REPUBLIQUE ALGERIENE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE YAHIA FARES DE MEDEA



Faculté de Technologie

Département du Génie Electrique

Mémoire de fin d'études de Master

Filière : Électrotechnique

Spécialité : Énergie Renouvelable en Électrotechnique

THEME :

Conception d'un mini-système de cogénération à usage domestique

Proposé et Dirigé par :

Pr. HENINI NOURDINE

Présenté par :

M. KHELIFA RACHID
M. CHIROUD OUSSAMA

Promotion 2022-2023

Remerciements :

Tout d’abord, Nous remercions Allah le tout puissant de nous avoir donné l’encourage et la patience nécessaires à mener ce travail à son terme.
Nous tenons à remercier tout particulièrement notre promoteur, Professeur à l’Université Yahia Fares, Médéa,pour l’aide qu’il nous a apportée, pour sa patience et sa rigueur scientifique .Ses conseils nous ont été précieux dans l’organisation du travail.
Nous tenons aussi à remercier les membres du jury pour l’honneur qu’il nous fait en prenant le temps de lire et d’évaluer ce travail.
Nous tenons aussi à exprimer notre gratitude à nos parents et amis qui nous ont apporté´ leur soutien moral et intellectuel tout au long de mon travail. Et aussi tous les enseignants de Génie électrique de premier cycle.

Dédicace

Pour l'étoile source d'affection et persévérance
Pour l'être les plus chères au monde
Pour leur soutien moral
Ma mère et mon père
Je dédie cette modeste mémoire de Master a :
Ma sœur : Sara Amina Roqia

Mes frères : Sidali Mohamed

A toutes ma famille : chiroud
Sans oublier mes très chers amis : islam hamza

mounir anoire ayoube aymen sidali lakhdar

tarek mohamed taher

A tous mes camarades de promotion

Et à toute personne à qui nous porte de

L'estime

Chiroud Oussama

Dédicace

Pour l'étoile source d'affection et persévérance
Pour l'être les plus chères au monde
Pour leur soutien moral
Ma mère et mon père
Je dédie cette modeste mémoire de Master a :
Ma sœur : laila et manel

Mes frères : laid et hicham et younes
A toutes ma famille : Khelifa et khanfouf
Sans oublier mes très chers amis : zirar bilal et

swalhi mohemd et Lherach younes

A tous mes camarades de promotion

Et à toute personne à qui nous porte de

L'estime

Khelifa Rachid

الملخص :
العمل المقدم في هذه المذكرة يهدف الى تصميم نظام توليد المصغر للاستخدام المنزلي باستخدام محرك "ستيرلنغ". يهدف هذا النظام إلى إنتاج الكهرباء والحرارة للاحتياجات المنزلية. تتناول المذكرة الجوانب المختلفة المتعلقة بتصميم النظام، مثل النمذجة الحرارية الميكانيكية لمحرك ستيرلنغ، وأبعاد المكونات، والتحكم / التحكم في النظام، فضلاً عن تحسين كفاءة الطاقة. كما يتم إجراء الدراسات التجريبية والاختبارات التجريبية للتحقق من صحة النموذج وتقييم أداء النظام. الهدف النهائي هو "تطوير نظام توليد المصغر الفعال والموثوق والمناسب للاحتياجات المحلية، باستخدام التكنولوجيا الواعدة لمحرك "ستيرلنغ
الكلمات المفتاحية :
دوار ملف حثي-لمحرك ستيرلنغ والتدفق الة غير متزامنة-الجزء الثابت

Résumé :
Le travail présenté dans ce mémoire porte sur la conception d'un mini système de cogénération à usage domestique utilisant un moteur Stirling. Ce système vise à produire à la fois de l'électricité et de la chaleur pour les besoins domestiques. Le mémoire aborde différents aspects liés à la conception du système, tels que la modélisation thermomécanique du moteur Stirling, le dimensionnement des composants, le contrôle/commande du système, ainsi que l'optimisation de l'efficacité énergétique. Des études empiriques et des tests expérimentaux sont également réalisés pour valider le modèle et évaluer les performances du système. L'objectif final est de développer un mini système de cogénération fiable, efficace et adapté aux besoins domestiques, en utilisant la technologie prometteuse du moteur Stirling.
Mots clés :
Rotor de bobine d'induction - pour moteur Stirling et machine asynchrone à flux - stator
Abstract :
The work presented in this thesis concerns the design of a mini cogeneration system for domestic use using a Stirling engine. This system aims to produce both electricity and heat for domestic needs. The thesis addresses various aspects related to the design of the system, such as the thermomechanical modeling of the Stirling engine, the dimensioning of the components, the control/command of the system, as well as the optimization of energy efficiency. Empirical studies and experimental tests are also carried out to validate the model and evaluate the performance of the system. The final objective is to develop a reliable, efficient mini cogeneration system suitable for domestic needs, using the promising technology of the Stirling engine..
Key Word :
Induction coil rotor - for Stirling motor and flow asynchronous machine - stator

Liste des figure:

Figure I. 1 : Schéma de principe d'une installation de micro-cogénération domestique..... 5
Figure I. 2 : Constitution d'une unité de micro-cogénération classique 5
Figure I. 3 :(a) Mode de production d'énergie actuelle (dite centralisée). 6
Figure I. 4 : Mode de production d'énergie avec les micro-Co générateurs (dite décentralisée ou autonome). 6
Figure I. 5 : Illustration du principe de fonctionnement d'une pile à combustible..... 19
Figure I. 6 : Illustration de la structure du moteur Stirling (moteur Stirling type α). 25
Figure I. 7 : Cycle de Stirling (type β). 26
Figure I. 8 : Cycle de Stirling : cycle théorique, cycle réel..... 27
Figure I. 9 : Schéma de principe d'un micro-cogénérateur utilisant un moteur Stirling α..... 28
Figure I. 10 : Structure d'un micro-cogénérateur motorisé par un moteur Stirling β couplé à un alternateur linéaire**.** 28

Figure II. 1 : Structure du moteur Stirling 34
Figure II. 2 :: Dispositif du moteur Stirling..... 35
Figure II. 3 : Exemple d'une constitution d'un régénérateur (réf. le laboratoire FEMTO-ST). 39
Figure II. 4 : Structure des échangeurs chauds (a) et des échangeurs froids (b) du prototype du moteur Stirling « simple effet », laboratoire FEMTO-ST**.** 40
Figure II. 5 : Schéma cinématique du moteur Stirling avec des ressorts et amortisseurs équivalents [18]. 41
Figure II. 6: Processus de résolution du système d'équations non linéaire du moteur Stirling 49
Figure II. 7: Les entrées sorties du modèle du moteur Stirling 54
Figure II. 8: Simulation du moteur Stirling commandé par un correcteur P.I.D. 57

Figure III. 1: Représentation des enroulements de la machine asynchrones 63
Figure III. 2:machine asynchrone 63
Figure III. 3: Représentation symbolique de la machine asynchrone triphasée à cage. 64
Figure III. 4: Structure diphasée de la machine asynchrone dans le repère (d-q). 69
Figure III. 5: Passage du système triphasé au système biphasé. 69
Figure III. 6: Repère de Concordia..... 71
Figure III. 7: Repère de Park 72
Figure III. 8: Modélisation de la machine asynchrone sous Matlab..... 75
Figure III. 9: coubel Electromagnetic torque Te (N*m)..... 76
Figure III. 10: courant de stator is a b c (A) 77
Figure III. 11:Rotor speed (wm)..... 78
Figure III. 12: voltage Stator vs d q (V) 78
Figure III. 13: La vitesse angulaire..... 79
Figure III. 14: Le vecteur de flux rotorique, aligné sur l'axe d, dans la commande vectorielle à flux orienté..... 80
Figure III. 15: Boucle d'asservissement en cascade du flux rotorique..... 83
Figure III. 16: Boucle d'asservissement du courant i_sq (force électromagnétique). 83
Figure III. 17: Synoptique de la commande vectorielle à flux orienté utilisant l'estimation du flux rotorique..... 84
Figure III. 18: Simulation de MAS commandée par la commande vectorielle en mode moteur. 85
Figure III. 19: V bus (V)..... 86

Figure III. 20: flux Stator phis _d q (V, s) avec..... 86

Figure IV. 1: Représentation énergétique du système de micro-cogénération à moteur Stirling 91
Figure IV. 2: Synoptique du banc d'essai virtuel du système de micro-cogénération. 92

liste des tableaux:

Tableau I. 1: Comparaison technologique des systèmes de micro/mini-cogénération, sources dans le texte 10
Tableau I. 2: Comparaison des performances des systèmes de micro/mini-cogénération, sources dans le texte 11

Tableau II. 1 Paramètres du moteur Stirling
Tableau II. 2 Variables thermodynamiques du moteur Stirling
Tableau II. 3 Caractéristique du gaz de travail (Hélium).
Tableau II. 4 Coefficients de raideur et d'amortisseurs du modèle mécanique du moteur Stirling
Tableau II. 5 Paramètres de dimensionnement du moteur Stirling
Tableau II. 6 Caractéristiques du système bouclé.

Tableau III. 1: Les paramètres de la machine asynchrone triphasée 76
Tableau III. 2: Paramétrage des correcteurs dans l'étude de simulation de la commande vectorielle de la MAS 85

Tableau IV. 1:État des études du système de micro-cogénération**.** 91

Table des matières :

Introduction générale : 1
I.1.Introduction 3
I.2.Définition et principe de la micro-cogénération : 4
I.3. Cogénération et micro-cogénération 7
I.3.1. Généralités 7
I.3.2. Technologies : 9
I.3.2.1. Cycle de rankine : 11
I.3.2.2. Micro-turbine 13
I.3.2.3. Moteur à combustion interne : 16
I.3.2.4. Les piles à combustible : 18
I.3.2.5. Moteur Stirling 21
I.4. Structure du moteur Stirling : 24
I.5. CONCLITION : 29
II.1. Introduction : 31
II.2. Structure et principe du fonctionnement du moteur Stirling : 31
II.2.1 structure de fonctionnement du moteur Stirling : 32
II.2.2. Principe de fonctionnement du moteur Stirling : 35
II.3 Étude de modélisation et de dimensionnement du moteur stirling : 40
II.3.1Modèle mécanique du moteur Stirling : 40
II.3.2. Modèle thermodynamique du moteur Stirling : 42
II.3.3 Modèle thermomécanique couplé du moteur Stirling : 46
II.3.4 Étude de dimensionnement du moteur Stirling. Condition de stabilité : 48
II.3.5. Géométrie du moteur Stirling prédimensionné : 50
II.4. Simulation du moteur Stirling : 53
II.4.1. Commande du moteur Stirling : 54
II.4.2. Établissement de fonction de transfert et lieu de Bode : 54
II.4.3. Synthèse d'une commande P.I.D : 56
II.4.4. Validation de la commande par simulation : 56
II.5. conclusion 58
III.1. Introduction : 61
III.2. Présentation de la machine asynchrone 62
III.2.1. Structure et fonctionnement : 62
III.2.2. Modélisation de machine asynchrone : 64
III.2.2.1. Mise en èquations de la MAS : 64
III.2.2.2. Equations de tensions : 65

III.2.2.3. Equations des flux.... 66
III.2.2.4. Equations mécaniques :.... 68
III.2.2.5.Couple électromagnétique.... 68
III.2. 3.Modéle biphasé : 73
III.2.3.1 Equations des tensions : 73
III.2.3.2 Expression du couple électromagnétique : 74
III.2.3.3Référentiel lié au stator 74
III.2.3.4. Référentiel lié au rotor : 74
III.2.3.5. Référentiel lié auchap tournant : 75
III.3. Simulation de modèle de la machine asynchrone 75
III.3.1. Résultats de simulation : 76
III.4. Étude du contrôle/ commande de la machine asynchrone.... 79
III.4.1. Importance, objectifs et choix d'une stratégie de commande 79
III.4.2. Principe de la commande vectorielle à flux orienté.... 80
III.4.3. Établissement des chaînes de commande 81
III.4.3.1. Contrôle du flux rotorique.... 81
III.4.2.2. Synthèse des correcteurs P.I :.... 83
III.4.2.3. Synoptique de la commande vectorielle à flux orienté.... 83
III.4.3. Simulation de la commande vectorielle à flux orienté appliquée à la MAS :... 85
III .4.3.1. L'interprétation : 87
III.5. Conclusion :.... 88
IV.1. Introduction : 90
IV.2. Banc d'essai virtuel du système global.... 91
IV.2.1. Objectifs d'un banc d'essai virtuel.... 91
IV.2.2. Construction du banc d'essai virtuel : 92
IV.3. Conclusion :.... 93
Conclusions général : 90
Annex A: Details de simulation et command du Moteur Stirling.... 90
Annex B: Details sur la modélisation analytique de la machine Asynchrone.... 90
Bibliographie : 90

Introduction générale :

Dans le contexte actuel du réchauffement climatique mondial et de l'épuisement inévitable des ressources d'énergie fossile, de nouvelles méthodes de production et de consommation efficaces sont développées, parmi lesquelles la cogénération. La cogénération a été initialement mise en œuvre dans les années 1970. Elle permet la production simultanée de deux formes d'énergie, généralement de la chaleur et de l'électricité, à partir d'une seule source d'énergie primaire. Cela favorise l'utilisation efficace des ressources primaires, avec un rendement supérieur à 85%, par rapport à la production séparée traditionnelle. Le premier chapitre abordera en détail l'importance de la cogénération.

La cogénération, qui englobe la production combinée de chaleur et d'électricité, est utilisée dans une large gamme de puissances. Elle va de la micro-cogénération, avec une puissance électrique inférieure à 36 kW, à la grande cogénération, pouvant dépasser 12 MW. Elle répond à divers besoins énergétiques pour différents types d'applications tels que quartiers résidentiels, usines, centres commerciaux, piscines, immeubles collectifs, maisons individuelles ou même bateaux. Un système de cogénération, quel que soit sa puissance nominale, est composé d'un convertisseur thermomécanique qui convertit l'énergie primaire en énergie mécanique pour entraîner un convertisseur électromécanique. Actuellement, il existe plusieurs types de motorisation possibles, notamment les moteurs à combustion interne, les turbines à gaz, les moteurs à apport de chaleur externe, etc. La cogénération peut également être réalisée à l'aide de moyens électrochimiques, tels que les piles à combustible.

Le moteur Stirling, un type de moteur qui utilise une source de chaleur externe, est devenu récemment une technologie très prometteuse pour la micro-cogénération. Plusieurs fabricants renommés à l'échelle internationale se sont engagés dans cette nouvelle voie. Des systèmes de micro-cogénération utilisant le moteur Stirling sont déjà en fonctionnement dans certains pays, bien que leur nombre soit limité. Cependant, cette technologie n'a pas encore atteint son état de maturité complet. Les principales caractéristiques avantageuses du moteur Stirling sont les suivantes : il fonctionne de manière silencieuse grâce à une combustion continue et contrôlée ; il utilise un fluide de travail encapsulé, ce qui garantit la propreté et la fiabilité du système ; et surtout, il est compatible avec différentes sources d'énergie primaires, qu'elles soient fossiles ou renouvelables.

Ce mémoire de thèse abordera l'étude d'un système de micro-cogénération innovant pour une application domestique, utilisant un moteur Stirling à piston libre. La structure générale du micro-cogénérateur étudié est présentée de manière simplifiée.

L'objectif de cette étude est de nature pluridisciplinaire, combinant étroitement les aspects thermomécaniques et électriques. Il est crucial de contrôler la force de charge du générateur de manière à optimiser la récupération de l'énergie mécanique et assurer le fonctionnement stable du moteur Stirling.

Les Principaux apports de cette recherche sont largement axés sur l'étude de la modélisation, du contrôle/commande et de l'optimisation de la conception de la chaîne électromécanique non conventionnelle du système. Dans le cas d'une connexion au réseau de distribution, une analyse de la chaîne de convertisseurs statiques de puissance sera effectuée afin d'optimiser le transfert d'énergie vers le réseau. Les travaux réalisés dans cette thèse se situent principalement dans le domaine de l'électrotechnique. Cependant, il est essentiel de maintenir une vision globale de l'ensemble du système thermomécano-électrique.

Dans le deuxième chapitre, nous présenterons les résultats des travaux de recherche réalisés en collaboration avec notre partenaire du laboratoire FEMTO-ST. Ces travaux portent sur la modélisation et le dimensionnement du moteur Stirling, visant à mettre en évidence le fort couplage entre cette partie et la partie électrique. Le modèle thermomécanique du moteur Stirling présente une non-linéarité. Une commande linéaire de type P.I.D, qui vise à stabiliser le système autour d'un point de fonctionnement nominal, a été mise en place. Une boucle d'asservissement du moteur a été développée pour garantir une réponse précise et contrôlée.
Le modèle électromagnétique du transducteur électromécanique de la structure d'origine, à savoir la machine à induction linéaire tubulaire décrite dans le traité de P. François [1], a été développé. Le troisième chapitre de cette étude se concentre sur la validation empirique de ce modèle, en ajustant les paramètres électromagnétiques et en effectuant des tests expérimentaux sur la machine asynchrone. Cette étude a été complétée par une analyse théorique et le développement d'une stratégie de contrôle expérimentale pour répondre aux besoins spécifiques du système électrique en question, en matière de formation notamment.
Dans le Modélisation, simulation et analyse globales Le quatrième chapitre a commencé par le système de cogénération partielle et la simulation enrichie des interprétations des résultats obtenus, et enfin nous terminerons par une conclusion générale

Chapitre I :

L'état de l'art sur les systémes de micro-cogénération domestique

I.1.Introduction

L'état de l'art sur les systèmes de micro-cogénération domestique est une exploration des dernières avancées technologiques dans le domaine de la production combinée de chaleur et d'électricité à petite échelle pour une utilisation résidentielle. Ces systèmes, souvent basés sur des technologies de pointe telles que les piles à combustible, les moteurs à combustion interne à haut rendement ou les systèmes Stirling, offrent aux ménages la possibilité de produire leur propre électricité tout en récupérant la chaleur générée pour le chauffage ou l'eau chaude sanitaire.

L'état de l'art examine les différentes solutions de micro-cogénération disponibles sur le marché, en mettant en évidence leurs caractéristiques, leurs avantages et leurs limitations. Il présente également les dernières tendances en matière d'efficacité énergétique et de durabilité, mettant en évidence les efforts de recherche et développement visant à améliorer les performances et la fiabilité de ces systèmes.

L'un des principaux avantages des systèmes de micro-cogénération domestique réside dans leur capacité à réduire la dépendance des ménages vis-à-vis des réseaux électriques traditionnels, tout en réduisant les émissions de gaz à effet de serre. En utilisant efficacement le combustible pour produire à la fois de l'électricité et de la chaleur, ces systèmes offrent un rendement énergétique supérieur à celui des solutions traditionnelles, contribuant ainsi à une utilisation plus durable des ressources.

L'état de l'art aborde également les défis et les perspectives d'avenir pour les systèmes de micro-cogénération domestique, tels que l'intégration avec les énergies renouvelables intermittentes, l'optimisation de la gestion de l'énergie et l'adaptation aux besoins spécifiques des différents types de logements.

I.2.Définition et principe de la micro-cogénération :

La micro-cogénération, également connue sous le nom de cogénération domestique, est un processus qui permet de produire simultanément de la chaleur et de l'électricité dans un système énergétique compact. Elle repose sur le principe de récupération et d'utilisation efficace de la chaleur résiduelle générée lors de la production d'électricité. [1]

Le fonctionnement de la micro-cogénération repose généralement sur l'utilisation d'un moteur à combustion interne ou d'une pile à combustible fonctionnant au gaz naturel, au biogaz, à l'huile végétale ou à d'autres sources de combustibles. L'énergie thermique produite lors de la génération d'électricité est récupérée et utilisée pour le chauffage de l'eau, le chauffage de l'espace ou d'autres besoins thermiques dans le bâtiment.

Le principe de la micro-cogénération repose sur l'idée de maximiser l'efficacité globale de l'utilisation de l'énergie. Dans les centrales électriques traditionnelles, une grande quantité d'énergie est perdue sous forme de chaleur dans l'environnement, mais la micro-cogénération permet de récupérer cette chaleur et de l'utiliser de manière productive, ce qui améliore considérablement l'efficacité énergétique globale. [2]

En utilisant la micro-cogénération, les utilisateurs peuvent réduire leur dépendance vis-à-vis des réseaux d'électricité et de chauffage centralisés, ce qui peut entraîner des économies d'énergie et de coûts. De plus, l'utilisation simultanée de la chaleur et de l'électricité permet de réduire les émissions de gaz à effet de serre, ce qui en fait une option attrayante du point de vue environnemental. [3]

Il convient de noter que les détails spécifiques de la micro-cogénération, tels que les technologies utilisées, les capacités de production d'électricité et de chaleur, ainsi que les exigences d'installation, peuvent varier en fonction du système choisi et des réglementations locales. Il est recommandé de consulter des références techniques, des études de cas ou des experts dans le domaine pour obtenir des informations plus détaillées et actualisées sur la micro-cogénération. [4]

Il est également recommandé de consulter des sites Web spécialisés tels que ceux des fabricants de systèmes de micro-cogénération, des institutions de recherche énergétique et des organismes gouvernementaux dédiés à l'énergie pour obtenir des informations actualisées sur la technologie de la micro-cogénération.

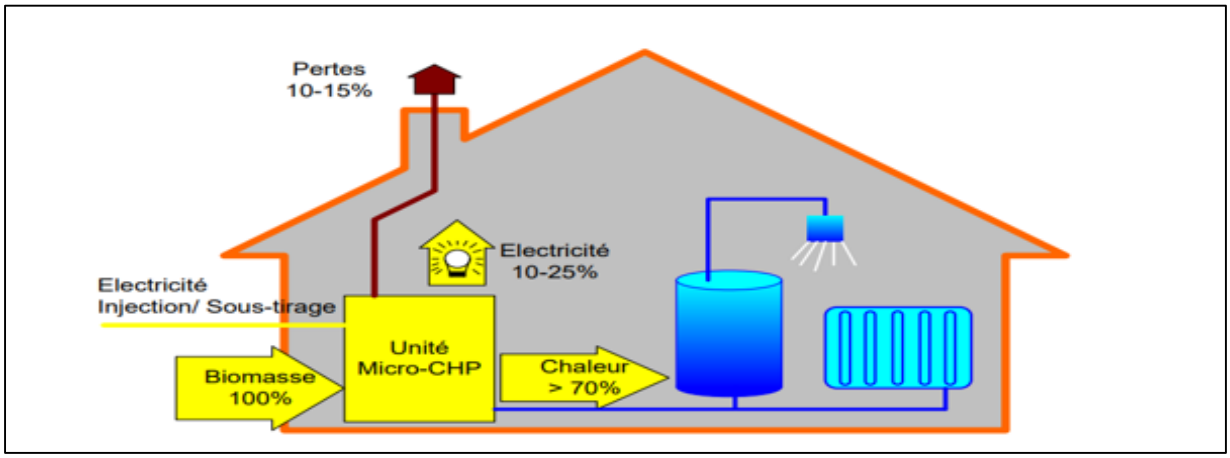


Figure I. 1 : Schéma de principe d'une installation de micro-cogénération domestique

Schéma de principe d'une installation de micro-cogénération domestique

L'énergie primaire, dans cet exemple, est arbitrairement la biomasse. En outre, d'autres ressources primaires telles que le gaz, le rayonnement solaire, l'énergie géothermique, etc. sont probables. Tout d'abord, le carburant est brûlé. L'énergie thermique dégagée par cette combustion fait fonctionner une chaîne thermodynamique de l'unité µCHP (basée sur une micro turbine ou un moteur Stirling par exemple). L'énergie mécanique de cette chaîne sera convertie en énergie électrique en entraînant un alternateur de la chaîne électromécanique. L'électricité produite peut être consommée directement sur place ou injectée dans le réseau public domestique. La fraction d'énergie thermique non convertie en énergie mécanique dans la chaîne thermodynamique passe par un échangeur pour alimenter le circuit de chauffage et d'eau chaude sanitaire (ACS) de la maison. Le rendement présenté dans cet exemple peut être compris entre 85% et 90%. Biomasse 100% (Solaire Gaz Géothermie E.) Primaire E. Thermique E. Thermomécanique Electromécanique Chaîne E. Mécanique Electrique.

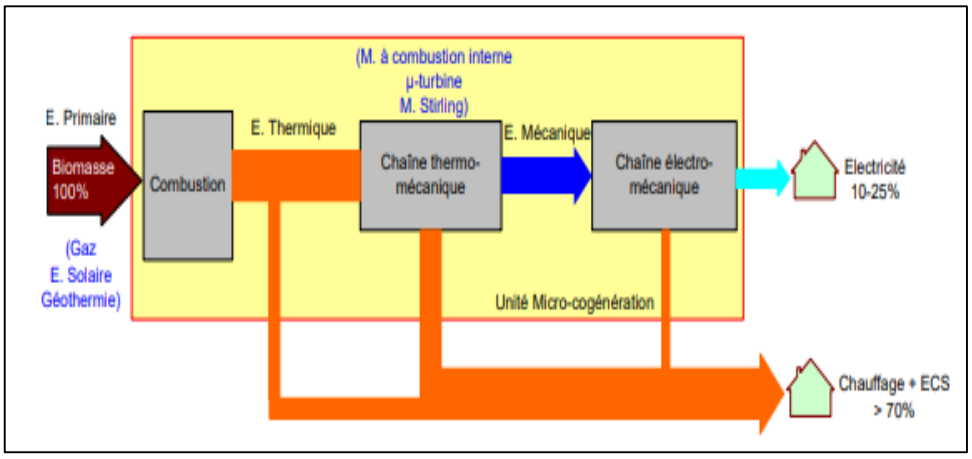


Figure I. 2 : Constitution d'une unité de micro-cogénération classique

Dans la phase de gestion énergétique de ce système, le point de performance du système est constamment régulé afin de maintenir le logement et le ballon ECS à la bonne température.
En permanence. Généralement, il n'est pas prioritaire de réguler la production électrique du système. Cette dernière est plutôt dépendante de la production thermique. Cependant, il pourrait être tout à fait d'immuable si la modification de l'interaction thermique/électrique est techniquement et économiquement autorisée. L'utilisation de stockage d'énergie thermique ou électrique (les batteries, même si elles restent chères) permettra une gestion optimale des flux énergétiques de l'habitation. Comparons ce mode de production (µCHP) avec le mode production-consommation actuel. Il est tout à fait humain que le consommateur final de la chaîne réfléchisse occasionnellement à la part d'énergie primaire (souvent fossile) utilisée pour créer de l'énergie électrique. Cette proportion d'énergie primaire (en kWh) est généralement bien supérieure à l'énergie électrique finale dont vous disposez sur votre lieu de résidence ou de travail, etc.

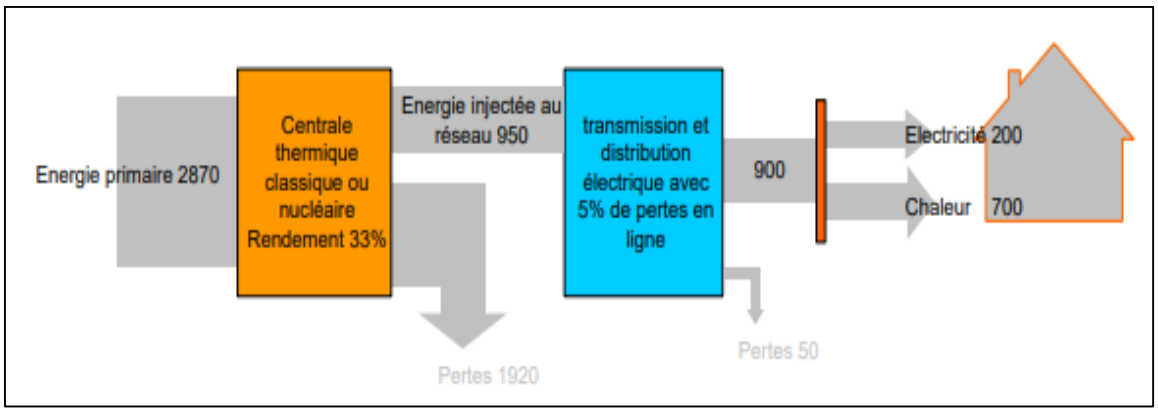


Figure I. 3 :(a) Mode de production d'énergie actuelle (dite centralisée).

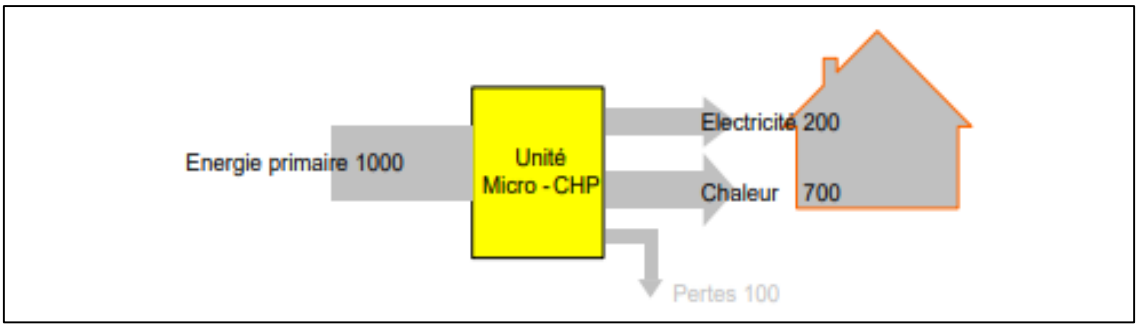


Figure I. 4 : Mode de production d'énergie avec les micro-Co générateurs (dite décentralisée ou autonome).

Ce schéma illustre la différence monumentale d'utilisation de l'énergie primaire dans un même objectif de satisfaction des besoins énergétiques d'un logement, entre les deux modes de production d'énergie. Ce dernier concerne principalement les pertes d'énergie au stade de la production centralisée d'électricité et les pertes d'énergie dans le transport et la distribution d'électricité. L'économie d'énergie primaire du micro générateur de Co va être une préoccupation beaucoup plus courante une fois que ce type de système sera adopté à grande échelle.

Cependant, en plus de l'indice économique intéressant que donne l'utilisation de ce système, d'autres exigences doivent également être respectées.

- Nettoyage : Aucune émission de gaz nocifs (CO, SO2, NOx, autres gaz à effet de serre, etc.).
- Silence : Performance silencieuse pour contribuer à la tranquillité des personnes qui habitent la maison équipée de ce système.
- Fiabilité : fonctionnement fiable à pleine charge ou à charge partielle pour répondre à tout moment à la demande de puissance fluctuante.
- Flexibilité de l'interaction thermique/électrique.
-Raccordement et communication sur le réseau public : Gestion optimale de la production et de la consommation d'énergie, souveraineté électrique de la maison en cas de coupure de courant, défense du système contre les court-circuit sur le réseau public en cas de raccordement au réseau, collaboration dans la gestion des pointes (smart gril).
- Maintenabilité : Maintenance et fixation simples et économiques. - Longue vie. A l'heure actuelle, certaines technologies sont susceptibles de pouvoir faire ce micro démarrage
-cogénération, sera détaillée dans la section §1.2.

I.3. Cogénération et micro-cogénération

I.3.1. Généralités

Un système de cogénération génère simultanément chaleur et électricité à partir d'une seule source d'énergie. La production décentralisée d'électricité par cogénération (via l'utilisation de multiples technologies présentées par la suite) permet la valorisation in-situ de la chaleur produite lors de la génération d'électricité et la réduction de la consommation d'énergie primaire. Afin de valoriser la chaleur produite, les installations de cogénération doivent être placées à proximité d'un besoin de chaleur (réseau de chauffage urbain, process industriel, bâtiment). La périodicité et le niveau de besoin thermique vont influer sur les conditions de

fonctionnement du cogénérateur. De son côté, l'électricité produite peut être valorisée sur le site ou bien exportée vers le réseau électrique.

La cogénération est généralement catégorisée en fonction de la puissance électrique nominale de l'appareil. On retrouve d'abord les installations de petite puissance, ou de micro-cogénération, pour des puissances inférieures à 36 kWel en France (50 kWel selon les critères de l'Union Européenne). Viennent ensuite les installations de mini-cogénération dont la limite est établie autour de 250 kWel. Les installations au-delà de 250 kWel sont généralement classées dans la cogénération de grande puissance et peuvent aller jusqu'à plusieurs MW. Le secteur de la micro/mini-cogénération est aujourd'hui peu représenté en France tandis que les grosses puissances sont assez répandues avec environ 4,5 GWel de puissance installée (sur un total de 5,2 GWel en 2015 (ATEE Club Cogénération, 2015)) [5]. Ces dernières bénéficient d'un soutien historique (contrats de rachat d'électricité) et d'une offre industrielle mature.

La cogénération a été, par convention, comparée aux moyens de production conventionnels d'électricité et de chaleur utilisant la même source d'énergie primaire (Dorer & Weber, 2007) [6]. Or, la plupart des installations de (micro-)cogénération fonctionnent au gaz naturel. Dans ce cas, l'approvisionnement énergétique de référence d'un bâtiment résidentiel ou tertiaire (dans le cas particulier de la micro et mini-cogénération) est constitué d'une chaudière fonctionnant au gaz naturel (rendement d'environ 90 %) pour la production de chaleur à destination du chauffage et de l'eau chaude sanitaire et par le réseau national électrique pour répondre aux besoins électriques spécifiques (ainsi qu'une éventuelle climatisation). La production conventionnelle d'électricité de réseau à partir de gaz naturel se fait dans le meilleur des cas à l'aide de cycles combinés dont le rendement se situe autour de 50 % (jusqu'à 60 % pour les centrales les plus efficaces). Les pertes de la solution conventionnelle se font au niveau de la production électrique centralisée qui induit des pertes thermiques élevées ainsi qu'au niveau du transport de l'électricité. Face à cette solution, une micro-cogénération avec un rendement global standard de 90 % (PCI) permet de diminuer l'énergie primaire consommée (Possidente, et al., 2006) [7].

I.3.2. Technologies :

Depuis le début des années 2000, de nouveaux systèmes de cogénération de plus petite capacité sont disponibles avec des systèmes de l'ordre du kWel, visant les applications résidentielles de petits immeubles collectifs voire logements individuels. La mise sur le marché d'un certain nombre de ces produits, notamment par des constructeurs japonais et allemands stimule l'intérêt de la recherche pour ces produits (Ren, et al., 2007) [8]. On trouve un grand nombre d'études listant les technologies disponibles et leur niveau de maturité (Andlauer, 2011), (Bianchi, et al., 2011), (Bouvenot, et al., 2014), (Onovwiona & Ugursal, 2004), (Knight & Beausoleil-Morrison, 2005) (Quoilin, et al., 2013) et (Milin, 2014) [9][10][11][12][13][14][15]. On s'appuie aussi sur une analyse de la littérature sur les performances de 5 technologies de micro-cogénération, menée au chapitre 4. Les tableaux suivants (Tableau 1.1 et Tableau 1.2) synthétisent les données de différentes études concernant des produits commercialisés ou au stade de prototype pour des puissances inférieures à 100 kWel. Les temps de démarrage sont principalement basés sur ceux des appareils fonctionnant au gaz naturel (GN).

Technologie	**Cycle de Rankine**	**Micro-turbine**	**Moteur à combustion interne**	**Moteur Stirling**	**Pile à combustible (SOFC)**	**Pile à combustible (PEMFC)**
Maturité technologique	Protos. en µCHP, commercialisée au-delà	Mini-CHP : commercialisée, µCHP : field-test	Commercialisée	Commercialisée mais peu de modèles	Field-test Europe, commercialisée au Japon	Field-test Europe, commercialisée au Japon
Fiabilité	Bonne (simplicité)	Potentiel élevé (simplicité) à confirmer	Bonne (techno. maîtrisée) si maintenance	Potentiel élevé (vit. rotation faible) à confirmer	Potentiel élevé (pas mécanique) mais complexité	Potentiel élevé (pas mécanique) mais complexité
Nature du combustible	Toutes sources de chaleur et combustibles	Gaz naturel, biogaz + qq. produits pétroliers	Gaz naturel, biogaz, diesel, hydrogène, huiles Végétales	Toutes sources de chaleur et combustibles	Hydrogène à partir de gaz naturel, biogaz, …	Hydrogène à partir de gaz naturel, biogaz, …
Possibilité de modulation	Bonne (20 %) mais rendement	Bonne (20 %) mais rendement	Moyenne (50 %) mais rendement	Moyenne (50 %) mais rendement	Bonne (20 %) mais arrêts à éviter (< 3/an)	Bonne (20 %) mais arrêts sensibles (<

	électrique dégradé	électrique dégradé	électrique degrade	électrique dégradé		1/j)
Temps de démarrage	Dépendant combustible utilisé	GN : < 20 min pleine charge	Elec. immédiat Therm. < 20 min pleine charge	GN : < 20 min pleine charge, dépendant comb.	Très long (> 3 h)	Long (> 1 h)
Maintenance	Maintenance faible	Maintenance régulière	Maintenance régulière et coûteuse	Maintenance faible	Bon potentiel mais besoins réguliers sur les protos.	Bon potentiel mais besoins réguliers sur les protos.
Durée de vie	>20 ans sur les fortes puissances	10 – 20 ans (avec remplacements)	10 – 20 ans (avec remplacements)	>15 ans mais manque de recul	5-10 ans mais forte évolution + Manque de recul	5-10 ans mais forte évolution + Manque de recul
Investissement (détail : chap. 4)	1000 – 10 000 €/kWel	1500 – 3000 €/kWel	1000 – 2500 €/kWel	5000 – 10 000 €/kWel	> 10 000 €/kWel	> 10 000 €/kWel

Tableau I. 1: Comparaison technologique des systèmes de micro/mini-cogénération, sources dans le texte

Technologie	Cycle de Rankine		Micro-turbine	Moteur à combustion interne	Moteur Stirling	Pile à combustible (SOFC)	Pile à combustible (PEMFC)
Gamme de puissance	Plutôt élevées (peu de protos. en micro/mini)		Surtout mini-CHP, tendance vers la Micro	Micro et mini-CHP	Micro-CHP	Micro-CHP (quelques cas en mini)	Micro-CHP (quelques cas en mini)
Rendement électrique (PCS)	7 – 20 %		10 – 30 %	20 – 45 %	10 – 20 %	30 – 60 %	25 – 45 %
Rendement total (PCS)	70 – 90 %		60 – 80 %	80 – 95 %	80 – 95 %	65 – 85 %	70 – 90 %
Ratio de puissance E/C	0,1 – 0,3		0,15 – 0,4	0,25 – 0,7	0,15 – 0,3	0,5 – 2	0,5 – 1

Emissions	Comparable chaudière		+ NOx	+ NOx (possibilité pot catalytique, combustion optimisée)	Comparable chaudière	Mieux qu'une chaudière (--NOxet CO)	Mieux qu'une chaudière (--NOxet CO)

Tableau I. 2: Comparaison des performances des systèmes de micro/mini-cogénération, sources dans le texte

Le Tableau 1.2 introduit la notion du ratio de puissance E/C des cogénérateurs. Il s'agit du ratio despuissances électrique et thermique (chaleur) nominales, c'est une grandeur caractéristique d'un appareil. Plus il est élevé plus les économies d'énergie primaire générées seront potentiellement élevées.

Le principe de chaque technologique est ensuite brièvement expliqué dans cette partie, on trouvera

des compléments d'information (Bouvenot, 2015).

I.3.2.1. Cycle de rankine :

Ce type de micro-cogénérateur est basé sur le cycle thermodynamique de Rankine qui utilise de la vapeur d'eau ou un fluide de travail organique. Elle est le plus couramment utilisée dans des systèmes de cogénération de grande puissance. L'utilisation d'un fluide de travail autre que l'eau permet de récupérer des sources de chaleur à basse température (typiques des énergies de récupération).

La flexibilité de la source de chaleur du cycle thermodynamique a notamment permis le développement de prototypes de produits fonctionnant à partir de sources renouvelables telles que le bois (Bouvenot, et al., 2014) (Thiers, et al., 2010), le solaire (Bouvier, et al., 2016) et à partir de sources de chaleur fatale (Quoilin, et al., 2011). Les cycles de Rankine en micro-cogénération présentent de faibles rendements électriques et semblent donc limités du point de vue des économies d'énergie primaire puisque la production d'électricité sera plus faible qu'avec d'autres technologies. Par contre, le coût limité de ces machines par rapport aux technologies concurrentesreprésente un avantage. De plus, cette technologie permet théoriquement une durée de vie importante car les contraintes mécaniques sont faibles.

Le cycle de Rankine est un cycle thermodynamique idéal qui est largement utilisé

dans les centrales électriques à vapeur pour produire de l'électricité à partir d'une source de chaleur. Voici les caractéristiques clés du cycle de Rankine :

1. Le cycle de Rankine utilise de l'eau comme fluide de travail qui est chauffé dans une chaudière pour produire de la vapeur. Cette vapeur est ensuite utilisée pour alimenter une turbine à vapeur, qui convertit l'énergie thermique en énergie mécanique.
2. La vapeur qui sort de la turbine est ensuite refroidie dans un condenseur, où elle est condensée en eau et retournée à la chaudière pour être réchauffée à nouveau. Ce processus de refroidissement de la vapeur dans le condenseur permet également d'extraire la chaleur latente de la vapeur, ce qui améliore l'efficacité globale du cycle.
3. Le cycle de Rankine est un cycle en boucle fermée, ce qui signifie que le fluide de travail est continuellement recyclé dans le système.
4. Le cycle de Rankine peut être utilisé avec une variété de sources de chaleur, notamment des combustibles fossiles, des réacteurs nucléaires, des centrales solaires thermiques et des sources géothermiques.
5. L'efficacité du cycle de Rankine dépend en grande partie de la température de la source de chaleur, de la pression de vapeur à l'entrée de la turbine et du taux de récupération de la chaleur dans le condenseur. Des améliorations peuvent être apportées à l'efficacité en utilisant des cycles de Rankine à plusieurs niveaux de pression et en utilisant des fluides de travail alternatifs, tels que le CO2 supercritique.

En résumé, le cycle de Rankine est un processus clé utilisé dans la production d'électricité à partir de sources de chaleur. Il utilise de l'eau comme fluide de travail, utilise une turbine à vapeur pour convertir l'énergie thermique en énergie mécanique, et est un cycle en boucle fermée. L'efficacité du cycle dépend de plusieurs facteurs, notamment la température de la source de chaleur et la pression de vapeur à l'entrée de la turbine.

Le cycle de Rankine est un cycle thermodynamique utilisé pour produire de l'électricité à partir de la vapeur d'eau. Il est largement utilisé dans les centrales électriques à combustibles fossiles et nucléaires, ainsi que dans les centrales à énergie solaire concentrée. Voici quelques-uns des avantages et des inconvénients du cycle de Rankine :

- **Avantages :**

1. Efficacité élevée : Le cycle de Rankine est un cycle thermodynamique bien établi qui peut atteindre des niveaux d'efficacité allant jusqu'à 45% dans les centrales électriques modernes, ce qui signifie qu'une grande partie de l'énergie thermique peut être convertie en énergie électrique

utile.

2. Flexibilité : Le cycle de Rankine peut être utilisé avec une variété de sources d'énergie, y compris les combustibles fossiles, la biomasse et l'énergie solaire concentrée.

3. Fiabilité : Le cycle de Rankine est une technologie éprouvée qui a été utilisée avec succès pendant des décennies dans les centrales électriques à travers le monde.

4. Contrôle de la température de sortie : Le cycle de Rankine permet un meilleur contrôle de la température de sortie de la centrale électrique, ce qui peut être important pour la qualité de l'eau dans les rivières et les autres sources d'eau.

- **Inconvénients :**

1. Coût élevé : Les centrales électriques qui utilisent le cycle de Rankine peuvent être coûteuses à construire et à entretenir, en particulier les centrales électriques à énergie solaire concentrée.

2. Emissions de gaz à effet de serre : Les centrales électriques à combustibles fossiles qui utilisent le cycle de Rankine émettent des gaz à effet de serre, ce qui contribue au changement climatique.

3. Consommation d'eau : Le cycle de Rankine nécessite beaucoup d'eau pour produire de la vapeur, ce qui peut avoir un impact sur les ressources en eau dans les régions où l'eau est rare.

4. Production de déchets : Les centrales électriques à combustibles fossiles qui utilisent le cycle de Rankine produisent des déchets tels que les cendres volantes, qui peuvent avoir des effets négatifs sur l'environnement.

En résumé, bien que le cycle de Rankine offre des avantages tels qu'une efficacité élevée et une flexibilité, il présente également des inconvénients tels que des coûts élevés, des émissions de gaz à effet de serre et une consommation d'eau importante. Il est important de peser les avantages et les inconvénients de cette technologie pour déterminer son appropriabilité dans un contexte donné.

I.3.2.2. Micro-turbine

Les micro et mini-turbines sont des « versions miniatures » des turbines à gaz utilisées dans les installations de plus grande puissance (plusieurs centaines de kW à plusieurs centaines de MW) mais présentent tout de même des différences technologiques. Le cycle ouvert repose sur la combustion de l'air et d'un combustible dont l'énergie est ensuite récupérée sous forme mécanique lors de la détente dans une turbine entraînant un alternateur. La chaleur résiduelle peut être récupérée pour chauffer l'air comburant (régénérateur) et/ou pour céder de l'énergie à un fluide caloporteur (cogénération).

Les petites turbines dédiées à la mini-cogénération ont été les premières à apparaître sur le marché (Herden & Khalifa, 2012) (Pilavachi, 2002). Elles présentent généralement un rendement électrique moins important que leurs pendants industriels dédiés à la production d'électricité en raison de différences de conception (nombre d'étages réduit à un et au type de turbine). Cependant,l'utilisation d'un cycle avec récupérateur permet de quasiment « doubler » la production électrique par rapport à un cycle simple. Il reste technologiquement difficile d'atteindre d'excellents rendements thermiques et globaux en raison des forts excès d'air de combustion, interdisant la condensation de la vapeur d'eau des fumées.

Il est en effet nécessaire de maintenir la températur dans la chambre de combustion à des niveaux contraints par la résistance des matériaux actuellement disponibles puisque la combustion y est continue, contrairement aux moteurs à explosion. Récemment, des micro-turbines de très faible puissance (< 10 kWel) sont apparues (Boudellal, 2013), dont les applications peuvent être envisagées pour de petits bâtiments résidentiels ou tertiaires.

- **Avantages** :

1. Taille compacte : Les micro-turbines sont relativement petites et légères par rapport aux turbines conventionnelles, ce qui facilite leur installation dans des espaces restreints.

2. Haute efficacité : Les micro-turbines peuvent atteindre des rendements élevés grâce à leur conception avancée et à l'utilisation de matériaux légers et durables.

3. Flexibilité de combustible : Les micro-turbines peuvent fonctionner avec différents types de combustibles, tels que le gaz naturel, le biogaz, le diesel, l'huile végétale et même l'hydrogène, ce qui leur confère une grande flexibilité.

4. Fonctionnement silencieux : Les micro-turbines produisent moins de bruit que les autres sources d'énergie, ce qui les rend adaptées aux applications résidentielles et commerciales.

5. Faibles émissions : Comparées à d'autres technologies de production d'électricité, les micro-turbines ont des émissions de polluants relativement faibles, notamment en termes de CO2, d'oxydes d'azote (NOx) et de particules fines.

- **Inconvénients :**

1. Coût initial élevé : Les micro-turbines sont généralement plus chères à l'achat et à l'installation que d'autres systèmes de production d'énergie, ce qui peut limiter leur adoption dans certains cas.

2. Besoin de maintenance : Comme toute autre machine, les micro-turbines nécessitent un entretien régulier pour maintenir leur efficacité et leur durée de vie. Cela peut entraîner des coûts supplémentaires et des temps d'arrêt.

3. Puissance limitée : En raison de leur petite taille, les micro-turbines ont une capacité de production d'énergie relativement limitée par rapport aux systèmes plus grands, ce qui peut être un inconvénient dans certaines applications nécessitant une puissance élevée.

4. Temps de réponse lent : Les micro-turbines ont un temps de réponse plus lent par rapport à d'autres technologies, ce qui signifie qu'elles peuvent mettre plus de temps à atteindre leur pleine capacité de production d'énergie lorsqu'elles sont sollicitées.

5. Efficacité à charge partielle : Les micro-turbines peuvent être moins efficaces lorsqu'elles fonctionnent à des charges partielles plutôt qu'à pleine capacité, ce qui peut affecter leur rendement global dans certaines conditions d'utilisation.

- ## LES Caractéristiques Micro-turbine :

Une micro-turbine est une petite turbine à gaz utilisée pour produire de l'énergie mécanique ou électrique à petite échelle. Voici les caractéristiques principales des micro-turbines :

1. Taille compacte : Les micro-turbines sont conçues pour être de petites tailles, généralement de quelques kilowatts à quelques centaines de kilowatts de puissance. Leur conception compacte les rend adaptées à une utilisation dans des espaces restreints.

2. Technologie à cycle ouvert : Les micro-turbines utilisent généralement un cycle ouvert, où l'air ambiant est aspiré et comprimé avant d'être mélangé avec du carburant et brûlé dans une chambre de combustion. L'expansion des gaz brûlés à travers la turbine génère de l'énergie mécanique.

3. Combustibles polyvalents : Les micro-turbines peuvent fonctionner avec différents types de carburants, notamment le gaz naturel, le diesel, le biogaz, le gaz de synthèse et même l'hydrogène. Cette polyvalence permet une adaptation aux différentes sources

d'énergie disponibles.

4. Faibles émissions : Les micro-turbines sont conçues pour être écoénergétiques et produire de faibles émissions de polluants. Les technologies modernes de combustion et de post-traitement des gaz d'échappement permettent de réduire les émissions de dioxyde de carbone (CO2), d'oxydes d'azote (NOx) et de particules fines.

Ces caractéristiques font des micro-turbines des solutions attrayantes pour une utilisation dans des situations où une petite taille, une grande flexibilité de combustible et une maintenance réduite sont essentielles.

I.3.2.3. Moteur à combustion interne :

Les moteurs à combustion interne représentent le groupe technologique le plus répandu dans le domaine de la micro-cogénération (Onovwiona & Ugursal, 2004). La gamme de puissance est très large allant de quelques kW à plusieurs dizaines de MW. Le ratio énergie mécanique/énergie thermique de cette technologie est relativement élevé et permet donc d'obtenir un bon rendement électrique (20-45 % PCS). La récupération de chaleur se fait sous différentes formes à l'aide de plusieurs échangeurs placés sur le circuit de refroidissement du moteur, sur les fumées d'échappement et aussi parfois sur le circuit de lubrification. Sur certains modèles, en raison d'une combustion quasi-stœchiométrique contrôlée, il est possible d'obtenir la condensation de la vapeur d'eau des produits de combustion et de dépasser 90 % de rendement PCS total. Le rendement global ainsi obtenu est l'un des meilleurs parmi les technologies de micro-cogénération.
La filière est très développée dans la gamme de puissance intermédiaire (car elle correspond aux applications routières) et son industrialisation a permis de diminuer les coûts d'investissement pour les moteurs de plusieurs dizaines de kW. On note cependant un coût de maintenance plus élevé que pour les autres technologies avec des révisions assez fréquentes (environ 5000 h de fonctionnement) qui peuvent légèrement diminuer le taux de disponibilité.

- **LES Caractéristiques moteur à combustion interne :**

Un moteur à combustion interne est un type de moteur qui utilise la combustion d'un carburant à l'intérieur d'une chambre de combustion pour générer de l'énergie mécanique. Voici quelques-unes des caractéristiques courantes des moteurs à combustion interne :

1. Cylindrée : La cylindrée représente le volume total de tous les cylindres d'un moteur à combustion interne. Elle est généralement exprimée en litres (L) ou en centimètres cubes (cc). Une plus grande cylindrée peut indiquer une plus grande puissance du moteur.
2. Type de carburant : Les moteurs à combustion interne peuvent utiliser différents types de carburant, tels que l'essence, le diesel, le gaz naturel, le GPL (gaz de pétrole liquéfié) ou le bioéthanol. Le type de carburant utilisé affecte les performances et l'efficacité du moteur.
3. Système d'allumage : La plupart des moteurs à combustion interne utilisent un système d'allumage pour enflammer le mélange air-carburant dans la chambre de combustion. Les moteurs à essence utilisent généralement une bougie d'allumage, tandis que les moteurs diesel utilisent la compression de l'air pour allumer le carburant.
4. Cycle de fonctionnement : Les moteurs à combustion interne peuvent fonctionner selon différents cycles, tels que le cycle à quatre temps (admission, compression, combustion, échappement) ou le cycle à deux temps (combustion à chaque course du piston). Chaque cycle a ses avantages et ses inconvénients en termes de puissance, d'efficacité et d'émissions.
Il convient de noter que les caractéristiques spécifiques d'un moteur à combustion inter

- **Avantages :**

1. Puissance élevée : Les moteurs à combustion interne peuvent générer une puissance considérable, ce qui les rend adaptés à une large gamme d'applications, des petites voitures aux gros véhicules commerciaux.
2. Réponse rapide : Ces moteurs peuvent fournir une réponse rapide lors de l'accélération, ce qui les rend appropriés pour les véhicules nécessitant une accélération rapide, comme les voitures de sport.
3. Autonomie : Les moteurs à combustion interne offrent une autonomie élevée grâce à l'utilisation de carburants à haute densité énergétique tels que l'essence et le diesel.
4. Infrastructures existantes : Étant donné que les moteurs à combustion interne sont largement utilisés, il existe déjà des infrastructures bien établies pour la distribution de carburant, ce qui facilite leur utilisation et leur ravitaillement.
5. Coût de fabrication relativement faible : Comparés aux moteurs électriques, les moteurs à combustion interne ont généralement un coût de fabrication moins élevé, ce qui peut rendre les véhicules équipés de ce type de moteur plus abordables.

- **Inconvénients :**

1. Émissions de gaz à effet de serre : Les moteurs à combustion interne produisent des émissions de gaz à effet de serre, notamment du dioxyde de carbone (CO2), qui contribuent au réchauffement climatique et aux problèmes environnementaux.
2. Pollution de l'air : Ces moteurs émettent également d'autres polluants atmosphériques, tels que les oxydes d'azote (NOx) et les particules fines, qui ont un impact néfaste sur la qualité de l'air et la santé humaine.
3. Bruit : Les moteurs à combustion interne sont généralement plus bruyants que les moteurs électriques, ce qui peut être perçu comme une nuisance dans certains cas.
4. Moindre efficacité énergétique : Comparés aux moteurs électriques, les moteurs à combustion interne ont généralement une efficacité énergétique inférieure, ce qui signifie qu'ils convertissent une plus petite quantité de carburant en travail utile.
5. Dépendance aux combustibles fossiles : Les moteurs à combustion interne nécessitent des combustibles fossiles tels que l'essence, le diesel ou le gaz naturel, ce qui crée une dépendance continue à ces ressources non renouvelables.

I.3.2.4. Les piles à combustible :

Le principe du fonctionnement de la pile à combustible date du début du 19-ème siècle et a été découvert par Christian Schönbein. Peu après, le premier prototype a été élaboré par William Grove. A cause du fait que cette technologie nécessite des matériaux couteux et sophistiqués, le développement des piles à combustible a été mis en pause jusqu'à la moitié du 20-ème siècle.

Une pile à combustible est un dispositif dans lequel la fabrication de l'électricité se fait grâce à l'oxydation sur une électrode d'un combustible réducteur, par exemple le dihydrogène, couplée à la réduction sur l'autre électrode d'un oxydant, tel que le dioxygène de l'air. La réaction d'oxydation de l'hydrogène est accélérée par un catalyseur qui est souvent fait en platine. Ce principe est l'inverse de l'électrolyse. Les produits de la réaction chimique, effectuée dans la pile à combustible sont l'électricité, la chaleur et l'eau (fig.1.2). 25

Depuis les années 1970, certaines piles à combustible, utilisées sur les satellites, contiennent des membranes en polymères avec des petites quantités de platine, à cause du prix très élevé de ce dernier.

En 2009, des chercheurs américains et allemands ont proposé d'intégrer un catalyseur supplémentaire, moins coûteux et qui pourrait diminuer encore la quantité de platine des piles à combustibles. Il s'agit de nanosphères construites avec des atomes de platine et de cuivre, dont les particules de cuivre sont par la suite en partie extraites, laissant une sorte de nanocoquille de platine de quelques atomes d'épaisseur [Kuo 09]

Ce procédé pourrait être appliqué à d'autres métaux pour produire d'autres types de catalyseurs pouvant par exemple permettre une production d'hydrogène et d'oxygène à partir de l'eau. De cette manière, un stockage chimique de l'énergie électrique pourrait être réalisé. L'utilisation des piles à combustible aujourd'hui, à cause du prix relativement élevé reste encore principalement dans les laboratoires de recherche et des applications spatiales. Pour ce dernier, le rendement global reste encore relativement faible, en raison des pertes dans chaque étape : synthèse de l'hydrogène, stockage, vaporisation, rendement des réactions électrochimiques de la pile, régulation thermique.

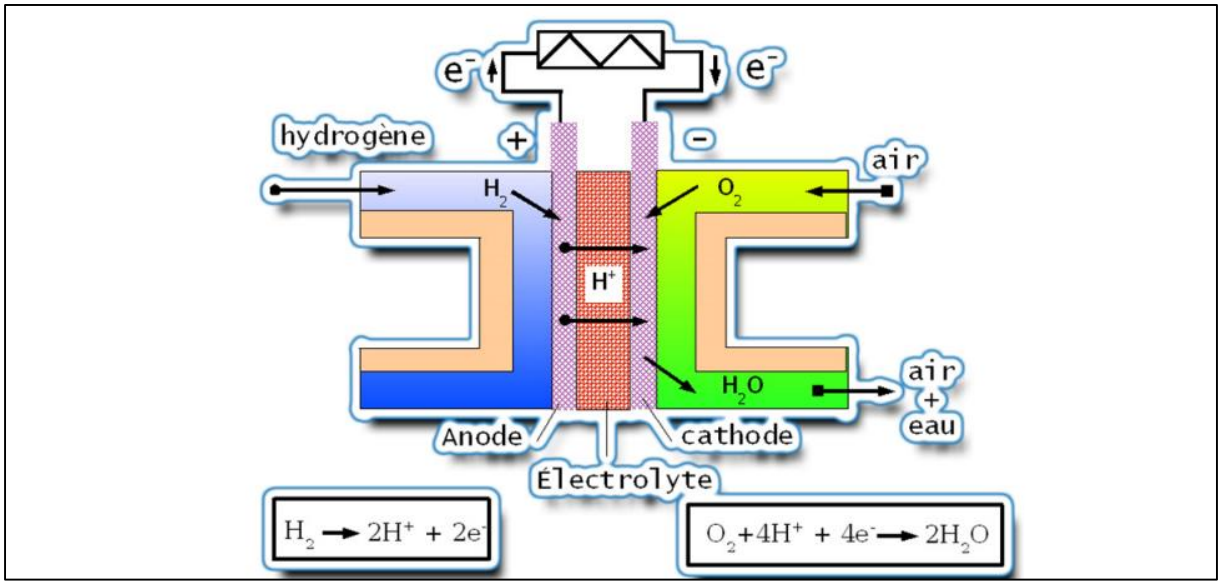


Figure I. 5 : Illustration du principe de fonctionnement d'une pile à combustible

Les piles à combustible sont des dispositifs qui produisent de l'énergie électrique en utilisant une réaction chimique entre un carburant et un oxydant. Voici quelques avantages et inconvénients des piles à combustible :

- **LES Caractéristiques les piles à combustible**

Les piles à combustible sont des dispositifs électrochimiques qui convertissent l'énergie chimique directement en énergie électrique. Elles présentent plusieurs caractéristiques distinctives, notamment :

1. Rendement élevé : Les piles à combustible offrent un rendement supérieur à celui des moteurs à combustion traditionnels, atteignant généralement des valeurs supérieures à 50%. Cela est dû à leur conversion directe d'énergie chimique en énergie électrique, évitant les pertes thermiques associées aux moteurs à combustion interne.

2. Émissions réduites : Les piles à combustible produisent de l'électricité en utilisant une réaction chimique entre un combustible (comme l'hydrogène) et un oxydant (comme l'oxygène de l'air). Leur principal sous-produit est de l'eau, ce qui en fait une source d'énergie propre, sans émission de polluants atmosphériques nocifs.

3. Flexibilité du combustible : Les piles à combustible peuvent fonctionner avec différents types de combustibles, tels que l'hydrogène, le méthanol, l'éthanol et même les hydrocarbures plus lourds comme le gaz naturel. Cela leur confère une certaine flexibilité en termes d'approvisionnement en carburant.

4. Faibles émissions sonores : Comparées aux moteurs à combustion interne, les piles à combustible sont beaucoup plus silencieuses car elles ne nécessitent pas de processus de combustion bruyant. Cela les rend idéales pour les applications où le bruit est un facteur critique, comme les véhicules électriques.

5. Durée de vie : Les piles à combustible ont une durée de vie relativement longue, ce qui en fait des dispositifs durables pour la production d'énergie. Leur durée de vie dépend de divers facteurs, tels que le type de pile à combustible, les conditions de fonctionnement et l'entretien approprié.

6. Temps de démarrage rapide : Contrairement aux batteries, les piles à combustible peuvent démarrer rapidement et fournir de l'électricité de manière continue. Elles sont donc souvent utilisées dans des applications où une alimentation électrique immédiate et constante est requise, comme les véhicules électriques.

Il est important de noter que les caractéristiques spécifiques des piles à combustible peuvent varier en fonction du type de pile (par exemple, PEMFC, SOFC, AFC, etc.) et de l'application particulière pour laquelle elles sont utilisées. Chaque type de pile à combustible présente des

avantages et des limites spécifiques, ce qui les rend plus adaptées à certains domaines d'application que d'autres.

- **Avantages :**

1. Efficacité énergétique : Les piles à combustible ont un rendement énergétique élevé, car elles convertissent directement l'énergie chimique en énergie électrique, sans passer par des étapes intermédiaires.

2. Faibles émissions : Les piles à combustible ne produisent pas de polluants atmosphériques tels que les oxydes d'azote ou les particules fines. Les seules émissions sont de l'eau et des gaz de combustion non nocifs tels que le dioxyde de carbone.

3. Faible bruit : Les piles à combustible sont très silencieuses car elles n'ont pas de pièces mobiles.

4. Polyvalence : Les piles à combustible peuvent être alimentées par divers carburants tels que l'hydrogène, le méthanol et l'éthanol, ce qui leur donne une grande polyvalence.

- **Inconvénients :**

1. Coût élevé : Les piles à combustible sont généralement plus chères que les autres sources d'énergie électrique en raison de la complexité de leur conception et de leur production.

2. Stockage de l'hydrogène : L'hydrogène est un carburant couramment utilisé dans les piles à combustible, mais sa production et son stockage peuvent être coûteux et compliqués.

3. Durée de vie limitée : Les piles à combustible ont une durée de vie limitée, souvent de quelques années, ce qui peut entraîner des coûts élevés de remplacement.

4. Sensibilité aux températures : Les piles à combustible peuvent être sensibles aux températures élevées ou basses, ce qui peut affecter leur efficacité.

En résumé, les piles à combustible présentent de nombreux avantages potentiels, tels que leur efficacité énergétique élevée et leur faible impact environnemental, mais leur coût élevé et leur sensibilité aux conditions de température peuvent constituer des obstacles à leur adoption généralisée.

I.3.2.5. Moteur Stirling

Le moteur Stirling est un moteur à combustion externe reposant sur le cycle fermé du

même nom. La source chaude du cycle permet de comprimer un gaz de travail (typiquement un gaz rare) et de mettre en mouvement un ou des pistons. Il existe plusieurs formes de moteurs Stirling (Andlauer, 2011) avec un ou deux pistons et régénérateur de chaleur entre les deux sources.

Le rendement électrique assez faible de cette technologie varie selon le type de cycle (entre 10 et 20%) mais, en revanche, la faible vitesse du/des pistons produit moins de bruit et de vibrations que le moteur à combustion interne ce qui diminue la maintenance. La possibilité de récupérer l'énergie de condensation des fumées dans ce type de moteur grâce à une combustion analogue à celle des chaudières permet d'augmenter le rendement thermique et de proposer un rendement global parmi les meilleurs. Cette technologie présente un coût d'investissement encore important, probablement dû à l'état de maturité de la filière. Les produits destinés à la micro-cogénération ont connu un développement fort dans le milieu des années 2000. Plusieurs unités fonctionnant au gaz naturel de l'ordre du kW_{el} ont été commercialisées par plusieurs constructeurs (Viessmann VitoTwin 300, De Dietrich Remeha Hybris Power, Baxi Ecogen, WhisperGen, …) suite à la mise au point de deux moteurs : MicroGen et WhisperGen.

- ## LES Caractéristiques Moteur Stirling :

Le moteur Stirling est un type de moteur thermique qui fonctionne sur le principe de la conversion de la chaleur en travail mécanique. Voici les principales caractéristiques du moteur Stirling :

1. Cycle de fonctionnement : Le moteur Stirling utilise un cycle thermodynamique fermé, appelé cycle de Stirling. Ce cycle se compose de quatre phases : la compression isotherme, la chauffe isochore, l'expansion isotherme et le refroidissement isochore.

2. Source de chaleur externe : Contrairement aux moteurs à combustion interne, le moteur Stirling utilise une source de chaleur externe pour chauffer le fluide de travail. Cette source peut être une flamme, une résistance électrique ou toute autre forme de chaleur externe.

3. Fluide de travail : Le moteur Stirling utilise un fluide de travail, généralement un gaz, qui subit des variations de pression et de température tout au long du cycle. Les gaz couramment utilisés sont l'air, l'hélium ou l'hydrogène.

4. Rendement élevé : Le moteur Stirling est réputé pour son rendement élevé par rapport à d'autres moteurs thermiques. Il peut atteindre des rendements théoriques proches de

celui du cycle de Carnot, qui est considéré comme le rendement maximal théorique pour un moteur thermique.

5. Faibles émissions : Le moteur Stirling produit des émissions relativement faibles en raison de sa combustion externe et de son cycle de fonctionnement en circuit fermé. Cela le rend attrayant pour les applications où la réduction des émissions est importante, telles que les véhicules à faibles émissions.

6. Fonctionnement silencieux : Le moteur Stirling fonctionne de manière silencieuse par rapport aux moteurs à combustion interne, car il ne nécessite pas d'explosions ou de combustion interne.

7. Souplesse de carburant : Le moteur Stirling peut fonctionner avec différentes sources de chaleur, ce qui lui confère une grande souplesse de carburant. Il peut utiliser des combustibles fossiles, des énergies renouvelables telles que le solaire, la biomasse ou même la chaleur résiduelle.

8. Fiabilité : Le moteur Stirling est connu pour sa fiabilité et sa durabilité. Il possède moins de pièces mobiles par rapport aux moteurs à combustion interne, ce qui réduit les risques de défaillance mécanique.

Ces caractéristiques font du moteur Stirling une option intéressante dans diverses applications, telles que la production d'électricité, le chauffage domestique, les systèmes de cogénération et les propulsions alternatives pour les véhicules.

- **Avantages :**

- Efficacité énergétique élevée : Le moteur Stirling est connu pour son efficacité énergétique élevée, qui peut atteindre jusqu'à 50 % dans certaines applications. Cela en fait une option attrayante pour les applications où l'efficacité énergétique est importante.

- Fonctionnement silencieux : Le moteur Stirling fonctionne sans bruit de combustion, ce qui en fait une option attractive pour les applications où le bruit est un problème.

- Fiabilité et durabilité : Le moteur Stirling a peu de pièces mobiles, ce qui réduit le risque de pannes et augmente sa durée de vie.

- Utilisation de sources de chaleur renouvelables : Le moteur Stirling peut fonctionner avec différentes sources de chaleur, y compris les sources de chaleur renouvelables telles que le solaire, ce qui en fait une option intéressante pour les

applications d'énergie renouvelable.

- **Inconvénients :**

- Coût élevé : Le moteur Stirling peut être plus coûteux que les moteurs à combustion interne en raison de sa conception complexe et de son faible volume de production.

- Puissance spécifique relativement faible : Le moteur Stirling a une puissance spécifique relativement faible par rapport aux moteurs à combustion interne, ce qui signifie qu'il est moins adapté pour les applications qui nécessitent une puissance élevée dans un espace restreint.

- Temps de réponse lent : Le moteur Stirling a un temps de réponse lent, ce qui signifie qu'il peut prendre plus de temps pour atteindre la puissance nominale. Cela le rend moins adapté pour les applications qui nécessitent une réponse rapide.

- Perte de chaleur : Comme le moteur Stirling utilise une source de chaleur externe, il y a un risque de perte de chaleur, ce qui peut réduire l'efficacité énergétique.

En résumé, le moteur Stirling est une option intéressante pour les applications où la fiabilité, l'efficacité énergétique et le fonctionnement silencieux sont importants, mais il peut être moins adapté pour les applications qui nécessitent une puissance élevée et un temps de réponse rapide.

I.4. Structure du moteur Stirling :

Un moteur Stirling comporte principalement des parties suivantes :

- Un échangeur chaud et un échangeur froid : Dans l'échangeur chaud (source chaude), le gaz de travail, en contact avec la chaleur dégagée de la combustion, se réchauffe. Dans l'échangeur froid (source froide), le gaz de travail, en contact avec le liquide caloporteur, cède son énergie thermique pour se refroidir.
- Chambre d'expansion (ou chambre chaude ou encore chambre de détente): dans laquelle, le gaz de travail est à la température T_C. Dans la phase de détente, le gaz engendre un travail mécanique, le volume de cette

chambre augmente d'où le nomd' « expansion ».
Chambre de compression (ou chambre froide) : dans laquelle, le gaz de travail est à la température Tf (<<Tc). Dans la phase de compression, le volume de cette chambre diminue pour comprimer le gaz de travail.

– Liaison mécanique :

Nous illustrons la constitution d'un moteur Stirling dans la figure suivante. Le moteur considéréest un moteur de type α. Les types de moteurs Stirling sont définis selon la façon d'aménager les différents éléments principaux. Mais chaque élément lui-même reste fondamentalement similaire dans les différents types des moteurs Stirling (α, β, γ…).

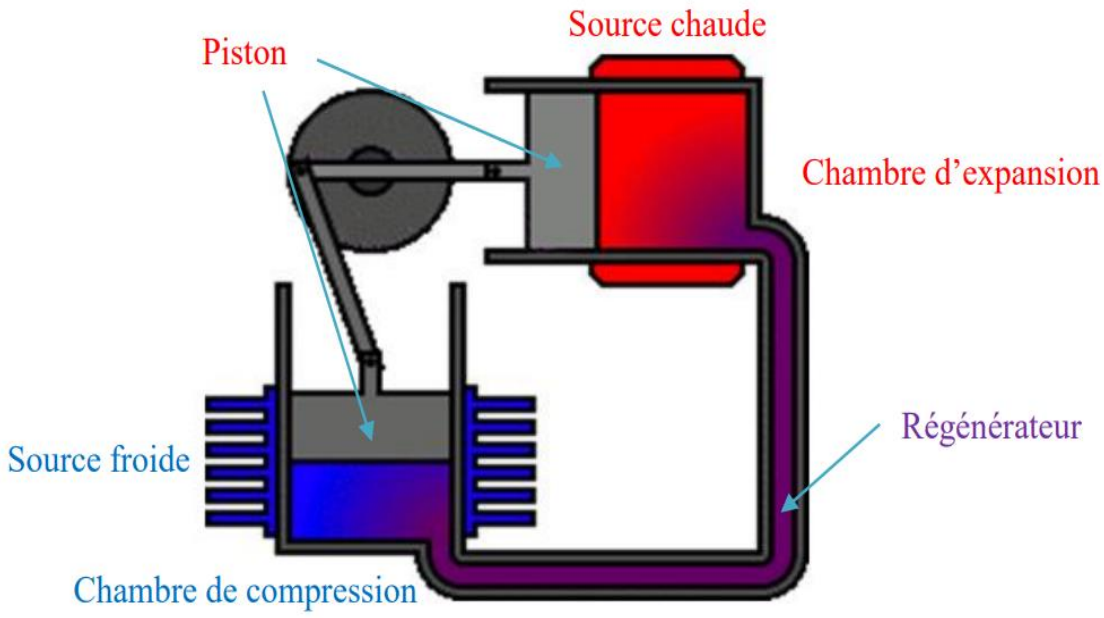


Figure I. 6 : Illustration de la structure du moteur Stirling (moteur Stirling type α).

– Régénérateur : C'est par là que le gaz s'écoule d'une chambre à l'autre en phase de réchauffement ou de refroidissement. Son rôle est d'accumuler la chaleur de la phase derefroidissement pour la restituer dans la phase de réchauffement. Il doit être fabriqué par le matériau qui supporte bien la différence de température. Il peut être constitué parune matrice de fils de cuivre ou de rubans d'acier inoxydable finement divisés. Son importance est d'économiser les échanges de chaleur et ainsi de réduire les pertes du moteur Stirling.

L'aménagement mécanique peut être différent en fonction de type de moteur. Cela peut être deux pistons (comme le cas du moteur type α, Figure 1.16) ou bien un piston et un déplaceur (comme le cas des moteurs de types β, Figure 1.17).

– Piston de compression (ou tout simplement piston) : C'est lui qui impose

la variation totale du volume du gaz.

– Déplaceur : C'est aussi un piston, mais dont le rôle est de séparer les deux parties chaudeet froide et de répartir le gaz entre ces deux parties.

Nota : Ces pistons doivent être isolés thermiquement. Lors du fonctionnement du moteur Stirling, il n'y a pas de contact (choc) mécanique direct entre ces deux pistons. Le mouvementdes parties mobiles est dû uniquement à la pression du gaz.

– Système d'entraînement mécanique : les bielles, vilebrequins sont utilisés pour une transmission du travail mécanique rotatif pour entraîner ensuite un alternateur par exemple. La technologie actuelle a permis de transmettre directement le mouvement rectiligne oscillatoire du piston par un couplage direct entre le piston avec un alternateurlinéaire commandé. C'est le cas de notre système d'étude.

c - Principe de fonctionnement du moteur Stirling :

Le cycle Stirling comprend 4 phases, illustrées sur un moteur β dans la figure suivante :

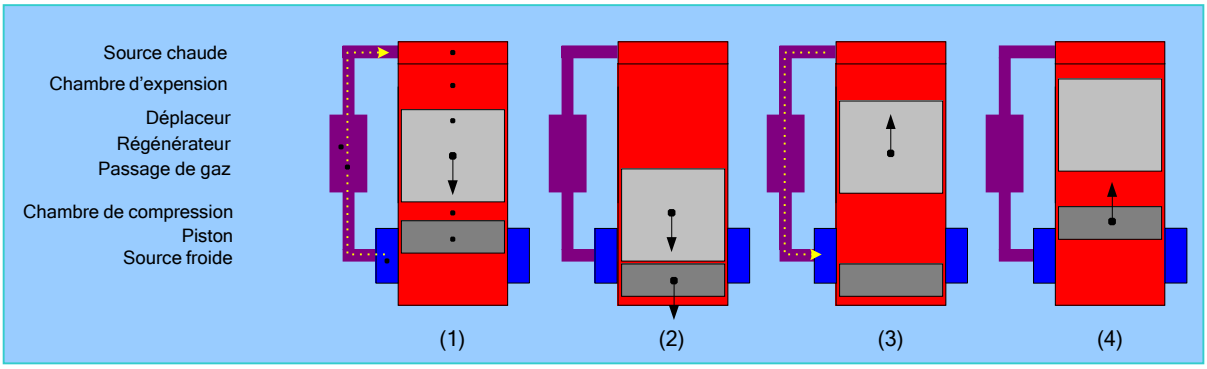


Figure I. 7 : Cycle de Stirling (type β).

– Chauffage isochore (1) : La source chaude cède de l'énergie et la température et la pression du gaz augmentent. Sous l'effet du déplaceur, le gaz passe de la partie froide àla partie chaude du cylindre. Il se préréchauffe en traversant le régénérateur. Pendant cette phase, le volume ne change pas.
– Détente isotherme (2) : Quand la pression du gaz devient suffisamment grande, elle pousse les pistons. C'est pendant cette phase que l'énergie mécanique est produite. Le volume du gaz augmente et la température du gaz reste constante.
– Refroidissement isochore (3) : Le gaz cède de l'énergie thermique à la source froide. Latempérature et la pression du gaz diminuent. Aussi sous l'effet du déplaceur, le gaz passe de la partie chaude à la partie froide. Il se prérefroidit en traversant le régénérateur.Le volume reste constant.
– Compression isotherme (4) : Quand la pression du gaz diminue suffisamment, l'énergiemécanique stockée, sous forme l'inertie du système

d'entraînement mécanique, poussele piston vers le haut. Le piston remonte en comprimant le gaz.

Sur le plan PV, le cycle Stirling est présenté par :

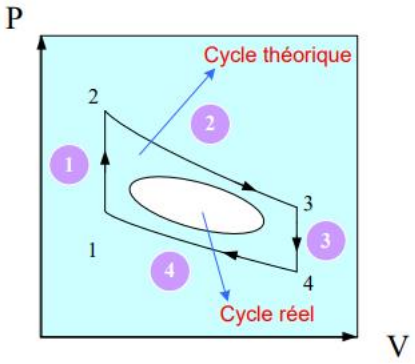


Figure I. 8 : Cycle de Stirling : cycle théorique, cycle réel

.

Les mouvements théoriques idéaux des pistons pour décrire un cycle sont discontinus, constitués d'une succession de droites brisées, ce qui est difficilement réalisable par unentraînement mécanique classique. Les mouvements des deux pistons réellement utilisés sont deux mouvements sinusoïdaux idéalement déphasés de 90°, ce qui engendre la déformation ducycle [**16**].

Ainsi, le cycle Stirling réellement réalisable a souvent un rendement bien plus faible que le rendement théorique. Notons qu'avec le système d'entraînement mécanique moderne comme par exemple un alternateur linéaire, non seulement le mouvement sinusoïdal du piston qui est possible, mais d'autres profils de ce mouvement pourront aussi être envisagés.

Enfin, le cycle est réversible ce qui signifie que si un travail mécanique est fourni, il peut fonctionner comme une pompe à chaleur et fournir de la chaleur ou du froid (trigénération).

d - Schéma d'un système de micro-cogénération motorisé par un moteur Stirling :

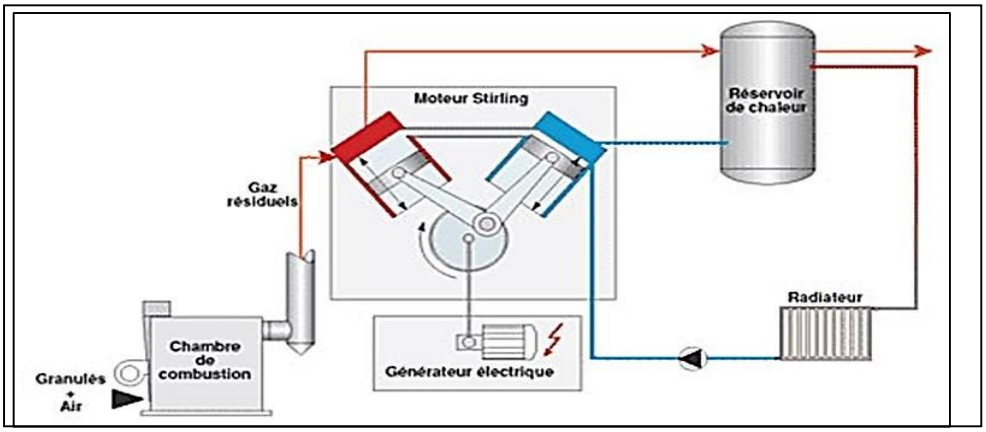


Figure I. 9 : Schéma de principe d'un micro-cogénérateur utilisant un moteur Stirling α

C'est dans la chambre de combustion que le combustible est consumé : biomasse, gaz,… La chaleur primaire passe par l'échangeur chaud pour « alimenter » et faire fonctionner le moteurthermique. Le circuit de récupération de chaleur passe au niveau de l'échangeur froid. La chaleur du gaz chaud résiduel sortant de l'échangeur chaud est aussi récupérée.

La figure suivante montre la structure d'un système de micro-cogénération à moteur Stirling βà piston libre. « Libre » parce qu'il n'y a pas de lien mécanique direct entre les pistons. Le mouvement rectiligne du piston est directement récupéré par un alternateur linéaire dont le mover (équivalent du « rotor » des machines tournantes) est rigidement lié au piston.

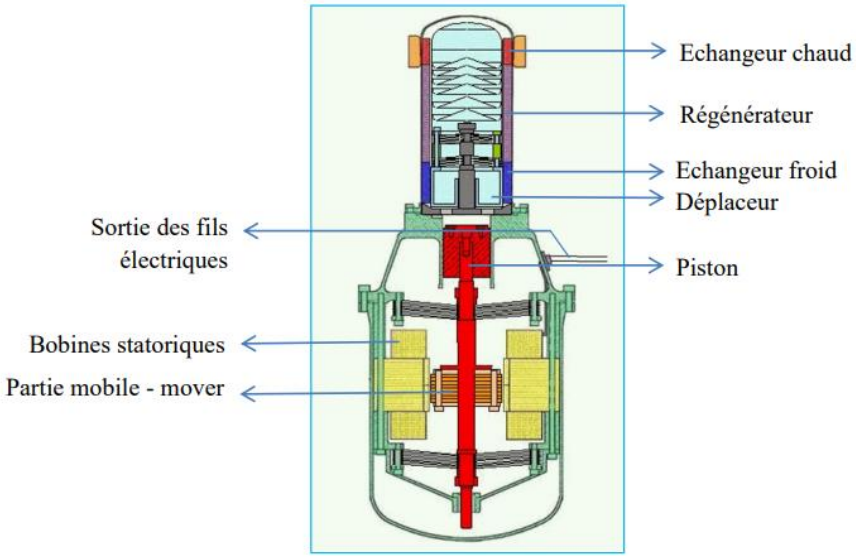


Figure I. 10 : Structure d'un micro-cogénérateur motorisé par un moteur Stirling β couplé à un alternateur linéaire**.**

I.5. CONCLITION :

En conclusion, l'état de l'art sur les systèmes de micro-cogénération domestique démontre l'émergence de technologies prometteuses qui offrent des avantages significatifs en termes d'efficacité énergétique et de réduction des émissions de gaz à effet de serre. Les systèmes de micro-cogénération permettent de produire à la fois de la chaleur et de l'électricité à petite échelle, ce qui les rend particulièrement adaptés aux besoins des foyers et des petits bâtiments.

Les différentes technologies de micro-cogénération, telles que les piles à combustible à hydrogène, les moteurs à combustion interne et les moteurs Stirling, ont fait l'objet de recherches et de développements intensifs. Elles offrent des rendements élevés et une utilisation optimale de l'énergie, ce qui permet de réduire la dépendance aux sources d'énergie traditionnelles et d'atteindre une plus grande autonomie énergétique.

De plus, les systèmes de micro-cogénération domestique peuvent être couplés à des sources d'énergie renouvelable, comme les panneaux solaires photovoltaïques ou les éoliennes, pour maximiser leur efficacité et réduire davantage les émissions de carbone. Cela permet aux utilisateurs de produire leur propre électricité et de réduire leur empreinte écologique.

Cependant, malgré les nombreux avantages de la micro-cogénération domestique, il reste encore des défis à surmonter. Les coûts initiaux élevés, la nécessité d'un entretien régulier et l'intégration dans les réseaux électriques existants sont autant de facteurs qui peuvent freiner l'adoption à grande échelle de ces technologies. De plus, les réglementations et les politiques énergétiques doivent être adaptées pour encourager l'installation et l'utilisation de systèmes de micro-cogénération domestique.

Les systèmes de micro-cogénération domestique représentent une avancée importante dans le domaine de l'efficacité énergétique et de la réduction des émissions. Avec des améliorations continues et des incitations appropriées, ils ont le potentiel de devenir une composante essentielle de la transition énergétique, offrant aux utilisateurs des avantages économiques, environnementaux et énergétiques considéra .

Chapitre 2

Modélisation, commande de la chaîne thermomécanique

II.1. Introduction :

La modélisation, la simulation et la commande de la chaîne thermomécanique, plus spécifiquement du moteur Stirling. La chaîne thermomécanique fait référence à l'ensemble des composants et des processus impliqués dans la conversion de l'énergie thermique en énergie mécanique. Dans le cas du moteur Stirling, cette conversion est réalisée grâce à un cycle thermodynamique qui exploite les variations de température pour générer un mouvement mécanique.

Le moteur Stirling est un moteur à combustion externe qui fonctionne sur le principe d'un gaz ou d'un fluide de travail emprisonné dans une enceinte hermétique. Ce fluide est alternativement chauffé et refroidi, ce qui provoque son expansion et sa compression, entraînant ainsi le mouvement d'un piston ou d'un piston-disque. Ce mouvement mécanique peut ensuite être utilisé pour générer de l'électricité, propulser des véhicules ou alimenter d'autres machines.

La modélisation et la simulation de la chaîne thermomécanique du moteur Stirling sont des outils essentiels pour comprendre et optimiser son fonctionnement. En utilisant des équations thermodynamiques, des équations de conservation de la masse et de l'énergie, ainsi que des modèles de transfert de chaleur, il est possible de créer un modèle mathématique qui décrit avec précision le comportement du moteur Stirling.

La simulation de ce modèle permet d'explorer différentes conditions de fonctionnement, de tester l'efficacité du moteur dans des scénarios variés et d'identifier les paramètres clés qui influencent ses performances. Cela permet de concevoir des moteurs plus efficaces, d'optimiser la consommation d'énergie et de réduire les émissions polluantes.

Enfin, la commande de la chaîne thermomécanique vise à réguler le fonctionnement du moteur Stirling afin d'obtenir des performances optimales. Des algorithmes de commande avancés peuvent être développés pour ajuster les paramètres du moteur en temps réel, en fonction des variations de la charge, des conditions environnementales et des objectifs spécifiques. Cela permet d'optimiser l'efficacité énergétique, la puissance de sortie et la stabilité du moteur Stirling.

II.2. Structure et principe du fonctionnement du moteur Stirling :

II.2.1 structure de fonctionnement du moteur Stirling :

La structure du moteur Stirling avec un déplaceur est légèrement différente de celle avec un piston. Dans ce cas, le déplaceur joue un rôle central dans le déplacement du fluide de travail entre les zones chaudes et froides du moteur. Voici comment fonctionne la structure du moteur Stirling avec un déplaceur :

1. Déplaceur : Le déplaceur est un élément mobile du moteur Stirling. Il est généralement constitué d'un matériau poreux, tel que la mousse métallique ou un matériau de transfert de chaleur approprié. Le déplaceur se déplace à l'intérieur du cylindre et agit comme une barrière entre la zone chaude et la zone froide.

2. Cylindre : Le cylindre est le logement dans lequel le déplaceur se déplace. Il est généralement fabriqué en acier ou en aluminium et est doté de parois isolantes pour minimiser les pertes de chaleur. Le cylindre comprend une zone chaude et une zone froide.

3. Source de chaleur : Comme dans le moteur Stirling avec piston, une source de chaleur externe est utilisée pour fournir de l'énergie thermique au moteur. La chaleur est généralement fournie par une combustion externe, telle que la combustion de carburant ou de biomasse. La source de chaleur chauffe la zone chaude du cylindre.

4. Zone chaude : La zone chaude est la partie du cylindre qui est chauffée par la source de chaleur. Lorsque la chaleur est appliquée, le fluide de travail (généralement de l'air) se dilate et pousse le déplaceur vers la zone froide.

5. Zone froide : La zone froide est une partie du cylindre qui est refroidie pour créer une différence de température avec la zone chaude. Lorsque le déplaceur atteint la zone froide, le fluide de travail se contracte et tire le déplaceur vers la zone chaude, complétant ainsi le cycle thermodynamique.

Le mouvement alternatif du déplaceur entre les zones chaude et froide permet le transfert efficace de l'énergie thermique et mécanique dans le moteur Stirling. Le déplaceur déplace le fluide de travail de manière à maximiser les variations de pression et de volume, permettant ainsi la conversion d'énergie thermique en énergie mécanique.

Il est à noter que la structure du moteur Stirling peut varier en fonction de sa conception spécifique et de son application. Différents types de déplaceur peuvent être utilisés, tels que des

déplaceur à balancier, des déplaceur à disques ou des déplaceur à piston. Chacun de ces déplaceur a ses propres avantages et caractéristiques de fonctionnement.

À la position initiale, le piston est symétrique par rapport à l'axe central. Le piston forme un tube étanche et creux, ce qui permet de loger à l'intérieur des dispositifs électriques. Le moteur ne possède que trois pièces mobiles que sont : le piston et les deux déplaceur. La structure du système peut être verticale ou horizontale, mais l'effet de la gravité des parties

Mobiles sera largement négligeable devant les forces ou les pressions thermodynamiques. Les notations présentées dans la Figure 2.1 sont expliquées dans le Tableau 2.1.

Tableau II. 1 Paramètres du moteur Stirling

a) Géométrie

Notations	**Désignation**	**Unités**
Y_{pc},	Hauteur des espaces de compression à l'état initial	M
Y_{dc},	Hauteur des espaces de détente à l'état initial	M
A_p	Section externe du piston	m^2
A_d	Section externe des déplaceur	m^2
A_r	Section du « ressort gazeux » M	m^2
V_{ini_b}	Volume initial des espaces B	m^3
V_{ini_m}	Volume initial des espaces M	m^3
V_{EF}	Volume des échangeurs froids	m^3
V_{EC}	Volume des échangeurs chauds	m^3
V_r	Volume des régénérateurs	m^3
m_p	Masse du piston	Kg
m_d	Masse des déplaceur	Kg

b) Variables mécaniques

Notations	Désignation	Unités
$Y_p(t)$	Position instantanée du piston	M
$Y_d(t)$	Position instantanée des déplaceur	M

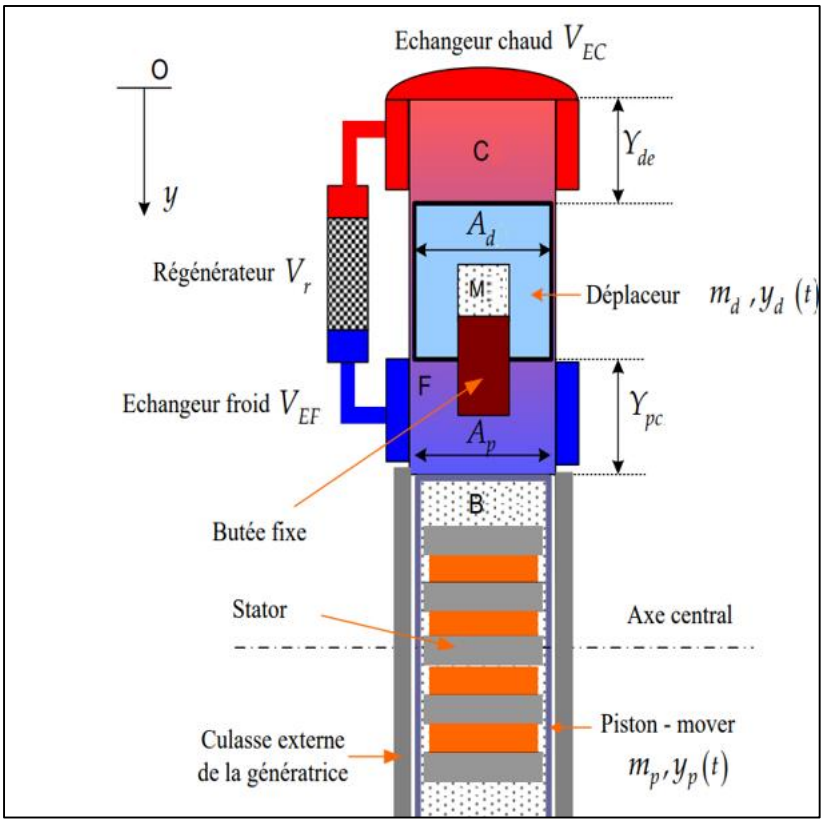


Figure II. 1 : Structure du moteur Stirling

Présentées dans la Figure II.2 cylindre moteur entraîne un volant d'inertie qui peut être couplé soit à un ensemble moteur générateur, soit à un L'extrémité du cylindre de détente est chauffée par une lampe à alcool, alors que le torsiomètre (mesure du

couple mécanique). De plus, un ensemble de capteurs permet de mesurer le volume, la pression, les températures froide (au dixième de °C) et chaude et la vitesse de rotation

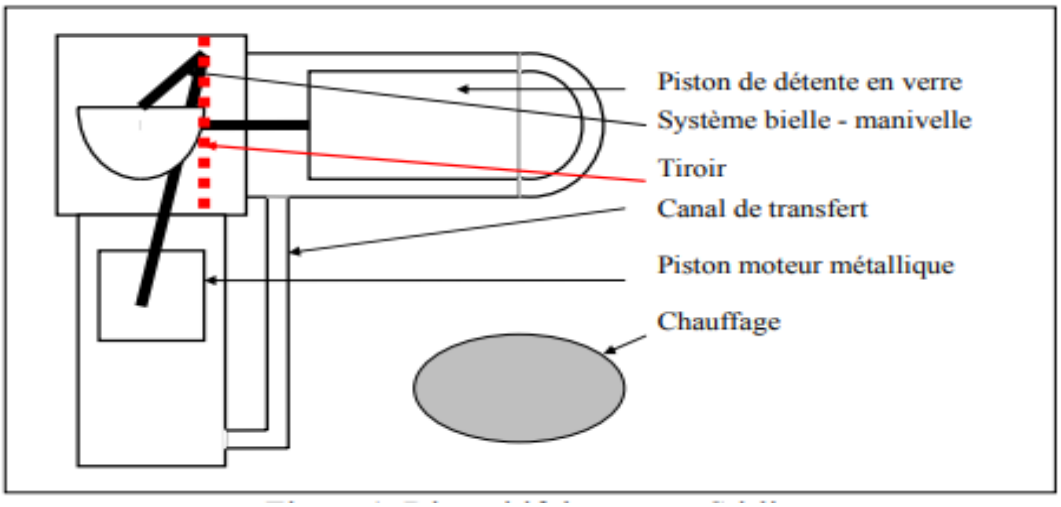


Figure II. 2 :: Dispositif du moteur Stirling

II.2.2. Principe de fonctionnement du moteur Stirling :

Le moteur Stirling avec piston et déplaceur fonctionne selon le principe du cycle Stirling, un cycle thermodynamique idéalisé qui permet de convertir l'énergie thermique en énergie mécanique. Voici le principe de fonctionnement de ce moteur :

(a) Compression : Le cycle commence lorsque le piston est au point mort bas et le déplaceur au point mort haut. Le fluide de travail (généralement de l'air) est initialement à basse pression et basse température. Le piston commence à se déplacer vers le haut, ce qui comprime le fluide de travail dans la zone froide du cylindre. Pendant cette phase de compression, le déplaceur reste immobile.

(b) Échauffement isochore : Une fois que le piston a atteint le point mort haut, la soupape de communication entre la zone froide et la zone chaude s'ouvre, permettant au fluide de travail comprimé de passer dans la zone chaude. Dans la zone chaude, le fluide de travail est exposé à une source de chaleur externe, ce qui entraîne une augmentation de sa température à pression constante. Pendant cette phase, le déplaceur reste immobile.

(c) Expansion : Lorsque le fluide de travail chauffé atteint sa température maximale, le piston commence à se déplacer vers le bas, ce qui permet l'expansion du fluide de travail dans la zone chaude. L'expansion du fluide de travail entraîne une augmentation de la pression et pousse le piston vers le bas, produisant ainsi de l'énergie mécanique. Le déplaceur reste

également en mouvement et se déplace vers le haut, assurant le déplacement du fluide de travail entre les zones chaude et froide.

(d) Refroidissement isochore : Une fois que le piston a atteint le point mort bas, la soupape de communication entre la zone chaude et la zone froide se ferme, isolant ainsi le fluide de travail dans la zone chaude. Le fluide de travail se refroidit alors à pression constante dans la zone chaude. Pendant cette phase, le déplaceur reste immobile.

(e) Détente : À mesure que le fluide de travail refroidit, sa pression diminue et le piston continue de se déplacer vers le bas. La détente du fluide de travail dans la zone chaude permet de tirer le piston vers le bas, produisant ainsi de l'énergie mécanique supplémentaire. Le déplaceur se déplace également vers le bas, facilitant le transfert du fluide de travail vers la zone froide.

Le cycle de moteur Stirling est un cycle thermodynamique utilisé dans les moteurs Stirling. Ce type de moteur fonctionne en convertissant la chaleur en travail mécanique en utilisant un fluide de travail, généralement de l'air ou un autre gaz, qui subit des cycles de compression et d'expansion.

Le cycle de moteur Stirling comprend généralement quatre étapes principales :

a. Compression isotherme : Dans cette étape, le fluide de travail est comprimé à basse température tout en maintenant une température constante. Cela se fait généralement en utilisant un piston qui se déplace dans un cylindre.
b. Chauffage isochore : Le fluide de travail comprimé est ensuite chauffé à haute température tout en maintenant le volume constant. Cela se fait généralement en utilisant une source de chaleur externe, comme une flamme ou un échangeur de chaleur.
c. Expansion isotherme : Dans cette étape, le fluide de travail chauffé est détendu à basse température tout en maintenant une température constante. Cela produit un travail mécanique qui peut être utilisé pour alimenter une charge, telle qu'un générateur électrique.
d. Refroidissement isochore : Le fluide de travail refroidi est ensuite ramené à sa température initiale à volume constant. Cela peut se faire en utilisant un échangeur de chaleur pour rejeter la chaleur résiduelle.

Le cycle de moteur Stirling est un cycle réversible, ce qui signifie qu'il peut fonctionner dans les deux sens, en utilisant le travail mécanique pour générer de la chaleur (mode réfrigération) ou en utilisant la chaleur pour générer du travail mécanique (mode moteur). Il est connu pour

sa grande efficacité thermique et sa capacité à fonctionner avec différentes sources de chaleur, ce qui en fait une technologie attrayante pour diverses applications, notamment la production d'énergie électrique, le chauffage et la climatisation.

Il est important de rappeler qu'il n'existe aucun contact mécanique direct entre les trois parties mobiles : piston, déplaceur. Ceux-ci sont en mouvement oscillatoire à cause des pressions du gaz de travail qui varient dans différentes chambres du moteur (C1, F, M, B). Les grandeurs physiques du moteur sont précisées dans le Tableau 2.2.

Tableau II. 2 Variables thermodynamiques du moteur Stirling

Notations	**Désignation**	**Unités**
T_f	Température des chambres froides$F$,	K
T_c	Température des chambres chaudes$C$	K
T_r	Température dans les régénérateurs	K
P_{ini}	Pression moyenne initiale du gaz juste avant l'oscillation	Pa
$P_f(t)$	Pression instantanée du gaz dans les chambres froidesFWX	Pa
$\boldsymbol{P_c(t)}$	Pression instantanée du gaz dans les chambres chaudes$C$	Pa
$\boldsymbol{P_b(t)}$	Pression instantanée du gaz dans les espaces « ressort gazeux » à l'intérieur du piston B	Pa
$\boldsymbol{P_m(t)}$	Pression instantanée du gaz dans les espaces « ressort gazeux » à l'intérieur des déplaceurs$M$	Pa
$\boldsymbol{V_f(t)}$	Volume instantané des chambres froides$F$	m^3
$\boldsymbol{V_c(t)}$	Volume instantané des chambres chaudes$C$	m^3
$\boldsymbol{V_b(t)}$	Volume instantané de l'espace ressort gazeux à l'intérieur du piston$B$	m^3
$\boldsymbol{V_m(t)}$	Volume instantané de l'espace ressort gazeux à l'intérieur des déplaceur$M$	m^3

Tous les composants du système sont immergés dans l'environnement liquide du gaz de travail, qui est contenu dans un cylindre. Le gaz de travail peut être de l'hélium (He), de l'azote (N2),

de l'hydrogène (H2), ou autre. Nous avons choisi d'utiliser l'hélium comme gaz de travail pour ce moteur Stirling en raison de ses nombreux avantages significatifs : une excellente conductivité thermique, une absence d'odeur, une non-toxicité, et son inertie (un gaz rare qui ne contribue pas à l'effet de serre). Les caractéristiques thermodynamiques de l'hélium sont répertoriées dans le Tableau 2.3.

Tableau II. 3 Caractéristique du gaz de travail (Hélium).

Notations	**Désignation**	Valeurs
C_g	Chaleur massique de l'Hélium	$5183\text{J}.Kg^{-1}K^{-1}$
r	Capacité thermique de l'Hélium	$2080J.k^{-1}$
y	Rapport des capacités calorifiques à pression et volume constants : $Y = \frac{C_p}{C_v}$ C_p : Capacité thermique molaire de l'hélium à pression C_v: Capacité thermique molaire de l'hélium à volume constant.	1,667

Un élément crucial pour le fonctionnement et l'efficacité du moteur Stirling est le régénérateur (cf. Figure II.1). Le régénérateur a déjà été introduit dès la première conception du moteur Stirling par son inventeur Robert Stirling en 1816. Le fonctionnement du moteur Stirling présente l'écoulement alterné du gaz entre l'échangeur chaud et l'échangeur froid. Le rôle du régénérateur est déjà brièvement introduit dans §1.2.4. Nous allons le préciser dans cette partie. Certains comparent le régénérateur à une « éponge thermique », c'est-à-dire :

- Lorsque le moteur Stirling est en phase de refroidissement, le gaz chaud à la température T_c est transféré de la chambre chaude à la chambre froide, et pendant ce processus, le régénérateur récupère une partie de son énergie thermique. Par conséquent, le gaz qui sort du régénérateur et entre dans la chambre froide est théoriquement à la température T_f.

- En revanche, lorsque le moteur Stirling est en phase de réchauffement, le gaz froid à la température T_f est transféré de la chambre froide à la chambre chaude, et le régénérateur restitue

l'énergie thermique précédemment récupérée pour chauffer le gaz. Ainsi, le gaz qui sort du régénérateur et entre dans la chambre chaude est théoriquement à la température T_c.

Le régénérateur est généralement constitué d'un milieu métallique poreux (ex. Figure 2.3). Lors que le gaz est en contact avec les surfaces solides du régénérateur, il se passe l'effet de peau thermique, c'est-à-dire la convection thermique. L'efficacité d'un générateur est ainsi caractérisée par son coefficient d'échange convectif. Dans la pratique, elle n'est comprise qu'entre 0,55 – 0,85. Si les mailles ne sont pas assez denses, l'effet de peau thermique ne sera pas suffisamment efficace. Au contraire, si elles sont trop denses, les pertes de charge peuvent s'accroître en pénalisant le rendement du moteur Stirling. L'étude du dimensionnement du régénérateur en régime du gaz alterné est un des axes de recherche importants de notre projet, mené par le laboratoire FEMTO-ST.

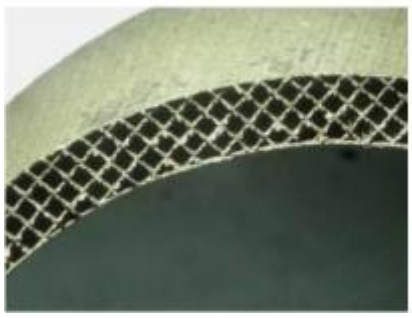


Figure II. 3 : Exemple d'une constitution d'un régénérateur (réf. le laboratoire FEMTO-ST).

Les échangeurs chauds sont constitués des tubes métalliques où circule l'air chaud issu de la combustion. L'énergie de l'air chaud est transmise au gaz par la convection thermique à travers la paroi des tubes. Les échangeurs froids sont également faits des tubes métalliques où l'eau froide circule en se chargeant de la chaleur dégagée du gaz de travail. Il existe également le phénomène de pertes de charge au niveau des échangeurs lors que le gaz traverse ceux-ci. Ces dispositifs devront posséder un très haut rendement pour un bon fonctionnement du moteur Stirling. La figure suivante montre un exemple de la structure étudiée pour les échangeurs de notre système :

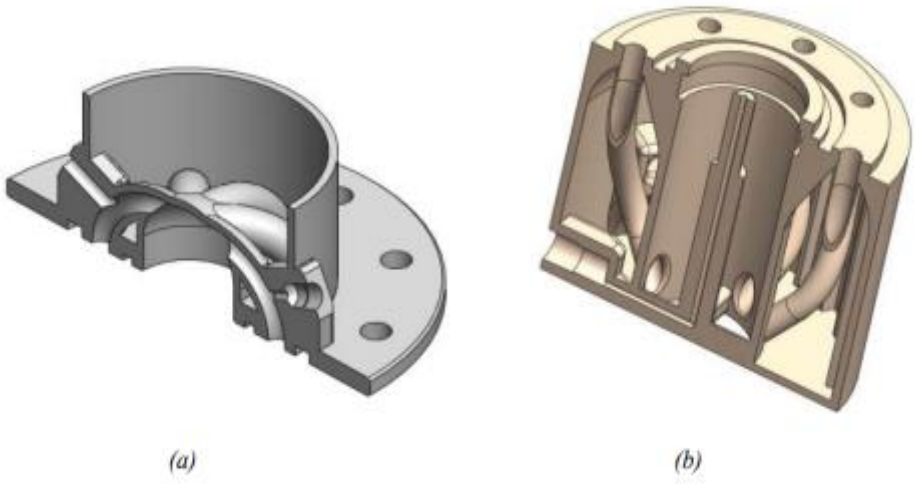


Figure II. 4 : Structure des échangeurs chauds (a) et des échangeurs froids (b) du prototype du moteur Stirling « simple effet », laboratoire FEMTO-ST.

II.3 Étude de modélisation et de dimensionnement du moteur stirling :

L'objectif est de comprendre les principes de fonctionnement de ce moteur novateur et d'analyser les conditions requises pour garantir son bon fonctionnement. Le modèle joue un rôle essentiel dans la conception du moteur Stirling et du système dans son ensemble. Il est un outil indispensable pour déterminer les dimensions appropriées du moteur Stirling et du système global.

II.3.1Modèle mécanique du moteur Stirling :

Le modèle mécanique du moteur Stirling est utilisé pour décrire et analyser le comportement mécanique du système. Il vise à représenter les interactions entre les différentes composantes du moteur, telles que le piston, le vilebrequin, le volant d'inertie, les bielles, etc.

Le modèle mécanique prend en compte les forces, les mouvements et les contraintes qui se produisent pendant le cycle de fonctionnement du moteur. Il utilise des équations et des principes de la mécanique, tels que les lois de Newton, la conservation de l'énergie et les équations cinématiques, pour décrire les mouvements des différentes parties du moteur.

Le modèle mécanique permet d'analyser des paramètres importants tels que la puissance développée par le moteur, l'efficacité, les vibrations, les contraintes mécaniques, etc. Il est utilisé

pour optimiser la conception du moteur, améliorer ses performances et assurer sa fiabilité.

En utilisant le modèle mécanique, il est possible de prédire le comportement du moteur Stirling dans différentes conditions de fonctionnement et d'explorer différentes configurations et paramètres pour trouver la combinaison optimale. Cela contribue à une meilleure compréhension du moteur Stirling et à son développement continu.

Le moteur Stirling comprend trois éléments mobiles qui effectuent des mouvements oscillatoires autour de leur position initiale respective. Par conséquent, le moteur peut être modélisé comme un système de vibrations mécaniques à trois degrés de liberté (ddl). La cinématique du système peut être représentée par un schéma comprenant des masses, des ressorts et des amortisseurs, comme illustré dans [18].

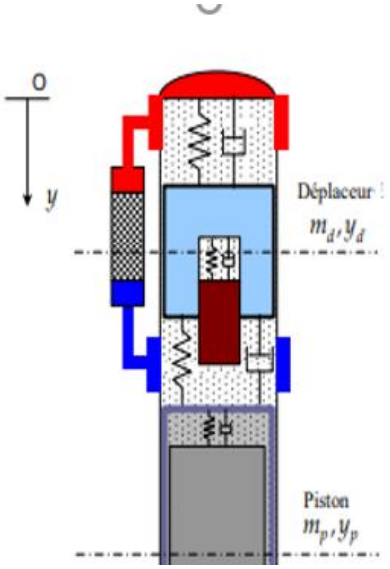


Figure II. 5 : Schéma cinématique du moteur Stirling avec des ressorts et amortisseurs équivalents [18].

Selon la loi de Newton, les équations dynamiques du piston et un déplaceur s'écrivent :

$$m_p \dot{y}_p = A_p P_{f1} - A_{pi} P_{b1} + -C_{Hp} \dot{y}_p - C_{palt} \cdot \dot{y}_p \quad (2.1)$$

$$m_{d1} \dot{y}_{d1} = A_p P_{c1} - (A_p - A_r) P_{f1} - A_r P_{m1} - C_{Hd} \dot{y}_{d1} \quad (2.2)$$

Dans lesquelles, les paramètres géométriques sont classés dans le Tableau 2.1 et les notations des variables thermiques et mécaniques (pressions du gaz dans différents espaces du moteur, des mouvements des pistons) sont indiquées dans le Tableau 2.2.

Le coefficients C_{palt} représente l'interaction de l'alternateur sur le piston par un modèle de

type freinage visqueux de manière à pouvoir maximiser l'énergie mécanique récupérée [19].

Ainsi, la force électromagnétique est résistante vis-à-vis à des forces thermodynamiques motrices et l'alternateur fonctionne comme un amortisseur mécano-électrique :

$$F_{\text{gene}}(t) = -C_{palt} \cdot \frac{dy_p(t)}{dt} \qquad (2.3)$$

Dans cette formule :

$F_{\text{gene}}(t)$[N] est la force électromagnétique développée par le générateur électrique. C_{palt} [Nm-1] , est le coefficient de frottement visqueux relatif à la récupération de l'énergie mécanique du piston.

Les autres coefficients de frottement visqueux (C_{Hp}, C_{Hd}) sont relatifs aux pertes d'énergie par cycle d'hystérésis du gaz dans les ressorts gazeux.

II.3.2. Modèle thermodynamique du moteur Stirling :

Le moteur Stirling est un moteur thermique à combustion externe qui fonctionne selon un cycle thermodynamique spécifique, connu sous le nom de cycle Stirling. Voici une description simplifiée du modèle thermodynamique du moteur Stirling :

1. Compression isotherme : Le cycle commence par la compression d'un gaz (généralement de l'air) à une température constante. Le gaz est comprimé à l'aide d'un piston dans une chambre froide, ce qui entraîne une augmentation de sa pression.

2. Chauffage isochore : Une fois que le gaz est comprimé, il est transféré vers une autre chambre, appelée chambre chaude, où il est chauffé à température constante. Le chauffage peut être réalisé en utilisant une source de chaleur externe telle que la combustion d'un carburant. Pendant cette étape, la pression du gaz augmente encore davantage.

3. Expansion isotherme : Après le chauffage, le gaz chaud est transféré vers une autre chambre froide, appelée chambre froide, où il se dilate à une température constante. La dilatation du gaz pousse le piston et effectue un travail mécanique.

4. Refroidissement isochore : Une fois que le gaz s'est dilaté, il est renvoyé vers la chambre chaude pour être refroidi à température constante. Cette étape permet de préparer le gaz pour le prochain cycle de compression.

Le cycle Stirling suit une séquence de compression, chauffage, expansion et refroidissement, et il peut être répété en continu pour produire un mouvement rotatif qui peut être utilisé pour entraîner des machines ou des générateurs électriques.

Le modèle thermodynamique du moteur Stirling est basé sur les principes de la conservation de l'énergie et des équations des gaz parfaits. Il prend en compte les variations de température, de pression et de volume du gaz à chaque étape du cycle pour déterminer l'efficacité du moteur et les performances globales. Différentes configurations et variations du moteur Stirling existent, chacune avec ses propres caractéristiques et considérations thermodynamiques spécifiques.

Cette partie présente de la modélisation des pressions instantanées du gaz dans les espaces du moteur Stirling. Le modèle mécanique est étroitement couplé au modèle thermodynamique ce qui engendre la difficulté dans l'étude de comportement du moteur à piston libre. L'approche utilisée est la méthode de Schmidt qui est, en thermodynamique, une méthode d'ordre 1, très utilisée. Les conditions pour pouvoir utiliser cette méthode sont les suivantes [17] :

- Le modèle thermodynamique du moteur Stirling implique un fonctionnement cyclique répété des étapes mentionnées ci-dessus. Ce cycle permet la conversion continue de la chaleur en travail mécanique, ce qui en fait un moteur efficace et potentiellement utilisable dans diverses applications. - Les variations de volume sont sinusoïdales dans le temps. Dans notre approche initiale, nous considérons que toutes les variables thermodynamiques et mécaniques du moteur Stirling sont des fonctions sinusoïdales dans le temps. Par exemple, les déplacements des pistons sont modélisés par :

$$y_p = y_{p\max} \cdot \cos(2\pi f_{\text{osc}}\, t)[\text{m}] \qquad (2.4)$$

$$y_d = y_{d\max} \cdot \cos(2\pi f_{\text{osc}}\, t + \varphi_1)[\text{m}] \qquad (2.5)$$

$y_{p\max}$, $y_{d\max}$ Sont respectivement les amplitudes de la course du piston et déplaceur

f_{osc} Est la fréquence d'oscillation mécanique, commune aux piston et déplaceur

φ, sont les déphasages entre le mouvement des déplaceurs par rapport au piston.

Si les fonctions de positions des pistons et déplaceur sont sinusoïdales dans le temps, la variation des volumes dans le moteur sera aussi temporellement sinusoïdale.

- Tous les volumes sont isothermes en étape de détente et de compression. En effet, les températures dans les chambres d'expansion et de compression sont considérées constantes. Cette condition exige une bonne isolation thermique entre les parties chaudes et froides.

-Le gaz présente une situation idéale : il n'y a aucune perte de pression ni de fuite de gaz lors des phases de détente et de compression. Par conséquent, il est nécessaire que les pistons soient à la fois bien étanches et mobiles.

- Le régénérateur est représenté comme un volume dont la température est équivalente à sa température moyenne, bien qu'il puisse exister un gradient de température le long de celui-ci. La température moyenne du régénérateur est déterminée par :

$$T_f = \frac{T_f - T_f}{\ln\left(\frac{T_c}{T_f}\right)} [\mathrm{K}] \qquad (2.6)$$

Si toutes les conditions sont remplies, on peut exprimer la pression instantanée du gaz de travail à l'intérieur du moteur comme suit :

$$P = \frac{mr}{\frac{V_{\text{purtic_chude}}}{T_c} + \frac{V_r}{T_r} + \frac{V_{\text{partic_fridte}}}{T_f}} [\ \mathrm{Pa}] \qquad (2.7)$$

La masse totale du gaz dans le moteur est représentée par M [kg], tandis que r désigne la capacité thermique du gaz selon le Tableau 2.3.

En utilisant la méthode de Schmidt pour le moteur Stirling N°1 (représenté en haut dans les Figures 2.1& et 2.5), l'expression de la pression instantanée du gaz dans le moteur 1, notée P_1 peut être reformulée de la manière suivante :

$$P = \frac{m_1 r}{\frac{V_a}{T_c} + \frac{V_{EC1}}{T_c} + \frac{V_{r1}}{T_r} + \frac{V_{EF1}}{T_f} + \frac{V_{f1}}{T_f}} [\ \mathrm{Pa}] \qquad (2.8)$$

Le paragraphe peut être paraphrasé comme suit : "Dans ce moteur, la masse du gaz est représentée par$m$ en kilogrammes. Les volumes des chambres chaude et froide, notés V_f et V_c respectivement, changent en fonction du mouvement du piston et du déplaceur Par conséquent, ces volumes sont exprimés par :

$$V_f = A_p \cdot Y_p + A_p \cdot y_p - (A_d - A_r) \cdot y_d [\ \mathrm{m}^3] \qquad (2.9)$$

$$V_c = A_d \cdot Y_{de} + A_{pd} \cdot y_d [\ \mathrm{m}^3] \qquad (2.10)$$

L'équation (2.8) devient alors :

$$P = \frac{m_1 r}{\left[\frac{A_p \cdot Y_{p1}}{T_f} + \frac{V_{EF1}}{T_f} + \frac{V_{r1}\ln\left(T_c/T_f\right)}{T_c - T_f} + \frac{V_{EC1}}{T_c} + \frac{A_{d1} \cdot Y_{de1}}{T_c}\right] + \left[\left[\frac{A_p \cdot y_p}{T_f} - \frac{(A_{d1} - A_{r1}) \cdot y_{d1}}{T_f} + \frac{A_{d1} \cdot y_{d1}}{T_c}\right]\right]} \qquad (2.11)$$

Pour simplifier l'écriture, nous introduisons la constante , qui représente la somme des termes constants :

$$S = \frac{A_p \cdot Y_{p1}}{T_f} + \frac{V_{EF1}}{T_f} + \frac{V_{r1}\ln(T_c/T_f)}{T_c - T_f} + \frac{V_{EC1}}{T_c} + \frac{A_{d1} \cdot Y_{de1}}{T_c} \quad (2.12)$$

$$P = \frac{m_1 r}{S_1} \cdot \frac{1}{\left[1 + \frac{A_p}{T_f \cdot S_1} \cdot y_p - \frac{(A_{d1} - A_{r1})}{T_f \cdot S_1} \cdot y_{d1} + \frac{A_{d1}}{T_c S_1} \cdot y_{d1}\right]} \text{ [Pa]} \quad (2.13)$$

Au commencement, juste avant le début des oscillations, la température dans la chambre C est de $T_c$et celle de la chambre F est de T_f. La méthode Schmidt permet d'exprimer la pression du gaz à ce moment-là :

$$P_{\text{ini}} = \frac{\text{m}r}{\text{S}} \text{[Pa]} \quad (2.14)$$

Par conséquent, la pression instantanée du gaz dans la chambre froide s'écrit :

$$P_f = P = P_{\text{ini}} \cdot \frac{1}{\left[1 + \frac{A_p}{T_f S_1} \cdot y_p - \frac{(A_{d1} - A_{r1})}{T_f S_1} \cdot y_{d1} + \frac{A_{d1}}{T_c S_1} \cdot y_{d1}\right]} \quad (2.15)$$

Dans l'hypothèse de petits mouvements du piston et des déplaceur, l'équation ci-dessus est linéarisée pour obtenir :

$$P_f = P_{ini} \cdot \left[1 - \frac{A_p}{T_f \text{S}} \cdot y_p + \left(\frac{A_d - A_r}{T_f \cdot \text{S}} - \frac{A_d}{T_c \cdot \text{S}}\right) \cdot y_d\right] \text{[Pa]} \quad (2.16)$$

La pression dans la chambre chaude est supérieure à celle dans la chambre froide d'une valeur correspondant aux pertes de pression lors de l'écoulement du gaz dans le régénérateur et les échangeurs thermiques **[20] [21].**

$$P_c = P_f + \Delta\text{P [Pa]} \quad (2.17)$$

Selon les références **[18] [22] [23],** les pertes de charge, qui correspondent à la réduction de pression du gaz lorsqu'il traverse le régénérateur et les échangeurs, sont estimées approximativement par l'équation expérimentale suivante :

$$\Delta\text{P} \approx \frac{C_{p1}(y_{p\max}, f_\infty)}{A_{d1}} \cdot \dot{y}_p + \frac{C_{d1}(y_{p\max}, f_{\infty\infty})}{A_{d1}} \cdot \dot{y}_{d1} + \frac{E_{p1}(f_{\infty\infty})}{A_{d1}} \cdot y_p + \frac{E_{d1}(f_{occ})}{A_{d1}} \cdot y_{d1} \text{[Pa]} \quad (2.18)$$

Les coefficients de pertes de chargeC_p, C_d, E_p, E_d, varient en fonction du point de fonctionnement spécifique du moteur Stirling "double effet". Ce phénomène a été étudié dans plusieurs articles abordant le moteur Stirling à piston libre **[21] [24] [25]**. Pour représenter les

pressions du gaz dans les espaces des ressorts gazeux M, B, nous faisons l'hypothèse que la transformation du gaz de travail est adiabatique (c'est-à-dire qu'il n'y a pas d'échange de chaleur avec l'extérieur) et réversible.

$$P_{\text{ini}} \cdot \left(V_{\text{ini_b}}\right)^{\gamma} = P_{b1} \cdot (V_{b1})^{\gamma} \text{ [Pa]} \quad (2.19)$$

$$P_{\text{ini}} \cdot (V_{\text{imi}-\text{m}})^{\gamma} = P_{m} \cdot (V_{m})^{\gamma} \text{ [Pa]} \quad (2.20)$$

Avec :

$$V_{\text{b}} = V_{\text{ini_b}} - A_{pi} \cdot y_p \text{ [m}^3\text{]} \quad (2.21)$$

$$V_{\text{m}} = V_{ini_m} - A_{\text{r}} \cdot y_d \text{[m}^3\text{]} \quad (2.22)$$

En linéarisant les expressions de P_b, P_{m} par hypothèse de petites variations de la position du piston et déplaceur, nous obtenons:

$$P_b = P_{ini}\left(\frac{1}{1-\frac{A_{pi}}{V_{\text{ini_b}}}\cdot y_p}\right)^{\gamma} \approx P_{ini}\left(1+\gamma\cdot\frac{A_{pi}}{V_{ini_b}}\cdot y_p\right) \text{[Pa]} \quad (2.23)$$

$$P_m = P_{ini}\left(\frac{1}{1-\frac{A_r}{V_{ini_m}}\cdot y_d}\right)^{\gamma} \approx P_{ini}\left(1+\gamma\cdot\frac{A_r}{V_{ini_m}}\cdot y_d\right) \text{[Pa]} \quad (2.24)$$

Nous avons donc réalisé une modélisation analytique des pressions du gaz dans différents espaces du moteur N°1. Les expressions obtenues ont ensuite été linéarisées afin de faciliter les simulations numériques.

II.3.3 Modèle thermomécanique couplé du moteur Stirling :

Une autre façon de représenter le modèle mécanique du moteur Stirling est en utilisant une matrice, comme suit :

$$\begin{bmatrix} \grave{y}_p \\ \grave{y}_d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{pp} & K_{pd} \\ K_{dp} & K_{dd} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_p \\ y_d \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} D_{pp} & D_{pd} \\ D_{dp} & D_{dd} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \grave{y}_p \\ \grave{y}_d \end{bmatrix} \quad (2.25)$$

Dans laquelle :

$[K] = \begin{bmatrix} K_{\mu p} & K_{pd} \\ K_{dp} & K_{dd} \end{bmatrix}$: Matrice des raideurs équivalentes (par unité de masse).

$[D] = \begin{bmatrix} D_p & D_{pd} \\ D_{dp} & D_{dd} \end{bmatrix}$: = Matrice des coefficients de dissipation visqueuse (par unité de masse).

Les valeurs de ces coefficients sont influencées par plusieurs facteurs, tels que la configuration géométrique du moteur Stirling, les températures des chambres chaudes et froides, la pression initiale du gaz à l'intérieur du moteur, ainsi que la fréquence et l'amplitude des oscillations du piston (point de fonctionnement). Les formules permettant de calculer ces coefficients peuvent être dérivées à partir du modèle des pressions du gaz précédemment développé. Voici un récapitulatif de ces formules dans le tableau suivant :

Tableau II. 4 Coefficients de raideur et d'amortisseurs du modèle mécanique du moteur Stirling

Coefficients de raideur [Nm-1kg-1]	**Coefficients d'amortisseur**
$K_{pp} = \frac{P_{ini}}{m_p}\left(-\frac{A_p^2}{T_f S} - \frac{2A_2^2 \gamma}{V_{ini_b}}\right)$	$D_{pp} = -\frac{1}{m_p}\left(C_{Hp} + C_{\text{wut}}\right)$
$K_{pd} = \frac{A_p P_{\text{ini}}}{m_p S_1}\left(\frac{A_{\text{d}} - A_{\text{r}}}{T_f} - \frac{A_{d1}}{T_c}\right)$	$D_{\text{pd1}} = 0$
$K_{dp} = \frac{A_p A_{\text{r}} P_{ini}}{T_f S} \cdot \frac{1}{m_d} + \frac{E_p}{m_d}$	$D_{dp} = \frac{C_p}{m_d}$
$K_{\text{dd}} = \frac{E_d}{m_d} + \frac{A_{\text{r}} P_{\text{ini}}}{S}, \frac{1}{m_{d1}}\left(\frac{A_d - A_r}{T_f} - \frac{A_d}{T_c}\right) - \frac{\gamma A_{t1}^2 P_{ini}}{V_{\text{ini-m}}} \cdot \frac{1}{m_d}$	$D_{\text{dd}} = \frac{C_{\text{d}} - C_{Hd}}{m_d}$

un modèle thermomécanique sous forme matricielle, le système reste fortement non linéaire. En effet, seuls les coefficients, K_{pp}, K_{pd}dépendent des paramètres fixes, alors que tous les autres coefficients, y compris les coefficients d'amortissement, dépendent du point de fonctionnement car ils contiennent les coefficients liés aux pertes de charges (2.18): c_p, c_d , E_p, E_d .

De plus, bien que le modèle mécanique du moteur Stirling soit représenté sous forme matricielle MCK avec des masses, des ressorts et des amortisseurs classiques, le problème ne réside pas

dans le fait que les matrices [K] et [D] ne sont pas symétriques et que les coefficients de rigidité et d'amortissement peuvent être négatifs.

II.3.4 Étude de dimensionnement du moteur Stirling. Condition de stabilité :

Étant donné que le mouvement du piston et des déplaceur est sinusoïdal dans le temps, nous utilisons la méthode des nombres complexes pour résoudre le système d'équations différentielles (2.1) (2.2) (2.3). Par conséquent, nous pouvons exprimer l'équation de la manière suivante :

$$Y_P = y_{p\max} \cdot e^{j_{-}-1}[\,\mathrm{m}] \qquad (2.26)$$

$$Y_{d1} = y_{d1\max} \cdot e^{\gamma^{(\omega-\mu^{1+q})}}[\mathrm{m}] \qquad (2.27)$$

D'où la pulsation mécanique s'écrit :

$$\omega_{\mathrm{osc}} = 2\pi f_{\mathrm{osc}}(\mathrm{rad/s}) \qquad (2.28)$$

Étant donné que le mouvement du piston et des déplaceurs est sinusoïdal dans le temps, nous utilisons la méthode des nombres complexes pour résoudre le système d'équations différentielles (2.1) (2.2) Par conséquent, nous pouvons exprimer l'équation de la manière suivante

$$:r = \frac{y_{\mathrm{dmax}}}{y_{\mathrm{pmax}}} \qquad (2.29)$$

Le système d'équations différentielles (2.25) devient :

$$K_{pp} + K_{pd} \cdot r \cdot e^{j\phi_1} + D_{pp}, j\omega_{\mathrm{osc}} + \omega_{\mathrm{osc}}^2 = 0 \qquad (2.30)$$

$$K_{dp} + K_{dd} \cdot \mathrm{r} \cdot e^{j\phi_1} + D_{dp} \cdot j\omega_{\mathrm{osc}} + D_{dd} j\omega_{osc} \cdot r \cdot e^{j\phi_1} + \omega_{osc}{}^2 . \mathrm{r} \cdot e^{j\phi_1} = 0 \qquad (2.31)$$

En séparant les parties réelles des parties imaginaires de ce système d'équations, nous obtiendrons **4** équations indépendantes. Cependant, il y a **5** variables inconnues : $y_{\mathrm{pmax}}, \omega_{osc}, \mathrm{r}, \varphi$ et C_{palt} (qui intervient dans D_{pp}).

En outre, comme indiqué dans le paragraphe précédent, plusieurs paramètres sont influencés par le point de fonctionnement, qui est déterminé par les variables y_{pmax} et ω_{osc}. Pour résoudre ce problème, une approche basée sur des itérations numériques a été utilisée, et sa procédure est expliquée dans le diagramme présenté dans la référence **[26]**.

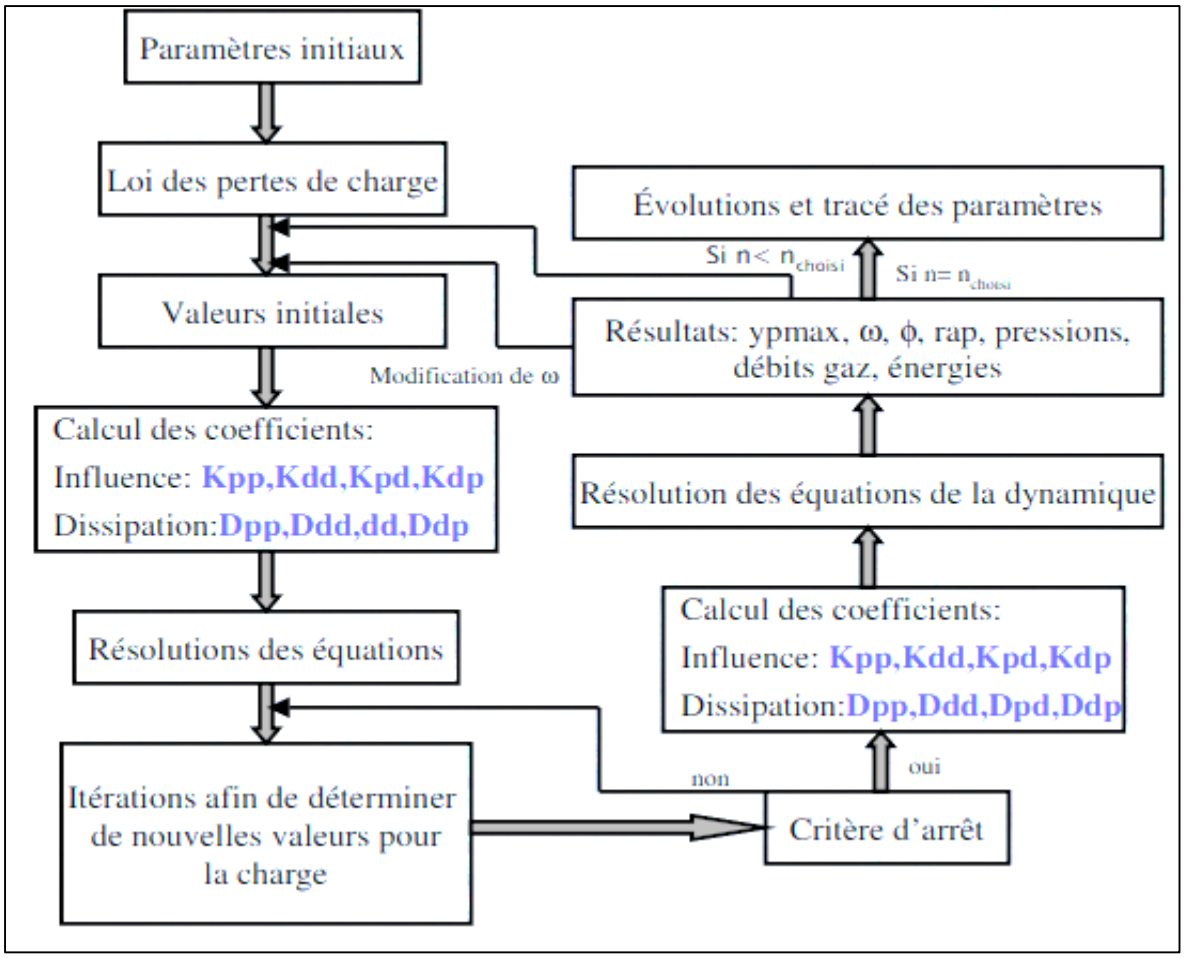


Figure II. 6: Processus de résolution du système d'équations non linéaire du moteur Stirling

La puissance mécanique du moteur Stirling doit être préalablement définie en tant que donnée fixe (par exemple 1000 W, 2000 W, etc.). Grâce aux expériences et à l'expertise de l'équipe de recherche du laboratoire FEMTO-ST, les paramètres géométriques (Tableau 2.1) ainsi que les paramètres thermodynamiques (Tableau 2.2) sont d'abord fixés. Il y a 5 variables à déterminer, mais en raison d'une contrainte sur la course maximale du piston, est également fixé. Il reste donc seulement 4 variables à déterminer : c_{palt} , ω_{osc}, φ, r .

La "loi des pertes de charge" est en fait une représentation mathématique des diminutions de pression qui se produisent dans les régénérateurs et les échangeurs. Elle est utilisée dans le processus global pour déterminer les coefficients de perte de charge (2.21) (2.33). Les détails précis de ces modèles sont expliqués dans l'article référencé **[24].** Les coefficients de raideur et d'amortissement sont ensuite calculés en utilisant les données numériques et les formules fournies dans le (Tableau 2.4). Par conséquent, à chaque itération, le système devient un système linéaire avec des coefficients constants, ce qui permet de le résoudre de manière

traditionnelle.

$$r_1 = \frac{\sqrt{(\omega_{osc}^2(K_{d1p}+D_{d1p}D_{d1d1})+K_{d1d1}K_{d1p})+\omega_{osc}^2(\omega_{osc}^2D_{d1p}+K_{d1d1}D_{d1p}-K_{d1p}D_{d1d1})^2}}{(\omega_{osc}^2+K_{d1d1})^2+(\omega_{osc}D_{d1d1})^2} \quad (2.32)$$

$$\varphi_1 = \tan^{-1}\left(\frac{\omega_{osc}(\omega_{osc}^2D_{d1p}+K_{d1d1}D_{d1p}-K_{d1p}D_{d1d1})}{\omega_{osc}^2(K_{d1p}+D_{d1p}D_{d1d1})+K_{d1d1}K_{d1p}}\right) \quad (2.33)$$

Avec la pulsation mécanique qui est le résultat de l'équation de la racine polynomiale suivante

$$Q(\omega_{\text{osc}}) = -(\omega_{\text{osc}}^2 + K_m + j\omega_{\text{osc}}D_m)(\omega_{\text{osc}}^2 + K_{dA1} + j\omega D_{dA}) + K_{pal}\left(K_{d1p}\, j\omega_{osc}D_{d1p}\right) = 0 \quad (2.34)$$

$$C_{\text{putt}} = \frac{2\cdot P_{\min}}{y_{\min}^2\cdot\omega_{\infty\infty}^2} \quad (2.35)$$

Le processus décrit précédemment a abouti à une solution. Le critère de terminaison est défini lorsque l'erreur entre deux solutions successives est inférieure à ε %.

La condition de stabilité est déterminée en analysant les valeurs propres de la matrice caractéristique. Le système peut également être exprimé de la manière suivante :

$$\dot{Y} = AY \quad (2.36)$$

$$\gamma = [y_p \quad y_d \qquad \dot{y}_p \quad \dot{y}_d \quad] \quad (2.37)$$

La matrice caractéristique A s'écrit :

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ K_{pp} & K_{pd} & D_{pp} & K_{pd} \\ K_{dp} & K_{dd} & D_{dp} & D_{dd} \end{bmatrix} \quad (2.38)$$

Le système est considéré comme stable lorsque sa matrice associée possède six valeurs propres, dont deux sont exclusivement imaginaires et les quatre autres ont une partie réelle négative **[27]**.

II.3.5. Géométrie du moteur Stirling prédimensionné :

Le tableau ci-dessous présente les résultats du dimensionnement du moteur Stirling qui ont été extraits des travaux de thèse de Julien Boucher et Isabel Garcia Burrel (2007). Ces résultats englobent les paramètres géométriques, thermiques et mécaniques nécessaires à la conception d'un moteur Stirling produisant une puissance mécanique de 1100W. Il est important de souligner que la force résistante exercée par la génératrice électrique sur le piston est assimilée à une force de frottement visqueux (2.4). De plus, la conception du moteur est considérée comme parfaitement symétrique.

Tableau II. 5 Paramètres de dimensionnement du moteur Stirling

Paramètre géométrique		
$A_p = 0{,}0121\ \mathrm{m}^2$	$V_{EF} = 3,1467.10^{-4}\ \mathrm{m}^3$	$Y_{pc} = 0{,}15\ \mathrm{m}$
$m_p = 6\ \mathrm{kg}$ $A_d = 0{,}0121\ \mathrm{m}^2$	$V_{EC} = 4,2072.10^{-4}\ \mathrm{m}^3$	$Y_{de} = 0{,}1\ \mathrm{m}$
$m_d = 0{,}3\ \mathrm{kg}$ $A_{pi} = 0{,}0113\ \mathrm{m}^2$	$V_r = 8,765.10^{-4}\ \mathrm{m}^3$	
$V_{\mathrm{ini_b}} = 78.10^{-4}\ \mathrm{m}^3$	$A_r = 9,6211.10^{-4}\ \mathrm{m}^2$	
$V_{\mathrm{ini}_m} = 1{,}4432 \cdot 10^{-4}\ \mathrm{m}^3$		
Paramètres thermiques et mécaniques		
$T_c = 650\ \mathrm{K}$	$P_{ini} = 1,375.10^6 Pa$	$C_{Hp} = 20\mathrm{Nm}^{-1}s$
$y_{p\max} = 0{,}0223\ \mathrm{m}$	$T_f = 320\ \mathrm{K}$	$C_{Hd} = 15\mathrm{Nm}^{-1}\ \mathrm{s}$

Remarque : Les valeurs des coefficients de pertes par hystérésis C_{Hp} et C_{Hd} sont des constantes. De plus, la course du piston est sélectionnée de manière à être réalisable dans la pratique. L'expression de la puissance mécanique moyenne produite par le moteur Stirling à est formulée de la manière suivante :

$$P_{\text{méca}} = \langle F_{\text{gene}}(t) \cdot \dot{y}_p(t) \rangle = 2\pi^2 \cdot C_{\text{palt}} \cdot y_{p\max}^2 \cdot f_{osc}^2 [\ \mathrm{W}] \qquad (2.39)$$

La fréquence d'oscillation mécanique obtenue est le résultat de la résolution du système non linéaire.

$f_{\text{osc}} = 27[\text{ Hz}]$ (2.40)

Le coefficient de frottement visqueux associé à la conversion de l'énergie mécanique est donc donné par :

$$C_{\text{palt}} = \frac{P_{\text{méca}}}{2(\pi \cdot y_{\text{pmax}} \cdot f_{\text{osc}})^2} = 153{,}72[\text{Nm}^{-1}\text{ s}] \quad (2.41)$$

Les coefficients relatifs aux pertes de charge au point de fonctionnement nominal sont **[3] :**

$C_p = 16{,}95$ (2.42)

$C_d = -32{,}56$ (2.43)

$E_p = -488{,}65$ (2.44)

$E_d = 938{,}37$ (2.45)

Enfin, les coefficients de raideur et d'amortissement du moteur Stirling, au point de fonctionnement nominal, peuvent être déduits :

$K_{pp} = -31492[\text{Nm}^{-1}\text{ kg}^{-1}]$ (2.46)

$K_{\text{pd}} = 4064[\text{Nm}^{-1}\text{ kg}^{-1}]$ (2.47)

$K_{\text{dp}} = -16724[\text{Nm}^{-1}\text{ kg}^{-1}]$ (2.48)

$K_{dd} = -39414[\text{Nm}^{-1}\text{ kg}^{-1}]$ (2.49)

$D_{pp} = -29[\text{Nm}^{-1}\text{skg}^{-1}]$ (2.50)

$D_{pd} = 0[\text{Nm}^{-1}1\text{skg}^{-1}]$ (2.51)

$D_{dp} = 56[\text{Nm}^{-1}1\text{skg}^{-1}]$ (2.52)

$D_{dd} = -158[\text{Nm}^{-1}1\text{skg}^{-1}]$ (2.53)

Les rapports entre les courses des déplaceur et celle du piston sont calculés selon (2.32)

$$r = 0{,}67 \tag{2.54}$$

Les déphasages entre le déplacement du piston et celui des déplaceur sont calculés selon (2.47) (2.48):LS

$$\varphi = 81{,}75° \tag{2.55}$$

La stabilité de ce moteur est examinée à travers les valeurs propres de la matrice caractéristique A. Le vecteur des valeurs propres est le suivant :

$$\Lambda = \begin{bmatrix} 0{,}60 + j174{,}24 \\ 0{,}60 - j174{,}24 \\ -94{,}34 + j190{,}95 \\ -94{,}34 - j190{,}95 \\ -79{,}27 + j182{,}02 \\ -79{,}27 - j182{,}02 \end{bmatrix} \tag{2.56}$$

Deux valeurs propres sont purement imaginaires. Et quatre valeurs propres ont leur partie réelle négative. Le moteur Stirling, dimensionné dans cette partie, est donc stable.

II.4. Simulation du moteur Stirling :

En utilisant le modèle thermomécanique et la géométrie prédéfinie du moteur Stirling (Tableau 2.5), une simulation de ce moteur thermique a été réalisée. L'objectif est de développer une commande linéaire pour stabiliser le moteur Stirling à son point de fonctionnement souhaité et vérifier le bon fonctionnement des parties mobiles. De plus, la simulation du moteur Stirling est essentielle pour construire ultérieurement la simulation complète du système de micro-cogénération.

Il s'agit de simuler les trois équations dynamiques (2.1), (2.2) et. La géométrie est fixée dans la section 2.2.5. Les pressions du gaz dans les différentes zones du moteur thermique sont exprimées à l'aide des formules développées dans les sections 2.2.2.1 et 2.2.2.2. Les entrées thermiques initiales du moteur Stirling (P_{ini}, T_c, T_f) sont constantes. Les coefficients qui varient en fonction du point de fonctionnement, tels que les coefficients de perte de charge, sont définis comme dans les équations (2.42), (2.43), (2.44) et (2.45). Tous les paramètres géométriques et physiques sont regroupés dans un fichier Matlab distinct, pouvant être modifiés.

La variable de commande du modèle est la force électromagnétique instantanée, tandis que les sorties du modèle sont les mouvements instantanés du piston et des déplaceur. Seule une forme

sinusoïdale de la force électromagnétique est prise en compte. La force électromagnétique doit être asservie pour stabiliser le moteur Stirling à son point de fonctionnement nominal, ce qui sera abordé dans le paragraphe suivant.

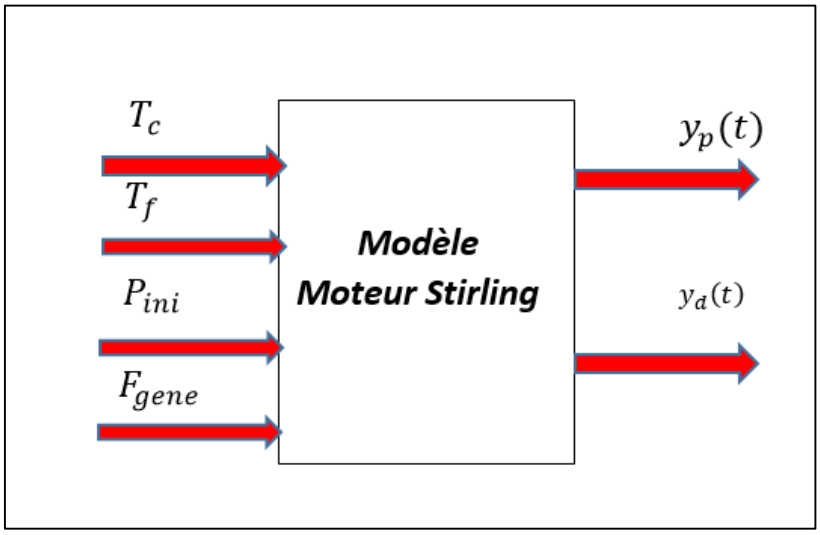


Figure II. 7: Les entrées sorties du modèle du moteur Stirling

La figure ci-dessous présente le schéma bloc de la simulation réalisée à l'aide de Matlab/Simulink. Les détails spécifiques des différents blocs sont fournis dans l'annexe A.

II.4.1. Commande du moteur Stirling :

Comme expliqué dans le paragraphe § 2.2, le moteur Stirling prédimensionné peut fonctionner de manière stable en boucle ouverte à un point de fonctionnement spécifique. Ce point est caractérisé par un couple (y_{pmax}, f_{osc})égal à (0,0223 m, 27 Hz) et une pression maximale d'oscillation. Cependant, la modélisation du moteur Stirling présente plusieurs incertitudes, notamment liées à l'estimation des pertes de charge dans le régénérateur et les échangeurs, ainsi qu'à l'estimation des coefficients de pertes par hystérésis. Par conséquent, nous allons développer dans cette partie une commande linéaire pour contrôler instantanément la position du piston au point de fonctionnement souhaité. Cette boucle de rétroaction consistera à réguler la force électromagnétique. Pour y parvenir, il est nécessaire de déterminer d'abord une fonction de transfert $\frac{Y_p(P)}{Y_{gene}(P)}$.

II.4.2. Établissement de fonction de transfert et lieu de Bode :

En transformant les équations différentielles (2.25) à l'aide de la transformée de Laplace, nous obtenons le système ci-dessous :

$$Y_p \cdot p^2 = K_{pp}Y_p + K_{pd}Y_{d1} + K_{pd}Y_{d2} + D_{pp}Y_p \cdot p + \frac{1}{m_p}F_{gove} \tag{2.57}$$

$$Y_d \cdot p^2 = K_{dp}Y_p + K_{dd}Y_{d1} + D_{dp}Y_p \cdot p + D_{dd} \cdot Y_d \cdot p \tag{2.58}$$

$$\text{Avec :} \qquad D_{pp} = -\frac{C_{Hp}}{m_p} \tag{2.59}$$

$Y_p(t)$, $Y_{d1}(t)$ sont les transformées de Laplace des fonctions temporelles $y_p(t)$,$y_d(t)$. Dans ces 3 équations, les coefficients [K] et [D] sont des constantes et sont identiques pour les deux moteurs. Cela implique que les déplacements des déplaceurs sont également identiques :

$$Y_d = \frac{K_{dp}+D_{dp}\cdot p}{p^2-D_{dd}\cdot p-K_{dd}} \cdot Y_p \tag{2.60}$$

Le lieu de Bode de cette fonction de transfert est montré dans la figure suivante :

$F_{\text{senu}}(p)$ et $Y_p(p)$:

$$Y_p \cdot p^2 = K_pY_p + 2K_{pd} \cdot \frac{K_{dp}+D_{dp}\cdot p}{p^2-D_{dw}\cdot p-K_{dt}} \cdot Y_p + D_p \cdot Y_p \cdot p + \frac{1}{m_p}F_{gmec} \tag{2.61}$$

$$\frac{Y_p(p)}{F_{smem}(p)} = G \cdot \frac{p^2+N_1p+N_0}{p^4+D_3p^3+D_2p^2+D_1p+D_0} \tag{2.62}$$

Avec :

$$G = \frac{1}{m_p} \tag{2.63}$$

$$N_1 = -D_{dd} \tag{2.64}$$

$$N_0 = -K_d \tag{2.65}$$

$$D_3 = -D_p - D_{dt} \tag{2.66}$$

$$D_2 = -K_p - K_{dd} + D_pD_{dd} \tag{2.67}$$

$$D_1 = K_wD_{dt} - 2K_{pd}D_{dp} + K_{dd}D_p \tag{2.68}$$

$$D_0 = K_p K_{dd} - 2K_{pd} K_{dp} \quad (2.69)$$

II.4.3. Synthèse d'une commande P.I.D :

Dans ce rapport, nous avons opté pour l'utilisation de la technique du "correcteur P.I.D" car elle nous permet de transformer un problème initial non linéaire en un problème linéaire centré autour de son point de fonctionnement. Le correcteur P.I.D offre un compromis entre stabilité, précision et rapidité. La formule de transfert d'un correcteur P.I.D est la suivante :

$$K(p) = \frac{K_{\text{PIP}}}{p}(1 + T_1 p) \quad (2.70)$$

$$K_{PPD} = 79432823 \quad (2.71)$$

$$T_1 = 0{,}01833 \quad (2.72)$$

Avec le correcteur P.I.D calculé, nous avons obtenu les caractéristiques suivantes :

Tableau II. 6 Caractéristiques du système bouclé.

Marge de phase	$\Delta\varphi = 45°$
Bande passante	$BP = 650\ rad/s$
Erreur statique	$\varepsilon = 0$
Durée du régime transitoire	$t5\% = 0,026\ s$
Dépassement	$D\% = 28\%$

II.4.4. Validation de la commande par simulation :

Pour commander le moteur Stirling modélisé dans §**Erreur ! Source du renvoi introuvable**., le correcteur P.I.D, développé ci-dessous, est utilisé. L'objectif est de valider cette commande et ensuite, d'examiner toutes les variables d'état du moteur Stirling en fonctionnement stabilisé.

La consigne de la position du piston est fixée à :

$$y_p'(t) = 2\,,23.\cos\,(174)[\text{cm}] \quad (2.73)$$

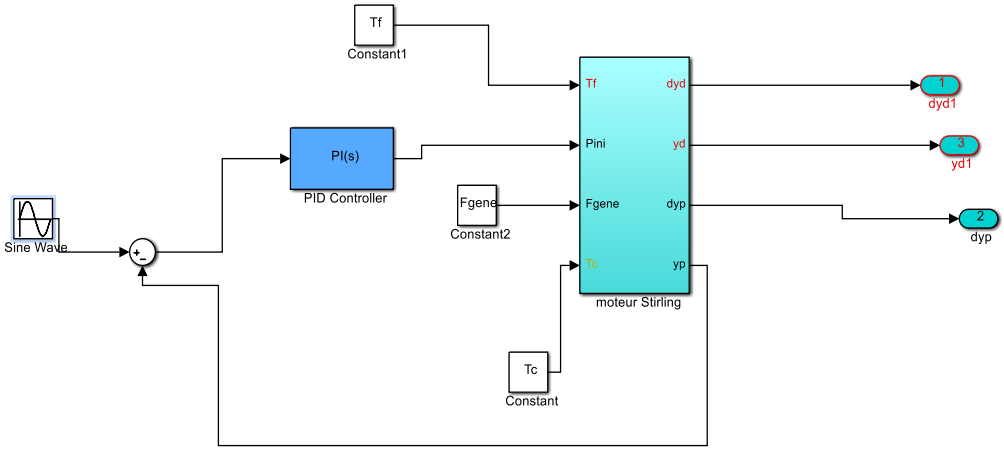


Figure II. 8: Simulation du moteur Stirling commandé par un correcteur P.I.D.

Les mouvements des déplaceur, résultats du mouvement du piston ainsi que des forces thermodynamiques au sein du moteur Stirling, sont stables et presque identiques. Leurs positions temporelles sont sinusoïdales de même fréquence et en avance de phase par rapport à la position du piston. Ces résultats ont montré que, même sans aucune commande spécifique sur les déplaceur, le moteur Stirling peut être capable de fonctionner en mode d'opposition de phase thermodynamique. Cependant, leurs axes d'oscillation naturelle imposés par les caractéristiques thermodynamiques du moteur sont légèrement décalés par rapport à l'axe théorique. Les composantes variantes des pressions du gaz autour de leur valeur moyenne Pini dans différentes chambres sont affichées dans la figure suivante :

En conclusion, la simulation du moteur Stirling commandé par un correcteur P.I.D a validé l'aptitude de cette commande dans le but de stabiliser le fonctionnement oscillatoire de celui-ci. Le fonctionnement du moteur Stirling à sa fréquence naturelle a été considéré. La simulation permet de trouver des valeurs instantanées des grandeurs telles que : $y_d(t), y_c(t), P_c(t), P_f(t)$ … ainsi que les coefficients comme C_{palt}, r, φ . Ces derniers sont comparés avec la solution de l'étape de prédimensionnement. La plupart des résultats de la simulation sont cohérents avec les résultats du calcul du dimensionnement commer, φ Mais concernant C_{palt}, nous constatons un léger décalage dû au décalage de la fréquence naturelle du système.

II.5. conclusion

La modélisation, la simulation et la commande de la chaîne thermomécanique, en particulier du moteur Stirling, jouent un rôle essentiel dans le développement et l'optimisation de cette technologie prometteuse. Grâce à ces approches, il est possible de comprendre en détail le comportement du moteur Stirling, de prédire ses performances et d'identifier les paramètres clés pour son fonctionnement efficace.

La modélisation permet de représenter mathématiquement les différentes composantes et les phénomènes physiques qui interviennent dans le moteur Stirling. Cela inclut la modélisation thermique, mécanique, fluidique et électrique, ainsi que la prise en compte des pertes et des inefficiences. En utilisant des équations et des modèles appropriés, on peut simuler le fonctionnement du moteur Stirling dans différentes conditions de charge, de température et de pression, et évaluer ses performances globales.

La simulation informatique constitue un outil puissant pour analyser et optimiser le moteur Stirling. Elle permet d'étudier des scénarios virtuels, de tester différentes configurations, de modifier les paramètres de conception et d'explorer des stratégies de commande. Grâce à la simulation, on peut prédire avec précision les performances du moteur Stirling, identifier les zones à améliorer et évaluer l'impact de ces modifications sur son rendement énergétique, sa durabilité et sa fiabilité.

La commande de la chaîne thermomécanique du moteur Stirling est un aspect crucial pour garantir un fonctionnement optimal. En utilisant des algorithmes de commande avancés, on peut réguler et optimiser les variables clés, telles que la pression, la température et la fréquence de fonctionnement, afin d'obtenir une performance maximale du moteur. La commande permet également de gérer les transitions entre les différentes phases du cycle thermodynamique du moteur Stirling de manière efficace et de minimiser les pertes énergétiques.

CHAPITRE 3

Modélisation, simulation et commande de la machine asynchrone

III.1. Introduction :

La modélisation de la machine asynchrone triphasée (MAS) est primordiale aussi bienpour la conception que pour la commande. Dans un premier lieu, on donnera de manière explicite le modèle mathématique de la machine asynchrone (Equations électriques et mécaniques) dans son référentiel triphasé. Puis, on réduira l'ordre du système par une transformation dite de PARK. Cette transformation modélise la MAS dans un nouveau référentiel, biphasé cette fois. Dans un dernier lieu, on donnera la simulation numérique des différentes grandeurs de la MAS. Dans les pays industrialisés, plus de 60% de l'énergie électrique consommée est transformée en énergie mécanique par des entraînements utilisant les moteurs électriques. Le modèle mathématique d'une (MAS) nous facilite largement son étude et permet sa commande dans les différents régimes de fonctionnement transitoire ou permanent. La représentation de la machine asynchrone par des équations selon le système triphasé donne un modèle, dont les équations sont à coefficients variables en fonction du temps. Dans le but de faciliter leur résolution, on a recours à une modélisation dite « transformation de Park », qui consiste à transformer le système triphasé en système à deux axes orthogonaux. L'élaboration d'une telle modélisation est indispensable pour l'étude du régime de contrôle du flux, de couple, de régulation de tension et de vitesse. Dans ce chapitre nous nous intéresserons à la modélisation de la machine asynchrone par :

- La mise en équation de la machine asynchrone à partir d'hypothèses simplificatrices.
- La simplification de ces équations par l'introduction de la transformation de Park.
- La mise sous forme d'équation d'état.

Le but ultime de l'étude de modélisation et de l'identification des paramètres est de conduire l'étude et la réalisation d'une stratégie de commande sur la génératrice du système global. L'exigence sur le contrôle/ commande de la partie électromécanique est, en premier lieu, abordée. En deuxième lieu, ayant choisi la commande vectorielle à flux orienté comme stratégie de contrôle, une simulation de la machine asynchrone à induction pilotée est faite.

III.2. Présentation de la machine asynchrone

III.2.1. Structure et fonctionnement :

La structure d'une machine asynchrone, également appelée machine à induction, se compose des éléments suivants :

1. Stator : Le stator est la partie fixe de la machine asynchrone. Il est composé d'une structure en fer laminé avec des encoches pour y loger les bobines. Les bobines du stator sont alimentées par un courant alternatif et produisent un champ magnétique tournant.

2. Rotor : Le rotor est la partie mobile de la machine asynchrone. Il est composé d'un ensemble de barres conductrices placées dans des encoches et formant des circuits fermés. Le rotor peut être de deux types : le rotor en cage d'écureuil et le rotor bobiné. Le rotor en cage d'écureuil est le plus couramment utilisé et est constitué de barres courtes en cuivre ou en aluminium reliées aux extrémités par des anneaux de court-circuit. Le rotor bobiné est composé d'enroulements reliés à des bagues collectrices.

3. Enroulements : Les enroulements sont des bobines situées dans les encoches du stator. Ces bobines sont connectées en étoile ou en triangle et sont alimentées par un courant alternatif triphasé. Les enroulements du stator créent un champ magnétique tournant qui interagit avec le rotor pour produire le mouvement.

4. Roulements : Les roulements sont des éléments mécaniques qui soutiennent l'arbre du rotor et permettent son mouvement de rotation en réduisant les frottements.

5. Carcasse : La carcasse est la structure externe de la machine asynchrone qui abrite le stator, le rotor et les autres composants. Elle fournit un support solide et protège les composants internes.

Le fonctionnement de la machine asynchrone est basé sur le principe de l'induction électromagnétique. Lorsque le courant alternatif est appliqué aux enroulements du stator, un champ magnétique tournant est créé. Ce champ magnétique induit des courants dans les barres du rotor en cage d'écureuil ou dans les enroulements du rotor bobiné. Les courants induits dans le rotor créent un champ magnétique qui interagit avec le champ magnétique du stator, produisant un couple de rotation. Cela entraîne le mouvement du rotor en essayant de suivre le champ magnétique tournant du stator, d'où le nom de "machine asynchrone".

La vitesse de rotation du rotor est légèrement inférieure à celle du champ magnétique tournant du stator, ce qui crée un glissement entre les deux. Ce glissement est nécessaire pour induire le courant dans le rotor et produire le couple de rotation. La différence de vitesse entre le champ magnétique tournant du stator et le rotor est appelée "glissement".

La machine asynchrone est largement utilisée dans de nombreuses applications industrielles en raison de sa simplicité de construction, de son faible coût, de sa robustesse et de sa facilité d'entretien. Elle est utilisée comme moteur dans les machines électriques, les pompes, les ventilateurs, les compresseurs, etc. Elle peut également être utilisée comme générateur dans certaines applications.

Une machine triphasée équilibrée, alimentée par un réseau triphasé constitue, dans sa totalité une entité non linéaire, ce qui complique son processus de commande. Cette machine est composée d'un stator formé par trois bobines identiques d'axes de références $Sa\ Sb\ Sc$ régulièrement décalées entre elles de 2π /3. L'axe de la phase Sa est pris comme référence angulaire, et d'un rotor qui est équivalent à trois bobines d'axes de références $Ra\ Rb\ Rc$ décalées entre elles également de 2π/3. Ces trois bobines sont évidemment court-circuitées sur elles-mêmes et la machine est représentée schématiquement sur la figure III.1. [2]

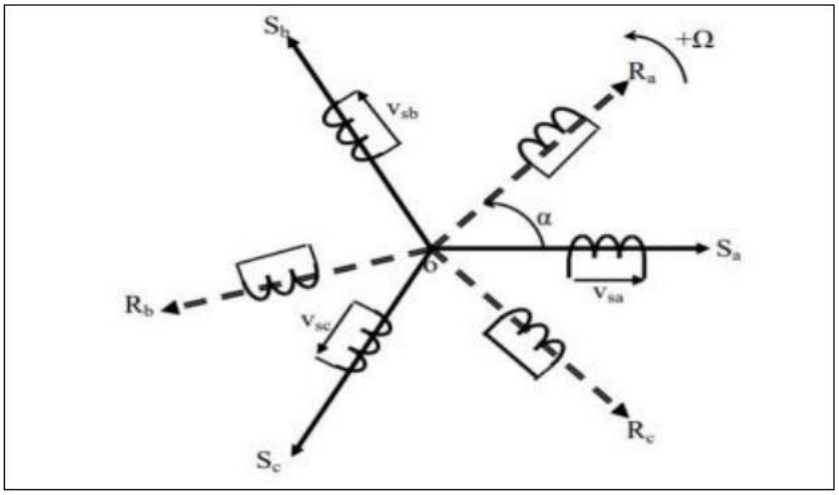


Figure III. 1: Représentation des enroulements de la machine asynchrones

On appelle machine asynchrone, une machine électrique de vitesse variable, à courant alternatif, qui à 2 enroulements dont un seul (le primaire) est alimenté par un réseau électrique de pulsation ω ; alors que la 2ème (le secondaire) est fermé sur lui-même ou sur des résistances électriques, généralement ce type de machines est plus utilisée en moteur asynchrone (en triphasé).

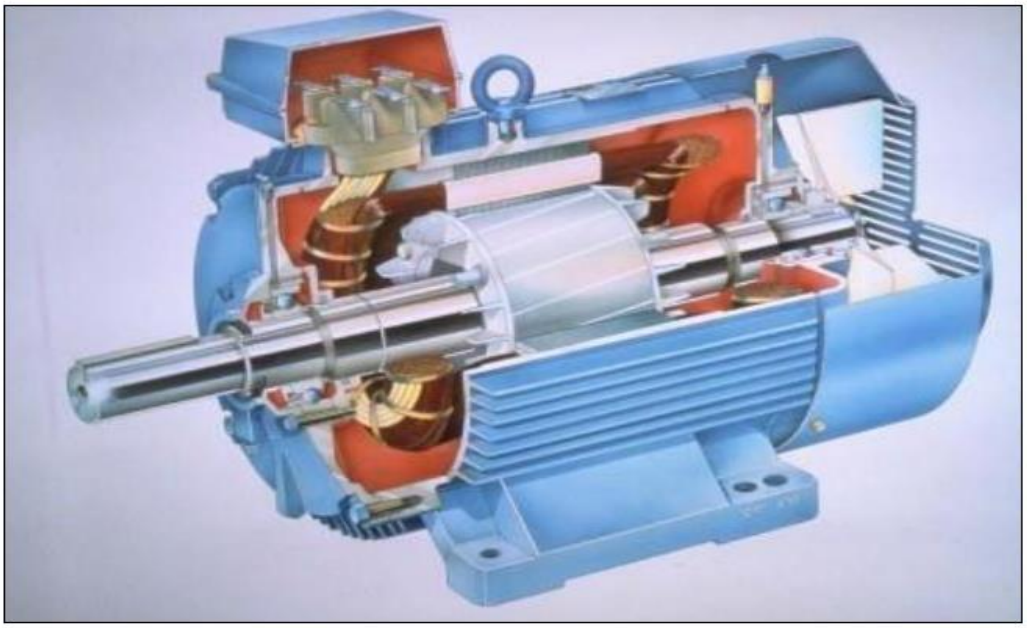


Figure III. 2:machine asynchrone

III.2.2. Modélisation de machine asynchrone :

La modélisation de la machine asynchrone est un besoin indispensable pour observeret analyser les déférentes évolutions de ses grandeurs électromécaniques, électriques et magnétiques d'une part et d'autre part de prévoir le contrôle nécessaire. Nous utiliserons un modèle de la machine asynchrone pour décrire le comportement dynamique des différentes grandeurs concernées par le système de contrôle (couple électromagnétique, flux magnétique, courants, tensions…… etc.), pour se faire on doit tenir compte de quelques hypothèsess implificatrices. **[27]**

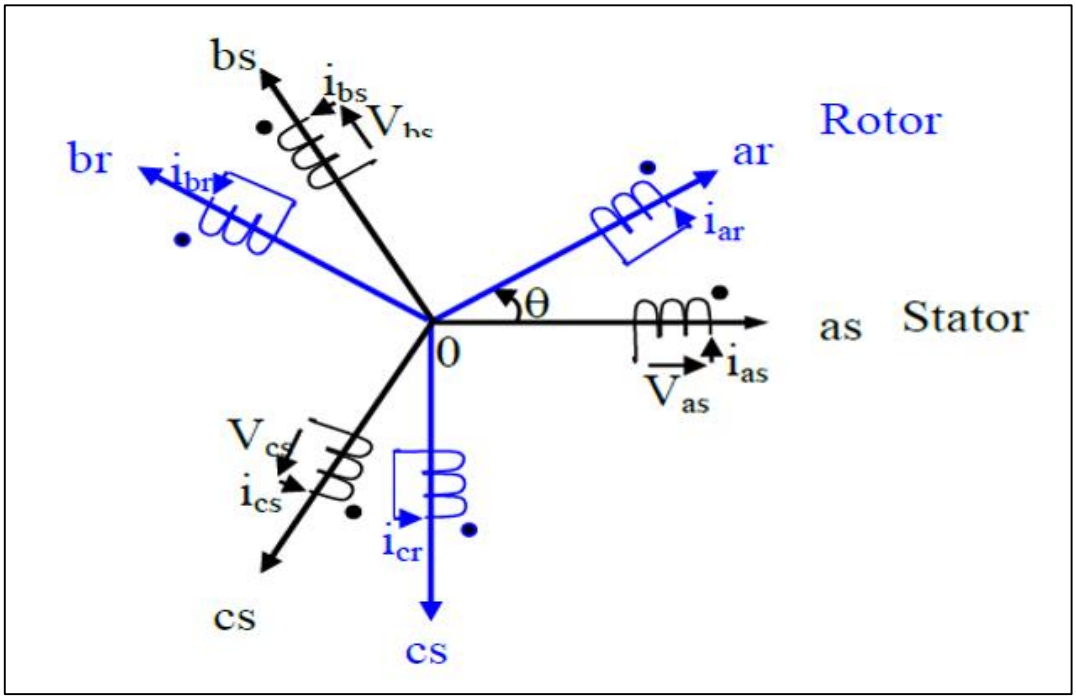


Figure III. 3: Représentation symbolique de la machine asynchrone triphasée à cage.

La figure III.3 donne une représentation symbolique de la machine ou les enroulements statoriques sont déphasés de $\frac{2\pi}{3}$ dans l'espace. La cage de rotor peut être modélisée aussi par trois enroulements déphasés de $\frac{2\pi}{3}$. Cette représentation simplifiée du rotor ne permet pas d'accéder à la connaissance du courant circulant effectivement dans chaque barre mais conduit à une traduction assez fidèle de l'influence des barres rotoriques sur le comportement de la machine. L'angle θ représente la position du rotor. **[31]**

III.2.2.1. Mise en èquations de la MAS :

Les équations de fonctionnement de la machine asynchrone triphasée sont données sous forme matricielle, pour cela nous utilisons les vecteurs de variables suivants : **[28]**

- **Vecteurs de tensions, courants et flux totaux statoriques :**

$$[V_s] = [V_as, V_bs, V_c cs]^t \quad (3.1)$$
$$[I_s] = [I_{as}, I_{bs}, I_{cs}]^t \quad (3.2)$$
$$[\phi_s] = [\phi_{as}, \phi_{bs}, \phi_{cs}]^t \quad (3.3)$$

- **Vecteurs de tensions, courants et flux totaux rotoriques :**

$$[V_r] = [V_{ar}, V_{br}, V_{cr}]^t = [0,0,0]^t \quad (3.4)$$
$$[I_r] = [I_{ar}, I_{br}, I_{cr}]^t \quad (3.5)$$
$$[\phi_r] = [\phi_{ar}, \phi_{br}, \phi_{cr}]^t \quad (3.6)$$

III.2.2.2. Equations de tensions :

Les équations générales des tensions s'obtiennent en écrivant la loi de Faraday pour chacun des enroulements statoriques et rotoriques en considérant la chute de tension ohmique.

En convention "récepteur", ces équations sont mises sous la forme matricielle suivante :[30]

$$\begin{cases} [V_s] = [R_s][I_s] + \dfrac{d}{dt}[\phi_s] \\ [V_r] = [R_r][I_r] + \dfrac{d}{dt}[\phi_r] \end{cases} \quad (3.7).$$

$[R_s]$ et $[R_r]$ sont les matrices des résistances statoriques et rotoriques données par :

$$[R_s] = R_s[I_3] \quad (3.8)$$

$$[R_r] = R_r[I_3] \quad (3.9)$$

Avec [I3] est la matrice d'identité d'ordre 3.

$$\begin{bmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{sa} \\ I_{sb} \\ I_{sc} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \varphi_{sa} \\ \varphi_{sb} \\ \varphi_{sc} \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

Ou bien :

$$[Vs] = [Rs][Is] + \frac{d}{dt}[\varphi s] \tag{3.11}$$

$[V_s]$: la matrice de résistance par phase du stator.

$$\begin{bmatrix} V_{ra} \\ V_{rb} \\ V_{rc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ra} \\ i_{rb} \\ i_{rc} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \varphi_{ra} \\ \varphi_{rb} \\ \varphi_{rc} \end{bmatrix} \tag{3.12}$$

Ou bien :

$$[V_r] = [R_r][I_r] + \frac{d}{dt}[\varphi_r] \tag{3.13}$$

Le rotor est en court-circuit, donc les tensions rotoriques sont nulles et on peut écrire :

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = [R_r][I_r] + \frac{d}{dt}[\varphi_r] \tag{3.14}$$

$[R_r]$: La matrice de résistance par phase du rotor.

III.2.2.3. Equations des flux

Les expressions des flux totaux à travers les enroulements statoriques et rotoriques sont données par la relation matricielle suivante :[29]

$$\begin{cases} [\phi_s] = [L_{ss}][I_s] + [M_{sr}][I_r] \\ [\phi_r] = [L_{rr}][I_r] + [M_{rs}][I_s] \end{cases} \tag{3.15}$$

Pour le stator :

$$\begin{bmatrix} \varphi_{sa} \\ \varphi_{sb} \\ \varphi_{sc} \end{bmatrix} = [L_s] \begin{bmatrix} I_{sa} \\ I_{sb} \\ I_{sc} \end{bmatrix} + [M_{sr}] \begin{bmatrix} i_{ra} \\ i_{rb} \\ i_{rc} \end{bmatrix} \tag{3.16}$$

Pour le rotor :

$$\begin{bmatrix}\varphi_{ra}\\ \varphi_{rb}\\ \varphi_{rc}\end{bmatrix} = [L_r]\begin{bmatrix}I_{ra}\\ I_{rb}\\ I_{rc}\end{bmatrix} + [M_{rs}]\begin{bmatrix}i_{sa}\\ i_{sb}\\ i_{sc}\end{bmatrix} \quad (3.17)$$

Tel que : $[M_{rs}] = [\ ]_{sr}$

Les inductances qui apparaissent dans ces équations dépendent de la position des enroulements et sont divisées en deux catégories :

Inductances constantes qui sont :

$[L_s]$: Matrices des inductances propres statoriques.

$[L_r]$: Matrices des inductances propres rotoriques.

$[M_s]$: Inductance mutuelle entre deux phases statorique.

$[M_r]$: Inductance mutuelle entre deux phases rotorique.

Inductances variables qui sont :

$[M_{sr}]$: Inductance mutuelle entre une phase statorique et une phase rotorique

$[M_{rs}]$: Inductance mutuelle entre une phase rotorique et une phase statorique

Où :

$$[L_s] = \begin{bmatrix}L_s & M_s & M_s\\ M_s & L_s & M_s\\ M_s & M_s & L_s\end{bmatrix} \quad (3.18)$$

$$[L_r] = \begin{bmatrix}L_r & M_r & M_r\\ M_r & L_r & M_r\\ M_r & M_r & L_r\end{bmatrix} \quad (3.19)$$

$$[M_{sr}] = M_0\begin{bmatrix}\cos\theta & \cos\left(\theta+\frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta-\frac{2\pi}{3}\right)\\ \cos\left(\theta-\frac{2\pi}{3}\right) & \cos\theta & \cos\left(\theta+\frac{2\pi}{3}\right)\\ \cos\left(\theta+\frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta-\frac{2\pi}{3}\right) & \cos\theta\end{bmatrix} \quad (3.20)$$

Avec :

θ : Angle électrique définit la position relative instantanée entre les axes statoriques et les axes rotoriques qui sont choisi comme axes des références.

M0 : Maximum de l'inductance mutuelle entre phase du stator et la phase Correspondent durotor.

III.2.2.4. Equations mécaniques :

L'étude des régimes transitoires fait intervenir en plus des grandeurs électriques les grandeurs mécaniques. Ainsi, pour compléter le modèle, nous devons ajouter l'équation mécanique déduite à partir du théorème des moments. **[27]**

L'équation mécanique de la machine est donnée par **:**

$$C_{em} = J\frac{dn}{dt} + C_r + f\Omega \qquad (3.21)$$

Avec :

C_{em} : Le couple électromagnétique.

C_r : Le couple résistant.

F : coefficient de frottement.

J : moment d'inertie du rotor

III.2.2.5.Couple électromagnétique

L'expression du couple électromagnétique est obtenue par dérivation de la Co-énergie

$$C_{em} = \begin{bmatrix}[I_s]\\ [I_r]\end{bmatrix}^t \left\{\frac{\partial}{\partial\theta}\begin{bmatrix}[L_{ss}] & [M_{sr}]\\ [M_{rs}] & [L_{rr}]\end{bmatrix}\right\}\begin{bmatrix}[I_s]\\ [I_r]\end{bmatrix} \qquad (3.21)$$

Les sous matrices [Ls] et [Lr] contiennent des termes constants, seules les matrices[Msr] et [Mrs] dépendent de l'angle θ, la relation …. Précédente se simplifie :

$$C_{em} = \frac{1}{2}[I_s]\left\{\frac{\partial}{\partial\theta}[M_{sr}]\right\}[I_r]^t \qquad (3.22)$$

-Le but de l'utilisation de cette transformation c'est de passer d'un système triphasé abc versun système biphasé (α, β). **[31]**

-La structure de la MAS diphasée est montrée par les figures suivant :

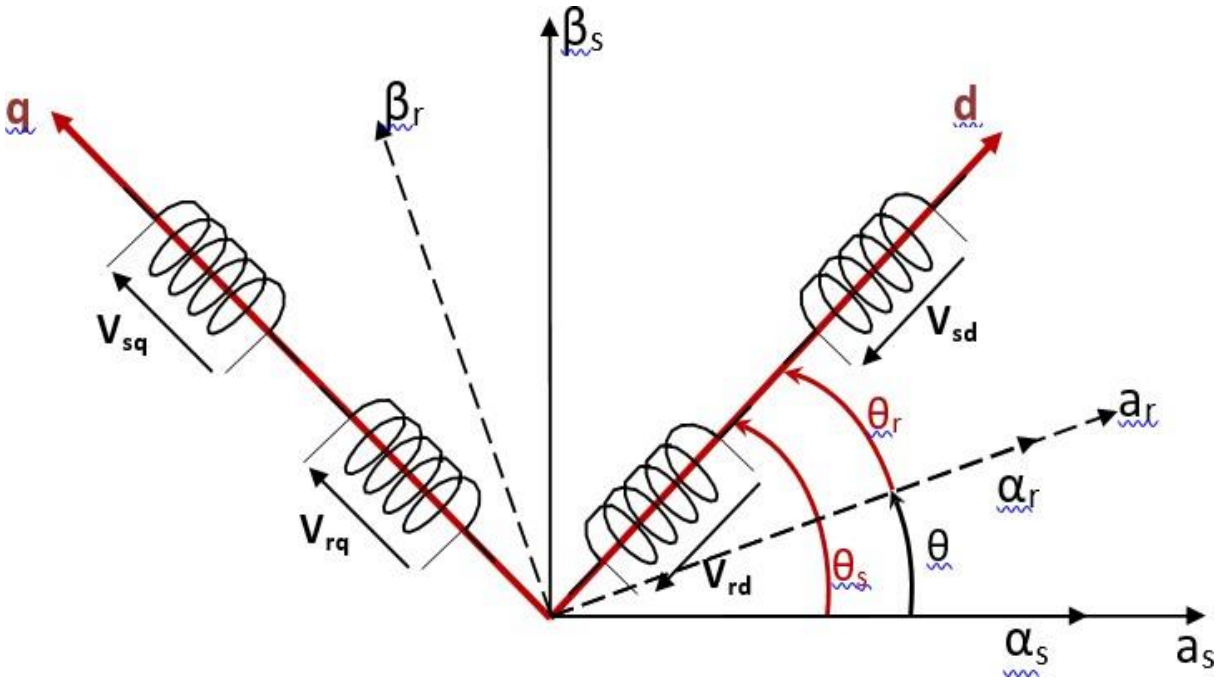


Figure III. 4: Structure diphasée de la machine asynchrone dans le repère (d-q).

Dans cette figure, on a repéré les différents référentiels communs au stator et au rotor jugé utile dans la mise en place des modèles dynamiques de la machine asynchrone.

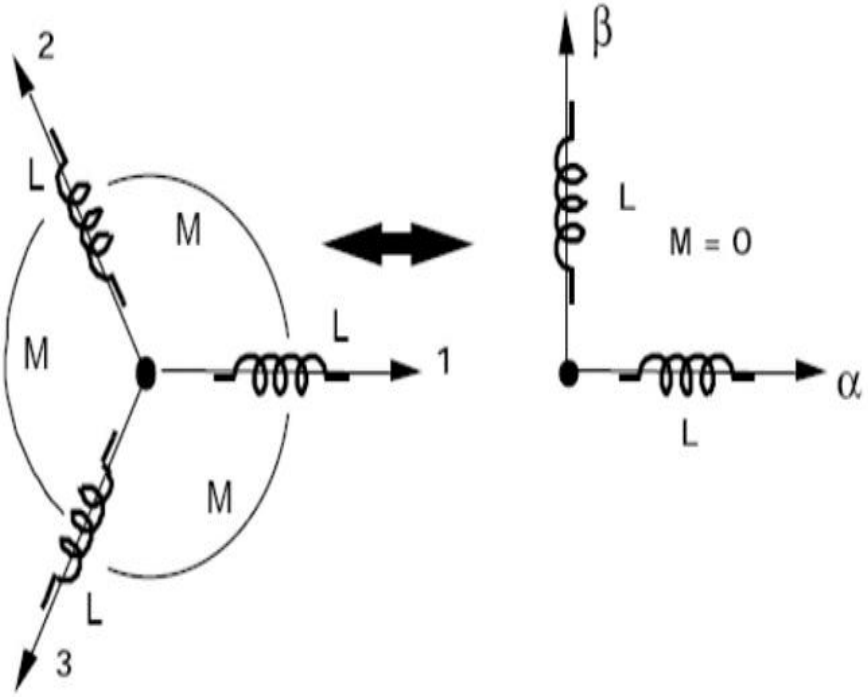


Figure III. 5: Passage du système triphasé au système biphasé.

D'après la théorie générale des machines électriques, le comportement de n'importe quelle machine polyphasée (m et n phase au stator et au rotor), à condition d'égalité des résistances au stator et au rotor, peut être représenté par son modèle diphasé, de ce fait un

enroulement (triphasé du stator ou du rotor) peut être substitué par un enroulement diphasé équivalent, il est donc possible de définir une matrice qui porte le nom de transformation de « Concordia » [T1] permettant le passage des composantes X a,b,c du système triphasé aux composantes X α ,β,0 du système diphasé tournant à la même vitesse telle que (Figure III.3) : [32]

$$\begin{bmatrix} X_\alpha \\ X_\beta \\ X_0 \end{bmatrix} = \frac{2}{3}\begin{bmatrix} 1 & \cos\left(\frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\frac{4\pi}{3}\right) \\ 0 & \sin\left(\frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(\frac{4\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} X_a \\ X_b \\ X_c \end{bmatrix} \quad (3.23)$$

$$\begin{bmatrix} X_\alpha \\ X_\beta \\ X_0 \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}}\begin{bmatrix} 1 & \cos\left(\frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\frac{4\pi}{3}\right) \\ 0 & \sin\left(\frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(\frac{4\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} X_a \\ X_b \\ X_c \end{bmatrix} \quad (3.24)$$

L'axe α étant confondu avec l'axe **a**.

Il existe deux types de transformations vers le repère (***α-β***) :

- La transformation de Clarke qui conserve l'amplitude mais pas la puissance ni le couple(rapport 2/3). [29]
- La transformation de Concordia qui conserve la puissance mais pas l'amplitude des Grandeurs de phase (rapport $\sqrt{2}$). [29]

3

- Le choix d'une matrice normée (Concordia) est souvent utilisé pour des raisons de symétrie des transformations directe et inverse.

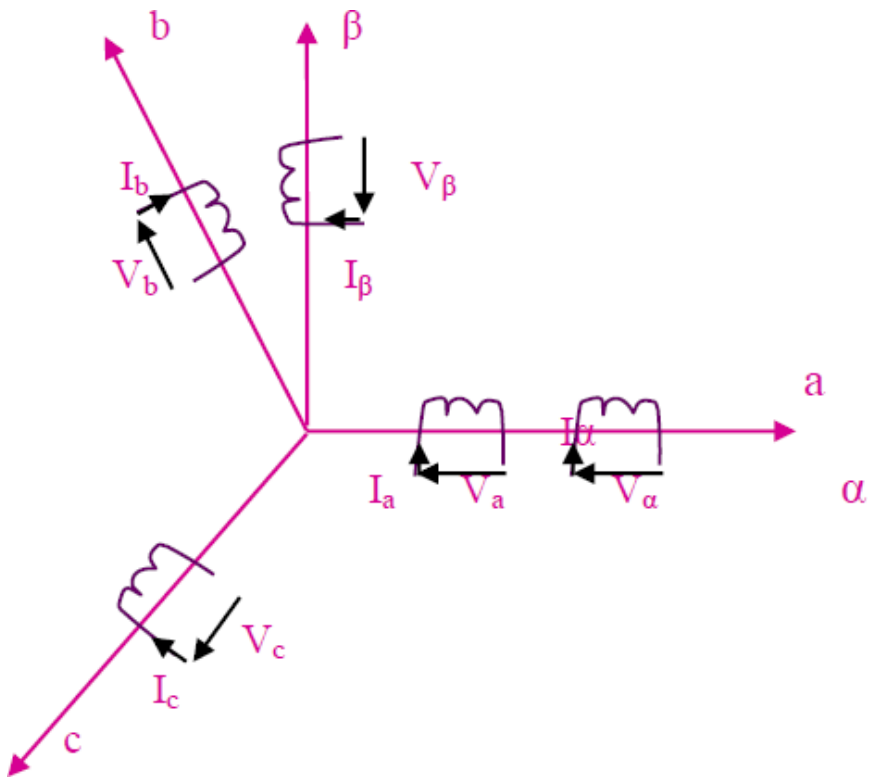


Figure III. 6: Repère de Concordia

A partir du repère de la figure II.4, on ajoute un autre repère, ce référentiel est caractérisé par un système d'axe (d,q) tournant à la vitesse :: $\omega_c = \frac{d\theta_c}{d_t}$: Par rapport au stator.

Ce repère est souvent appelé repère de Park (Figure II.5). On peut définir une matrice de passage du repère (α, β, 0) au repère (d, q, 0). Cette matrice est notée [T2], tel que :

$$\begin{bmatrix} X_d \\ X_q \\ X_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) & 0 \\ -\sin(\theta) & \cos(\theta) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} X_\alpha \\ X_\beta \\ X_0 \end{bmatrix} \quad (3.25)$$

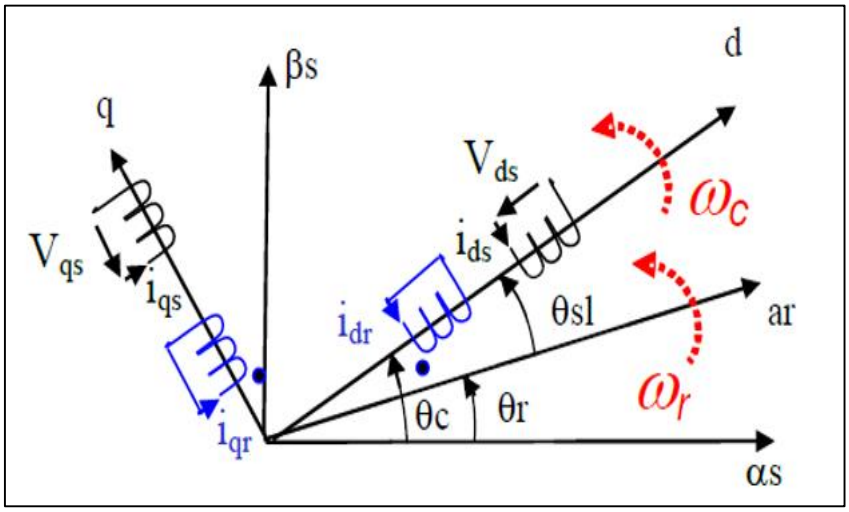


Figure III. 7: Repère de Park

Ainsi, on peut définir une transformation unique permettant le passage direct du système triphasé au système diphasé tournant, cette transformation sera notée [P], elle est définie par le produit matriciel suivant [P] = [T1] [T2] :

$$[p(\theta)] = \sqrt{\frac{3}{2}}\begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ -\sin(\theta) & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (3.26)$$

On définit, de la même façon la matrice inverse permettant le passage (diphasé-triphasé) notée par $[(\theta)]^{-1}$: et donnée par :

$$[p(\theta)]^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}}\begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (3.27)$$

Avec :

L'angle θ correspond à la position du repère choisi pour la transformation.

* Θ=θs pour le stator.

* Θ=θr pour le rotor [9]

[P(θ)] : est la matrice de la transformation de Park.

Par $[(\theta)\,]^{-1}$: est la matrice inverse de la transformation de Park.

On remarque que $p^{-1} = p^{T}$, ainsi cette transformation est orthogonale.

Le passage des variables Xa, b, c aux variables Xd, q, et inversement s'écrie sous laforme matricielle suivante :

$X_{dq} = [p(\theta)]\, X_{abc}$

Tel que :

X : peut-être la tension, le courant ou le flux.

Ou :

$$\begin{bmatrix} X_{\mathrm{d}} \\ X_{\mathrm{q}} \\ X_{0} \end{bmatrix} = [p(\theta)] \begin{bmatrix} X_{\mathrm{a}} \\ X_{b} \\ X_{\mathrm{c}} \end{bmatrix} \qquad \begin{bmatrix} X_{\mathrm{a}} \\ X_{b} \\ X_{\mathrm{c}} \end{bmatrix} = [p(\theta)]^{-1} \begin{bmatrix} X_{d} \\ X_{q} \\ X_{0} \end{bmatrix} \tag{3.28}$$

En absence de la composante homopolaire c'est-à-dire, lorsque Ia+Ib+Ic=0 etVa+Vb+Vc=0 ; les composantes I0 et V0 sont nulles, de ce fait on les négligera.

III.2. 3.Modéle biphasé :

III.2.3.1 Equations des tensions :

L'application de la transformée de Park sur les enroulements statoriques et rotoriquesconduit aux équations suivantes :

$[X_{dqs}] = [P(\theta_c)]\,[X_{abc}]_s$ Pour les grandeurs statoriques

$[X_{dqr}] = [P(\theta_c - \theta_r)][X_{abc}]_r$ Pour les grandeurs rotoriques

$$V_{ds} = R_s I_{ds} + \frac{d}{dt}\phi_{ds} - w_c \tag{3.29}$$

$$V_{qs} = R_s I_{qs} + \frac{d}{dt}\phi_{qs} + w_c \phi_{ds} \tag{3.30}$$

$$V_{dr} = R_r I_{dr} + \frac{d}{dt}\phi_{dr} - (w_c - w_r)\phi_{qr} \tag{3.31}$$

$$V_{qr} = R_r I_{qr} + \frac{d}{dt}\phi_{qr} + (w_c - w_r)\phi_{dr} \tag{3.32}$$

wc : vitesse angulaire du repère biphasé
wr : vitesse angulaire du rotor

Les équations de flux sont :

$L_s = l_s - M_s$: Inductance cyclique statorique. $L_r = l_r - M_r$: inductance cyclique rotorique.

$L_m = \frac{3}{2} M$: Inductance mutuelle cyclique entre stator et rotor.

III.2.3.2 Expression du couple électromagnétique :

La puissance électrique absorbée par la machine asynchrone est :

$$pc = \left[I_{ds}\frac{d\phi_{ds}}{dt} + I_{qs}\frac{d\phi_{qs}}{dt} + I_{dr}\frac{d\phi_{dr}}{dt} + I_{qr}\frac{d\phi_{qr}}{dt}\right] + \left[\left(\phi_{ds}I_{qs} - \phi_{qs}I_{ds}\right)\frac{d\theta_s}{dt} + \left(\phi_{dr}I_{qr} - \phi_{qr}I_{dr}\right)\frac{d\theta_{sl}}{dt} + \left[R_s\left(I_{ds}^{\ 2} + I_{qs}^{\ 2}\right) + R_R\left(I_{dr}^{\ 2} + I_{qr}^{\ 2}\right)\right]\right] \quad (3.33)$$

1er terme : variation de l'énergie emmagasinée

2eme terme : la puissance électrique transformée

en mécanique3eme terme : les pertes joules

$$C_{em} = \frac{p}{w_r}$$

On obtient :

$$C_{em} = p(\phi_{ds}I_{qs} - \phi_{qs}I_{ds})$$

$$C_{em} = P\frac{L_m}{L}(\phi_{dr}I_{qs} - \phi_{qr}I_{ds}) = PL_m(I_{dr}I_{qs} - I_{qr}I_{ds}) \quad (3.34)$$

III.2.3.3Référentiel lié au stator

Ce repère est immobile par rapport au stator $(\omega_c = 0)$ et$(\omega_{s1} = -\omega_r)$

$$\begin{cases} V_{\alpha s} = R_s I_{\alpha s} + \frac{d}{dt}\phi_{\alpha s} \\ V_{\beta s} = R_s I_{\beta s} + \frac{d}{dt}\phi_{\beta s} \\ V_{\alpha r} = R_r I_{\alpha r} + \frac{d}{dt}\phi_{\alpha r} + w_r\phi_{\beta r} \\ V_{\beta r} = R_r I_{\beta r} + \frac{d}{dt}\phi_{\beta r} - w_r\phi_{\alpha r} \end{cases} \quad (3.35)$$

III.2.3.4. Référentiel lié au rotor :

Ce repère est immobile par rapport au rotor. Il est caractérisé par $(\omega_e = \omega_r)$ donc :

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s I_{ds} + \frac{d}{dt}\phi_{ds} - w_r \phi_{qs} \\ V_{qs} = R_s I_{qs} + \frac{d}{dt}\phi_{qs} + w_r \phi_{ds} \\ V_{dr} = R_r I_{dr} + \frac{d}{dt}\phi_{dr} \\ V_{qr} = R_r I_{qr} + \frac{d}{dt}\phi_{qr} \end{cases} \quad (3.36)$$

III.2.3.5. Référentiel lié auchap tournant :

Ce référentiel correspond aux transformations des enroulements rotoriques et statoriques dans un référentiel tournant à la vitesse synchrone$(\omega_c = \omega_s)$ et $(\omega_{s1} = \omega_s - \omega_r)$

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s I_{ds} + \frac{d}{dt}\phi_{ds} - w_s \phi_{qs} \\ V_{qs} = R_s I_{qs} + \frac{d}{dt}\phi_{qs} + w_s \phi_{ds} \\ V_{dr} = R_r I_{dr} + \frac{d}{dt}\phi_{dr} - w_{sl}\phi_{qr} = 0 \\ V_{qr} = R_r I_{qr} + \frac{d}{dt}\phi_{qr} + w_{sl}\phi_{dr} = 0 \end{cases} \quad (3.37)$$

III.3. Simulation de modèle de la machine asynchrone

Pour faire valider l'étude qu'on a faite, nous avons simulé le modèle de la machine asynchrone par l'outil Simulink, et nous avons relevé le comportement du flux rotorique direct ΦRd et en quadratures ΦRq, La vitesse Ω et du couple électromagnétique.

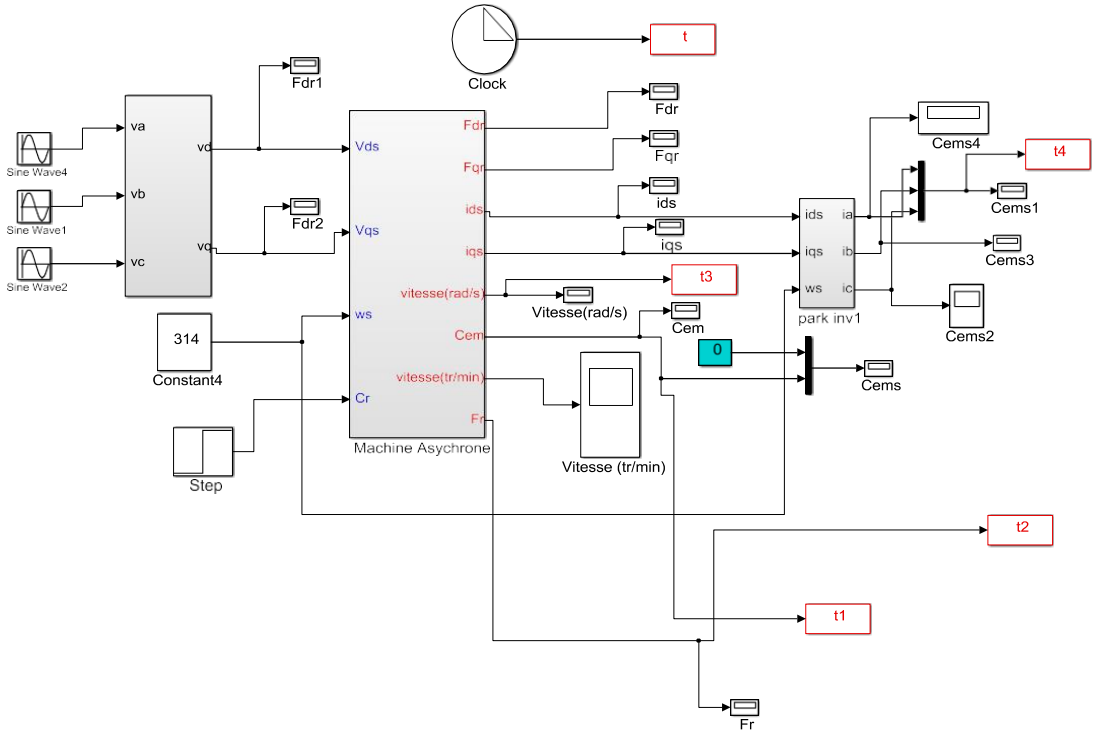


Figure III. 8: Modélisation de la machine asynchrone sous Matlab.

Les paramètres de la machine asynchrone triphasée :

Les valeurs des paramètres de la machine asynchrone du schéma de simulation sontdécrites comme suite :

Tableau III. 1: Les paramètres de la machine asynchrone triphasée

V	Fs	P	Rs	Rr	Lr	Ls	Lm	J	F
220	50	2	4.85	3.805	0.274	0.274	0.258	0.031	0.008
SIGmA	Cr	Fn	Wrn	Tr	Ts	T	Tp		
$1-\frac{lm^2}{Ls*Lr}$	0.2	1	$\frac{1477*2*pi}{60}$	$\frac{Lr}{Rr}$	$\frac{Ls}{Rs}$	$\frac{(2*\frac{J}{Tr})}{\frac{J}{Tr\hat{}2}}$	$\frac{1}{21*50}$		

III.3.1. Résultats de simulation :

La figure suivante représente les signaux de tensions d'entrée triphasée.

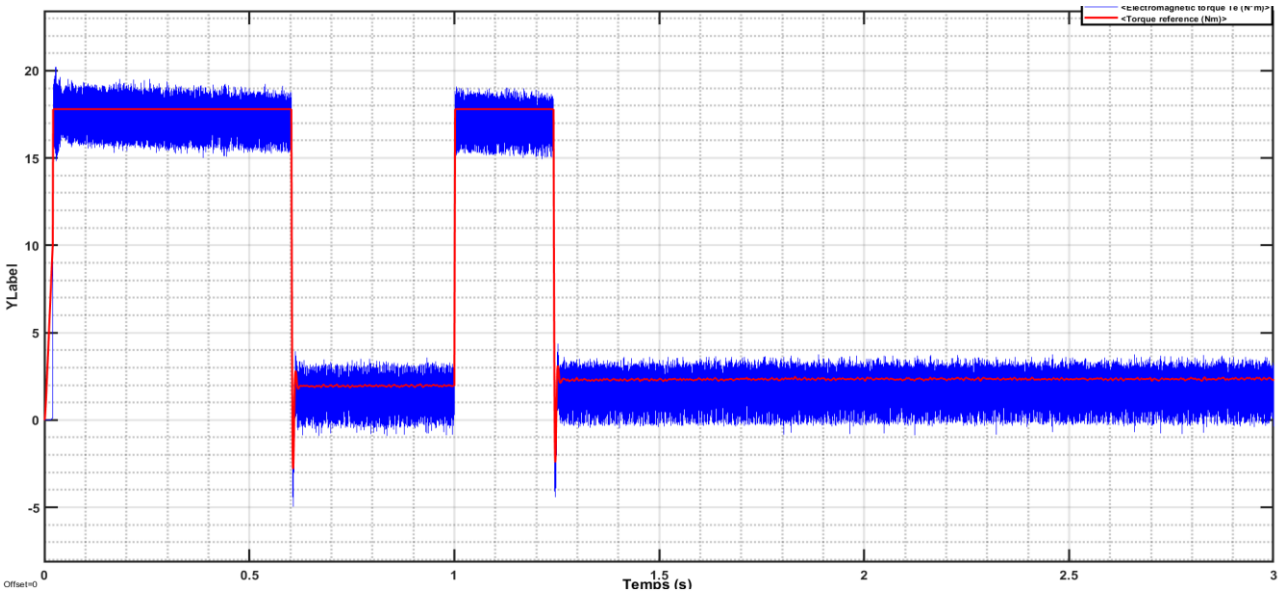


Figure III. 9: coubel Electromagnetic torque Te (N*m)

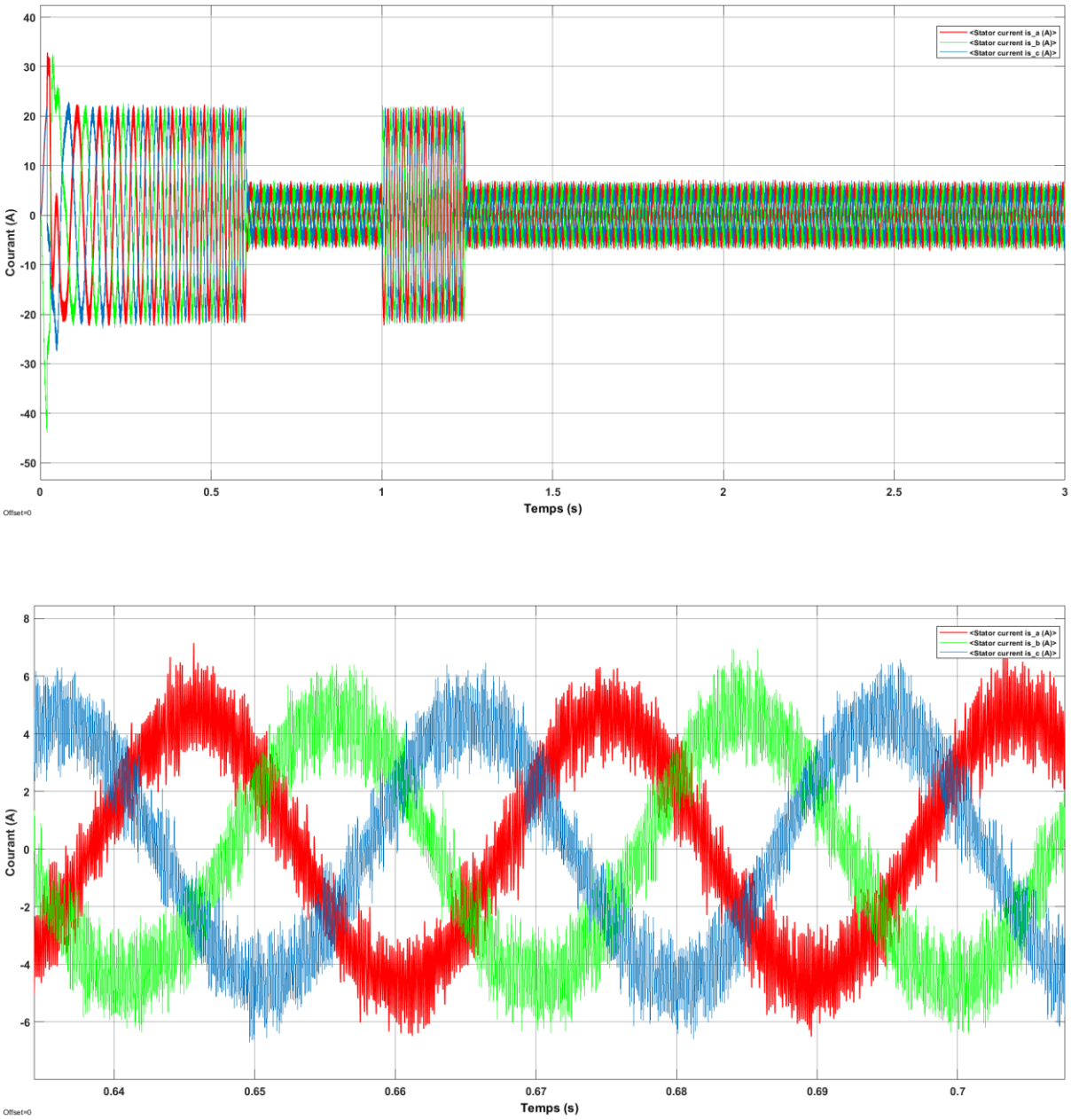


Figure III. 10: courant de stator is a b c (A)

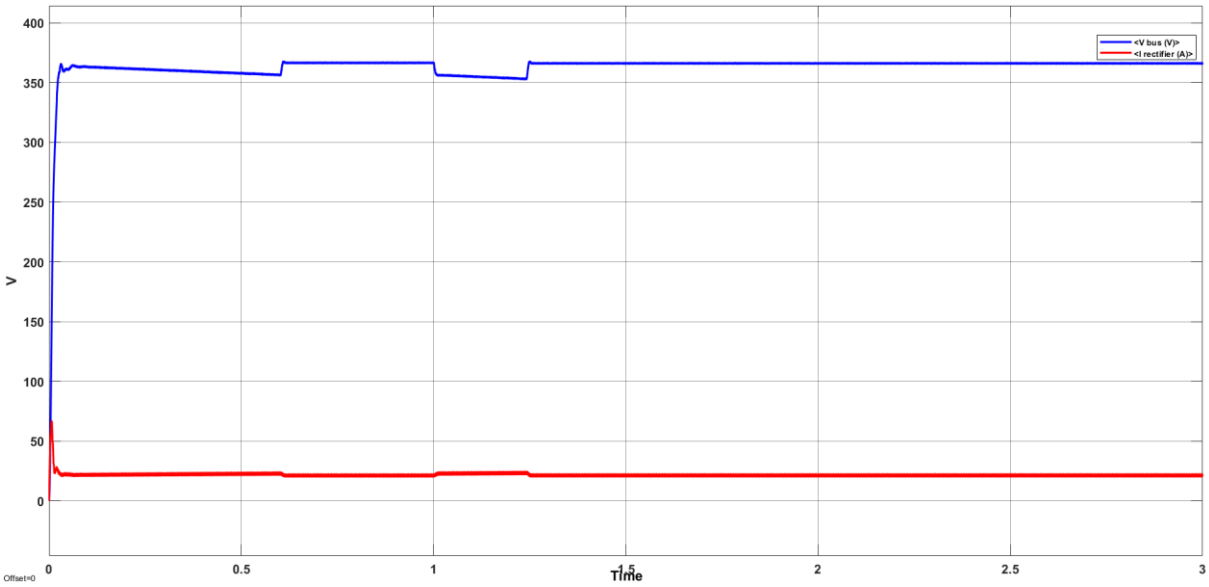


Figure III. 11:Rotor speed (wm)

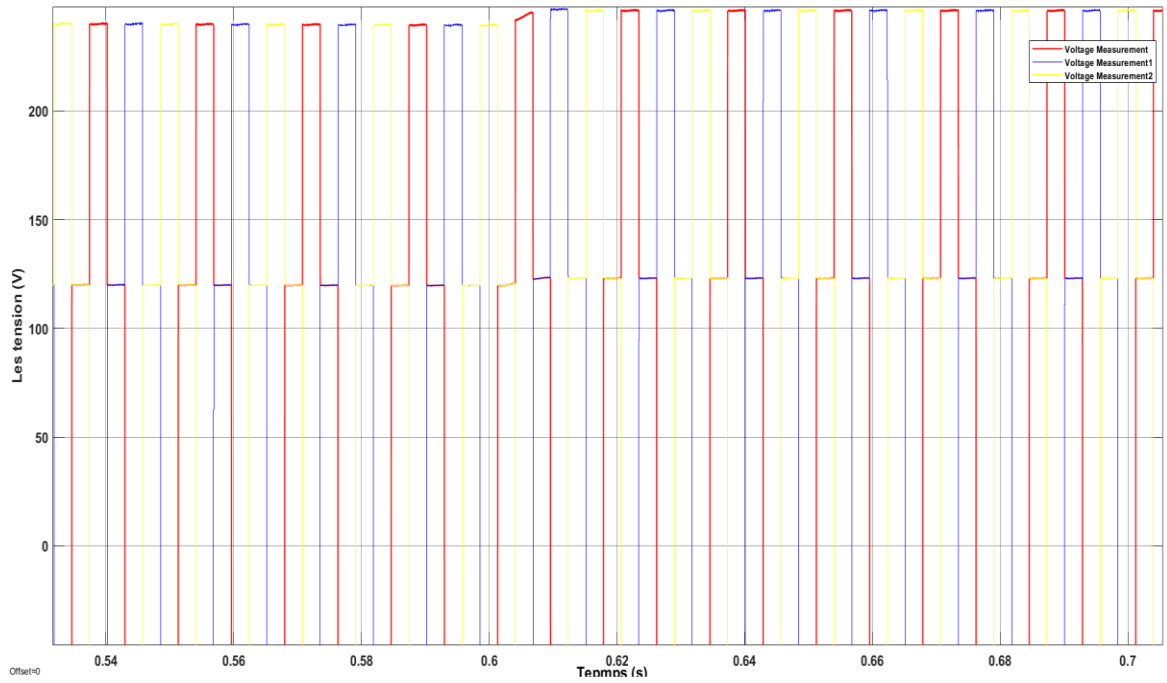


Figure III. 12: voltage Stator vs d q (V)

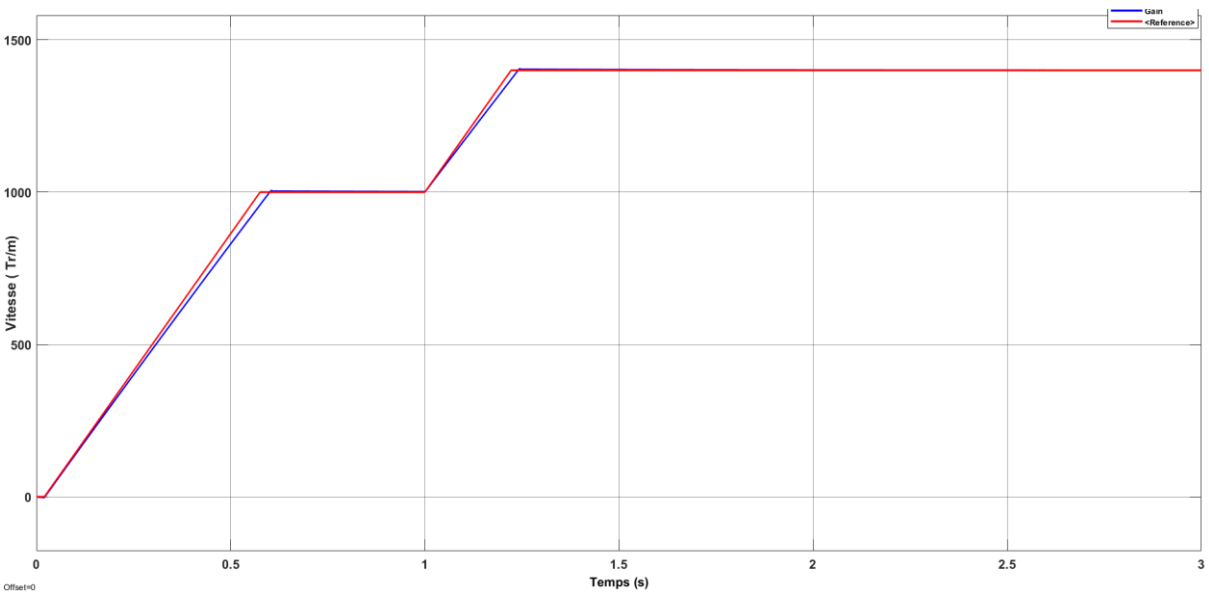


Figure III. 13: La vitesse angulaire

III.4. Étude du contrôle/ commande de la machine asynchrone

III.4.1. Importance, objectifs et choix d'une stratégie de commande

Le contrôle de la force électromagnétique de la machine asynchrone tubulaire est essentiel pour garantir le bon fonctionnement du système de micro-cogénération. Il joue un rôle fondamental dans l'interaction physique entre cette composante et la partie thermomécanique, qui a été étudiée dans le chapitre 2. le choix d'une stratégie de commande pour une machine asynchrone dans un système de micro-cogénération vise à réguler la puissance, à optimiser le rendement, à contrôler la vitesse et la fréquence, à gérer les variations de charge, à assurer la stabilité du système et à protéger la machine asynchrone, le tout dans le but d'assurer un bon fonctionnement global du système de micro-cogénération.

De plus, il est nécessaire d'imposer une force de type frottement visqueux qui agit contre le mouvement du piston. Cette action vise à optimiser le rendement du moteur Stirling et à maximiser la récupération de l'énergie mécanique fournie par celui-ci. L'équation (2.4) rappelle cette relation fondamentale entre la force électromagnétique appliquée et les performances du système.

$$F_{\text{gene}}(t) = -C_{palt} \cdot \frac{dy_p(t)}{dt}$$

La forme temporellement sinusoïdale de la force mentionnée précédemment est uniquement prise en compte dans notre système. En effet, la consigne de la force électromagnétique est générée par le régulateur P.I.D du moteur Stirling qui a été étudié dans le chapitre 2. Cette consigne de force électromagnétique est calculée par le régulateur en fonction du point de fonctionnement spécifique du moteur Stirling.

L'objectif est de développer une commande capable de contrôler instantanément la force électromagnétique de la MAS. Dans le cadre de cette thèse, la commande étudiée est la commande vectorielle à flux orienté à paramètres fixes, indépendamment de la vitesse et de l'état de saturation magnétique de la machine.

La commande vectorielle, qui est devenue relativement courante, est susceptible de répondre aux exigences élevées en termes de dynamique des oscillations mécaniques du piston-mover.

III.4.2. Principe de la commande vectorielle à flux orienté

La commande vectorielle permet de transformer les grandeurs électriques dans le repère de Park en deux composantes indépendantes : une composante de flux et une composante de couple.

$$F_z(t) = \frac{3}{2} \cdot \frac{\pi}{\tau} \cdot \frac{M}{L_r} \left(\varphi_{rd} \cdot i_{sq} - \varphi_{rq} \cdot i_{sd} \right) \qquad (3.38)$$

L'expression de la force électromagnétique dans l'équation (3.1) montre que pour contrôler cette force, il est nécessaire de contrôler à la fois le flux rotorique φ_r et le courant statorique i_s. Cependant, ces deux grandeurs sont fortement couplées, ce qui rend difficile l'établissement d'une loi de régulation simple.

La commande vectorielle à flux orienté permet de résoudre ce problème en premier lieu en découplant ces deux grandeurs. Pour ce faire, les grandeurs sont modélisées par deux vecteurs tournants dans le repère de Park. L'axe d de ce repère est aligné avec le vecteur de flux rotorique

En utilisant cette approche, la commande vectorielle à flux orienté permet de contrôler de manière indépendante le flux et le couple dans une machine électrique. Cela offre des avantages significatifs en termes de précision et de réactivité du contrôle, ce qui permet d'optimiser les performances globales du système.

$$\begin{cases} \varphi_{ri} = 0 \\ \varphi_r = \varphi_{rd} \end{cases} \qquad (3.39)$$

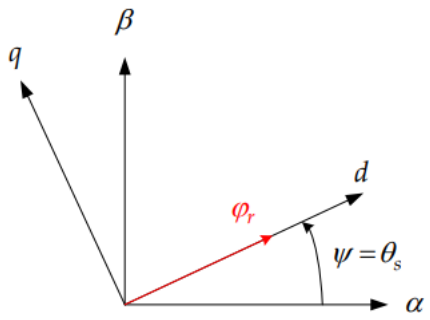


Figure III. 14: Le vecteur de flux rotorique, aligné sur l'axe d, dans la commande vectorielle à flux orienté.

Dans cette figure, le repère α, β est fixe (stator). L'angle de transformation est égal à φ_s, la position du champ tournant statorique. Ainsi, dans ce repère, le vecteur du flux rotorique ne possède désormais qu'une seule composante selon l'axe d. Le flux rotorique et le courant statorique deviennent ainsi découplés dans l'expression suivante :

$$F_{\text{gene}} = \kappa \cdot \varphi_{rd} i_{\text{sq}} \qquad \text{avec } \kappa = \frac{3}{2} \cdot \frac{\pi}{\tau} \cdot \frac{M}{L_r} = C^{\text{te}} \qquad (3.40)$$

D'où F_{gene} est la force électromagnétique de la TLIG, équivalent F_z F dans l'expression (3.1). L'expression (3.3) nous permet de saisir une stratégie de commande semblable à la commande d'une machine à courant continu (MCC). En effet, le contrôle du flux inducteur est indépendant

du contrôle du courant d'induit qui est directement proportionnel à la force électromagnétique. Deux boucles d'asservissement indépendantes seront établies :

– Une boucle d'asservissement du flux rotorique, φ_{rd} . Cette grandeur sera maintenue constante comme le flux d'excitation d'une MCC et idéalement, à la valeur constante qui maximise le rendement.

– Une boucle d'asservissement du courant statorique, i_{sd}. Ce courant est directement proportionnel à la force F_{gene} à travers d'un gain constant. Alors, comment placer le vecteur du flux rotorique sur l'axe d du repère en tout moment ? Pour ce faire, il faut procurer l'information sur la position instantanée du flux rotorique par la méthode de l'estimation.

Le module du flux rotorique est estimé à partir de la valeur mesurée de i_{sd} par:

$$\varphi_{rd} = \frac{M}{\tau_r p+1} \cdot i_{sd} \tag{3.41}$$

Le flux rotorique est en retard de phase par rapport au courant statorique. La condition pour l'angle de transformation du repère de Park pour que l'axe d soit calé sur le vecteur du flux rotorique est la suivante :

$$\theta_s = \int_0^t \omega_s dt = \int_0^t \left(\omega_r + \frac{\pi}{\tau} v\right) dt = \int_0^t \left(\frac{M}{\tau_r}, \frac{i_{s\varphi}}{\varphi_{rd}} + \frac{\pi}{\tau} v\right) dt \tag{3.42}$$

Cet angle sera introduit dans la matrice de transformation directe et inverse de Park dans la commande vectorielle. Cette méthode d'estimation de la position du flux rotorique est relativement simple et ne requiert pas beaucoup de calcul en temps réel. Cependant, elle est sensible aux variations de la constante de temps rotorique. En réalité, sans une mesure directe de l'angle φ_r, il n'est pas possible de confirmer si φ_r est instantanément et exactement aligné avec l'axe d. La précision de cette estimation sera justifiée ultérieurement par la comparaison entre la consigne et la réponse des grandeurs à asservir.

III.4.3. Établissement des chaînes de commande

III.4.3.1. Contrôle du flux rotorique

À partir du modèle dynamique de la MAS, avec l'hypothèse que φ_{rq}= 0 , nous avons l'expression de la tension statorique :

$$v_{sd} = R_s i_{sd} + L_s \sigma \frac{di_{sd}}{dt} + \frac{M}{L_r} \frac{d\varphi_{nd}}{dt} - \omega_s L_s \sigma i_{sq} \tag{3.43}$$

D'où, σ est le coefficient de distorsion ou de Blondel. Le flux rotorique sera gardé constant, nous avons donc :

$$\frac{d\varphi_{rd}}{dt} = 0 \tag{3.44}$$

Le terme dit « de couplage », contenant la composante du courant statorique de l'axe q i_{sd} , est supposé fixe:

$$e_{sd} = \omega_s L_s \sigma i_{sq} \tag{3.45}$$

Nous avons alors la tension statorique de l'axe d :

$$v_{sd} + e_{sd} = R_s i_{dd} + L_s \sigma \frac{di_{sd}}{dt} \quad (3.46)$$

En appliquant la transformation de Laplace à l'expression ci-dessus, nous obtenons :

$$\frac{I_{sd}(p)}{V_{sd}(p)+E_{sd}(p)} = \frac{1}{R_s+L_s\sigma p} \quad (3.47)$$

Pour contrôler le flux rotorique, il y a de différentes manières de mettre en œuvre la chaîne de régulation. Dans la mesure où nous disposons des résultats de mesure sûrs de l'inductance mutuelle M de la machine (par exemple, dans le cas de la MAS tournante traditionnelle travaillant longtemps en régime permanent), le flux rotorique peut être directement la grandeur à contrôler grâce à l'estimation du flux (cf. équation 3.4). La fonction de transfert de la boucle ouverte s'écrit :

$$f_\varphi(p) = \frac{\Phi_{rd}(p)}{V_{sd}(p)} = \frac{M}{(R_s+L_s\sigma p)(\tau_r p+1)} \quad (3.48)$$

Cependant, dans le cas où l'inductance mutuelle cyclique est l'objet de fluctuation, la mesure de M n'est pas fiable (notamment dans une machine linéaire où M peut varier constamment avec la vitesse du mover à cause des effets d'extrémités), le fait d'introduire la valeur constante de M dans l'estimation du flux est devenu imprécis. Alors, la grandeur d'asservissement n'est plus, Φ_{rd} mais i_m (courant magnétisant) ou tout simplement i_{sd}.

Le courant i_m est le courant magnétisant, défini par

$$i_m = \frac{\varphi_{rd}}{M} \quad (3.49)$$

Dans le cas où m i est la grandeur à contrôler, la fonction de transfert de la boucle ouverte devient :

$$f_\varphi(p) = \frac{I_m(p)}{V_{sd}(p)} = \frac{1}{(R_s+L_s\sigma p)(\tau_r p+1)} \quad (3.50)$$

Finalement, i_{sd} est la grandeur d'asservissement, la fonction de transfert est :

$$f_\varphi(p) = \frac{I_{sd}(p)}{V_{sd}(p)} = \frac{1}{(R_s+L_s\sigma p)} \quad (3.51)$$

La chaîne de régulation pour contrôler le flux est illustrée dans la figure suivante dans laquelle la boucle d'asservissement de i_{sd} , plus rapide que celle du flux (ou i_m), constitue la boucle interne.

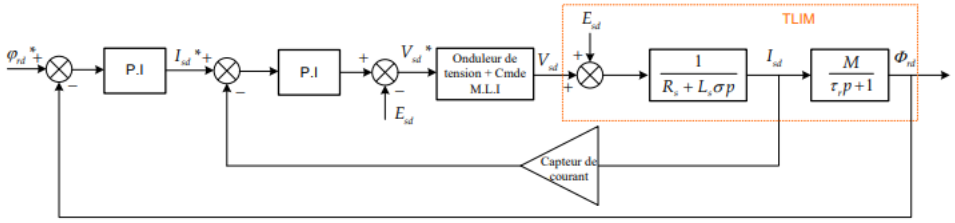


Figure III. 15: Boucle d'asservissement en cascade du flux rotorique.

Contrôle du courant statorique l'axe q (proportionnel avec la force) Nous obtenons à partir du modèle dynamique, avec l'hypothèse que Φ_{rd} =0 :

Avec le terme dit « de couplage », contenant des composantes sur l'axe d, considéré comme constant si le contrôle du flux montré précédemment est opérationnel :

La valeur de ce terme, reconstituée à partir des mesures des courants et de l'estimation du flux, sera rajoutée à la sortie des correcteurs comme termes de compensation. En appliquant la transformation de Laplace, nous obtenons la fonction de transfert de 1er ordre suivante :

Finalement, la chaîne de commande sur l'axe q est montrée dans la figure suivante :

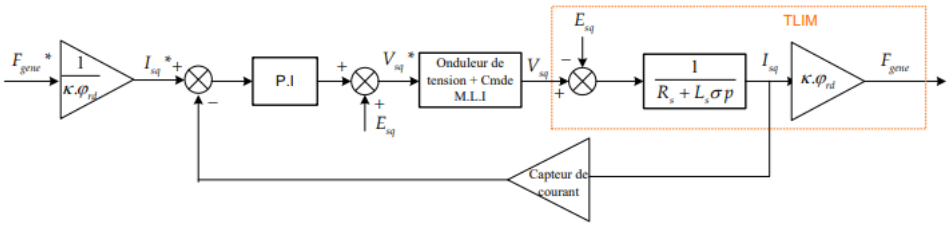


Figure III. 16: Boucle d'asservissement du courant is (force électromagnétique).

III.4.2.2. Synthèse des correcteurs P.I :

Les correcteurs P.I sont calculés en se basant sur les fonctions de transfert illustrées dans les Figures **III.15**et **III.15**. Afin de compenser les termes de couplage E_{sd}, E_{sq}dans la machine, nous ajoutons, à la sortie des correcteurs P.I, les termes de compensation E_{sd}, E_{sq} mais avec un signe inverse (Figure **III.16**).

La méthode de synthèse du correcteur P.I pour une fonction de transfert de premier ordre est la méthode de compensation de pôle et d'imposition de la constante de temps de la boucle fermée. Pour une fonction de transfert de deuxième ordre, un correcteur P.I peut être suffisant en utilisant la méthode d'imposition de la marge de phase et de la bande passante.

III.4.2.3. Synoptique de la commande vectorielle à flux orienté

Pour résumer la méthode, un synoptique de la commande vectorielle à flux orienté est montré sur la figure suivante :

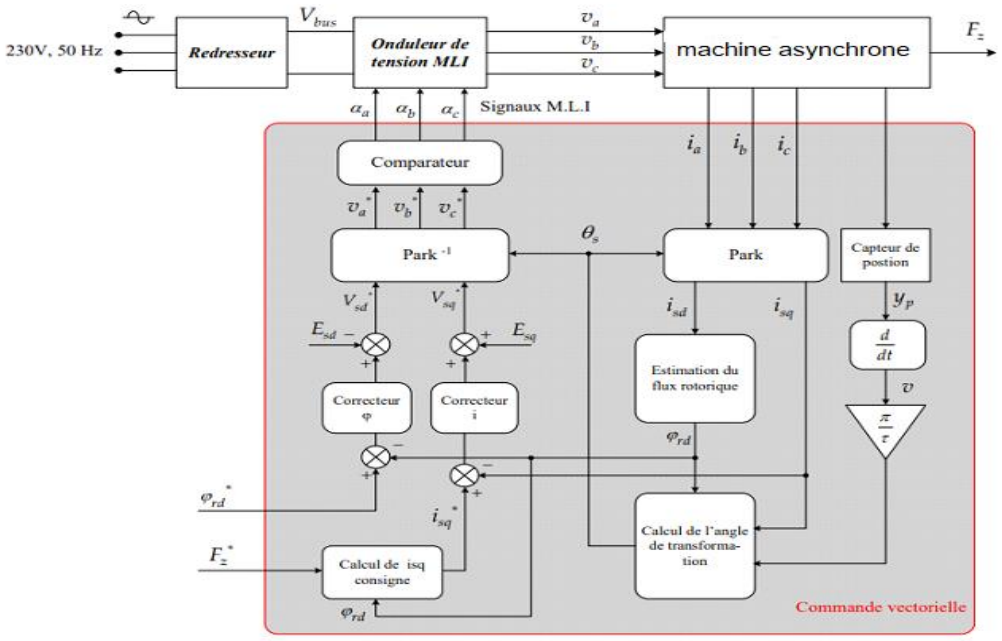


Figure III. 17: Synoptique de la commande vectorielle à flux orienté utilisant l'estimation du flux rotorique

La commande vectorielle utilise les informations du flux rotorique et de la force électromagnétique pour générer les commandes nécessaires. Elle requiert des mesures en temps réel des courants triphasés du stator ainsi que la position ou la vitesse du rotor afin de reconstituer le flux rotorique. En utilisant une méthode d'estimation, la fréquence du stator est calculée en se basant sur la mesure de la position du rotor et une estimation de la fréquence du rotor.

La valeur reconstituée du flux est ensuite comparée à la consigne pour obtenir l'erreur du flux, qui est utilisée comme entrée pour un correcteur proportionnel-intégral (P.I). Étant donné que le courant i_{sd}est proportionnel à la force électromagnétique, le contrôle de la force est équivalent au contrôle de ce courant. Par conséquent, la mesure du courant i_{sd}est également comparée à sa consigne, représentée par sq_rd_F_i, afin d'obtenir l'erreur du courant, qui est utilisée comme entrée pour un deuxième correcteur P.I. Les boucles de régulation du flux et du courant fonctionnent en parallèle.

Les correcteurs de type P.I sont utilisés pour améliorer la précision de la régulation, en permettant d'atteindre une erreur statique nulle. Les correcteurs génèrent les consignes de tension pour l'onduleur triphasé qui alimente la machine. La synthèse des correcteurs se fait en utilisant les fonctions de transfert entre les tensions du stator et les courants du stator, ce qui sera expliqué dans le paragraphe suivant. Les consignes de tension sont ensuite comparées dans un comparateur, dont les sorties correspondent aux signaux de modulation par largeur d'impulsion (M.L.I). Ces signaux M.L.I commandent les interrupteurs à semi-conducteurs de l'onduleur triphasé, qui va découper la tension continue pour fournir trois tensions alternatives de valeur moyenne (par cycle de découpage) égales aux consignes.

III.4.3. Simulation de la commande vectorielle à flux orienté appliquée à la MAS :

Disposant de la simulation de la MAS sur Matlab/Simulink (annexe B), une simulation de la commande vectorielle à flux orienté a été réalisée. Cette simulation est l'étape de préparation pour une validation expérimentale de la commande sur la maquette. Les contraintes sont définies comme dans le contexte réel avec les consignes de force qui varient sinusoïdalement dans le temps. En effet, les paramètres introduits dans le modèle de la MAS sont les suivants :

Pour asservir le contrôle du flux rotorique, une boucle d'asservissement du courant magnétisanta été établie. Les correcteurs P.I utilisés sont :

Tableau III. 2: Paramétrage des correcteurs dans l'étude de simulation de la commande vectorielle de la MAS

Boucles d'asservissement	Les gains Ki	Les const .de temps Ti
Du courant magnétisant	180	0,01
Du courant statorique l'axe q	30	0,001

Dans cette simulation, les frottements mécaniques sont négligés. Les paramètres montrés dansle Tableau 3.11

Le programme de simulation est montré dans la figure suivante, avec les détails des blocs dans l'annexe C.

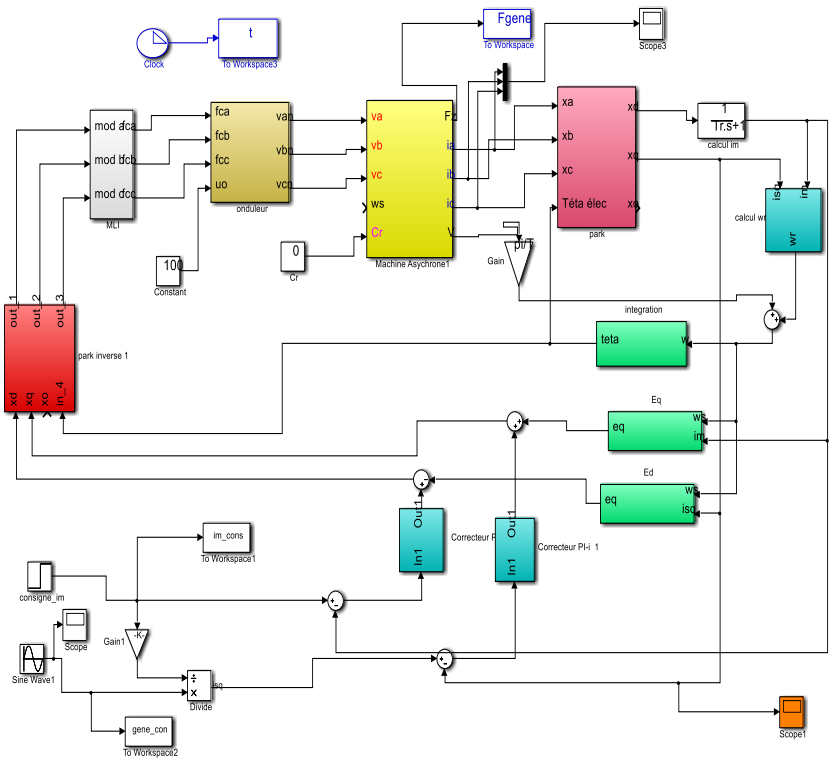


Figure III. 18: Simulation de MAS commandée par la commande vectorielle en mode moteur.

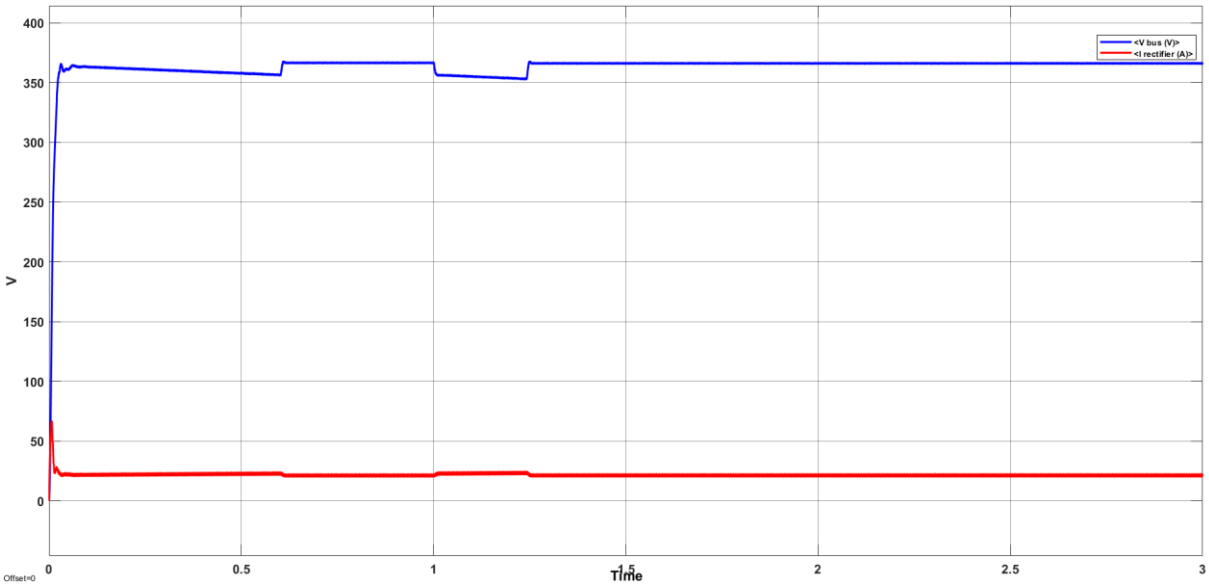


Figure III. 19: V bus (V)

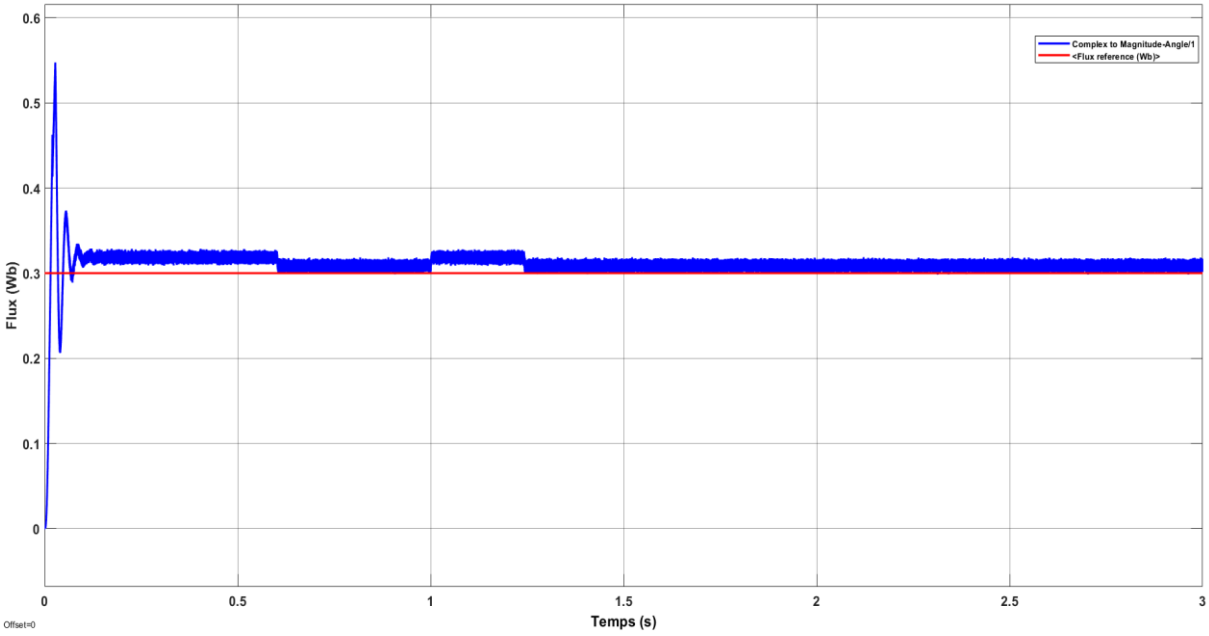


Figure III. 20: flux Stator phis _d q (V, s) avec

III .4.3.1. L'interprétation :

Une simulation de machine asynchrone avec commande vectorielle dans MATLAB Simulink vous permettra d'étudier et de contrôler le comportement de la machine asynchrone en utilisant des techniques de commande avancées.

Voici quelques résultats clés que vous pourriez obtenir :

1. Réponse en vitesse : Vous pouvez observer comment la machine asynchrone réagit aux variations de la consigne de vitesse. La commande vectorielle devrait permettre d'obtenir une réponse dynamique rapide et précise, en ajustant le flux et le couple du moteur de manière indépendante.

2. Réponse en couple : Vous pouvez analyser comment le moteur réagit aux variations de la consigne de couple. La commande vectorielle permet de régler avec précision le couple fourni par le moteur, ce qui est important dans de nombreuses applications industrielles.

3. Efficacité énergétique : Vous pouvez évaluer l'efficacité énergétique de la machine asynchrone sous différentes conditions de fonctionnement. La commande vectorielle peut permettre d'optimiser la consommation d'énergie en ajustant les paramètres de contrôle pour minimiser les pertes et maximiser le rendement.

4. Stabilité du système : Vous pouvez étudier la stabilité du système et observer si des oscillations ou des instabilités apparaissent. La commande vectorielle vise à maintenir le système stable et à réduire les effets indésirables tels que les vibrations ou les variations de vitesse.

5. Réponse transitoire : Vous pouvez analyser comment le moteur réagit lors de démarrages, arrêts ou changements brusques de consigne. La commande vectorielle devrait permettre d'obtenir une réponse transitoire rapide et sans à-coups.

Il est important de noter que les résultats de la simulation peuvent varier en fonction des paramètres de la machine asynchrone, des réglages de la commande vectorielle et des conditions spécifiques de la simulation. Par conséquent, il est nécessaire d'analyser les résultats de manière approfondie et de les interpréter en fonction du contexte et des objectifs de votre étude.

III.5. Conclusion :

La commande vectorielle avec machine asynchrone est une technique avancée utilisée dans le contrôle des moteurs électriques. Elle permet de contrôler avec précision la vitesse et le couple du moteur en utilisant des algorithmes sophistiqués et des calculs vectoriels.

La machine asynchrone, également appelée moteur à induction, est largement utilisée dans de nombreuses applications industrielles en raison de sa fiabilité et de son coût relativement bas. Cependant, son contrôle traditionnel basé sur la commande en boucle ouverte présente certaines limitations en termes de précision et de réponse dynamique.

La commande vectorielle, également connue sous le nom de commande à flux orienté, surmonte ces limitations en permettant un contrôle précis du moteur asynchrone. Elle consiste à décomposer les courants et tensions du moteur en deux composantes : une composante de flux et une composante de couple. En ajustant ces deux composantes de manière indépendante, il est possible de contrôler la vitesse et le couple du moteur de manière plus précise.

L'avantage de la commande vectorielle avec une machine asynchrone réside dans sa capacité à fournir un couple élevé à basse vitesse, une réponse dynamique rapide et une grande précision de contrôle. Cela la rend particulièrement adaptée aux applications nécessitant un contrôle précis de la vitesse et du couple, telles que les robots industriels, les machines-outils et les systèmes de positionnement.

En conclusion, la commande vectorielle avec machine asynchrone est une approche avancée et efficace pour le contrôle des moteurs électriques. Elle permet d'obtenir une meilleure performance et une plus grande précision de contrôle par rapport aux méthodes traditionnelles, ce qui en fait un choix privilégié pour de nombreuses applications industrielles.

Chapitre IV :
Sheema globales du systéme de micro-cogénération

IV.1. Introduction :

Dans ce chapitre, nous allons traiter tout d'abord d'une étude de modélisation et de commande de la chaîne de convertisseurs statiques de puissance, qui servira à connecter le système de micro-cogénération au réseau public. Ensuite, nous allons construire un modèle global du système en assemblant tous les modèles que nous avons étudiés depuis le début de ce mémoire à savoir le moteur Stirling, la machine asynchrone et la chaîne de convertisseurs statiques. Ce modèle global sera appelé le « banc d'essai virtuel » qui aura pour objectif d'étudier le fonctionnement en mode générateur de la MAS, de valider le contrôle/ commande du système global, de valider l'aptitude du fonctionnement de la chaîne des convertisseurs couplée avec notre système et enfin de calculer le rendement électrique global. La construction du banc d'essai virtuel sous sera ainsi détaillée.

Dans le banc d'essai virtuel, la chaîne thermomécanique sera préservée comme dans l'étude de prédimensionnement présentée lors du chapitre 2. Pour améliorer le rendement électrique global, il sera nécessaire d'optimiser la géométrie ainsi que le fonctionnement de la machine asynchrone couplée à la chaîne des convertisseurs statiques. Le modèle global du système sera un élément principal de l'étude d'optimisation, permettant de calculer la (les) fonction(s) d'objectif telle que la puissance électrique injectée au réseau.

IV.2. Banc d'essai virtuel du système global

IV.2.1. Objectifs d'un banc d'essai virtuel

Nous avons étudié trois éléments principaux constituant le système de micro-cogénération : le moteur Stirling «, la machine asynchrone et la chaîne des convertisseurs statiques. L'état de connaissances sur le système est récapitulé dans le tableau suivant :

Tableau IV. 1:État des études du système de micro-cogénération**.**

	Étude théorique	
	Modèle analytique	Stratégie de commande
Moteur Stirling	✓	✓
Machine Asynchrone	✓	✓
Chaîne des convertisseurs statiques de puissance	✓	✓

Afin d'illustrer la chaîne énergétique du système global, nous proposons le schéma suivant. Inspiré de la REM (Représentation Energétique Macroscopique), ce schéma sert à illustrer des interactions énergétiques entre des différents éléments principaux du système :

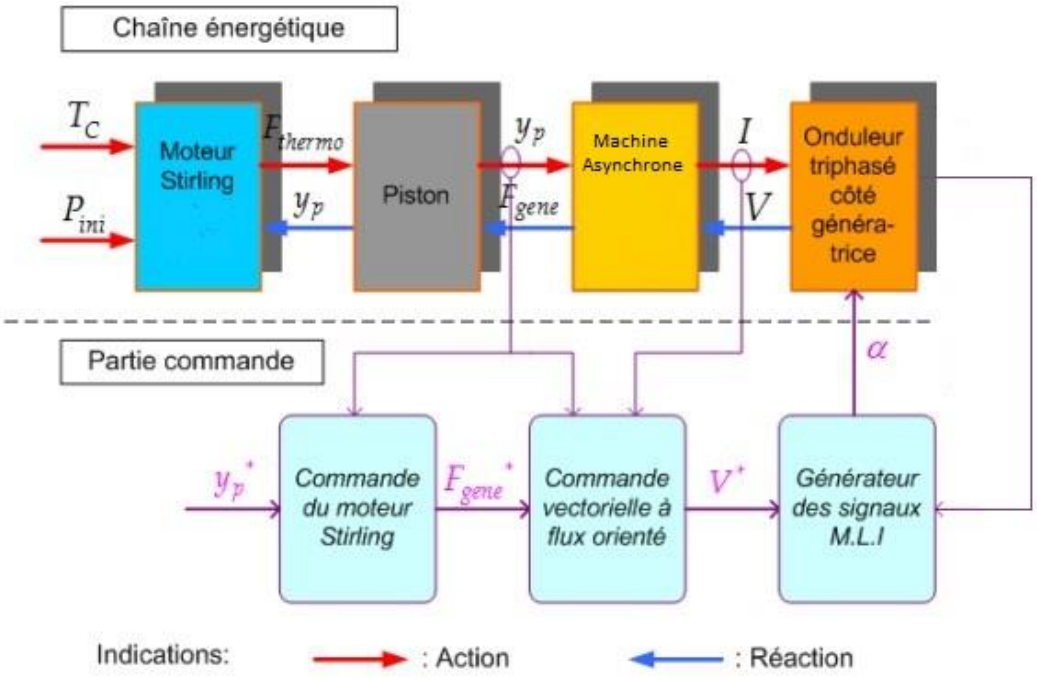


Figure IV. 1: Représentation énergétique du système de micro-cogénération à moteur Stirling

IV.2.2. Construction du banc d'essai virtuel :

Cette partie consiste à la mise en œuvre d'un couplage des différents modèles du système micro -cogénérateur connecté au réseau. Le synoptique du banc d'essai virtuel est défini par le schéma ci-dessous :

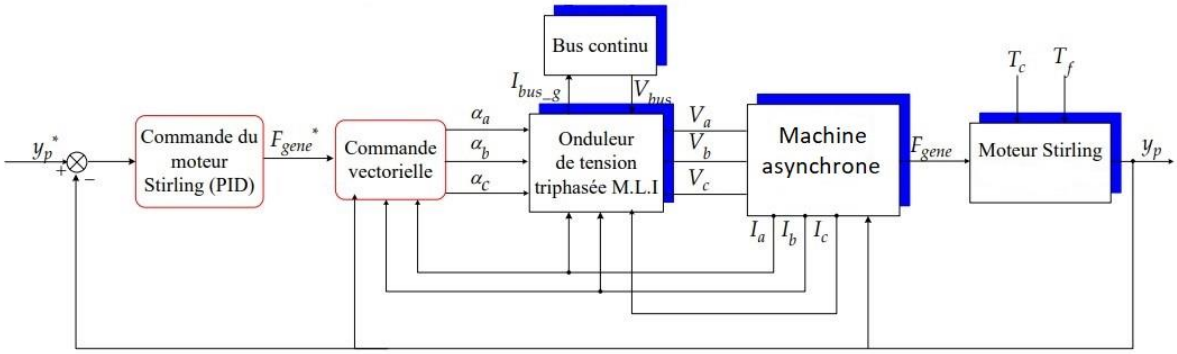


Figure IV. 2: Synoptique du banc d'essai virtuel du système de micro-cogénération.

IV.3. Conclusion :

Notre étude a porté sur trois éléments clés du système de micro-cogénération : le moteur Stirling, la machine asynchrone et la chaîne des convertisseurs statiques. Nous avons examiné les caractéristiques, les avantages et les applications de chaque composant, ainsi que leur contribution au fonctionnement global du système.

En combinant le moteur Stirling, la machine asynchrone et la chaîne des convertisseurs statiques, le système de micro-cogénération présente un potentiel considérable pour répondre aux besoins énergétiques des applications résidentielles, commerciales et industrielles. Il offre une solution efficace, économique et respectueuse de l'environnement en permettant la production simultanée d'électricité et de chaleur à partir de diverses sources d'énergie.

Cependant, malgré les avantages de ces composants, il est important de prendre en compte les contraintes techniques, économiques et réglementaires lors de la conception et de l'implémentation d'un système de micro-cogénération. Une analyse approfondie de ces facteurs est essentielle pour maximiser les avantages du système et assurer sa viabilité à long terme.

En conclusion, l'étude des composants clés du système de micro-cogénération nous a permis de comprendre leurs caractéristiques individuelles ainsi que leur synergie dans la production d'électricité et de chaleur. Cela ouvre la voie à des applications plus larges de la cogénération, contribuant ainsi à une utilisation plus efficace des ressources énergétiques et à une réduction des émissions de gaz à effet de serre.

Conclusions général :

En conclusion, le système de micro-cogénération basé sur le moteur Stirling, la machine asynchrone et la chaîne des convertisseurs statiques offre une solution prometteuse pour la production simultanée d'électricité et de chaleur à petite échelle. Ces trois éléments clés ont été étudiés en détail et présentent chacun des avantages spécifiques qui contribuent au fonctionnement global du système.

Le moteur Stirling se distingue par son rendement élevé, sa faible émission de polluants et sa compatibilité avec diverses sources de chaleur. Il offre une conversion efficace de la chaleur en électricité grâce à un cycle thermodynamique fermé, ce qui en fait une option attrayante pour la cogénération.

La machine asynchrone, de son côté, se caractérise par sa simplicité de conception, son coût réduit et sa robustesse. Elle peut fonctionner avec différents types de carburants et s'adapter à une variété de charges électriques, ce qui en fait un choix polyvalent pour la cogénération. Les progrès technologiques récents ont également amélioré ses performances globales, notamment en termes d'efficacité et de contrôle.

La chaîne des convertisseurs statiques, composée d'onduleurs, de redresseurs et de régulateurs, joue un rôle crucial dans la conversion et la gestion de l'énergie produite par le moteur Stirling et la machine asynchrone. Ces convertisseurs garantissent une sortie électrique stable et de haute qualité, facilitent la connexion au réseau électrique et permettent une gestion optimisée de l'énergie produite.

En combinant ces trois éléments, le système de micro-cogénération offre une solution efficace, économique et respectueuse de l'environnement pour répondre aux besoins énergétiques des applications résidentielles, commerciales et industrielles. Il permet une utilisation plus efficace des ressources énergétiques en produisant simultanément de l'électricité et de la chaleur, ce qui peut entraîner des économies d'énergie substantielles et une réduction des émissions de gaz à effet de serre.

Cependant, il est essentiel de prendre en compte les contraintes techniques, économiques et réglementaires lors de la conception et de l'implémentation d'un tel système. Une analyse approfondie de ces facteurs est nécessaire pour maximiser les avantages du système et assurer sa viabilité à long terme.

Dans l'ensemble, le système de micro-cogénération basé sur le moteur Stirling, la machine asynchrone et la chaîne des convertisseurs statiques présente un potentiel considérable pour améliorer l'efficacité énergétique et réduire l'impact environnemental. Son adoption peut contribuer à la transition vers une production d'énergie plus durable et plus responsable.

Les annexes

Annex A: Details de simulation et command du Moteur Stirling

Paramètre géométrique

$A_p = 0{,}0121\ \text{m}^2$ $V_{EF} = 3,1467.10^{-4}\ \text{m}^3$ $Y_{pc} = 0{,}15\ \text{m}$

$m_p = 6\ \text{kg}$ $A_d = 0{,}0121\ \text{m}^2$ $V_{EC} = 4,2072.10^{-4}\ \text{m}^3$ $Y_{de} = 0{,}1\ \text{m}$

$m_d = 0{,}3\ \text{kg}$ $A_{pi} = 0{,}0113\ \text{m}^2$ $V_r = 8,765.10^{-4}\ \text{m}^3$

$V_{\text{ini_b}} = 78.10^{-4}\ \text{m}^3$ $A_r = 9,6211.10^{-4}\ \text{m}^2$

$V_{\text{ini_}m} = 1{,}4432 \cdot 10^{-4}\ \text{m}^3$

Paramètres thermiques et mécaniques

$T_c = 650\ \text{K}$ $P_{ini} = 1,375.10^6 Pa$ $C_{Hp} = 20\text{Nm}^{-1}s$

$y_{p\max} = 0{,}0223\ \text{m}$ $T_f = 320\ \text{K}$ $C_{Hd} = 15\text{Nm}^{-1}\ \text{s}$

Annex B: Details sur la modélisation analytique de la machine Asynchrone

v	Fs	P	Rs	Rr	Lr	Ls	Lm	J	F
220	50	2	4.85	3.805	0.274	0.274	0.258	0.031	0.008
SIGmA	Cr	Fn	Wrn	Tr	Ts	T	Tp		
$1-\frac{lm^2}{Ls*Lr}$	0.2	1	$\frac{1477 * 2 * pi}{60}$	$\frac{Lr}{Rr}$	$\frac{Ls}{Rs}$	$\frac{(2 * \frac{J}{Tr})}{\frac{J}{Tr\text{^}2}}$	$\frac{1}{21 * 50}$		

Boucles d'asservissement	**Les gains Ki**	**Les const .de temps Ti**
Du courant magnétisant	180	0,01
Du courant statorique l'axe q	30	0,001

Bibliographie :

[1]. "Micro-Cogeneration: Towards Decentralized Energy Systems" - Par Robert Steinberger-Wilckens, Rupert Gammon, et Karen Renshaw (2019).

[2]. "Cogeneration: Combined Heat and Power (CHP)" - Par Ashok D. Rao (2019).

[3]. "Micro-Cogeneration Systems" - Par S.C. Bhatia et S.M. Sivakumar (2018).

[4]"Cogeneration and District Energy Systems: Modelling, Analysis and Optimization" - Par Marc A. Rosen (2017).

[5] ATEE Club Cogénération (2015) : Il s'agit probablement d'une publication ou d'une source d'information du Club Cogénération de l'Association technique énergie environnement (ATEE) en France. Cette source pourrait fournir des données sur la puissance installée de la cogénération en France en 2015.

[6] Dorer, V., & Weber, C. (2007) : Ceci est connu pour être un article, une étude ou un trait de vie de comparaison entre la cogénération et les modes de production conventionnels que sont l'électricité et la chaleur employés. Même source d'énergie primaire.

[7] Possidente, G., et al. (2006) : Référence pourrait être un article, une étude ou un document de recherche qui discute du rendement global standard de la micro-cogénération et de ses avantages par port à la production conventionnelle d'électricité à partir de gaz naturel.

[8]Ren, H., Gao, W., & Zhou, N. (2007). Performance analysis of a residential-scale cogeneration system for multi-family buildings in Japan. Energy and Buildings, 39(12), 1161-1169.

[9]Andlauer, C. (2011). Overview of residential micro-combined heat and power in Europe. In Proceedings of the ASME 2011 5th International Conference on Energy Sustainability (pp. 707-714). American Society of Mechanical Engineers.

[10]Bianchi, M., De Pascale, A., & Melino, F. (2011). Micro CHP systems: A state of the art review. Applied Thermal Engineering, 31(10), 1707-1717.

[11]Bouvenot, G., Michel, B., & Maréchal, F. (2014). A review of micro-CHP technologies. Applied Energy, 136, 168-185.

[12]Onovwiona, H. I., & Ugursal, V. I. (2004). Residential cogeneration systems: review of the current technology. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 8(5), 427-460.

[13]Knight, I., & Beausoleil-Morrison, I. (2005). Analysis of micro-cogeneration systems in residential applications. Energy Conversion and Management, 46(13-14), 2241-2264.

[14]Quoilin, S., Broek, M., Declaye, S., & Dewallef, P. (2013). Techno-economic survey of Organic Rankine Cycle (ORC) systems. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 22, 168-186.

[15] Milin, S. (2014). A review of small-scale CHP technologies for the residential sector: Key aspects for micro-cogeneration applications. Applied Energy, 136, 178-192

[16] [Online]. http://www.microcogeneration.info/

[17] Philippe NIKA and François LANZETTA, "Thermodynamique des moteurs Stirling," Revue 3EI, no. 57, pp. 9-17, Juin 2009.

[18] Julien BOUCHER, François LANZETTA, and Philippe NIKA, "Optimization of a dual free piston Stirling engine," Applied Thermal Engineering, no. 27, pp. 802-811, 2007.

[19] Julien BOUCHER, Isabel GARCIA-BURREL, François LANZETTA, and Phillipe NIKA, "Étude paramétrique des performances d'un cogénérateur Stirling à piston libres de type Dual," Congrès Français de Thermique, Mai 2007.

[20] E.D. Rogdakis, N.A. Bormpilas, and I.K Koniakos, "A thermodynamic study for the optimization of stable operation of free piston Stirling engines," Energy Conversion and Management, no. 45, pp. 575-593, 2004.

[21] F. de Monte and G. Benvenuto, "Reflections on free-piston Stirling engines - part 1: cycle steady operation," J. Propulsion Power 4, pp. 499-508, 1998.

[22] S Backhaus and G.W Swift, "A thermoacoustic Stirling heat engine, detailed study," Journal of the Acoustical Society of America, p. 107(6), 2000.

[23] Phillipe Nika, François Lanzetta, Julien Boucher, E Gavignet, and J.E Rakotoniaina, "Aspects dynamiques et thermiques de l'écoulement oscillant dans la matrice poreuse d'un régénérateur de machine Stirling," Congrès français de thermique, Mai 2004.

[24] Sylvie Bégot, Guillaume Layes, François Lanzetta, and Phillipe Nika, "Stability analysis of free piston Stirling engines," The European Physical Journal, 2012.

[25] Fabien Formosa and G. Despesse, "Analytical model for Stirling cycle machine design," Université de Savoie, Annecy Le Vieux,.

[26] Julien BOUCHER, "Moteurs Stirling appliqués à la cogénération," FEMTO-ST, Présentation 2006.

[27]RAGI.G .contrôle vectoriel de la machine asynchrone a rotor bobiné , thése de l'instut national polytechnique de toulouse 05 octobre 2001

[28]Berrezzek Farid. Modélisation non linéaire des machines électriques pour la commande et le diagnostic. Thèse de doctorat en sciences de l'université Badji Mokhtar-Annaba 2016.

[29] CARON.J.P.HAUTIER.J.P modilisation de la machine asynchrone edition 1995

[30] Boussalem Souad. Contrôle DTC d'une machine asynchrone. Thèse de master en électrotechnique de l'université Badji Mokhtar-Annaba 2017

[31]Mr Mebrek Yahia. Contribution à l'étude et à la modélisation des éléments d'un système photovoltaïque. Thèse de magister en physique de l'université Abou-Bekr Belkaid-Tlemcen 2011.

[32] Dr. BOUDANNA D, cours de modélisation dynamique des machines électriques , université Dr YAHIA Farés de Médéa faculté de la technologie ,département de génie électrique.