

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE



UNIVERSITE SAAD DAHLAB DE BLIDA 1
FACULTE DE TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT DE MECANIQUE

Projet de Fin d'Etudes pour l'obtention du Diplôme de Master
en Génie Mécanique
Option : Installations Energétiques et Turbomachines

Fondamentaux du Turbo-expander pour la protection cathodique

Mémoire Réalisé par :

MENADI FAIÇAL

Promoteur :

Pr. BOUSSAD BOUMEDDANE

Co-Promoteur :

M. KHALFI MOHAMED

Année universitaire 2021/2022

DEDICACE

C'est avec un très grand honneur que je dédie ce modeste travail aux personnes les plus chères au monde, mes chers parents pour leur amour et bonté et que sans eux je n'aurai jamais pu atteindre mon objectif, qu'ALLAH me les garde. Qui ne vient pas d'offres fatigué pour ceux qu'imitaient mes chaînes bonheur tissés de son cœur à ma chère Mère et mon Père.

Pour leur amour de l'être dans mes veines et médite leur mémoire de mon cœur à mes frères et Sœurs.

Nous avons marché ensemble pour partir, et nous trouvons notre chemin ensemble vers la réussite et de la créativité à, nous compose la main dans la main nous en prenons la fleur et j'ai appris à mes Amis et Collègues.

REMERCIEMENTS

On tient à remercier avant tout le bon dieu , le tout puissant de nous avoir donné la force ,la volonté et la patience nécessaire pour la réalisation de ce modeste travail.

*Nous tenons à remercier et à exprimer notre profonde gratitude à notre promoteur **Mr Boumeddane Boussad** ,et mon co-promoteur **Mr KHALFI MOHAMED** pour tout le temps qu'il nous a consacré.*

On vous remercie pour tout : votre gentillesse, votre disponibilité, vos conseils et surtout votre confiance qui nous a permis d'exprimer notre compétence durant ce travail.

*On voudrait également exprimer nos vifs remerciements aux **membres de jury** pour avoir accepté d'évaluer notre travail et pour le temps et les orientations accordées.*

*Nos remerciement vont également à l'ensemble des enseignants du **département génie Mécanique**.*

*On voudrait aussi exprimer notre profonde gratitude à **mes parent** pour leur soutien moral et leur encouragement prodigué pendant tous ces années d'études.*

*Notre reconnaissance va également à tous **nos amis**.*

RESUME

La corrosion cause chaque année des pertes matérielles considérables à l'industrie, en particulier dans les champs pétrolifères ou lorsque le gaz naturel est transporté par pipeline.

L'objet de cette étude est de dimensionner un système de **protection cathodique** dans les canalisations enterrées par soutirage de courant par **Turbo expander**.

Ce mode de protection nécessite une alimentation électrique, lorsque ces réseaux sont éloignés de l'appareil à protéger. L'utilisation de turboexpander est essentielle pour protéger les structures traversant des zones désertiques.

L'efficacité et la rentabilité d'un procédé utilisant un turbodétendeur dépendent principalement de la bonne utilisation de ce dernier.

Elle doit faire l'objet de recherches en ingénierie et doit tenir compte des techniques de conception et de sélection des systèmes.

Mots clés : Corrosion, Protection cathodique, Turbo expander, Alimentation électrique.

ABSTRACT

Corrosion causes considerable material losses to industry each year, particularly in oilfields or when natural gas is transported by pipeline.

The purpose of this study is to size a cathodic protection system in buried pipelines by current withdrawal by Turbo expander.

This mode of protection requires a power supply, when these networks are far from the device to be protected. The use of turboexpander is essential to protect structures crossing desert areas.

The efficiency and profitability of a process using a turboexpander depends mainly on the proper use of the latter. It must be the subject of engineering research and must take into account the techniques of design and selection of systems.

Keywords: Corrosion, Cathodic protection, Turbo expander, Power supply.

المخلص

يتسبب التآكل في خسائر مادية كبيرة للصناعة كل عام ، لا سيما في حقول النفط أو حيث يتم نقل الغاز الطبيعي عبر خطوط الأنابيب. الغرض من هذه الدراسة هو قياس نظام الحماية الكاثودية في خطوط الأنابيب المدفونة عن طريق السحب الحالي بواسطة الموسع التوربيني يتطلب وضع الحماية هذا مصدر طاقة ، عندما تكون هذه الشبكات بعيدة عن الجهاز المراد حمايته. استخدام التوربيني الموسع ضروري لحماية الهياكل التي تعبر المناطق الصحراوية. تعتمد كفاءة وربحية العملية باستخدام الممدد التوربيني بشكل أساسي على الاستخدام الصحيح للأخير. يجب أن يكون موضوع بحث هندسي ويجب أن يأخذ في الاعتبار تقنيات تصميم واختيار الأنظمة

الكلمات المفتاحية: تآكل ، حماية كاثودية ، موسع تربو ، مزود طاقة

TABLE DES MATIERES

Introduction Générale

Chapitre1 Généralité sur la corrosion et la protection cathodique

| | |
|--|----|
| Introduction..... | 1 |
| 1.Définition..... | 1 |
| 1.2 Processus de corrosion..... | 2 |
| 1.3 Types de la corrosion..... | 4 |
| 1.4 Protection contre la corrosion des conduites souterraines..... | 5 |
| 1.4.1 Protection passive par revêtements..... | 6 |
| 1.4.1.2 Principe de la protection passive par revêtement..... | 6 |
| 1.4.2 Protection active (protection cathodique)..... | 6 |
| 1.4.2.1 Principe de la protection cathodique..... | 7 |
| 1.4.2.4 Type de protection cathodique..... | 7 |
| a) protection par anode sacrificielles..... | 7 |
| b) protection par soutirage de courant imposé..... | 8 |
| b.1 Installation d'un poste de P.C à courant imposé..... | 9 |
| Conclusion..... | 11 |

Chapire 2 Présentation du Turbo expander

| | |
|---|----|
| Introduction..... | 13 |
| 2.1 Origine et develeppement..... | 13 |
| 2.2 Description de la turbo expander..... | 13 |
| 2.3 Application de turboexpander..... | 14 |
| 2.3.1 Production de l'electricité..... | 14 |
| 2.3.2 La réfrigération..... | 15 |
| 2.3.3 Production d'energie..... | 16 |
| 2.7 Principaux caractéristiques d'un Turboexpander..... | 16 |
| 3.1 Les composente d'un Turboexpander..... | 17 |
| 3.2 Comment Fonctionent les Turboexpander..... | 18 |

| | |
|--|----|
| 3.3 Les Principaux composants de la section centrale de rotation (MCS) | 18 |
| 3.3.1 Aubes directrices à admission variable (IGV) | 19 |
| 3.3.2 Roue d'expansion et compresseur..... | 20 |
| 3.3.3 Arbre..... | 21 |
| 3.3.4 Garniture (joint d'etanchiété de l'arbre) | 22 |
| 3.3.5 Les Roulements magnétique actifs..... | 23 |
| 3.3.6 Palier lisses et butée | 23 |
| 3.3.7 Joint d'etanchiété de boitiers..... | 24 |
| 3.3.8 Diffuseur de compresseur..... | 24 |
| 3.3.9 Vanne de Déclanchement de l'expander et écran d'admission..... | 25 |
| 3.3.10 Sondes de Vibration..... | 25 |
| 3.4 Les Dispositifs de base de syteme..... | 26 |
| 3.5 Fonctionnement du systeme de lubrification..... | 27 |
| 3.6 Pousse axilae et systeme egalisateur ATB..... | 27 |
| 3.6.1 Systeme égalisateur de la pousse axiale ATB..... | 28 |
| 3.6.2 Fonctionnement du systeme ATB..... | 29 |
| 3.7 Evaluations et réparations du Turboexpander..... | 31 |
| 3.8. Avantage d'un Turboexpander..... | 32 |
| 3.9 Inconvénients d'un Turboexpander..... | 32 |
| Conclusion..... | 33 |

Chapitre 3 Etude Thurmodynamique

| | |
|--|----|
| Introduction..... | 35 |
| 4.1 Notion thermodynamique..... | 35 |
| 4.1.1 Evolution isentropique et réelle d'un gaz parfait..... | 35 |
| 4..1.1.1 Lois d'évolution – coefficient isentropique..... | 35 |
| 4.1.1.2 Température en fin d'évolution isentropique..... | 36 |
| 4.1.1.3 Evolution réelle d'un gaz parfait..... | 36 |
| 4.1.2 Evolution isentropique et réelle d'un gaz réel..... | 37 |
| 4.2 Notions relatives au calcul de rendement..... | 38 |
| 4.2.1 Rendement Isentropique..... | 38 |

| | |
|---|----|
| 4.2.2 Rendement polytropique..... | 39 |
| 4.2.3 Rendement dans le compresseur..... | 40 |
| 4.2.4 Méthode de calcul des enthalpies et des entropies..... | 42 |
| 4.2.4.1 Calcul d'enthalpie et d'entropie H1, S1 à l'entrée de l'expander..... | 42 |
| 4.2.4.2 Calcul d'enthalpies et entropie de décharge H2, S257..... | 42 |
| 4.3 Calcul de rendement de Turbo expander..... | 43 |
| 4.3.1 Les paramètres et la composition du gaz de process..... | 43 |
| 4.3.2 Calcul des entropies et enthalpies à l'entrée du Turbo Expander..... | 43 |
| 4.3.3 Calcul des enthalpies isentropique à la sortie de Turbo-Expander..... | 44 |
| 4.3.4 Calcul de rendement isentropique..... | 46 |
| 4.3.5 Description du logiciel HYSYS..... | 46 |
| 4.3.5.1 Calcul de rendement polytropique..... | 47 |
| Conclusion..... | 49 |

Conclusuin Générale

LISTE DES FIGURES

| | |
|--|-----------|
| Figure 1.1: Phénomène de corrosion dans une cellule de corrosion..... | 2 |
| Figure 1.2 : Corrosion caverneuse..... | 5 |
| Figure 1.3: Corrosion érosion..... | 5 |
| Figure 1.4 : Corrosion par pique..... | 5 |
| Figure 1.5 : Corrosion galvanique..... | 5 |
| Figure 1.6: Principes de la protection par anodes sacrificielles..... | 8 |
| Figure 1.7 : Principe de la protection par courant imposé..... | 9 |
| Figure 2.1 : Principe d'un système de production électrique..... | 15 |
| Figure 2.2 : Le principe d'un système de réfrigération..... | 15 |
| Figure 2.3 : Shéma d'un Turbo expander..... | 16 |
| Figure 3.1: Les trois composant d'un Turbo-expander..... | 17 |
| Figure 3.2 : Fonctionnement d'un Turbo-expander..... | 18 |
| Figure 3.3: Les principaux composants de la section centrale..... | 19 |
| Figure 3.4 : Aube directrice d'entrée variable (IGV)..... | 20 |
| Figure 3.5 : Roue d'expansion..... | 20 |
| Figure 3.6: Roue de compresseur..... | 21 |
| Figure 3.7 : Arbre..... | 22 |
| Figure 3.8 : Les labyrinthes du turbo-expander..... | 22 |
| Figure 3.9 : Roulement magnétique..... | 23 |
| Figure 3.10 : Les paliers de turbo-expander..... | 24 |
| Figure 3.11 : Diffuseur de compresseur..... | 25 |
| Figure 3.12 :Vanne de déclanchement de l'expandeur..... | 25 |

| | |
|--|-----------|
| Figure 3.13: Chemine d'huile de lubrification du réservoir au refoulement des Pompes..... | 27 |
| Figure 3.14 : direction des forces axiales exercées sur la surface des roues..... | 28 |
| Figure 3.15 Un système automatique de palier de butée (ATB)..... | 29 |
| Figure 3.16 Egalisateur de poussée axiale Poussée vers le compresseur..... | 29 |
| Figure 3.17 Egalisateur de poussée axiale Poussée vers la turbine..... | 30 |
| Figure 4.1 : Diagramme H-S coté expander..... | 37 |
| Figure 4.2 : Diagramme H-S coté compresseur..... | 41 |
| Figure 4.3 : Variation de l'entropie en fonction de la température $S = f(T)$..... | 45 |
| Figure 4.4 : Variation de l'enthalpie en fonction de la température $\Delta H = f(T)$..... | 45 |
| Figure 4.5 : La variation de rendement de Turbo expander en fonction de la température de sortie..... | 48 |

LISTE DES TABLEAUX

| | |
|--|-----------|
| Tableau 4.1 : L'enthalpie et l'entropie à l'entrée de T.E à (T = -24.5°C, P = 57 bar)..... | 43 |
| Tableau 4.2 : L'enthalpie et l'entropie à la sortie de T.E à (T = -72.8°C, P = 16.6 bar)... | 44 |
| Tableau 4.3 : Valeurs des entropies et enthalpies à l'entrée et à la sortie de TE..... | 44 |
| Tableau 4.4 : Les résultats à l'aide d'une simulation sur Aspen HYSYS..... | 47 |
| Tableau 4.5 : Le rendement isentropique et polytropique de TE..... | 47 |

INTRODUCTION GENERALE

La protection cathodique par soutirage de courant est l'une des techniques les plus efficaces de lutte contre la corrosion des canalisations enterrées.

Ce mode de protection nécessite une source d'énergie électrique. Lorsque l'on dispose, à proximité, d'un réseau de distribution, le transfo-redresseur est d'usage. Le problème se pose en cas d'éloignement de tels réseaux des installations à protéger. Dans le cas de la protection d'ouvrages traversant des zones désertiques, l'utilisation de turbo expander s'impose. L'efficacité et la rentabilité d'un procédé utilisant un turbo expander dépend essentiellement de la bonne exploitation de ce dernier doit faire l'objet d'une étude d'engineering qui doit tenir compte le technique pour la conception et le dimensionnement du système.

L'objet de cette étude est de dimensionner un système de **protection cathodique** d'un pipeline par soutirage de courant par **Turbo expander** .

Le présent travail est divisé en trois chapitres :

Le premier chapitre introduire les généralité sur le phénomène de corrosion et leurs causes et les types et les formes ...etc,et la protection cathodique pour la prévention de la corrosion des conduites souterraines, et les différentes formes passives et active , le principe de fonctionnement du proction active par courant impose.

Nous exposons dans le deuxième chapitre la presentation de Turbo expander et leur qualité et caractéristique et leur application (extraction d'hydrocarbures liquides du gaz naturel,la production d'énergie et d'électricité et la réfrigération ..).

Dans le troisième chapitre nous voulons voir la conception de cet ensemble, exige une très haute précision dans les tolérances de fonctionnement, et de qualité des matériaux de fabrication.

Dans quatrième chapitre rassemble les calculs, les résultats, etude thermodynamique, calcul du rendement et simulation du Turbo Expander sur **Aspen HYSYS** et leurs interprétations.

Nous terminerons ce mémoire par une conclusion générale.

Introduction

La corrosion entraîne chaque année des pertes matérielles considérables pour l'industrie surtout le domaine pétrolier. Plus grave encore, la corrosion peut causer des dommages irréversibles à l'environnement et même des pertes en vie humaine.

De nombreux ouvrages métalliques, tels les canalisations de gaz, et de pétrole, les pipelines et les bacs de stockage de brut sont détériorés par la corrosion que l'on peut définir comme étant la destruction d'un métal par réaction chimique ou électrochimique.

La corrosion des aciers est la plus répandue et apparaît comme un mal mystérieux, associant un milieu, ou l'un de ses composants, un métal, et diverses formes de dommages.

La Vue l'importance du problème de la corrosion à l'échelle mondiale et sa présence dans les ouvrages de transport du Gaz par canalisation de **GRTG**, on a choisit d'étudier les techniques de prévention et de contrôle de ce phénomène. La protection cathodique permet de protéger un métal contre la corrosion. L'application de cette technique de protection a pour but de diminuer le potentiel de polarisation du métal à un niveau pour lequel la vitesse de corrosion du métal est réduite de façon significative. Le seuil de protection cathodique peut être déterminé thermodynamiquement.

1. Définition

Le terme corrosion provient du latin *corrodere*, qui signifie ronger, attaquer.

La corrosion affecte tous les métaux. Elle résulte d'interactions physico-chimiques entre le matériau et son environnement entraînant des modifications de propriétés du métal souvent accompagnées d'une dégradation fonctionnelle de ce dernier (altération de ses propriétés mécaniques, électriques, etc....).

La corrosion correspond au retour de la matière à son état le plus stable. Dans le cas de fer, par exemple, la forme stable dans la nature n'est pas le métal mais l'oxyde, c'est pourquoi une pièce en acier exposée sans protection à une atmosphère humide tend à se transformer en rouille (oxyde de fer hydratés).

La corrosion est dite sèche lorsque la dégradation d'un matériau dans un environnement chimiquement réactif sous l'effet d'une haute température, et éventuellement de contraintes mécaniques.

La corrosion humide est le résultat d'une réaction électrochimique, (une réaction est un échange - gain ou perte - de particules) dont les particules proviennent d'une électrode métallique et d'un électrolyte qui réagissent au contact l'un de l'autre.[1]

1.2 Processus de corrosion

La corrosion du métal est un processus de destruction qui s'effectue généralement par action chimique ou électrochimique. La surface métallique est attaquée par son milieu et se transforme en composé d'oxyde, en sel ou en autre composé. Il s'agit d'une circulation de courant électrique produite sous l'échange d'électrons à l'interface de métal /électrolyte par l'intermédiaire des réactions chimiques. Les réactions d'oxydation (corrosion) se produisent sur les surfaces anodiques du métal alors que les réactions de réduction se produisent sur les surfaces cathodiques permettant ainsi de créer des piles galvaniques.[2]

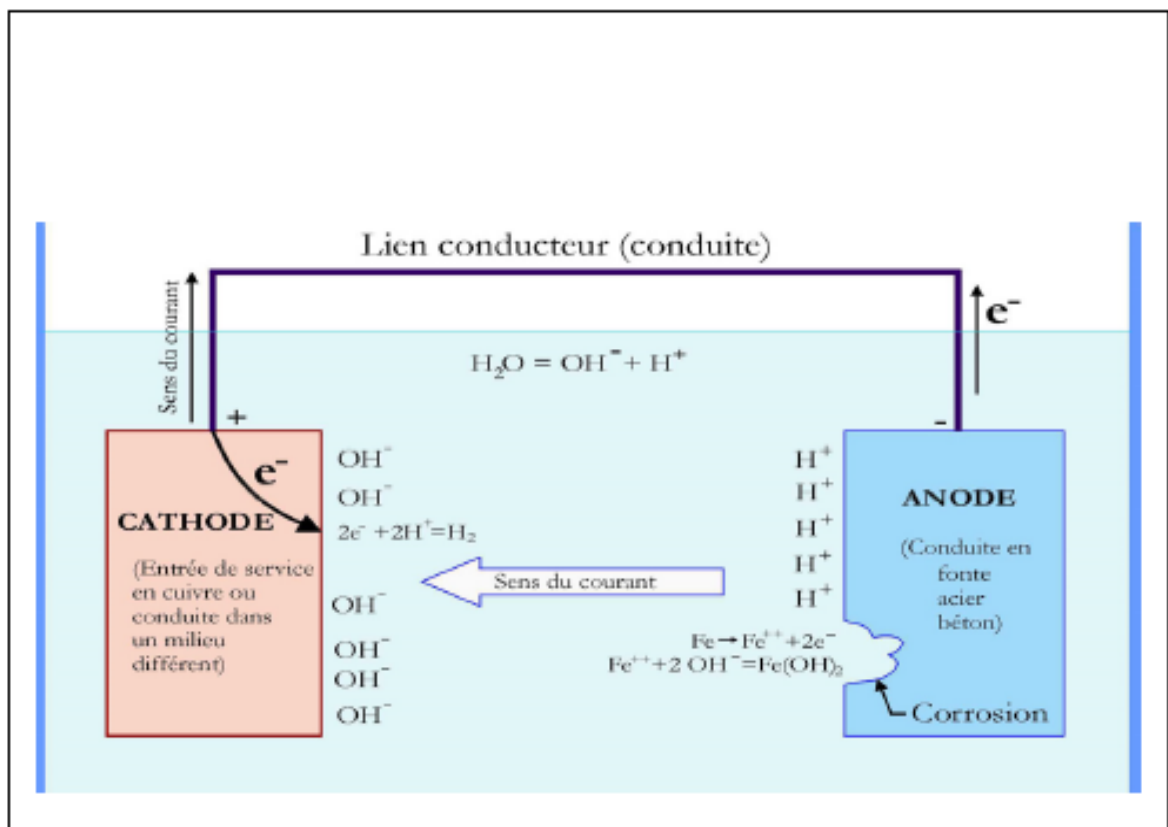
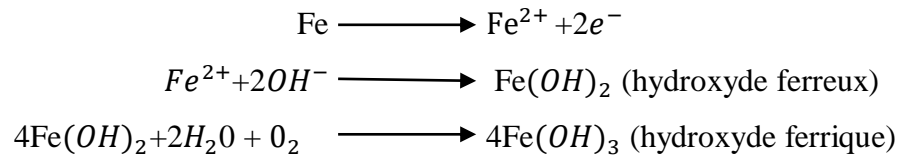


Figure 1.1 Phénomène de corrosion dans une cellule de corrosion[2]

Par ailleurs, le phénomène de dissolution ne se produit que lorsque les quatre éléments ciaprès sont présents.

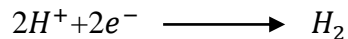
a) La zone anodique : Elle est le siège de la réaction d'oxydation. À cet endroit, le métal s'oxyde et libère des ions dans l'électrolyte laissant derrière lui une perte d'électrons ce qui entraîne la corrosion de la structure métallique aux endroits appelés zones anodiques.[2]

Le mécanisme réactionnel de cette réaction chimique est décrit par les réactions suivantes :



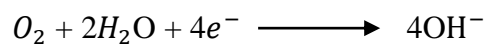
b) La zone cathodique : Il s'agit du siège de la réaction de réduction où les ions présents dans l'électrolyte sont réduits sur la surface de la cathode. La réaction de réduction des ions d'hydrogène présents dans l'eau est celle qui se produit le plus souvent en formant.[2]

le gaz d'hydrogène selon le processus chimique suivant :



En présence de sols aérés, une autre possibilité de réaction chimique peut avoir lieu à la cathode. C'est la réduction des atomes d'oxygène dissous dans l'électrolyte qui se produit

selon la réaction suivante:



c) L'électrolyte : est un composé permettant le passage du courant électrique par déplacement d'ions quand il est à l'état liquide ou en solution aqueuse. En l'occurrence, le sol a la capacité de conduire un courant électrique entre l'anode et la cathode et provoquer la dissociation d'une molécule en ions.[2]

d) Le chemin métallique : Il nécessite non seulement une zone anodique mais aussi une zone cathodique qui coexiste avec la première. Ces deux zones doivent être électriquement reliées entre elles par un milieu conducteur tel que la conduite.

Le phénomène de corrosion est alors établi comme étant un processus électrochimique permettant aux électrons libérés de circuler entre la zone anodique et la zone cathodique.[3]

1.3 Types de la corrosion :

Il existe plusieurs types de corrosion :

a- Corrosion uniforme : c'est la forme la plus commune caractérisée par une réaction chimique ou électrochimique qui se produit uniformément sur toute la surface considérée. Donc c'est une perte de matière plus ou moins régulière sur toute la surface. Cette attaque est observée sur les métaux exposés aux milieux acides. [4]

b- Corrosion galvanique : Elle peut se définir simplement par l'effet résultant du contact de deux métaux ou alliages différents dans un environnement corrosif conducteur on utilise aussi le terme de bimétallisme.

Lors d'un couplage entre deux métaux ou alliages qui diffèrent par leur potentiel de corrosion, il va s'établir un courant électro chimique entre eux résultant du court-circuit formé. On observe généralement un accroissement de la corrosion de l'alliage le moins noble et diminution ou suppression de la corrosion de l'alliage le plus noble. [4]

c- Corrosion caverneuse : Est due à une différence d'accessibilité de l'oxygène entre deux parties d'une structure, créant ainsi une pile électrochimique. Cette attaque sélective du métal est observée dans les fissures et autres endroits peu accessibles à l'oxygène. [4]

d- Corrosion par piqûres : Cette forme de corrosion est particulièrement insidieuse. L'attaque se limite à des piqûres, très localisées et pouvant progresser très rapidement en profondeur, alors que le reste de la surface reste indemne. L'installation peut être perforée en quelques jours sans qu'une perte de poids appréciable de la structure apparaisse. [4]

e- Corrosion sous contrainte : Est une fissuration du métal qui résulte de l'action commune d'une contrainte mécanique et d'une réaction électrochimique. [4]

f- Corrosion-érosion : Cette corrosion est produite par le mouvement relatif d'un fluide corrosif et d'une surface métallique. [4]



Figure 1.2 : Corrosion Caverneuse [4]



Figure 1.3: Corrosion érosion [4]



Figure 1.4 : Corrosion par Piqure [4]



Figure 1.5 : Corrosion Galvanique [4]

1.4 Protection contre la corrosion des conduites souterraines

L'application des procédures de protection contre l'évolution de la corrosion sur les conduites des réseaux est indispensable. En terme de prévention, il existe quatre moyens pour lutter contre la corrosion, à savoir :

- **Choix du matériel de fabrication des conduites :** Cette étape vient en priorité du fait qu'elle donne l'avantage au réseau de mieux résister aux conditions opérationnelles et environnementales. [2]
- **Application de revêtements :** Ce type de protection a pour but d'isoler la conduite électriquement et d'éliminer tout contact direct avec le milieu environnant. Ainsi, ce revêtement anticipe la formation des cellules de corrosion sur la surface de la conduite. [2]
- **Utilisation des inhibiteurs de corrosion :** Ce type de protection est destiné à la protection des surfaces internes de la conduite métallique. Ils forment une couche passive sur la paroi interne avant d'empêcher la production des cellules de corrosion. [2]
- **Application de la protection cathodique :** La technique de protection repose sur l'injection d'un courant électrique continu permettant d'abaisser le potentiel de la structure métallique à protéger jusqu'à la zone d'immunité. [2]

1.4.1 Protection passive par revêtements :

La protection par revêtement extérieurs vise à isoler le plus parfaitement possible, le métal du milieu ambiant pour prévenir le mécanisme de la corrosion.

Elle consiste à isoler des conduites à protéger du milieu environnant par l'utilisation de revêtement et de raccord isolant. L'isolation de la canalisation doit être la plus soignée possible, afin d'éviter le contact de l'électrolyte avec le métal de la canalisation, elle repose sur l'idée qui vise isoler le métal du milieu ambiant. [5]

D'une manière générale, on considère deux principes permettent d'assurer la protection par revêtement :

- Enrobage pour les conduites enterrées.
- Peinture pour les conduites aériennes.

1.4.1.2 Principe de la protection passive par revêtements

- 1 - l'isolement du métal par rapport au milieu.
- 2 - l'isolement des différents métaux constitutifs d'un réseau.
- 3 - Délimitation de l'ouvrage à protéger cathodiquement.
- 4 - Isolation du réseau des autres structures étrangères enterrées. [5]

1.4.2 Protection Active (Protection Cathodique)

La protection cathodique d'un ouvrage métallique en contact avec un électrolyte consiste à placer cet ouvrage à un potentiel électrique négatif tel que la corrosion devienne thermodynamiquement impossible. Comme valeur de potentiel, au dessous duquel l'acier ne peut se corroder dans un milieu ayant un pH compris entre 4 et 9, on admet le critère de -850mV, mesuré par rapport à l'électrode impolarisable au sulfate de cuivre en solution saturée.

Le principe de la Protection Cathodique trouve son application dans la pile élémentaire ou l'une des électrodes (anode) est toujours corrodée alors que l'autre ne l'est pas. [2]

1.4.2.1 Principe de la protection cathodique :

Le principe de la protection cathodique est d'amener la surface totale de la structure à protéger à être cathode par rapport à l'électrolyte, une anode servant de pièce de consommation.

- Consiste à abaisser le potentiel de l'ensemble de la surface du métal en contact avec l'électrolyte, jusqu'à son domaine d'immunité ou toute corrosion devient négligeable.
- Son principe c'est d'amener la surface totale de la structure à protéger à être cathode/l'électrolyte, une anode servant de pièce de consommation. [4]

1.4.2.2 Type de protection cathodique :

La transformation d'une surface métallique corrodée à une surface protégée catholiquement nécessite de ramener le potentiel naturel de celle-ci vers celui de la zone d'immunité. Pour y parvenir, on doit procéder à une installation d'un système de protection par courant continue dans le même électrolyte. La mise en oeuvre d'un tel système requiert l'application de l'un des deux types d'anodes suivants :

- a) Anodes galvaniques (**sacrificielles**) ayant un potentiel plus électronégatif que le métal à protéger.
- b) Anodes branchées à un générateur électrique assurant la protection par **Soutirage de courant (courant imposée)**. [4]

a) Protection par anodes sacrificielles :

Le principe de la protection cathodique par anode galvanique consiste à créer un couple galvanique entre la conduite à protéger et une anode galvanique.

Les anodes sacrificielles ou galvaniques agissent grâce au couplage galvanique créé naturellement entre le métal de l'ouvrage et des anodes constituées de zinc, d'alliages d'aluminium ou de magnésium, métaux plus électronégatifs. La différence de potentiel naturel entre les métaux crée une circulation de courant ; le potentiel de l'ouvrage diminue, alors que celui de l'anode augmente. L'ouvrage se trouve plus cathodique, donc se corrode moins vite que s'il était seul, et les anodes se corrodent beaucoup plus rapidement que si elles étaient seules. [4]

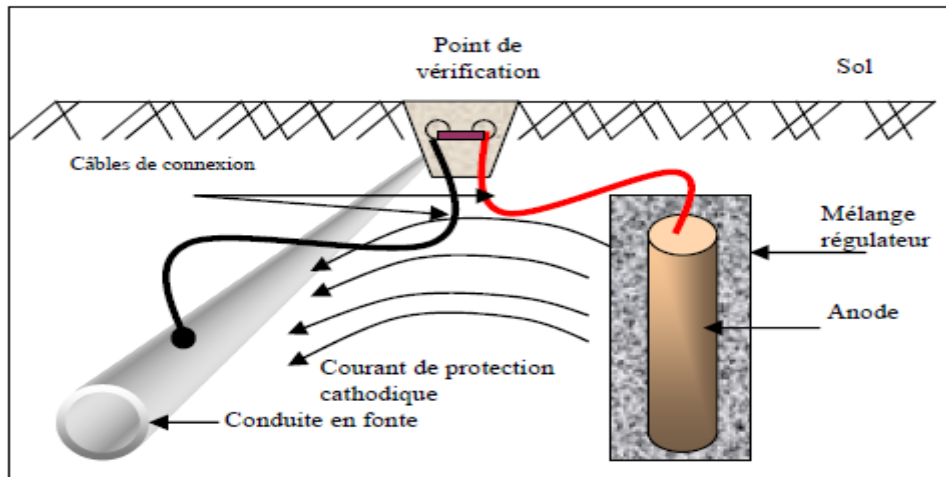


Figure 1.6: Principes de la protection par anodes sacrificielles.[2]

b) Protection par Soutirage de courant imposée

Obtenue en reliant la structure à protéger au pôle négatif d'un Générateur de courant continu, dont le pôle positif est connecté à un déversoir enterré à une certaine distance et servant de pièce de consommation.

Le courant débité par le générateur est diffusé dans le sol par le déversoir, et est capté par la structure à protéger.

Avec la technique de courant imposé, un poste transformateur-redresseur (souvent appelé poste de soutirage) génère un courant continu qui circule entre l'ouvrage et un déversoir anodique constitué d'anodes enfouies ou immergées.

Les métaux principalement utilisés sont l'acier. Le courant sort des anodes (pôle «+» du redresseur) et entre dans l'ouvrage (pôle «-» du redresseur) pour abaisser son potentiel électrochimique.

Ces systèmes sont plus complexes à mettre en œuvre qu'un système par anodes galvaniques, mais présentent de nombreux avantages par ailleurs. Ils ont une durée de vie supérieure, environ 20 ans pour les déversoirs. Un seul poste peut assurer la protection de plusieurs kilomètres de canalisations. Il est nécessaire de disposer d'une parcelle de terrain, proche de l'ouvrage à protéger (entre 50 et 100 mètres), dans laquelle enterrer le déversoir anodique constitué d'anodes, et une source de courant électrique. [4]

La protection par courant imposé (ou de soutirage) utilise une source d'énergie électrique en courant continu qui débite dans un circuit comprenant :

- Un lit d'anodes .
- Un générateur de courant.
- Un Conducteur électrolytique (sol ou eau).

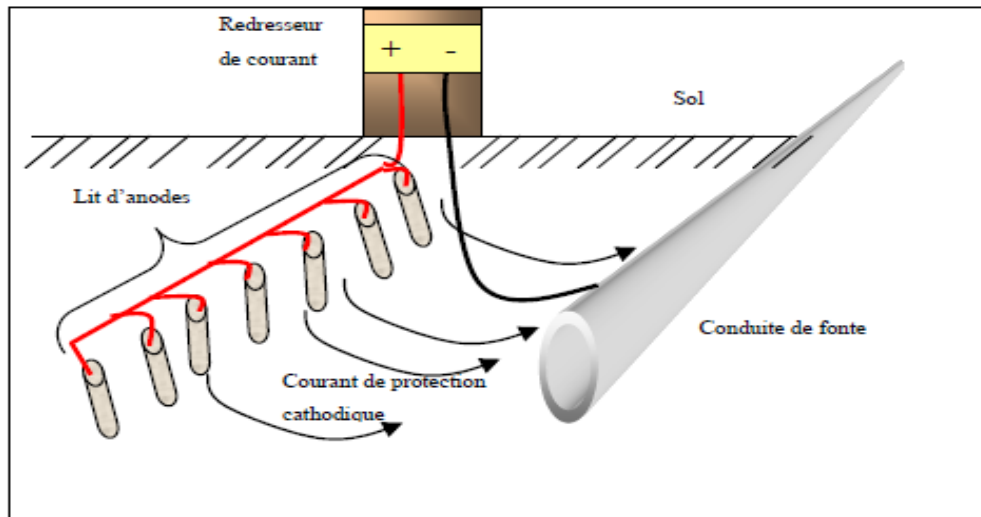


Figure 1.7 Principe de la protection par courant imposé.[2]

b.1 Installation d'un poste de protection cathodique à courant imposé

Une installation de soutirage comprend :

1/ une source d'énergie BT

La basse tension supérieure à 50 volts et inférieure à 1000 volts, ayant une installation dont la puissance est inférieure à 250 kW.

2/ Générateur de courant continu

Ce sont généralement des transfo-redresseurs alimentés à partir du réseau électrique BT

En cas d'absence ou d'éloignement des réseaux électrique, il est intéressant de disposer d'une source autonome d'énergie (Les panneaux solaires photovoltaïques, Les groupes électrogènes, Les thermo générateurs, Les générateurs de type éolien, Piles à combustibles.....) .

3/ Déversoir anodique

Le déversoir anodique est constitué d'un ensemble d'anodes posé verticalement ou horizontalement.

le déversoir sert à injecter le courant de protection cathodique dans le sol, il doit donc être constitué de matériaux conducteurs de courant, se comportant comme une anode, il est soumis aux phénomènes d'oxydation .

4/ Les électrodes de référence :

Pour mesurer le potentiel d'une électrode, on utilise une électrode de référence qui devrait avoir un potentiel reproductible. et être non polarisable (aux faibles intensités de courant, le potentiel ne varie pratiquement pas).

5/ Des câbles de liaisons

Des câbles de liaisons électriques du pôle négatif du redresseur au réseau à protéger, du pôle positif du transfo-redresseur au déversoir et le transfo-redresseur avec la prise de terre.

6/Compteur d'énergie, disjoncteur différentiel 500 mA , prises de courant, mise à la terre.

Un disjoncteur différentiel 500 mA permet de séparer le réseau public du réseau privé et matérialise la limite d'intervention du gestionnaire du réseau public.

On l'appelle également « appareil général de coupure et de protection » (AGCP), ou disjoncteur général. Il permet la coupure électrique générale de l'installation.

Conclusion

Toute canalisation en acier, enterrée dans le sol ou immergée, est amenée à se corroder à plus ou moins longue échéance. Les causes de la corrosion sont multiples et complexes et elles résultent d'interactions chimiques et /ou physiques entre le matériau et son environnement.

La Protection des ouvrages métalliques contre la corrosion peut se faire par revêtements, protection cathodique.

La protection cathodique permet de réduire la vitesse de corrosion des ouvrages et d'augmenter considérablement leur durée de vie, deux principes sont à mettre en œuvre conjointement :

Soit par l'interposition d'une barrière entre le métal et le milieu environnant, il s'agit d'une **protection passive**.

Soit par un apport d'énergie extérieure qui empêche l'amorce du processus de corrosion, il s'agit d'une **protection active**.

Introduction

En cas d'absence ou d'éloignement de tel réseau électrique, une source autonome d'énergie peut être une solution technico-économique rentable.

Le développement des turboexpander peut représenter une solution rentable pour l'alimentation de systèmes de protection cathodique des ouvrages de transport du Gaz par canalisation.

Les turbo expander , également appelés turbines de détente, permettent de capter l'énergie perdue dans les installations de gaz naturel et les raffineries. Les turbodétendeurs ont une gamme d'applications, pour la réfrigération et la récupération d'énergie et la production d'électricité.

Dans ce chapitre nous voulons c'est quoi un turbo expander et voir la conception de cet ensemble, exige une très haute précision dans les tolérances de fonctionnement, et de qualité des matériaux de fabrication, pour répondre aux conditions de service (vitesse et température).

2.1 Origine et développement :

Les turbo-expander ont été utilisés dans les procédés de séparation de l'air dès les années 50. Les premiers modèles étaient réduits et avaient des problèmes mécaniques principalement liés à la miniaturisation et de l'indisponibilité de la bonne lubrification pour les roulements à haute vitesse. Les rotors ont été seulement de quelques pouces de diamètre. Une plus grande efficacité, moins d'entretien et de taille, ont été les avantages attendus au delà de ceux réalisables à partir des machines alternatives.

Le succès des turbo-expander avait été prévu dès 1940. Plus récemment, des procédés similaires à ceux utilisés dans la séparation de l'air ont été appliqués dans d'autres domaines. Ces nouvelles applications ont progressé à la suite de l'évolution parallèle des procédés nouveaux et amélioré les turbo-expander qui sont devenus très résistants. Par ailleurs, il y a eu des améliorations dans l'économie des procédés eux-mêmes.[6]

2.2 Description de la Turbo expander :

Une turbine d'expansion, également appelée **turbodétendeur** ou turbine de détente, est une turbine centrifuge ou à écoulement axial, à travers laquelle un gaz à haute pression est détendu pour produire un travail qui est souvent utilisé pour entraîner un compresseur ou un générateur , les turbodétendeurs sont aussi l'étage essentiel du procédé Claude de liquéfaction de gaz , Les turbines d'expansion sont largement utilisées comme sources de réfrigération

dans des processus industriels tels que l'extraction d'éthane et d'autres hydrocarbures du gaz naturel.

Au cours de processus de détente, la pression et la température du gaz d'alimentation chutent en liquéfiant le propane plus et en maintenant des constituants légers tels que le méthane et l'éthane à l'état gazeux, elle génère le froid et développe l'énergie mécanique grâce à la détente du gaz.

Le passage du gaz haut pression provoque la rotation de la roue de l'expander. Cette rotation est transmise à l'arbre, qui est supporté par un ensemble de paliers et à la roue du compresseur à son autre bout. La puissance transmise à l'arbre est utilisée pour entraîner un compresseur, un générateur électrique ou tout autre moyen pour dissiper cette énergie.

L'énergie provenant de la détente du gaz sur les lames de l'expandeur est ensuite utilisée pour entraîner le compresseur qui augmente la pression des fractions légères dans une phase du procédé d'expédition.[7]

2.3 Application du Turbo expander

Bien que les turbines d'expansion soient couramment utilisés dans les procédés basse température, elles sont aussi utilisées dans de nombreux autres domaines. Cette section traite de l'un des procédés courant à basse température, l'extraction d'hydrocarbures liquides du gaz naturel, production d'électricité, ainsi que de certains autres usages :

2.3.1 Production d'électricité

le système de génération d'électricité qui utilise une source de chaleur et une turbine d'expansion.

Le fluide de travail circulant dans le système est pompé à haute pression, puis vaporisé dans l'évaporateur par échange de chaleur avec la source de chaleur. La vapeur à haute pression en sortie d'échangeur s'écoule vers la turbine d'expansion, où elle subit une détente isentropique et sort sous forme de mélange liquide-vapeur, qui est ensuite condensé au niveau d'un second échangeur de chaleur avec la source froide. Le liquide condensé est pompé vers l'évaporateur pour terminer le cycle.

Le système présenté sur le schéma est un cycle de Rankine (ORC) tel qu'utilisé dans les centrales thermiques à combustibles fossiles, l'eau étant le fluide de travail et la source de chaleur étant la combustion du gaz naturel, du fioul utilisé pour générer de la vapeur à haute pression. La vapeur à haute pression subit alors une détente isentropique dans une turbine à vapeur classique. La vapeur d'échappement de la turbine à vapeur est ensuite condensée en eau liquide, qui est ensuite pompée vers le générateur de vapeur pour terminer le cycle. [8]

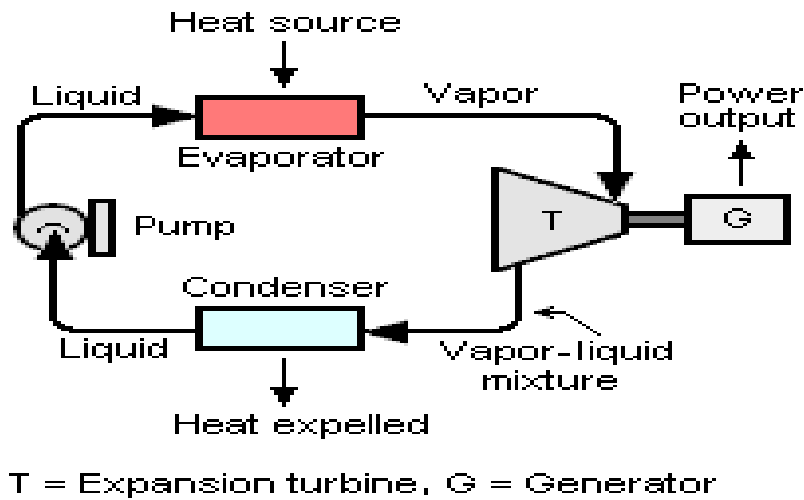


Figure 2.1: principe d'un système de production électrique utilisant une turbine d'expansion[8]

2.3. 2 La Réfrigération

Les turbo – expander sont vastement utilisés dans le domaine cryogénique, grâce à leur capacité importante de produit de froid, et atteindre des températures très basse, qui conduit à une meilleur séparation, (récupération) des différents produits..[8]

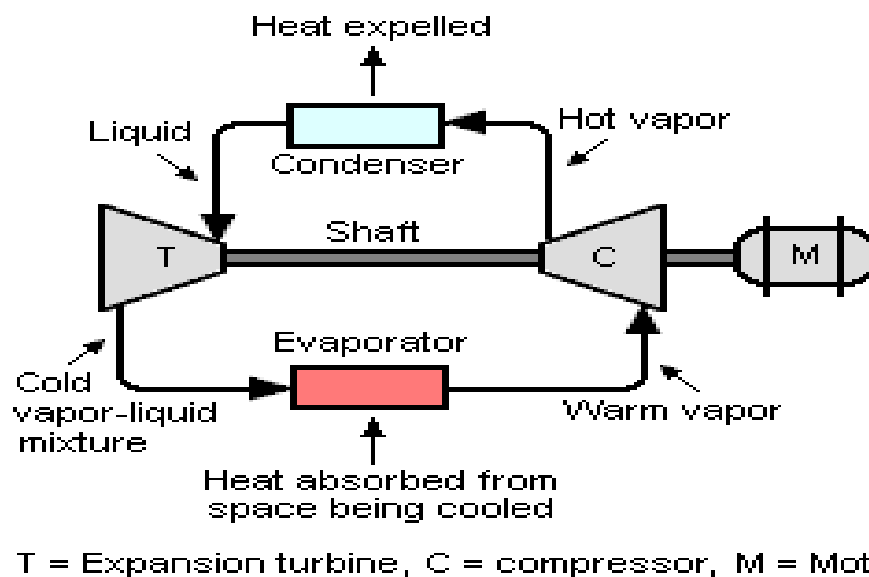


Figure 2.2 : Le principe d'un système de réfrigération utilisant une turbine d'expansion, un compresseur et un moteur. [8]

2.3.3 Production d'énergie

Utilisation de la chaleur ou de la pression naturelle ou artificielle sources, les turbodétendeurs créent une électricité précieuse qui peut créer des flux de révision supplémentaires ou être utilisée dans les espaces déserté pour l'alimentation de systèmes de protection cathodique. L'application de production d'énergie comprend :

- Géothermie utilisant le cycle organique de Rankine
- Abaissement de la pression du gaz naturel du pipeline
- Chaleur perdue en électricité, froid en électricité en utilisant le cycle de Rankine.
- Stockage d'énergie à air comprimé (CAES)
- Stockage d'énergie à air liquide (LAES). [8]

2.4 Principaux caractéristiques d'un Turbo-expander :

- Turbine a réaction (admission radiale, échappement axiale).
- Récupération généralement réalisée en un seul étage de détente.
- Bon rendement isentropique: 80 à 86 %.
- Bonne tolérance à la présence de condensat et de particules solides.
- Récupération d'énergie favorisée par de basses températures d'admission.

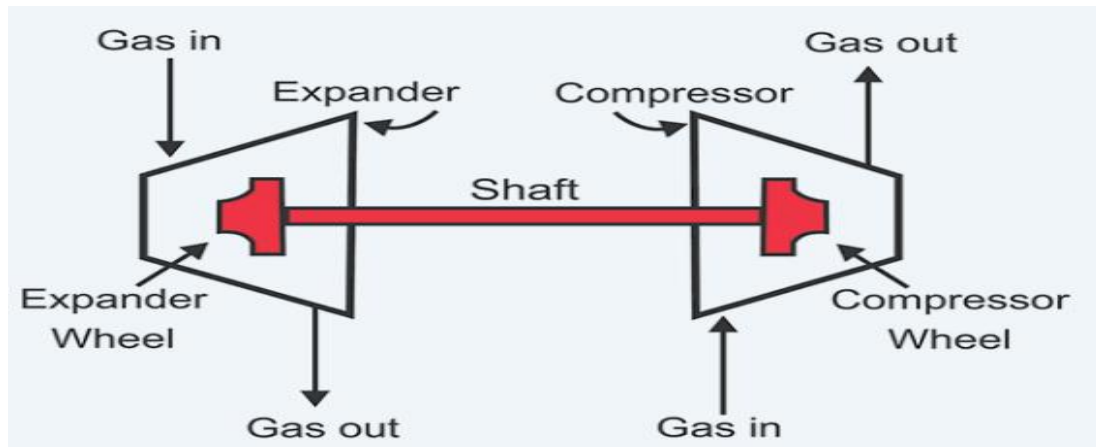


Figure 2.3 : Schéma d'un Turbo expander [10]

3.1 Les composants d'un Turbo-expander

Un turbo-Expander typique comprend trois sections principales, à savoir le carter du compresseur (Compressor case), le carter de l'expander (Expander case) et la section centrale mécanique (MCS).

1- Les boîtiers des turbo-expander sont généralement divisés radialement et regroupés en trois parties distinctes. Le boîtier de l'Expander est généralement en acier inoxydable, en raison du gaz à basse température qu'il contient. Dans de nombreux modèles, il abrite l'ensemble de guidage d'entrée.

2- Le carter du compresseur est généralement en acier au carbone. Il constitue la partie diffuseur de l'étage compresseur, ainsi que le collecteur ou la volute, selon la conception.

3- se concentre sur la section centrale mécanique (MCS), qui est le cœur de la machine. Le boîtier de roulement est généralement en acier au carbone et contient presque toute la machine, de la roue d'expansion à la roue du compresseur. Il comprend le rotor, les roulements et les joints. Ce qui suit est un aperçu des composants clés du MCS et de leurs fonctions et principales caractéristiques de conception. [11]

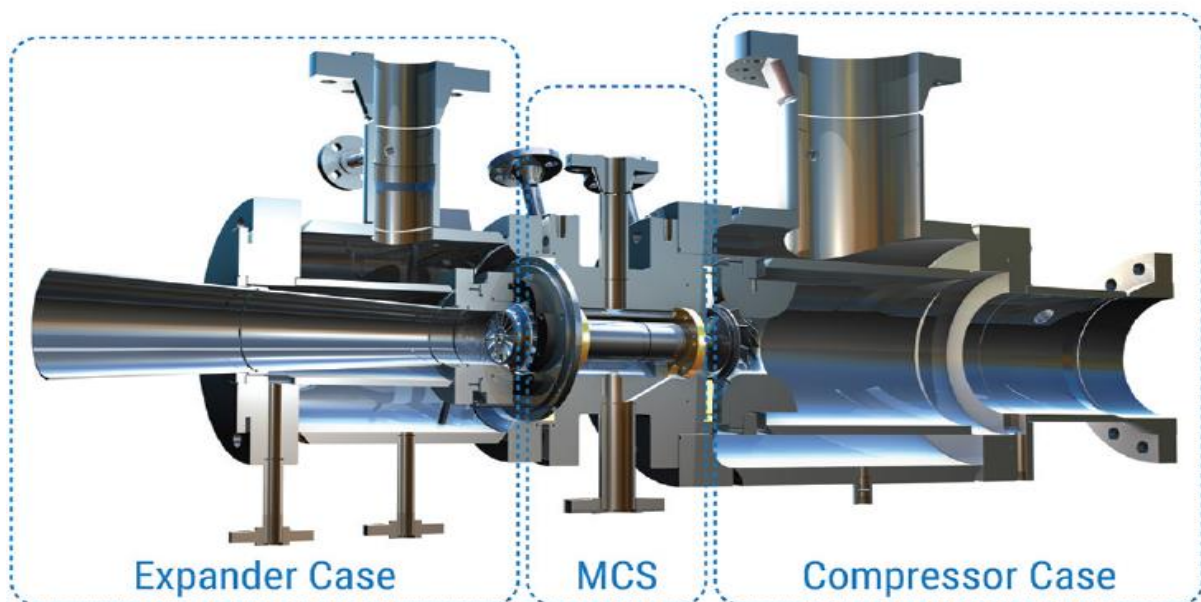


Figure 3.1: Les trois composant d'un Turbo-expander[11]

3.2 Comment fonctionnent les Turbo Expander

A: Le gaz entre par les aubes guides d'admission créant une chute de pression initiale et une vitesse élevée vortex.

B: Une expansion supplémentaire a lieu dans roue d'expansion. Un désamorçeur conique est souvent utilisé pour récupérer les restes rapidité.

C: La puissance extraite du détenteur est transmis par le rotor, soutenu par huile ou paliers magnétiques pour roue de compresseur.

D: Le gaz de procédé entre dans le compresseur où la pression et la température sont soulevés par la roue du compresseur.

E: Le gaz de procédé sort de la roue par un diffuseur sans palette pour une meilleure plage de fonctionnement et fiabilité.[11]

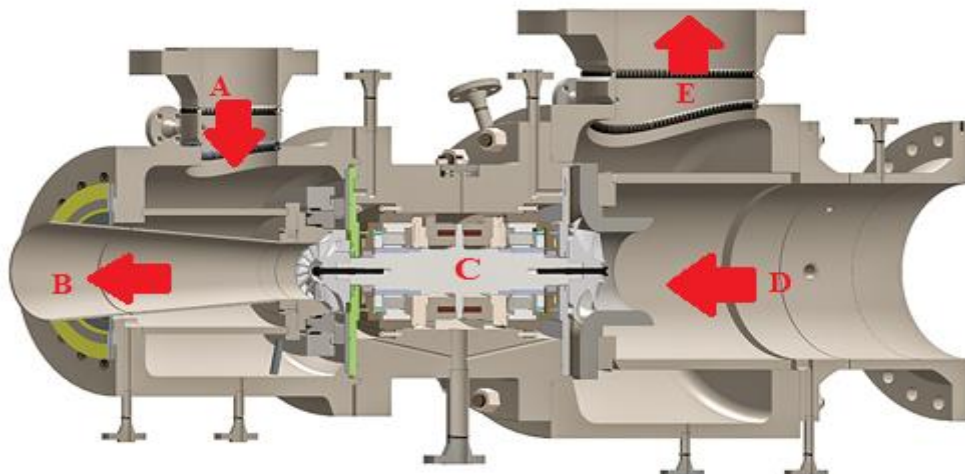


Figure 3.2 : Fonctionnement d'un Turbo-expander [11]

3.3 Les principaux composants de la section centrale de rotation (MCS)

1. Aubes directrice d'entrée variables (IGV)
2. Roues expander et compresseur
3. Arbre
4. Garniture (joint) d'étanchéité de l'arbre
5. Les roulements magnétiques actifs
6. Paliers lisse et butées

7. Joints d'étanchéité de boitiers (volutes)
8. Diffuseur de compresseur
9. Vanne de déclenchement de l'expandeur et écran d'admission
10. Sondes de vibration. [10]

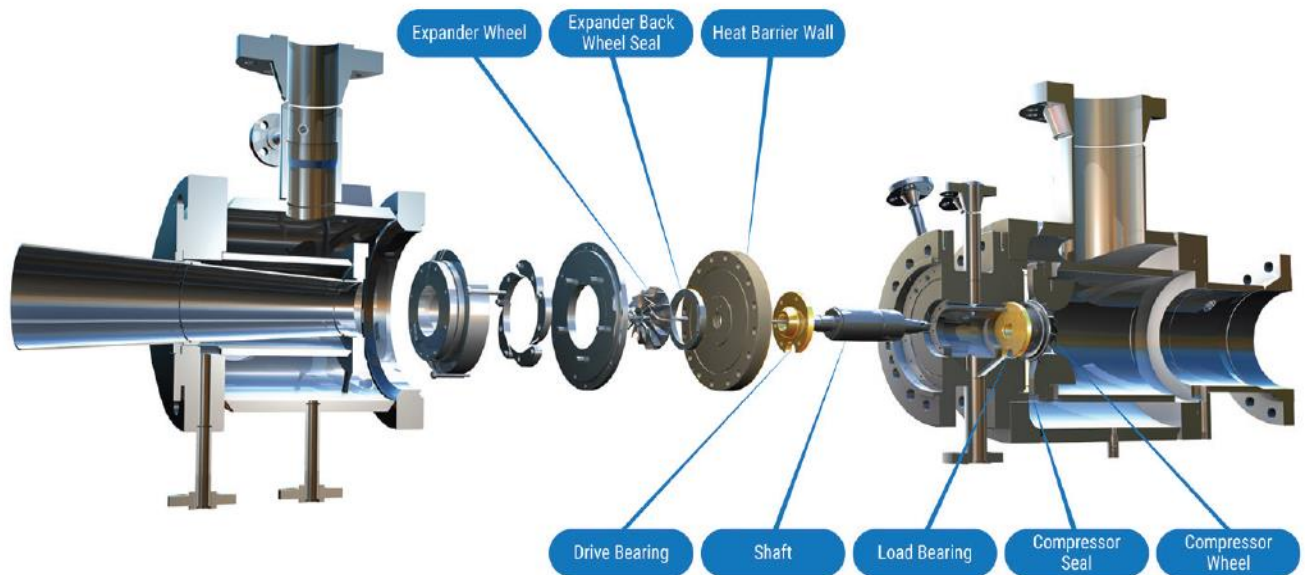


Figure 3.3: Les principaux composants de la section centrale [10]

3.3.1 Aubes directrices à admission variable (Variable inlet guide vanes (IGV))

Les aubes directrices d'entrée sont les stators variables de l'étage du détendeur. Les éléments mécaniques en forme de profil aérodynamique fournissent un chemin d'écoulement aérodynamique efficace pour que le gaz détendeur pénètre dans la roue en rotation. Ils fonctionnent également comme une vanne, en se fermant pour pincer le débit. Les OEM diffèrent considérablement dans leurs conceptions choisies pour les IGV.

Certains choisissent d'avoir quatre ou cinq palettes avec des mécanismes de réglage simples. D'autres optent pour un plus grand nombre d'aubes avec des mécanismes de liaison complexes.

Les pièces à l'intérieur de l'IGV sont exposées à deux mécanismes d'usure : le frottement et l'érosion. Le frottement provient d'un mouvement de glissement répété contre les pièces en contact qui sont sous pression . [10]

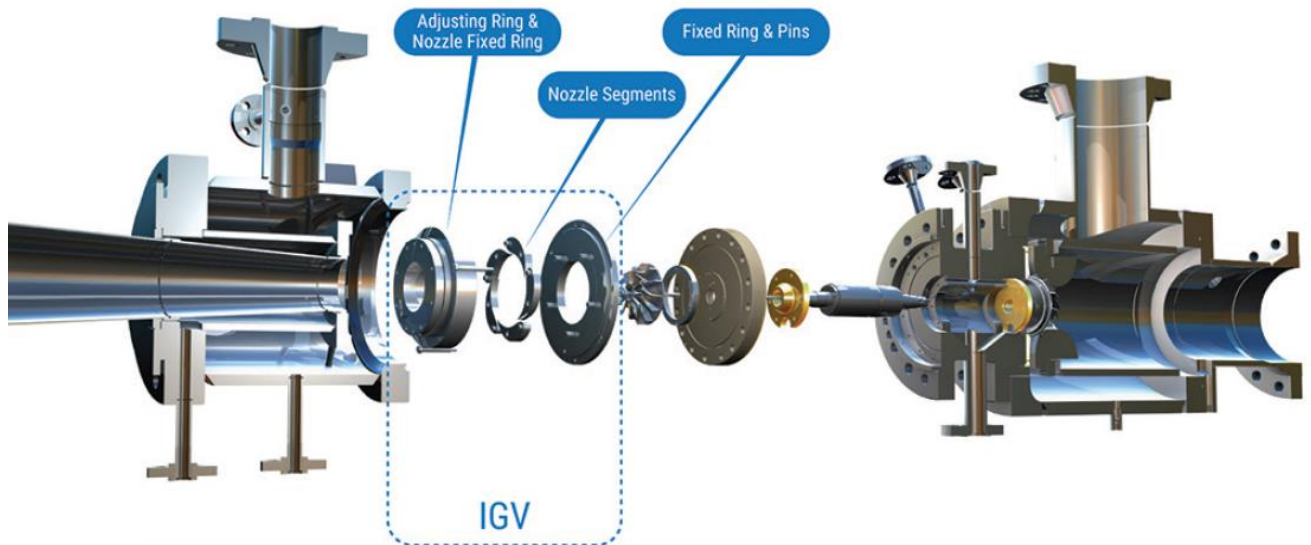


Figure 3.4 : Aube directrice d'entrée variable (IGV) [10]

3.3.2 Roue d'expansion et compresseur

1/ Roue d'expansion_ (expander wheel (impeller))

C'est une roue de détente à grande vitesse (vitesse de fonctionnement de 10000tr/min) et a pour rôle de détendre l'énergie de pression du gaz, de telle sorte que la pression d'alimentation chute de 95 à 21 bars et, par conséquent la température baisse de 12 à - 47°C.[10]



Figure 3.5 : Roue d'expansion [10]

2/ Roue de compresseur_ (compressor wheel (impeller))

Elle récupère l'énergie cinétique fournie par la roue expander et la transforme en énergie mécanique pour comprimer le gaz résiduel léger (C1, C2) de 20 à 31 bars et l'acheminer vers les stations de compression pour la réinjection dans le gisement.

Les roues de la turbine et du compresseur, sont usinées à partir de plaques, de barres et de pièces forgées et massives.

Chaque roue a été soumise à des essais de résistance aux vibrations, aux fréquences de résonance de la lame, et du disque. Le turbo-expander peut fonctionner de zéro à la vitesse de déclenchement, sans craindre d'atteindre la résonance nuisible des roues. [10]



Figure 3.6: Roue de compresseur [10]

3.3.3 Arbre (Shaft)

L'arbre de l'expander-compresseur est conçu, pour opérer en dessous de la première vitesse de flexion critique et de résonance de torsion. Une bande d'aluminium plaquée à chaud est appliquée sur l'arbre dans la zone surveillée par les sondes de détection de vibrations. Les roues sont montées sur l'arbre et l'ensemble forme le rotor qui doit être guidé en rotation et axialement sur un profil taraudé spécial avec des clavettes et des rainures des clavettes cylindriques.

Cette conception évite les concentrations des contraintes associées aux languettes et aux rainures des clavettes classiques.

Ce montage garantit une fixation des roues stables, même en condition des vitesses et des températures extrêmes. [10]

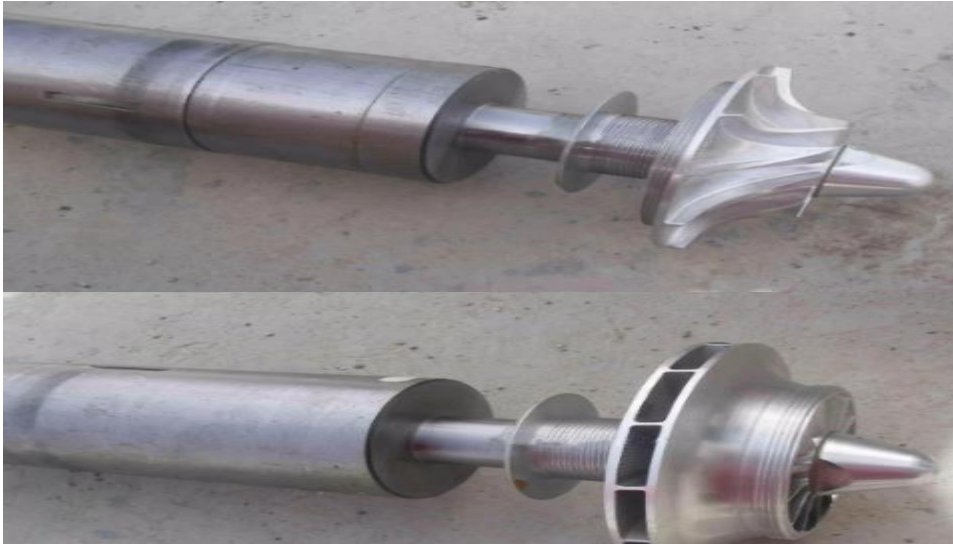


Figure 3.7 : Arbre [10]

3.3.4 Garniture (joint) d'étanchéité de l'arbre (Shaft seals)

Les joints d'étanchéité sont du type à labyrinthe pour réduire au minimum les fuites du gaz d'étanchéité. La conception incorpore un labyrinthe rotatif en acier inoxydable remplaçable, côté à côté avec une cartouche d'étanchéité en résine renforcée par des fibres verres. En cas de contact avec le joint d'étanchéité, cette conception permet à la résine de s'user d'une façon prédéterminée pour éviter d'endommager la pièce pivotante. Étant donnée la symétrie de l'arbre, les joints d'étanchéité du côté de l'expandeur sont interchangeables avec ceux du côté du compresseur. [10]



Figure 3.8 : Les labyrinthes du turbo-expander. [10]

3.3.5 Les roulements magnétiques actifs (Magnetic Bearings)

Des paliers magnétiques en option sont disponibles pour Unités d'expansion-compression pour fournir une solution sans huile avec un entretien réduit et un plan parcouru réduit. [10]



Figure 3.9 : Roulement magnétique [10]

3.3.6 Paliers lisses et butées (Journal and thrust bearings)

Les paliers radiaux utilisés dans cette machine sont du type à patins fixes à trois gorges. Ces paliers conviennent particulièrement aux vitesses élevées requises par cette application.

Un détecteur de température à résistance à élément double est intégré dans le patin inférieur de chaque palier afin de mesurer la température et signaler tout dommage du palier. Sur les appareils froids, ce détecteur signale les possibilités de gel du palier et peut être utilisé comme un « inhibiteur de démarrage » jusqu'à ce qu'une température suffisante du palier soit atteinte.

Des paliers de butée sont requis pour maintenir la position axiale du rotor de la turbine dans une tolérance étroite. Les paliers de MTC sont conçus pour supporter la même charge axiale dans les deux directions.

Les charges de poussée axiales sont surveillées par un orifice sonde de détection de pression située sur le côté de chaque palier. Ces signaux de pression alimentent l'égalisateur automatique de poussée (A.T.B.) qui ajuste la charge de poussée. [10]



Figure 3.10 : Les paliers de turbo-expander. [10]

3.3.7 Joints d'étanchéité de boîtiers (volute)

Un joint à ressort à levre en Teflon est utilisé pour assurer l'étanchéité des boîtiers cryogéniques. Ce joint d'étanchéité très fiable est également commandé par pression. Par conséquent, l'efficacité de l'étanchéité ne dépend pas du couple appliqué sur les boulons du boîtier. Des anneaux toriques aux élastomères sont utilisés pour l'étanchéité des boîtiers pour procédé chaud et des pièces internes chaudes. [10]

3.3.8 Diffuseur de compresseur (diffuser)

Le compresseur incorpore un diffuseur sans vanne à paroi parallèle qui donne d'excellentes performances dans des conditions anormales.

Conçu pour permettre une réévaluation de la machine pour les nouvelles conditions de processus sans le besoin d'un nouveau logement ou sacrifier la performance, les supports de diffuseur variables donnent une flexibilité supplémentaire pour d'autres mises à niveau. [10]

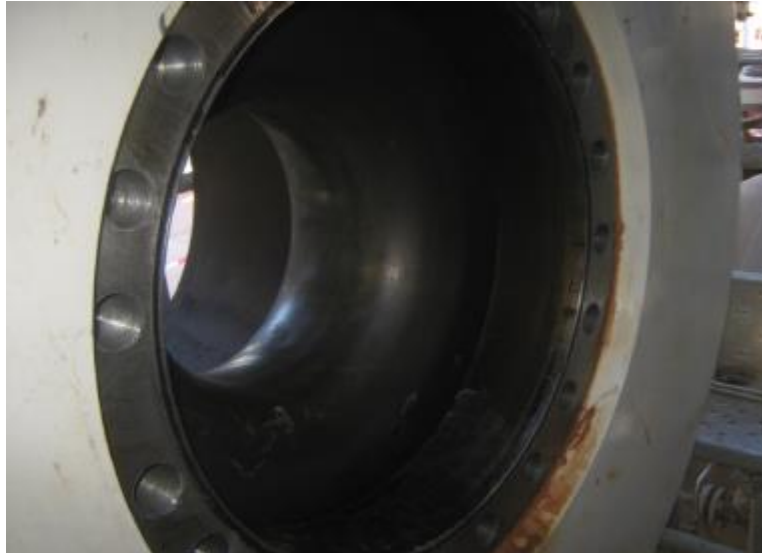


Figure 3.11 : Diffuseur de compresseur [10]

3.3.9 Vanne de déclenchement de l'expandeur et écran d'admission

MTC a fourni une vanne de déclenchement d'expandeur de type à papillon. Cette vanne doit être à action rapide pour permettre un arrêt rapide de l'expandeur (0.5 seconde maximum) et installée le plus proche à la bride d'admission turbine pour surveiller la chute de pression [10]

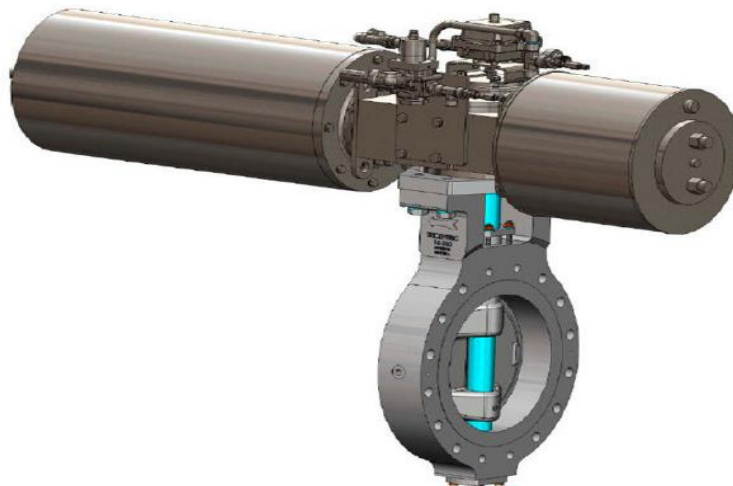


Figure 3.12 : Vanne de déclenchement de l'expandeur [10]

3.3.10 Sondes de vibration

MTC a trouvé un moyen pour obtenir une indication précise de la vibration de l'arbre pendant toute la durée d'utilisation de l'arbre.

Une bande d'aluminium d'environ 1 mm d'épaisseur est fixée à l'arbre sur lequel les vibrations sont mesurées par les sondes de type à déplacement sans contact. De cette manière,

la composante de faux rond électrique de vibration de l'arbre est en fait annulée et les fausses indications de vibration attribuées aux anomalies de microstructures de matériau profondes de l'arbre sont évitées. [10]

3.4 Les dispositifs de base de système

1 Un réservoir d'huile

Quelque chose d'unique dans les turbo-expandeurs : le réservoir d'huile est pressurisé au-dessus de la pression atmosphérique. Le réservoir d'huile de lubrification fonctionne spécialement à la pression d'aspiration de la section compresseur, peut emmagasiner toute l'huile vidange ou d'un arrêt. Il est équipé d'un voyant (jauge d'huile) le long de la hauteur du bac pour visualiser le niveau d'huile.

Il est muni aussi, d'un commutateur d'alarme de niveau bas, d'un appareil de chauffage, d'une vanne de sûreté et d'une vanne de vidange. [11]

2 La pompe d'huile

Deux pompes à vis entraînées par des moteurs électriques, dont la puissance est au moins de 25% supérieure à celle requise. L'une en marche et l'autre en stand-by, elle se met en marche automatiquement si la première pompe s'arrête pendant le fonctionnement de turboexpandeur ou si la pression différentielle d'huile au niveau des paliers chute. [11]

3 Un refroidisseur d'huile

Un arrefrigérant qui permet de fournir un refroidissement suffisant pour l'huile de lubrification dans les conditions ambiantes extrêmes spécifiées. [11]

4 Les filtres d'huile

Des filtres qui permettent d'éliminer les impuretés existantes dans l'huile. Il y a : Deux filtres placés avant l'accumulateur. [11]

5 Accumulateur d'huile

L'accumulateur souple est fourni pour alimenter les paliers en huile de lubrification pendant le ralentissement en cas de panne des pompes à huile. Un nécessaire de charge est inclus en vrac avec d'autres pièces de démarrage. [11]

6 Soupape de régulation de pression de l'huile de lubrification

La pression de l'huile de lubrification est contrôlée par une soupape de régulation intégrée qui maintient automatiquement une pression d'huile de lubrification constante dans les paliers. [11]

3.5 Fonctionnement du système de lubrification

Après avoir chauffé l'huile au niveau du par l'intermédiaire du rechauffeur à environ 35°C, l'huile provenant du réservoir entre dans des pompes qui sont conçues pour augmenter la pression au-dessus de la pression de l'huile de lubrification, nécessaire aux paliers.

Les soupapes de décharge sont spécialement installées près de chaque pompe d'huile et sur le réservoir pour protéger ces pièces contre tout excès de pressurisation.

Un dispositif de contrôle de pression, sur la ligne de refoulement de la pompe, libère l'excès d'huile en la renvoyant vers le réservoir en maintenant ainsi dans la machine la pression fixée à l'avance de l'huile de lubrification. [11]

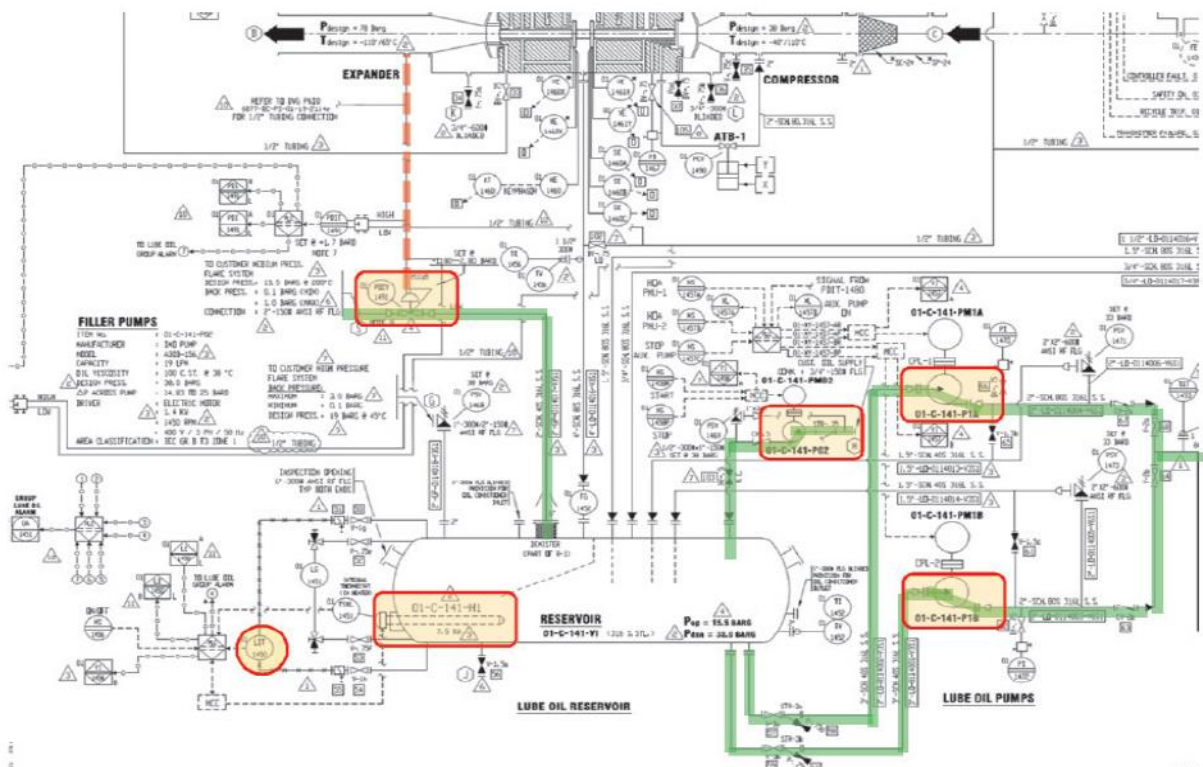


Figure 3.13 : Chemine d'huile de lubrification du réservoir au refoulement des pompes[11]

3.6 Poussee axiale et systeme egalisateur ATB

La poussée axiale est une force qui provoque le déplacement du rotor vers la butée des paliers soit de l'expandeur ou bien du compresseur. Cette poussée est due à la présence d'une pression arrière roue au niveau des deux roues, mais la résultante de ces forces se dirige vers

le côté compresseur parce que le diamètre de la roue de se dernier est plus grand à celui de la roue de l'expandeur. [11]

La poussée axiale peuvent serieusement endommager les paliers en apparaissant les anomalies suivant :

- Coupure de film d'huile de lubrification de la butee.
- Usure et arrachement du metal de la surface de butee.
- Frottement excessif obturant l'orifice de detection de la pression d'huile du systeme d'equilibre en le rendant non operationnel.
- Vibrations importantes [11]

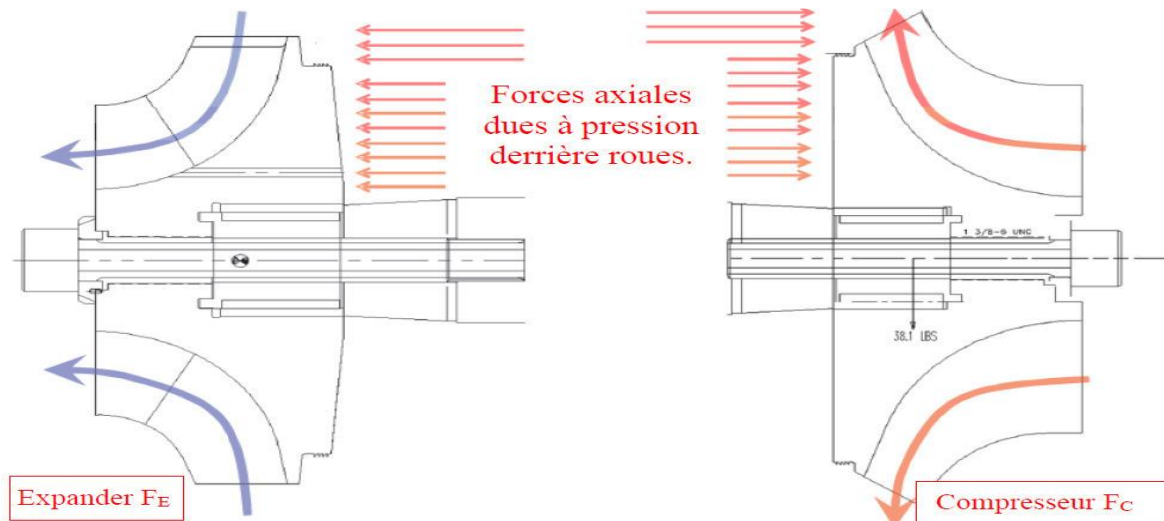


Figure 3.14 : direction des forces axiales exercées sur la surface des roues [11]

3.6.1 Systeme egalisateur de la pousse axiale (ATB)

Ce systeme est essentiellement compose d'un comparateur a huile et d'une vanne de depressurisation de la chambre derriere la roue du compresseur. Les charges de la pousse axiales sont maintenues bien en dessous de la capacite des paliers par l'egalisateur automatique de la pousse .

Les signaux de pression provenant de chaque palier alimentant les cotes opposes d'un piston a trou cylindrique. Ce piston module la pression derriere la roue du compresseur pour controler la pousse du rotor.[11]

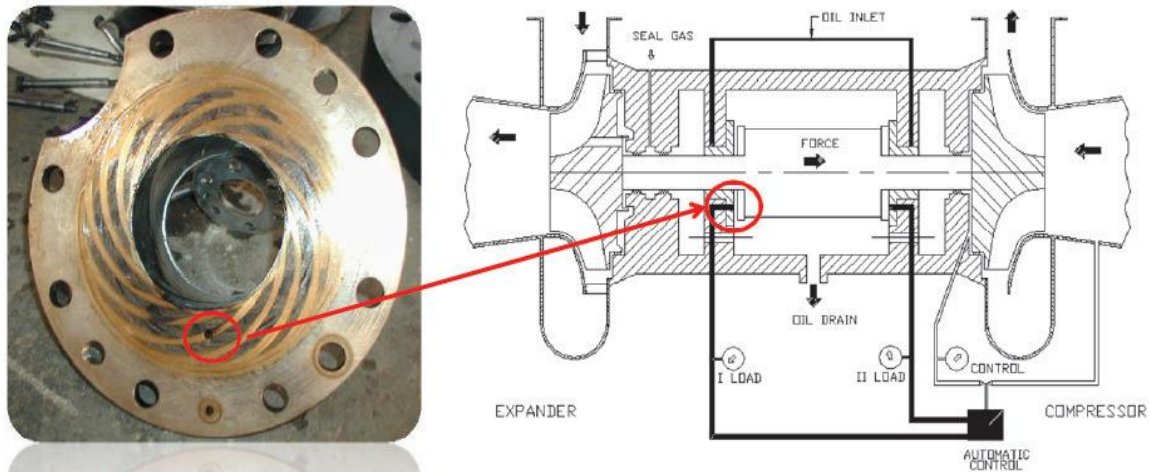


Figure 3.15 Un système automatique de palier de butée (ATB) [11]

3.6.2 Fonctionnement du système (ATB)

1. La poussée axiale est vers le compresseur

Quand la poussée axiale est vers le compresseur, c'est-à-dire que l'arbre tend à casser le film d'huile sur le palier axial côté compresseur.

La pression d'huile dans cette zone augmentera, en conséquence le piston du comparateur sera poussé, ce qui permettra la dépressurisation de la chambre derrière la roue du compresseur et ainsi limitant la poussée axiale. [11]

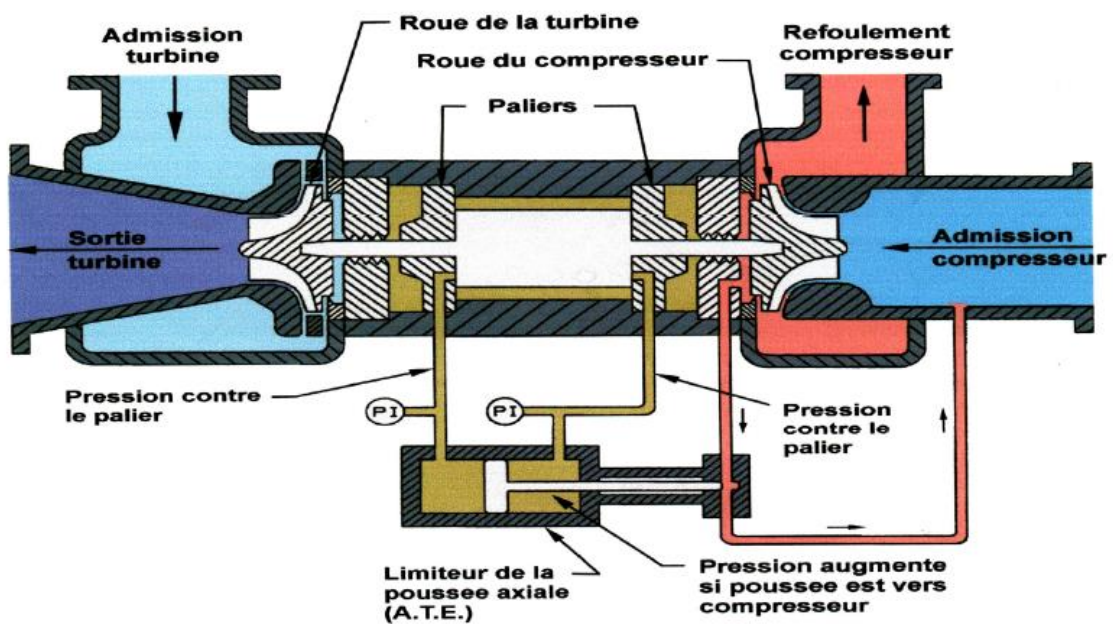


Figure 3.16 Egalisateur de poussée axiale Poussée vers le compresseur [11]

2. La poussée axiale est vers l'expandeur

Quand la poussée axiale est vers la turbine, l'arbre tend à écraser le film d'huile sur le palier axial côté turbine.

La pression d'huile dans cette zone augmentera, ce qui permettra l'obturation du circuit de dépressurisation de la chambre derrière la roue ainsi la pression derrière la roue de compresseur augmentera et tendra à tirer l'arbre vers le compresseur.

La pression de l'huile est transmise à partir de petites ouvertures dans la chambre d'égalisateur de poussée.

Le piston du compresseur de poussée actionne la vanne d'obturation pour régler la pression derrière la roue du compresseur et équilibrer la charge de poussée à des niveaux acceptables. [11]

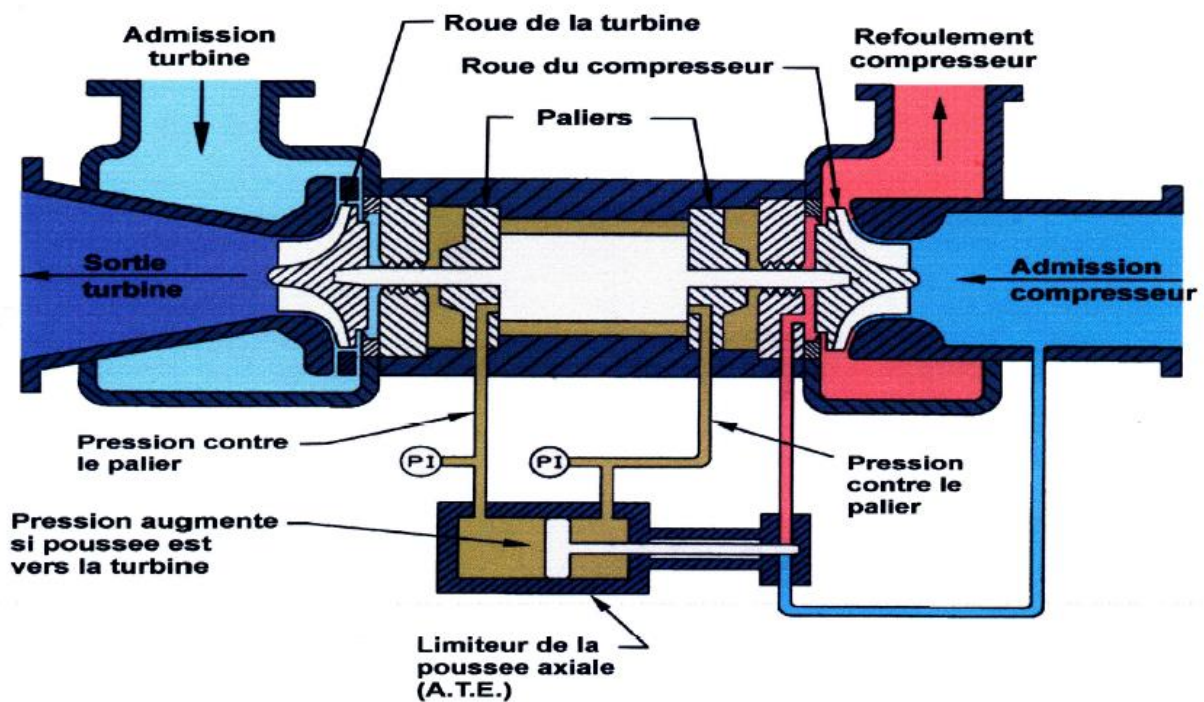


Figure 3.17 Egalisateur de poussée axiale Poussée vers la turbine [11]

3.7 Evaluations et Réparations de Turbo expander

Les délais de réparation varient en fonction de la gravité des dommages. La plupart des turbo expander sont conçus pour le processus d'une usine spécifique.

Plusieurs inspections majeures de maintenance préventive doivent être effectuées :

- **1.** L'huile de lubrification doit être vérifiée tous les 3 à 6 mois. Un échantillonnage d'huile doit être effectué pour s'assurer qu'il n'y a pas de dégradation de l'intégrité de l'huile de lubrification ou la présence de contaminants qui pourraient affecter les performances et l'efficacité du turbodétendeur.
- **2.** Les lectures de routine doivent être documentées pour les conditions de fonctionnement, les gaz de traitement et le gaz d'étanchéité pour s'assurer que le turbodétendeur fonctionne dans les plages de conception technique (comme indiqué précédemment).
- **3.** Les vérifications critiques comprennent :
 - ✓ un Pression différentielle du gaz d'étanchéité
 - ✓ Instruments de pression de poussée et de pression différentielle
 - ✓ Pression différentielle de l'huile de lubrification (systèmes à paliers à huile) ré- températures d'alimentation et de vidange d'huile de lubrification (systèmes à paliers à huile).
 - ✓ Viscosité de l'huile de lubrification (systèmes à paliers à huile).
 - ✓ Pression différentielle du filtre à huile de lubrification (systèmes à paliers à huile).
 - ✓ Niveau d'huile du réservoir (systèmes à paliers à huile).
 - ✓ Essai de la pompe à huile de lubrification Auxiliaire (systèmes à paliers à huile).
- **4.** Remplacez la batterie de l'IHM tous les 2 ans.
- **5.** Les filtres doivent être remplacés au fur et à mesure qu'ils se bouchent, ce qui est généralement indiqué par une pression différentielle élevée dans les filtres. **[10]**

3.8. Avantages d'un turbo expandeur :

Les avantages qu'apporte l'utilisation d'un turbo-expander :

- Leur application dans différents procédés de traitement, de séparation et de liquéfaction de gaz.
- Il assure un bon rendement comparé aux autres systèmes de détente.
- Il apporte une meilleure récupération des fractions condensables du gaz naturel.
- L'utilisation du travail fournit par la détente pour alimenter le compresseur.
- Leur grande capacité de production (pour les grandes installations). [10]

3.9. Inconvénients d'un turbo expandeur :

Les inconvénients qu'apporte l'utilisation d'un turbo-expander :

- Le turbo-expander comme toutes les machines tournantes à grande vitesse s'affronte au problème d'usure mécanique.
- Coût élevé de l'installation due au matériau utilisé et à la fabrication de ces éléments.
- Problème de réfrigération lié à la température très basse.
- Formation de gouttelettes qui peuvent abimer les ailettes de l'expander. [10]

Conclusion

Ce chapitre décrit les principaux éléments impliqués dans les travaux de maintenance du turboexpander.

Nous concluons que l'étude de n'importe quelle machine de l'industrie nécessite une parfaite maîtrise de la façon dont elle prend en compte d'abord toutes les contraintes liées au fonctionnement et au rôle de turbo expnder dans le processus. cette machine, il est largement utilisé dans le domaine de traitement du gazet l'extraction d'hydrocarbures liquides du gaz naturel et pour la production d'électricité.

Introduction

De nombreuses études se sont intéressées au rendement et à l'efficacité des turbo-expanders suite à l'importance avérée de ces machines dans l'industrie.

Le but de ce chapitre concernant l'utilisation et les problèmes qui peuvent influencer sur la marche et le rendement du turbo-expander et faire une comparaison des différentes conclusions constatées par les gens qui travaillent sur celui-ci, et comment améliorer les paramètres de fonctionnement afin d'obtenir un meilleur rendement pour déterminer une température et une pression optimales.

les performances du Turbo-expander à travers une étude thermodynamique. Pour cet objectif, une combinaison entre le calcul manuel et celui numérique, en utilisant le logiciel « HYSYS ».

4.1 Notion thermodynamique

4.1.1 Evolution isentropique et réelle d'un gaz parfait

4.1.1.1 Lois d'évolution – coefficient isentropique

L'évolution d'un gaz parfait lors de la détente est dite isentropique lorsque :

- Il n'y a pas de dégradation d'énergie par frottement (réversibilité de transformation d'énergie).
- Il n'y a pas d'échange de chaleur avec l'extérieur (transformation adiabatique)

Cette évolution idéale d'un gaz parfait est représentée par la loi :

$$P * V^\gamma = \text{constante} \dots \dots \dots (1)$$

Avec ;

- P : La pression
- V : Le volume de gaz
- γ : L'exposant ou coefficient isentropique caractéristique du gaz, avec :

$$\gamma = \frac{C_p}{C_v} = \frac{C_p}{C_p - R}$$

C_p en Kj/ Kg * K

$R = 8314$ Kj/mol *K

M en Kg /K mol

La valeur de γ peuvent donc être obtenue à partir des données de C_p mais en pratique, elles sont accessibles pour un certain nombre de corps purs grâce aux abaques qui donnent γ en fonction de la température.

4.1.1.2 Température en fin d'évolution isentropique

De l'hypothèse $P * V^\gamma = cst$ et de la loi des gaz parfaits, il résulte que la température T_{2is} en fin d'évolution isentropique est donnée par la relation :

$$\frac{T_{2is}}{T_1} = \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \quad (2)$$

- T_{2is} , T_1 : En kelvin.
- P_2 , P_1 : En bars abs.
- γ : Coefficient isentropique.

Elle dépend :

- Du taux de compression ou de détente,
- De la température absolue initiale,
- De la nature du gaz caractérisé par son coefficient isentropique.

4.1.1.3 Evolution réelle d'un gaz parfait

Lors d'une détente dans une machine, les hypothèses prises en compte pour l'évolution isentropique, ne sont pas vérifiées.

L'évolution réelle doit en effet tenir compte :

- D'un échange de chaleur avec l'extérieur soit par refroidissement, soit par réchauffage.
- Frottements aérodynamique dus aux imperfections des surfaces de la machine et à la viscosité du gaz .
- Pertes par choc du gaz contre les parois de la machine.
- Pertes de charge localisées.

On a donc : $T_2 \text{ réelle} > T_2 \text{ is} \dots \dots \dots (3)$

Pour pouvoir calculer cette température réelle, on définit une évolution polytropique fictive qui serait régie par la même loi que l'évolution isentropique, dans cette évolution, l'exposant polytropique k remplace γ qui permet de calculer la température de refoulement réelle par la formule :

$$T_{2 \text{ réelle}} = T_1 \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} \quad (4)$$

- k : Ne dépend plus seulement de la nature du gaz, il dépend également des imperfections de la machine.

4.1.2 Evolution isentropique et réelle d'un gaz réel

Si l'évolution isentropique d'un gaz réel, peut être calculée à partir d'une équation d'état, ou de la loi des états correspondants, la méthode la plus pratique, quand on a affaire à un corps pur consiste à suivre évolution du gaz, sur un diagramme thermodynamique.

L'utilisation d'un diagramme thermodynamique, d'un corps pur permet de résoudre facilement le problème, posé par une évolution isentropique :

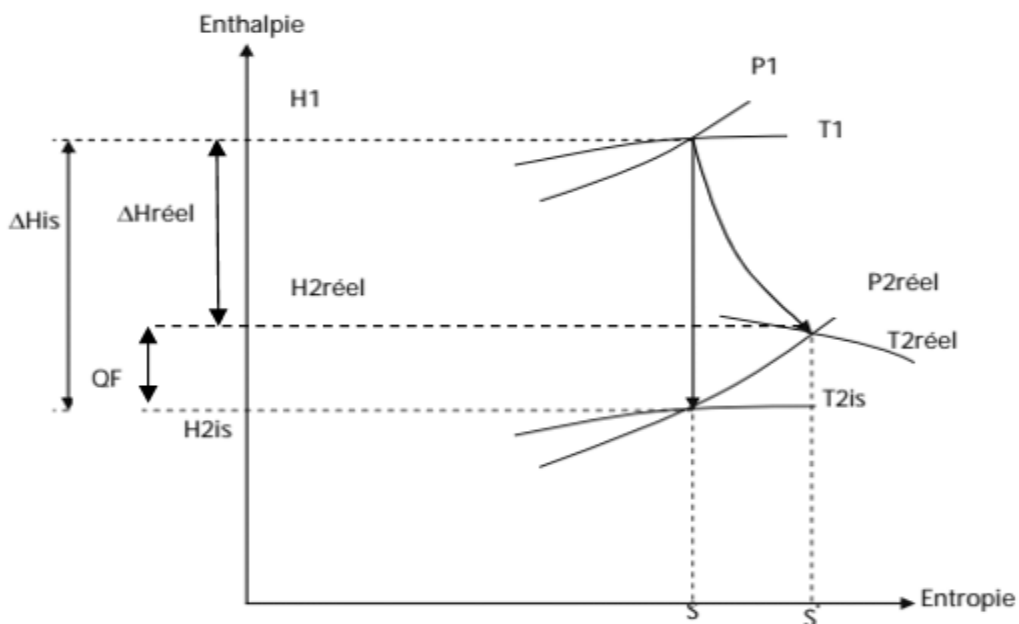


Figure 4.1 : Diagramme H-S coté expander. [13]

L'énergie mécanique fournie par le gaz dans le cas d'une détente isentropique est ;

$$W_{is} = \Delta H_{is} = H_1 - H_{2is} \dots \dots \dots (5)$$

Où :

- H_1 : L'enthalpie à l'entrée de la machine avec les conditions P_1 , T_1 , et la composition de gaz.

- H_{2is} : L'enthalpie à la sortie, dans le cas d'une évolution isentropique.

La chute d'enthalpie (ΔH_{is}) correspondante à la turbine parfaite représente le travail isentropique récupéré à la détente.

Le trajet vertical représenté sur le diagramme H-S, a une récupération maximale d'énergie mécanique, dans une machine réelles, la détente de gaz s'accompagne d'une augmentation d'entropie, qui est traduite graphiquement par un segment oblique sur le diagramme H-S cela a pour conséquences :

- Une température de décharge T_2 plus élevée que T_{2is} à cause des frottements.
- Une chute d'enthalpie $\Delta H_{réel}$ réduite par rapport a ΔH_{is} ; a cause d'énergie dissipée par frottement.

L'énergie mécanique fournie par le gaz dans le cas d'une détente réelle est ;

$$W_{réel} = \Delta H_{réel} = H_1 - H_{2réel} \dots \dots \dots (6)$$

Où :

- H_1 : L'enthalpie à l'entrée de la machine avec les conditions P_1 , T_1 , et la composition de gaz.
- $H_{2réel}$: L'enthalpie à la sortie, dans le cas d'une évolution réelle.

4.2 Notions relatives au calcul de rendement

Il est tout fois intéressant pour mesurer la performance d'une turbine, de comparer l'évolution réelle de gaz à celle qu'il aurait lieu dans une turbine parfaite répondant aux caractéristiques suivantes :

- ✓ Pas de dégradation d'énergie par les frottements (réversibilité des transformations d'énergie)
- ✓ Machine adiabatique ; pas d'échange de chaleur avec extérieur (la machine est calorifugée).

4.2.1 Rendement Isentropique

Le rendement isentropique de la machine est finalement ; le rapport entre le travail réel et le travail isentropique :

$$\eta_{is} = (W_{réel} / W_{is}) * 100 = (\Delta H_{réel} / \Delta H_{is}) * 100$$

Cas d'un gaz parfait :

$$\eta_{is} = \frac{T_2 - T_1}{T_{2is} - T_1} = \frac{T_1 * \left(\frac{T_2}{T_1} - 1\right)}{T_1 * \left(\frac{T_{2is}}{T_1} - 1\right)}$$

$$\eta_{is} = \frac{\left(\frac{T_2}{T_1} - 1\right)}{\left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1} = \frac{\tau - 1}{(\varepsilon)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1}$$

$$\eta_{is} = \frac{\tau - 1}{(\varepsilon)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1}$$

Où ;

$$\Delta H_{is} = H_1 - H_{2is}$$

$$\Delta H_{réel} = H_1 - H_{2réel}$$

$$\frac{P_2}{P_1} = \varepsilon \quad , \quad \frac{T_2}{T_1} = \tau$$

Le schéma précédent (Figure 4.1) montre le processus d'expansion de gaz à travers le Turbo-Expander dont :

- ✓ $\Delta H_{réel}$ La différence d'enthalpie entre l'entrée et la sortie de processus réel (actuel processus).
- ✓ ΔH_{is} La différence d'enthalpie entre l'entrée et la sortie de processus isentropique (idéal processus 100% efficacité).

4.2.2 Rendement polytropique

$$\eta_{poly} = (W_{réel}/W_{poly}) * 100 = (\Delta H_{réel}/\Delta H_{poly}) * 100$$

Cas d'un gaz parfait :

$$\eta_{poly} = \frac{T_2 - T_1}{T_{2poly} - T_1} = \frac{T_1 * \left(\frac{T_2}{T_1} - 1\right)}{T_1 * \left(\frac{T_{2poly}}{T_1} - 1\right)}$$

$$\eta_{poly} = \frac{\left(\frac{T_2}{T_1} - 1\right)}{\left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{k-1}{k}} - 1} = \frac{\tau - 1}{(\varepsilon)^{\frac{k-1}{k}} - 1}$$

$$\eta_{poly} = \frac{\tau - 1}{(\varepsilon)^{\frac{k-1}{k}} - 1} \dots \dots \dots (8)$$

La détente polytropique obéit à la relation :

$$\frac{T_{2poly}}{T_1} = T_1 \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{k-1}{k}} \dots\dots\dots(9)$$

Où k est le rapport des chaleurs spécifiques à pression constante et à volume constant :

$$\left\{ \begin{array}{l} K = \frac{Cp}{Cv} \\ Cp - Cv = R \end{array} \right.$$

En absence de travaux de frottement et d'échange avec l'extérieur, cette évolution serait Isentropique et donne une température T_{2is} où on écrit l'égalité :

$$\frac{T_{2is}}{T_1} = \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}$$

Et par l'utilisation de la notion de rendement polytropique η_p :

$$\eta_p = \frac{\gamma}{\gamma-1} \times \frac{K-1}{K}$$

On écrit donc :

$$\frac{T_1}{T_{2poly}} = \left(\frac{P_1}{P_2}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma} \times \eta_p} \dots\dots\dots(10)$$

Le travail de la détente réelle dans l'expander est égal :

$$W_T = Cp(T_1 - T_2) \dots\dots\dots (11)$$

Il vient :

$$W_t = Cp \times T_1 \left[1 - \left(\frac{P_1}{P_2}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma} \times \eta_p} \right] \dots\dots\dots(12)$$

Dans le cas de la détente on a : $W_{réel} < W_{poly} < W_{is} \rightarrow \eta_{réel} < \eta_{poly} < \eta_{is}$

4.2.3 Rendement dans le compresseur

L'énergie donnée par l'expansion de gaz dans le turbo expander **HPexpandeur** est distribuée comme un travail pour l'entraînement de compresseur **HPcompresseur** et une énergie consommée par Paliers (Bearings) de turbo expander **HPpaliers** .

$$HP_{\text{expander}} = HP_{\text{compresseur}} + HP_{\text{palier}}$$

L'énergie consommée par le compresseur est donnée par la formule suivante :

$$HP_{\text{compresseur}} = \frac{1,4145 \times \Delta H_{\text{iscompresseur}} \times Q}{\eta_{\text{compresseur}}} \dots\dots\dots(13)$$

Avec :

- Q : Le débit de gaz
- **1,4145** : Conversation d'unité d'énergie en Horsepower.

Le rendement de compresseur est :

$$\eta_{\text{comp}} = \frac{\Delta H_{\text{iscompresseur}}}{\Delta H_{\text{réelcompresseur}}}$$

$$\eta_c = \frac{W_{is}}{W_{\text{réel}}} \dots\dots\dots (14)$$

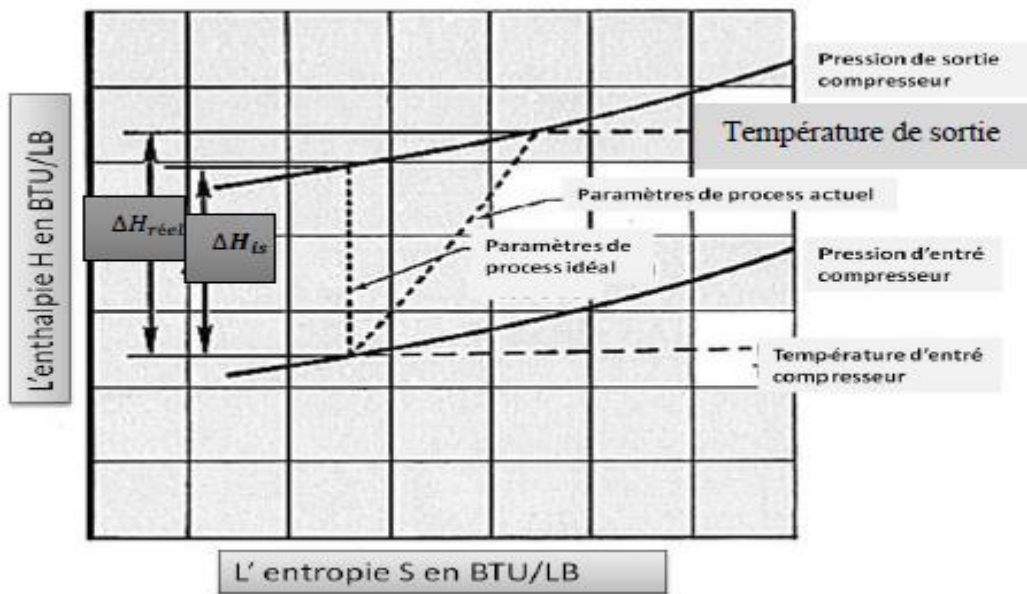


Figure 4.2 : Diagramme H-S coté compresseur. [13]

La pression de gaz sortant de compresseur P_{sortie} est donnée par :

$$P_{\text{sortie}} = P_{\text{entré}} \times \left(1 + \left(\frac{\Delta H_{\text{iscompresseur}}}{C_p \times T_{\text{entré}} \times Z} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} \right) \dots\dots\dots(15)$$

- γ : Le rapport entre Cp et Cv.
- Z : Facteur de compressibilité de gaz.
- Cp: La chaleur spécifique à pression constante.

- Tentré : Température de gaz d'entré compresseur.
- Pentré : La pression de gaz d'entré compresseur.

4.2.4 Méthode de calcul des enthalpies et des entropies

4.2.4.1 Calcul d'enthalpie et d'entropie $H1, S1$ à l'entrée de l'expander

Après la connaissance de température $T1$ et la pression $P1$; A l'aide des diagrammes d'équilibre de chaque composant on tire la valeur de H_i, S_i à l'état correspondant.

L'enthalpie totale au point « 1 » (entre expander) est la somme des enthalpies :

$$H1 = \Sigma(Xi * Hi) , i = 1,2,3, \dots , n \dots \dots \dots (16)$$

Où Xi : est la fraction molaire de chaque composant dans le mélange.

De même façon l'entropie totale à la sortie est :

$$S1 = \Sigma(Xi * Si) , i = 1,2,3, \dots , n \dots \dots \dots (17)$$

Avec :

- $H1$: Enthalpie totale à l'entrée.
- $S1$: Entropie totale à l'entrée.

4.2.4.2 Calcul d'enthalpies et entropie de décharge $H2, S2$

Dans le cas d'un turbo-expander, la détente dans la turbine (expander) s'accompagne avec un changement d'état du gaz.

Après la décharge à une température plus basse : on a un mélange biphasique (liquide – vapeur) :

Donc l'enthalpie à la sortie de l'expander est somme des enthalpies liquides et vapeur.

$$H2 = (1 - x)HL + x * HV \dots \dots \dots (18)$$

De même façon pour l'entropie :

$$S2 = (1 - x)SL + x * SV \dots \dots \dots (19)$$

D'où :

- x : Titre massique de vapeur (représente le pourcentage du vapeur à la sortie de la machine).
- HV : Enthalpie de la phase gazeuse à la sortie.
- SV : Entropie de la phase gazeuse à la sortie.
- HL : Enthalpie de la phase liquide à la sortie.
- SL : Entropie de la phase liquide à la sortie.

Et:

- $HV = \sum HV_i \cdot X_i, i = 1.2.3.4 \dots n.$
- $HL = \sum HLi \cdot X_i, i = 1.2.3.4 \dots n.$
- $SV = \sum SV_i \cdot X_i, i = 1.2.3.4 \dots n.$
- $SL = \sum SL_i \cdot X_i, i = 1.2.3.4 \dots n.$

4.3 Calcul de rendement de Turbo expander

4.3.1 Les paramètres et la composition du gaz de process

Pour calculer le rendement du turbo-expander, on a besoin des paramètres suivants :

- ✓ La composition du gaz d'admission.
- ✓ Le débit du gaz d'entrée.
- ✓ La pression et température d'aspiration. [13]

4.3.2 Calcul des entropies et enthalpies à l'entrée du Turbo Expander

Les données dans le tableau suivant représentent les données nécessaires pour le calcul de l'enthalpie H1 et l'entropie S1 de mélange à (T= -24.5 °C, P= 57 bar) à l'entrée du turbo-expander (déterminées à partir des abaques, voir annexe). [13]

| Comp | Mw (kg/kmol) | Xi mol | Enthalpie H (Kj/Kg) | Entropie S (Kj/Kg.K) | Xi.Hi H (Kj/Kg) | Xi.Si S(Kj/Kg.K) |
|------|-----------------|--------|------------------------|-------------------------|--------------------|---------------------|
| N2 | 28,013 | 0,98 | 490 | 2,4 | 4,802 | 0,02352 |
| CO2 | 44,01 | 1,25 | 360 | 0,1 | 4,5 | 0,00125 |
| C1 | 16,043 | 86,63 | 875 | 1,85 | 758,0125 | 1,602655 |
| C2 | 30,07 | 8,22 | 500 | 1,74 | 41,1 | 0,143028 |
| C3 | 44,097 | 2,2 | 460 | 1,43 | 10,12 | 0,03146 |
| IC4 | 58,124 | 0,26 | 380 | 1,22 | 0,988 | 0,003172 |
| NC4 | 58,124 | 0,33 | 340 | 1,2 | 1,122 | 0,00396 |
| IC5 | 72,151 | 0,07 | 375 | 1,54 | 0,2625 | 0,001078 |
| NC5 | 72,151 | 0,05 | 310 | 1,18 | 0,155 | 0,00059 |
| NC6 | 86,178 | 0,02 | 340 | 1,26 | 0,068 | 0,000252 |
| NC7 | 100,206 | 0 | 380 | 1,5 | 0 | 0 |
| | 18.61 | 100 | | | 821,13 | 1,810965 |

Tableau 4.1 : L'enthalpie et l'entropie à l'entrée de T.E à (T = -24.5°C, P = 57 bar). [13]

- H1 (P = 57 bar, T = -24.5 °C) = 821.13 Kj/Kg.
- S1 (P = 57 bar, T = -24.5 °C) = 1.8109 Kj/KgK.

4.3.3 Calcul des enthalpies isentropique à la sortie de Turbo Expander

Les données dans le tableau suivant représentent les données nécessaires pour le calcul de l'enthalpie H_{2is} de mélange à ($T = -72.8\text{ °C}$, $P = 16.6\text{ bar}$) à la sortie du turbo-expander.

(déterminées à partir des abaques, voir annexe).

| | V | L | H | Hv | HL | |
|-----|---------|-------|-------|---------|--------|---------|
| N2 | 28,013 | 1,05 | 0,06 | 450 | 4,725 | 0,27 |
| CO2 | 44,01 | 1,2 | 1,86 | 220 | 2,64 | 4,092 |
| C1 | 16,043 | 90,65 | 28,25 | 840 | 761,46 | 237,3 |
| C2 | 30,07 | 6,45 | 33,92 | 370 | 23,865 | 125,504 |
| C3 | 44,097 | 0,62 | 25,19 | 360 | 2,232 | 90,684 |
| IC4 | 58,124 | 0,02 | 3,68 | 265 | 0,053 | 9,752 |
| NC4 | 58,124 | 0,02 | 4,96 | 240 | 0,048 | 11,904 |
| IC5 | 72,151 | 0 | 1,08 | 260 | 0 | 2,808 |
| NC5 | 72,151 | 0 | 0,73 | 220 | 0 | 1,606 |
| NC6 | 86,178 | 0 | 0,24 | 210 | 0 | 0 |
| NC7 | 100,206 | 0 | 0,04 | 204 | 0 | 0 |
| | | | | 795,023 | 483,92 | |

Tableau 4.2: L'enthalpie et l'entropie à la sortie de T.E à ($T = -72.8\text{ °C}$, $P = 16.6\text{ bar}$). [13]

Calcul d'enthalpie et entropie isentropique à la sortie de l'Expander :

$$HV = 795.023 \text{ Kj/Kg} \quad HL = 483.92 \text{ Kj/Kg} \quad x = 0.88$$

$$H2 = (1 - x) HL + x * HV$$

$$H2is = (1 - 0.88) * 483.92 + 0.88 * 795.023$$

$$\mathbf{H2is = 759.24 \text{ Kj/Kg}}$$

De la même façon citée en haut, les entropies $S2$ et les enthalpies $H2$ sont calculées à différentes températures T_s et $P2 = 16.6\text{ bar}$.

Sachant que les T_s sont respectivement : - 63,- 65,- 69,- 73°C.

Les résultats trouvés sont présentés dans le tableau suivant :

| | T (°C) | P(bar) | H(Kj/Kg) | ΔH (Kj/Kg) | S(Kj/Kg°K) |
|-----------|--------|--------|----------|--------------------|------------|
| Entré TE | -24,5 | 57 | 821,1 | 0,0 | 1,818 |
| Sortie TE | -63 | 16,6 | 784,9 | 36,3 | 1,912 |
| | -65 | 16,6 | 776,5 | 44,6 | 1,883 |
| | -69 | 16,6 | 764,5 | 56,6 | 1,822 |
| | -73 | 16,6 | 751,6 | 69,5 | 1,767 |

Tableau 4.3 : Valeurs des entropies et enthalpies à l'entrée et à la sortie de TE. [13]

On trace les courbes $S = f(T)$ et $\Delta H = f(T)$ (figure 4.3 et figure 4.4).

Une détente isentropique correspond à $S_2 = S_1 = 1,81 \text{ Kj/kg K}$ c.à.d. $\Delta S = 0$

La température théorique à la sortie du turbo-expander est déterminée par extrapolation sur le graphique de la (Figure 4-3) et elle est égale à $T_{Sth} = -70^\circ\text{C}$

Qui correspond à $\Delta S = 0$ et $\Delta H_{theo} = 60 \text{ kj/kg}$

Pour une efficacité du turbo-expander égale à 83% (donnée par le constructeur), la variation de l'enthalpie sera :

$\Delta H_{réel} = \Delta H_{th} * 83\% = 49.8 \text{ kj/kg}$ et la température réelle trouvée à la sortie du Turbo-Expander .

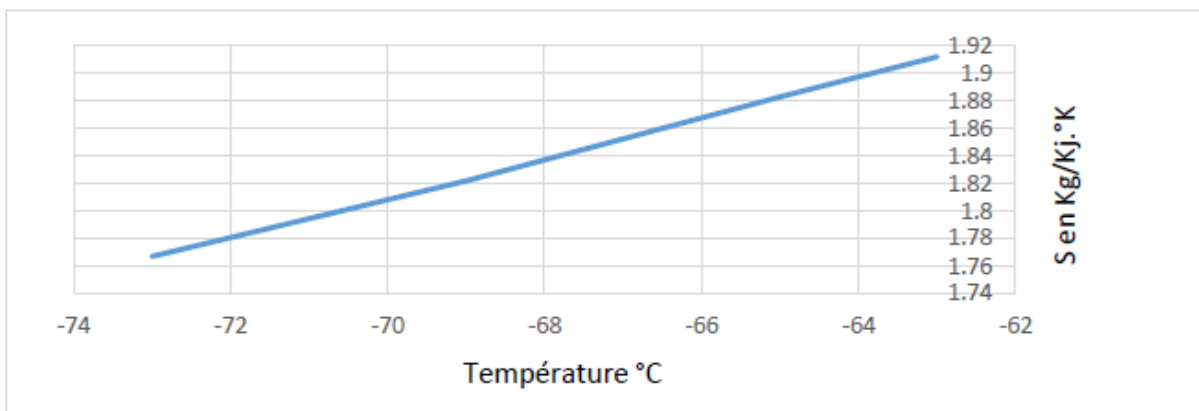


Figure 4.3 : Variation de l'entropie en fonction de la température $S = f(T)$

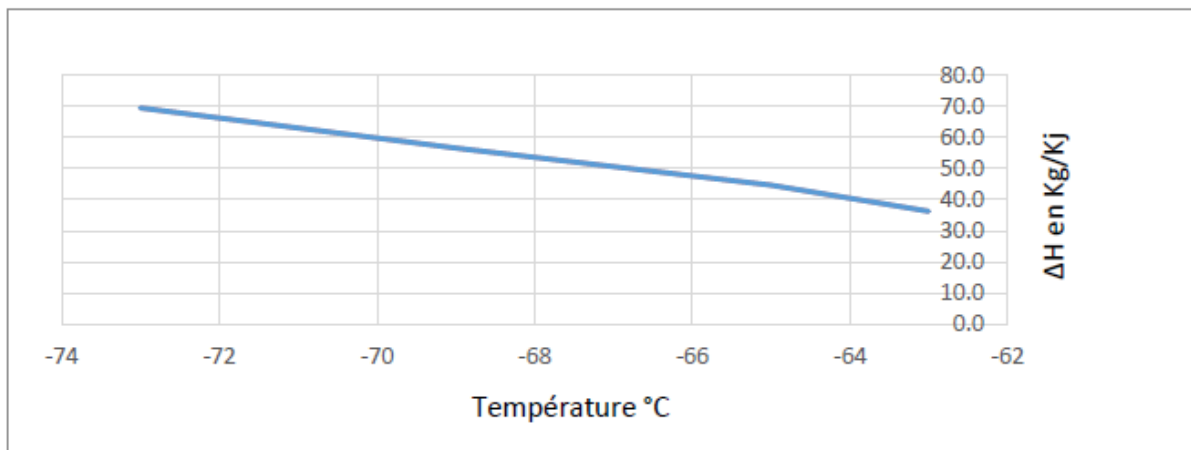


Figure 4.4 : Variation de l'enthalpie en fonction de la température $\Delta H = f(T)$

4.3.4 Calcul de rendement isentropique

En utilisant les paramètres précédents et en se référant à l'équation de calcul de rendement isentropique, le rendement isentropique égale :

$$\eta_{is} = \frac{\Delta H_{réel}}{\Delta H_{is}} \times 100 = \frac{H_{2réel} - H_1}{H_{2is} - H_1} \times 100 = 80.2\%$$

L'énergie échangée par le turbo-Expander **HPexpander** est exprimée par la formule suivante (l'énergie donnée par l'expansion des gaz) :

$$HPExp = \Delta H_{is} * Q * \eta_{is} * 1,4145$$

$$HPExp = (26.65) * 177.5 * 0,802 * 1,4145$$

$$HPExp = 5366 \text{ Horspower.}$$

$$WExp = 4001 \text{ Kw.}$$

- **WExp** : Le travail récupéré par l'expander en kilowatt .
- **HPexp** : L'énergie échangée par le turbo-expander en Horsepower.
- **Q** : Le débit de gaz .
- **1,4145** : Conversion d'unité d'énergie en Horsepower.

4.3.5 Description du logiciel HYSYS

HYSYS est un logiciel de simulation de procédé de génie des procédés, de génie chimique et d'énergétique développé par la société Hyprotech (canada) il est l'un des plus performants logiciels de simulation. Le simulateur HYSYS peut être utilisé lors de la conception d'un procédé industriel afin d'établir des bilans de matière et d'énergie d'un procédé industriel et de dimensionner les équipements de ce procédé ou bien dans le suivi des procédés qui sont déjà installés afin de réajuster les paramètres de fonctionnement dans le cas de changement de compositions de l'alimentation ou des conditions de fonctionnement de certains équipements et de déterminer les performances des équipements. [13]

Aspen HYSYS est le premier logiciel de simulation de processus de l'industrie de l'énergie utilisé par les principaux producteurs de pétrole et de gaz, les raffineries et l'ingénierie L'utilisation des simulateurs HYSYS se fait de la façon suivante:

- ✓ L'utilisateur doit spécifier les constituants du gaz, du liquide ou du mélange.
- ✓ Il choisit un modèle thermodynamique .
- ✓ Il doit établir le schéma du procédé (PFD) .

- ✓ Il doit aussi spécifier les paramètres nécessaires pour le calcul de chaque opération .
- ✓ Le simulateur résout le schéma de procédé .
- ✓ Le simulateur peut aussi dimensionner quelques équipements. [13]

4.3.5.1 Calcul de rendement polytropique

A l'aide d'une simulation sur Aspen HYSYS qui nous offre des notions thermodynamiques complètes pour un calcul exact des propriétés physiques, cinétiques et des comportements des fluides.

Après la simulation, les résultats aboutis sont représentés dans les tableaux suivants :

| | Entrée Expander | Sortie Expander Isentopique | Sortie Expander Poly-tropique Actuel |
|------------------|-----------------|-----------------------------|--------------------------------------|
| Température °C | -24.50 | -74.4 | -72.8 |
| Pression Barg | 56 | 15.6 | 15.6 |
| % mol Vapeur % | 100 | 88.5 | 93.56 |
| % mol Liquide % | -- | 11.5 | 6.43 |
| Liquide Tonne/Hr | -- | 35.78 | 33.35 |

Tableau 4.4 : Les résultats à l'aide d'une simulation sur Aspen HYSYS. [13]

| | ISONDROPIQUE | POLYDROPIQUE ACTUEL |
|----------------|--------------|---------------------|
| Puissance (KW) | 4001 | 3691 |
| Rendement (%) | 80.2 | 74 |

Tableau 4.5 : Le rendement isentropique et polytropique de TE. [13]

Un écart important (5.8%) entre le rendement isentropique et poly-tropique actuel est observé cet écart est causé par des facteurs d'imperfections et des pertes, notamment d'un échange de chaleur avec l'extérieur (la formation de glace sur la machine), frottements aérodynamiques dus aux imperfections des surfaces de la machine et à la viscosité du gaz, pertes par choc du gaz contre les parois de la machine, pertes de charge localisées, et il est aussi lié à la pression d'aspiration de la machine.

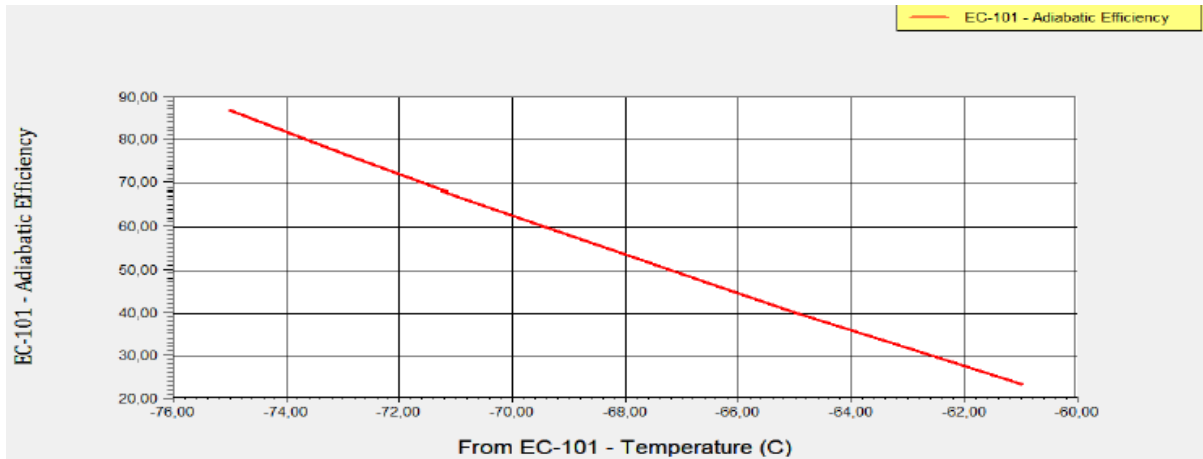


Figure 4.5 : La variation de rendement de Turbo expander en fonction de la température de sortie.

D'après le graphe de variation de rendement de Turbo expander en fonction de la température de sortie, on remarque bien que plus la température diminue plus le rendement augmente.

Conclusion

La compréhension du comportement des hydrocarbures est basée sur la maîtrise de la thermodynamique, le transfert de chaleur et le transfert de matière. Une bonne maîtrise de ces paramètres permet de les transformer sous forme d'équations mathématiques dont la programmation est envisageable. Ceci dans le but d'économiser le temps du calcul et d'éviter les erreurs involontaires.

Une différence significative (5,8%) entre l'efficacité isentropique et polytropique du courant a été observée, cette différence est causée par des défauts et des facteurs de perte.

Donc les résultats obtenus d'une bonne modélisation sont comparables à ceux des simulateurs professionnels.

CONCLUSION GENERALE

La protection cathodique peut réduire le taux de corrosion d'une structure et prolonger considérablement sa durée de vie, deux principes vont fonctionner ensemble :

Que ce soit en insérant une barrière entre le métal et le milieu environnant, c'est une protection passive.

C'est une protection active que ce soit par l'apport d'énergie extérieure pour stopper l'initiation du processus de corrosion.

Les turboexpander sont des équipements critiques pour de nombreuses applications, y compris le traitement du gaz, les gaz industriels, la récupération d'énergie et la production d'électricité, et leur longévité et leurs performances soutenues sont souvent essentielles à la rentabilité d'une entreprise.

Le développement de turboexpander pourrait représenter une solution rentable pour fournir des systèmes de protection cathodique dans les structures de transport de gaz naturel par pipeline.

D'après notre calcul à l'aide du logiciel HYSYS, le rendement de l'expander est de 80% ce qui est bien inférieur à la valeur donnée par le constructeur qui est de 83%, cela est dû au déclin dans la production du gisement.

Donc, pour améliorer le rendement de Turbo-expander on a deux solutions possibles :

- ✓ Augmentation de la pression du gaz à l'entrée du train par la section de boosting.
- ✓ Augmentation du débit du gaz de recyclage à une valeur acceptable.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] **Marec, corrosion et protection cathodique, école d'application des techniques gazières, TRAN 96.2, (1996), Gaz de France.**
- [2] **D. Bouzidi, Corrosion et protection cathodique des conduites souterraines, mémoire d'ingénieurs, école de technologie supérieure université du Québec 2011.**
- [3] **Mme H. ZENDAOUI, IAP Boumerdes, partie 1 corrosion et protection des canalisations, SH, IAP.CU, UFR : Gas Refining & Petrochemistry 2011.**
- [4] **La Protection Cathodique - Guide Pratique - Éditions Technip - Paris 1986.**
- [5] **Document technique sonelgaz “ Procédures relatives au revêtement appliqué sur les tubes transport de gaz : généralités sur les fonctions des revêtements et leurs applications” PR : N° 004.GRTG - R 1 (2008).**
- [6] **Benabed, L (2017). Étude de l'influence du rendement sur la production du GPL. Mémoire de fin d'étude : cryogénie de froid. Université de Science et de la Technologie Houari Boumediene, 80p**
- [7] **Documentation de General Electric Company « Turboexpander-compressors» GE_TXComp_Brochure_020310**
- [8] **Documents interne du service GPL2, Complexe industriel sud (CIS), Hassi Messaoud**
- [9] **Généralités sur le T.E, vanne J.T & notions de thermodynamique.**
- [10] **Avetian, T. et L Rodríguez, « Fundamentals of turboexpander design and operation », Gas Processing & LNG, mai/juin 2020**
- [11] **Driving Expander Technology © Atlas Copco Gas and Process 02/2019, Germany.B26/004/036/0618**
- [12] **Mr. AKROUR Tarek. (Techniques de prévention et de contrôle de la corrosion à Rhourde el Baguel) Université Boumerdes**
- [13] **Mouloud Haouari (Calcul du rendement et l'influence du changement des paramètres du processus sur la marche des opérations de la turbine d'expansion) Université ain temouchent**