moteur à combustion interne. Sous l'effet de la force centrifuge, les palettes se plaquent contre la paroi interne du corps de pompe et glissent le long de l'axe flottant. La rotation du rotor et le mouvement des palettes créent des zones variables en volume entre elles. Lorsque le volume entre deux palettes s'agrandit, la pression diminue, ce qui permet l'aspiration du fluide par l'orifice d'aspiration. La rotation continue du rotor entraine les palettes et le fluide emprisonné dans les chambres. Lorsque le volume diminue, la pression augmente, refoulant le fluide vers l'orifice de refoulement.

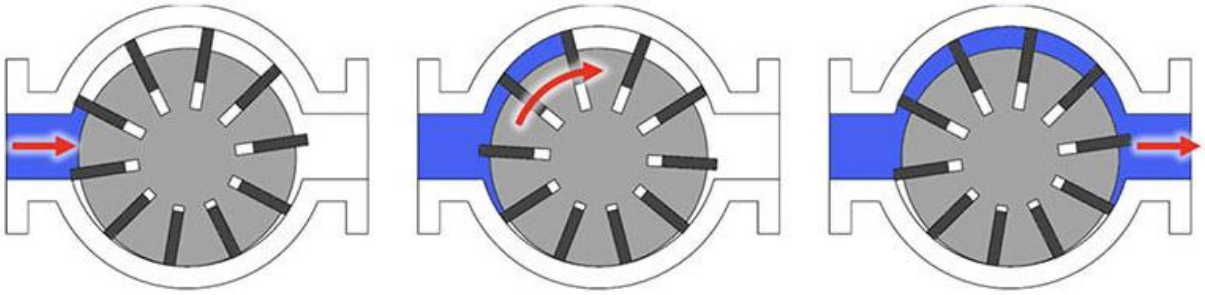


Figure I.8. Fonctionnement d'une pompe a palettes

Alors le volume caractéristique (W: volume entre palettes) peut être exprimé approximativement de la manière suivante :

$$w = 2 \times e \times b \times \left[\left(\frac{2 \times \pi \times (\mathrm{R} - \mathrm{e})}{\mathrm{z}}\right) - \sigma\right] (Eq.I.9)$$

Où, Rest le rayon de la surface interne du corps. e est excentricité (l'écart entre le centre du rotor et du corps) ;z est le nombre de palettes ;b est la dimension des palettes dans la direction axiale et σ est l'épaisseur des palettes. Tandis que le débit théorique moyen est éxprimée de la manière suivante :

$$Q_{th} = \frac{Z \times W \times n}{60} = 2 \times e \times b\ [2\pi\ (R - e) - Z\ 6]\ \frac{n}{60}\ ;\ (Eq.I.10)$$

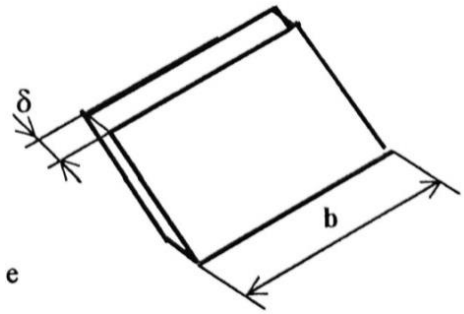


Figure I.9. Schéma d'une palette.

II-3 Pompes Hydraudynamiques (Turbopompes)

Ces pompes, appelées turbopompes, exploitent l'énergie cinétique d'un rotor pour accroître la pression d'un fluide. Elles sont particulièrement appréciées dans les applications nécessitant des débits élevés et des pressions variables, telles que les systèmes de chauffage, de ventilation et de climatisation (HVAC). On distingue plusieurs types de turbopompes, parmi lesquelles les pompes centrifuges, à hélice et hélico-centrifuges. Ces mêmes machines, lorsqu'elles sont utilisées pour comprimer des gaz ou de la vapeur afin de générer un débit à partir d'une faible différence de pression, prennent le nom de compresseurs.

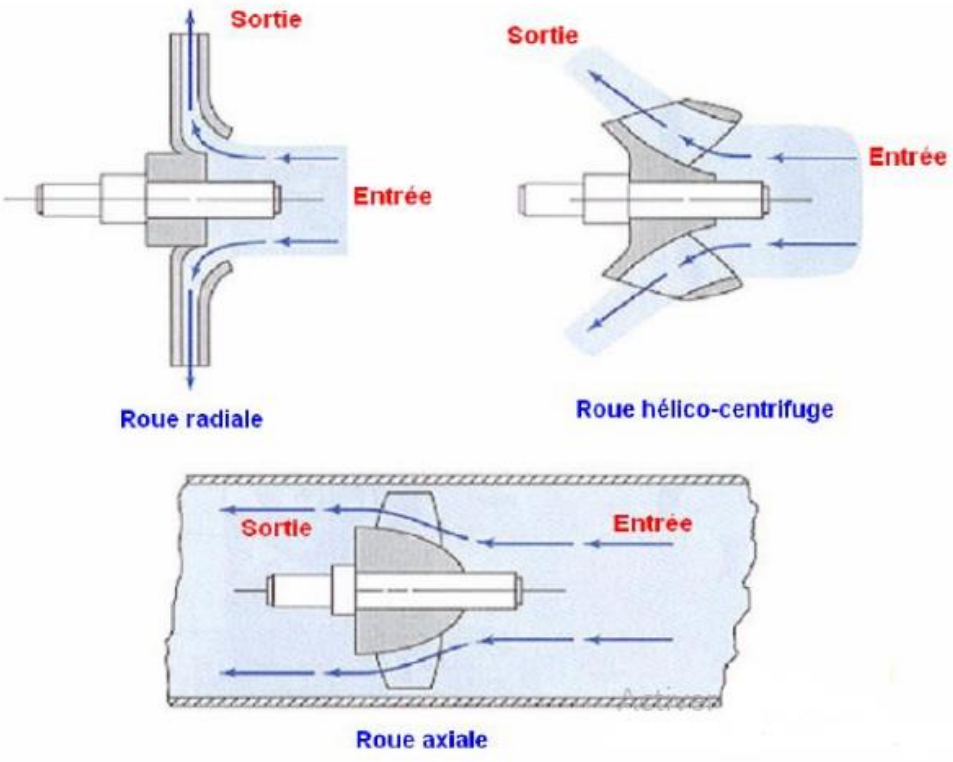
II.3.1 Classification des turbo-pompe

Les turbo-pompes peuvent être classées en fonction du trajet du fluide à l'intérieur de la pompe et du nombre d'éléments disposés en série.

Classification par rapport Trajet du fluide

Cette classification se divise principalement en trois catégories [2]:

- **Machines radiales centrifuges ou centripètes :** Dans ces machines, les flux de fluide se déplacent dans des plans perpendiculaires à l'axe de la roue. Dans les machines centrifuges, le fluide s'éloigne de l'axe, tandis que dans les machines centripètes, il se rapproche de l'axe.
- **Machines axiales :** Ces machines voient les flux de fluide se déplacer le long de cylindres coaxiaux à l'axe de la machine.
- **Machines intermédiaires hélicocentrifuges ou hélicocentripètes :** Dans ce type de machines, le fluide circule sur des surfaces de révolution telles que des cônes, par exemple.
- **Nombre d'éléments disposés en série :**Une turbo-pompe élémentaire ou monocellulaire comprend deux séries d'organes : certains fixes (les directrices) et d'autres mobiles (les roues). L'association d'un organe fixe et d'une roue mobile constitue une cellule. Dans certains cas, il est nécessaire de disposer plusieurs cellules en série, le fluide parcourant successivement chacune d'elles. On obtient alors une machine multicellulaire.



- **Figure I.10.** Différents écoulements dans un turbomoteur.

II -3-2 Classification des pompes centrifuges

La classification des pompes centrifuges repose non seulement sur la trajectoire du liquide à l'intérieur du rotor, mais également sur la diversité des types de pompes présentes dans l'industrie, ce qui nécessite l'établissement de critères clairs. Les principaux critères de classification sont les suivants [7]:

- **Disposition de l'axe :** Axe horizontal et Axe vertical et Axe incliné ;
- **Nombre d'étages :** Monocellulaire (un seul étage) et Multicellulaire (plusieurs étages) ;
- **Type de récupération :** Pompe avec diffuseur, pompe avec ailettes et pompe avec volute ;
- **Importance de la pression engendrée :** Pompe à basse pression, pompe à pression moyenne et pompe à haute pression ;
- **Moyen d'entraînement :** Entraînement par courroie et Entraînement par accouplement direct ;
- **Forme de la roue :** roue à simple aspiration et roue à double aspiration ;
- **Destination** : Pompe à eau, pompe pour liquides corrosifs et pompe pour liquides chargés ;
- **Type de moteur utilisé :** Moteur électrique et moteur diesel.

Cette classification exhaustive permet une meilleure compréhension et une utilisation plus efficace des différentes pompes centrifuges disponibles sur le marché industriel.

II-3-3 Principe de fonctionnement d'une pompe centrifuge

L'élément actif principal de l'une pompe centrifuge, la roue ou le rotor a aube qui tourne à grande vitesse, transmettant au liquide un surplus de pression et le rejette à une vitesse supérieure à sa vitesse initiale dans le diffuseur[8, p. 34].

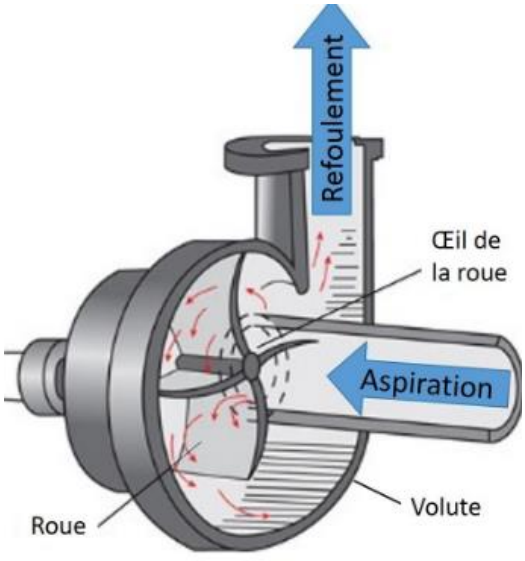


Figure I.11. Schéma des éléments constitutifs d'une pompe.

Entre les aubes de la roue et le courant liquide se produit une interaction qui sort du rotor et à transformer une partie del'énergie mécanique en énergie hydraulique.

Le diffuseur est destiné à recevoir le liquide qui sort du rotor et à transformer en partie l'énergie cinétique du courant en énergie de pression.

Le liquide arrive à la pompe parallèlement à son axe de rotationet, ensuite, dirigé vers les canaux former par les aubes après avoir parcouru ces canaux, le liquide sort de la roue pour les fentes fournées par les disques du rotor.

I.3. Moteur asynchrone

Également connu sous le nom de moteur à induction, le moteur asynchrone, s'impose comme le type de moteur le plus largement répandu dans le domaine des entraînements électriques. Son succès repose sur une combinaison d'atouts indéniables, parmi lesquels l'absence de contacts glissants, gage d'une structure simple, robuste et facile à concevoir. Cette caractéristique majeure se traduit par une maintenance réduite et une fiabilité accrue, aspects essentiels pour les applications industrielles.

I.3. 1. Applications

Le moteur asynchrone trouve son application dans une multitude de domaines, en raison de ses multiples atouts et de sa polyvalence. On le retrouve notamment dans :

- **Pompes et ventilateurs :** Le moteur asynchrone est couramment utilisé pour l'entraînement de pompes et de ventilateurs, en raison de sa simplicité, de sa robustesse et de son rendement énergétique élevé.
- **Convoyeurs :** Les convoyeurs industriels font également appel au moteur asynchrone pour leur fonctionnement, profitant de sa capacité à fonctionner sur une large plage de vitesse et de sa robustesse.
- **Machines-outils :** Le moteur asynchrone équipe de nombreuses machines-outils, notamment les tours, les fraiseuses et les perceuses, grâce à sa précision et à sa fiabilité.
- **Électroménager :** Le moteur asynchrone est présent dans de nombreux appareils électroménagers, tels que les lave-linge, les réfrigérateurs et les climatiseurs, en raison de sa simplicité, de son silence de fonctionnement et de son rendement énergétique.
- **Automobile :** L'industrie automobile utilise également le moteur asynchrone dans certains véhicules électriques et hybrides, profitant de ses avantages en termes de rendement énergétique et de fiabilité.

Dans le cas de la présente étude, l'utilisation de moteur asynchrone dans sera consacrée pour l'alimenté une pompe pour le rechargement de l'ammoniac dans les navire citerne.

I.3. 2. Caractéristiques et performances

Le moteur asynchrone se distingue par des caractéristiques remarquables qui en font un choix privilégié pour de nombreuses applications. Sa vitesse de rotation est légèrement inférieure à la vitesse de synchronisme, d'où l'appellation "asynchrone"[9]. Cette différence de vitesse, appelée glissement, est à l'origine du couple moteur développé par le moteur. Le moteur asynchrone présente un certain nombre d'avantages majeurs. En effet, L'absence de contacts glissants confère au moteur asynchrone une structure simple et robuste, réduisant ainsi les besoins en maintenance et augmentant sa fiabilité. De plus, Sa conception simple le rend facile à construire et à produire à moindre coût. D'un autre côté,Le moteur asynchrone peut fonctionner sur une large plage de vitesse, ce qui le rend polyvalent et adaptable à de nombreuses applications. Sur tous ces performances vient s'ajouté la maintenance réduite du moteur en raison de l'absence de contacts glissants et le bon traduit par une consommation d'énergie moindre.

I.3. 3. Avantages et inconvénients

Le moteur asynchrone présente des avantages considérables qui font de lui un choix privilégié pour de nombreuses applications. Cependant, il est important de noter que le moteur asynchrone présente également quelques inconvénients [10]:

- **Glissement :** Le glissement, caractéristique inhérente au moteur asynchrone, se traduit par une légère perte de vitesse par rapport à la vitesse de synchronisme. Cette perte de vitesse peut être négligeable pour certaines applications, mais elle peut s'avérer critique dans d'autres cas.
- **Couple de démarrage :** Le couple de démarrage du moteur asynchrone est généralement inférieur à celui d'autres types de moteurs, tels que les moteurs à courant continu. Cela peut limiter son utilisation dans certaines applications nécessitant un couple important au démarrage.
- **Sensibilité aux variations de tension :** Les performances des moteurs asynchrones peuvent être affectées par les variations de tension du réseau d'alimentation.

I.3. 4. Constitution et principe de fonctionnement

Le moteur asynchrone se compose de deux éléments principaux : le stator et le rotor (Figure I.1). Le stator, partie fixe du moteur, est constitué d'un ensemble de bobines alimentées par un courant alternatif. Ce courant alternatif génère un champ magnétique rotatif dont la vitesse est synchrone à la fréquence du réseau électrique. Le rotor, partie mobile du moteur, est quant à lui constitué d'un circuit électrique, plongé dans ce champ magnétique rotatif.L'interaction entre le champ magnétique rotatif et le circuit du rotor induit des courants électriques dans ce dernier. Ces courants, à leur tour, génèrent un champ magnétique propre au rotor. L'interaction entre les deux champs magnétiques, celui du stator et celui du rotor, produit un couple moteur qui entraine la rotation du rotor[11], [12].

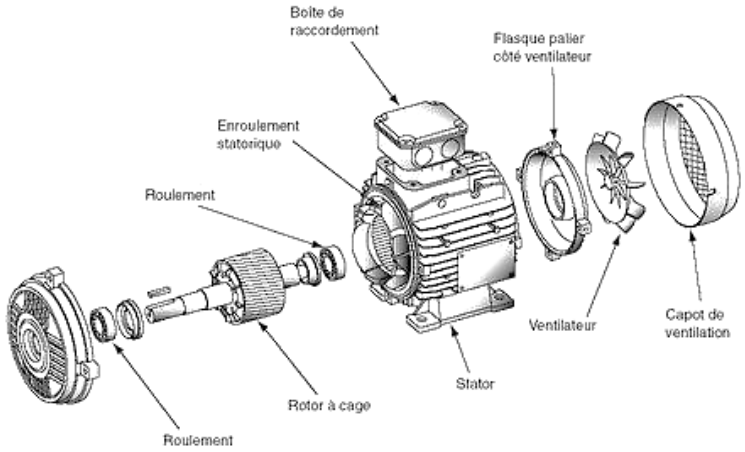


Figure I.12. Schéma représentatif de Composition du moteur asynchrone

I.3.4.1. Stator

Le stator, composant statique du moteur asynchrone, joue un rôle crucial dans la génération du champ magnétique rotatif nécessaire à la rotation du rotor. Sa conception soignée et sa fabrication rigoureuse garantissent un fonctionnement efficace et durable du moteur.

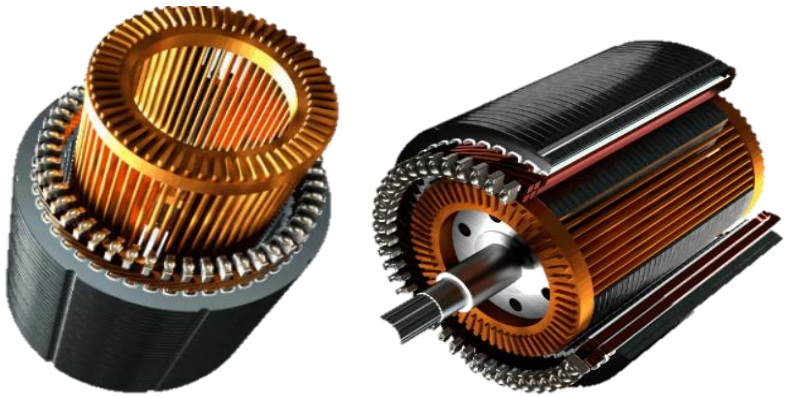


Figure I.13. Stator d'un moteur asynchrone.

Le stator est enveloppé dans une carcasse, généralement en fonte ou en alliage léger, qui assure une protection mécanique robuste et une dissipation thermique efficace.Au cœur du stator se trouve un circuit magnétique constitué d'un empilage de tôles minces en acier au silicium, typiquement d'une épaisseur de l'ordre de 0,5 mm. L'isolation des tôles entre elles, par oxydation ou par un vernis isolant, minimise les pertes par hystérésis et par courants de Foucault, optimisant ainsi l'efficacité énergétique du moteur.Les tôles présentent des encoches soigneusement usinées qui accueillent les enroulements statoriques. Ces enroulements, composés de plusieurs bobines, sont responsables de la création du champ magnétique rotatif. Le nombre de paires de pôles du moteur, et donc sa vitesse de rotation, est déterminée par le mode de couplage des bobines entre elles[13].

Lorsqu'un courant triphasé alimente les enroulements statoriques, un champ magnétique rotatif est généré. La vitesse de rotation de ce champ est proportionnelle à la fréquence du courant d'alimentation. Ce champ magnétique rotatif traverse l'entrefer, la zone d'air séparant le stator du rotor, et induit des courants dans le rotor. L'interaction entre les champs magnétiques du stator et du rotor entraine la rotation du rotor, générant ainsi le couple moteur.

I.3.4.2. Rotor

Le rotor est constitué d'un empilage de tôles minces en acier au silicium, isolées entre elles pour minimiser les pertes par courants de Foucault. Ces tôles sont assemblées en forme de cylindre et clavetées sur l'arbre du moteur, assurant une liaison mécanique robuste et un transfert efficace du couple.La technologie du rotor distinguedeux grandes familles de moteurs asynchrones :« le rotor à cage d'écureuil et les moteurs à bagues intègrent un bobinage triphasé »[13].

Le rotor à cage d'écureuil est La solution la plus simple et la plus répandue. Il se compose de barres conductrices en cuivre ou en aluminium insérées dans les encoches des tôles et reliées par des anneaux courts aux extrémités. Cette conception robuste et économique offre une bonne tenue au démarrage et une grande fiabilité.

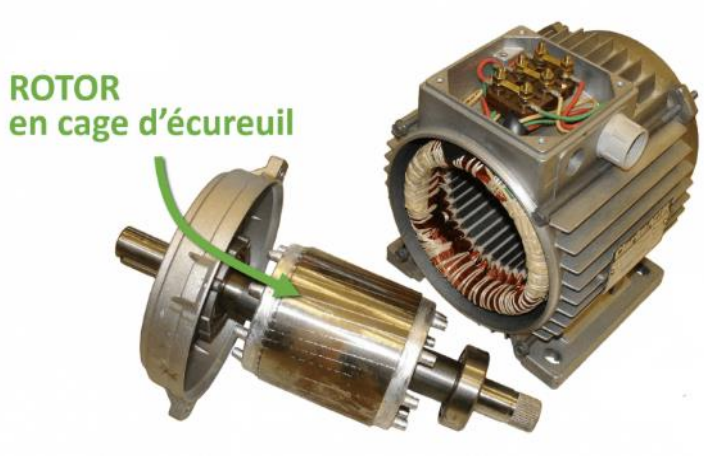


Figure I.14. Retor en cage d'écureuil.

Pour des applications plus exigeantes en termes de vitesse variable et de couple, les moteurs à bagues intègrent un bobinage triphasé réparti dans les encoches des tôles. Ce bobinage est connecté à des bagues collectrices situées aux extrémités de l'arbre, permettant une connexion à un rhéostat ou à un variateur de vitesse.

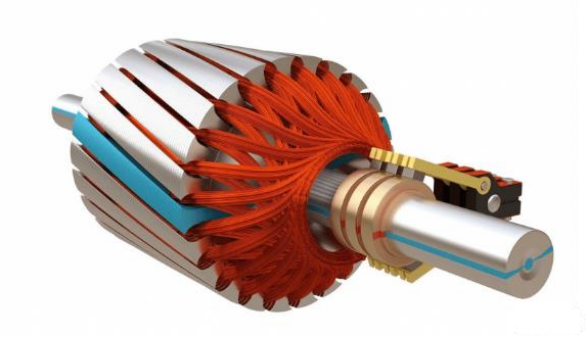


Figure I.15. Retor en cage d'écureuil.

La mince espace d'air séparant le stator du rotor, dit l'entrefer, joue un rôle crucial dans le fonctionnement du moteur. Son épaisseur, généralement de l'ordre du millimètre, doit être rigoureusement contrôlée pour garantir un flux magnétique optimal et minimiser les pertes. La faible épaisseur de l'entrefer rend sa taille sensible aux variations dues aux encoches statoriques.Ces variations d'entrefer créent des harmoniques d'encoches, des perturbations indésirables dans le champ magnétique. Pour les atténuer, les encoches statoriques sont souvent fermées par des cales magnétiques. Ces cales, généralement en acier doux, permettent de maintenir le bobinage statorique et de lisser le champ magnétique, réduisant ainsi les harmoniques d'encoches et améliorant l'efficacité du moteur.

I.3.4.3. Organes mécaniques

Les organes mécaniques du moteur asynchrone jouent un rôle crucial dans son fonctionnement en assurant la structure, la transmission de puissance et le refroidissement du moteur. Leur conception robuste et leur fabrication précise garantissent la fiabilité et la longévité du moteur dans des conditions d'utilisation variées[14].

La carcasse constitue l'enveloppe externe du moteur, offrant un support structurel et une protection contre l'environnement extérieur. Elle est généralement fabriquée en fonte ou en alliage d'aluminium, matériaux robustes et résistants à la corrosion. La carcasse assure également la dissipation thermique, permettant l'évacuation de la chaleur générée par le moteur pendant son fonctionnement[15].

L'arbre, élément central de la transmission de puissance, relie le rotor au système d'entraînement ou à la charge. Il comprend une partie centrale qui sert de support au corps du rotor et est soutenu par un ou plusieurs paliers. Ces paliers, généralement à roulements, assurent la libre rotation du rotor en minimisant les frottements et les vibrations. Le second palier est souvent libre pour permettre les dilatations thermiques de l'arbre dues aux variations de température.

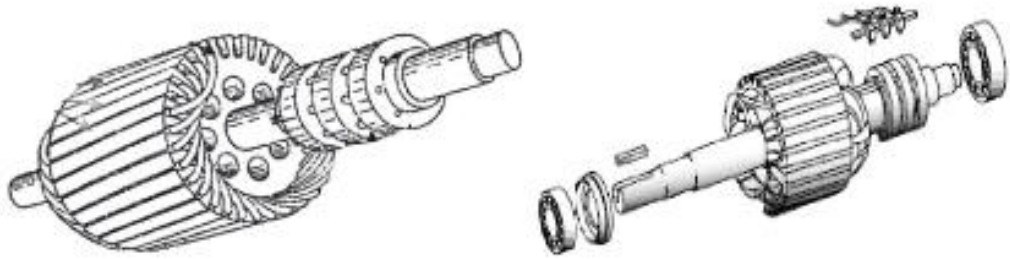


Figure I.16. Représentation schématique de l'arbre du rotor.

Les deux paliers jouent un rôle essentiel dans le support du rotor et le maintien de sa rotation fluide. Ils sont généralement constitués de roulements à billes ou à rouleaux, offrant une faible résistance au frottement et une grande longévité. Pour les machines de petite et moyenne puissance, des paliers à bague lisse peuvent être utilisés. L'isolation électrique de l'un des paliers est parfois nécessaire pour éliminer les courants parasites dans l'arbre dus aux dissymétries des réluctances du circuit magnétique.

Figure I.17. Roulements à billes.

Dans la plupart des moteurs asynchrones, un ventilateur de refroidissement est intégré pour assurer une dissipation efficace de la chaleur. Ce ventilateur, généralement axial, aspire l'air ambiant et le dirige à travers les canaux de ventilation du moteur, permettant d'évacuer la chaleur générée par les pertes fer et cuivre. La taille et la vitesse du ventilateur sont déterminées par la puissance du moteur et les conditions de fonctionnement.

Figure I.18. Ventilateur en plastique.

I.3.5. Caractéristiques du moteur asynchrone

I.3.5.1 Caractéristiques électromécaniques du moteur asynchrone

Les caractéristiques électromécaniques du moteur asynchrone, telles que la puissance nominale, la vitesse nominale, le couple moteur et le rendement, sont des paramètres essentiels pour définir ses performances et choisir le moteur adapté à une application spécifique. La compréhension de ces caractéristiques permet d'optimiser l'utilisation du moteur et de garantir son fonctionnement efficace et durable [16].

- **Puissance nominale : La force motrice du moteur**

La puissance nominale, exprimée en kilowatt (kW), représente la puissance mécanique disponible sur l'arbre du moteur à sa vitesse nominale. Cette valeur, également appelée puissance utile, définit la capacité effective du moteur à fournir du travail mécanique. La puissance d'un moteur électrique est intimement liée à son dimensionnement, notamment à sa hauteur d'axe, et dépend également de sa vitesse de rotation.

- **I.3.5.2 Vitesse nominale : Une cadence de rotation définie**

La vitesse nominale correspond à la vitesse de rotation de l'arbre du moteur à sa puissance nominale. Il est important de distinguer cette vitesse de la vitesse du champ tournant du stator, appelée vitesse de synchronisme (n_s). La relation entre ces vitesses est donnée par la formule :

$$N_s = F \times P (Eq.I.11)$$

Où :N_s est la vitesse de synchronisme, en tours par minute (tr min^{-1}), F est fréquence du réseau (Hz) et P est nombre de paires de pôles du moteur (Kw).

Il est important de noter que la vitesse de rotation du rotor est toujours légèrement inférieure à celle du champ tournant. L'écart entre ces deux vitesses, appelée glissement, est nécessaire au fonctionnement du moteur asynchrone. Il est exprimée par l'expression suivante expression :

$$g = \frac{N_s - N_R}{N_s} = 1 - \left(\frac{N_R}{N_s}\right) (Eq.I.12)$$

- **I.3.5.3 Couple moteur : La force motrice à l'arbre**

Le couple moteur, noté exprimé en newton-mètres (N.m), représente la force de rotation générée par le moteur sur son arbre. Cette force est directement liée à la puissance mécanique délivrée par le moteur. La relation entre le couple (C) et la puissance nominale (P) est donnée par la formule :

$$C = \frac{2 \times \pi \times N_n}{60} (Eq.I.13)$$

avec : C est le couple moteur (N.m),P est la puissance nominale (kW), N_s est la vitesse de synchronisme, en tours par minute (tr min^{-1}).

- **I.3.5.4 Intensité nominale : Un indicateur de consommation**

L'intensité nominale, exprimée en ampères (A), représente la valeur du courant absorbé par le moteur à sa puissance nominale et pour une tension d'alimentation donnée. Cette valeur dépend du couplage des enroulements du moteur et est généralement indiquée sur la plaque signalétique du moteur.

- **I.3.5.5Facteur de puissance (cos ϕ) et rendement (η) : Des indicateurs d'efficacité**

Le facteur de puissance (cos ϕ) et le rendement (η) sont deux indicateurs clés de l'efficacité énergétique du moteur asynchrone. Le facteur de puissance représente le rapport entre la puissance active (puissance réellement utilisée par le moteur) et la puissance apparente (puissance totale absorbée par le moteur). Un facteur de puissance élevé (proche de 1) indique une meilleure utilisation de l'énergie électrique.

Le rendement (η), exprimé en (%), représente le rapport entre la puissance mécanique utile fournie par le moteur (Pu) et la puissance électrique absorbée (Pe). Il traduit la capacité du moteur à convertir l'énergie électrique en énergie mécanique utile. Un rendement élevé indique un moteur plus efficace.

$$\eta = (\frac{P_u}{P_e}) \times 100 (Eq.I.14)$$

où : η est le rendement du moteur (%), Pu : puissance mécanique utile (kW) et $P_e$puissance électrique absorbée, en kilowatt (kW).

Le rendement d'un moteur asynchrone varie en fonction de sa charge et de sa vitesse de rotation. Il est généralement plus élevé aux environs de la puissance nominale et de la vitesse nominale.

Il est important de noter que le rendement et le facteur de puissance du moteur asynchrone varient en fonction de sa charge et de sa vitesse de rotation. Ils sont généralement plus élevés aux environs de la puissance nominale et de la vitesse nominale.La puissance utile (Pu) sur l'arbre d'un moteur asynchrone triphasé peut être calculée à l'aide de la formule suivante :

$$P_u = \sqrt{3} \times U \times I \times \cos\varphi \times \eta (Eq.I.15)$$

où :U est la tension d'alimentation (V), I est l'intensité nominale (A) et cos φest facteur de puissance.

I.3.5.2 Caractéristiques de fonctionnement : Caractéristique couple- Vitesse

La relation entre le couple développé par un moteur asynchrone et sa vitesse de rotation est fondamentale pour comprendre son fonctionnement et choisir le moteur adapté à une application spécifique. Cette relation, appelée caractéristique couple-vitesse, n'est pas linéaire et est mieux représentée par une courbe que par une simple équation.

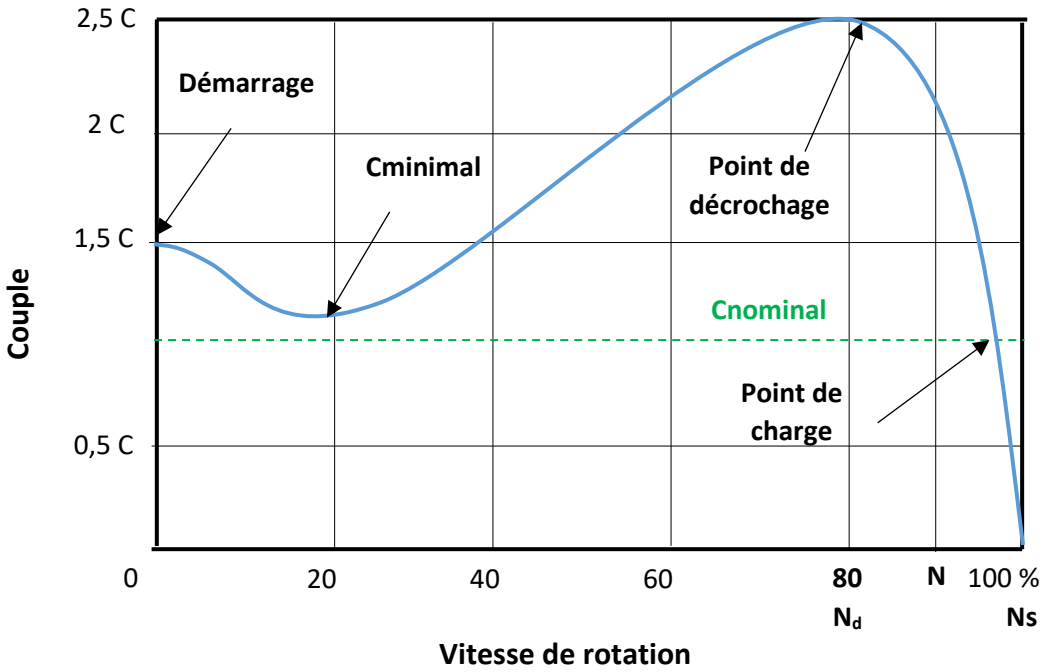


Figure I.19. Courbe couple-vitesse de rotation du moteur asynchrone a cage d'écureuil.

Considérons un moteur à cage alimenté par une source triphasée à tension et fréquence constantes. En augmentant progressivement la charge mécanique sur le moteur, sa vitesse de rotation diminue graduellement. Cependant, lorsque le couple résistant atteint une valeur critique appelée couple de décrochage, la vitesse chute subitement et le moteur s'arrête.

L'observation de la courbe couple-vitesse (Figure I.19) pour un moteur de 1 kW de construction conventionnelle révèle plusieurs points clés :

- **Couple de démarrage:** Le couple maximal que le moteur peut fournir au démarrage est de 1,5 fois le couple nominal (C).
- **Zone de variation du couple:** A mesure que la vitesse augmente, le couple diminue initialement jusqu'à un minimum, puis connait une légère hausse avant d'atteindre un pic à 2,5 fois le couple nominal (2,5C) à 80% de la vitesse de synchronisme (Ns).
- **Point d'opération normal:** Le point (C, n) sur la courbe représente le fonctionnement normal du moteur à pleine charge, avec un couple de C et une vitesse de n.
- **Couple nul à vitesse synchrone:** A la vitesse de synchronisme (Ns), le couple du moteur devient nul, indiquant l'impossibilité de fournir un couple supplémentaire.
- **Influence de la puissance:** Les moteurs de petite puissance (≤10 kW) atteignent leur couple de décrochage à environ 80% de Ns, tandis que les machines de grande puissance (≥1000 kW) décrochent à une vitesse proche de 0,98 Ns.
- **Variation selon la conception:** La forme exacte de la courbe couple-vitesse dépend de la taille du moteur et de ses caractéristiques de conception spécifiques.

I.3.6. Régimesde fonctionnement

Les trois modes de fonctionnement possibles sont représentés sur la courbe du couple en fonction du glissement précédente. Ces modes sont représentées par les digramme illustré par la figure (I.20)

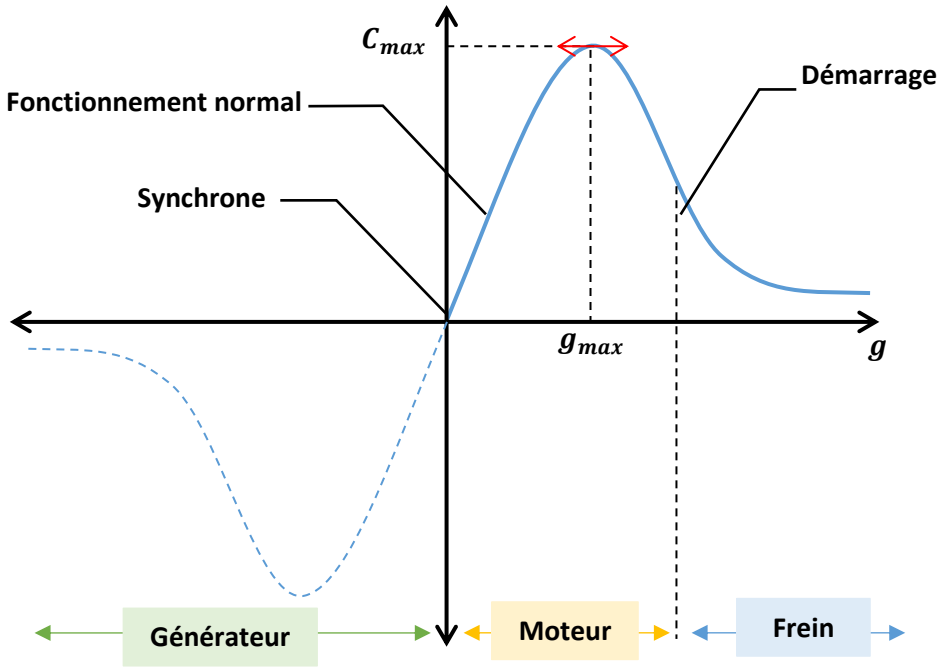


Figure I.20. Différents types de régime de fonctionnement d'un moteur asynchrone a cage d'écureuil en fonction de glissement et le couple.

- **Fonctionnement en générateur :** Lorsque g<0, le couple C<0 et la machine transforme l'énergie mécanique en énergie électrique, dans le pratique, les générateurs Asynchrones sont assez rarement utilisées
- **Fonctionnement en Moteur :** Lorsque 0<g<1, la machine fournit un couple positif c>0, g compris au démarrage (g=1), et transforme de l'énergie électrique en énergie mécanique, il fonctionne en moteur. Dans le pratique, le moteur polyphasé à induction fonctionne avec une valeur faible de glissement, dans la zone linéaire voisine du point de synchronisme.
- **Fonctionnement en frein :** Lorsque g>1, la machine fonctionne en frein électrique ce qui signifie qu'elle absorbe l'énergie électrique fournie par le réseau pour la transformer en une puissance mécanique négative.

I.3.7. Stabilité de fonctionnement

La stabilité de fonctionnement en traçant Courbe de variation du couple électromagnétique en fonction du glissement 5 (figure I.21).

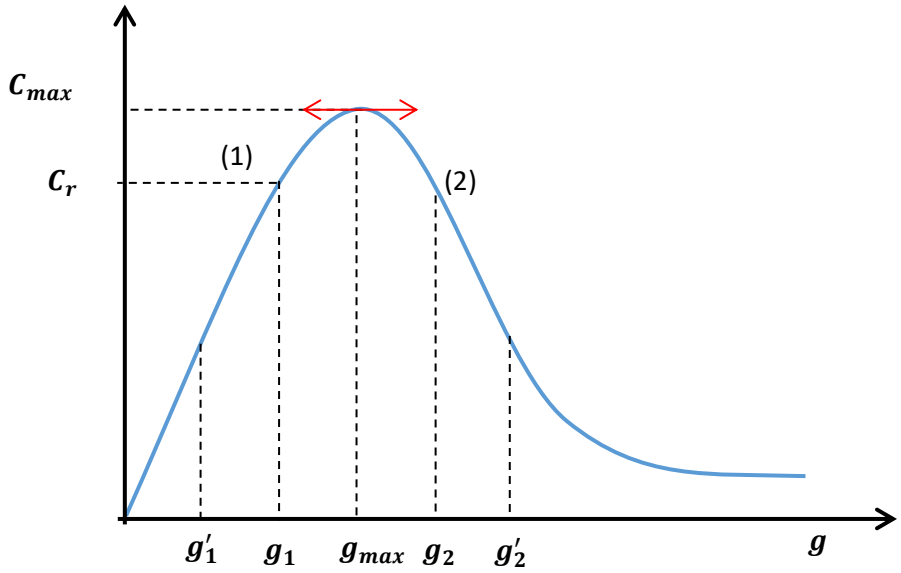


Figure I.21. Courbe de variation du couple électromagnétique en fonction du glissement.

$$C_e = C_r + \left(\frac{J \times dw}{dt}\right) (Eq.I.16)$$

Avec , C_e est couple électromagnétique,C_r est couple résistant du mécanisme entraîné,J est le moment d'inertie de la partie tournant,w est la vitesse et t est le temps .Pour que le moteur soit stable dans les point (1) et (2) il faut qu'il réponde à la variation de la charge pour maintenir la vitesse constante.

$$\left(\frac{Dw}{dt}\right) = 0$$

Si on accélère le moteur au point 1, le glissement diminue ainsi que le couple moteur $(g'_1 < g_1)$. Par conséquent,$C_e - C_r < 0$ et la dérivé de la vitesse sera une valeur négative.

$$(\frac{Dw}{dt}) < 0$$

Donc, la vitesse diminue et atteint la valeur initiale correspondant au glissement g, pour le quel $C_e = C_r$.Dans le cas contraire, quand on freine le moteur par rapport à la vitesse correspondante à g, le couple électromagnétique sera supérieur au couple résistant, donc :

$$\left(\frac{Dw}{dt}\right) < 0$$

la vitesse, dans ce cas, augmente jusqu'à la vitesse initiale correspondant au glissement g. Donc le point 1 est le point de fonctionnement stable du moteur Asynchrone.

Si on accélère le moteur au point 2 la vitesse continuera à augmenter jusqu'à ce que le couple résistant soit égale au couple électromagnétique. Dans le cas contraire (freinage) par rapport à g_2 le glissement du moteur continuera à diminue même jusqu'à l'arrêt complet du moteur. Donc le point 2 est le point de fonctionnement instable du moteur.

Le fonctionnement stable du moteur Asynchrone correspond au : $0 < g < g_{cr}$.

I.3.8. Choix de l'accouplement

Les accouplements servent à la transmission des moments et des puissances entres deux arbres coaxiaux, parallèles où concourants. On distingue suivant eaux, parallèles con les accouplements permanents et les accouplement temporaires. Dans les accouplements permanents la liaison ne peut être interrompe. Ils sont repartis en :

- **Accouplement rigides :** qui ne rattrapent pas les erreurs d'alignement des arbres.
- **Accouplement mobiles :** ils assurent la liaison d'arbres présentant des mes alignements latéraux ou angulaires où encore subissant un déplacement axial.

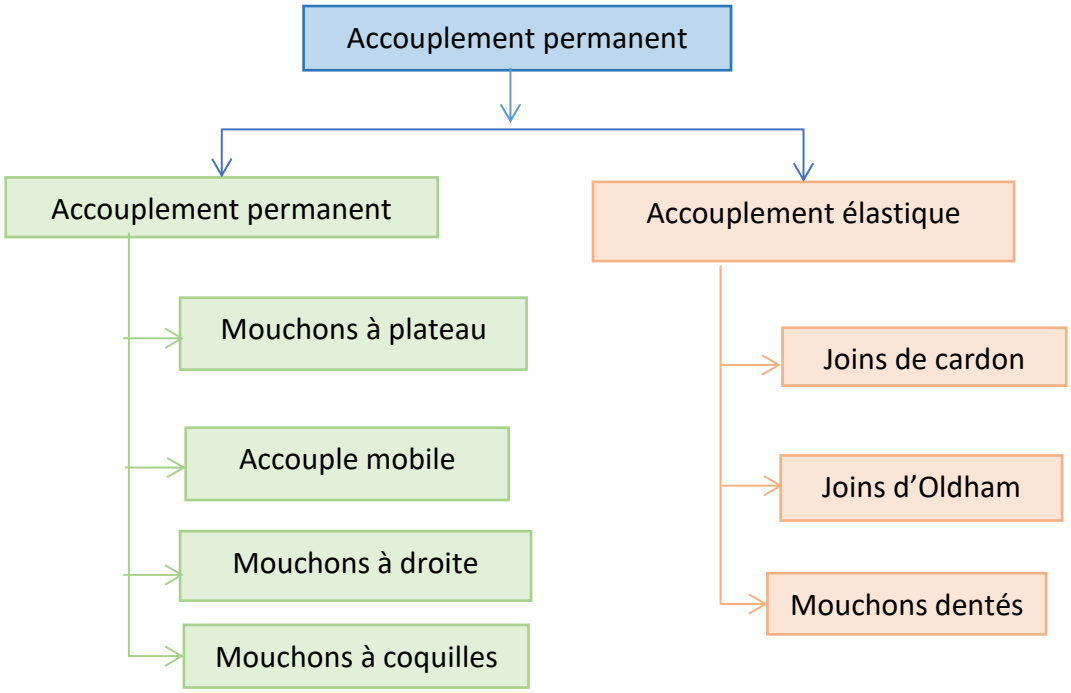


Figure I.22.classification des accouplements permanents.

Les accouplements temporaires permettent l'entraînement des mécanismes à fonctionnement intermittent on température. Lors du choix ou de la conception d'un accouplement, en plus des considérations relatives à la fiabilité, à la sécurité au prix, il faut tenir compte aussi des critères suivants :

- L'accouplement doit être monté sans difficulté et si possible sans déplacement axial des arbres.
- Le poids de l'accouplement ainsi que sont moment d'inertie doivent être facile.

Le type de commande dépend de l'environnement physique et fonctionnel. Les différents types d'accouplement permanents sont représenté sur la figure I.22.

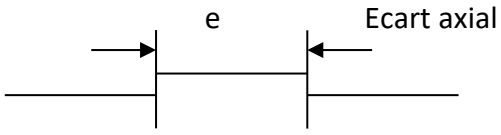
L'alignement parfait des arbres, qui est un critère impératif pour les approchements fixés, est très sèves mestibleoffendiser d'une manière approchée.

L'imprécision relative aux arbres accouplement due défauts à fabrication inévitable évolue sous L'action des déformations provoquées par les charges, températures, etc...

Ce sont les raisons pour le quelles les accouplements fixés ne sont pas employés pour ce cas là.

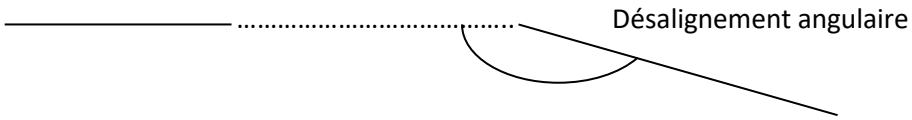
Les déplacements relatifs éventuels des arbres a accoupler :

• Ecart axial : aucun déplacement relatif (accouplement rigide).



•Désalignement radial : un déplacement relatif est possible (accouplement de Oldham).

•Désalignement angulaire :déplacement relatif possible (accouplement flexible).



•Ecart angulaire : tout déplacement relatif ;mai avec une limitation élastique (accouplement élastique).

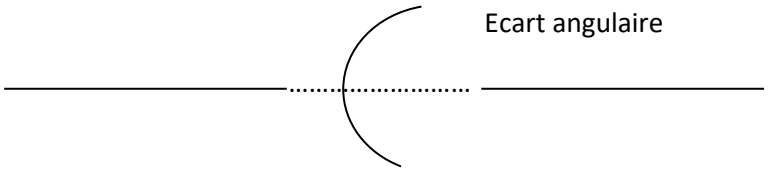


Figure I.23. Les déplacements relatifs éventuels des arbres a accoupler.

Référence bibliographique

[1] C. E. Aouadi et A. Kerkour, « Analyse du risque industriel Cas du bac de stockage d'ammoniac T-101 et pipeline FERTIAL-ANNABA », Badji Mokhtar Annaba, Annaba,

2019. [En ligne]. Disponible sur: file:///C:/Users/RALVA/Documents/PFE-Master-HSI-Aouadi-et-Karkour-2019-2020.pdf
[2] M. Said, « Etude de la cavitation dans une pompe centrifuge », Université SAAD DAHLAB de BLIDA, 2014.
[3] « Rapport su le port de Annaba », OMS, Demographie Algérienne. Consulté le: 31 mai 2024. [En ligne]. Disponible sur: https://openjicareport.jica.go.jp/pdf/11038148_06.pdf
[4] « Le Port, un axe de soutien stratégique ». Fertial News, 14 juin 2013.
[5] S. KHALDI, « ETUDE DES DIFFERENTES METHODES, DE MAINTENANCE D'UNE POMPE CENTRIFUGE », UNIVERSITÉ IBN-KHALDOUN DE TIARET, 2017.
[6] L. Mansouria et B. Nadia, « ETUDE DE COMPARAISON ENERGETIQUE D'UN GROUPEMENT DE POMPES A FLUIDE INCOMPRESSIBLE : EN SERIE ET EN PARALLELES », Université Abdel Hamid Ben Badis – Mostaganem, 2019.
[7] D. B. Abdelkarim et P. K. Abdallah, « Analyse Des Causes De Défaillance des Pompes Centrifuges », Université de Badji Mokhtar Annaba, 2021. [En ligne]. Disponible sur: https://biblio.univ-annaba.dz/ingeniorat/wp-content/uploads/2022/03/5.-Memoire-DJEBABLA-Basma-DJELLALI-Badis-M2-Maint-2021.pdf
[8] A. Lawal, « Etude de la fiabilité de la pompe centrifuge 105 de l'unité d'hydrocraquage », Université Sidi Mohammed Ben Abdellah -Fès, 2020. Consulté le: 8 juin 2024. [En ligne]. Disponible sur: https://www.academia.edu/37335978/Universit%C3%A9_Sidi_Mohammed_Ben_Abdellah_F%C3%A8s_MEMOIRE_DE_PROJET_DE_FIN_DETUDES_Etude_de_la_fiabilit%C3%A9_de_la_pompe_centrifuge_105_de_lunit%C3%A9_dhydrocraquage_34
[9] « Energies | Free Full-Text | Fault Identification and Classification of Asynchronous Motor Drive Using Optimization Approach with Improved Reliability ». Consulté le: 8 juin 2024. [En ligne]. Disponible sur: https://www.mdpi.com/1996-1073/16/6/2660
[10] R. Mujal-Rosas, O. Aragones, X. Colom, et A. Rolan, « Behavior of the Three-Phase Induction Motor With Spiral Sheet Rotor », *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 24, p. 68-76, mars 2009, doi: 10.1109/TEC.2008.2005283.
[11] R. Mujal-Rosas et J. Orrit-Prat, « General Analysis of the Three-Phase Asynchronous Motor With Spiral Sheet Rotor: Operation, Parameters, and Characteristic Values », *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 58, p. 1799-1811, juin 2011, doi: 10.1109/TIE.2010.2051397.
[12] D. D'Urso, F. Chiacchio, D. Borrometi, A. Costa, et L. Compagno, « Dynamic failure rate model of an electric motor comparing the Military Standard and SvenskaKullagerfabriken (SKF) methods », *Procedia Computer Science*, vol. 180, p. 456-465, janv. 2021, doi: 10.1016/j.procs.2021.01.262.
[13] « Three-phase asynchronous motors Generalities and ABB proposals for the coordination of protective devices », 2009. Consulté le: 8 juin 2024. [En ligne]. Disponible sur: https://www.semanticscholar.org/paper/Three-phase-asynchronous-motors-Generalities-and-of/5d43658dbc4bf04b730a432e0592fd32d8fd9921
[14] « Single Phasing Simulation of Asynchronous Motor | Semantic Scholar ». Consulté le: 8 juin 2024. [En ligne]. Disponible sur: https://www.semanticscholar.org/paper/Single-Phasing-Simulation-of-Asynchronous-Motor-Kocman-Demel/1911a6b6637ed56fff74df0b2e1dd38d0870f461
[15] « composition of motor asynchronous. thesis – Recherche Google ». Consulté le: 8 juin 2024. [En ligne]. Disponible sur: https://www.google.com/search?q=composition++of+motor+asynchronous.+thesis&tb

m=isch&ved=2ahUKEwj74rPS_MyGAxXuRaQEHZwgDYIQ2-cCegQIABAA&oq=composition++of+motor+asynchronous.+thesis&gs_lp=EgNpbWciKmNvbXBvc2l0aW9uICBvZiBtb3RvciBhc3luY2hyb25vdXMuIHRoZXNpc0jZcVC7CVjxZ3AAeACQAQCYAYIEoAGlJKoBCjAuMjYuMy41LTG4AQPIAQD4AQGKAgtnd3Mtd2l6LWltZ4gGAQ&sclient=img&ei=OtBkZvvdD-6LkdUPnMG0kAg&bih=607&biw=1366&prmd=isvnbmtz&rlz=1C1GCEA_enDZ1047DZ1047&hl=fr#imgrc=2r_Ti6ALK8GD_M

[16] K. G. Sabbir, « Response Analysis of Large Induction Motors at Different Voltages and Frequencies ». Consulté le: 9 juin 2024. [En ligne]. Disponible sur: https://www.researchgate.net/publication/237707895_Response_Analysis_of_Large_Induction_Motors_at_Different_Voltages_and_Frequencies

Documentation de l'entreprise.

Cour d'hydraulique, B-NEKRASSOR.

Machine hydraulique, ANTAL. THUMA.

Schématique de l'électrotechnique.

Machine Electrique II, KOSTINKO.

Guide de la maintenance

DANIEL BOITEL - CLAUDE HAZARD.

NATHAN et AFNOR 1984.

Partie II :
Partie pratique

Partie II : Partie pratique

II.1 Matériel est méthode

Le chargement de l'ammoniac les navire citernes, au port de Annaba, se fait en utilisant un pompe centrifuge, ces caractéristiques sont les suivant :

- Le débit réel ($Q_{réel}$) de pompe est de de 75 m³ h ;
- La masse volumique de l'NH_3 à -5°C est 386 Kg/m³ ;
- La hauteur réel de teoulement($H_{réel}$) est de 250 m ;
- Une puissance réel de la pmpe($P_{réel}$) de 34,89 KW.

La figure II.1 illustre un la compétition de la pompe 110J à travers une représentation schématique.

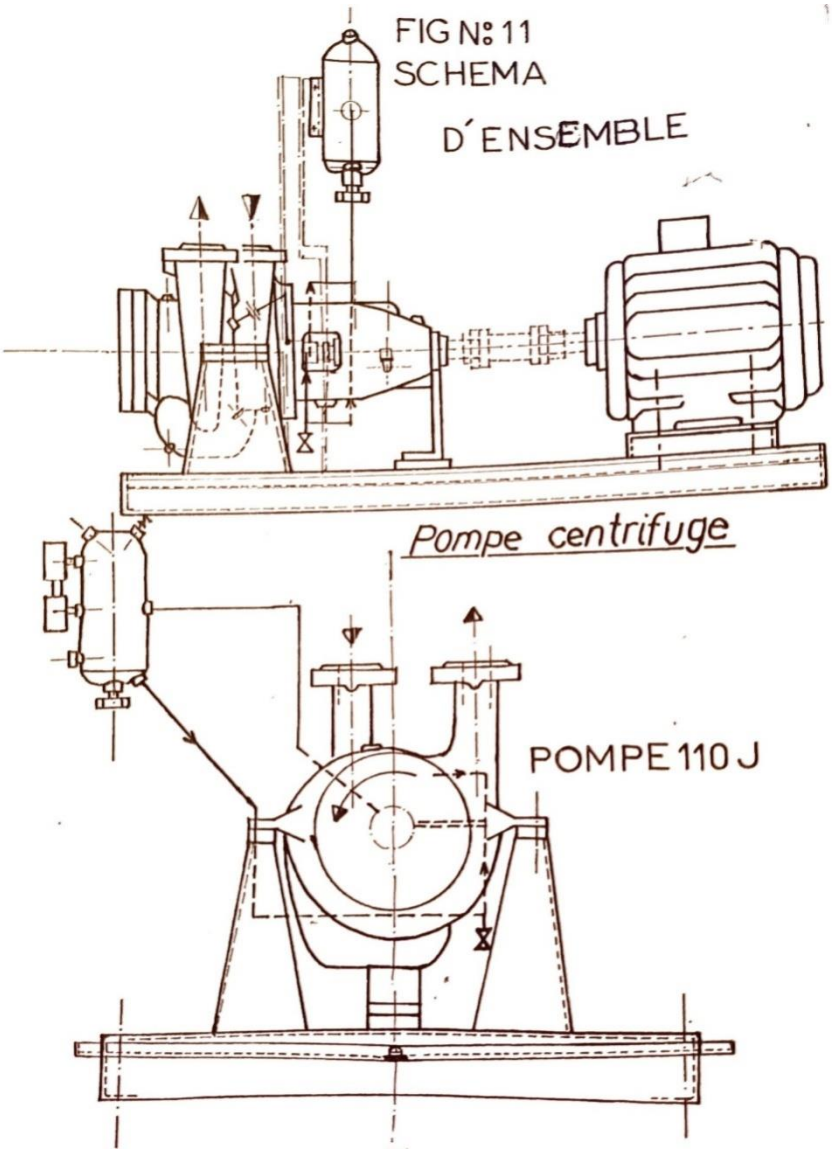


Figure II.1. Représentation schématique de la pompe centrifuge 110J.

La présente étude s'intéresse à la validation d'un moteurasynchrone a cage d'écureuil. Ces caractéristiques, tirées partir de son catalogue, sont présentées par le tableau II.1.

Tableau II.1. Caractéristique du moteur donnée par le catalogue.

Caractéristique	Abréviation	Unité	valeur
Puissance nominal	P_n	KW	55
intensité	I_n	A	104
Vitesse nominal	N_n	$tr\ min^{-1}$	2965
Vitesse de synchronisme	N_s	$tr\ min^{-1}$	
Rendement	η	%	91
	N_s	-	2.2
Inertie	J	$Kg\ m^{-2}$	0.48
Masse	m	Kg	430

II.2 Résultats et discussion

II.2.1 Validation de la puissance requise pour la pompe de chargement d'ammoniac

II.2.1.1Calcul de la puissance de la pompe 110J

Le calcul de la puissance transmît au fluide est nécessaire pour s'assure que le moteur asynchrone possède la puissance et le couple nécessaires pour les opérations de chargement de l'ammoniac. Il est effecteur en se basant sur la formule suivante :

$$P_{réel} = p\ \times g \times H_{réel} \times Q_{réel} (Eq.II.1)$$

$$P_{réel} = 34.89$$

Il est a considéré que la masse volumique du fluide ρ est d'environ 386 Kg/m³, la hauteur réel de la charge $H_{réel}$ est de 250 m et le débit réel de la pompe($Q_{réel}$)est de 75 m³ h. La pompe nécessite une puissance réel $(P_{réel})$ de 34,89 KW fonctionner efficacement.

II.2.1.2 Calcul de la puissance du moteur

Le moteur asynchrone choisi doit pouvoir fournir au moins la même puissance de la pompe, avec une marge de sécurité pour couvrir les variations de charge. La puissance du moteur peut être calculer en s'appuyant sur la relation suivante :

$$P_C = \frac{1.1 \times \rho \times H_{réel} \times P_{réel}}{\eta_{réel} \times 3.6 \times 10^6} \ (Eq.II.2)$$

le chiffre 1,1 représente le coefficient de sécurité, $P_{réel}$ est la puissance réel du moteur et de 75 W, est le rendement réel $(\eta_{réel})$du moteur est à 82 %.

$$P_C = \frac{1.1 \times 63 \times H_{réel} \times P_{réel}}{\eta_{réel} \times 3.6 \times 10^6}$$

L'application numérique de l'équation donne :

$$P_C = \frac{1.1 \times 683 \times 9.81 \times 75}{0.82 \times 3.6 \times 10^6} = 46{,}6\text{KW}$$

La puissance normalisée du moteur est de 55 KW, dont les caractéristiques sont données dans le tableau II.2 qui correspond à celle du moteur assurant l'entraînement de la pompe. La puissance calculer est inférieur à la puissance nominale ; donc le choix du moteur dans l'installation est bon.

II.2.2 Détermination de la caractéristique du moteur Asynchrone

La détermination de la caractéristique du moteur asynchrone se repose sut la méthode de Kloss, cette-ci est exprimée par la formule suivante :

$$C = \frac{2C_{max}}{\frac{g}{g_{cr}} + \frac{g_{cr}}{g}} \ (Eq.II.3)$$

Où, C_{max} est le couple maximal du moteur, g_{cr} est le glissement critique et g est glissement nominal. Le couple maximal (λ) est déterminer par l'expression :

$$\lambda = \frac{C_{max}}{C_n} = 2.2 \ (Eq.II.4)$$

$$C_{max} = \lambda C_n = 2.2 \ C_n (Eq.II.5)$$

Avec, $C_n$et couple nominal développé lors de la marche en charge et λ est le coefficient de surcharge. $C_n$peut-être calculer de la manière suivante :

$$C_n = \frac{60 \times P_n}{2\pi \times N_n} (Eq.II.6)$$

$$C_n = \frac{60 \times 55 \times 10^3}{2 \times 3.14 \times 2965}$$

$$C_n = 179 \ N.m$$

En remplacnt la valeur de C_n dans $(II.5)$, la valeur de C_{max} est détérmiée.

$$C_{max} = \lambda C_n = 2.2 \ C_n (Eq.II.7)$$

$$C_{max} = 387{,}2 \ \text{N.m}$$

Le glissement critique g_{cr} se calcul d'après la formule suivante :

$$g_{cr} = g_n \left[\lambda + \sqrt{\lambda^2} - 1\right] \ (Eq.II.8)$$

Avec g_n est glissement nominal exprimée par la relation suivante :

$$g_n = 1 - (\frac{N_R}{N_s})(Eq.II.9)$$

Avec N_s est vitesse de synchronisme et $N_n$est la vitesse nominal. L'Application numérique de cette équation donne :

$$g_n = 1 - \left(\frac{2965}{3000}\right) = \ 0{,}0117 = \ 1{,}17\%$$

Le remplacement de la valeur de $g_n$dans l'equation$(II.9)$ donne

$$g_{cr} = 0{,}0117 \ \left[2{,}2 + \sqrt{(2{,}2)^2} - 1\right]$$

$$g_{cr} = \ 0{,}048\ \%$$

En utilisant la formule de Kloss$(Eq.II.3)$et on variant le glissement g, on obtiendra les valeurs des couples correspondant :

Tableau II.2. Couple en fonction de glissement.

g_{cr}	0,001	0,002	0,005	0,008	0,01	0 ,03
C (N.m)	16,1	32,2	79,8	125,5	154,6	348
g_{cr}	0.048	0,05	0,07	0,4	0,8	11
C (N.m)	387,2	361,18385	353,14	91,686	4346,53	34,7

Le traçage de la courbe g_{cr} permet d'avoir l'allure présenté par la figure II.2.

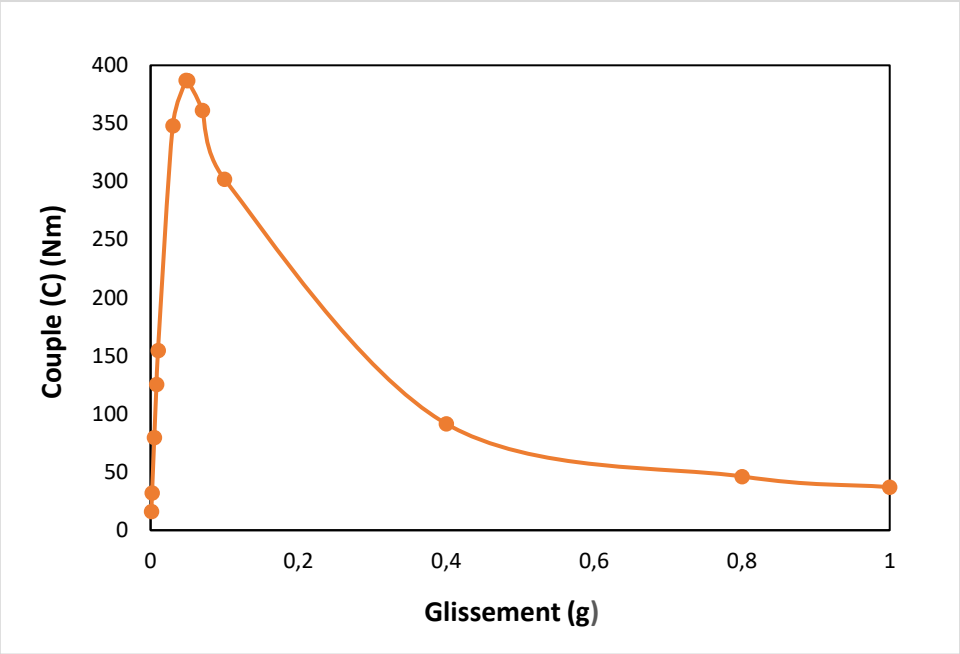


Figure II.2. Courbe du couple en fonction de glissement.

II.2.3.Vérification de conditions de moteur

II.2.3.1. Conditionsde surcharge

La vérification de surcharge est essentielle pour éviter toute surchauffe du moteur, provoquant des dommages aux enroulements, à l'isolation et à d'autres composants, menant à une défaillance prématurée du moteur. Il empêche la génération excessive de la chaleur qui provoque un incendie.

Pour que cela sera validé, il faut que surcharge donnée par le catalogue du moteur ($\lambda_{\text{catalogue}} = 2.2$) soit inférieur ou égale à celle déterminer à partir de la courbe du couple en fonction de glissement ($\lambda_{\text{calculer}}$)(Figure II.2).

$$\lambda_{\text{calculer}} \leq \lambda_{\text{catalogue}} \ (Eq.II.10)$$

Dans cas de cette étude, cette condition est vérifiée car la valeur de λ_{courb}, estimée à :

$$\lambda_{\text{calculer}} = \frac{387,2}{176}$$

$$\lambda_{\text{calculer}} = \leq \ 2,2$$

En respectant les situations de surcharge, la durée de vie de votre moteur est considérablement prolongée.

II.2.3.2 Conditionsde démarrage

La vérification des conditions de moteur permet de s'assurer que le moteur peut démarrer sans surcharger le réseau et sans causer de dommages mécaniques. En effet, le moteur peut

générer un courant trop élève qui conduit au sur-chauffage du moteur. De plus, un couple excessif de démarrage peut brusquer la charge mécanique et endommager le moteur ou la machine connectée. Ceci conduit à la diminution de l'efficacité énergétique du moteur en augmentant les pertes de puissance pendant la phase de démarrage.

La capacité du moteur à démarrer et à vaincre la résistance de la charge au moment du démarrage est représenté rapport K_s ce dernier peut être calculer la formule suivante :

$$K_s = \left(\frac{C_d}{C_n}\right)_{calculé} \quad (Eq.II.11)$$

Avec C_d est la coupe de départage du moteur. L'application numérique de cette formule donne :

$$K_s = \frac{97{,}7}{179} = 0.19$$

Pour vérifier les conditions de démarrage d'un moteur asynchrone, il faut que les donnée K_s calculer soit inférieur ou égale à $K_s$donnée par le catalogue. Ceci est exprimée par la figure suivante :

$$\left(\frac{C_d}{C_n}\right)_{calculer} = \left(\frac{C_d}{C_n}\right)_{cataloge} \quad (Eq.II.12)$$

En effet, la valeur de $K_s$donnée par le catalogue est égale a 1.7 soit supérieur ou égale au K_s calculer ce qui permet de conclure que le démarrage du moteur est bon.

II.2.5 Détermination du couple résistant de la pompe

Le couple résistant de la pompe (Cr)représente la force s'opposant à la rotation du rotor de la pompe et empêchant le débit du fluide. Sa détermination est une étape cruciale dans le processus de validation d'un moteur d'entraînement pour une application de pompage. En effet, elle peut être calculer par l'équation (II.10) dans un régime de fonctionnement nominal de la pompe (N_n) de 2965 tr/min.

$$C_r = \frac{P_n}{W_n} \ (Eq.II.13)$$

Avec, $W_n$représente la vitesse angulaire du moteur rd s^{-1}. Celle-ci peut être déterminer à partir de la formule (Eq.II.14).

$$W_n = \frac{2 \times \pi \times N_n}{60} \ (Eq.II.14)$$

L'application numérique de la

$$W_n = \frac{2 \times \pi \times 2965}{60}$$

$$W_n = 10 \text{ rd } s^{-1}$$

La détermination de la valeur de W_n permet de calculer la valeur de Cr. L'application numérique de la formule $(Eq.II.13)$ est comme suivant :

$$C_r = \frac{55 \times 10^{-3}}{310}$$

$$C_r = 177\ Nm$$

Cependant, le moteur doit être capable de fournir un couple suffisant pour surmonter la résistance de la pompe et assurer le débit et la hauteur de refoulement requis. Ce paramètre représente la force générée par le moteur pour faire tourner son arbre. Pour valider le choix d'un moteur pour une application de pompage, il est nécessaire de comparer le couple du (C_{177})moteur au couple résistant de la pompe (C_r).

II.2.3.Vérification de la contrainte de torsion

La torsion est la force de rotation appliquée à l'arbre du moteur. Si la contrainte de torsion dépasse la capacité de l'arbre, cela peut entraîner des défaillances mécaniques catastrophiques, telles que la rupture de l'arbre ou des dommages aux roulements.La vérification de la contrainte de torsion permet de s'assurer que l'arbre du moteur est suffisamment robuste pour supporter les charges appliquées pendant le pompage d'ammoniac. Cela garantit la sécurité du personnel et évite des réparations coûteuses. Cette dernière est vérifiée en utilisant la relation suivante :

$$\tau = \frac{2 \times C_n \times K}{\pi \times D_1^2 \times \delta} (Eq.II.15)$$

C_n est couple nominal (176 Nm), K est coefficient qui tient compte du frottement qui est égale de 2.5,D_1est diamètre extérieur dans le flasque qui vaut 80mm.δ est déplacement radiale admissible de 2mm est la contrainte admissible de 80 N/mm². L'application numérique de cette équation donne :

$$t = \frac{2.176 \times 2{,}5 \times 10^3}{\pi \times 80^2 \times 2} = 21{,}89 \quad N/mm^2$$

On remarque que la contrainte admissible calcule est inférieur à la valeur admissible (qui est de 80). Donc on conclue que la condition est vérifié.

Conclusion

Le présent travail vise àvalider l'utilisation le moteur asynchrone a cage d'écureuil pour l'alimentation d'une pompe pour le chargement des citerne-navire par l'ammoniac liquide au port de Annaba. Les principaux résultats sont :

- Le calure la puissance requise pour la pompe de chargement d'ammoniac a monté que les puissances de du moteur est légèrement supérieur par rapport à la puissance de la pompe.
- La détermination conditions de moteur ont prouvé que les conditions de démarrage et de surcharges calculer son comparable àcette donnée parle catalogue du moteur.
- Détermination du couple résistant de la pompe le couple moteur au couple résistant de la pompe sont comparable.
- Lors de la vérification de la contrainte de torsion, la contrainte admissible calcule est inférieur à la valeur admissible (qui est de 80).

A partir de ces, il peut êtredéduitle moteur asynchrone a cage d'écureuil étudier est peut alimenter, avec toute sécurité, la pompe centrifuge 110Jpour le chargement des citerne-navire par l'ammoniac liquide.