

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE M'HAMED BOUGARA BOUMERDES



Faculté des Sciences de L'Ingénieur
Département Génie Mécanique

MEMOIRE DE MASTER

En vue de l'obtention du diplôme de **MASTER** en :

Filière : Electromécanique
Spécialité: Electromécanique

Thème

ETUDE TECHNOLOGIQUE DES PALIERS MAGNETIQUES
DANS LE TURBOEXPANDER

Présenté par :

KAHLAOUI Walid
BOURABIA Youcef

Promoteur :

Pr.H AKNOUCHE

Promotion 2018- 2019

Dédicace

Je dédie ce travail à mes très chers parents pour leur amour, affection, encouragement et leur soutien inconditionnel durant mon parcours et toute ma vie, que Allah vous bénisse, vous assiste, vous soit en aide et vous garde pour moi.

A mes sœurs et mes chers frères et à toute ma famille.

A mon binôme et mes meilleurs amis et surtout mes amis MEM17 et sans oublier la chambre 122.

Et en fin à tous ceux qui me connaissent.



Walid

Dédicace

Je dédie ce travail à mes très chers parents pour leur amour, affection, encouragement et leur soutien inconditionnel durant mon parcours et toute ma vie, que Allah vous bénisse, vous assiste, vous soit en aide et vous garde pour moi.

À mes sœurs et mes chers frères et à toute ma famille.

À mon binôme et mes meilleurs amis et surtout mes amis MEM17 et sans oublier la chambre 122.

Et en fin à tous ceux qui me connaissent.



Youcef

Remerciement

Ce travail a été réalisé à la faculté de sciences de l'ingénieur, université M'HAMED BOUGUERA- BOUMERDES, département de génie mécanique.

De prime abord nous glorifions « ALLAH » qui nous a prodigué la force et le courage pour terminer ce travail.

Nous tenons à remercier aussi nos parents et toute la famille qui nous ont beaucoup aidés dans notre cursus scolaire.

Nous remercions plus particulièrement notre promoteur Mr AKNOUCHE Hamid.

Nous tenons à remercier aussi nos collègues de groupe ELECTROMECANIQUE de promotion 2018/2019, sans oublier tous nos amis avec lesquels nous avons passé des bons et agréables moments ; ainsi que les gens que nous avons fréquenté à l'université pendant cinq années que ce soit des professeurs, des agents de sécurité.



Youcef/Walid

Résume

L'utilisation de paliers magnétiques est de plus en plus fréquente étant donné les avantages que cette technologie apporte. En effet, ces derniers permettent de léviter un objet rotatif grâce à un champ magnétique. Un roulement à billes peut être substitué par un palier magnétique. Cette substitution permet de réduire les entretiens, diminuer les pertes par friction et augmenter la durée de vie du système. Des applications nécessitant d'hautes vitesses de rotation et des pertes réduites constituent des situations exemplaires de l'utilisation de cette technologie. Un palier magnétique est une technologie avec de nombreux avantages et certains inconvénients. Par exemple, un palier magnétique hybride est un système naturellement instable et la force d'attraction magnétique est une équation fortement non-linéaire en fonction du courant et de l'entrefer. Ces caractéristiques démontrent qu'une loi de commande est nécessaire afin de stabiliser le palier magnétique. De plus, la loi de commande doit être précise et rapide. Les principales applications d'un palier magnétique incluent une rotation de l'objet en lévitation. Ceci nécessite une erreur en régime permanent nulle et une commande ajustable rapidement afin d'assurer une stabilité en tout temps.

Les mots clés : paliers magnétiques, commande, non-linéaire, industrie pétrolière, turboexpander
ملخص

أصبح استخدام المحامل المغناطيسية أكثر شيوعاً بالنظر إلى الفوائد التي تجلبها هذه التكنولوجيا. في الواقع، هذه تسمح بارتفاع جسم دوار من خلال مجال مغناطيسي. يمكن استبدال محمل كروي بمحمل مغناطيسي. هذا الاستبدال يقلل من الصيانة، ويقلل من خسائر الاحتكاك ويزيد من عمر النظام. تعد التطبيقات التي تتطلب سرعات دوران عالية وخسائر منخفضة حالات مثالية في استخدام هذه التكنولوجيا. المحامل المغناطيسية هي تقنية ذات مزايا وعيوب عديدة. على سبيل المثال، المحامل المغناطيسية الهجينة هي نظام غير مستقر بشكل طبيعي، وقوة الجذب المغناطيسي هي معادلة غير خطية بقوة كوظيفة لفجوة التيار والهواء. تثبت هذه الخصائص أن قانون التحكم ضروري من أجل تثبيت الحاملة المغناطيسية. بالإضافة إلى ذلك، يجب أن يكون قانون الرقابة دقيقاً وسريعاً. وتشمل التطبيقات الرئيسية للمحمل المغناطيسي دوران الكائن في الرفع. هذا يتطلب التقليل من الخطأ والتحكم قابل للتعديل بسرعة لضمان الاستقرار في جميع الأوقات.
الكلمات المفتاحية : المحامل المغناطيسية، تحكم، اللاخطية، صناعة بترولية، توربو متوسع

Abstract

The use of magnetic bearings is becoming more common given the benefits that this technology brings. Indeed, these allow to levitate a rotating object through a magnetic field. A ball bearing can be substituted by a magnetic bearing. This substitution reduces maintenance, reduces friction losses and increases system life. Applications requiring high rotational speeds and reduced losses are exemplary situations in the use of this technology. A magnetic bearing is a technology with many advantages and disadvantages. For example, a hybrid magnetic bearing is a naturally unstable system and the magnetic attraction force is a strongly non-linear equation as a function of current and air gap. These characteristics demonstrate that a control law is necessary in order to stabilize the magnetic bearing. In addition, the control law must be precise and fast. The main applications of a magnetic bearing include a rotation of the object in levitation. This requires zero steady state error and quickly adjustable control to ensure stability at all times.

Key words: magnetic bearing, command, non-linear, petroleum industry, turboexpander

Sommaire

Introduction générale

Introduction générale.....	1
----------------------------	---

Chapitre I : Présentation de l'organisme d'accueil

Introduction	2
I.1 Situation géographique de GASSI TOUIL	2
I.2 Historique du champ de GASSI TOUIL	4
I.3 Développement du site GASSI TOUIL	5
I.4 Organisation et structure de la région de GASSI TOUIL	5
I.5 L'organisation et fonctionnement de la division de maintenance	5
I.5.1 Service méthode	5
I.5.2 Service instrumentation	6
I.5.3 Service Electricité.....	6
I.5.4 Service mécanique.....	6
I.6 Les activités de la région de GASSI TOUIL.....	6
I.7 Description de la nouvelle usine de traitement de gaz	6
I.7.1 Zone G01: Séparation initial.....	7
I.7.2 Zone G05 : Compresseur (booster)	7
I.7.3 Zone G11 : Séparation de C1, C2.....	8
I.7.4 Zone P10: Séparation GPL	8
I.7.5 Zone G50 : Turbine à gaz	8
I.7.6 Zones de stockage de GPL et de condensat.....	8
I.8 Organigramme générale de GASSI TOUIL.....	10
Conclusion.....	11

Chapitre II: UNITÉ TURBODETANDER

Introduction	12
II.1 Définition du turbo-expandeur	13
II.2 Domaine d'utilisation du Turbo Expander	13
II.3 Principales caractéristiques d'un Turbo Expander	13
II.4 Rôle d'un Turbo-Expander.....	14
II.5 Description du turbo expander	14
II.6 Parties composants la machine.....	16
II.6.1 Roue de détente (Expander).....	16

Sommaire

II.6.2	La roue du compresseur	18
II.6.3	L'arbre.....	19
II.6.4	L'aube directrice (Distributeur)	20
II.6.5	Les paliers	20
II.7	Fonctions principales de la machine	21
II.7.1	Fonction de compression	21
II.7.2	Fonction de guidage du rotor	22
II.8	Avantages et inconvénients du turbo expander	22
II.8.1	Avantages.....	22
II.8.2	Inconvénients	22
	Conclusion.....	22

Chapitre III : Paliers Magnétiques

	Introduction.....	23
III.1	Notions Fondamentaux	23
III.1.1	Fondamentaux du magnétisme.....	23
III.1.2	Force de Lorentz.....	24
III.1.3	Force de réluctance.....	25
III.1.4	Force de Linéarisation	27
III.2	Classification des paliers magnétiques.....	29
III.3	COMPOSANTS DU PALIER MAGNÉTIQUE ACTIF	30
III.3.1	Noyau de fer	30
III.3.2	Enroulements.....	30
III.3.3	Rotor.....	30
III.3.4	Capteurs de position	30
III.3.5	Contrôleur.....	30
III.3.6	Amplificateurs de puissance.....	30
III.4	Applications.....	31
III.4.1	100 000 tours par minute.....	32
III.4.2	Compresseur de réfrigération	32
III.4.3	Broche de meulage	32
III.4.4	Broche haute vitesse.....	32
III.5	Pertes dans les paliers magnétiques	33

Sommaire

III.6 Avantages et inconvénients	35
III.6.1 Avantages	35
III.6.2 Inconvénients	35
Conclusion.....	36
Chapitre IV: Système de contrôle PMA	
Introduction	37
IV.1 Enoncé de problème	37
IV.2 Etude du système de contrôle spécifié de l'PMA axial	37
IV.2.1 Electroaimants	37
IV.2.2 Système de contrôle	42
IV.3 Interprétation des résultats	46
Conclusion.....	48
Conclusion générale	
Conclusion générale	49
Références bibliographiques.....	50

Liste des figures :

- Chapitre I :

Fig.I.1 : situation géographique du GASSI TOUIL.....	3
Fig.I.2 : les différents champs de GASSI TOUIL.....	4
Fig. I.3 : Zone G05.....	7
Fig.I.4 : Schéma présente les différentes zones.....	9

- Chapitre II :

Fig.II.1 : Turbo-Expander à paliers magnétiques au CPF GT.....	12
Fig.II.2 : turbo-expander image.....	14
Fig.II.3 : parties de turbo expander.....	15
Fig.II.4 : La configuration du turbo-expandeur supporté par les paliers magnétiques actifs.....	16
Fig.II.5 : Roue de détente (Expander).....	17
Fig.II.6 : la roue de compresseur.....	18
Fig.II.7 : les laminations ferromagnétiques sur l'arbre.....	19
Fig.II.8 : schéma de l'arbre.....	20
Fig.II.9 : emplacement des paliers dans le turbo expander.....	20
Fig.II.10 : schéma des axes d'un palier magnétique.....	21

- Chapitre III :

Fig.III.1 : Circuit magnétique simple.....	25
Fig.III.2 : Electroaimant simple avec arbre.....	26
Fig.III.3 : Dépendance de la force magnétique sur la position.....	28
Fig.III.4 : Dépendance de la force magnétique sur le courant.....	28
Fig.III.5 : Classification de paliers magnétiques.....	29
Fig.III.6 : Composants de PMA.....	31
Fig.III.7 : Pertes dans les paliers magnétiques.....	34

- Chapitre IV :

Fig.IV.1 : Système de lévitation magnétique.....	38
--------------------------------------------------	----

Liste des figures

Fig.IV.2 : Schéma fonctionnel du système de lévitation magnétique.....	38
Fig.IV.3 : Circuit équivalent.....	40
Fig.IV.4 : Système de contrôle spécifié PMA.....	42
Fig.IV.5 : Modèle d'électroaimant.....	43
Fig.IV.6 : Modèle simplifié du rotor.....	43
Fig.IV.7 : Schéma de calcul des courants de référence.....	44
Fig.IV.8 : Boucle de contrôle de courant interne.....	44
Fig.IV.9 : Caractéristiques du courant de référence et du courant mesuré.....	46
Fig.IV.10 : Réaction à l'effet d'entrée du signal de référence.....	47

Liste des tableaux

Liste des tableaux :

- Chapitre IV

Tableau IV.1 : Paramètres de modélisation.....45

Liste des abréviations

Liste des abréviations :

GT : Gassi Touil

RGA : Récupération des Gaz Associés

PGT : Projet de Gassi Touil

CPF : Central Production Facilities

GPL : Gaz de Pétrole Liquéfié

C1 : Méthane

C2 : Ethane

CP: Central Production

O2: oxygen

N2: Nitrogen

PMA: Palier Magnétique Actif

H: Le champ magnétique(Tesla).

i: Le courant (A)

ds: La longueur différentielle (m).

B : flux magnétique (Tesla/m²).

μ : La perméabilité magnétique (H/m).

μ_0 : La perméabilité de l'espace libre

μ_r : La perméabilité relative

Q : La charge électrique (C).

V : La vitesse (m/s).

U : L'énergie potentielle(J).

n : Le nombre de bobines

CFC : Chlorofluorocarbures

N : Le nombre de tours de l'enroulement

S_{air} : La plus petite surface transversale de l'électroaimant

i_{bias} : Le courant de polarisation (A).

Liste des abréviations

X : l'angle de force (rad).

R_g : La résistance magnétique dans l'entrefer (Ω).

R_c : La résistance magnétique dans l'électroaimant (Ω).

Ψ : Le flux magnétique weber (wb).

W_{ce} : L'énergie (W).

W_{fe} : L'énergie magnétique(J).

F : La force (N)

K_i : La raideur du courant (N/m).

K_x : La raideur de la position (N/m).

Introduction générale

Introduction générale

Introduction générale

La recherche de nouvelles solutions pour les systèmes de roulement dans les turbomachines, qui doivent satisfaire à des exigences de performances particulières, a suscité l'intérêt des systèmes de suspension magnétique active à rotor. De nouvelles solutions dans les systèmes de roulement ont été de plus en plus fréquemment appliquées dans les machines tournantes modernes. Un système de palier magnétique actif est une technologie qualitativement différente des solutions classiques et nécessite la coopération de spécialistes de deux branches technologiques, car il combine un système mécanique à un système de commande électronique automatique qui commande ce système mécanique.

Dans notre travail, nous nous sommes intéressés à l'étude du système de contrôle de l'AMP axial.

Ce mémoire s'articule autour de quatre chapitres :

Dans le premier chapitre, nous présentons notre lieu de stage et leurs différentes constitutions

Dans le deuxième chapitre, nous abordons les principes de fonctionnements de TURBOEXPANDER dans la composition de la station.

Dans le troisième chapitre nous rappelons sur les fondamentaux de magnétisme, la théorie et des principes de fonctionnement des paliers magnétiques

Dans le dernier chapitre nous étudions le système de contrôle PMA sur la base d'un modèle informatique donné dans MATLAB

Nous terminons notre mémoire par une conclusion générale.

Chapitre I : Présentation de l'organisme d'accueil

Introduction

Pendant longtemps le gaz a été considéré comme un sous-produit du pétrole; il était brûlé à la torche sur de nombreux gisements. Il a commencé à être utilisé aux Etats-Unis, dans l'industrie d'abord, puis pour des usages domestiques en se substituant peu à peu au gaz manufacturé. Son développement a ensuite été très rapide, grâce à l'abondance de ses réserves, à leur répartition sensiblement plus équilibrée que celle des réserves pétrolières et à son excellente qualité pour le consommateur final.

L'économie algérienne s'appuie sur un patrimoine énergétique ou prédomine largement le gaz naturel, 61% des réserves récupérables contre 15% de pétrole brut. L'Algérie est. Un pays exportateur de gaz, avec des réserves récupérables estimées à plus de 3000 milliards de m³. Un des nombreux gisements de gaz naturel se situe dans le Sahara Algériens à GASSI TOUIL.

Dans ce rapport nous présenterons le site de Gassi-Touil, ou nous avons effectué notre formation, ainsi que le fonctionnement général de l'unité de traitement de gaz naturel (CPF).

I.1 Situation géographique de GASSI TOUIL

Le site de projet se trouve sur le champ de Gassi Touil à 150 km au sud de Hassi Messaoud, à une attitude de 30° 31' 00" nord et à une longitude de 6° 28' 7" est, l'altitude moyenne est 200m environ. Il s'étend sur une superficie d'environ 170 km de long et 105 km de large, dans une région à caractère désertique sujette aux tempêtes de sable et aux écalas. Le climat est caractérisé par une humidité relative 10 % min, et 75 % max. les amplitudes de température sont importantes, variant de -5 °c en hiver à 55 °c en été. Le vent est violent et souvent accompagné de sable avec une direction nord-est sud-ouest.

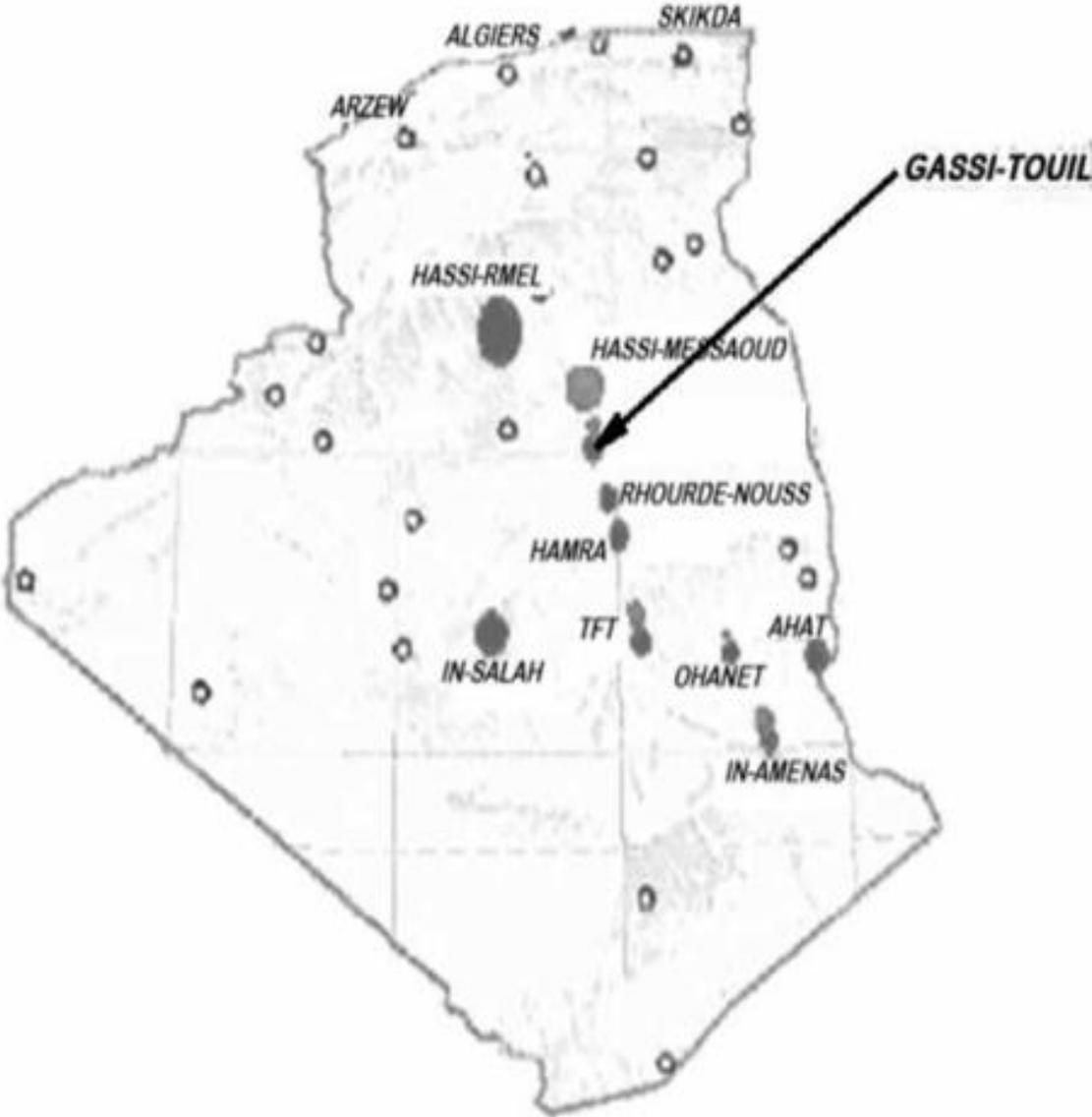


Fig.I.1: Situation géographique du GASSI TOUIL.

I.2 Historique du champ de GASSI TOUIL

La région de Gassi Touil est à vocation pétrolière et gazière, elle est composée de plusieurs champs dont les principaux : Nezla Nord/Sud; Hassi Touareg Nord/Sud, Gassi Touil; Hassi Chergui Nord/Sud; Toulal; Brides.

Le champ de Gassi Touil a été découvert en 1961 par le forage de GT 1, implanté au sommet de la structure (COPEFA-CEP). Ce forage a mis en évidence la présence de gaz dans les réservoirs des Trias Supérieur et Inférieur. Il a fallu attendre le forage de GT 3 (Novembre 1962-Mars 1963), implanté sur le flanc est de la structure, pour découvrir de l'huile dans le Trias Inférieur à une profondeur de 2100 m.

Le développement de ce champ a été poursuivi très rapidement durant les deux années suivantes où pas moins de 30 puits ont été forés et mis en exploitation. Depuis, le forage de nouveaux puits a continué jusqu'en 1974, pour délimiter les contours du gisement.

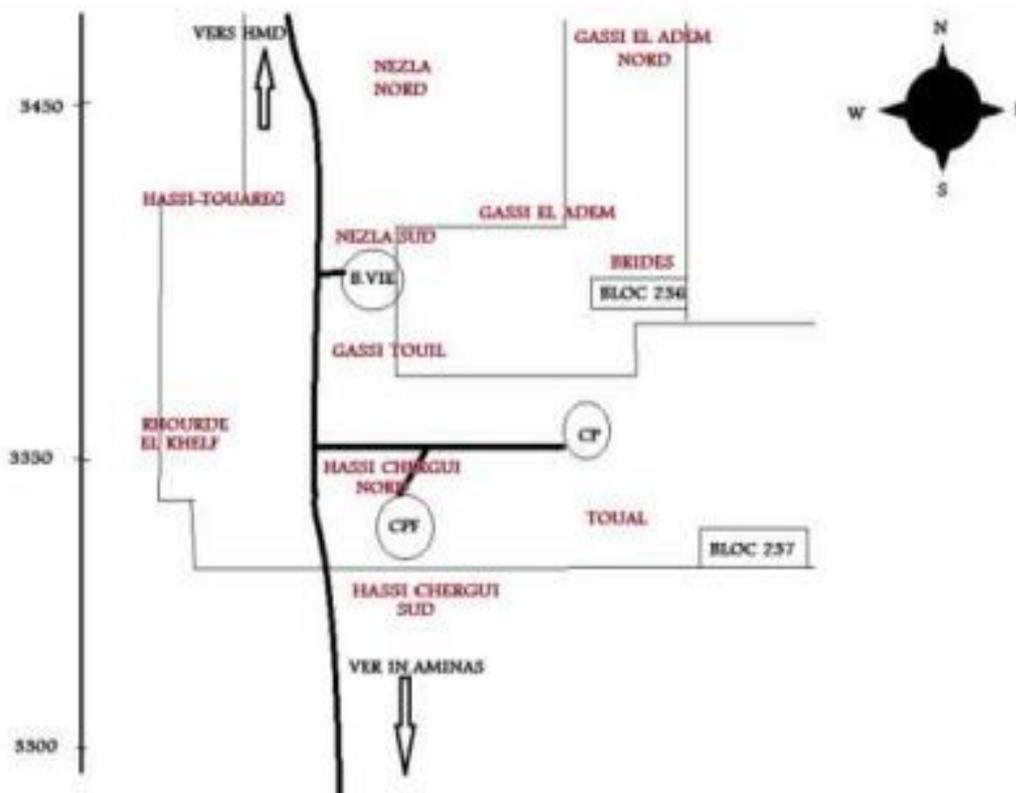


Fig.I.2 : les différents champs de GASSI TOUIL.

I.3 Développement du site GASSI TOUIL

Les réserves importantes révélées par le gisement découvert, des étapes importantes ont marqué le développement du champ :

- 1965 : Une unité de séparation brute est réalisée de capacité de 21 850 m³/j.
- 1976 : Réalisation de l'unité traitement du gaz par la société française SOFREGAZ pour traiter le gaz du champ de GASSI TOUIL (TAGS). La capacité initiale de traitement installée est de 20 millions de Sm³/jour de gaz pour une production de 2900 tonnes de condensât récupérés.
- 2000 : Réalisation d'une station de déshuilage, dont le but principal est la protection de l'environnement. La capacité de traitement de la station est de 100 m³/h.
- 2003 : Réalisation de l'unité RGA (Récupération des Gaz Associés BP, MP, HP) contrôlée par un système DCS. La capacité est de 4 900 000 Sm³/j à une pression de 150 bars pour la réinjection.
- 2010 : Réalisation de l'unité traitement du gaz par la société JGC pour traiter le gaz du champ de GASS TOUIL. La capacité initiale de traitement installée est de 12 millions m³/jour de gaz.

I.4 Organisation et structure de la région de GASSI TOUIL

La direction régionale de Gassi Touil est composée de 9 divisions dirigées par un directeur régional. Dans ces 9 divisions, on s'intéresse seulement à la division maintenance et en particulier au service électricité.

I.5 L'organisation et fonctionnement de la division de maintenance

Elle occupe une place très importante dans la région, ceci se caractérise surtout par ses diverses activités pour le bon fonctionnement des équipements d'exploitation.

Ses fonctionnements surtout d'ordre technique, électrique, mécanique et régulation. Les quatre services de cette division sont définis brièvement comme suit :

I.5.1 Service méthode

Il est chargé de :

- La documentation technique ;
- La présentation des pièces de rechange ;
- L'établissement des rapports d'activité (hebdomadaire, mensuel, annuel).

I.5.2 Service instrumentation

Il est chargé de la maintenance et de l'entretien des instruments pneumatiques et électroniques ainsi que les équipements de régulation (vannes, transmetteurs,...etc.).

Les principaux travaux de ce service sont :

- Nettoyage.
- Vérification et contrôle des instruments de régulation (pneumatique et électronique).

I.5.3 Service Electricité

Chargé de tous les travaux de nature électrique tel que le réseau d'alimentation en énergie électrique, sous station électrique, équipement, appareillage, ...etc., la nature des travaux à la charge de ce service est à caractère préventif, curatif et prédictif.

I.5.4 Service mécanique

Ce service prend en charge tous les travaux de nature mécanique tel que : Accouplement, alignement, changement des parties défectueuses, réparation,....

Il est composé de deux ateliers :

- Atelier mécanique : réparation des pannes de nature mécanique ;
- Atelier usinage : équipé des machines-outils.

I.6 Les activités de la région de GASSI TOUIL

Elle dispose de différentes installations de base permettant d'assurer la production, le stockage et l'expédition du gaz et du brut, dont principalement :

- Une unité de traitement brut.
- Des unités de stockage du brut.
- Une unité de traitements du GAZ.
- Une unité d'injection du gaz pour le maintien de la pression dans le gisement.
- Une unité de déshuilage pour la protection de l'environnement.
- Laboratoire d'analyse.
- Unité d'exploitation.
- Unité de sécurité industrielle.

I.7 Description de la nouvelle usine de traitement de gaz

Le Projet de Gassi Touil « PGT » est lancé dans le cadre de développement de différents champs à gaz. Cette usine de traitement de gaz est conçue pour traiter 12 millions de mètres

cubes de gaz/jour provenant des champs de gaz. La capacité de fonctionnement de l'usine CPF est comprise entre 30% (3,6 millions de mètres cubes de gaz par jour), et 110% (13,2 millions de mètres cubes de gaz par jour) de sa capacité de base. La nouvelle usine permet de produire de GPL (Gaz de Pétrole Liquéfié), de condensat et du gaz sec. Elle est composée des zones suivantes :

I.7.1 Zone G01: Séparation initial

Dans cette zone **G01** il y a deux manifolds : un manifold pour trois 03 arrivées haut pression HP (70bar): NAZLA, TOUAL, RODH ELKHELEF et un manifold pour deux 02 arrivées basse pression BP GASSI TOUIL (28bar), HASSI TOUAREG (36 bar).

I.7.2 Zone G05 : Compresseur (booster)

Dans cette zone **G05** il y a deux étages A/B; A chaque étage, nous avons deux compresseurs entraînés par deux moteurs électriques de tension 5.5KV et une vanne régulatrice pour réguler la pression de le gaz qui arrive.

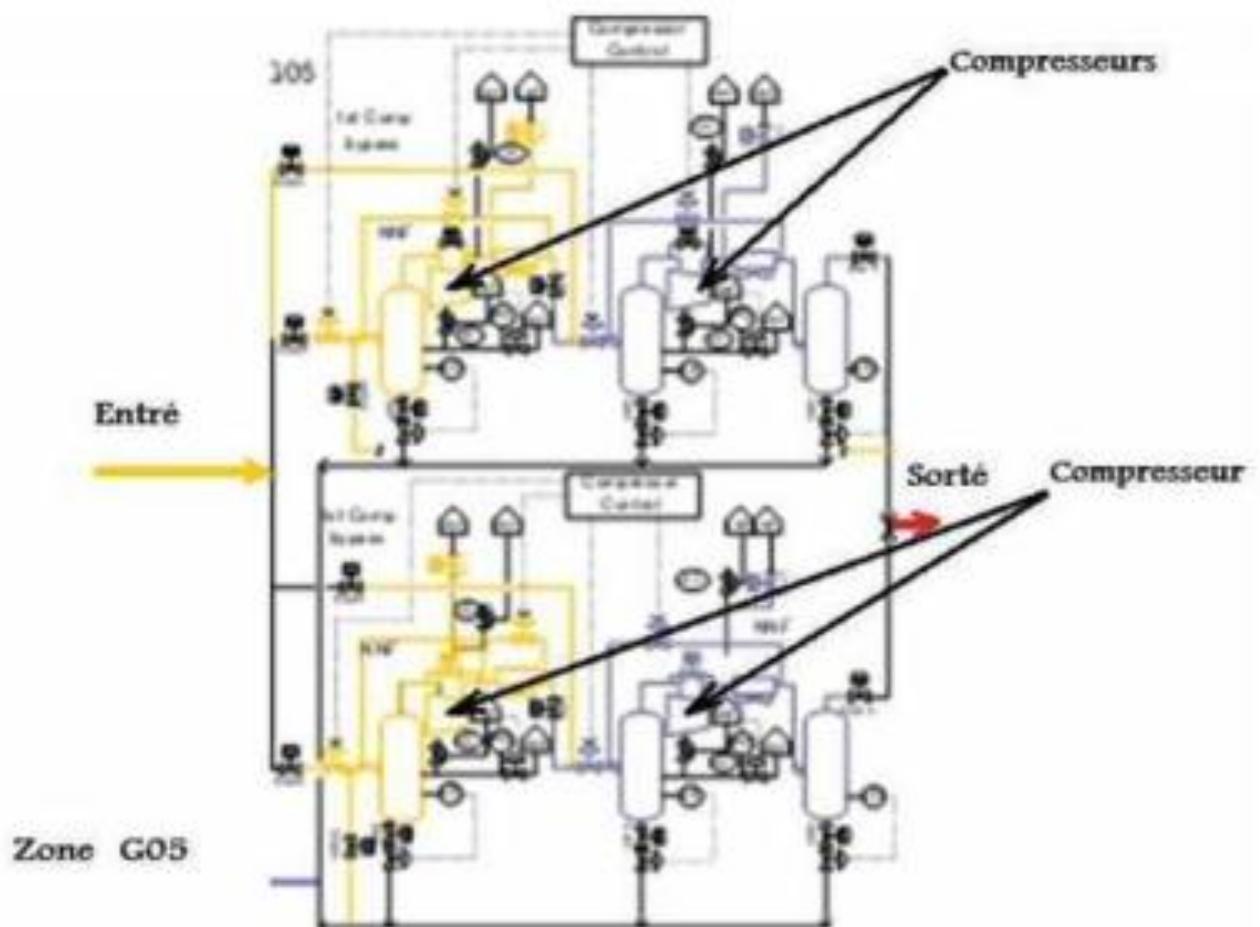


Fig. I.3 : Zone G05.

Note: Les moteurs électriques de tension alimentation 5500V ont des démarreurs progressifs associant avec eux.

I.7.3 Zone G11 : Séparation de C1, C2

- Le traitement de gaz qui arrive à **G01** et **G05** dans cette zone-là.
- Récupération de liquide (condensat et GPL).
- Extraction des poussières, sable, les gouttes d'eau.

I.7.4 Zone P10: Séparation GPL

L'opération de séparation GPL Contenu dans la zone **P10** sur deux (02) équipements fondamentales : un stabilisateur qui réceptionne le liquide qui arrive à la zone **G01**, et un débuthaniseur qui réceptionne le liquide qui arrive à la zone **G11**. Dans cette zone-là.

I.7.5 Zone G50 : Turbine à gaz

Dans cette zone il y a deux turbines à gaz chaque turbine est munie d'un compresseur pour augmenter la pression de gaz qui arrive à la zone **G11** avant d'être envoyée vers l'expédition.

I.7.6 Zones de stockage de GPL et de condensat

Le GPL et le condensat produits par l'usine CPF seront stockés temporairement sur site avant d'être expédiés via les conduites de transport.

Les dispositifs de stockage du GPL seront les suivants :

- Deux sphères de stockage de GPL conformes aux spécifications, d'un volume de 500 m³.
- Une sphère de stockage de GPL hors spécifications, d'un volume de 500 m³. Les dispositifs de stockage de condensat seront les suivants :

Deux réservoirs à toit flottant de stockage de condensat conformes aux spécifications, d'un volume de 5000 m³.

- Un réservoir à toit fixe de stockage de condensat hors spécifications, d'un volume de 3000 m³.

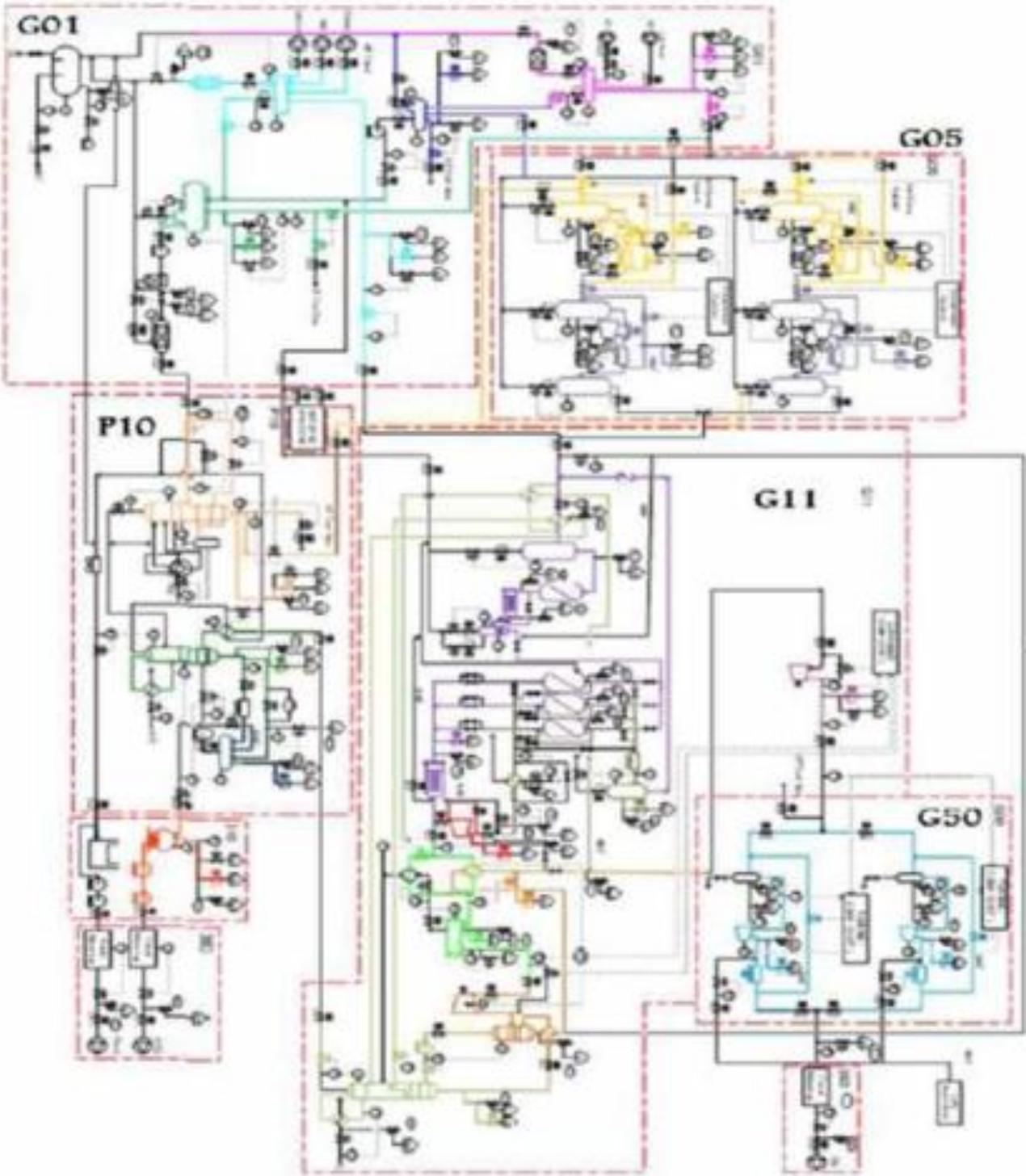
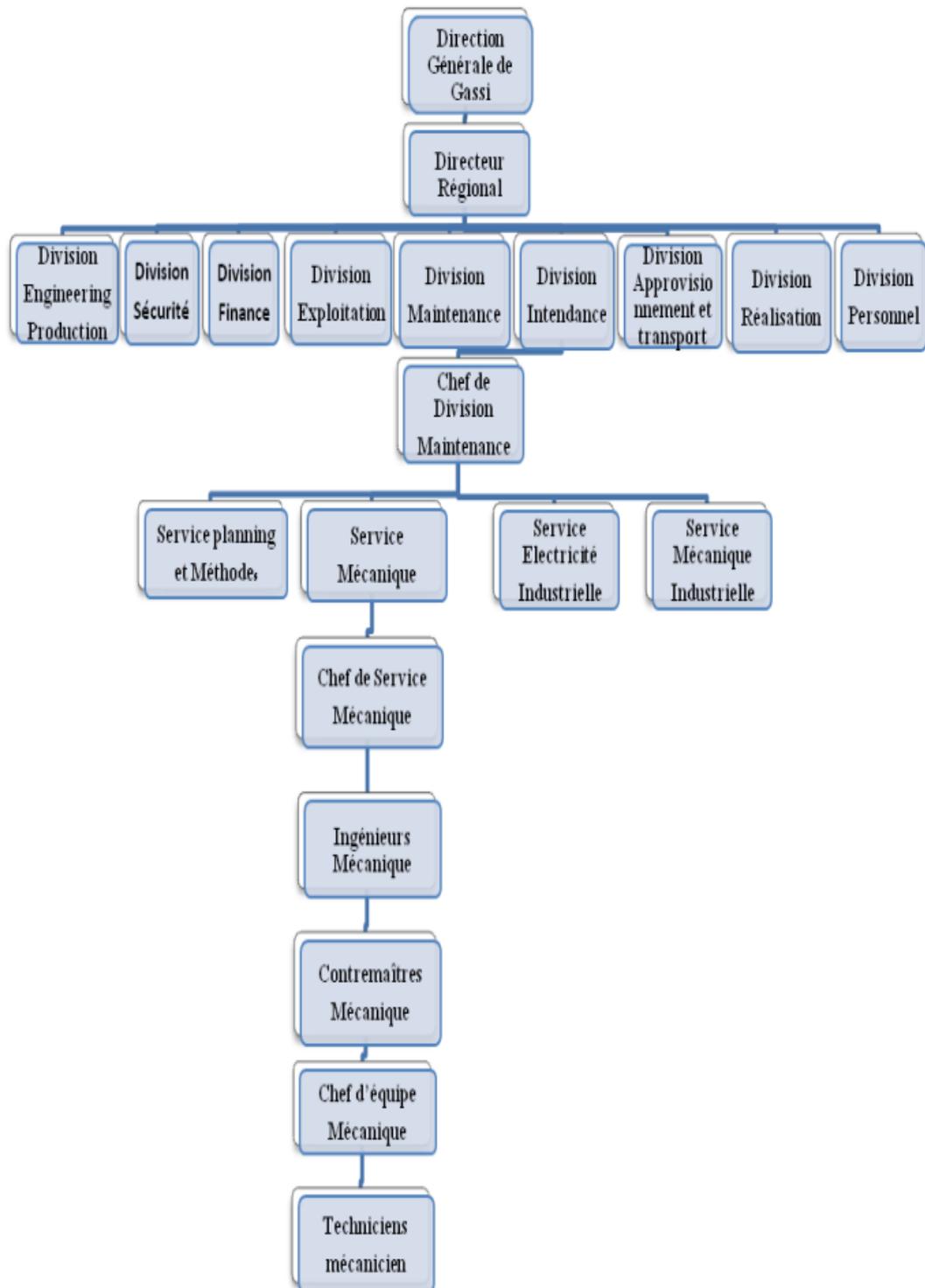


Fig.I.4:Schéma présente les différentes zones.

I.8 Organigramme générale de GASSI TOUIL



Conclusion

L'unité CP a été installée pour traiter le gaz de Gassi-Touil dans un premier temps. Ensuite, l'installation de l'unité CPF mise en exploitation en 2013. Dans ce chapitre nous avons donné une description générale de GASSI TOUIL.

Chapitre II : Unité TURBODETANDER

Introduction

Le processus de traitement des gaz bruts dans l'unité CPF de la région de Gassi Touil comprend notamment la valorisation du GPL appelée G11. L'un des instruments qui composent cette unité est la nouvelle turbine à expansion ou Turbo-Expander à paliers magnétiques, a vu son intérêt augmenter en tant que turbine de récupération d'énergie et ce sont la plupart des types d'installations de conception sans cette machine.

Le succès de sa mise en œuvre est principalement dû à son haut rendement et à sa grande fiabilité de fonctionnement, où l'utilisation plus répandue de Turbo-Expander dans l'industrie est destinée à la condensation de mélanges de gaz afin de récupérer les fractions lourdes de ces mélanges. Dans ce chapitre, nous présentons le fonctionnement général du Turbo-Expander de roulements magnétiques. La figure (fig.II.1) donne un aperçu du Turbo-Expander.



Fig.II.1 : Turbo-Expander à paliers magnétiques au CPF GT.

II.1 Définition du turbo-expandeur

Un Turbo-Expander ou turbine à expansion est une machine qui convertit l'énergie d'un gaz ou de la vapeur d'eau en un travail mécanique lors de son expansion dans la turbine. Cette expansion se faisant très rapidement, cela réduit énormément la quantité de chaleur cédée ou reçue par le système, en conséquence et en accord avec le 1^{er} principe de la thermodynamique: l'énergie interne d'un gaz décroît lorsque le travail est cédé ce qui a pour résultat une grande baisse de température. Ceci fait que le Turbo-Expander fonctionne soit comme producteur du froid (dans un circuit de réfrigération) ou comme producteur de travail mécanique dans les circuits de puissance. D'où la grande utilisation des Turbo-Expanders dans le domaine de la cryogénie pour la production du froid. Le turbo-expandeur est composée d'une roue de détente (ou d'expansion) et d'une roue de compression reliée entre elles, d'un système de contrôle, permettant au gaz de la détente isentropique pour une récupération maximale de condensât et la rotation du compresseur pour la compression du gaz traité de tels turbo-expandeur peuvent être utilisés avec une grande variété de flux de gaz différents, par exemple pour u séparation d'air, un traitement et une transmission de gaz naturel, un rétablissement d'énergie de chute de pression à partir d'un processus de détente, ou un rétablissement d'énergie thermique à partir de la chaleur perdue de processus associés.

II.2 Domaine d'utilisation du Turbo Expander

- Cryogénie (refroidissement par détente d'un gaz).
- Récupération d'énergie sur champs pétroliers (réduction de la pression).
- Liquéfaction de l'air et Séparation de O₂ et N₂.
- Purification des gaz : H₂ et He.
- Récupération d'éthane et GPL à partir du gaz naturel.
- Liquéfaction du gaz naturel.

II.3 Principales caractéristiques d'un Turbo Expander

La turbine à réaction à une entrée radiale et un échappement axial. La récupération s'effectue généralement au cours d'une même phase d'expansion à haute vitesse entre [10 et 50 000 tr / min] pour les moyennes et grandes puissances [45 70000 tr / min] pour les petites puissances: <50 kW.

Sa gamme de puissance pour les installations pétrolières varie de (50-60000 kW), il a une bonne efficacité isentropique: De 80 à 86%, il diminue si le taux de dilatation augmente, avec conservation de la charge variable d'efficacité grâce à l'utilisation de pales guidant l'entrée (possibilité de variation de charge: 50 à 120% du débit nominal) et une bonne tolérance à la présence de condensat et de particules solides, ainsi qu'une récupération d'énergie favorisée par les basses températures d'entrée.

II.4 Rôle d'un Turbo-Expander

L'utilisation de ce dernier, très répandue, est justifiée par son efficacité pour atteindre des températures très basses qui favorisent la récupération des produits lourds. Le Turbo-Expander a pour fonction de récupérer l'énergie qui se produit lorsqu'un gaz à haute pression passe à travers la turbine pour réduire sa pression (détente isentropique). La détente du gaz permet d'abaisser la température au-dessous de celle obtenue par l'effet Joule Thompson. Donc permet de récupérer une grande quantité de liquide. Cette énergie est destinée pour entraîner le compresseur en vue d'augmenter la pression du gaz avant d'être envoyé comme gaz de vente.

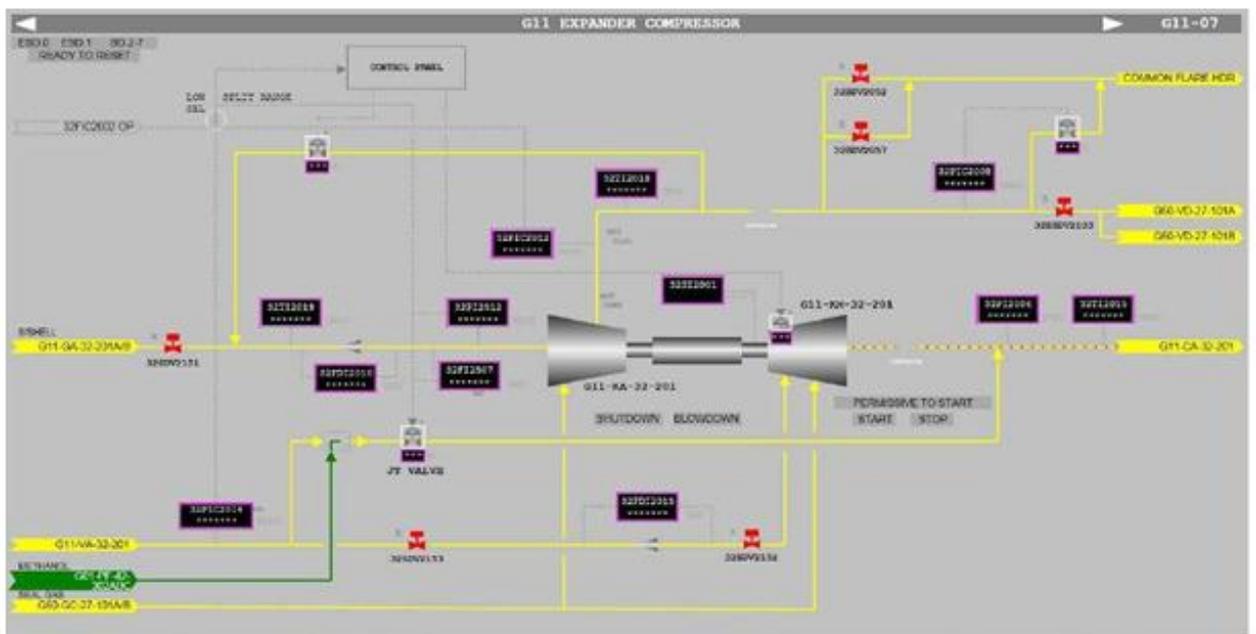


Fig.II.2 : turbo-expandeur Image.

II.5 Description du turbo expander

Dans notre cas nous avons choisi le modèle MTC 500/200 conçu par cryostar et celui-là est utilisé dans la station traitement de gaz à GASSI TOUIL.

Le gaz à traité passe à travers le carter de l'Expander et du compresseur, dont la géométrie détermine le régime d'écoulement du gaz, en assurant une circulation aisée du gaz vers les roues à aubes, sans pertes de charge. Les composantes du système sont disposées de façon à faciliter l'exploitation et l'entretien.

Il est constitué de trois sections principales : (Fig.II.3)

1. La section de l'expandeur comprenant les brides d'entrée et de sortie.
2. L'assemblage ou la section centrale de rotation.
3. La section du compresseur avec les brides d'entrée et de sortie.

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).

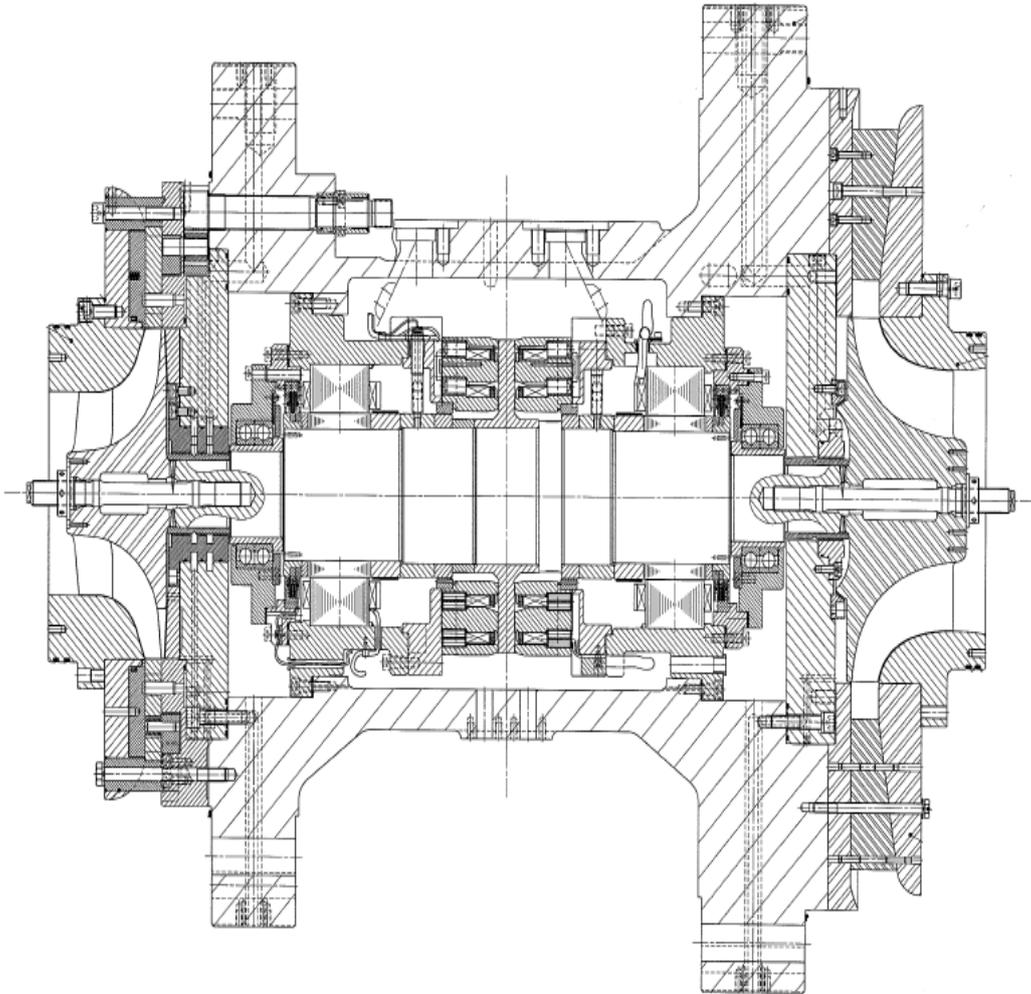


Fig.II.3 : Eléments du turbo expander.

Les principaux composants de la section centrale de rotation sont : (Fig.II.4)

- 1) Roue d'expansion
- 2) Capteur de déplacement
- 3) Roulement magnétique radial
- 4) Palier magnétique de poussée
- 5) Arbre
- 6) Palier d'atterrissage
- 7) Roue de compresseur

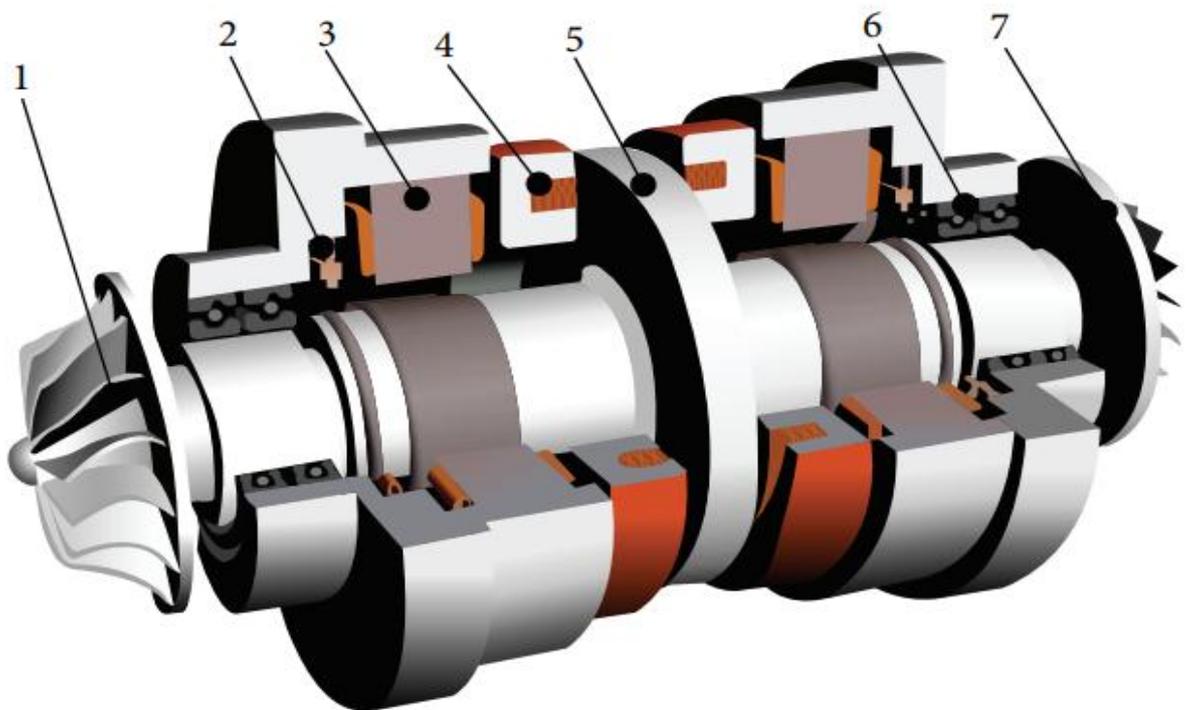


Fig.II.4: La configuration du turbo-expandeur supporté par les paliers magnétiques actifs.

II.6 Parties composants la machine

II.6.1 Roue de détente (Expander)

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.

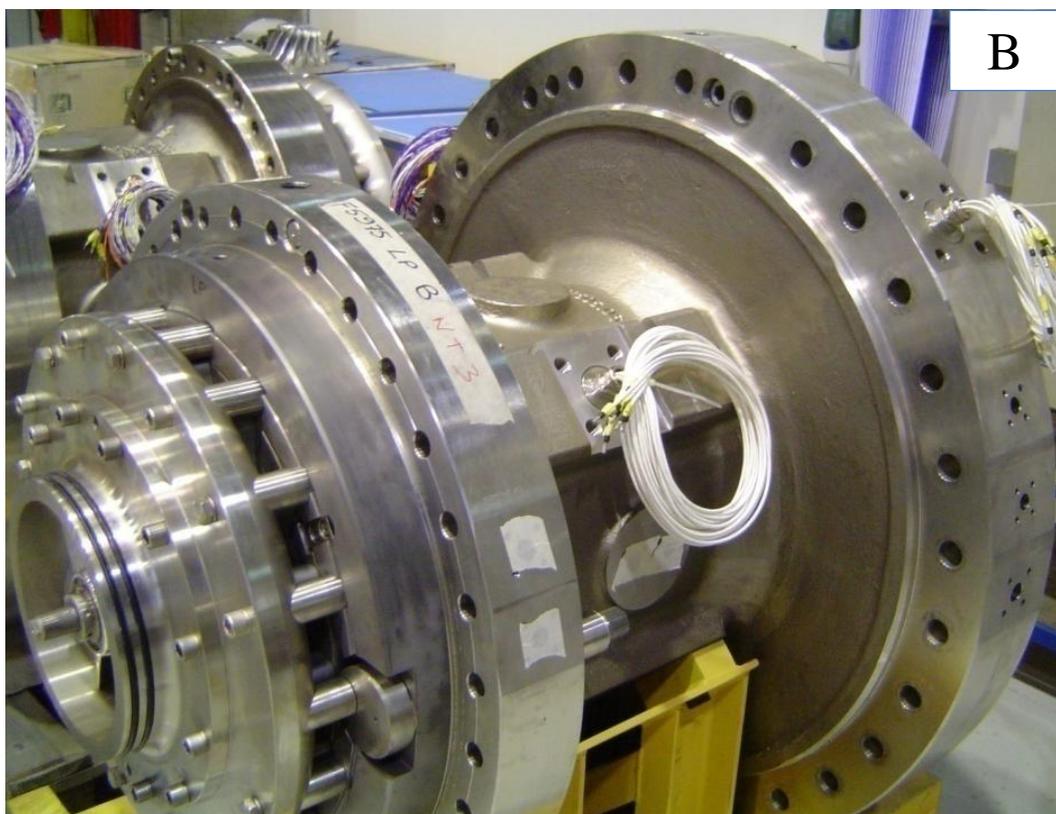
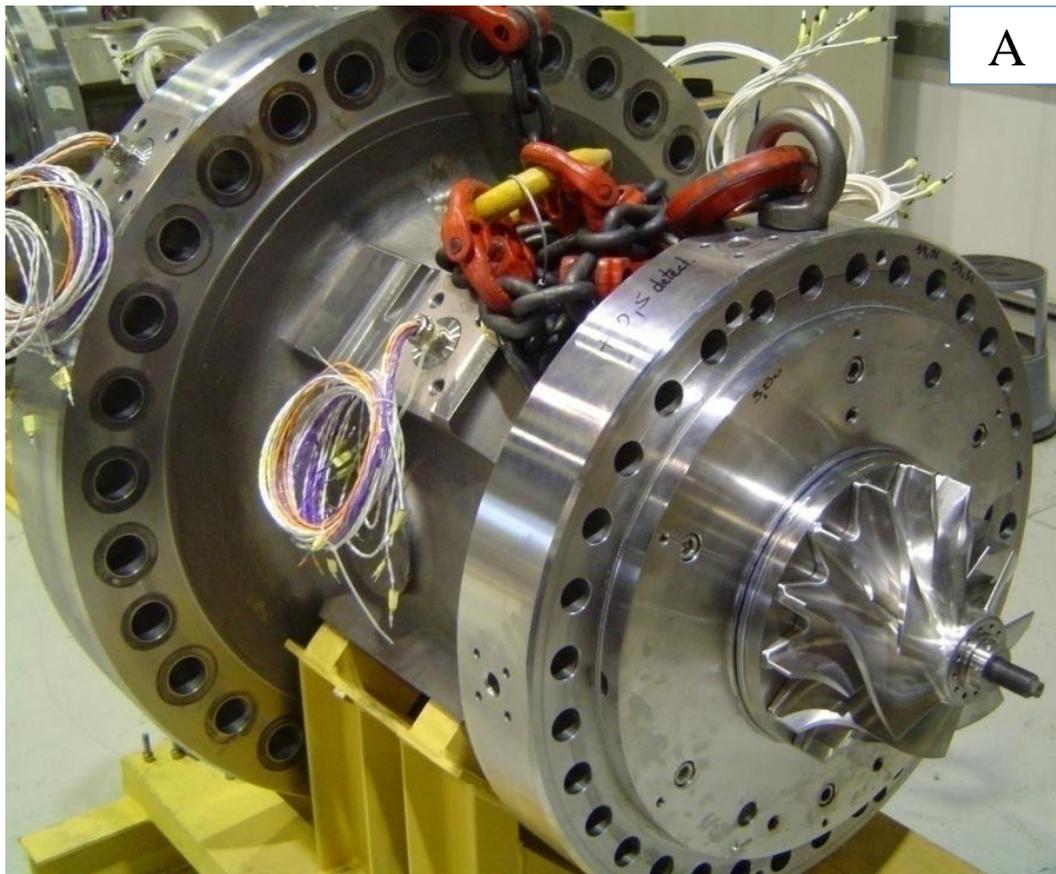


Fig.II.5 : Roue de détente (Expander) A et B.

II.6.2 La roue du compresseur

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.



Fig.II.6 : La roue de compresseur A et B.

II.6.3 L'arbre

Le rotor est équipé de laminations ferromagnétiques, afin d'éviter les pertes par courants de Foucault dans le rotor dues à l'alternance continue des pôles nord et sud en rotation

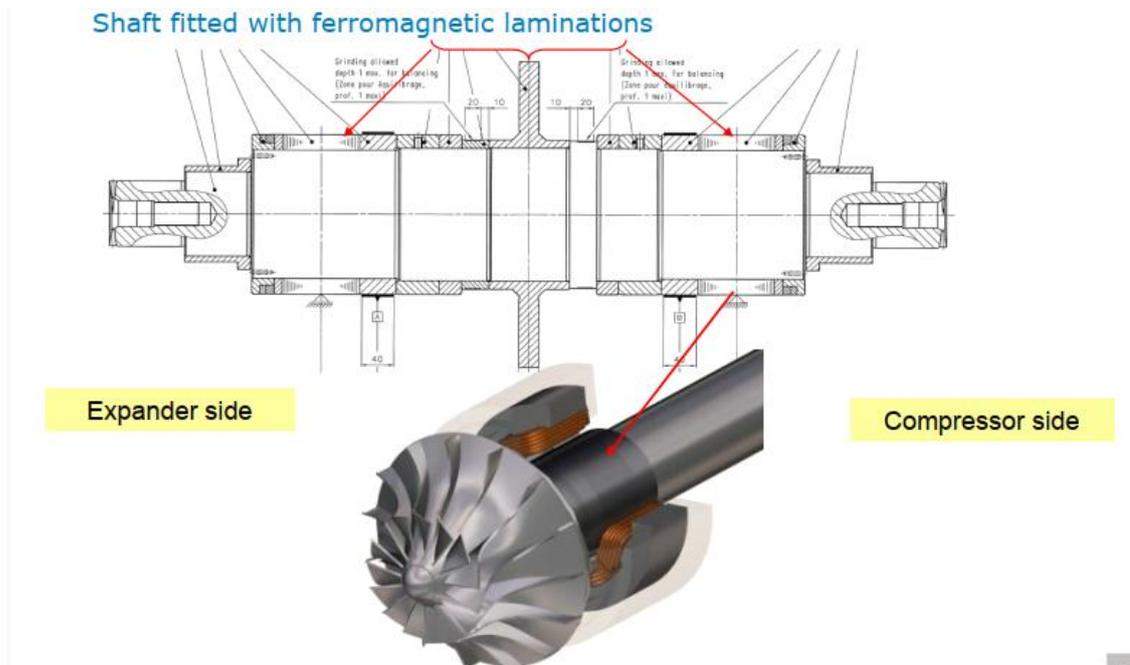


Fig.II.7 : Les laminations ferromagnétiques sur l'arbre.

Des capteurs inductifs surveillent la position du rotor dans chaque axe. Celles-ci détectent tout écart par rapport à la position nominale et émettent un signal qui commande les courants dans les électroaimants afin de ramener le rotor à sa position nominale.

Ils sont situés près du côté extérieur du roulement radial.

Disque monté perpendiculairement à l'axe de rotation et opposé aux électroaimants.

Le capteur de position axiale est situé à l'extrémité d'un arbre où la position axiale est la plus importante.

Deux capteurs de position sont installés, chacun sur une extrémité de l'arbre, afin de mesurer l'allongement de l'arbre.

Le disque axial est soit ajusté par rétraction, soit fait partie intégrante de l'arbre en fonction de la vitesse de l'application. Le choix du matériau du disque est défini par ses propriétés magnétiques et mécaniques.

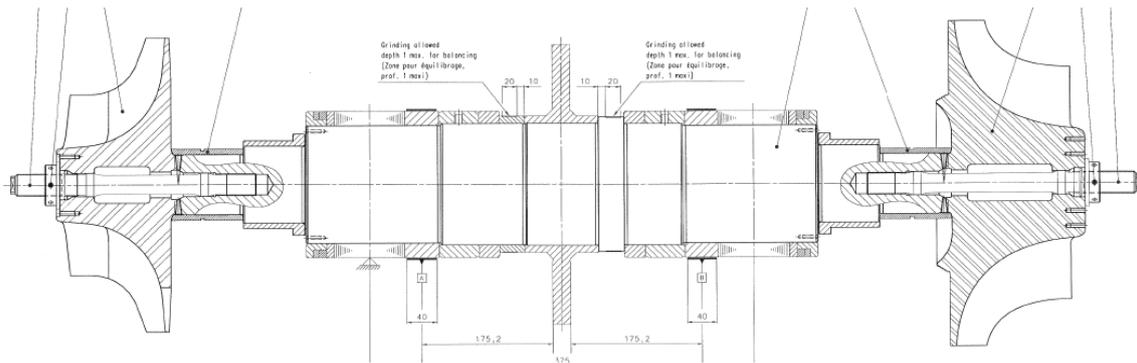


Fig.II.8 : Schéma de l'arbre.

II.6.4 L'aube directrice (Distributeur)

C'est une vanne à aube variable. Elle est conçue pour régler le débit du gaz d'alimentation, en le dirigeant vers la roue de l'expander. Cette roue est conçue pour offrir une commande positive et une efficacité élevée dans une plage de fonctionnement étendue, grâce au vérin d'ajustement des IGV.

Le mécanisme est conçu pour rester à la pression d'entrée maximale de l'expander et peut être réglé pour faire varier l'écoulement dans une plage allant, de 0% à environ 125% du débit massique prévu.

II.6.5 Les paliers

Pour chaque machine, les roues d'expansion et de compresseur sont montées sur un seul arbre rigide, soutenu par 2 paliers magnétiques radiaux et un palier magnétique axial.

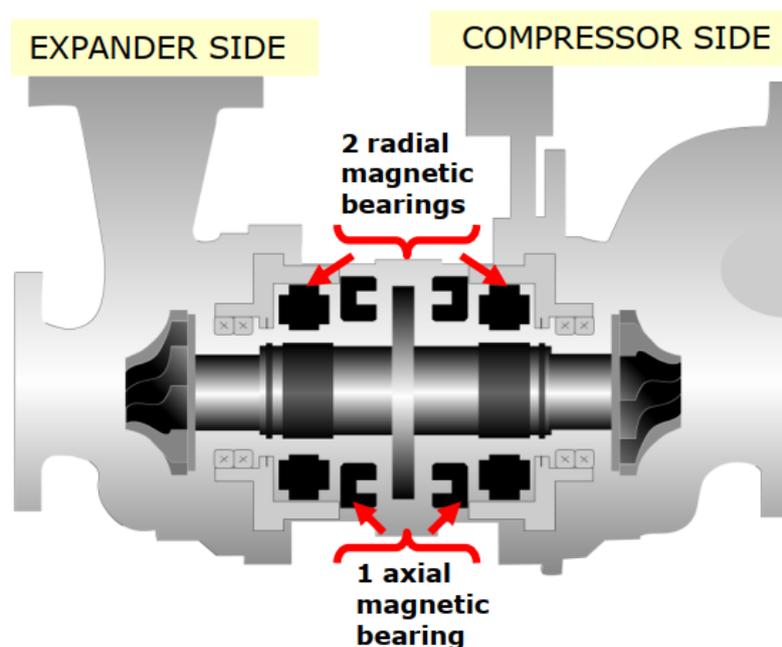


Fig.II.9 : Emplacement des paliers dans le turbo expander.

Le rotor est maintenu en suspension par les flux électromagnétiques générés par les enroulements du stator.

Les courants électriques circulant dans les enroulements sont régulés par un système de contrôle afin de maintenir le rotor en position.

Pour ce faire, les positions radiales du rotor sont contrôlées le long de deux axes perpendiculaires (V et W sur le schéma ci-dessus) et la position axiale du rotor est également surveillée.

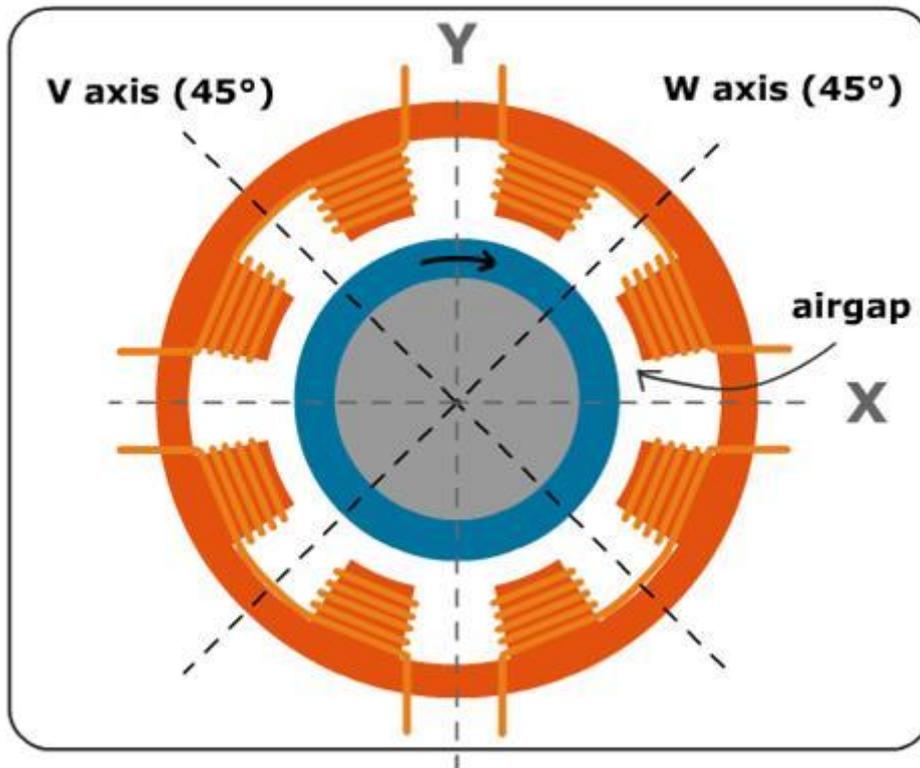


Fig.II.10 : Schéma des axes d'un palier magnétique.

II.7 Fonctions principales de la machine

II.7.1 Fonction de compression

Le gaz entre dans le compresseur par le tube d'aspiration et arrive par un canal de distribution à la première roue. Il passe ensuite à travers un ensemble de pièces mobiles, les roues et les pièces fixes, les diffuseurs et les canaux de retour. Le gaz est déchargé à la sortie du dernier diffuseur de la volute et du raccordement de décharge.

II.7.2 Fonction de guidage du rotor

Les roues sont montées sur l'arbre et forment ensemble le rotor pour être guidé de manière rotative et axiale. La compensation axiale est automatiquement effectuée à toutes les vitesses de l'arbre.

II.8 Avantages et inconvénients du turbo expander**II.8.1 Avantages**

Les avantages de l'utilisation d'un Turbo Expander sont les suivants:

- ✓ Utilisé dans les méthodes de traitement, de séparation et de liquéfaction des gaz.
- ✓ Il garantit de bonnes performances par rapport aux autres systèmes de relaxation.
- ✓ Il permet une meilleure récupération des fractions condensables du gaz naturel.
- ✓ L'utilisation du travail fournit par relaxation pour alimenter le compresseur.
- ✓ Leur grande capacité de production (pour les grandes installations).

II.8.2 Inconvénients

Les inconvénients apportés par l'utilisation d'un Turbo Expander sont:

- ✓ Il est confronté au problème de l'usure mécanique, comme toute machine tournante.
- ✓ Coût d'installation élevé lié au matériau utilisé et à la fabrication de ces éléments.
- ✓ Problème de refroidissement lié à la très basse température.
- ✓ Former des gouttelettes qui peuvent abîmer les nageoires de l'Expander.

CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous concluons que l'étude de toute machine industrielle nécessite une parfaite maîtrise de la manière dont elle prend d'abord en compte toutes les contraintes liées au fonctionnement et au rôle de cette machine dans le processus.

Chapitre III : Paliers Magnétiques

Introduction

Depuis l'antiquité, l'idée de léviter le corps physique dans l'air était le rêve de l'humanité. Plus récemment, le phénomène de la lévitation magnétique a été découvert et au XXe siècle, le principe de la lévitation magnétique a été utilisé pour la première fois dans les roulements. Depuis lors, la technologie de la suspension corporelle dans le champ magnétique a considérablement évolué et aujourd'hui, les paliers magnétiques actifs (PMA) trouvent leur application dans de nombreux secteurs de l'industrie en raison de leurs caractéristiques et avantages uniques par rapport aux paliers classiques. Dans certains secteurs de l'industrie, des composants structurels répondant à des exigences spécifiques sont requis. Ainsi, pour divers compresseurs, arbres d'entraînement et générateurs, des vitesses de rotation élevées permettent de réduire le poids, la taille et le coût du système, ce qui entraîne une augmentation de son efficacité. Chaque année, le domaine d'application des paliers magnétiques actifs s'élargit et la demande de l'industrie pour les équipements utilisés est en croissance constante

III.1 Notions Fondamentales

La force magnétique utilisée dans les paliers magnétiques peut être divisée en deux catégories: la force de réluctance et la force de Lorentz. La force de réluctance résulte d'une différence de perméabilités entre deux matériaux. La force de Lorentz résulte du mouvement de charges dans un champ magnétique. Les détails de ces deux forces seront examinés plus tard. Le palier magnétique actif classique et le palier magnétique permanent utilisent tous deux l'utilisation de la force de réluctance conjointement avec un matériau ferromagnétique, alors que seul le palier magnétique actif utilise l'électromagnétisme, comme indiqué précédemment.

III.1.1 Fondamentaux du magnétisme

Un champ magnétique existe entre deux pôles de polarité opposée, désignés pôles nord et sud. Les lignes de champ magnétique sont émises radialement depuis le pôle nord dans toutes les directions et aboutissent au pôle sud, puis retournent à travers l'objet jusqu'au pôle nord, créant un chemin fermé. Ces lignes de champ magnétique peuvent également être créées par un électro-aimant, qui fonctionne en faisant passer du courant dans un fil enroulé autour d'un morceau de matériau ferromagnétique. Le champ magnétique H , peut être calculé avec l'équation (1), le courant passant par une seule boucle de fil est évalué à l'équation (2).

$$\oint H ds = i \quad (\text{III.1})$$

$$H = \frac{i}{2\pi.r} \quad (\text{III.2})$$

Où ds est la longueur différentielle du fil et i le courant. En tenant compte de plusieurs boucles de fil, il suffit de multiplier le facteur supplémentaire du nombre de boucles avec l'équation (2). La direction de H est déterminée à l'aide de la règle de la main droite. La densité de flux magnétique B , est liée au champ magnétique par :

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (\text{III.3})$$

Où μ est la perméabilité magnétique. La perméabilité peut également être représentée par :

$$\mu = \mu_0 \mu_r \quad (\text{III.4})$$

Où μ_0 est la perméabilité de l'espace libre, une constante, et μ_r est la perméabilité relative du matériau utilisé. Les matériaux ayant une perméabilité inférieure à un sont appelés diamagnétiques, supérieurs à un paramagnétiques et beaucoup plus importants qu'un ferromagnétique. Un matériau ferromagnétique est également appelé magnétisable. Lorsqu'un tel matériau est inséré dans un champ magnétique, le flux augmente linéairement, comme décrit par l'équation (3). Mais à un moment donné, le matériau devient saturé et le flux magnétique à travers le matériau se stabilise. Lorsque le champ magnétique est diminué, le flux suit un chemin différent, créant une hystérésis. La zone dans l'hystérésis représente la quantité de perte d'énergie thermique par cycle d'hystérésis.

III.1.2 Force de Lorentz

La force de Lorentz est présente lorsqu'une charge électrique est soumise à un champ d'énergie et / ou se déplace dans un champ magnétique, sous la forme de l'équation (5). Cependant, en présence d'un champ magnétique induit, la force due au champ électrique est beaucoup plus faible que la force due au champ magnétique, simplifiant (5) à l'équation (6).

$$\vec{f} = Q(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}) \quad (\text{III.5})$$

$$\vec{f} \approx Q(\vec{v} \times \vec{B}) \quad (\text{III.6})$$

La variable Q est la charge électrique, E le champ électrique et v la vitesse de la charge électrique. Le courant étant simplement composé de charges en mouvement, l'équation (7) peut être insérée dans (6) pour donner une forme finalisée à la force de Lorentz fournie sous forme d'équation (8).

$$\vec{i} = Q \cdot \vec{v} \quad (\text{III.7})$$

$$\vec{f} = \vec{i} \times \vec{B} \quad (\text{III.8})$$

Ce qui ressort de (8) est que seule la composante du vecteur de flux magnétique perpendiculaire au courant joue un rôle dans la génération d'une force. La force maximale possible à générer serait simplement lorsque le flux est exactement perpendiculaire au flux du courant.

III.1.3 Force de réluctance

La force de réluctance est une force résultant d'une différence entre les perméabilités magnétiques en présence d'un champ magnétique. La direction de cette force est perpendiculaire à l'interface des deux surfaces. Pour les matériaux linéaires, l'énergie dans un champ magnétique est donnée par

$$U = \frac{1}{2} \int_V \mathbf{B} \mathbf{H} dV \quad (\text{III.9})$$

Où U est l'énergie potentielle et V le volume. La différenciation (9) par rapport à la distance l - selon le principe du travail virtuel - conduit à une équation de la force résultante, fournie comme suit:

$$\mathbf{f} = \frac{B^2 A}{2\mu} \quad (\text{III.10})$$

Où A est l'aire de la section transversale perpendiculaire à l . Une configuration typique d'utilisation d'un électroaimant est constituée d'un électroaimant en forme de U et d'une barre de matériau ferromagnétique séparés par la largeur d'un entrefer, illustrés à la figure 1.

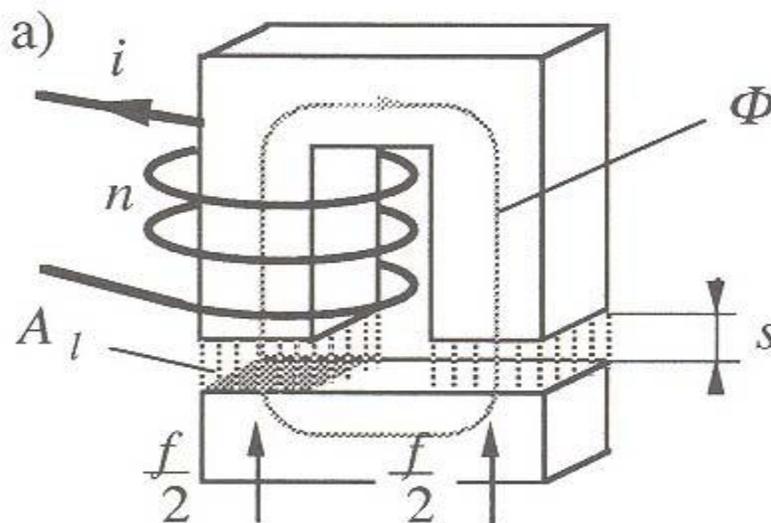


Fig.III.1: Circuit magnétique simple.

La variable Φ illustre le chemin du circuit magnétique en circuit fermé. En commençant par l'équation (9), on peut montrer que l'énergie dans l'entrefer

$$U_a = \frac{1}{2} B_a H_a A_a 2s \tag{III.11}$$

Où s est la taille de l'entrefer. L'évaluation de l'équation (1) pour le circuit magnétique de la figure 1 donne l'expression (12). Le flux magnétique a été résolu pour à partir de (12) à l'aide des équations (3) et (4) et présenté sous forme d'équation (13) :

$$\oint H ds = l_{Fe} H_{Fe} + 2s H_a = ni \tag{III.12}$$

$$B = \mu_0 \frac{NI}{\left(\frac{l_{Fe}}{\mu_r} + 2s\right)} \tag{III.13}$$

La variable n est le nombre de bobines et NI , ensemble, est souvent mis en majuscule et appelé force magnétomotrice. Dans l'évaluation (12), l'hypothèse principale était que le flux magnétique ne quittait pas les limites de l'entrefer, ce qui se produit lors du fonctionnement réel de tels appareils. Pour faciliter le développement de cette analyse, nous allons maintenant utiliser le modèle de la figure 2 au lieu du modèle de la figure 1, qui illustre plus précisément la situation.

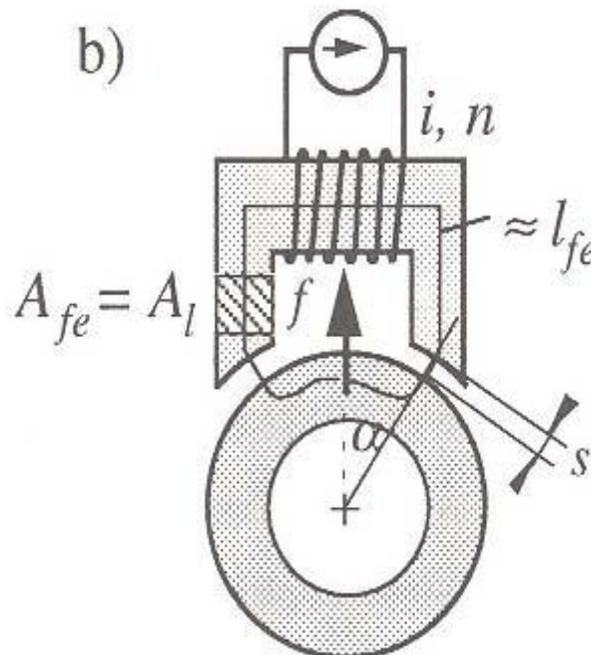


Fig.III.2: Electroaimant simple avec arbre.

Le principe de fonctionnement est le même, mais la géométrie reflète un système réel beaucoup plus proche. Utiliser à nouveau le principe du déplacement virtuel avec l'équation (11) et simplifier avec les équations (3) et (13) conduit à l'expression suivante de la force exercée sur un arbre en rotation par un électro-aimant.

$$f = \mu_0 \left(\frac{ni}{l_{Fe}/\mu_r + 2s} \right)^2 A_a \cos \alpha \quad (\text{III.14})$$

On peut voir la raison du terme cosinus entre (14) en examinant la géométrie de la figure 2. Les seules variables de l'équation (14) sont le courant i et l'entrefer s .⁶ Après avoir supposé que la perméabilité du fer, μ_r est beaucoup plus grande que la longueur du circuit magnétique traversant le fer l_{Fe} , la dépendance de la force sur la largeur de l'intervalle et le courant devient beaucoup plus claire: la force est quadratiquement proportionnelle au courant et inversement quadratiquement proportionnelle à la largeur de la fente. Tous les autres termes sont des constantes. Cette relation sera importante dans l'analyse des équations du contrôleur.

III.1.4 Force de Linéarisation

Pour tout système de roulement magnétique actif, les composants principaux sont constitués de l'électroaimant, du rotor, du capteur, du contrôleur et de l'amplificateur. Le système à rotor électromagnétique sera examiné plus en détail pour voir comment obtenir les équations qui régissent l'utilisation du contrôleur.

La force exercée par un aimant se comporte différemment de celle d'un ressort. La force d'un ressort augmente linéairement à mesure que le déplacement augmente, alors que la force d'un aimant est inversement proportionnelle au carré d'une augmentation de la distance. À mesure que la distance entre l'aimant et l'objet soumis à sa force diminue, la force se stabilise à un point où le matériau devient saturé par le flux magnétique. Pour un système mécatronique, les relations d'ordre supérieur compliquent les choses et rendent plus difficile la mise en œuvre d'un contrôleur. Pour cette raison, la force magnétique doit être linéarisée autour du point de fonctionnement. Toutefois, pour ce faire, les effets du courant et de la position doivent être évalués de manière indépendante. Avec un courant constant et une position définie comme déviation par rapport au point de fonctionnement, et dans la direction opposée telle que définie précédemment pour obtenir une corrélation positive, une ligne tangente à la courbe de la force magnétique au point de fonctionnement est tracée, comme illustré à la figure 3.

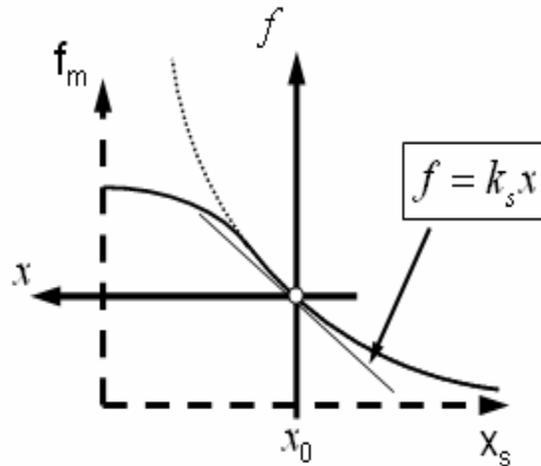


Fig.III.3:Dépendance de la force magnétique sur la position.

Le facteur force-déplacement K_s est utilisé pour décrire la pente de la ligne tangente. Avec la position constante et le courant défini comme déviation du courant au point de fonctionnement, une ligne tangente au point de fonctionnement est également utilisée à la figure .III.4.

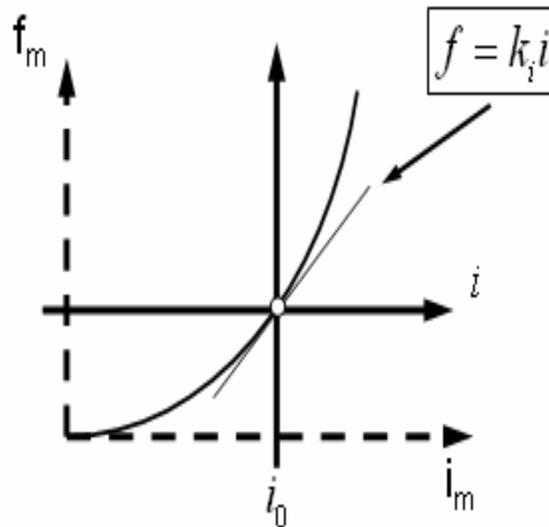


Fig.III.4: Dépendance de la force magnétique sur le courant.

Ici, le facteur force-courant est utilisé pour décrire la pente de la ligne tangente. L'ajout des deux corrélations indépendantes conduit à l'équation (15) où la force magnétique a été simplifiée à une dépendance linéaire à la fois de la position et du courant.

$$\mathbf{f(x, i) = k_s x + k_i i} \quad (15)$$

Il faut noter qu'un tel modèle n'est pas valable pour les cas de contact de roulement de rotor, de saturation magnétique ou de faibles courants de fonctionnement.

III.2 Classification des paliers magnétiques

On peut classer les paliers magnétiques selon :

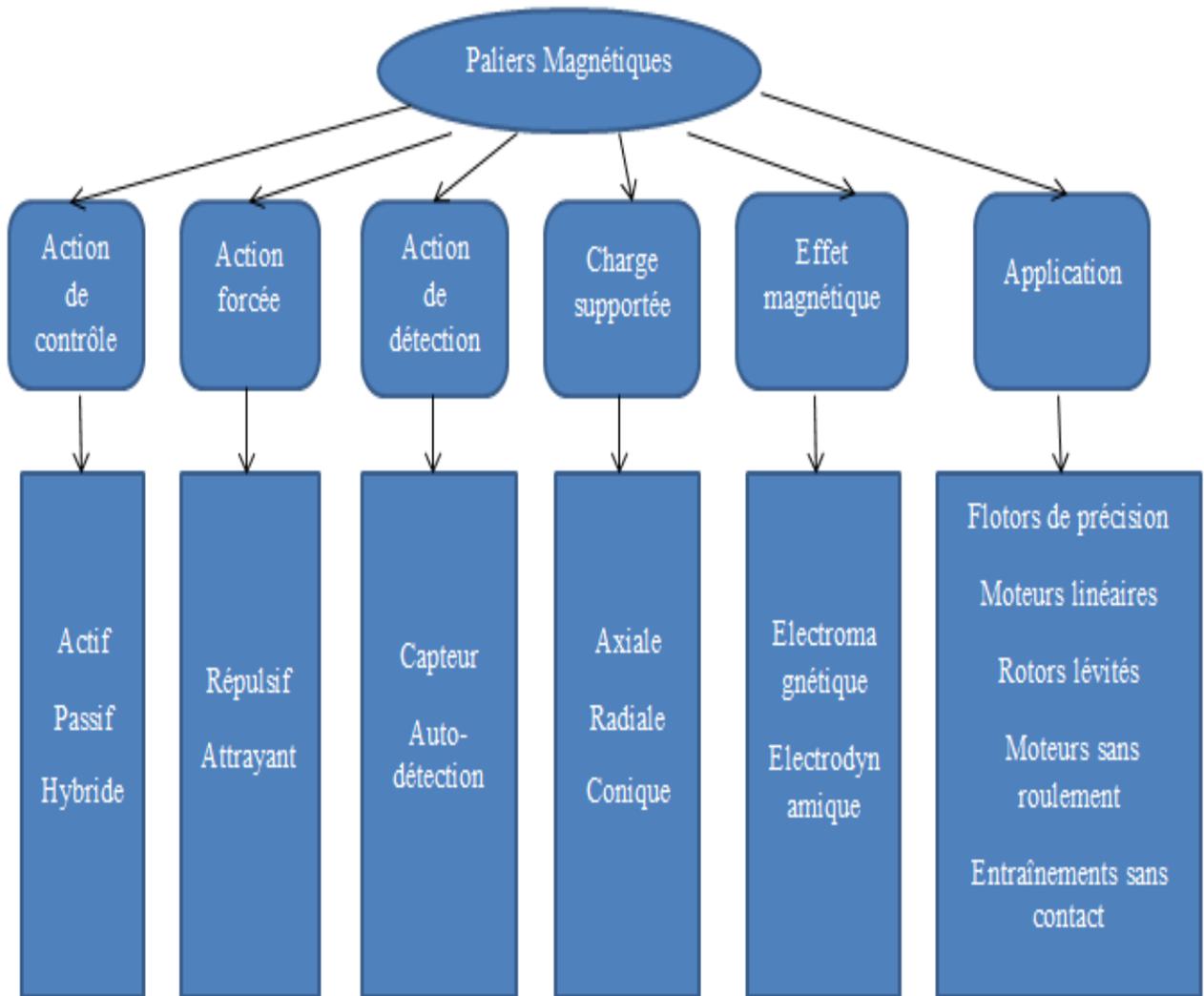


Fig.III.5:Classification de paliers magnétiques.

III.3 COMPOSANTS DU PALIER MAGNÉTIQUE ACTIF

Les électroaimants sont composés d'un noyau magnétique doux et de bobines électriques. Ils ressemblent un peu au stator d'un moteur électrique. Fig.III.6 montre les composants de PMA

III.3.1 Noyau de fer

Le noyau de fer est un matériau conduisant le champ magnétique à l'entrefer. Sa perméabilité magnétique doit être élevée, ainsi que sa saturation magnétique. Afin de minimiser les pertes par courants de Foucault, le noyau est généralement constitué de feuilles de laminage isolées.

III.3.2 Enroulements

Le courant dans l'enroulement est la source du champ magnétique. L'enroulement est constitué d'un conducteur isolé enroulé sur le noyau magnétique doux. Afin d'améliorer l'efficacité de l'PMA, le conducteur doit avoir une faible résistance électrique et doit être enroulé avec un facteur de remplissage élevé.

III.3.3 Rotor

Le rotor, dans les constructions standard, est réalisé avec un paquet de lamination contracté sur un arbre non magnétique. Des tolérances de fabrication strictes sont nécessaires pour éviter les déséquilibres. Les propriétés mécaniques de la stratification du rotor doivent être bonnes pour surmonter les contraintes centrifuges dues à la rotation à grande vitesse.

III.3.4 Capteurs de position

Dans la plupart des applications, il existe des capteurs de position dans les PMA. Puisque les PMA sont activement contrôlés en ce qui concerne le signal du capteur, les performances de contrôle dépendent fortement des performances du capteur. Plusieurs types de capteurs sont utilisés dans les PMA: capteurs inductifs, à courants de Foucault, de capacité et de déplacement optique

III.3.5 Contrôleur

Aujourd'hui, les contrôleurs sont principalement basés sur la technologie numérique. Ils offrent une grande flexibilité et une vitesse de calcul élevée. Les contrôleurs numériques permettent principalement un contrôle adaptatif, une compensation de déséquilibre et constituent un excellent outil pour le diagnostic du système. Pour le traitement en temps réel, des processeurs de signal numérique (DSP) sont utilisés. Les PMA sont contrôlés en boucle fermée. Différentes méthodes telles que PD, PID, retour optimal de sortie ou retour d'état basé sur l'observateur sont utilisées.

III.3.6 Amplificateurs de puissance

Les amplificateurs de puissance convertissent les signaux de commande en courants de commande. Les amplificateurs à commutation sont généralement utilisés en raison de leurs faibles pertes. L'amplificateur est souvent le composant limitant dans un système PMA.

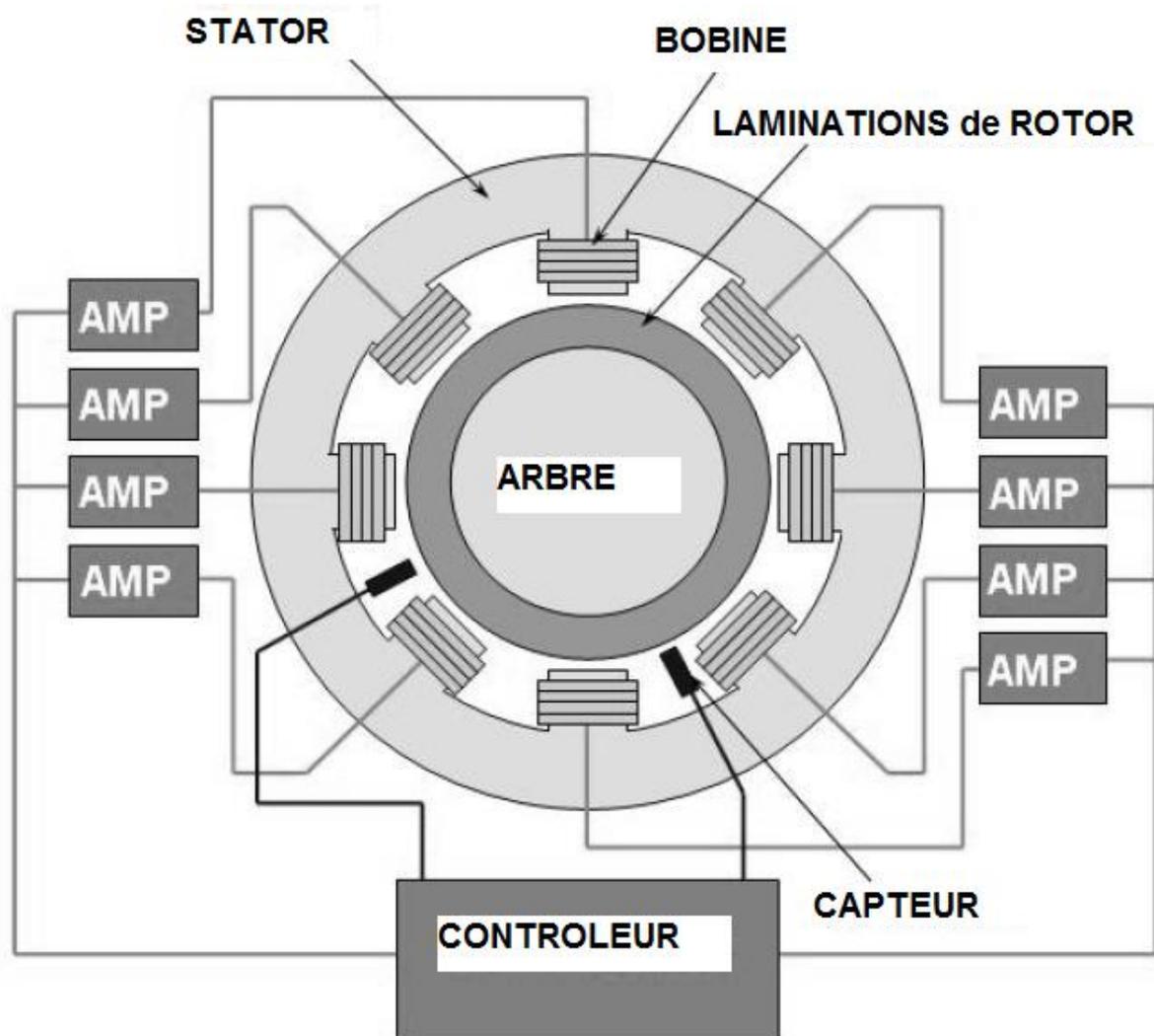


Fig.III.6: Composants de PMA.

III.4 Applications

Les roulements magnétiques ont été sélectionnés pour plusieurs raisons, parmi lesquelles:

- Les roulements magnétiques revêtus fonctionnent dans le cadre du système de contrôle de processus qui garantit une pâte de la plus haute qualité.

- Les roulements magnétiques revêtus fonctionnent dans le cadre du processus d'étanchéité, éliminant ainsi une cause fréquente de temps d'arrêt.
- La conception intégrée a abouti à une solution avec un nombre minimum de pièces et une performance maximale

III4.1 100 000 tours par minute

Broche de machine-outil de 100 000 t / mn pour centre d'usinage à trois axes à grande vitesse. Cette broche est un prototype de démonstration. Des roulements magnétiques étaient nécessaires pour atteindre la vitesse extrêmement élevée. Cependant, le souci principal est la finition de surface constante et de haute qualité. Les paliers magnétiques permettront un intervalle de service beaucoup plus long que les paliers à roulement normalement utilisés

III4.2 Compresseur de réfrigération

Il s'agit d'un compresseur hermétique, sans huile, destiné aux applications de réfrigération et de refroidissement utilisant de nouveaux réfrigérants sans CFC.

Le fonctionnement sans huile est essentiel pour maintenir une efficacité de cycle élevée avec cette nouvelle classe de réfrigérant. De plus, il n'y a pas d'huile dans le système pour diminuer l'efficacité de transfert de chaleur des échangeurs de chaleur. Les roulements magnétiques ont été choisis comme technologie habilitante.

III4.3 Broche de meulage

Cette broche motorisée à grande vitesse est conçue pour fonctionner dans une rectifieuse contrôlée par ordinateur utilisée dans la production de roulements.

Les roulements magnétiques donnent à cette broche une plage de fonctionnement beaucoup plus large, ce qui permet d'utiliser une broche lorsque deux broches conventionnelles sont utilisées. Cela améliore la productivité en réduisant le temps de réinitialisation. On espère que les paliers magnétiques peuvent être utilisés pour améliorer activement les performances de meulage à l'aide de concepts de retour d'information de processus.

III4.4 Broche haute vitesse

Ce prototype de broche a été construit pour être utilisé dans un centre d'usinage à grande vitesse. Bien que pas encore en production, la broche démontre de nombreux avantages des roulements magnétiques dans cette application. Les roulements magnétiques permettent une broche à haute vitesse et haute puissance pour des performances constantes. Les performances ne sont pas affectées par les problèmes thermiques ni par l'usure. Les intervalles de maintenance sont considérablement augmentés par rapport aux roulements classiques. Les paliers magnétiques détectent automatiquement les situations de surcharge et arrêtent instantanément l'opération d'usinage.

En bref Voici les principales applications des PMA :

- Turbo pompes moléculaires.
- Pompes à sang.
- Hacheurs à faisceau moléculaire.
- Guides linéaires sans contact.
- Broches à vitesse variable.
- Compresseur de pipeline.
- Contrôle du rotor élastique.
- Banc d'essai pour pneus haute vitesse.
- Magnarails et systèmes maglev.
- Engrenages, chaînes, convoyeurs, etc.
- Flywheels.
- Étapes de position de haute précision.
- Amortisseurs magnétiques actifs.
- Moteurs aéronautiques intelligents.
- Machines turbo.

III.5 Pertes dans les paliers magnétiques

Avec les rotors sans contact, il n'y a pas de frottement dans les paliers magnétiques. Le fonctionnement des paliers magnétiques actifs occasionne beaucoup moins de pertes que le fonctionnement des roulements à billes ou à tourillons conventionnels, mais il faut néanmoins prendre en compte ces pertes et parfois des limitations.

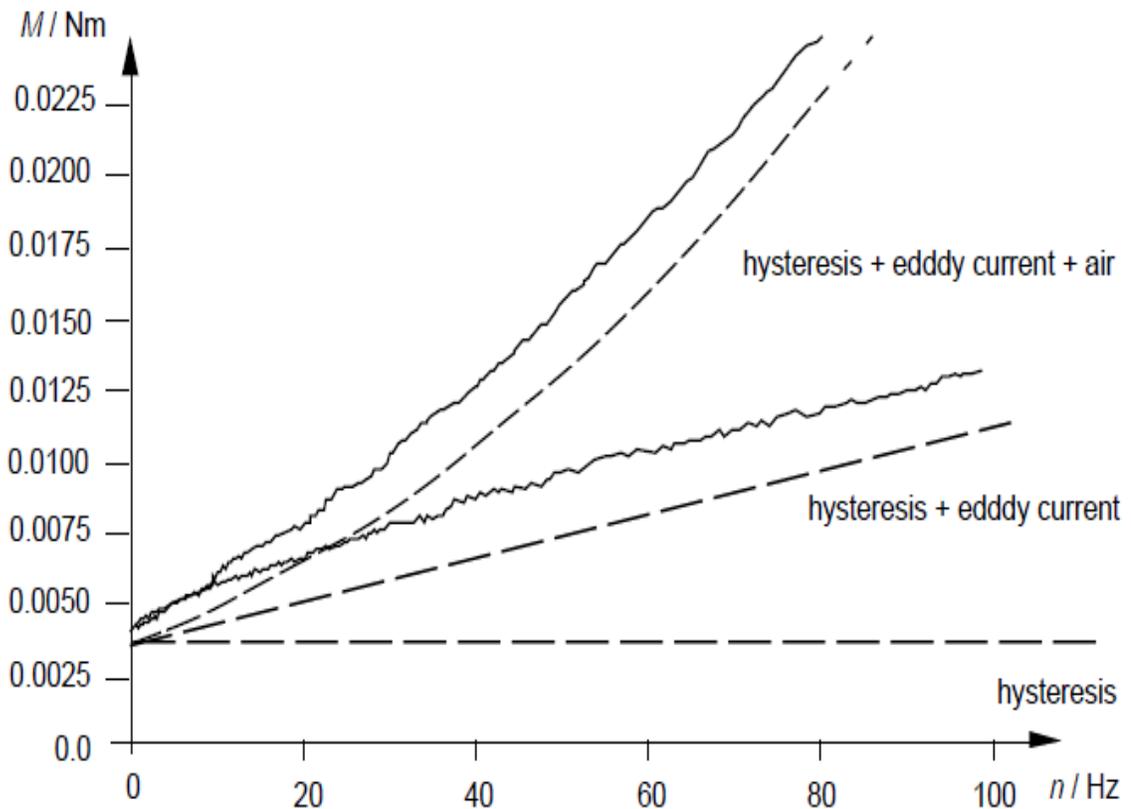


Fig.III.7 : Pertes dans les paliers magnétiques.

Les pertes peuvent être regroupées en pertes survenant dans les pièces fixes, dans le rotor lui-même, et en pertes liées à la conception du contrôle.

Les pertes dans les parties fixes du roulement proviennent principalement des pertes de cuivre dans les enroulements du stator et des pertes dans les amplificateurs. Les pertes de cuivre sont une source de chaleur et, en l'absence de refroidissement suffisant, peuvent limiter le courant de commande et donc la force de charge maximale pouvant être atteinte.

Les pertes dans la partie rotor sont plus complexes et conduisent à des limitations plus sévères. Ces pertes comprennent les pertes de fer causées par l'hystérésis et les courants de Foucault, ainsi que les pertes par traînée d'air. Les pertes chauffent le rotor, provoquent un couple de freinage sur le rotor et doivent être compensées par la puissance motrice du moteur. Les relations entre les différentes pertes les unes par rapport aux autres sont illustrées à la figure III.7. En général, les pertes par courants de Foucault sont les plus importantes.

III.6 Avantages et inconvénients**III.6.1 Avantages**

- La fiabilité de ces roulements est davantage comparée aux roulements conventionnels. Il n'y a pas d'usure car il n'y a pas de contact entre les pièces fixes et en rotation
- Les générateurs pratiques dus à l'usure et au besoin de lubrification sont éliminés. Par conséquent, le processus ne peut pas être contaminé par de l'huile, de la graisse ou des particules solides
- Le fait que le rotor tourne dans l'espace sans contact avec le capteur signifie que la traction sur le rotor est minimale. Cela permet au roulement de fonctionner à des vitesses extrêmement élevées.
- Les roulements magnétiques utilisent des algorithmes de contrôle avancés pour influencer le mouvement de l'arbre et ont donc la capacité inhérente de contrôler avec précision la position de l'arbre en microns et d'éliminer pratiquement les vibrations.
- Ces roulements sont capables de fonctionner dans une plage extrêmement large, allant de -2500°C à 2200°C , permettant ainsi un fonctionnement là où les roulements classiques ne peuvent pas fonctionner.
- Ceux-ci peuvent fonctionner dans des environnements corrosifs en mettant en conserve des pièces fixes et rotatives.
- Un palier magnétique fonctionne en déterminant la vibration et la charge du palier. Ces informations, traitées dans une armoire de commande électronique, peuvent être utilisées pour détecter les défaillances naissantes, planifier la maintenance et optimiser les performances.

III.6.2 Inconvénients

- Les roulements magnétiques ont une capacité de charge spécifique (charge maximale par unité d'application) inférieure à celle des autres roulements. Il en résulte des roulements, qui seront physiquement plus grands que d'autres roulements similaires.
- La complexité des paliers magnétiques est supérieure à celle des technologies concurrentes. Cependant, le coût du cycle de vie des roulements magnétiques peut souvent être inférieur à celui des roulements traditionnels.
- Les roulements magnétiques nécessitent de l'alimentation pour alimenter le système de contrôle, les capteurs et les électroaimants. Le système de palier magnétique représente une approche complètement différente du support des équipements en rotation.

Conclusion

Les progrès réalisés dans le contrôle du matériel magnétique ont contribué à la réalisation de systèmes de relations sans contact utilisant des paliers magnétiques pour éliminer le dernier élément susceptible de s'user. Les efforts actuels sont davantage orientés vers la réduction de la taille, du poids et de la complexité de ces dispositifs pour parvenir à une acceptation complète.

La technologie PMA a été brièvement passée en revue, notamment ses avantages, ses composants, ses principes de fonctionnement, son coût et ses performances. Certains problèmes de conception et de mise en œuvre ont également été abordés.

En tenant compte des avantages ci-dessus, l'adoption de roulements magnétiques dans l'industrie sera plus économique, plus efficace et plus respectueuse de l'environnement que les roulements classiques. Les auteurs estiment que les systèmes PMA sont encore relativement plus coûteux que les paliers mécaniques classiques; par conséquent, l'utilisation massive d'PMA dans les industries reste prohibitive malgré les nombreux avantages offerts. Les PMA ne remplaceront pas encore complètement les roulements conventionnels dans les machines tournantes dans un avenir proche. Cependant, PMA peut bien trouver sa place dans un nombre limité de machines tournantes à hautes performances.

Chapitre IV : Système de contrôle PMA

Chapitre IV : Système de contrôle PMA

Introduction

L'PMA est un exemple frappant de produit mécatronique de haute technologie, car le matériel d'un système doté d'un amplificateur comprend des composants mécaniques associés à des éléments électroniques et des outils de traitement de l'information. Le logiciel du système PMA est un autre élément nécessaire et important, car le modèle de contrôle conçu détermine l'efficacité supplémentaire du système. Dans un système mécatronique typique, les forces et les mouvements sont produits conformément aux signaux d'entrée traités par le système.

IV.1 Enoncé du problème

Dans ce chapitre on fait une étude sur le système de contrôle spécifié de l'PMA axial.

IV.2 Etude du système de contrôle spécifié de l'PMA axial

IV.2.1 Electroaimants

La structure typique d'un système à lévitation magnétique à un degré de liberté est présentée à la figure IV.1 [6].

Un signal du capteur est fourni à l'entrée du régulateur et celui-ci assure le contrôle du courant. La loi de commande détermine la stabilité de la lévitation, la rigidité et l'oscillation de la suspension magnétique. Un enroulement constamment enroulé autour d'un électroaimant est excité par des courants de commande de référence à la sortie de courant du régulateur. En contrôlant les courants dans l'enroulement, le flux magnétique change, ce qui entraîne une modification des forces magnétiques attirantes. La ligne de flux magnétique est représentée par une ligne pointillée. De toute évidence, l'entrefer est traversé par une ligne de champ magnétique deux fois le long de l'axe des x.

Pour assurer la lévitation d'un objet, la force magnétique d'attraction verticale générée doit être suffisante pour contrecarrer la gravité. Ainsi, la force magnétique générée doit être inversée dans le sens de la gravité:

$$F_m = -F_g = -(m * g_a) = m * g \quad (\text{IV.1})$$

Où $-F_m$, F_g et g_a attirant la force magnétique, la gravité et l'accélération gravitationnelle, respectivement.

La force radiale f_x est décrite comme suit:

$$F_x = ma = m\ddot{x} = K_i i_c + K_x x \quad (\text{IV.2})$$

Où :

K_i Est le coefficient de l'organe exécutif (rigidité actuelle),

K_x La rigidité de la position de l'objet,

i_c Est le courant de commande de référence,
 x est le déplacement radial le long de l'axe x.

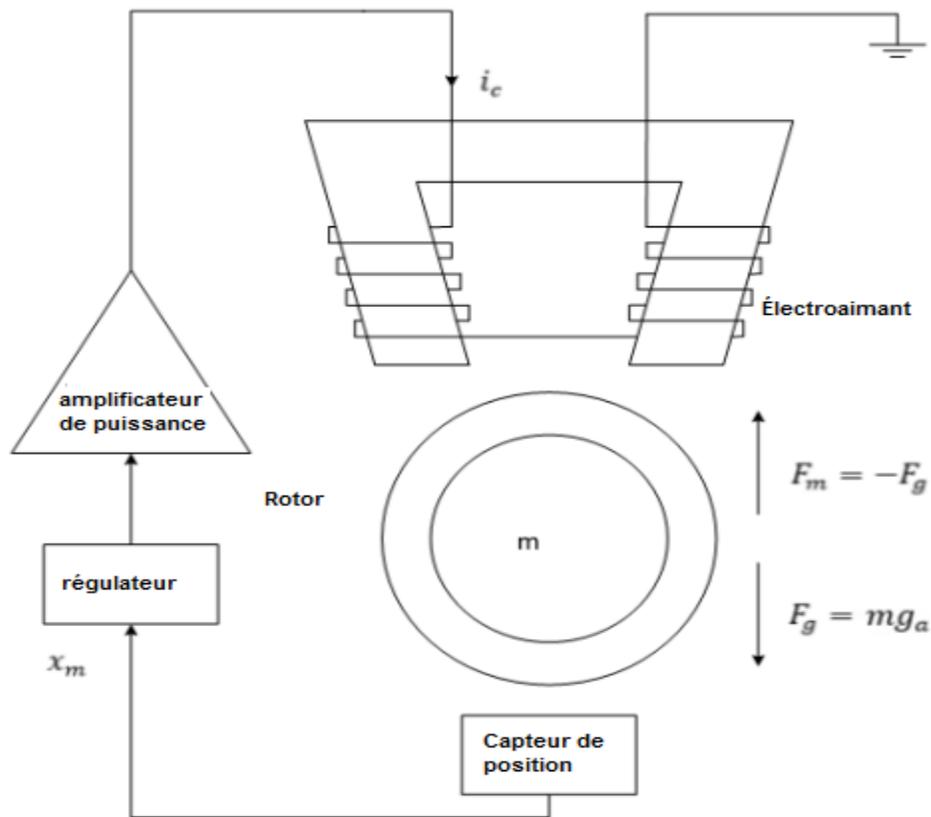


Fig.IV.1 : Système de lévitation magnétique.

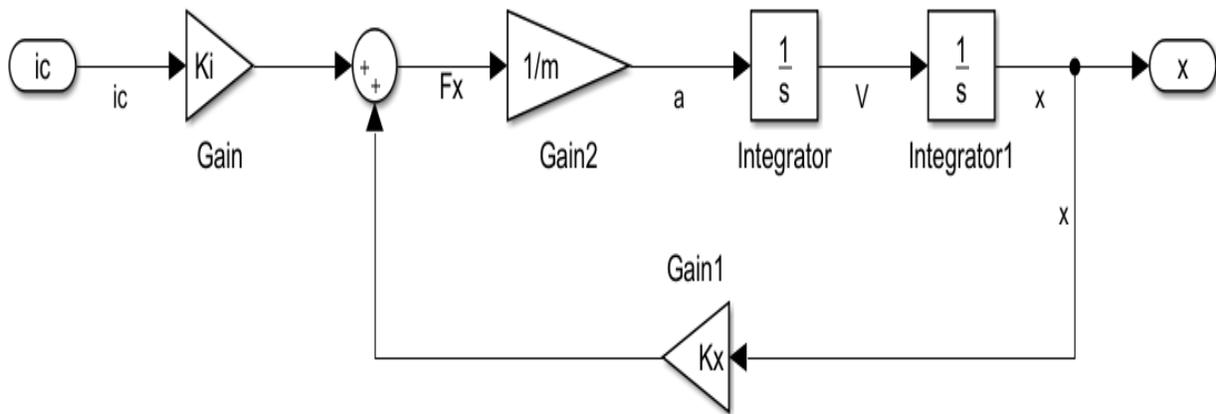


Fig.IV.2: Schéma fonctionnel du système de lévitation magnétique.

Le schéma fonctionnel de la figure IV.2 représente l'équation (1.1), dans laquelle la variable de sortie est un déplacement radial le long de l'axe x. Le schéma de principe pour un fonctionnement dans la direction de l'axe des y peut être obtenu par analogie. La valeur du déplacement radial x est obtenue par double intégration de l'accélération a à l'aide de l'opérateur de Laplace $1/s$. Le schéma structurel montre clairement que K_x est un coefficient de rétroaction positive, le système présenté est donc instable. Conformément au schéma fonctionnel, la fonction de transfert du système est exprimée par l'équation (1.3)

$$G(s) = \frac{K_i}{ms^2 - K_x} \quad (\text{IV.3})$$

Fonction de transfert de pôle:

$$s = \pm \sqrt{\frac{K_x}{m}} \quad (\text{IV.4})$$

L'un des pôles est situé dans le demi-plan de droite; par conséquent, un régulateur à rétroaction négative est requis pour un fonctionnement stable du système.

Les coefficients K_x et K_i pour le système sont linéarisés autour du point de fonctionnement et peuvent être obtenus comme suit [2]:

$$K_x = \frac{\mu_0 N^2 S_{air} i_{bias}^2 \cos X}{I_0^3} \quad (\text{IV.5})$$

$$K_i = \frac{\mu_0 N^2 S_{air} i_{bias} \cos X}{i_0^2} \quad (\text{IV.6})$$

Où :

μ_0 La perméabilité au vide,

N est le nombre de tours de l'enroulement,

S_{air} La plus petite surface transversale de l'électroaimant,

i_{bias} Le courant de polarisation,

X est l'angle de la force ($\pi/8$).

Le schéma électrique équivalent de l'électroaimant est présenté à la figure (fig.IV.3).

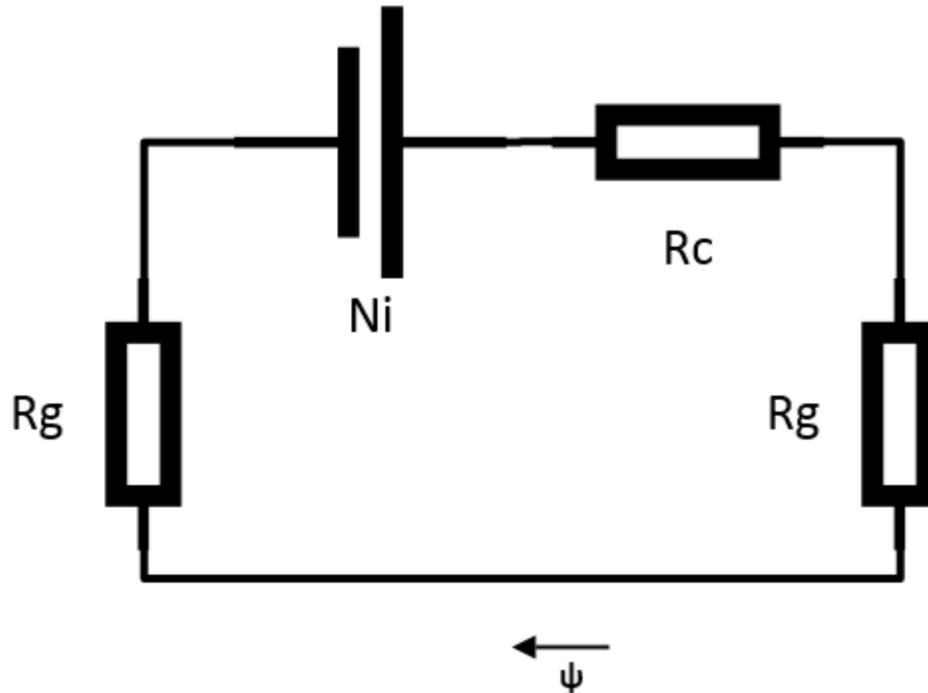


Fig.IV.3:Circuit équivalent.

La source de tension N_i représente la force magnétomotrice produite par le courant dans l'enroulement. R_g Et R_c représentent respectivement la résistance magnétique dans l'entrefer et dans l'électroaimant. Les résistances magnétiques peuvent être calculées à l'aide des formules suivantes:

$$R_g = \frac{l_{air}}{\mu_0 W_l} \quad (\text{IV.7})$$

$$R_c = \frac{l_{flux}}{\mu_0 \mu_r W_l} \quad (\text{IV.8})$$

Le flux magnétique Ψ peut être obtenu sous la forme:

$$\Psi = \frac{N_i}{2R_g} = \frac{N_i \mu_0 W_l}{2l_{air}} \quad (\text{IV.9})$$

Sur la base de l'équation du flux magnétique, la densité de flux magnétique B dans l'entrefer peut être exprimée par:

$$B = \frac{\Psi}{W_l} = \frac{N_i \mu_0}{2l_{air}} \quad (\text{IV.10})$$

Sur la base de la densité du flux magnétique dans l'entrefer B, l'énergie de champ dans l'entrefer peut être exprimée. L'énergie W_{ce} et l'énergie magnétique W_{fe} peuvent être considérées comme égales, en supposant que le circuit magnétique soit linéaire. Pour l'électro-aimant illustré à la figure (fig.IV.1), l'énergie dans l'entrefer est exprimée comme suit:

$$W_{ce} = \int_V \int_0^H B dH dV = \int_V \int_0^H H dB dV = \frac{1}{2\mu_0} \int_V B^2 dV = \frac{1}{2\mu_0} B^2 S_{air} 2l_{air} \quad (IV.11)$$

Selon le principe du travail virtuel, la force dans un électroaimant peut être définie comme la dérivée de l'énergie magnétique W_{ce} par rapport au déplacement x

$$f = \frac{\partial W_{ce}}{\partial x} = \frac{B^2 S_{air} \cos X}{\mu_0} \quad (IV.12)$$

La force d'attraction générée par l'électroaimant peut être obtenue à l'aide de l'équation suivante

$$f = \frac{\mu_0 N^2 i^2 S_{air} \cos X}{4l_{air}^2} \quad (IV.13)$$

La force totale de deux électroaimants agissant le long d'un axe peut être exprimée par la différence des forces produites par les électroaimants :

$$f = f_{x,1} - f_{x,2} = \frac{\mu_0 N^2 S_{air} \cos X}{4} \left(\frac{i_{x,1}^2}{(l_0 - x)^2} - \frac{i_{x,2}^2}{(l_0 + x)^2} \right) \quad (IV.14)$$

Pour plus de commodité, les courants d'enroulement $i_{x,1}$ et $i_{x,2}$ doivent être limités et le courant de polarisation i_{bias} doit être ajouté. Pour les électroaimants agissant le long de l'axe x , les forces sont déterminées comme suit:

$$\begin{aligned} i_{x,1} &= \max(i_{bias} + i_c, 0) \\ i_{x,2} &= \max(i_{bias} - i_c, 0) \end{aligned} \quad (IV.15)$$

$$f_x = \frac{\mu_0 N^2 S_{air} \cos X}{4} \left(\frac{(i_{bias} + i_c)^2}{(l_0 - x)^2} - \frac{(i_{bias} - i_c)^2}{(l_0 + x)^2} \right)$$

La raideur du courant K_i et la raideur de la position K_x peuvent être obtenues en calculant les dérivées des équations de force

$$k_i = \frac{\partial f}{\partial i_c} = \frac{0.000023544x^2 + 5.886e-9xi_c + 2.3544e-11}{-0.000002x^2 + x^4 + 1.0e-12} \quad (IV.16)$$

$$K_x = \frac{\partial f}{\partial x} = \frac{2.943 \cdot 10^{-9} i_c^2 + 4.7088 \cdot 10^{-5} x i_c + 1.88352 \cdot 10^{-7}}{-0.000002 x^2 + x^4 + 10^{-12}} - \frac{(4x^3 - 0.4 \cdot 10^{-5} x)}{(-0.000002 x^2 + x^4 + 10^{-12})} * \frac{(1.88 \cdot 10^7 x + 2.3544 \cdot 10^{-11} i_c + 0.00002344 x^2 i_c + 2.943 \cdot 10^{-9} x i_c^2)}{(-0.000002 x^2 + x^4 + 10^{-12})} \quad (IV.17)$$

En prenant l'offset radial et le courant de contrôle à zéro, les valeurs des coefficients sont les suivantes:

$$K_i = 23.544$$

$$K_x = 1.884 \cdot 10^5$$

IV.2.2 Système de contrôle

La structure générale du système de contrôle avec deux boucles de contrôle est illustrée à la figure (fig.IV.4).

Le système contient une boucle de contrôle interne pour le courant et une boucle de contrôle externe pour la position du rotor. Dans le modèle développé, les gains «ph2pu» et «pu2ph» sont conçus pour convertir les valeurs de travail en valeurs données et inversement, respectivement. Cette conversion est utilisée dans les modèles dans lesquels la valeur des signaux de référence peut être modifiée, il est donc nécessaire de prendre en compte le réglage du contrôleur. Cependant, lors de l'utilisation de la conversion, il n'est pas nécessaire de régler le régulateur.

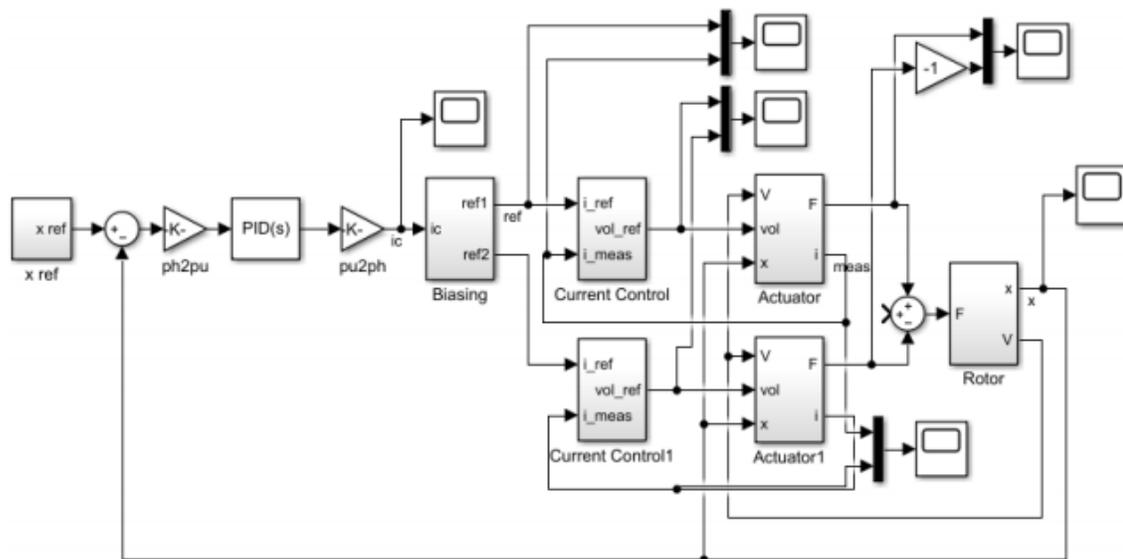


Fig.IV.4: Système de contrôle spécifié PMA.

Ce modèle est un système de contrôle d'objet à deux circuits avec deux degrés de liberté. Les sous-systèmes Actionneur 1 et Actionneur 2 contiennent des modèles d'électroaimants agissant le même axe. Le modèle d'électroaimant est présenté à la figure (fig.IV.5).

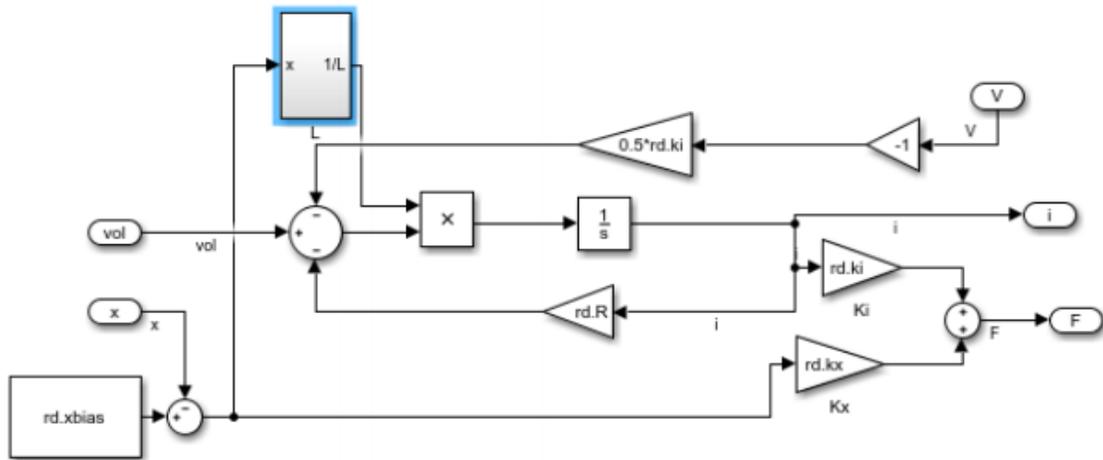


Fig.IV.5: Modèle d'électroaimant.

Le sous-système Rotor est un modèle simplifié du rotor dans lequel il ne prend pas en compte la connexion avec deux autres axes et la vitesse de rotation.

Un modèle simplifié du rotor est présenté à la figure (fig.IV.6).

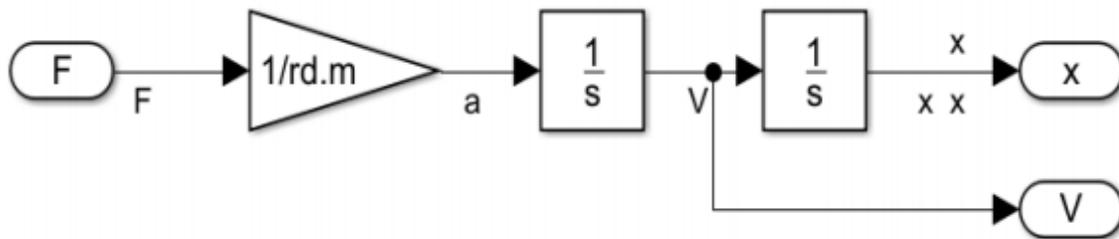


Fig.IV.6 : Modèle simplifié du rotor.

Le sous-système «Offset» est un calcul de la valeur de référence actuelle pour chacun des électroaimants. Les signaux de référence sont déterminés par le courant de polarisation et le courant de commande, dont la valeur est identique pour les deux électroaimants. Le calcul correspond à la somme de ces courants pour l'un et de la différence pour un autre électroaimant, ce qui permet d'augmenter la force d'attraction d'un électroaimant et de diminuer la force d'un autre. Le principe de calcul des valeurs des courants de référence est présenté à la figure (fig.IV.7).

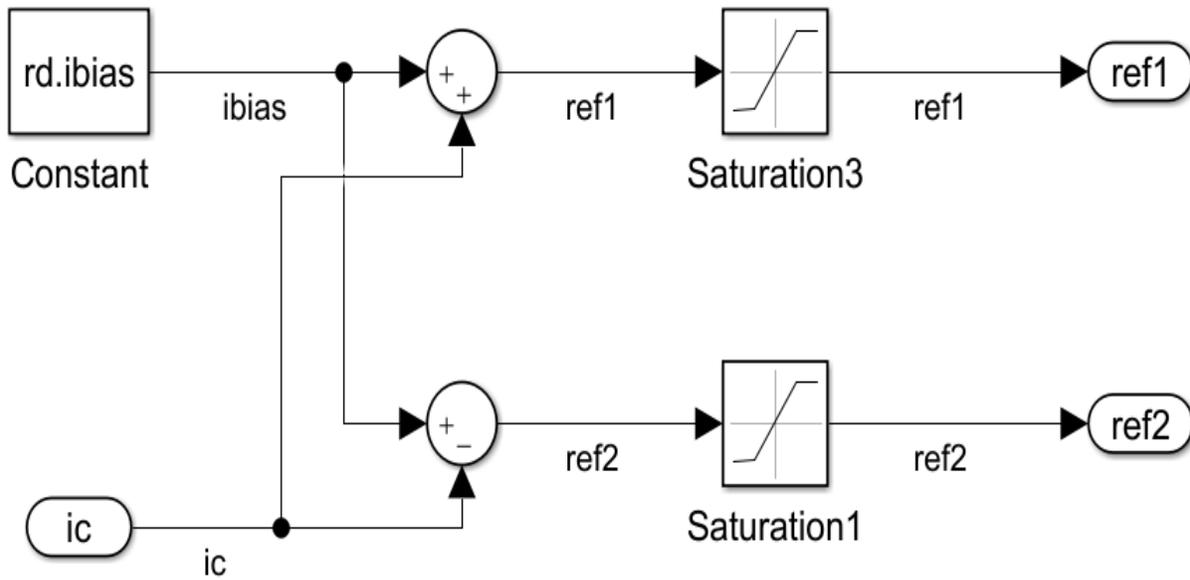


Fig.IV.7 : Schéma de calcul des courants de référence.

La boucle de contrôle de courant interne est présentée à la figure (fig.IV.8).

La position du rotor est contrôlée par le contrôleur de position du rotor, qui reçoit la valeur du déplacement x à l'aide du retour. Les valeurs des courants de commande entrent dans le régulateur de courant à partir du régulateur de position.

Le contrôleur de position dans ce système est le contrôleur PID.

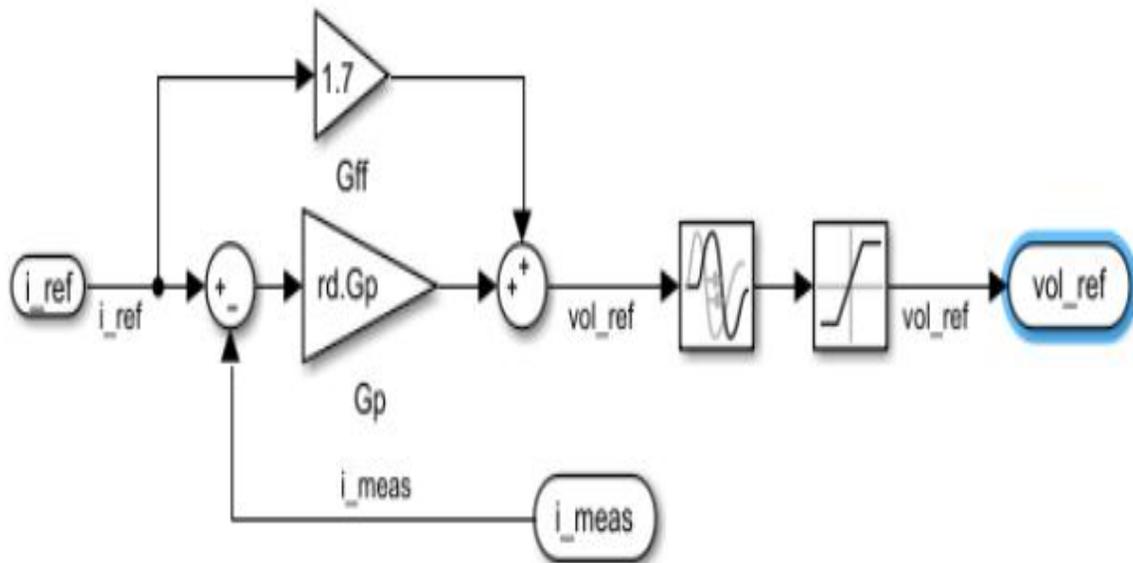


Fig.IV.8 : Boucle de contrôle de courant interne.

Le tableau IV.1 presente les parametres de la simulation :

Parametres	Valeurs
P	2.866
I	29.713
D	0.061
N	18207.436
Gp	10
Gff	1.7

Tableau .IV.1: Parametre de modelisation.

IV.3 Interprétation des résultats

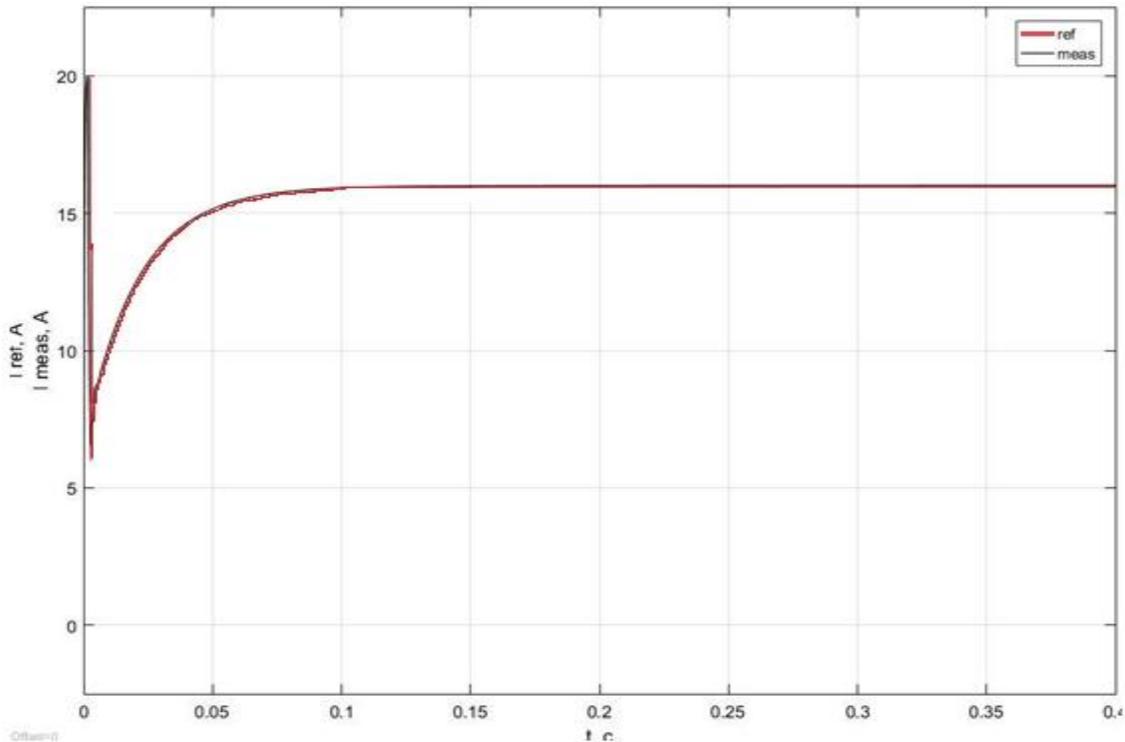


Fig.IV.9 : Caractéristiques du courant de référence et du courant mesuré.

La figure (fig.IV.10) montre clairement que les courbes représentant le courant de référence et le courant mesuré correspondent. Ainsi, la tâche principale de la boucle de contrôle interne est réalisée. Le contrôle du courant est basé sur la rétroaction du courant mesuré du corps exécutif, ce qui permet d'éliminer l'effet du comportement non linéaire de l'inductance de la bobine de l'électroaimant. Le facteur de dérivation est utilisé pour compenser l'effet d'une chute de tension sur une résistance et l'effet d'erreurs statiques causées par PWM. Le contrôle de courant développé peut être considéré comme un processus de premier ordre avec une temporisation. Les processus à temps long et variable sont complexes du point de vue du contrôle. La boucle de contrôle du courant interne doit donc être robuste et offrir une faible sensibilité aux changements de paramètres. Lors de la conception du régulateur, le fait que des valeurs de gain proportionnelles élevées ajoutent un bruit significatif à la valeur du courant de sortie a également été pris en compte.

Cependant, l'utilisation d'une commande exclusivement en intensité du courant n'est pas suffisante pour le fonctionnement stable du système, et un contrôleur de position du rotor est nécessaire [7].

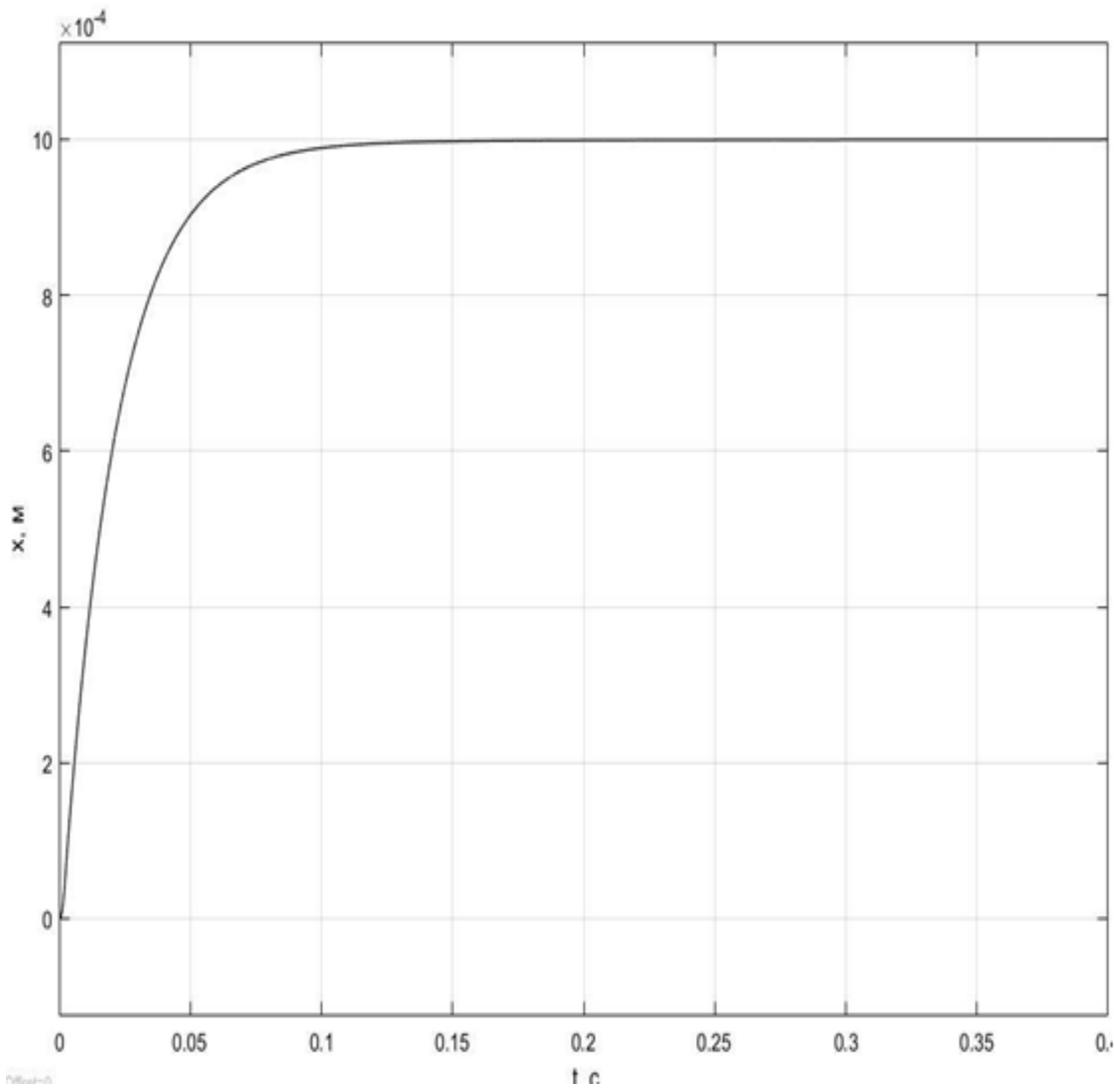


Fig.IV.10 : Réaction à l'effet d'entrée du signal de référence.

La réponse transitoire de la figure (fig.IV.11) est de nature monotone (il n'y a pas de fluctuations) et a un temps de montée relativement court.

Conclusion

La présence de deux boucles de contrôle permet un contrôle plus rapide et moins oscillant.

De plus, le système de commande décrit dans ce paragraphe utilise un seul contrôleur de position du rotor pour les deux électroaimants agissant le long du même axe de coordonnées.

En conséquence, par rapport aux simples régulateurs présentés dans les paragraphes précédents, le schéma de contrôle en question nécessite un nombre plus réduit de régulateurs pour un système à quatre degrés de liberté.

Conclusion générale

Conclusion générale

En arrivant à la fin de notre travail, il convient de s'interroger sur la portée de celui-ci et d'en tirer quelques conclusions

Nous avons exposé dans ce mémoire une étude des différents composants de TURBOEXPANDER, qui nous a permis d'apprécier la nécessité d'utilisation de ce dernier dans l'unité centrale de traitement de gaz.

Les paliers magnétiques sont utilisés lorsque les autres paliers ont atteint leur limite. Ils permettent à un rotor de tourner sans frottement ni contact. Leur domaine de prédilection concerne les applications à très haute vitesse de rotation, celles pour lesquelles il faut minimiser les pertes, éviter l'usure, ne pas polluer un environnement sensible par des poussières ou un lubrifiant, supprimer les vibrations, fonctionner à très basse ou très haute température ou limiter la maintenance. Ce mémoire, explique l'intérêt des paliers magnétiques, énumère leurs domaines d'application, décrit les principes de fonctionnement et détaille un exemple simple de suspension magnétique

Aussi nous avons étudié un système de contrôle de courant développé avec un régulateur PID permet de prendre en compte les caractéristiques de conception de l'arrêt AMP, à savoir le nombre d'enroulements et la surface des pôles. Pour mettre en œuvre le modèle mathématique, le logiciel de modélisation mathématique MATLAB a été utilisé

Finalement, nous souhaitons que ce mémoire puisse servir comme outil de travail pour les futurs étudiants concernés, et qu'il sera amélioré et complété en pratiquant des simulations afin d'élaborer une gamme de méthodes de contrôle de la position du rotor.

Il est souhaitable de prendre en charge cette thématique afin de mettre en évidence ces paliers magnétiques qui sont très utiles pour des équipement spécifiques utilisés dans plusieurs industries.

Références bibliographiques

Références bibliographiques :

- [1] Chouiha H, Mansouri AE, "Study the performance of Turbo-Expander ", memoire d'ingénieur, Université Kasdi Merbah de Ouargla, 2016.
- [2] Bensahad, "Présentation du nouveau projet de traitement de gaz (CPF) à GTL", Rapport de stage, Direction Régionale de Gassi Touil, 2014.
- [3] Guemgam, Abdelkader., "Etude thermodynamique sur le TurboExpander au CPF", Mémoire d'ingénieur, Université Amar Telidji de Laghouat, 2013.
- [4] Schweitzer G., Maslen E.H. Magnetic bearings. Theory, design, and application to rotating machinery. New York: Springer, 2009
- [5] "M. Aenis, E. Knopf, R. Nordmann", "Active magnetic bearings for the identification and fault diagnosis in turbomachinery" " 2002"
- [6] Boyko R.V, "Etude d'un système de contrôle de turbo-expandeur à différents modes de fonctionnement d'une installation de refroidissement à gaz ", Université électrotechnique d'état de Saint-Pétersbourg"LETI"eux.V. Ilyanova (Lénine) ,2018.
- [7] Mirlenko P.A, "Commande directe du système de force avec un rotor sur des roulements magnétiques actifs", Université électrotechnique d'état de Saint-Pétersbourg"LETI"eux.V. Ilyanova (Lénine) ,2017.
- .