الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE DR. YAHIA FARES DE MEDEA

FACULTE DES SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE

Département du Génie Électrique et de l'Informatique



Projet de Synthèse

Présenté pour l'obtention du Diplôme
De Master en Génie Électrotechnique

Spécialité : énergies solaire et éolien

Thème

Etude et simulation d'un système autonome Hybride éolien-diesel

Proposé et dirigé par :

Mr. Tami youcef

Co promoteur :

Dr.MOUALDIA .A

Préparé et présenté par :

Mlle. REBHI Amira

Mlle.MESSILI Assma

Dédicace

Je dedis ce modeste travail à mes chères parents

pour leurs sacrifices,

et qui n'ont jamais cessé de m'encourager

Mes grands parents ; Zoulikha & Saad

que Dieu me les gardes.

Et à mes frères Oussamaet Fadhel.

Et à mes sœurs Imane, Khadidja et Houda

Et a la petit ange Zouza Hanine

et à toute la famille Messili et Mezhoud.

Et à tout mes amies:

Souma , Sousou, Donia, Yamna, Baya,

Iman, Wissam et Khadidja, .

Et spéciale dédicace à ma binome ; Amira

Et à tout ce qui j'aime et qui m'aime

Assoum

Dédicace

Je dédie ce modeste travail à mes parents les plus chères,

Pour leur sacrifice, leur tendresse, pour l'amour qu'ils m'ont offert,

pour leur patience, soutien, aide et encouragements

Que Dieu les garde pour moi.

A mes cher frères et sœurs Oussama, Aymen, Adnan, Yasser, Maha

Et les petits sidali et dorsaf

A tous les membres de ma famille qui m'ont aidé et m'en

courage afin que je réalisée ce projet.

Ensuit à mes amis tout entiers

Egalement à mes professeurs et enseignants qui m'en appris

Tous les savoirs durant tout mon cursus d'études.

Amira

Remerciement

Avant tout nous tenons nos remerciements

A' notre dieu de nos avoir donné la force et le courage

A' la suite nous tenons a' remercier vivement

Mr TAMI Youcef

Notre promoteur qui a fourni des efforts énormes par ses

Informations ses conseils et ses encouragements

Nous tenons également a' remercie messieurs

Les nombres de jury pour

L'honneur qu'ils nos ont fait en acceptant de siéger a' notre soutenance

Et toutes les professeures de département de génie électrique

A tous ce furent a' un moment ou a' toute instante partie

Prenante de ce travail

Nos plus chaleureux remerciements pour tous ceux qui de prés et de loin

Ont contribué a' la réalisation de cette mémoire

ASSMA et AMIRA

ملخص

أدت المخاوف المتزايدة حول البيئة بعد بروتوكول كيوتو إلى تشجيع استخدام الطاقات الجديدة و النظيفة .و تستعمل هذه الطاقات الجديدة لتغذية المناطق الريفية و النائية التي يبقى مشكل توصيلها بالطاقة الكهربائية متعلقا بالسعر الباهظ و التكلفة الإضافية للوقود التي تزداد بشكل كبير مع عزلة هذه المناطق . للتغلب على هذه المشاكل دراسات و بحوث متعددة قد تم توجيهها إلى فهم الأنظمة الهجينة لتوليد الطاقة الكهربائية.

الهدف الرئيسي من هذا العمل هو دراسة لمحاكاة نظام هجين لمحرك ديزل مع تور بينات الرياح الذي يلبي احتياجنا للطاقة الكهربائية و ذلك للحد من الانبعاثات الغازية.

نتائج الدراسة المتحصل عليها من خلال برنامج ماتلاب تثبت مرونة النظام المقترح مع الطلب المتغير للطاقة و ذلك للتقليل من الانبعاثات الغازية و توفير استقرار أكبر في التردد مع وجود اضطرابات ناجمة عن سرعات رياح عشوائية.

الكلمات المفتاحية: **الطاقة المتجددة ـ النظام الهجين ـ شبكة ذاتية الحكم – نظام التوأمة الرياح- الديزل**

Abstract :

Growing concerns about the environment after the Kyoto Protocol led to the use of clean and inexhaustible renewable resources. The production of energy from renewable resources in mainly implemented to supply remote rural areas. For these regions, the grid extension princes would be prohibitive and the additional cost of the fuel supply increases dramatically with isolation.To overcome these problems the research has been directed towards the concept of hybrid systems generation of electrical energy.

The main objective of this work is the study and simulation of a Wind –Diesel system that meets our energy needs to reduce greenhouse gas emissions. The simulation results obtained by Matlab/Simulink show the proper functioning of the proposed system in the presence of network disturbances and wind generation because of cuts wind well justified by the greater stability of the voltage and frequency generated by a self-excited induction generator.

Keyword: **Renewable Energy - Hybrid System - Network Autonome- wind-diesel system**

Résumé *:*

Les préoccupations croissantes sur l'environnement après le Protocole de Kyoto ont encouragé l'exploitation des ressources renouvelables propres et inépuisables. La production de l'énergie par des ressources renouvelables est principalement mise en œuvre pour alimenter les zones rurales éloignées.

Pour ces régions, le prix d'extension du réseau électrique s'avère prohibitif et le surcoût de l'approvisionnement en combustible augmente radicalement avec l'isolement.

Cependant, et pour pallier ces problèmes les travaux de recherche ont été orientés vers le concept des systèmes hybrides de génération d'énergie électrique.

L'objectif principal de ce travail est l'étude et la simulation d'un système hybride éolien-diesel qui répond à nos besoins énergétiques afin de réduire les émissions des gaz à effet de serre.

Les résultats de simulation obtenus, par Matlab/Simulink, montrent la souplesse du système proposé face aux variations de la charge tout en minimisant les émissions des gaz à effet de serre et assurant une meilleure stabilité sur la tension et la fréquence générées en présence des perturbations provoquées par la ressource aléatoire du vent.

Mot clé : Energie Renouvelable – Système Hybride – Réseau Autonome- Système jumelage éolien-diesel

Sommaire

Dédicace

Remerciement

Résumé

Listes des figures et tableaux

Liste des abréviations

Liste des symboles et unités de mesure

Introduction général……..…… …..……1

CHAPITRE I : l'état de l'art de système hybride éolien-diesel

I.1 introduction……..3

I.2 Contexte socio-économique……3

I-3 Le jumelage Eolien-Diésel …….8

I.3.1 Le système principal -Générateur Diesel (GD)……...……10

1.3.2 Le système auxiliaire- Aérogénérateur ……...……12

I.3.3 la commutation des sources……..13

1.4 Problématique du jumelage éolien-diesel……...15

1.4.1 Charge minimale d'un générateur……...….15

1.4.2 Fréquence d'arrêt/démarrage des groupes diesel……..16

I.4.3 Le stockage de l'énergie ……...….16

1.4.4 La stabilité du système…….17

CHAPITRE II: modèle mécanique du système hybride éolien-diesel

II.1 Introduction…….....18

II.2 Dimensionnement du système hybride……...18

II.2.1 Le générateur diesel…….19

a) La turbine (Moteur) diesel (MD)……..20

b) La génératrice synchrone……..22

II.2.2 Le générateur éolien……24

II.2.2.1 Les principales topologies de construction d'éoliennes……26

II.2.2.2 Modèle du vent…….28
II.2.2.3 Bloc de simulation du vent……...……29
II.2.2. 4Résultat de la simulation du vent…….29
II.2.2.5 Conversion aérodynamique……..30
II.2.2.6 Production de l'énergie mécanique……..34
II.2.2.7 Transmission……35
II.3. La génératrice - machine – asynchrone……....36
II.4 Conclusion……37

CHAPITRE III: modèle électrique du système hybride éolien-diesel
III.1 Introduction……38
III.2 Principe de fonctionnement d'un système hybride éolien diesel……38
III.3 Modélisation de la machine asynchrone à cage d'écureuil ……..…….39
III.3.1 Hypothèse pour la mise en équation de la machine asynchrone……...…….40
III.3.2 Définition des différents enroulements…….……40
III.3.3 Équations électriques…….……42
III.3.4 Relation entre les flux et les courants……..……..43
III.3.5 Transformation de Park……..44
III.3.6 Équations des flux dans le plan dq……46
III.3.7 Équations des tensions dans le plan dq ..…… …….47
III.3.8 Équation mécanique de la machine asynchrone à cage……47
III.4 Modélisation de la machine synchrone……47
III.4.1 Définition des enroulements……48
III.4.2 Équations électriques……49
III.4.2 Équation mécanique de la machine synchrone……..…53
III.5 Régulateur de tension……54
III.6 Réglage de la fréquence……55
III.7 Modèle de la charge……56
III.8 Conclusion……...57

CHAPITRE IV: Validation du système hybride éolien-diesel

IV.1 Introduction……59

IV.2 Modèle du générateur diesel……59

IV.2.1 Réponse dynamique et en régime permanent……....60

IV.3 Modèle de l'éolienne seule……..62

IV.3.1 Réponse dynamique et en régime permanent……..…….63

IV.4.1 Réponse dynamique et en régime permanent……64

IV.5 Conclusion……...69

Conclusion générale……70

Annexe…….....72

Bibiographie……76

Listes des figures et tableaux

Figure I-1 Consommation mondial d'énergie primaire de 1790 a' 2030……..……**3**

Figure I-2 Evolution mondial de la puissance éolienne installée de 2001 a' 2009…….**....7**

Figure I-3 structure globale d'un système de jumelage Eolien-diesel……..**...9**

Figure I-4 Configuration du générateur diesel……..…….**.....11**

Figure I-5 Chaine de conversion éolienne a' générateur asynchrone a' cage Fonctionnant a' vitesse fixe **...**……...……..**12**

Figure I-6 Evolution des puissances dans un SJED en fonction de la vitesse du vent …….**...14**

Figure I-7 Profil général de consommation d'une turbine diesel ……...……**....15**

Figure II-1 Schéma de principe d'un système hybride éolien-diesel ……...……**..18**

Figure II-2 Présentation physique d'un générateur diesel……...……**19**

Figure II-3 Modèle simplifié du générateur diesel……..…… **...19**

Figure II-4 Moteur diesel (a) organes de production du couple (b) contrôle Et circuit d'injection (c) cycle a'4 temps ……**...**……..**20**

Figure II-5 Bloc diagramme d'un moteur diesel simplifié ……...……..**21**

Figure II-6 Génératrice synchrone (a) constitution (b) vue simplifie utilisé pour la modélisation ……**23**

Figure II-7 Schéma d'étude de la machine synchrone ……**...**……**....24**

Figure II-8 Présentation de l'aérogénérateur ……..……**25**

Figure II-9 Principales architectures des aérogénérateurs……...……**27**

Figure II-10 Bloc de simulation de la vitesse de vent ……..……**..29**

Figure II-11 Evolution de la vitesse du vent ……...……**29**

Figure II-12 Veine fluide traversant le rotor éolien……..……**...30**

Figure II-13 Présentation d'un système éolien……..……**..31**

Figure II-14 Coefficient de puissance……**...**……**...32**

Figure II-15 Coefficient de puissance pour différent types d'éoliennes ……...…..**33**

Figure II-16 Modélisation du couple éolien ……..……**34**

Figure II-17 Couplage mécanique ……..……**36**

Figure II-18 La machine asynchrone (a) constitution (b) la cage d'écureuil ……..……..**37**

Figure II-19 Schéma d'étude de la génératrice asynchrone ……...…….**37**

Figure III-1 Schéma de système global ……..……**39**

Figure III-2 Définition du différent enroulement d'une machine asynchrone …..……**41**

Figure III-3 Représentation de la machine asynchrone dans le repère de park …….……....**45**

Figure III-4 Disposition des enroulement pour une machine synchrone triphasé comportant une seule paire e de pôles……...……...……....**49**

Figure III-5 Schéma électrique de la machine synchrone dans le référentiel fixe ……...**50**

Figure III-6 Schéma électrique de la machine synchrone a' pôles saillants dans le référentiel tournant avec le rotor…….…….....**54**

Figure III-7 Régulation de tension type 1d'IEEE tel qu'elle est implanté dans simulin.……**55**

Figure III-8 Schéma bloc de la charge secondaire avec le régulateur de fréquence…..…….**56**

Figure III-9 Régulateur de fréquence ……..……...**57**

Figure IV.1 Schéma de simulation du système du générateur diesel avec la charge …...…..**59**

Figure IV.2 Tensions de source courant, courant de la charge la fréquence de réseau du générateur diesel seul…….……...**60**

Figure IV.3 Schéma de simulation du système éolien avec la charge ……...….**62**

Figure IV.4 Tension de source ,courant de charge secondaire et la fréquence La vitesse de la machine asynchrone courant de charge du réseau de l'éolienne seule…….**.....**……**63**

Figure IV.5 Puissance active et réactive débités et consommées du système éolien **..**……...**65**

Figure IV.6 Tension de source ,courant de charge secondaire et la fréquence vitesse de la machine asynchrone et la courant de charge ……...……...**67**

Figure IV.7 Puissance active et réactive débitées et consommées du système éolien –diese..**69**

Tableau I.1 *Avantages et inconvénients des énergies renouvelables par technologies*……..**6**

Tableau I.2 *Classification des SEH par gamme de puissance*……..**8**

Introduction général :

Pour les régions isolées ou éloignées, le prix d'extension du réseau électrique s'avère prohibitif et le surcoût de l'approvisionnement en combustible augmente radicalement avec l'isolement. Le terme ''Système d'Énergie Hybride'' fait allusion aux systèmes de génération d'énergie électrique utilisant plusieurs types de sources. Le jumelage des sources d'énergie renouvelable comme l'éolienne, le photovoltaïque ou les petites centrales hydroélectriques peu constituer un complément ou une alternative aux générateurs diesels utilisés généralement pour la génération d'électricité dans les régions isolées. Les systèmes énergies hybrides sont généralement conçus pour répondre aux besoins énergétiques allant du simple éclairage jusqu'à l'électrification complète des villages ou de petites îles.

L'utilisation de plusieurs sources d'énergies dans un système hybride doit avoir une incidence profitable sur la production d'énergie, en termes de coût et de disponibilité, étant entendu que le bilan ``écologique`` est supposé a priori favorable. Les moyens de production d'énergie utilisant l'éoliennes, le photovoltaïque, le petit hydraulique, Présentent des capacités de production incertaines et souvent fluctuantes, non corrélées à l'évolution de la charge. Le but du système hybride est d'assurer une alimentation à la charge continue sans interruption, et si possible de maximiser le bilan d'énergie provenant d'autres sources d'énergies renouvelables. Dans tous les cas, la bonne qualité de l'énergie doit être garantie par rapport aux normes de sécurité des personnes et d'usage des équipements.

Dans ce contexte, le travail de recherche présenté dans ce mémoire est l'étude et simulation D'un système autonome hybride (éolien diesel). Le modèle présenté comporte une éolienne, un générateur diesel, une charge secondaire et une charge linéaire.

Le modèle du système hybride est implanté dans l'environnement MATLAB/Simulink pour des fins de simulation.

Le travail présenté dans ce mémoire comprend quatre chapitres.

Dans le premier chapitre, nous avons situé le sujet dans son contexte socioéconomique. Ce dernier est marqué par les constats des détériorations environnementales engendrées par l'exploitation sans cesse croissante des énergies fossiles. Par ailleurs, les difficultés d'acheminement du carburant servant à alimenter les groupes diésel, moyen classique de production d'énergie en zones isolées, montre bien la nécessité de disposer d'une source d'énergie renouvelable.

Le deuxième chapitre est consacré à la modélisation de la partie mécanique des deux sources d'énergie de notre système hybride.

Dans le troisième chapitre, le modèle électrique détaillé du système hybride éolien diesel est présenté.

Le quatrième chapitre est réservé à la validation du système.

Enfin, les principaux résultats de ce travail et les perspectives qui en résultent sont donnés dans la conclusion générale.

I.1 introduction

Notre précieuse planète Terre existe depuis des milliards d'années. Au cours de son évolution, elle a accumulé des ressources et des biens exceptionnels mais, face aux nombreuses catastrophes écologiques et aux bouleversements socio-économiques qui ont marqué la fin du XX^{ème}, la problématique de la gestion des ressources énergétiques a été propulsée au centre des débats scientifiques.

Ce chapitre introductif vise à situer le jumelage éolien-diesel dans son contexte socioéconomique. Il sera question pour nous, de décrire ledit système et ses sous-ensembles. Ainsi, nous ferons ressortir les principaux défis techniques à relever pour la réalisation de telles structures. À la fin de ce chapitre, nous préciserons la problématique qui retiendra notre attention tout au long de ce mémoire.

I.2 Contexte socio-économique

Suite aux progrès scientifiques et à l'explosion démographique planétaire, les exigences en ressources énergétique fossiles s'en vont grandissantes. La consommation mondiale de pétrole, prépondérante dans la consommation énergétique mondiale, est en forte croissance. Elle a augmenté de 11 % entre les années 1970 et 2000, et l'on estime qu'elle va encore augmenter de 30 à 40% d'ici 2030 (IEA : International Energy Agency). [9]

La Figure I-1 montre l'allure de la consommation mondiale des énergies primaires. On peut observer que les ressources fossiles telles que le pétrole, qui ont mis des siècles à s'accumuler, sont exploitées à une vitesse sans cesse en hausse. Les réserves de pétrole, même si elles sont mal ou partiellement connues, s'en trouvent réduites et pourraient venir à manquer.

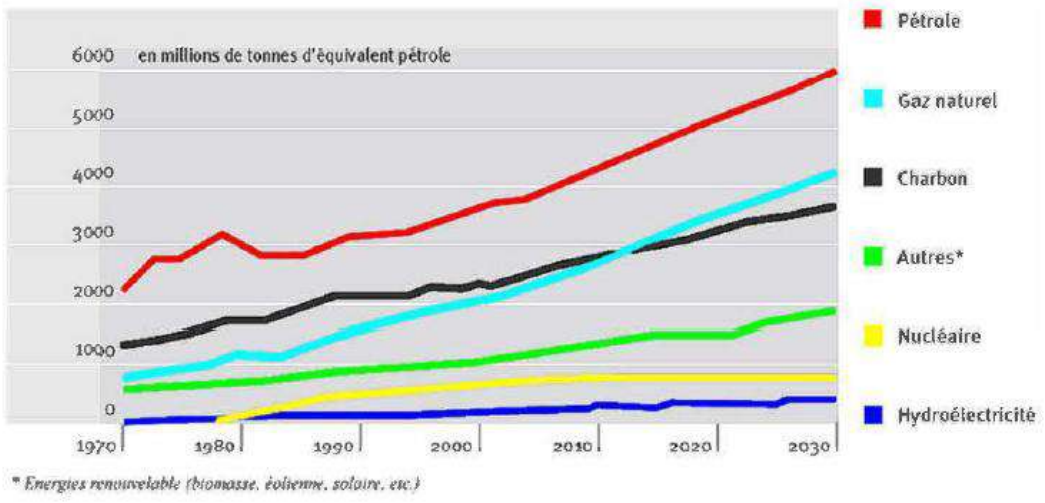


Figure I-1 *Consommation mondiale d'énergie primaire de 1970 à 2030* [9]

Par ailleurs, le développement économique des pays émergents tels que la Chine, l'Inde et le Brésil, ainsi que 1 'accroissement de la consommation d'énergie dans les pays développés ont provoqué une augmentation vertigineuse du prix du pétrole et du gaz naturel. À cela s'ajoutent des politiques de développement durable liées à la limitation des rejets de gaz à effets de serre.

Ces derniers ont, entre autres, entraîné la déréglementation des activités production de 1'énergie dans plusieurs de ces pays.

Hormis les effets notoires du cours du pétrole sur l'économie mondiale, le réchauffement climatique est un phénomène écologique préoccupant, pouvant directement être imputé à l'exploitation exponentielle des ressources pétrolières. 97 % des transports, et pratiquement 100% de la production d'énergie électrique en zone isolées dépendent des produits pétroliers. Ainsi le coût du kWh d'énergie électrique obtenu des traditionnels groupes électrogènes (en zones isolées) est monté en flèche durant les dernières décennies, et garde une fâcheuse tendance à la croissance. À cela, on peut ajouter les difficultés d'acheminement du carburant dans ces zones difficiles d'accès.

Les récents développements dans le domaine des énergies renouvelables on fait émerger un ensemble d'alternatives, dites "bio", pouvant être mises en œuvre à prix concurrentiels en zones difficiles d'accès. Les principales sources d'énergie bio sont:

- la biomasse,
- l'hydroélectricité,
- le solaire,
- l'éolienne.

Le Tableau I-1 présente les points forts et faibles des principales technologies de production d'énergie renouvelables. Ces technologies posent, pour la plus part, des sérieux problèmes de rendement et d'instabilité. Cependant, la production d'énergie électrique à partir d'éoliennes offre un certain nombre d'avantages par rapport aux autres sources renouvelables (notamment son rendement plus élevé). Bien qu'étant une source d'énergie propre et inépuisable, le vent est fondamentalement insaisissable et incontrôlable. Le véritable défi technologique dans la production de l'énergie éolienne est donc la stabilisation de l'énergie produite.

Les énergies renouvelables sont de plus en plus envisagées par bon nombres de pays développés ou émergents mais cependant, même si elles sont pour la plupart viables, ces dernières ont de la peine à s'imposer. En effet, elles impliquent un changement d'habitudes pour les fournisseurs et les consommateurs.

Le jumelage des sources renouvelables aux sources traditionnelles présente alors une alternative qui est mieux acceptée; l'objectif étant de faire évoluer les mentalités progressivement en introduisant de plus en plus de "mégawats renouvelables". La Figure I-2 montre le réel engouement suscité par le développement de la filière éolienne. Elle illustre la contribution sans cesse croissante de la production d'énergie éolienne à 1 'échelle mondiale.

Technologie	**Avantages**	**inconvénients**
Solaire	- Les panneaux solaires nécessitent très peu d'entretien et réduisent considérablement la facture domestique d'électricité ; - Les panneaux solaires sont simples et rapides à installer ; - Le système est silencieux et sans danger pour la santé;	-Les prix de fabrication et d'installation des panneaux sont assez élevés ; - Il est impossible d'obtenir une autonomie énergétique complète par le biais de panneaux solaires seulement; -Le rendement énergétique est plutôt faible.
Éolienne	- L'énergie éolienne ne nécessite aucun carburant, ne génère aucun gaz à effet de serre et ne produit pratiquement aucun déchet; - Les frais de fonctionnement sont limités et les coûts de production sont prévisibles et se stabilisent à long terme - La ressource principale (le vent) est à 100% renouvelable et son exploitation ne comporte pratiquement aucun effet néfaste pour l'environnement.	-Les vents peuvent parfois souffler à des intensités irrégulières ; -Impossibilité d'emmagasinage de la source (le vent); -La production dépend de l'intensité des vents et non de la demande en énergie; -Des dispositifs externes de stabilisation sont en général nécessaires

Hydraulique	-L'exploitation de barrages et de centrales hydroélectriques ne génère aucun déchet toxique; - Les infrastructures ont une très longue durée de vie et les coûts d'exploitation sont maîtrisables; - Possibilité d'emmagasiner de l'eau dans les barrages et de produire une énergie de grande qualité très rapidement lors des périodes de forte demande	- Les coûts d'installation d'une centrale hydroélectrique sont très importants; - Les écosystèmes aquatiques originals et les débits saisonniers naturels des cours d'eau peuvent être bouleversés par les installations; -Inondation de grands espaces fertiles nécessitant souvent le déplacement des populations locales
Biomasse	- Les ressources naturelles nécessaires sont disponibles en quantités abondantes -La biomasse génère peu d'émissions polluantes;	-La biomasse possède un faible rendement énergétique ; -Utilisation de ressources naturelles précieuses comme source d'énergie (ex. : les céréales pour la fabrication de 1' éthanol).

Tableau I-1 *Avantages et inconvénients des énergies renouvelables par technologies [9)*



Figure I-2 *Evolution mondiale de la puissance éolienne installée de 2001 à 2009 (World Wind Energy Association 2010)*

Ainsi, Emboîtant le pas aux ténors du développement éolien tels que l'Allemagne, 1'Inde, le Danemark, 1'Australie et la Grèce, certains payés ont fait du jumelage Éolien-Diésel, un choix stratégique pour l'alimentation en énergie électrique des régions éloignées. Ces zones ont généralement des potentiels de vents propices au développement de projets éoliens.

Les réseaux non reliés, aussi appelés réseaux autonomes, constituent le principal marché pour les systèmes de production hybride. Ces réseaux forment ainsi un créneau de marché spécialisé qui couvre des capacités électriques allant de 100 kW à 100 MW, où plusieurs technologies de production peuvent se jumeler et agir en complémentarité pour assurer la fourniture des besoins électriques d'une communauté non raccordée à un grand réseau continental. Il s'agit d'un marché complexe en raison des sévères contraintes de fiabilité d'approvisionnement électrique. En effet, ces réseaux opèrent en totale autonomie et doivent respecter les normes de production tout en assurant la même qualité de service aux communautés isolées qu'à celles connectées aux réseaux continentaux. Il est fréquent que l'industrie des systèmes hybrides désigne ce marché comme celui de l'électrification des villages *("village power").* Ce secteur, très prometteur, permet ainsi une décentralisation de la production électrique tout en réduisant progressivement la dépendance aux carburants fossiles en régions enclavées.[9][1]

I-3 Le jumelage Eolien-Diésel [1]

Les Systèmes électriques hybrides (SEH), ou bien systèmes jumelées, associent au moins deux technologies complémentaires: une ou plusieurs sources d'énergie classiques, généralement des générateurs diesels, et au moins une source d'énergie renouvelables. Ces deux principaux éléments s'ajoutent le système de contrôle et les composants nécessaires à l'exploitation comme la charge secondaire, le régulateur et commande automatisée. Les sources d'énergies renouvelables, comme l'éolienne ne délivrent pas une puissance constante. Leur couplage avec des sources classiques permet d'obtenir une production électrique continue. Le champ d'application des SEH est très large et par conséquent, il est difficile de classer ces systèmes. On peut néanmoins essayer de réaliser un classement par gamme de puissance tableau I.2

Puissance du SEH	Application
Faible : inferieur à 5 KW	Système autonome : station de télécommunication, pompage de l'eau…
Moyenne : entre 10 à 25 KW	Alimentation d'un village isolé, d'un hameau, des zones rurales…
Grande : supérieure à 500 KW	Grands réseaux isolés comme par exemple réseaux insulaires.

Tableau I.2 *Classification des SEH par gamme de puissance[1]*

Les sites isolés peuvent être classifiés en fonction du degré de pénétration de l'énergie renouvelable [9].

Le Taux de pénétration en puissance **(TPP)** est défini comme le rapport entre la puissance éolienne installée et la puissance maximum de la charge. Tandis que le taux de pénétration en énergie (**TPE**) est défini comme le rapport entre l'énergie éolienne annuelle produite et l'énergie consommée par la charge. Le Système Hybride Eolien-Diesel (SHED) est dite à haute pénétration si le **TPP >1**.

Le jumelage éolien-diésel présente le meilleur compromis entre le rendement, la propreté, disponibilité et la stabilité en zones isolées. C'est une approche permettant de bénéficier de la stabilité d'un groupe diésel, en augmentant la puissance disponible et en réduisant les coûts de production ainsi que la dépendance aux carburants fossiles.

L'idée de base d'un jumelage éolien-diesel consiste à adjoindre des aérogénérateurs à des groupes diesels existants, dans l'optique d'appuyer leur production et par ricochet, de réduire la consommation de gazole. Pour cela, ce système doit être ajusté pour :

- une utilisation optimale de l'énergie du vent,
- une bonne robustesse vis-à-vis des fluctuations du vent et de la charge,
- des dérives minimales des grandeurs électriques produites (amplitude et fréquence), et un coût de revient minimum.

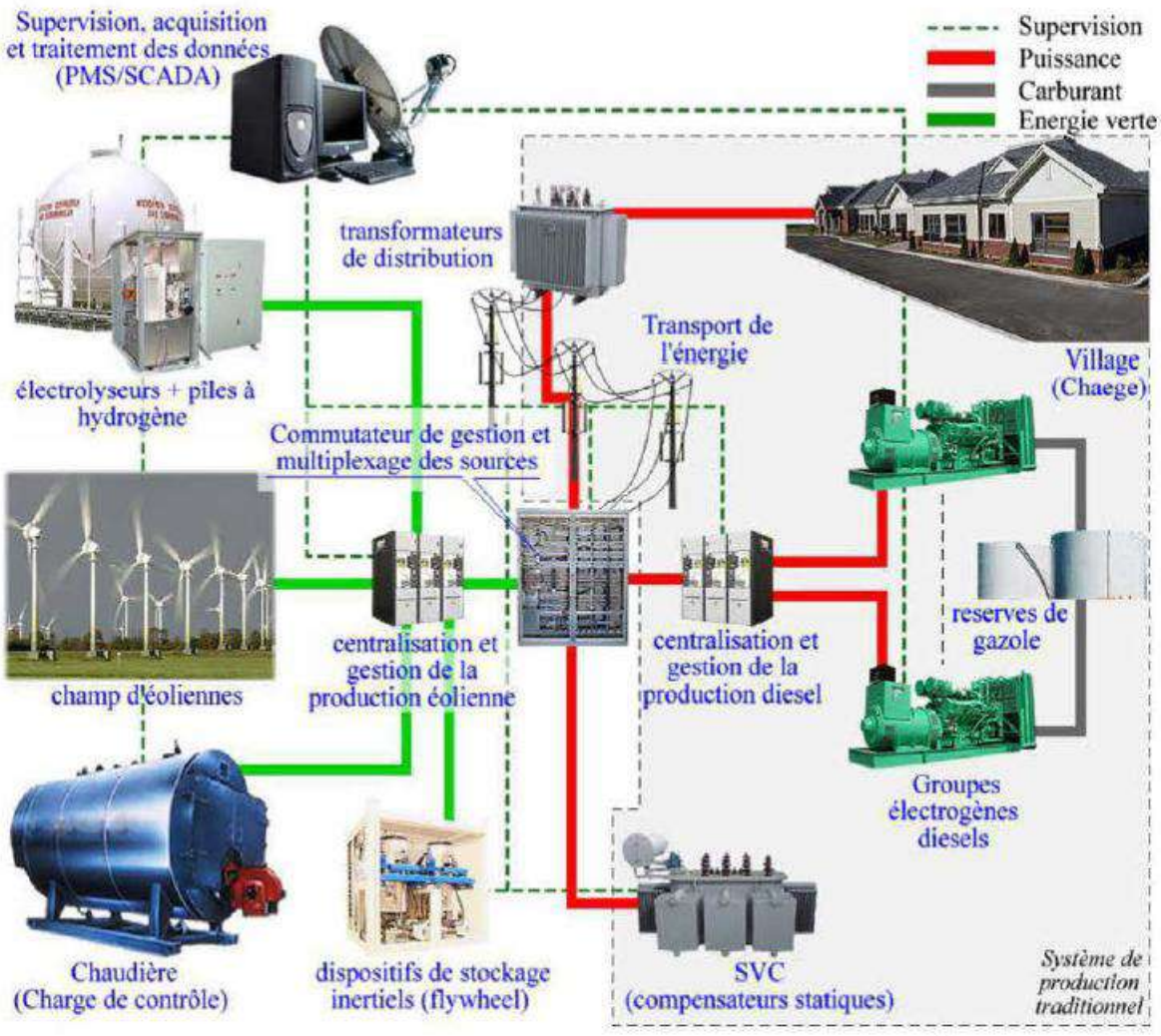


Figure I-3 *Structure globale d'un système de jumelage Éolien-Diesel [9]*

La Figure I-3 présente la structure globale d'un système de jumelage Éolien-Diesel.
Le mode de production classique comprend:

- un ou plusieurs générateurs diesels;
- des réservoirs de stockage de gazole;
- un dispositif de gestion et de commutation des groupes diesels;

- des lignes de transport d'énergie électrique;
- la charge (village);
- un ensemble de dispositifs de compensation de la puissance réactive.

De l'énergie éolienne est apportée dans l'optique de réduire la puissance vue par les groupes diesels. Sous certaines conditions, l'alimentation peut être assurée par la seule énergie éolienne. Les principaux additifs nécessaires au système diesel sont: [9]

- une ou plusieurs turbines éoliennes (parc d'éoliennes);
- des dispositifs de stockage du surplus de production éolienne;
- d'éventuels dispositifs auxiliaires d'exploitation du surplus d'énergie (non stockable);
- un système de contrôle de la ressource éolienne;
- un commutateur principal de multiplexage éolienne-diesel;
- un dispositif de gestion de l'information et de supervision.

En somme, on a un système de base constitué de générateurs diesels et un système auxiliaire constitué d'aérogénérateurs, l'ensemble devant fonctionner de manière stable et sécuritaire. Dans la suite nous présentons plus en détail chaque groupe constituant le jumelage.

D'après [1], le SHED est caractérisé par trois modes de fonctionnement : Si la vitesse du vent est suffisante, l'éolien alimentera seule la charge **(WO)**, le surplus de puissance est envoyé vers la charge secondaire. Durant ce mode de fonctionnement, le **GD** se déconnecte automatiquement du **GS** par un embrayage. Le **GS** fonctionne ainsi comme un condenseur synchrone. Si la vitesse du vent est moins forte, l'éolienne produisant peu de puissance, sera dans l'incapacité d'alimenter totalement seule la charge, alors le générateur diesel interviendra en fournissant la différence (**WD**). Si la vitesse du vent est très faible, le **GD** sera contraint d'alimenter seul la charge (**DO**).

I.3.1 Le système principal -Générateur Diesel (GD)

Les générateurs diesels consomment du gazole pour produire de l'énergie électrique. Ils sont principalement constitués d'un moteur diesel (MD)servant à entrainer une génératrice synchrone(GS) et offrent un moyen stable de production d'énergie à long terme.

Pour assurer la continuité de production d'énergie électrique dans un réseau autonome il est nécessaire de recourir au stockage d'énergie ou d'ajouter un ou plusieurs générateurs diesel. Le **GD** est généralement composé d'un **MD** couplé au **GS** (Figure 1.4). La fréquence du courant alternatif à la sortie est maintenue par un régulateur de vitesse. Le régulateur fonctionne en ajustant le flux du fuel dans l'objectif de garder la vitesse du **MD** et la vitesse

du **GS** constante. La fréquence du réseau est directement liée à la vitesse de rotation du générateur. [1][9][2]

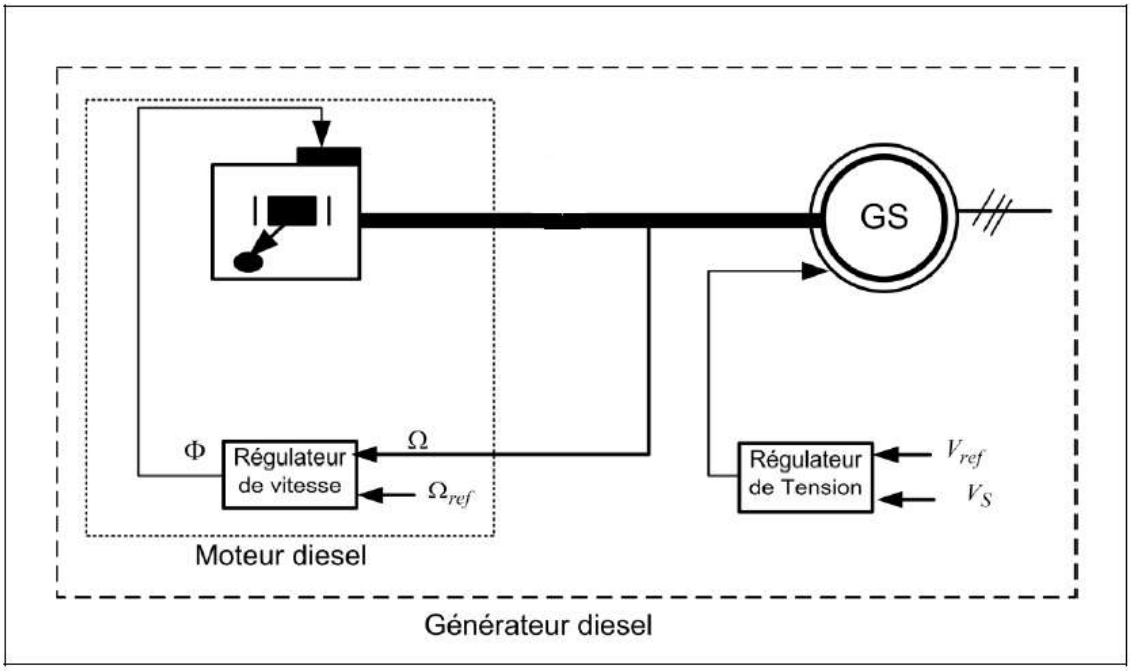


Figure 1.4 *Configuration du générateur diesel.*

En général, chaque générateur diesel embarque un réservoir de stockage à court termes qui est relié à un réservoir central de plus grande capacité. Un dispositif de gestion de la commutation des générateurs est nécessaire pour les configurations à plusieurs générateurs diesels. Ce système permet, entre autre, d'adapter la puissance produite à la demande tout en allongeant le temps moyen entre les interventions de maintenance sur chaque générateur. La présence de dispositifs d'arrêt/démarrage électriques permet une gestion intelligente et quasi-automatisée de la production.

Les lignes de transport sont représentées par un ensemble de dispositifs d'interconnexions électriques (transformateurs, câbles, disjoncteurs, etc.). Compte tenu de la petitesse des zones de distribution envisagées dans les SJED, le réseau de connexions est généralement de moyenne ou basse tension, très souvent triphasé.

La charge est en général constituée de maisons d'habitation, d'ateliers ou même de petites usines. Cette charge consomme de l'énergie active et réactive de manière quasi aléatoire. En effet, le profil de consommation dépend non seulement du moment de la journée, de la période dans l'année mais aussi de l'activité des usagers qui peuvent arrêter et démarrer des équipements à leur guise. Dans le cas d'un réseau continental, ces perturbations sont largement amorties, ce qui n'est pas le cas pour un réseau autonome. La fluctuation de la consommation de puissance réactive est la principale cause des problèmes de d'instabilité de

la tension dans un réseau autonome. Les compensateurs employés pour stabiliser la tension peuvent être de type synchrone employant des machines synchrones, ou statiques employant de l'électronique de puissance. La tendance actuelles est à l'emploie de compensateurs synchrones statiques compte tenu de leur rendement et élevé de leur facilité de mise en œuvre. Ainsi, la production par générateurs diesel est stable et bien maîtrisée mais cependant, son caractère polluant est un désavantage majeur, vu le contexte socio-économique précédemment exposé. En outre, bon nombre de ces systèmes ont pris de l'âge et fonctionnent de moins en moins de manière optimale.

I.3.2 Le système auxiliaire- Aérogénérateur [9]

L'ajout d'un parc éolien aux sources disponibles permet d'alléger la charge des générateurs diesel, et si les conditions sont favorables, de les remplacer complètement.

En effet, lorsque la production éolienne est suffisante, les générateurs diesel peuvent être tous arrêtés. Ceci n'est possible que si le potentiel éolien est suffisant.

La puissance disponible en sortie d'une éolienne est en rapport cubique avec la vitesse du vent incident à la turbine, ce qui implique la possibilité de pics de production allant au-delà de la demande de la charge.

L'éolienne, fiable et rentable, représente la source d'énergie idéale pour de nombreuses applications. Les éoliennes existent en plusieurs dimensions, des microsystèmes montés sur un mât aux turbines de 5 mégawatts alimentant le réseau électrique. La plus part des éolienne de plus de 50 KW exploitées dans les SEH utilisent des **GAS**. Le faible coût et la standardisation des **MAS** ont conduit à une large domination des **GAS** à cage. En raison de la consommation de puissance réactive, elles ne peuvent pas fonctionner indépendamment d'une source qui leur fournisse la puissance réactive. En fonctionnement à vitesse fixe elles sont souvent associées à une batterie de condensateurs Figure 1.5. Pour les réseaux isolés, les éoliennes à vitesse fixe couplé à la **GAS** fonctionnent seulement quand au moins un **GD** fonctionne, sauf s'il y a d'autre sources d'énergie réactive.

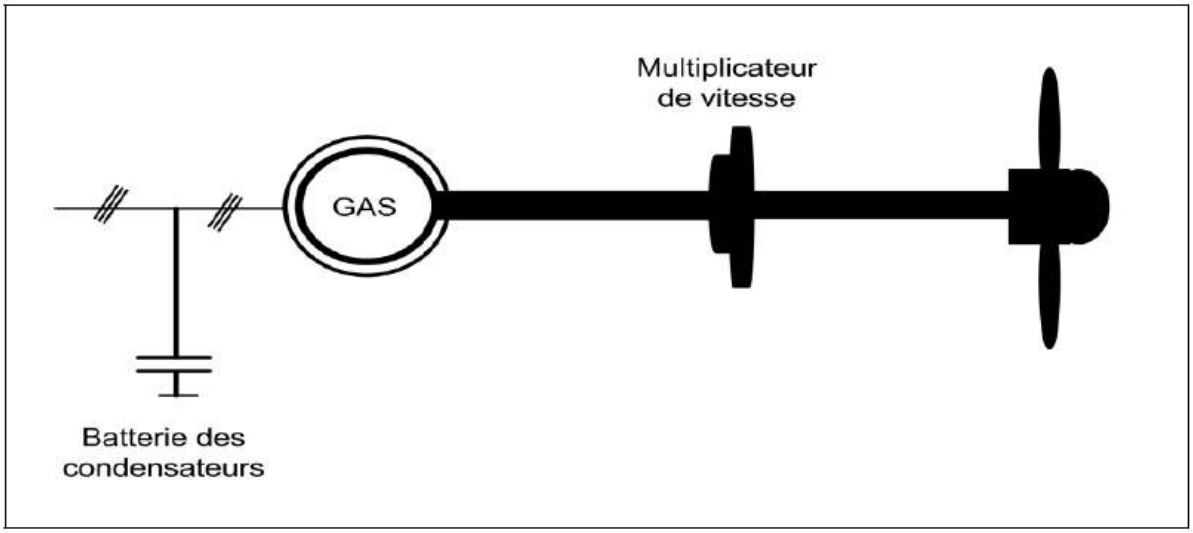


Figure 1.5 *Chaîne de conversion éolienne à générateur asynchrone à cage fonctionnant à vitesse fixe.*

I.3.3 la commutation des sources [9]

Le taux de pénétration de l'énergie éolienne est une donnée primordiale dans la réalisation d'un projet de jumelage Éolien-Diésel. Il est défini par le rapport entre l'énergie éolienne apportée et l'énergie totale consommée (I.1)- (I.2):

$$W_{p\%} = \frac{Energie\ éolienne\ \ produite\ [KWh]}{Energie\ consommée\ \ par\ \ la\ ch\,\text{arge}[KWh]} \times 100 \qquad \text{(I.1)}$$

$$w_{p\%} = \frac{puissance\ éolienne\ \ [KW\ ]}{puissance\ absorbée\ \ par\ \ la\ ch\,\text{arge}[KW\ ]} \times 100 \qquad \text{(I.2)}$$

On peut envisager les scénarios de production suivants figure I-6:

- **DO: Diesel seul** producteur (stabilité optimale, économie moindre)
- **DW: Diesel et Éoliennes** produisant de la puissance (moins stable)
- **WO: Éoliennes seules** productrices (économie maximale, stabilité critique)

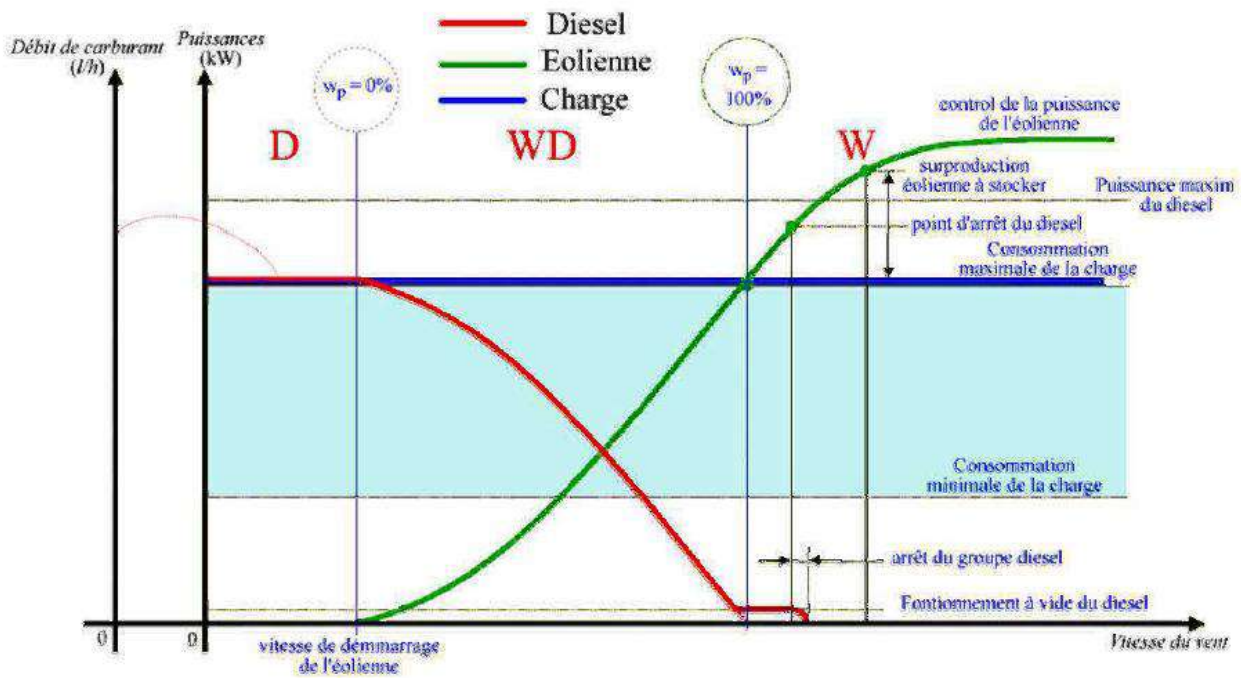


Figure 1-6 *Évolution des puissances dans un SJED en fonction de la vitesse du vent [9]*

Pour un faible taux de pénétration de l'éolienne (inférieur à 50%), le dispositif de stockage d'énergie n'est pas nécessaire. En effet, la puissance produite par les aérogénérateurs demeure en dessous de la demande en énergie et le groupe diesel prend totalement en charge le supplément de puissance nécessaire, tout en stabilisant les paramètres de production (Tensions, fréquence). La partie éolienne agit alors comme une simple charge négative. La stabilité de la partie éolienne n'est pas critique mais en revanche, les avantages économiques tels que la réduction de consommation de carburant sont réduits. Pour un fort taux de pénétration de l'éolienne (de 50 à 100% et plus), la turbine éolienne peut produire assez d'énergie pour assumer toute la production. Les fluctuations de la vitesse du vent peuvent alors avoir des répercussions sur la sortie si des régulateurs adéquats ne sont pas mis en œuvre. La charge du groupe diesel est maintenue au minimum, ce qui augmente le risque de combustion incomplète qui baisse le rendement de ce dernier, d'où la nécessité d'un système de supervision et de commutation des sources.[9][1]

I.4 Problématique du jumelage éolien-diesel

I.4.1 Charge minimale d'un générateur diesel [9][13]

Des études empiriques montrent que la consommation de carburant d'un générateur diesel (en litres par heure) est une fonction quasi-linéaire de la puissance débitée figure I.7.
La cogénération permet, par réduction de la charge du générateur diesel, de réduire le débit de carburant consommé. Cependant, on peut se poser une question fondamentale:
Y- a-t-il une limite inférieure à la réduction de la consommation d'un générateur diesel?
La réponse est bien évidemment oui. Même à vide, un générateur diesel absorbe du carburant pour assurer le fonctionnement des parties mécaniques. Ceci ne se fait pas sans douleur pour le générateur. En effet, comme tout moteur à combustion interne, les performances d'une turbine diesel dépendent de la qualité du mélange air-carburant et de son degré de combustion

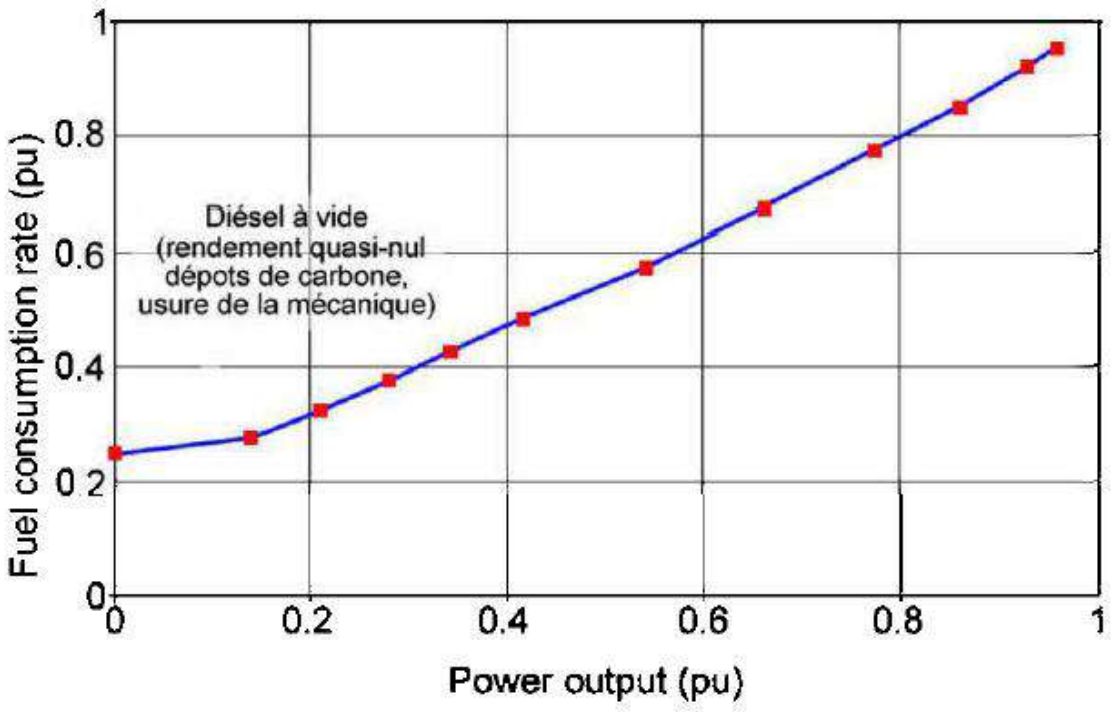


Figure 1-7 *Profil général de consommation d'une turbine diesel[9]*

Lorsque la turbine diesel fonctionne sous charge quasi nulle, sa température optimale n'est pas atteinte et les gaz d'échappement ne sont pas complètement brulés. La température des gaz rejetés est inférieure à la normale et on dit qu'il y a accumulation d'humidité. Ceci conduit alors au développement de crasse de carbone (résidus solides de la combustion incomplète) s'accumulant sur les valves d'échappement des chambres de combustion et autres tuyauteries

d'échappement. Une accumulation excessive conduit à une baisse de performances de la turbine et augment la fréquence des interventions de maintenance. Ce phénomène a pour effet, non seulement l'augmentation des coûts de maintenance, mais aussi l'ineffectivité de l'économie de carburant préconisée par le jumelage éolien-diésel.

La norme **NFPA-1106** (**N**ational **F**ire **P**rotection **A**gency : Standard for Emergency and Standby Power Systems) recommande une puissance minimale égale à 30% de la puissance nominale marquée sur la plaque signalétique du générateur. Il est donc clair que seul un arrêt total du diesel (mode **WO**) permet d'assurer une économie optimale du carburant.

I.4.2 Fréquence d'arrêt/démarrage des groupes diesel

Dans un système de jumelage à forte pénétration de l'éolienne, il faut absolument limiter le nombre de cycles d'arrêt/démarrage des turbines diesel. En effet, la source éolienne peut être fortement fluctuante et imprévisible. On peut donc assister à de fortes productions éoliennes suivies de brusques chutes de régime résultant de la variabilité de la vitesse du vent. Si le ou les groupes diesel sont arrêtés et doivent repartir aussitôt, il en résulte une forte sollicitation de la mécanique des turbines diesel qui a des conséquences à long terme sur les performances et la disponibilité desdites turbines. Outre les pics de stress mécaniques, les arrêt/démarrage répétitifs causent des pertes de carburant, l'usure des dispositifs électriques de démarrage (batteries, démarreurs, etc.) et des risques d'instabilité de la tension et de la fréquence provoqués par les processus de resynchronisation des génératrices synchrones.

I.4.3 Le stockage de l'énergie [9][4]

En général, le stockage d'énergie à long termes pause de sérieux problèmes environnementaux et de maintenance. Une méthode très employée par le passé consistait à redresser la production éolienne à l'aide de redresseurs à diodes. Ceci permettait la recharge des batteries au plomb dont l'énergie servait à faire fonctionner des onduleurs en cas d'absence de vent. Outre les problèmes environnementaux posés par l'entreposage des électrolytes de ces batteries, elles nécessitent des systèmes avancés de gestion de la capacité. Pour des installations de très grandes puissances, la gestion de ce moyen de stockage est coûteuse et difficile à maintenir.

Les récents développements dans le domaine des piles à combustible, notamment la pile à hydrogène, font de l'association Électrolyseur/PEMFC (**P**roton **E**xchange **M**embrane **F**uel **C**ells) la meilleure option de stockage. Elle s'adapte merveilleusement selon l'application et les réactions chimiques mises en œuvre ne posent pas de problèmes environnementaux

majeurs. Le surplus de production éolienne peut donc être emmagasiné en produisant de l'hydrogène par électrolyse de l'eau. Cette énergie sera ensuite restituée à la charge par réaction électrochimique dans une PEMFC, qui produit elle-même de l'eau. C'est un bio stockage pouvant tenir entre 1 et 10 heures de temps, voire plus, et qui nécessite très peu de maintenance.

Pour réduire les coûts d'installation des SJED on évite généralement tout stockage à long terme au profit d'un stockage à court terme. Ce dernier est généralement construit autour d'une machines synchrone entrainant une roue inertielle. Cette méthode de stockage peut tenir pendant une minute ou deux, laissant ainsi le temps de démarrer un générateur diesel en toute transparence, ou de ne pas le faire en cas de retour immédiat du vent. Ainsi, le stockage à courts termes à un impact immédiat sur le nombre de cycles d'arrêt/démarrage des groupes diesel. Une étude sur l'impact du stockage par roue d'inertie montre que l'installation de 5 minutes de stockage fait passer le nombre de cycles d'arrêt/démarrage de 30 à 1 cycle par heure, avec une baisse significative de la consommation de gazole .

De plus en plus, on assiste à 1' émergence de générateurs diesel spécialement équipés pour la cogénération ou l'alimentation de secours. Ces derniers embarquent un volant d'inertie solidaire de l'arbre de la génératrice, reliée à la turbine diesel via un embrayage électromagnétique. La turbine diesel peut ainsi être découplée et arrêtée, laissant alors sa génératrice synchrone fonctionner en simple roue inertielle/condensateur synchrone. Ceci permet aussi un recouplage de la turbine de manière totalement transparente pour la charge.

I.4.4 La stabilité du système [1[9][4]

Le mode de production diesel seulement (**DO**, voir Figure 1-6) est complètement maîtrisé et ne pose pas de problème majeur. Cependant, lorsque l'éolienne et le diesel fonctionnent ensemble (en mode **WD**), l'éolienne agit vis-à-vis du groupe diesel comme une charge négative. Ceci aboutit à de très grandes fluctuations dans le profil de production des groupes diesel, entrainant une large excursion du couple électromagnétique dans la génératrice avec un impact direct sur la mécanique de la turbine diesel. La mécanique ainsi fortement sollicitée peut entrer en résonance si le générateur ne possède pas une bonne marge de stabilité.

En mode éolienne seulement (**WO**), l'éolienne est seule responsable de la stabilisation des paramètres de production. Le système doit donc faire face à la variabilité de la charge et à celle du vent. On a ainsi des perturbations en amont et en aval de la production. L'introduction

de charges contrôlables - radiateurs ou simples résistances - permet généralement d'adoucir le profil de consommation et de gérer le surplus d'énergie non emmagasiné.

II.1 Introduction

Les systèmes hybrides utilisent différentes sources d'énergies comme l'éolien, le photovoltaïque, hydroélectrique et le générateur diesel. Ce type de système peut représenter une solution pour les régions éloignées d'un grand réseau interconnecté. Dans ce contexte, un dimensionnement correct et rentable du système hybride, ainsi que l'étude du comportement dynamique du système sont très important. Afin de, concevoir des contrôleurs pour le système, les modèles dynamiques précis sont nécessaires. Dans ce chapitre, on présente le modèle dynamique (partie mécanique) des deux sources d'énergies : éolienne et générateur diesel.

II.2 Dimensionnement du système hybride

La configuration du système hybride dépend évidemment des ressources énergétiques disponibles ainsi que les contraintes d'utilisation. Ceci requiert une campagne de mesure et une analyse préalable des spécificités du site. Pour notre étude nous avons choisi d'adopter les données présentées par [1]. Le modèle de base étudié, développé et testé est montré dans à Figure II.1. Il est formé de deux sources d'énergies l'éolienne et le générateur diesel, la charge secondaire et la charge principale.

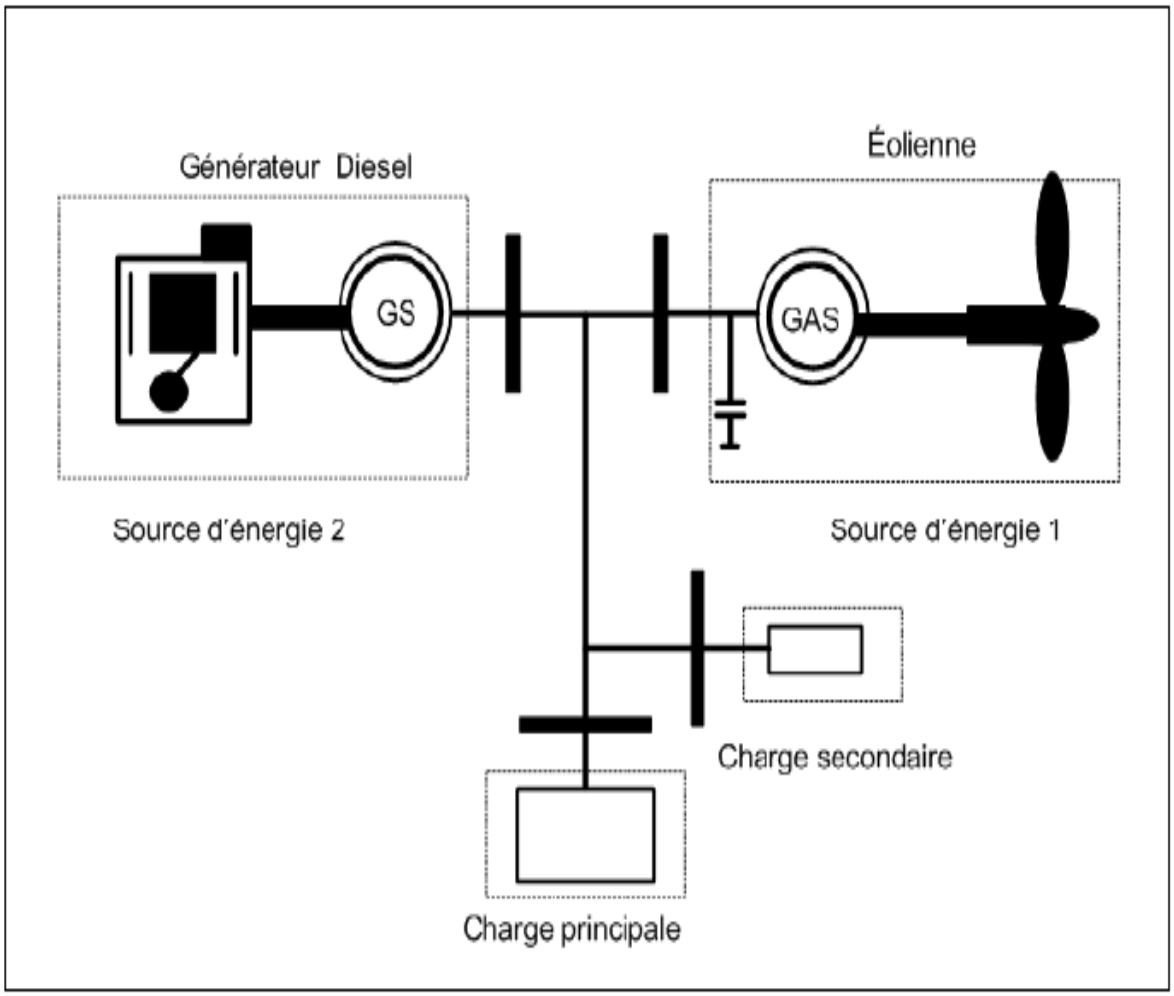


Figure II.1 *Schéma de principe d'un système hybride éolien-diesel.*

II.2.1 Le générateur diesel[9]

Un générateur diesel est constitué d'un moteur à combustion interne (turbine) **MD** entrainant en rotation l'inducteur d'une génératrice synchrone **GS**. L'ensemble est maintenu stable grâce à des dispositifs de régulation de vitesse et de tension Figure II.2 et Figure II.3.

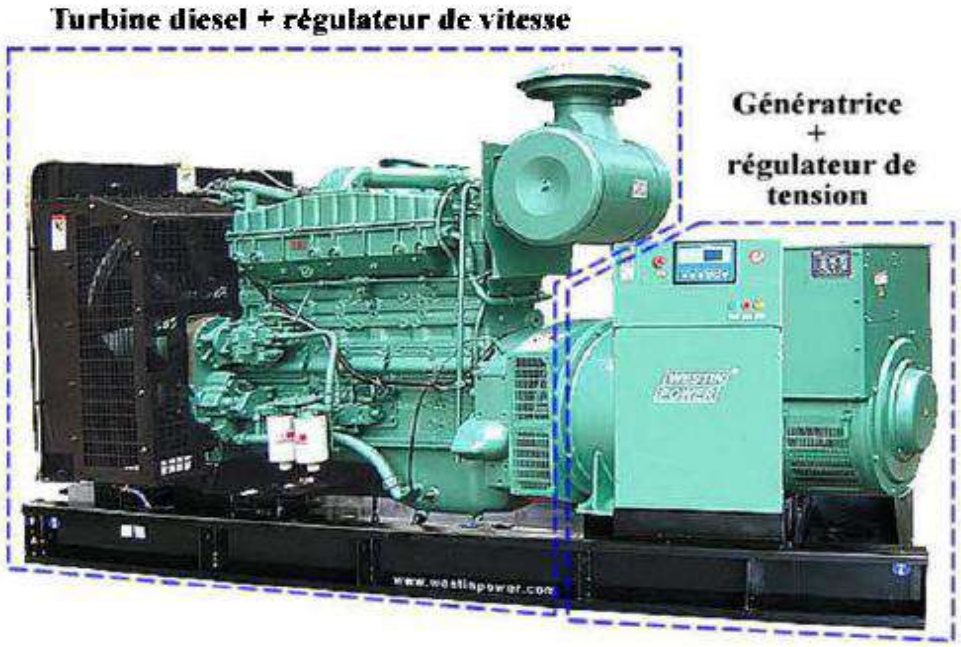


Figure II.2 *Présentation physique d'un générateur diesel*

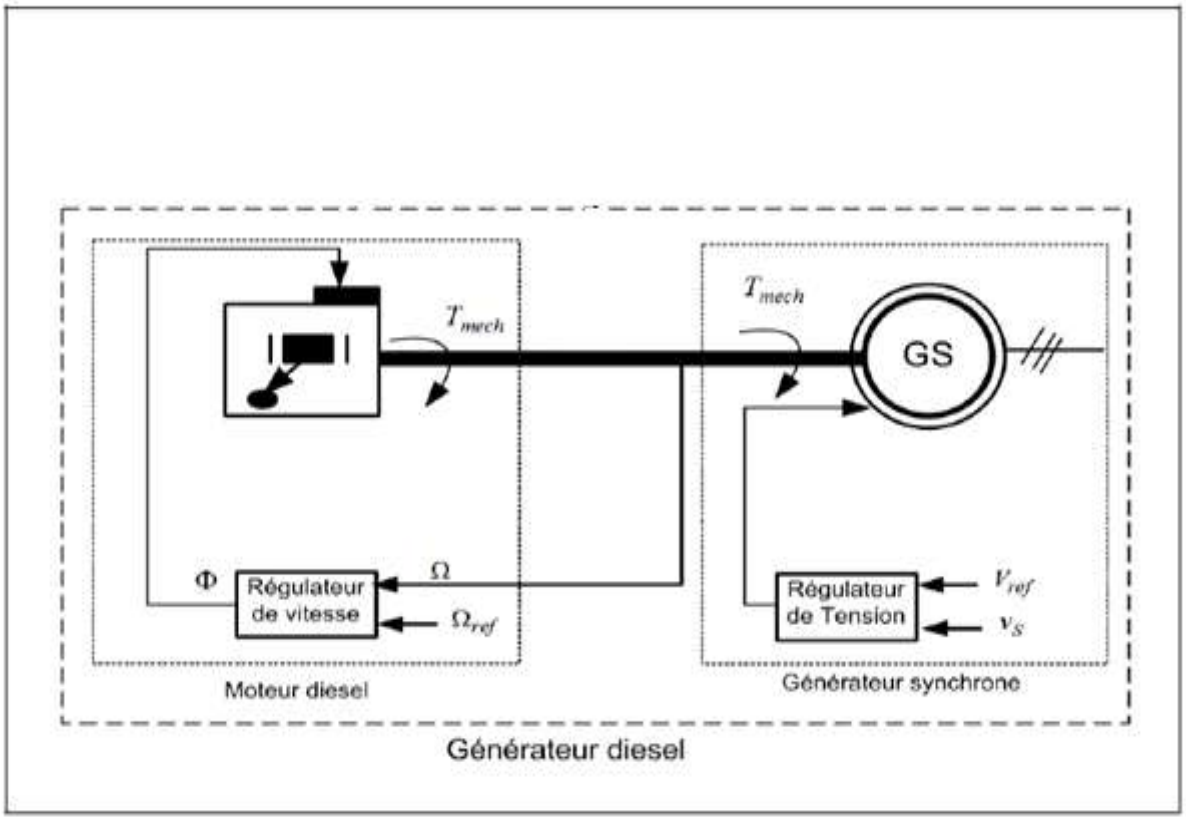


Figure II.3 *Modèle simplifie du générateur diesel.*

a) La turbine (Moteur) diesel (MD) [9]

La Figure II-4 présente les principales composantes mécaniques de ce système. Pour un moteur à quatre temps (4 courses de piston par cycle) la production du couple mécanique se fait suivant les étapes suivantes (voir Figure II- 4(c)):

- **l'aspiration (ou admission)**:

La soupape d'admission est ouverte et celle d'échappement est fermée. Le piston descend, aspirant ainsi l'air frais qui se trouve dans la tuyauterie d'admission. En fin d'admission, le piston se trouve au ***PMB*** (Point Mort Bas).

- **la compression**:

La soupape d'admission se ferme et le piston remonte en comprimant l'air contenu dans le cylindre (chambre de combustion). Il en résulte un échauffement de l'air qui est emmené à une température favorisant l'explosion ***TAI*** (Température d'auto-Inflammation).

En fin de compression, le piston se retrouve au ***PMH*** (Point Mort Haut).

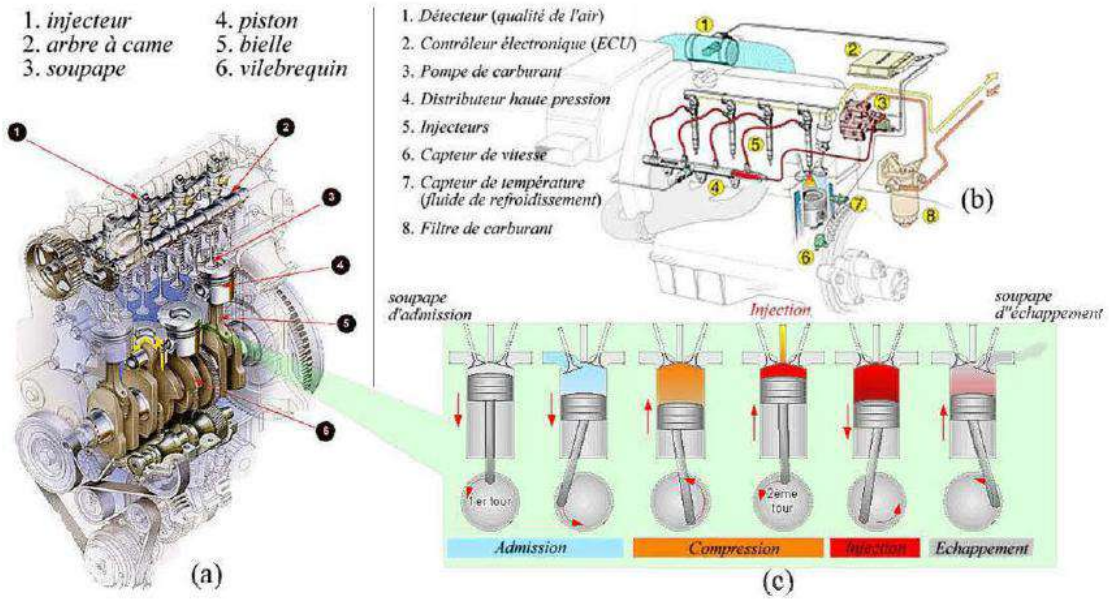


Figure II-4 *Moteur diesel:* ***(a)*** *organes de production du couple* ***(b)*** *contrôle et circuit d'injection* ***(c)*** *cycle à 4 temps*

- **l'injection (explosion)**:

Un injecteur projette sous haute pression du gazole dans la chambre de combustion. Il s'en suit une auto-inflammation explosive du mélange, qui produit une détente brusque du gaz contenu dans la chambre de combustion. Le piston redescend alors, poussé par la pression de l'explosion. Ce troisième temps est généralement appelé temps moteur qui ramène le piston au ***PMB*** (Point Mort Bas).

- **l'échappement**:

La soupape d'échappement s'ouvre et le piston remonte vers le ***PMH*** en poussant les gaz brûlés vers la tuyauterie d'échappement.

Il existe aussi des moteurs à deux temps:

- Une compression suivie d'une explosion;
- Et une détente couplée à l'échappement et à 1'admission (les gaz brulés sont directement expulsés par l'entrée de l'air frais).

Ceci est une avancée majeure permettant d'obtenir un temps moteur tous les tours de vilebrequin, au lieu d'un temps moteur pour deux tours de vilebrequin (cycle à 4 temps) [9]. On obtient ainsi un plus fort couple et une meilleure dynamique de la turbine.

Cependant la consommation est plus élevée et les risques de combustion incomplète plus sérieux.

Le contrôle des soupapes est assuré par un arbre à cames synchronisé au mouvement du vilebrequin. Ce dernier, grâce à plusieurs liaisons de type bielle-manivelle, transforme les allés et retour des pistons en un mouvement de rotation transmis au volant moteur. La vitesse de rotation d'un tel moteur dépend de la quantité de carburant injecté et de la charge appliquée au vilebrequin du moteur. Le moteur diesel est un système non linéaire. Il présente des temps morts et des retards, ce qui rend difficile son contrôle. Les moteurs diesels sont munis d'un régulateur de vitesse : mécanique, électromécanique ou électronique. Celui-ci réalise le contrôle automatique de la vitesse du moteur diesel, en réglant l'injection du carburant en fonction de la charge. Il agit sur le mécanisme d'accélération. De nombreux ouvrages proposent des modèles plus ou mois complexe du moteur diesel, en fonction de la disponibilité des données constructeurs.

Le diagramme bloc d'un moteur diesel simplifié est illustré dans la Figure II.5, et les paramètres sont fournis dans le tableau 1 (Annexe1) .

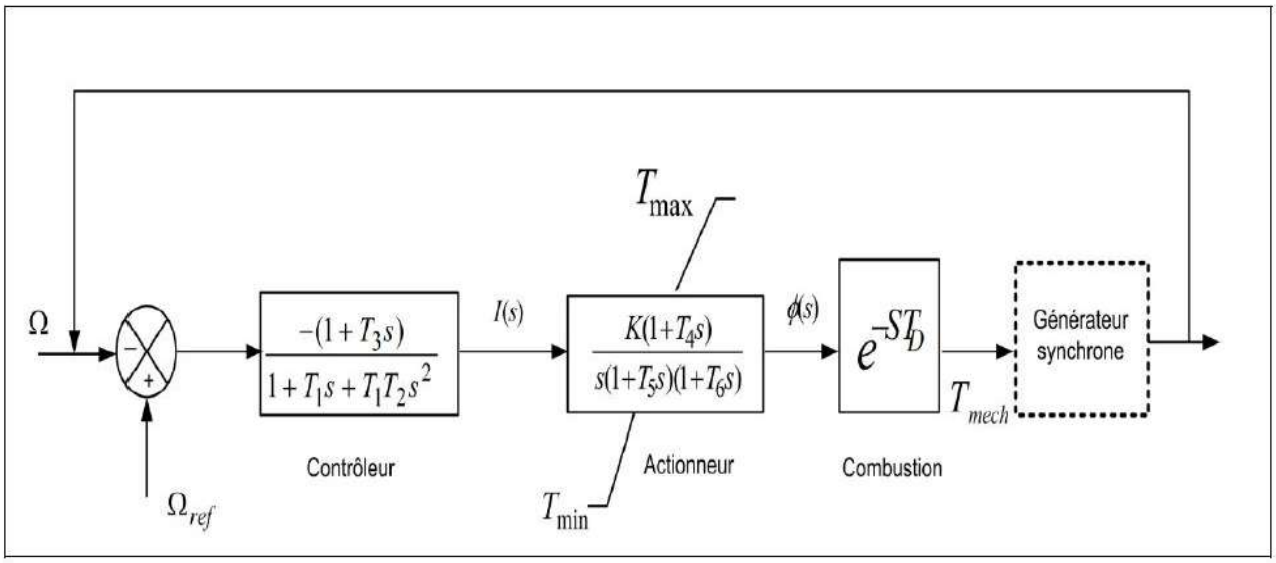


Figure II.5 *Bloc diagramme d'un moteur diesel simplifié.[9]*

L'entrée du contrôleur de vitesse est l'erreur de vitesse de rotation et la sortie est le signal de commande de l'actionneur I(s). La dynamique de fonctionnement de l'actionneur est approchée par une fonction de transfert avec le gain K ; qui adapte la relation entre le couple et la consommation de carburant [1].

$$G(s) = \frac{K(1+T_4 s)}{s(1+sT_5)(1+sT_6)} I(s) \qquad \text{(II.1)}$$

Le bloc combustion inclut un retard qui représente le temps nécessaire pour que le moteur diesel réponde à une demande de modification du taux d'injection de carburant. Ce temps mort $\mathbf{T_D}$ est le résultat de plusieurs cylindres qui ne sont pas tous dans la position permettant d'accepter plus de carburant à un instant donné. Le délai peut être exprimé comme étant le temps réel entre les arrivées consécutives des pistons au point d'injection plus approximativement un quart de tour du vilebrequin. Le couple produit par le moteur diesel, $\mathbf{T_{mech}(s)}$ est une fonction du débit de carburant Φ(s) :

$$T_{mech} = e^{-sT_D}\phi \qquad \text{(II.2)}$$

Dans notre étude le générateur diesel est chargé de fixer la fréquence du réseau, et de garder l'amplitude de tension constante, dans le cas de fonctionnement en mode diesel seul (**DO**), et de fournir de la puissance réactive à la génératrice asynchrone en cas de besoin, dans le cas fonctionnement en mode éolienne seul (**WO**).

b) La génératrice synchrone [9][5]

La génératrice synchrone est constituée d'un rotor, portant un enroulement courant continu, libre de se mouvoir à l'intérieur d'une partie fixe portant des enroulements statoriques. Le courant continu appliqué au rotor produit à travers les bobines statoriques un flux magnétique dépendant de la position du rotor. Ainsi, le mouvement du rotor induit des tensions statoriques qui sont destinées à alimenter la charge électrique connectée à la génératrice. Dans la structure du rotor, des barres métalliques appelées amortisseurs, permettent d'améliorer la stabilité de la machine en régime dynamique en atténuant les vibrations mécaniques. La Figure II-6(a) montre l'organisation d'une génératrice synchrone de grande puissance.

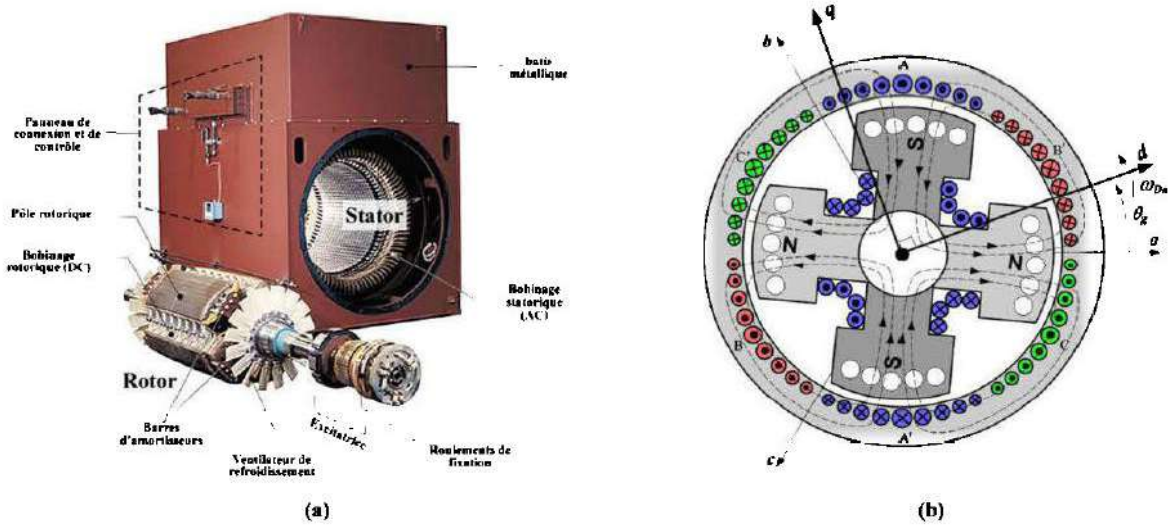


Figure II-6 *Génératrice synchrone: (a) constitution; (b) vue simplifiée utilisée pour la modélisation.*

Les bobinages statoriques sont logés dans des encoches et organisés de manière à faire apparaitre trois axes magnétiques décalés de $2\pi/q$ les uns des autres, pour une génératrice à q-phases (voir FigureII-6(a)). Les enroulements rotoriques sont connectés en série de manière à crée un seul circuit alimenté que l'on alimente en courant continue.

Ceci a pour effet de crée une succession de pôles magnétiques nord (N) et sud (S). Grâce à un très faible espace entre le rotor et le stator (appelé entrefer), l'électroaimant ainsi créer au rotor est libre de se mouvoir à l'intérieur du stator. Les bobines statoriques voient donc défiler une succession de pôles nord et sud à une vitesse liée à la vitesse d'entrainement de la machine. Compte tenu de la variation de flux créée par le mouvement du rotor, chaque bobine statorique est le siège d'une force électromotrice induite sinusoïdale, dont la pulsation est liée à la vitesse de rotation dudit rotor. On a alors la relation fondamentale (II.3) liant la vitesse d'entrainement de la génératrice à la vitesse de défilement des pôles vu par une bobine statorique.

$$\omega_{sync} = \frac{\omega_e}{p_p} \qquad [rad/s] \qquad (II.3)$$

Où

ω_{sync} est la vitesse angulaire (vitesse synchrone) de l'arbre de la turbine diesel,

$\omega_e = 2\pi f$ est la pulsation des courant statoriques de la génératrice synchrone du groupe,

p_p est le nombre de paires de pôles de la génératrice.

La valeur efficace de la tension produite est donnée par la formule de Boucherot qui s'écrit:

$$V_g = 4.44\phi_{\max} Nf = 4.44\phi_{\max} N \frac{\omega_e}{2\pi} \qquad (II.4)$$

Où $\phi_{\max}$ est le flux maximal produit dans l'entrefer par un pôle du rotor, *N* le nombre de spires constituant la bobine statorique. V_g la tension induite efficace obtenue aux bornes de cette bobine.

La formule (II.4) n'est valable qu'en régime permanant. Pour mettre en équation le fonctionnement dynamique de la Génératrice synchrone, on a généralement recours à une représentation de la génératrice en termes de bobinages magnétiquement couplés (voir Figure II-7).

Les bobinages statorique sont ramenés à trois principales bobines enroulées suivant les axes *a*, *b* et *c*. Au niveau du rotor, les bobinages créant le champ magnétique sont regroupés en une seule bobine dont l'axe magnétique est dirigé suivant l'axe *d*. L'axe directement en quadrature est appelé axe *q*. les barres d'amortisseurs forment des circuits électriques fermés modélisés par deux bobines de faible résistance, l'une dirigées suivant l'axe *d* et l'autre suivant l'axe *q*.

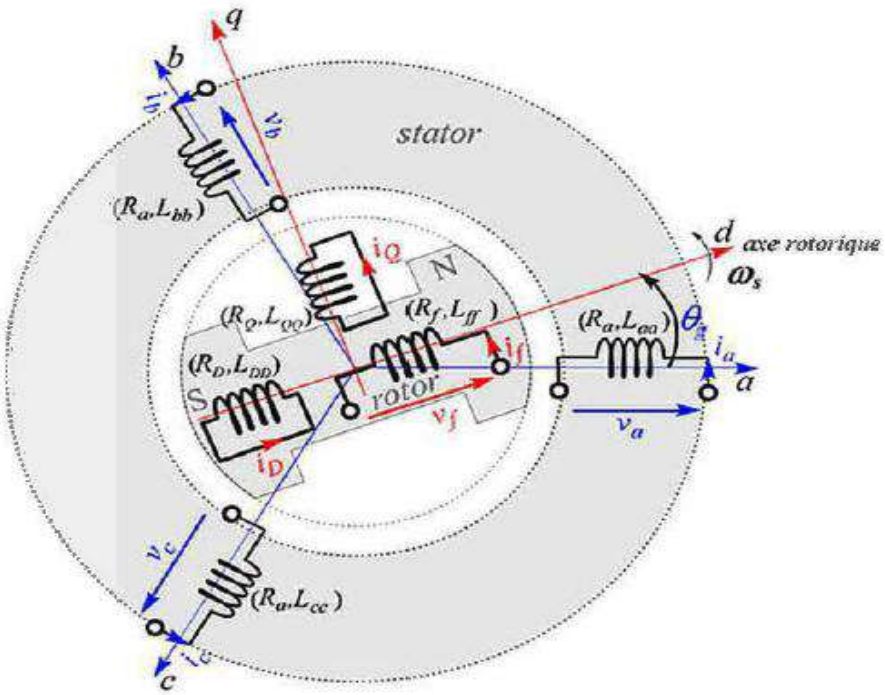


Figure II-7 *Schéma d'étude de la machine synchrone*

II.2.2 Le générateur éolien (aérogénérateur)

L'aérogénérateur est un ensemble complexe d'éléments mécaniques, électriques et électromécaniques, permettant de convertir l'énergie cinétique du vent en énergie électrique. Un aérogénérateur est généralement constitué [1] [9][3]:

- d'une turbine qui capte l'énergie cinétique du vent pour produire une puissance mécanique disponible en bout de son rotor;
- d'un dispositif de transmission et de conversion mécanique permettant d'adapter la génératrice à la turbine;
- d'une génératrice qui reçoit la puissance mécanique de la turbine et produit une puissance électrique;
- d'un dispositif de connexion à la charge permettant d'adapter les niveaux de tension et les fréquences;
- d'un dispositif de gestion global de l'ensemble de turbine (capteurs, régulateurs, protections, etc.)

Selon l'orientation de l'axe de la turbine, on peut regrouper les aérogénérateurs en deux grandes familles:

- les turbines à axe vertical (VAWT : Vertical Axis Wind Turbine)
- les turbines à axe horizontal (HAWT : horizontal axis Wind Turbine)

Les turbines à axe vertical peuvent capter l'énergie du vent quelle que soit la direction dans laquelle il souffle. Par ailleurs, la Génératrice est fixée à la base de la turbine, ce qui permet un accès facile aux connexions et une maintenance aisée. Cependant, leur mise en œuvre requiert un dispositif de fixation particulièrement robuste et le rendement est fortement affecté par les obstacles et le phénomène de cisaillement vertical du vent.

Des études vibratoires montrent aussi que ces éoliennes ont une fâcheuse tendance à entrer en résonance (mécanique) vu la grande variabilité du vent en basse altitude.

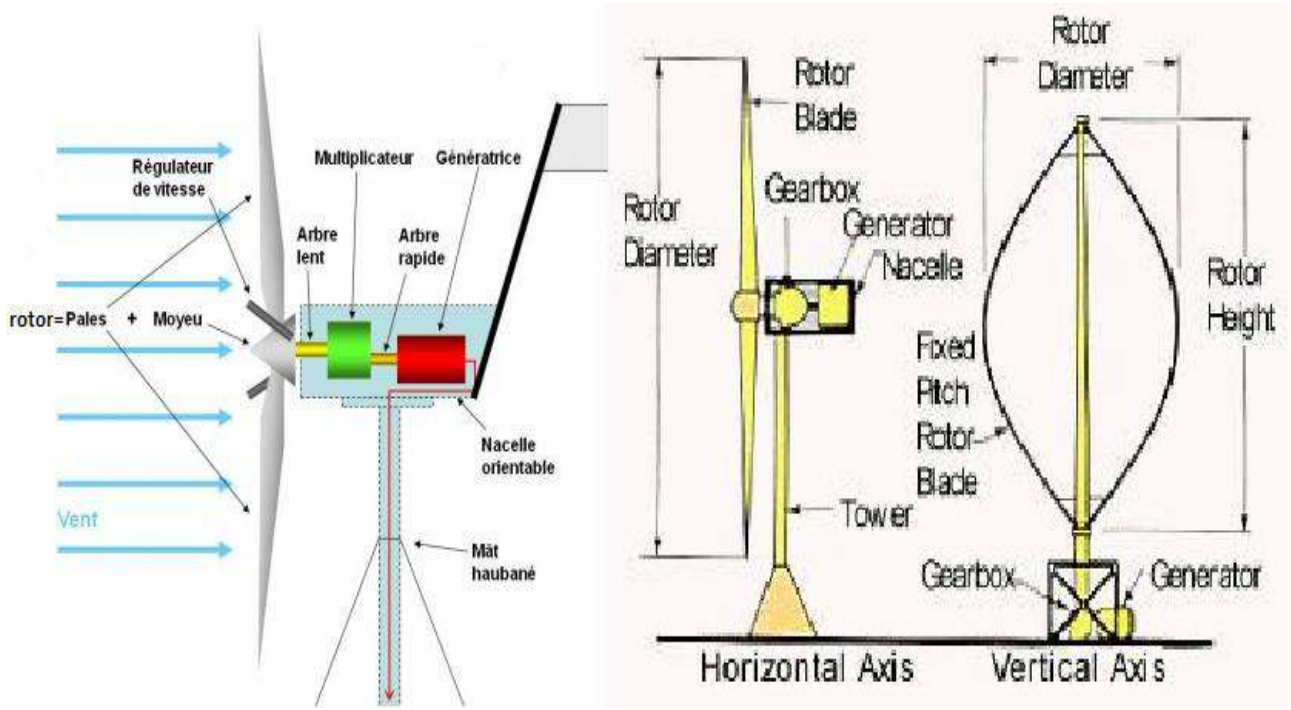


Figure II-8 *Présentation de l'aérogénérateur*

Les turbines à axe horizontal sont les plus employées. Elles se fixent en hauteur, au dessus d'un mat permettant de bénéficier des vitesses de vent plus élevées, une variabilité et un cisaillement vertical de vitesse du vent réduits. Sa conception et son installation plus simples en font l'aérogénérateur idéal pour les zones urbaines et rurales.

Pour capter le maximum de vent, certains mats sont équipés de dispositifs de guidage permettant d'orienter la turbine dans le sens du vent.

La puissance mécanique produite en bout du rotor de la turbine est développée par un couple mécanique élevé et une vitesse de rotation faible. Un multiplicateur de vitesse permet d'adapter la vitesse lente du rotor à la vitesse rapide requise par la génératrice. En effet, la vitesse de rotation de la génératrice est liée à la fréquence électrique voulue, alors que la vitesse de rotation de la turbine éolienne est liée à l'aérodynamique des pâles et aux mécanismes de régulation de vitesse.

Le principal avantage des turbines à axe horizontal réside dans la flexibilité de sa commande. Compte tenu de ses nombreux avantages, les turbines à axes horizontal seront spécialement explorées dans cette présentation.

II.2.2.1 Les principales topologies de construction d'éoliennes

Une turbine éolienne à axe horizontal peut fonctionner: [9]

- à vitesse fixe (la génératrice employée peut être synchrone ou asynchrone directement connectée au réseau);
- ou à vitesse variable (on utilise généralement une **GADA** (Génératrice Asynchrone à Double Alimentation) directement connectée au réseau ou une machine synchrone connectée au réseau via un convertisseur de puissance).

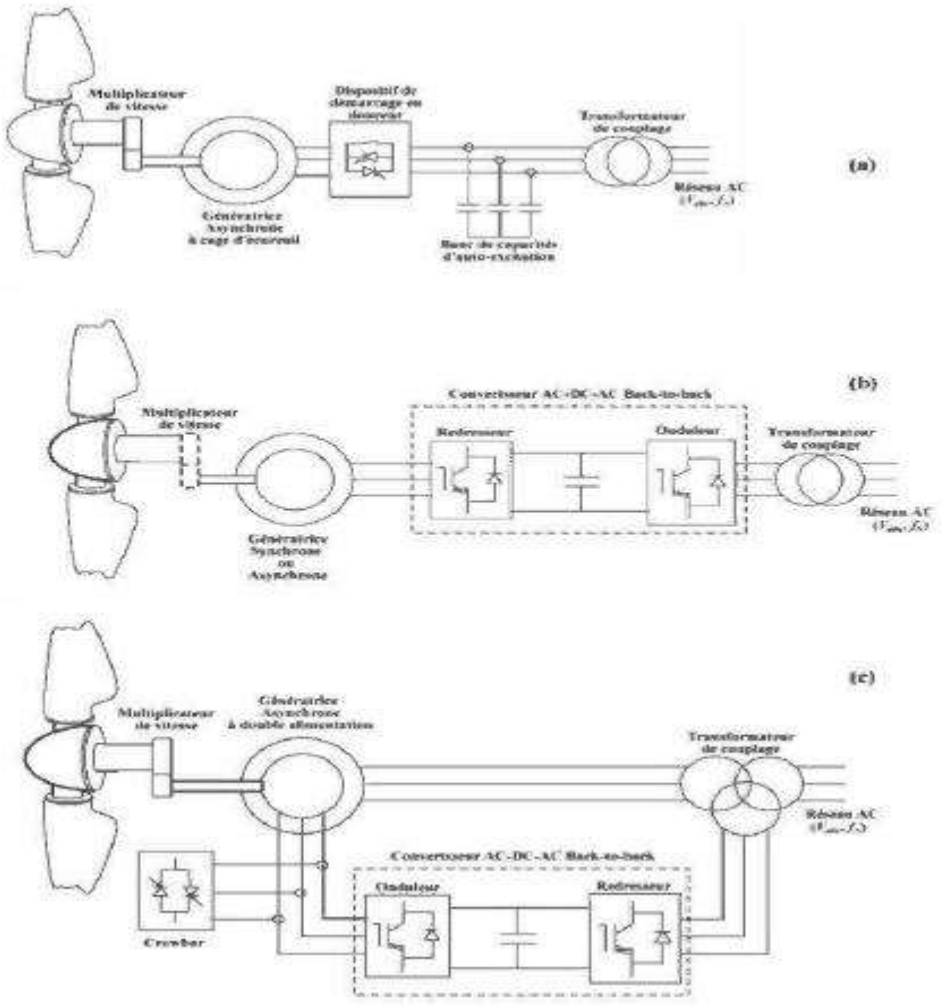


Figure II-9 *Principales architectures des aérogénérateurs [ ]*
(a) à génératrice asynchrone auto-excitée (vitesse fixe);
(b) à génératrice synchrone ou asynchrone (vitesse variable);
(c) à génératrice asynchrone à double alimentation (vitesse variable).

Dans les deux cas, le but est d'obtenir une fréquence et une tension de bus stable. Les principales technologies actuellement développées sont présentées à la Figure II-9. Les éoliennes à vitesse fixe sont directement connectées au réseau AC via un transformateur de couplage adaptant les niveaux de tensions (voir Figure II-9(a)). Ces dernières font généralement appel à une génératrice asynchrone (à cage d'écureuil), qui nécessite une source externe de puissance réactive pour son excitation. Un banc de condensateurs, connectés en triangle ou en étoile, est généralement utilisé à cet effet.

Pour éviter une introduction brutale de l'éolienne sur le bus AC, on emploie généralement un gradateur à thyristors comme organe de raccordement de la génératrice au réseau de distribution.

Le schéma de la Figure II-9(b) montre une topologie à vitesse variable. La génératrice employée est de type synchrone ou asynchrone. L'emploie d'une génératrice synchrone à nombre de pôles élevé permet de s'affranchir du multiplicateur de vitesse qui est le siège de nombreuses pertes. Lorsqu'elle est utilisée, la génératrice synchrone est généralement à aimant permanant.

Pour les éoliennes à vitesse variable, l'on emploie des dispositifs d'électronique de puissance pour contrôler les transferts de puissance. Dans la structure de la Figure II-9(b), la puissance AC délivrée par la génératrice est dans un paramètre temps redressée. Ceci permet d'obtenir une tension DC pouvant être ondulée à la fréquence requise par le réseau AC. Le redresseur et l'onduleur peuvent être côte à côte. On parle alors de conversion back-to-back ou AC-DC-AC. Cette topologie possède l'avantage d'isoler l'éolienne du réseau ainsi, le risque d'instabilité par ajout de puissance éolienne est limitée [2]. En plus on a la possibilité d'exploiter un bus DC centralisé de manière à connecter d'autres sous-systèmes tels que les dispositifs de stockage. Néanmoins, les convertisseurs employés doivent être surdimensionnés, pour pouvoir assurer le transfert des puissances réactive et active.

La topologie de la Figure II-9(c) emploie une génératrice asynchrone à double alimentation. Son principal avantage est la puissance réduite - environ 10% de la puissance totale - requise par le convertisseur de puissance. En outre le stator de la génératrice est directement connecté au réseau (via le transformateur de couplage). Les interactions entre le réseau et la génératrice sont alors plus forts et difficiles à prédire [2].

II.2.2.2 Modèle du vent [6][10]

La ressource en vent, du point de vue de sa distribution statistique, est primordiale dans un projet éolien et donc déterminante pour le calcul de production de l'électricité et de rentabilité. Les propriétés dynamiques du vent sont capitales pour l'étude de l'ensemble du système de conversion d'énergie car la puissance éolienne, dans les conditions optimales, évolue au cube de la vitesse du vent. L'Algérie présente un potentiel éolien considérable qui peut être exploité pour la production d'énergie électrique, surtout dans le sud où les vitesses de vents sont élevées et peuvent dépasser 4m /s (6m/s dans la région de Tindouf), et jusqu'à 7m /s dans la région d'Adrar.

La vitesse du vent est généralement représentée par une fonction scalaire qui évolue dans le temps.

$$V_v = f(t) \tag{II.5}$$

La vitesse du vent sera modélisée sous forme déterministe par une somme de plusieurs harmoniques :

$$V_v(t) = A + \sum_{n=1}^{i} (a_n.\sin(b_n.w_v.t)) \tag{II.6}$$

$$V_v(t) = 10 + 0.2\sin(0.1047t) + 2\sin(0.2665t) + \sin(1.2930t) + 0.2\sin(3.6645t)$$

II.2.2.3 Bloc de simulation du vent :

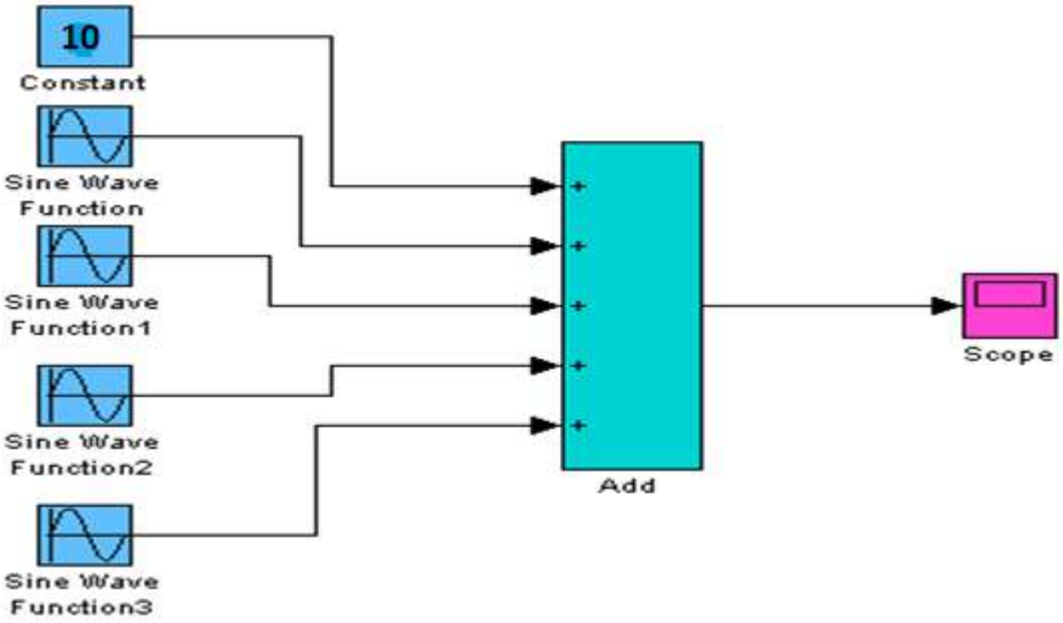


Figure II.10 : *Bloc de simulation de la vitesse du vent.*

II.2.2. 4Résultat de la simulation du vent

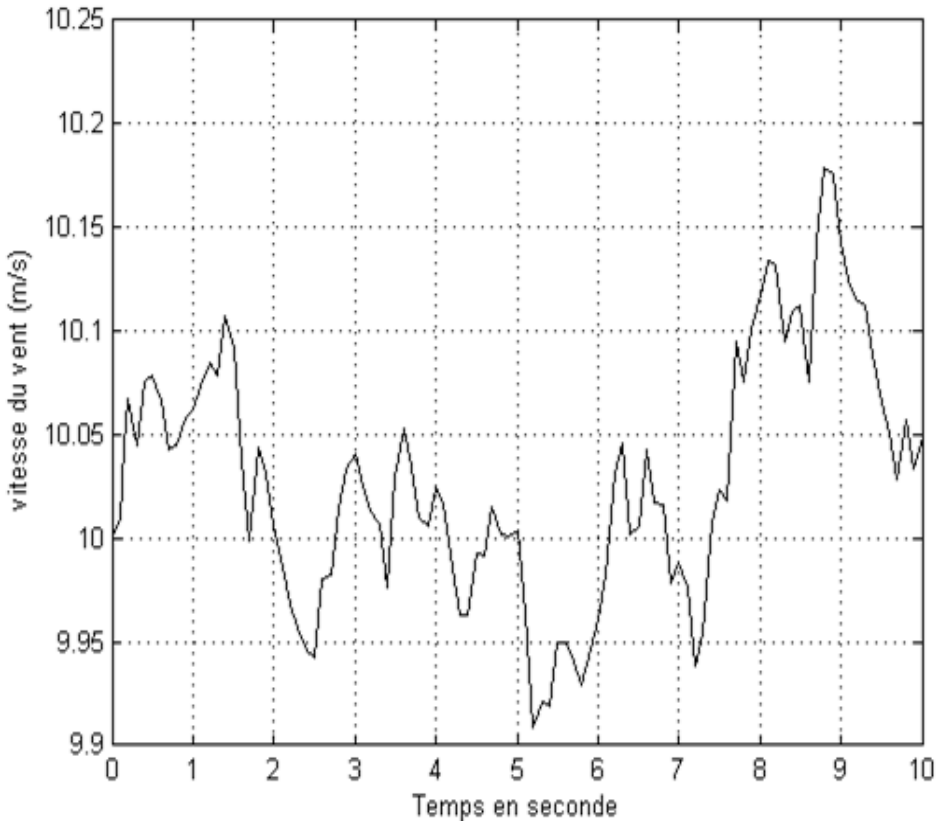


Figure II.11 : *évolution de la vitesse du vent dans le temps (m/s) « profil du vent réel »*

La figure (II.11) montre la variation de la vitesse du vent dans un temps de (10s) entre deux valeurs (V_v=*10.18m/s*) comme valeur maximale et (V_v=*9.92m/s*) comme valeur minimale d'une façon aléatoire ce qui reflète un vent réel.

II.2.2.5 Conversion aérodynamique [9]

Le rotor éolien est un système de conversion d'énergie qui transforme l'énergie cinétique des masses d'air, en mouvement en énergie mécanique disponible sur l'arbre. Cette énergie cinétique est proportionnelle à la masse d'air qui se déplace à une vitesse donnée.

L'extraction de l'énergie se fait donc par un ralentissement de l'air qui traverse le rotor, par un mécanisme de transformation des forces qui agissent sur les pales. Schématiquement, selon les principes de la mécanique des fluides, il en résulte que, la veine fluide traverse le rotor éolien en s'élargissant Figure II.12.

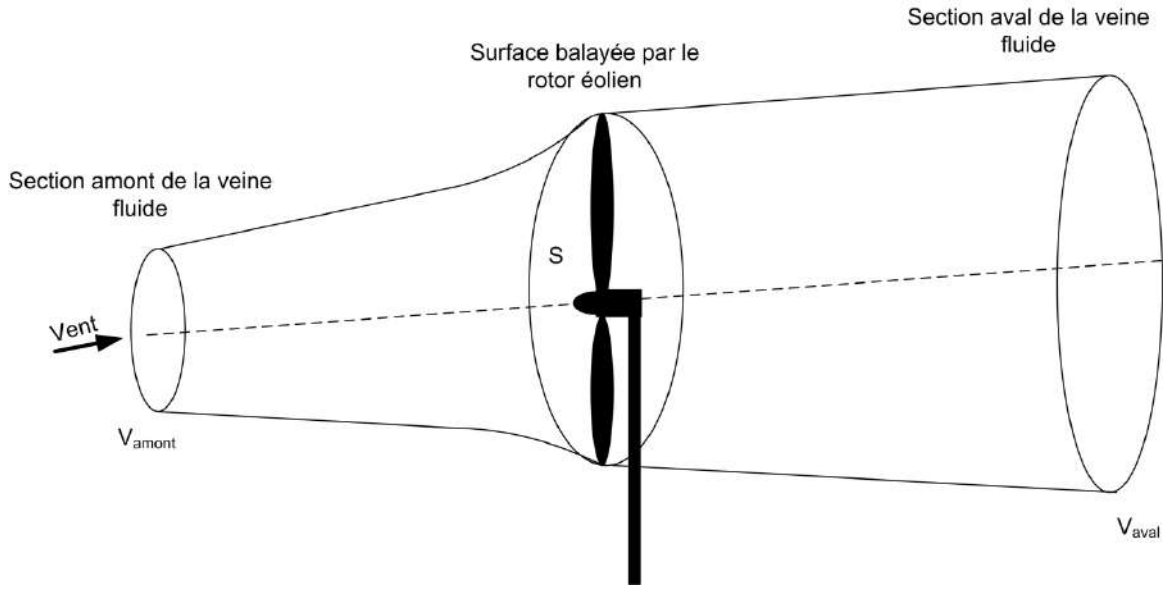


Figure II.12 *Veine fluide traversant le rotor éolien.*

Considérons le système éolien à axe horizontal représenté sur la Figure II.13, sur lequel on représente la vitesse du vent V_{amont} en amont de la turbine et la vitesse V_{aval} en aval.

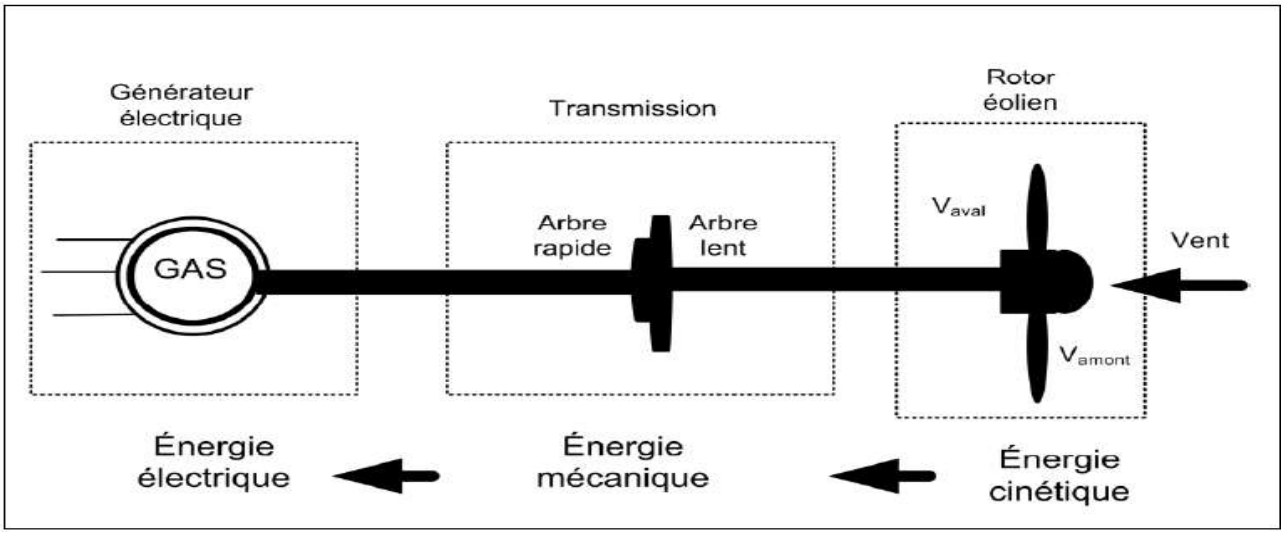


Figure II.13 *Présentation d'un système éolien.*

En supposant que la vitesse du vent traversant le rotor est égale à la moyenne entre les deux vitesses V_{amont} , V_{aval};

$$V_{moy} = \frac{V_{amont} + V_{aval}}{2} \tag{II.7}$$

La masse de l'air en mouvement qui passe à travers un disque de surface S (surface balayée par les pales de l'éolienne) durant le temps Δt, est représentée par :

$$\frac{m}{\Delta t} = \rho S \left[\frac{V_{amont} + V_{aval}}{2} \right] \tag{II.8}$$

Où

ρ : Densité spécifique de l'air

S : Surface balayé par le rotor.

Selon la deuxième loi de Newton, la puissance mécanique Pt extraite du vent par le rotor se définit par :

$$p_t = \frac{En_{amont} + En_{aval}}{\Delta t} \tag{II.9}$$

Où

En_{amont} : Énergie cinétique en amont.

En_{aval} : Énergie cinétique en aval.

$$En_{amont} = S\rho \left[\frac{V_{amont} + V_{aval}}{2} \right] V_{amont}^2 \tag{II.10}$$

$$En_{aval} = S\rho\left[\frac{V_{amont}+V_{aval}}{2}\right]V_{aval}^{2} \quad \text{(II.11)}$$

En remplaçant (II.10) et (II.1) dans (II.9) on obtient;

$$P_t = \frac{1}{2}S\rho\left[\frac{V_{amont}+V_{aval}}{2}\right]\left[V_{amont}^{2}-V_{aval}^{2}\right]$$

(II.12)

V_{amont} , semble mesurable puisque ce n'est pas une donnée perturbée par l'éolienne.

V_{aval} dépend beaucoup plus de l'éolienne.

Nous allons donc faire en sorte de mettre d'un coté V_{amont}, et de l'autre une formule compliquée que nous enfermerons dans un coefficient.

$$P_t = \frac{1}{2}S\rho V_{amont}^{3}\frac{1}{2}\left[\frac{V_{aval}}{V_{amont}}\right]\left[1+\frac{V_{aval}^{2}}{V_{amont}^{2}}\right] \quad \text{(II.13)}$$

On regroupe sous le coefficient :

$$C_p = \frac{1}{2}\left[1+\frac{V_{aval}}{V_{amont}}\right]\left[1+\frac{V_{aval}^{2}}{V_{amont}^{2}}\right] \quad \text{(II.14)}$$

Nous obtenons finalement la formule pilier de l'éolien:

$$P_t = \frac{1}{2}S\rho V_{amont}^{3}C_p \quad \text{(II.15)}$$

Si on représente la caractéristique correspondante à l'équation (II.14) Figure II.14, on s'aperçoit que le coefficient de puissance C_p présente un maxima de 16/27 soit 0.59. Cette limite théorique appelée limite de Betz, fixe la puissance maximale extractible pour une vitesse de vent donnée, cette limite n'est jamais atteinte en réalité.

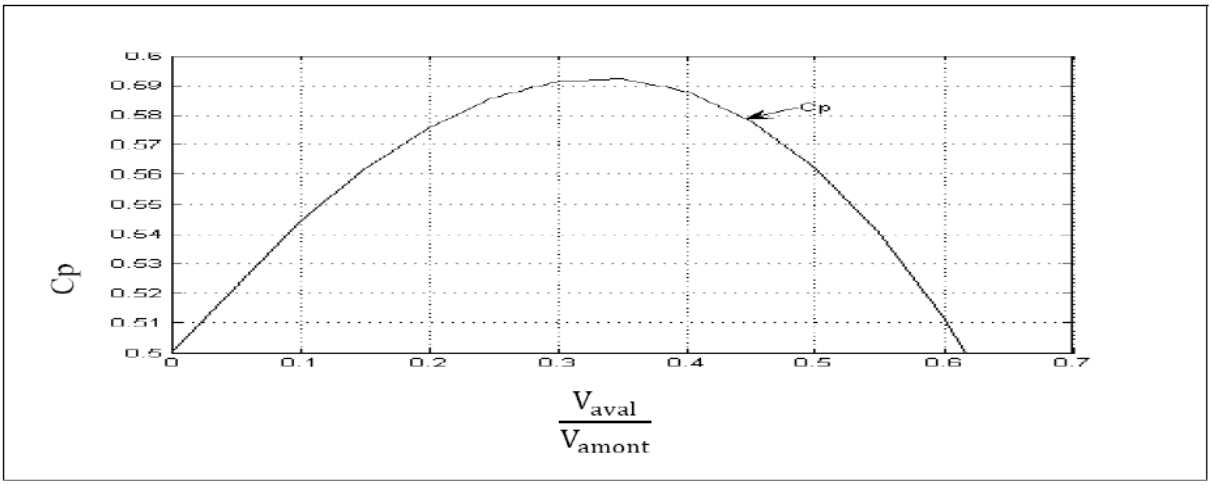


Figure II.14 *Coefficient de puissance.*

Il est aussi intéressant de connaitre, à ce niveau, un facteur clef lié à la conception de l'éolienne. λ, Le coefficient de vitesse spécifique de l'éolienne (sans unité). λ, représente le rapport entre la vitesse du bout de la pale et celle du vent au niveau de l'axe rotor. On a donc :

$$\lambda = \frac{\Omega_t R}{V_{amont}} \qquad \text{(II.16)}$$

Ω_t : La vitesse de rotation avant la transmission.

R : Le rayon de l'éolienne.

La Figure II.15 [9], montre les coefficients de puissance obtenus selon le type d'éolienne en fonction de la vitesse spécifique λ. Les éoliennes à marche lente sont munies d'un grand nombre de pales (entre 2 et 4), leur inertie importante impose en général une limitation du diamètre à environ 8 m. Leur coefficient de puissance atteint rapidement sa valeur maximale lors de la montée en vitesse mais décroit également rapidement par la suite.

Les éoliennes à marche rapide sont beaucoup plus répandues et pratiquement toutes dédiées à la production d'énergie électrique. Elles possèdent généralement entre une et trois pales fixes ou orientables pour contrôler la vitesse de rotation.

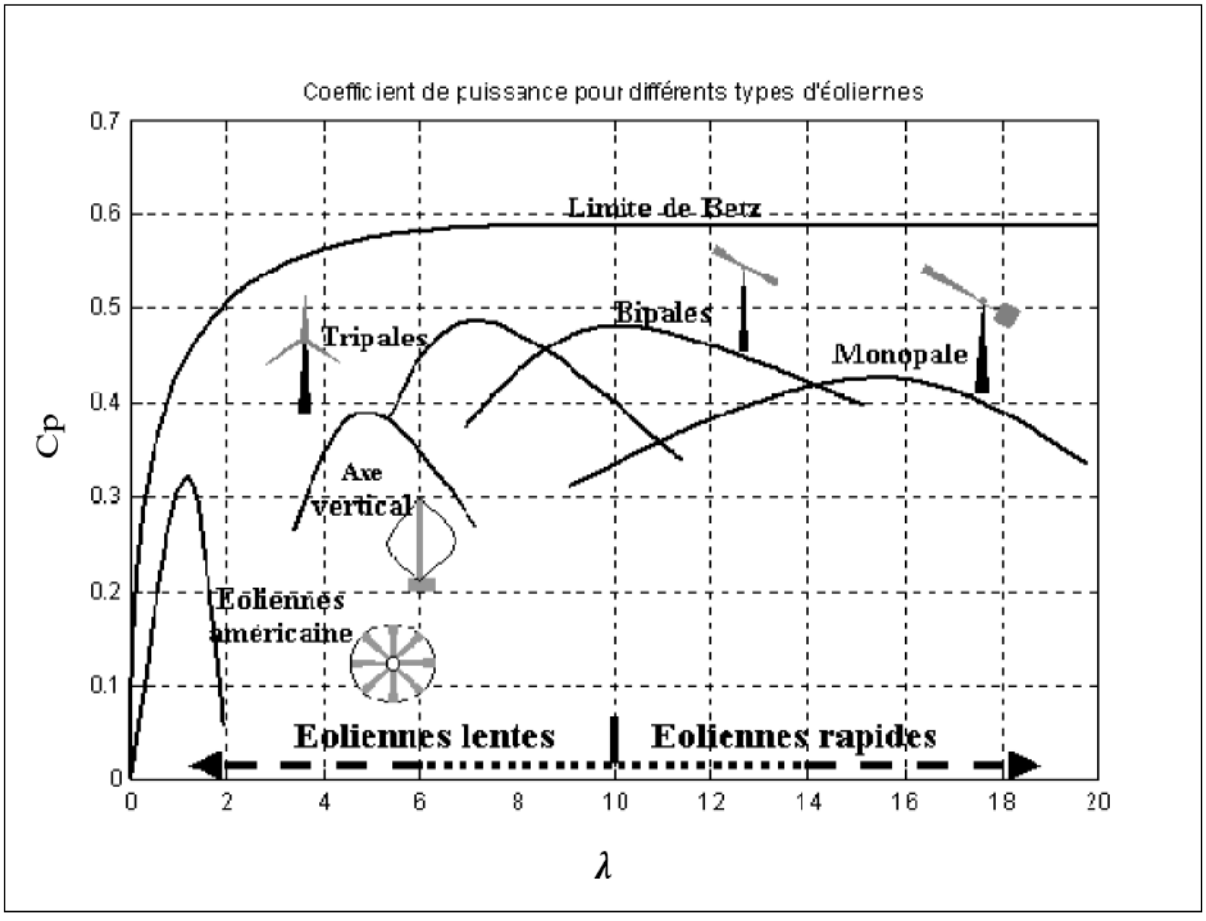


Figure II.15 *Coefficient de puissance pour différents types d'éoliennes.*

II.2.2.6 Production de l'énergie mécanique

Pour capter l'énergie cinétique des masses d'air en mouvement, les pales du rotor éolien se présentent obliquement au vent avec un angle appelé angle de calage β, provoquant la rotation. La puissance qui peut être récupérée est décrite par la relation (II.18). Pour l'éolienne étudiée dans ce travail, l'angle de calage β est fixe et la grandeur de sortie du rotor éolien est le couple. Ce dernier peut être calculé à partir de la puissance captée et de la vitesse de rotation du rotor éolien :

$$T_t = \frac{P_t}{\Omega_t} = \frac{\frac{1}{2} S \rho V_{amont}^3}{\Omega_{amont}} C_p = \frac{1}{2} \frac{\rho \pi R^2 V_{amont}^2}{\frac{\lambda V_{amont}}{R}} C_p \qquad \text{(II.17)}$$

$$T_t = \frac{1}{2} \frac{\rho \pi R^3 V_{amont}^2}{\lambda} = \frac{1}{2} \rho \pi R^3 V_{amont}^2 C_t \qquad \text{(II.18)}$$

Où C_t est le coefficient de couple. Ce dernier et le coefficient de puissance sont liés par la relation:

$$C_t(\lambda) = \frac{C_p(\lambda)}{\lambda} \qquad \text{(II.19)}$$

La modélisation du rotor éolien exige la connaissance de la caractéristique $C_t(\lambda)$ dépendant des caractéristiques géométriques du profil des pales [1]. Les détails du bloc modélisant le couple développé par la turbine éolienne sont présentés dans la Figure II.16.

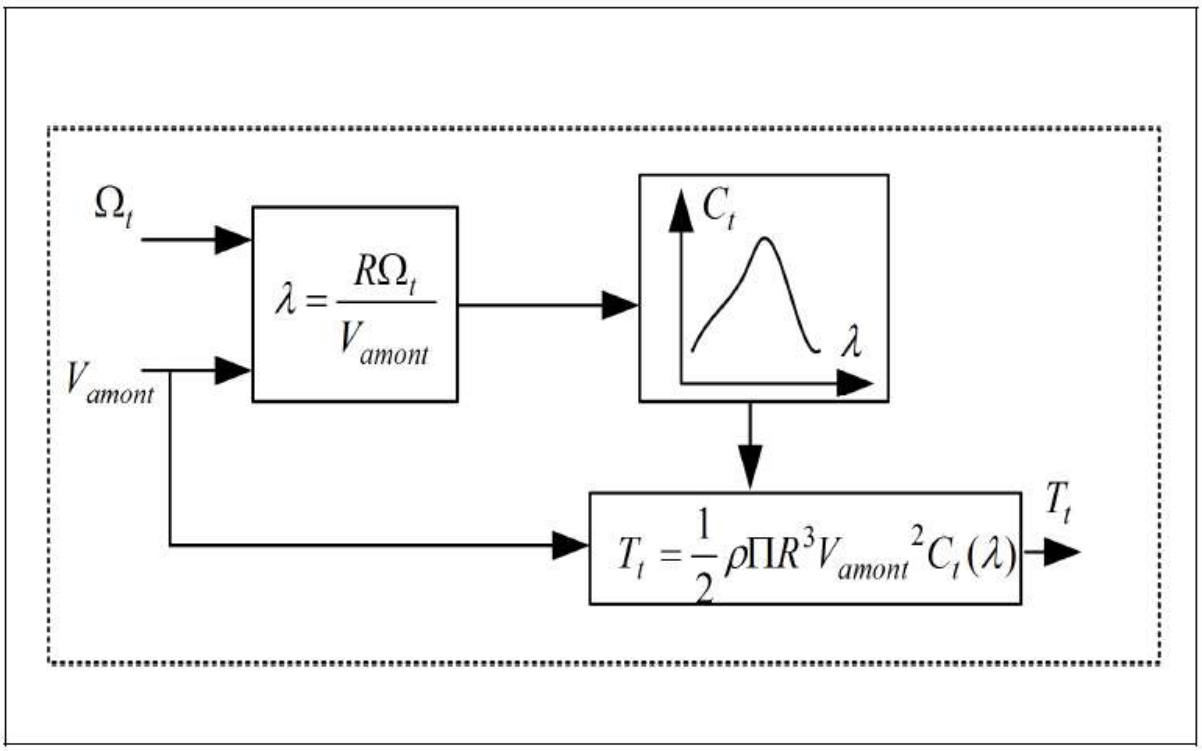


Figure II.16 *Modélisation du couple éolien.[1]*

II.2.2.7 Transmission [1]

Tous les éléments de la transmission, c'est-à-dire l'arbre lent côté rotor éolien, le multiplicateur et l'arbre rapide côté générateur, sont inclus dans le bloc «Transmission» Figure II.17. Le multiplicateur transforme la vitesse lente de l'arbre du rotor éolien en une vitesse beaucoup plus élevée, compatible avec la plage de vitesse de fonctionnement du générateur électrique.

Le modèle de la partie mécanique est défini en considérant un seul arbre équivalent. Le couple sur l'arbre du rotor éolien Tt et le couple électromagnétique Tem, sont liés par la relation:

$$J\frac{d\Omega_t}{dt} = T_t - NT_{em} - D\Omega_t \quad \text{(II.20)}$$

Avec :

$$J = J_t + N^2 J_G \quad \text{(II.21)}$$

$$D = D_t + N^2 D_g \quad \text{(II.22)}$$

$$N = \frac{\Omega_G}{\Omega_t} \quad \text{(II.23)}$$

Où

D_t et J_t : Respectivement le coefficient de frottement et l'inertie de l'éolienne

Dg et Jg : Respectivement le coefficient de frottement et l'inertie du générateur électrique

D et J : Coefficient du frottement et l'inertie équivalents totaux ramenés sur l'arbre lent

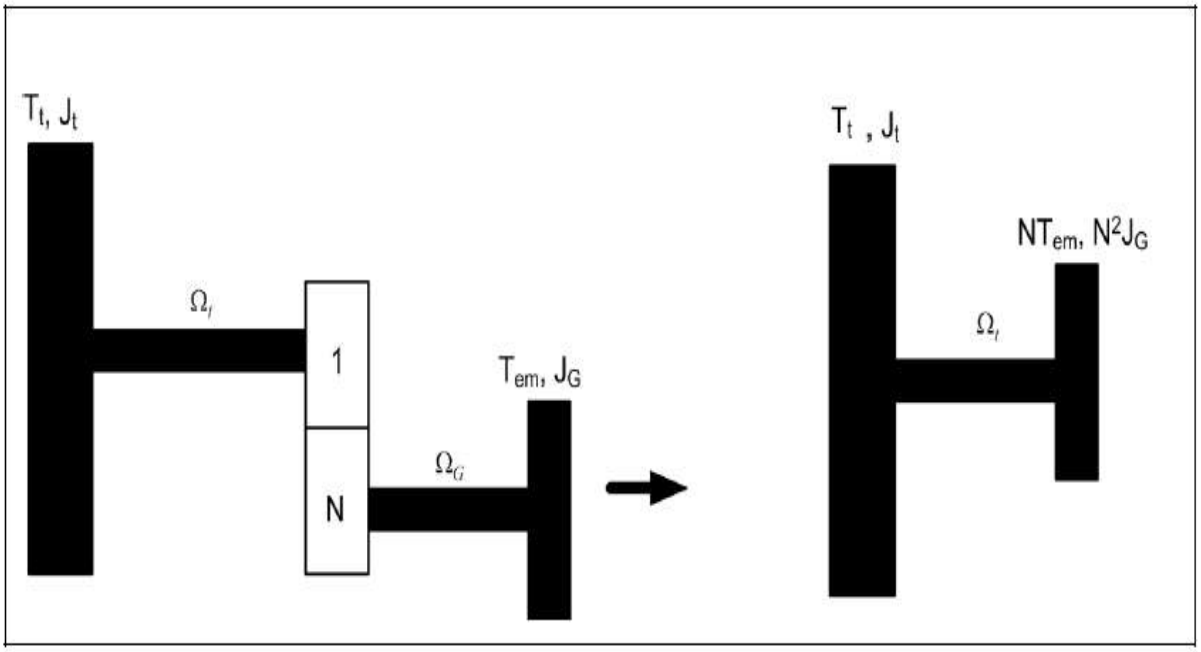


Figure II.17 *Couplage mécanique.*

II.3. La génératrice - machine – asynchrone

La machine asynchrone possède une structure analogue à celle de génératrice synchrone. Cependant, la machine asynchrone fonctionne sans alimentation au rotor.

Sa structure est représentée à la Figure II-18(a). La conception de la machine asynchrone est abordée dans [|9]. Ne possédant pas de borne d'alimentation, le rotor de cette machine exploite les courants induits par le champ statorique. Pour cela, la machine asynchrone est aussi appelée machine à induction.

Le stator d'une machine asynchrone est semblable à celui d'une machine synchrone. La différence fondamentale se situe au niveau de la construction du rotor qui est constitué d'un ensemble barres de cuivre, dont les bouts sont court-circuités par des anneaux métalliques formant ainsi une structure semblable à une cage d'écureuil (Figure II-18(b)). Cette cage est généralement construite dans les encoches du circuit magnétique rotorique permettant d'obtenir un entrefer constant. Il existe aussi des rotors de machine asynchrone portant un bobinage triphasé connecté à des bagues collectrices. On parle alors de rotor à bagues, ou rotor bobiné. Les bagues du rotor bobiné sont généralement montées en court-circuit pour les utilisations simples.

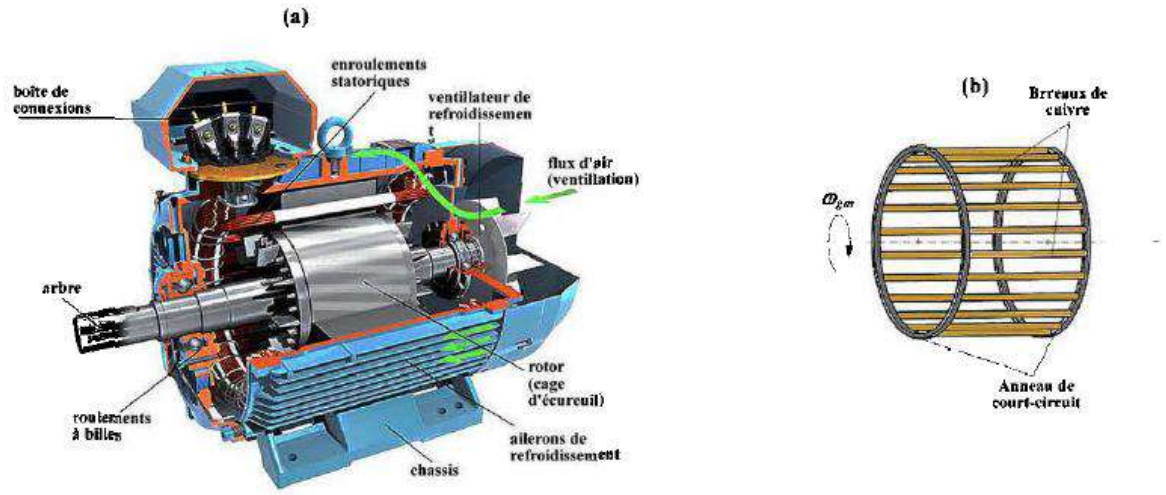


Figure II-18 *La machine asynchrone: (a) constitution; (b) la cage d'écureuil.*

Les rotors à cage d'écureuil sont de loin, les plus simples à construire et les plus robustes, puisqu'elles sont complètement sans balais. Les rotors bobinés offrent trois bornes de commandes supplémentaires pour le contrôle de la machine, mais restent fragiles et presque aussi couteux que les machines synchrones.

Pour sa modélisation, la Figure II-19 est généralement employée pour représenter la génératrice asynchrone. On admet généralement une génératrice à rotor bobiné et il suffit de court-circuiter les enroulements rotoriques, pour obtenir le modèle d'une génératrice à cage d'écureuil.

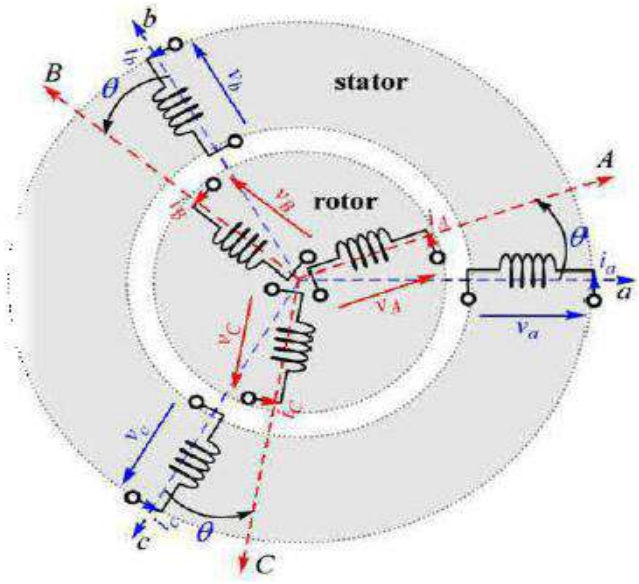


Figure II-19 *Schéma d'étude de la génératrice asynchrone*

II.4 Conclusion

Une brève description des sources d'énergies du système mécanique a été présentée dans ce chapitre. Les puissances mécaniques fournies par l'éolienne et le moteur diesel à partir des deux sources d'énergie primaire, le vent et le carburant, vont entrainer deux générateurs électriques. Une génératrice synchrone côté moteur diesel et génératrice asynchrone côté éolienne. Le modèle électrique du système ainsi que les modèles des machines d'entrainement seront détaillés dans le chapitre qui suit.

III.1 Introduction

La Figure II.1 montrée dans le chapitre précédent présente le schéma du principe du SHED. L'éolienne et Le MD sont respectivement couplés avec une GAS à cage et à une GS à pôle saillant. L'énergie mécanique produite par les deux sources d'énergies est transformée en énergie électrique par les deux génératrices électriques. La GAS comme on l'a déjà expliqué dans la partie littérature a besoin de l'énergie réactive pour le démarrage (génération du champ magnétique tournant). Dans notre cas les batteries de condensateurs branchées en parallèles avec le circuit statorique fournissent cette énergie. Le rotor de la GS est alimenté en courant continu par un circuit d'excitation. Dans ce chapitre, nous présentons le modèle électrique de notre SHÉD et les contrôleurs de la tension et de la fréquence d'alimentation.

III.2 Principe de fonctionnement d'un système hybride éolien diesel

La Figure III.1 montre le schéma détaille du **SHÉD**. D'âpres [1], le vent est l'élément dominateur. Si la vitesse du vent est suffisante, l'éolien alimentera seule la charge **(WO).** Le surplus de puissance est envoyé vers La charge secondaire. Rappelons que la régulation de la fréquence est assurée par cette même charge secondaire dans le cas de ce mode de fonctionnement. Durant ce fonctionnement, le **MD** se déconnecte automatiquement du **GS**. Le **MS** fonctionne ainsi comme un condenseur synchrone en fournissant de la puissance réactive dans l'objectif de maintenir la tension d'alimentation constante. Dans le cas où la vitesse du vent est moins forte, l'éolienne produisant peu de puissance, sera dans l'incapacité d'alimenter totalement seule la charge, alors le **GD** interviendra en fournissant la différence **(WD)**. Si la vitesse du vent est très faible, le **GD** sera contraint d'alimenter seul la charge **(DO).** Dans ce cas, le **GD** assure seul la régulation de la tension et de la fréquence.

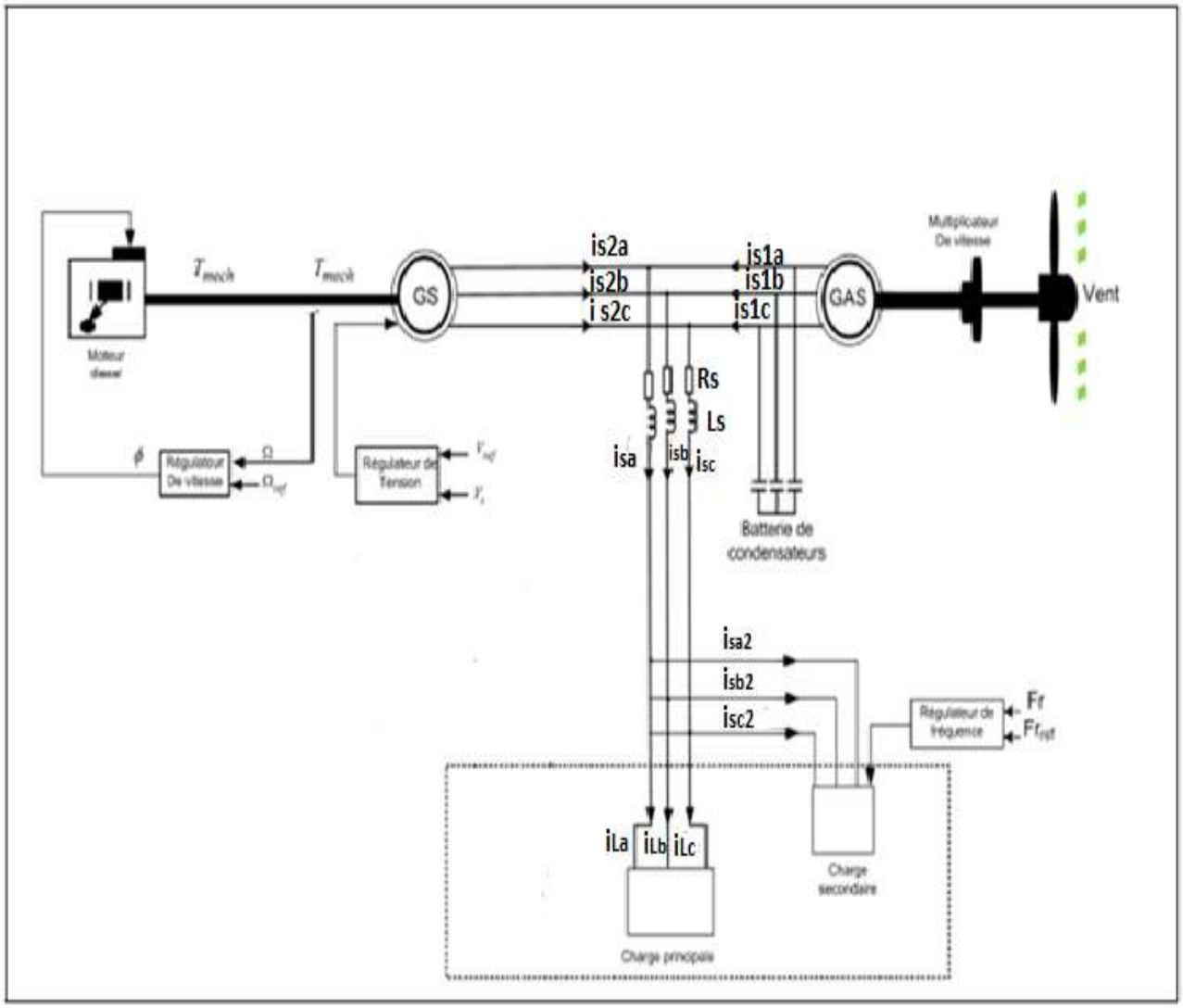


Figure III.1 *Schéma de système global.*

Où

is_{1abc} : Courants débités par la GAS.

is_{2abc} : Courants débités par la GS.

is_{abc} : Courants de source totale.

is_{abc2}: Courants de charge secondaire.

i_{Labc} : Courants de charge principale.

III.3 Modélisation de la machine asynchrone à cage d'écureuil

Grâce aux nombreux avantages tels que, la robustesse, la simplicité d'installation, le coût modeste par rapport aux autres types de machine électrique, la machine asynchrone à cage connue également sous le nom de machine à induction est une machine intéressante pour son utilisation comme génératrice couplée à une turbine éolienne [1][12].

III.3.1 Hypothèse pour la mise en équation de la machine asynchrone

La modélisation de la MAS à cage d'écureuil a déjà fait l'objet de nombreux travaux [1][9][10]. La machine est modélisée à entrefer constant, le stator porte un en roulement triphasé symétrique et le rotor a des barres en aluminium court-circuitées par des couronnes. On fait les hypothèses suivantes [1]:

- caractéristique magnétique linéaire,
- absence d'effet pelliculaire,
- absence de pertes dans le circuit magnétique.

III.3.2 Définition des différents enroulements [1][12]

La modélisation de la dynamique de la génératrice asynchrone est basée sur les relations électromagnétiques des circuits couplés. Ce couplage dépend de la position du rotor par rapport au stator. Le schéma d'étude d'une génératrice asynchrone est donné à la figure III.2. Les bobinages statoriques sont représentés par trois enroulements identiques dont les axes magnétiques sont décalés de $2\pi/3$. Ces bobinages sont parcourus par des courants triphasés i_a, i_b et i_c, qui induisent un champ tournant dans l'entrefer de la machine.

Le rotor (bobiné ou à cage d'écureuil) est représenté par trois enroulements identiques semblables à ceux du stator. Pour le cas d'une machine à cage d'écureuil, tous les enroulements rotoriques sont en court-circuit et les tensions rotoriques sont toutes nulles: $v_A = v_B = v_C = \mathbf{0}$.

Il est à noté que les grandeurs rotoriques ont des indices en majuscule et celles du stator en minuscule. L'angle électrique θ indique la position du rotor par rapport au stator. Si θ=0, l'enroulement de la phase ''A'' de la partie mobile se trouve aligné à l'enroulement ''a'' de la partie fixe, d'un point de vue magnétique. Par les hypothèses posées, seules les inductances mutuelles entre stator et rotor sont en fonction de l'angle θ.

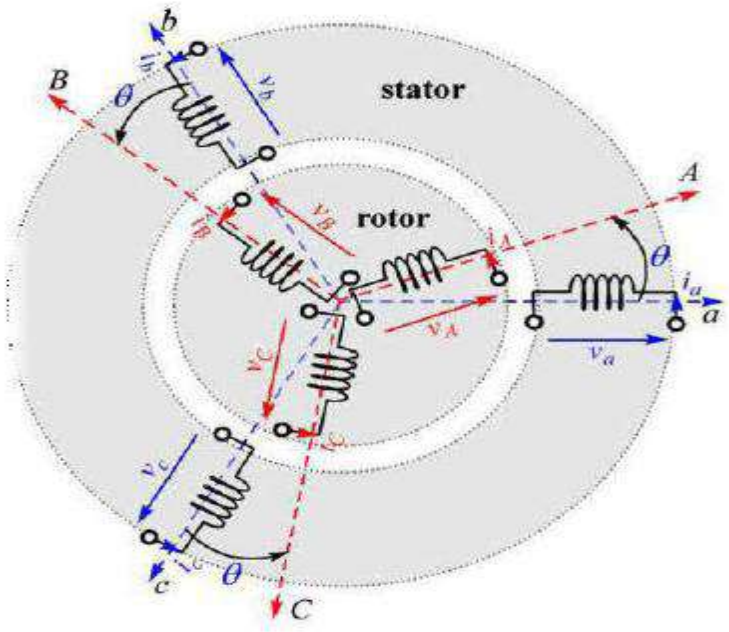


Figure III.2 *Définition des différents enroulements d'une machine asynchrone.*

Nous pouvons donc écrire les relations suivantes entre les différentes inductances. D'après [1], la machine est définie par cinq inductances.

– Inductances propres statoriques :

$$L_{aa} = L_{bb} = L_{cc} = cst \qquad \textbf{(III.1)}$$

– Inductances propres rotoriques :

$$L_{AA} = L_{BB} = L_{CC} = cst \qquad \textbf{(III.2)}$$

– Inductances mutuelles stator-stator :

$$L_{ab} = L_{ac} = L_{ba} = L_{bc} = L_{ca} = L_{cb} = cst \qquad \textbf{(III.3)}$$

– Inductances mutuelles rotor-rotor :

$$L_{AB} = L_{AC} = L_{BA} = L_{BC} = L_{CA} = L_{CB} = cst \qquad \textbf{(III.4)}$$

– Inductances mutuelles stator-rotor :

$$L_{Aa}, L_{Ab}, L_{Ac}, L_{Ba}, L_{Bb}, L_{Bc}, L_{Ca}, L_{Cb}, L_{Cc} = f(\theta) \qquad \textbf{(III.5)}$$

Comme dans toutes les machines électriques tournantes, la production d'un couple est la conséquence de l'interaction entre deux forces magnétomotrices l'une produite par le stator et l'autre par le rotor. Dans une machine à courant continu ou synchrone ces deux forces peuvent être indépendantes et réglables sans trop d'efforts mais la machine asynchrone à cage d'écureuil possède une force magnétomotrice au rotor qui dépend de celle au stator et d'une grandeur qui exprime la vitesse du rotor ω_m par rapport à la vitesse du champ tournant ω_s, la différence de vitesse entre le champ tournant et le rotor se nomme la vitesse de glissement g :

$$g = \frac{\omega_s - \omega_m}{\omega_s} \quad \textbf{(III.6)}$$

III.3.3 Équations électriques

Les équations de tension sont obtenues en appliquant la loi d'ohm généralisée aux bornes des enroulements du stator et du rotor [ ].

- Pour le stator :

$$u_a = R_a i_a + \frac{d\lambda_a}{dt} \quad \textbf{(III.7)}$$

$$u_b = R_b i_b + \frac{d\lambda_b}{dt} \quad \textbf{(III.8)}$$

$$u_c = R_c i_c + \frac{d\lambda_c}{dt} \quad \textbf{(III.9)}$$

- Pour le rotor (à cage) :

$$0 = R_A i_A + \frac{d\lambda_A}{dt} \quad \textbf{(III.10)}$$

$$0 = R_B i_B + \frac{d\lambda_B}{dt} \quad \textbf{(III.11)}$$

$$0 = R_C i_C + \frac{d\lambda_C}{dt} \quad \textbf{(III.12)}$$

Les équations de (III.7) à (III.12) peuvent se mettre sous forme matricielle :

$$[U_{abc}] = R_s [i_{abc}] + \frac{d}{dt}[\lambda_{abc}] \quad \textbf{(III.13)}$$

Et :

$$[U_{ABC}] = 0 = R_r[i_{ABC}] + \frac{d}{dt}[\lambda_{ABC}] \quad \textbf{(III.14)}$$

Où

u_a, u_b, u_c : Tensions instantanées aux bornes de l'enroulement statoriques.

i_a, i_b, i_c : Courant instantanés dans les phases de l'enroulement statorique.

i_A, i_B, i_C : Courants instantanés dans les phases de l'enroulement rotoriques.

R_r, R_s : Respectivement résistances rotoriques et statoriques.

$\lambda_a \lambda_b \lambda_c$: Flux totalisés traversant l'enroulement statorique.

$\lambda_A \lambda_B \lambda_C$: Flux totalisés traversant l'enroulement rotoriques.

III.3.4 Relation entre les flux et les courants

Nous pouvons exprimer linéairement les flux totalisés en fonction des inductances et des courants en utilisant l'hypothèse du non saturation de la machine [1].

$$\begin{bmatrix} \lambda_a \\ \lambda_b \\ \lambda_c \end{bmatrix} = [L_s] \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + [L_{sr}] \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix} \quad \textbf{(III.15)}$$

$$\begin{bmatrix} \lambda_A \\ \lambda_B \\ \lambda_C \end{bmatrix} = [L_{sr}]^T \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + [L_r] \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix} \quad \textbf{(III.16)}$$

Avec :

$$[L_s] = \begin{pmatrix} L_{aa} & L_{ab} & L_{ac} \\ L_{ba} & L_{bb} & L_{ac} \\ L_{ca} & L_{ab} & L_{cc} \end{pmatrix} \quad \textbf{(III.17)}$$

$$[L_s] = \begin{pmatrix} L_{AA} & L_{AB} & L_{AC} \\ L_{BA} & L_{BB} & L_{AC} \\ L_{CA} & L_{AB} & L_{CC} \end{pmatrix} \quad \textbf{(III.18)}$$

$$[L_{sr}]=[L_{rs}]^T=L_{aA}^{\max}\left[\begin{pmatrix}\cos(\theta) & \cos(\theta+\frac{2\pi}{3} & \cos(\theta-\frac{2\pi}{3}\\ \cos(\theta-\frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta) & \cos(\theta+\frac{2\pi}{3})\\ \cos(\theta+\frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta-\frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta)\end{pmatrix}\right] \quad \textbf{(III.19)}$$

L_{aa} : est l'inductance propre de la phase a,

L_{ab} : la mutuelle entre la phase a et b.

$[L_{sr}]$: Mutuelle entre stator et rotor.

L_{aA}^{max} : L'inductance mutuelle maximale entre stator et rotor.

La matrice des inductances mutuelles est fonction de l'angle θ, ce qui rend la résolution des équations onéreuses. Pour remédier à ce problème et rendre le système d'équations à coefficients constants, on applique la théorie référentielle de Park**.**

III.3.5 Transformation de Park

La transformée de Park est une opération mathématique qui permet de passer d'un système triphasé d'axes magnétique décalés d'un angle électrique de 120°, en un système à trois axes orthogonaux. En fait ce n'est rien d'autre qu'un changement de base pour les axes magnétiques du système [ ].

La transformation directe est la suivante :

$$\begin{bmatrix} f_d\\ f_q\\ f_o\end{bmatrix}=\frac{2}{3}\left[\begin{pmatrix}\cos(\theta) & \cos(\theta-\frac{2\pi}{3} & \cos(\theta+\frac{2\pi}{3}\\ \sin(\theta) & \sin(\theta-\frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta+\frac{2\pi}{3})\\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2}\end{pmatrix}\right]\begin{bmatrix} f_a\\ f_b\\ f_c\end{bmatrix}=[P]\begin{bmatrix} f_a\\ f_b\\ f_c\end{bmatrix} \quad \textbf{(III.20)}$$

$$\theta=\omega t+\theta(0) \quad \textbf{(III.21)}$$

Où f Peut représenter les grandeurs de la machine comme la tension ou le courant, les flux et la charge électrique, θ est l'angle entre l'axe a et l'axe d (axe direct) du référentiel de Park Figure III.3. Les grandeurs d'indice «o» existent seulement en présence de composantes homopolaires, c'est-à-dire en cas de fonctionnement dissymétrique de la machine.

Les grandeurs d'indice «d» et «q» peuvent être considérées comme les projections sur les deux axes d et q en quadrature de celles des axes a, b et c. Le facteur $\frac{2}{3}$ est présent dans ce type de transformée

pour permettre de conserver les grandeurs de la machine. La transformée inverse de la matrice de Park est donnée par la matrice suivantes:

$$\begin{bmatrix} f_a \\ f_b \\ f_c \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} \cos(\theta_{da}) & \sin(\theta_{da}) & 1 \\ \cos(\theta_{da} - \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta_{da} - \frac{2\pi}{3}) & 1 \\ \cos(\theta_{da} + \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta_{da} + \frac{2\pi}{3}) & 1 \end{pmatrix} \begin{bmatrix} f_d \\ f_q \\ f_o \end{bmatrix} = [P]^{-1} \begin{bmatrix} f_d \\ f_q \\ f_o \end{bmatrix} \quad \textbf{(III.22)}$$

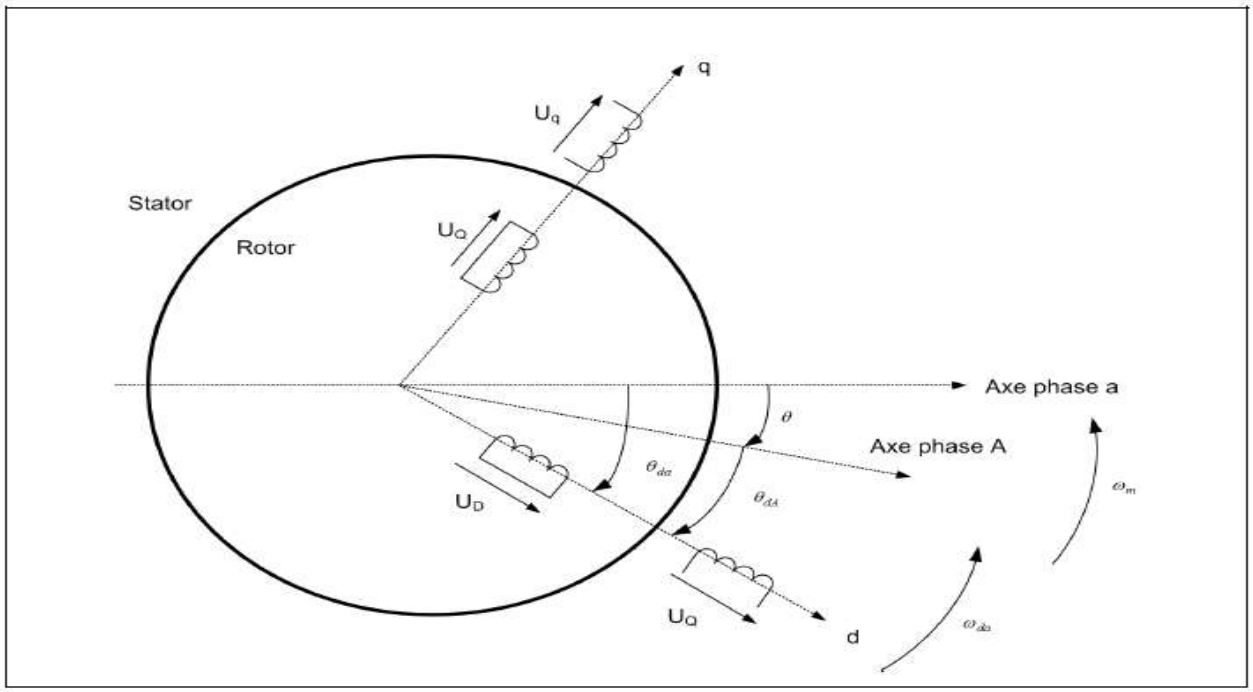


Figure III.3 *Représentation de la machine asynchrone dans le repère de Park.*

Les angles θ_{da} et θ_{dA}, représentent respectivement l'angle électrique entre la phase a statorique et l'axe d de Park et celui de entre la phase A rotoriques et l'axe d de Park. ω_{da} désigne la vitesse angulaire électrique du système d'axe d, q, ω_m celle du rotor.

L'enroulement homopolaire du rotor n'est pas représenté à cause de son influence inexistante dans notre système.

III.3.6 Équations des flux dans le plan dq [1]

L'absence de l'équation de flux homopolaire dans le rotor découle du fait que dans une machine asynchrone à cage, le rotor est en court-circuit triphasé symétrique permanent sans neutre relié, donc, la composante homopolaire est nulle.

Par ailleurs, nous posons :

$$L_s = L_{aa} - L_{ab} \quad \textbf{(III.23)}$$

$$L_r = L_{AA} - L_{AB} \quad \textbf{(III.24)}$$

$$L_o = L_{aa} + 2L_{ab} \quad \textbf{(III.25)}$$

$$L_{md} = L_{mq} = \frac{3}{2} L_{aA}^{maw} = L_m \quad \textbf{(III.26)}$$

L_s , L_r , L_o et L_{md} désignent respectivement les inductances cycliques statoriques, les inductances rotoriques, l'inductance homopolaire statorique et l'inductance mutuelle cyclique entre rotor et stator. Nous remarquons que les inductances présentes dans ces équations sont maintenant indépendantes de l'angle électrique θ .

Les équations (III.15) et (III. 16) dans les axes d-q, après développement et arrangement on obtient :

- Pour le stator :

$$\lambda_d = L_s i_d + L_{md} i_D \quad \textbf{(III.27)}$$

$$\lambda_q = L_s i_q + L_{mq} i_Q \quad \textbf{(III.28)}$$

$$\lambda_o = L_o i_o \quad \textbf{(III.29)}$$

- Pour le rotor :

$$\lambda_D = L_r i_D + L_{md} i_d \quad \textbf{(III.30)}$$

$$\lambda_Q = L_r i_Q + L_{mq} i_q \quad \textbf{(III.31)}$$

III.3.7 Équations des tensions dans le plan dq :

Ainsi les équations des tensions statoriques et rotoriques de (III.7) à (III.10), pour un référentiel lié au champ tournant $\omega_{da=\omega_s}$ s'écrivent sous la forme suivante :

$$u_d = R_a i_d + \frac{d\lambda_d}{dt} - \omega_s \lambda_q \quad \textbf{(III.32)}$$

$$u_q = R_a i_q + \frac{d\lambda_q}{dt} - \omega_s \lambda_q \quad \textbf{(III.33)}$$

$$u_o = R_a i_o + \frac{d\lambda_o}{dt} \quad \textbf{(III.34)}$$

$$u_D = 0 = R_A i_D + \frac{d\lambda_D}{dt} - (\omega_s - \omega_m)\lambda_Q \quad \textbf{(III.35)}$$

$$u_Q = 0 = R_A i_Q + \frac{d\lambda_Q}{dt} - (\omega_s - \omega_m)\lambda_D \quad \textbf{(III.36)}$$

Le couple électromagnétique s'exprime à partir des grandeurs électriques, est défini par la relation suivante :

$$T_{em} = \frac{3}{2} P_p (i_q \lambda_q - i_d \lambda_d) \quad \textbf{(III.37)}$$

III.3.8 Équation mécanique de la machine asynchrone à cage

La dynamique de la machine asynchrone à exprimée par la relation (III.38)

$$J \frac{d_{\omega t}}{dt} = T_t - N T_{em} - D\omega_t \quad \textbf{(III.38)}$$

Les paramètres de la machine asynchrone sont donnés dans le tableau 2 (Annexe).

III.4 Modélisation de la machine synchrone

La puissance mécanique P_{mech} fournie en sortie du bloc «moteur diesel» est convertie en puissance électrique par une machine synchrone à pôle saillant. La machine synchrone peut fonctionner autant en mode moteur qu'en mode générateur. Elle est utilisée surtout en mode générateur, dans notre cas. Le moteur diesel entraine la génératrice dans les deux modes de fonctionnements (**DO** et **WD**).

Dans le cas où le vent est fort l'éolienne est capable de servir seul la demande en puissance de la charge. La machine synchrone fonctionne comme condenseur synchrone (**$P_{mec} = 0$**), elle reçoit de la puissance active de l'éolienne pour compenser les pertes dans la machine et fournit la puissance réactive dont la **GAS** a besoin.

La Machine synchrone comprend deux parties principales, le circuit induit (stator) et le circuit inducteur (rotor). La Figure III.4 montre la disposition des enroulements d'une machine synchrone à 2 paires de pôle.

III.4.1 Définition des enroulements

La Figure III.4 [1], montre la disposition des enroulements pour une machine synchrone comportant un seule pair pôle. La référence angulaire est l'axe magnétique de la phase` a `est la séquence positive (abc). On définit deux axes supplémentaires : axes d (direct) et q (quadrature), placés dans les axes polaire et interpolaire.

Les six enroulements sont ceux :

1. du stator (a-a', b-b', c-c');
2. de l'inducteur (F-F');
3. des amortisseurs (D-D', Q-Q').

On désigne les grandeurs statoriques par des lettres minuscules (a,b,c), et les grandeurs rotoriques par des lettres majuscules.

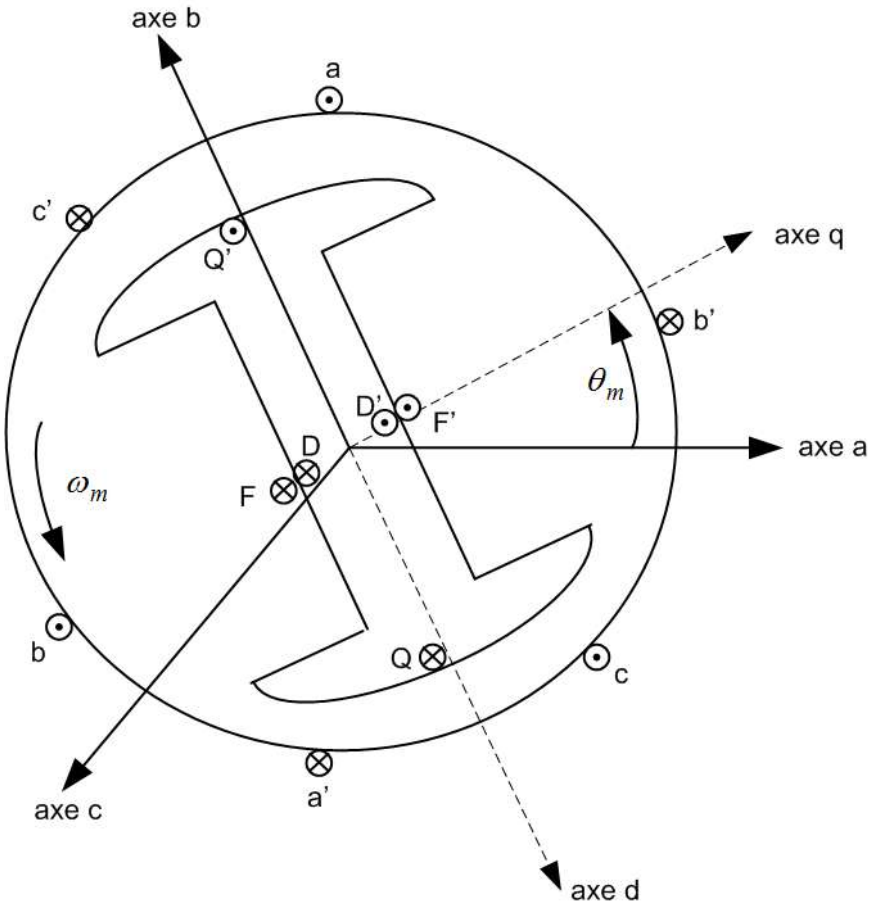


Figure III.4 *Disposition des enroulements pour une machine synchrone triphasée comportant une seule paire de pôles.*

III.4.2 Équations électriques

Maintenant, nous développons les équations différentielles qui régissent le comportement électrique de la MS en se basant sur les notions données dans l'ouvrage [1]. Nous présentons d'abord les équations des tensions et des flux dans le référentiel fixe, puis la transformation de Park est introduite. Ensuite les diverses équations électriques MS sont décrites dans un nouveau référentiel qui tourne avec le rotor. La Figure III.5 montre le schéma électrique correspondant à la MS décrite à la Figure III.4. Les enroulements des amortisseurs sont en court-circuit ($V_D=V_Q=0$). Les inductances mutuelles ne sont pas représentées dans ce schéma.

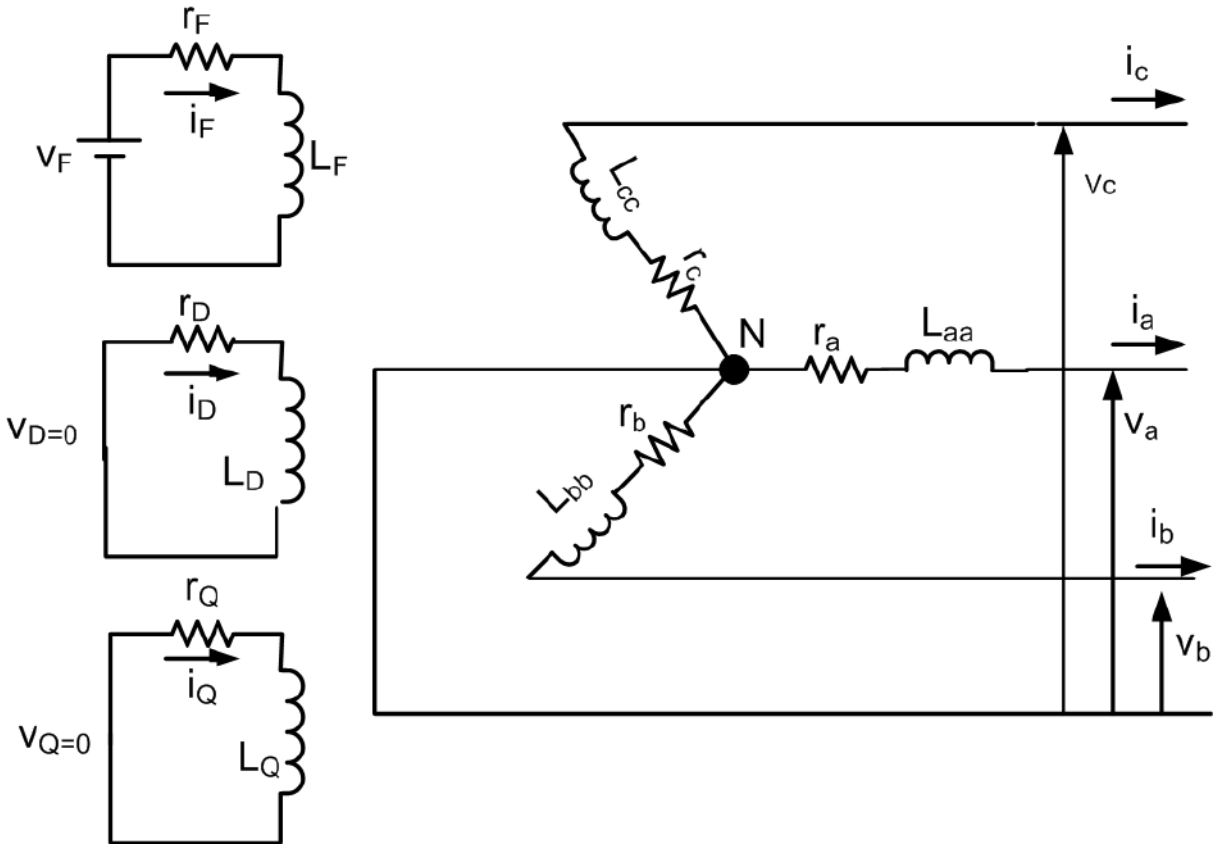


Figure III.5 *Schéma électrique de la machine synchrone dans le référentiel fixe.*

Les équations de flux sont données par l'équation (III.39). Dans ces équations, L_{ij} est une self inductance si i=j, et une inductance mutuelle entre i et j si i≠j.

$$\begin{bmatrix} \lambda_a \\ \lambda_b \\ \lambda_c \\ \lambda_F \\ \lambda_D \\ \lambda_Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{aa} & L_{ab} & L_{ac} & L_{aF} & L_{aD} & L_{aQ} \\ L_{ba} & L_{bb} & L_{bc} & L_{bF} & L_{bD} & L_{bQ} \\ L_{ca} & L_{cb} & L_{cc} & L_{cF} & L_{cD} & L_{cQ} \\ L_{Fa} & L_{Fb} & L_{Fc} & L_{FF} & L_{FD} & L_{FQ} \\ L_{Da} & L_{Db} & L_{Dc} & L_{DF} & L_{DD} & L_{DQ} \\ L_{Qa} & L_{Qb} & L_{Qc} & L_{FQ} & L_{QD} & L_{QQ} \end{bmatrix} \quad \textbf{(III.39)}$$

On peut exprimer l'équation (III.40) sous une forme plus compacte :

$$\begin{bmatrix} \boldsymbol{\lambda_{abc}} \\ \boldsymbol{\lambda_{FDQ}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{L_{aa}} & \boldsymbol{L_{aR}} \\ \boldsymbol{L_{Ra}} & \boldsymbol{L_{RR}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \boldsymbol{i_{abc}} \\ \boldsymbol{i_{FDQ}} \end{bmatrix} \quad \textbf{(III.40)}$$

Où

L_{aa}: Matrice de l'inductance stator-rotor.

L_{aR}, L_{Ra} : Matrices des inductances stator-rotor et rotor stator.

L_{RR}: Matrice de d'inductance rotor-rotor.

Les équations des tensions dans le référentiel fixe sont données par l'équation suivante :

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \\ -V_F \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_a & & & & & \\ & r_b & & & 0 & \\ & & r_c & & & \\ & & & r_F & & \\ & 0 & & & r_D & \\ & & & & & r_Q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \\ i_F \\ i_D \\ i_Q \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \frac{d\lambda_a}{dt} \\ \frac{d\lambda_b}{dt} \\ \frac{d\lambda_c}{dt} \\ \frac{d\lambda_F}{dt} \\ \frac{d\lambda_D}{dt} \\ \frac{d\lambda_Q}{dt} \end{bmatrix} \quad \textbf{(III.41)}$$

On peut aussi exprimer l'équation (III.41) sous une forme plus compacte :

$$\begin{bmatrix} V_{abc} \\ V_{FDQ} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{abc} & 0 \\ 0 & r_{FDQ} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{d\lambda_{abc}}{dt} \\ \frac{d\lambda_{FDQ}}{dt} \end{bmatrix} \quad \textbf{(III.42)}$$

Le système d'équations formé par (III.39) à (III.42) n'est pas linéaire, du fait des inductances variables avec θ_m Pour supprimer la non linéarité, on transforme les enroulements statoriques en enroulements orthogonaux en utilisant la transformation du Park (III.20).

Les enroulements rotoriques ne subissent aucune transformation puisqu'ils sont déjà ordonnés selon deux axes perpendiculaires. Dans l'expression (III.20), f peut être une tension, un courant ou un flux. L'angle θ est celui de nouveau référentiel par rapport à l'axe magnétique de la phase a. ω, est sa vitesse angulaire. Comme on veut que le référentiel tourne avec le rotor, on pose $\theta = \theta_m$ et $\omega = \omega_m$. Les indices suivants servant à identifier les variables du nouveau référentiel :

- d, pour toutes les variables dans l'axe direct.
- q, pour toutes les variables dans l'axe en quadrature.
- o, pour toutes les variables dans l'axe homopolaire.

Dans le but de simplifier l'équation (III.40), on applique la transformation de Park à la partie de l'équation qui décrit le stator :

$$\begin{bmatrix} \boldsymbol{P} & \boldsymbol{0} \\ \boldsymbol{0} & \boldsymbol{P} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \boldsymbol{\lambda_{abc}} \\ \boldsymbol{\lambda_{FDQ}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{P} & \boldsymbol{0} \\ \boldsymbol{0} & \boldsymbol{P} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \boldsymbol{L_{aa}} & \boldsymbol{L_{aR}} \\ \boldsymbol{L_{Ra}} & \boldsymbol{L_{RR}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \boldsymbol{i_{abc}} \\ \boldsymbol{i_{FDQ}} \end{bmatrix} \quad \textbf{(III.43)}$$

Dans cette équation, I est la matrice identité 3 par 3, de telle sorte qu'on n'affecte pas les équations du rotor.

Après plusieurs manipulations algébriques et matricielles, on obtient l'équation suivante :

$$\begin{bmatrix} \lambda_q \\ \lambda_d \\ \lambda_F \\ \lambda_D \\ \lambda_Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -L_q & 0 & 0 & 0 & L_{mq} \\ 0 & -L_d & L_{md} & L_{md} & 0 \\ 0 & -L_{md} & L'_F & L_{md} & 0 \\ 0 & -L_{md} & L_{md} & L'_D & 0 \\ -L_{mq} & 0 & 0 & 0 & L'_Q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_q \\ i_d \\ i'_F \\ i'_D \\ i'_Q \end{bmatrix} \quad \textbf{(III.44)}$$

On note que la composante homopolaire λ_0 est nulle, on remarque aussi l'apparition «′» à l'exposant sur toutes les grandeurs relatives au rotor. Ceci est dû au fait que toutes les grandeurs du rotor sont ramenées au stator.

On définit aussi un nouvel ensemble d'inductances, où l'inductance totale de chaque circuit comporte une inductance de fuite et une inductance mutuelle avec chacun des autres circuits de même axe (d ou q). Comme les axes d et q sont orthogonaux, il n'y pas de couplage magnétique entre eux. De plus, nous posons l'hypothèse que toutes les inductances mutuelles d'un même axe sont égales.

- Pour l'axe d, on définit l'inductance mutuelle L_{md}:

$$L_{dD} = L_{Dd} = L_{dF} = L_{Fd} = L_{DF} = L_{FD} = L_{md} \quad \textbf{(III.45)}$$

- Pour l'axe q, on définit l'inductance mutuelle L_{mq}:

$$L_{qQ} = L_{Qq} = L_{mq} \quad \textbf{(III.46)}$$

Les inductances de chacun des cinq circuits sont alors données par les équations de (III.47) à (III.51), où L_i est l'inductance totale de l'enroulement i, L_{li} est l'inductance de fuite de l'enroulement i, s désigne le stator et L_{mj} est l'inductance mutuelle de l'axe j.

$$\boldsymbol{L_d = L_{ls} + L_{md}} \quad \textbf{(III.47)}$$

$$\boldsymbol{L_q = L_{ls} + L_{mq}} \quad \textbf{(III.48)}$$

$$\boldsymbol{L'_F = L'_{IF} + L_{md}} \quad \textbf{(III.49)}$$

$$\boldsymbol{L'_Q = L'_{lQ} + L_{mq}} \quad \textbf{(III.50)}$$

$$\boldsymbol{L'_D = L'_{ID} + L_{md}} \quad \textbf{(III.51)}$$

Maintenant nous appliquons la transformation de Park à l'équation des tensions (III.42):

$$\begin{bmatrix} \boldsymbol{P} & \boldsymbol{0} \\ \boldsymbol{0} & \boldsymbol{I} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \boldsymbol{V_{abc}} \\ \boldsymbol{V'_{FDQ}} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} \boldsymbol{P} & \boldsymbol{0} \\ \boldsymbol{0} & \boldsymbol{I} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \boldsymbol{r_{abc}} & \boldsymbol{0} \\ \boldsymbol{0} & \boldsymbol{r'_{FDQ}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \boldsymbol{I_{abc}} \\ \boldsymbol{I'_{FDQ}} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \boldsymbol{P} & \boldsymbol{0} \\ \boldsymbol{0} & \boldsymbol{I} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \boldsymbol{\frac{d\lambda_{abc}}{dt}} \\ \boldsymbol{\frac{d\lambda_{FDQ}}{dt}} \end{bmatrix} \qquad \textbf{(III.52)}$$

Après de nombreuses manipulations, on obtient l'équation suivante :

$$\begin{bmatrix} V_q \\ V_d \\ v'_F \\ V'_D \\ V_Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -r_s & & & & \\ & -r_s & & 0 & \\ & & r'_F & & \\ & 0 & & r'_D & \\ & & & & r'_Q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_q \\ i_d \\ i'_F \\ i'_D \\ i'_Q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{d\lambda_d}{dt} \\ \frac{d\lambda_q}{dt} \\ \frac{d\lambda_F}{dt} \\ \frac{d\lambda'_D}{dt} \\ \frac{d\lambda'_Q}{dt} \end{bmatrix} + \omega_m \begin{bmatrix} \lambda_d \\ -\lambda_q \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \qquad \textbf{(III.53)}$$

Où :

$$\mathbf{r_a = r_b = r_c = r_s}$$

Et

ω_m Vitesse angulaire mécanique du rotor.

L'équation (III.53) décrit le comportement électrique de la MS. La Figure III.6, montre le schéma électrique de la MS à pôle saillants dans le référentiel tournant avec le rotor.

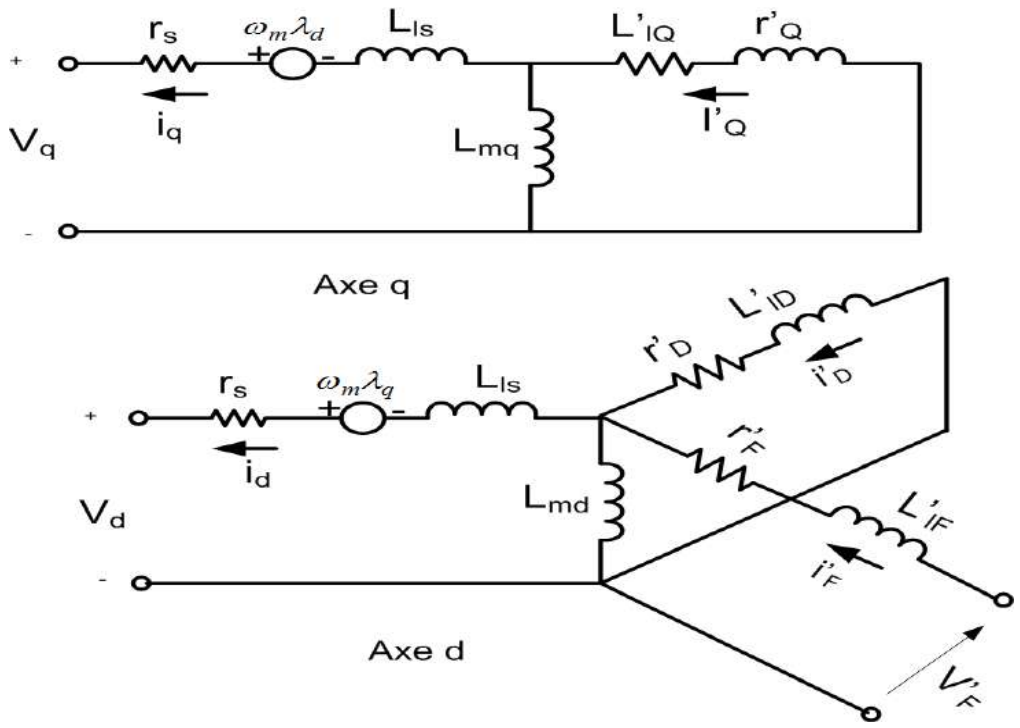


Figure III.6 *Schéma électrique de la machine synchrone à pôles saillants dans le référentiel tournant avec le rotor.*

Finalement le couple électromagnétique est donné par la relation suivante [1][9]:

$$T_{em} = \frac{3}{2} P_p (i_q \lambda_q - i_d \lambda_d) \quad \textbf{(III-54)}$$

III.4.2 Équation mécanique de la machine synchrone

La dynamique de la machine synchrone est décrite par l'équation (III.55) :

$$J \frac{d\omega_m}{dt} = T_{mech} - T_{em} - D\omega_m \quad \textbf{(III.55)}$$

Dans cette équation :

ωm est la vitesse angulaire du rotor, en rad/s,

Tmech est le couple mécanique appliqué à l'arbre de la machine et provenant du MD, en N.m. Tem est le couple électromagnétique développé par la machine, en N.m. J est le moment d'inertie combiné du rotor de la machine et du MD qui l'entraîne, en kg.m^2 D est le coefficient de frottement visqueux, en N.m.s. Les paramètres de la MS sont illustrés dans le tableau 3 (Annexe 1).

III.5 Régulateur de tension

Afin de régler la tension terminale de la MS, et la quantité de la puissance réactive générée ou absorbée. Un circuit de commande est associé à la MS pour contrôler la tension d'excitation. Le régulateur de tension que nous avons implanté est conforme au type 1 de l'IEEE (Collaboration, 1992) [1], il est représenté par le schéma Simulink donné à la Figure III.7.

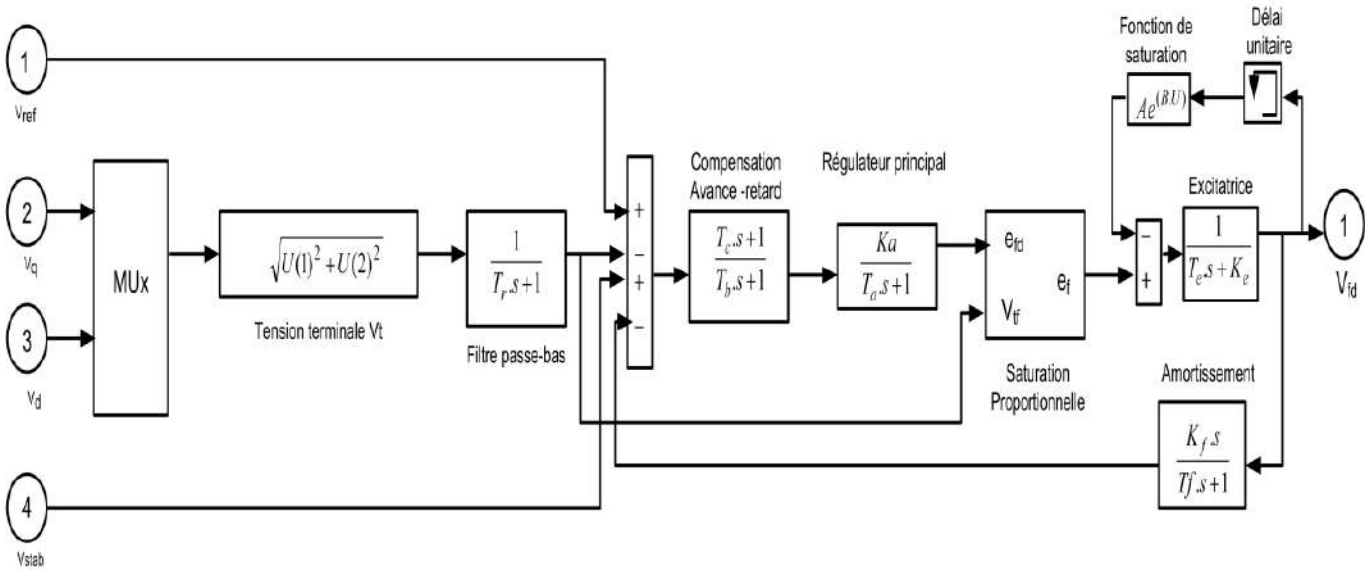


Figure III.7 *Régulateur de tension type 1 d'IEEE tel qu'elle est implanté dans simulink.*

Le régulateur de tension comporte quatre entrées. La première entrée est la tension de référence. Les deux entrées suivantes, les tensions V_d et V_q provenant habituellement de la machine à laquelle le régulateur est branché. La quatrième entrée, la tension de stabilisation est générée par un régulateur employé dans un réseau où il y a plusieurs **MS**. On obtient en premier lieu la tension terminale de la machine en prenant la racine carrée de la somme des carrés des tensions V_d etV_q. La grandeur obtenue est en suite filtrée par un filtre passe-bas la sortie du filtre est soustraire de la tension de référence v_{ref} et la tension de stabilisation V_{stab} s'il y en a une **MS** de plus. Un retour de la sortie est également soustrait après avoir passé par un circuit d'amortissement. L'erreur totale passe ensuite par un compensateur d'avance-retard avant de passer par le régulateur principal qui un simple proportionnel avec un filtre passe-bas. La tension d'excitation passe par un limiteur. Le dernier étage est un filtre passe-bas permet de tenir compte du gain et de la constante de temps de l'excitatrice et une boucle comportant une fonction non-linéaire, permet de tenir compte de la saturation de la génératrice à courant continu. Les paramètres de ce régulateur de tension sont illustrés dans le tableau 4 (Annexe 1).

III.6 Réglage de la fréquence [1]

La charge secondaire ou de délestage est une charge spéciale. Elle est utilisée dans un réseau autonome pour régler la fréquence du réseau autonome autour de sa valeur nominale 60 Hz, dans les conditions de surplus de la puissance active produite par les sources d'énergies renouvelables. Pour avoir une fréquence constante durant tous les modes de fonctionnements, il faut que la puissance active produite par les deux sources d'énergies P_{source} soit égale à celle consommée par la charge P_L.

$$\boldsymbol{P_{source} = P_L} \quad \textbf{(III.56)}$$

Où :

$$\boldsymbol{P_{source}=P_w + P_D} \quad \textbf{(III.57)}$$

P_D : Puissance électrique produite par le générateur diesel.

P_w: Puissance électrique produite par l'éolienne.

Si la puissance produite par les deux sources d'énergies est supérieure à celle demandée par la charge (III.58), la différence de puissance ΔP (III.59), est envoyée vers la charge secondaire afin de maintenir la fréquence du notre SHÉD constante.

$$\boldsymbol{P_{source} > P_L} \quad \textbf{(III.58)}$$

$$\boldsymbol{\Delta P = P_{source} - P_L} \quad \textbf{(III.59)}$$

La Figure III.8, montre la charge secondaire avec le régulateur de fréquence, elle consiste en huit jeux de résistances à trois phases connectés en série avec GTO thyristor des commutateurs. La puissance nominale de chaque jeu suit une progression binaire pour que la charge puisse être variée de 0 à 446.25 kW avec un pas de 1.75kW. Les thyristors GTO sont simulés par des commutateurs idéaux .

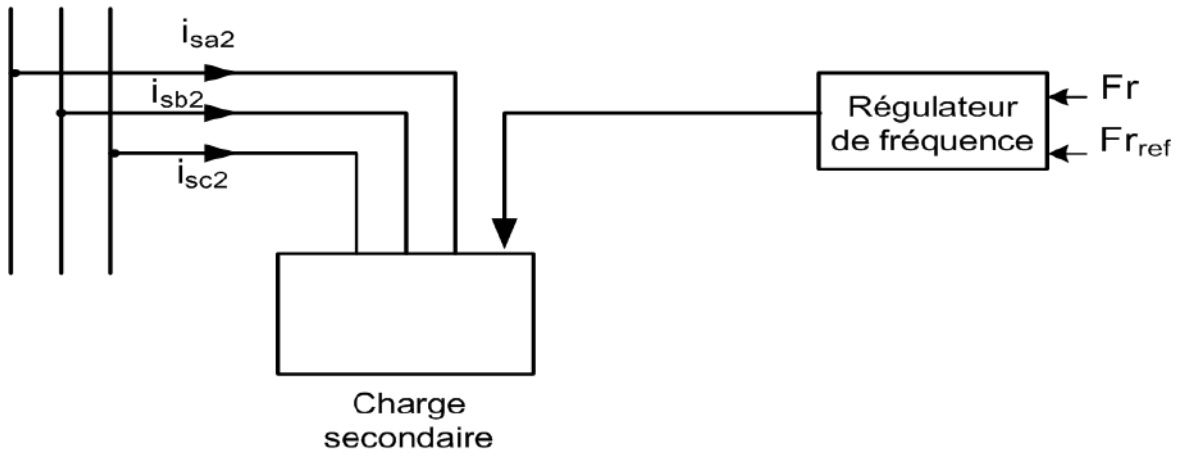


Figure III.8 *Schéma bloc de la charge secondaire avec le régulateur de fréquence.*

La fréquence du réseau est contrôlée par le bloc de régulateur de fréquence discrète montré à la Figure **III.9**. Le régulateur de fréquence utilise un PLL pour mesurer la fréquence de réseau. La fréquence mesurée est comparée à celle de référence. L'erreur obtenue est intégrée pour obtenir l'erreur de phase. L'erreur de phase est alors utilisée par un contrôleur de type PID (du régulateur de fréquence sont illustrés dans le tableau 5(Annexe1), dans l'objectif de produire un signal P_{ref} qui représente la puissance qui sera dissipée dans la charge secondaire. Ce signal est converti en un signal analogique de 8 bit capable de contrôler le bloc résistance.

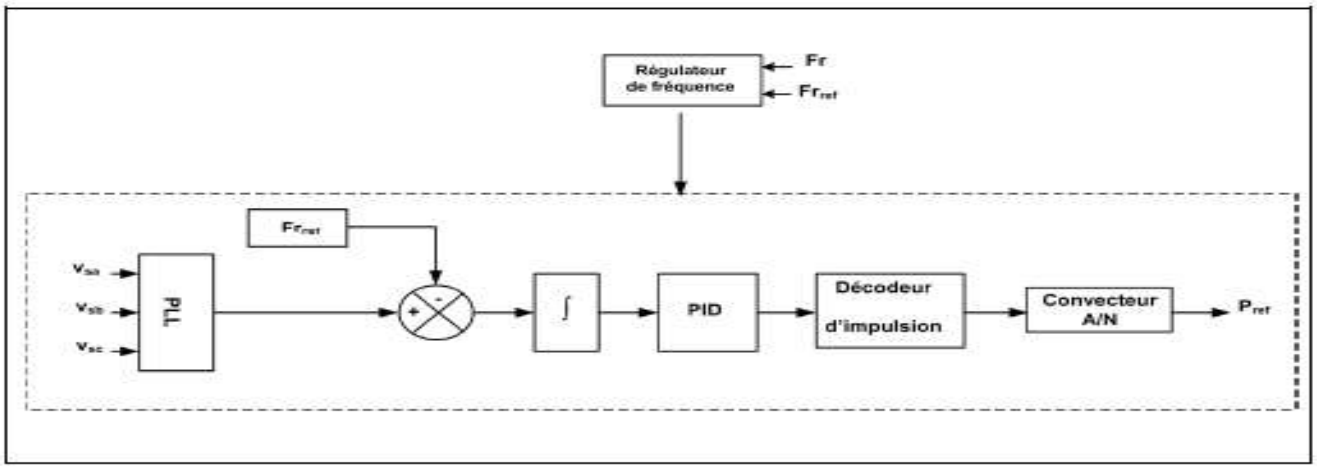


Figure III.9 *Régulateur de fréquence.[1]*

Où

Fr : fréquence de réseau.

Fr_{ref} : fréquence de référence.

III.7 Modèle de la charge [1][9]

Il existe deux types de charge, des charges linéaires à caractère résistif et inductif, comme, les ampoules à incandescence, les chauffe-eaux etc. Le deuxième type de charges est représenté par les charges non linéaires qui détériorent la qualité d'énergie. La résolution des problèmes engendrées par ce type de charge fait l'objet d'un autre projet. Dans l'analyse des systèmes classiques, la demande de la charge en puissance est représentée par :

$$\mathbf{S_L = P_L + jQ_L = Y_L|V_L|^2} \qquad \textbf{(III.60)}$$

S_L : Puissance apparente demandée par la charge.

P_L : Puissance active demandé par la charge.

Q_L : Puissance réactive demandé par la charge.

Y_L : Admittance de la charge.

III.8 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté une modélisation de la partie électrique de SHÉD qui est constitué d'une génératrice synchrone et asynchrone, d'une charge secondaire, d'une charge principale, d'un régulateur de fréquence et d'un régulateur de tension. Nous avons conçu dans l'environnement MATLAB/Simulink, les modèles de tous les éléments du SHÉD afin de simuler le comportement du système complet.

IV.1 Introduction

Le système global montré dans la Figure III.1 est implanté dans Matlab/Simulink. Les éléments du SHÉD sont utilisés par module. Une charge linéaire de type résistive de 75 KW représente la puissance demandée par les consommateurs (village). Au début nous utilisons le GD seul pour alimenter cette charge. Après nous utilisons l'éolienne seule avec la même charge et avec une vitesse de vent égale à 10 m /s.

IV.2 Modèle du générateur diesel

Le modèle du GD est donné à la Figure IV.1. Il est validé par simulation pour s'assurer du bon fonctionnement du régulateur de tension et de vitesse. Les paramètres du modèle sont les mêmes que ceux donnés dans l'annexe (tableau 4). La charge linéaire branchée est soumise à des variations de 50%.

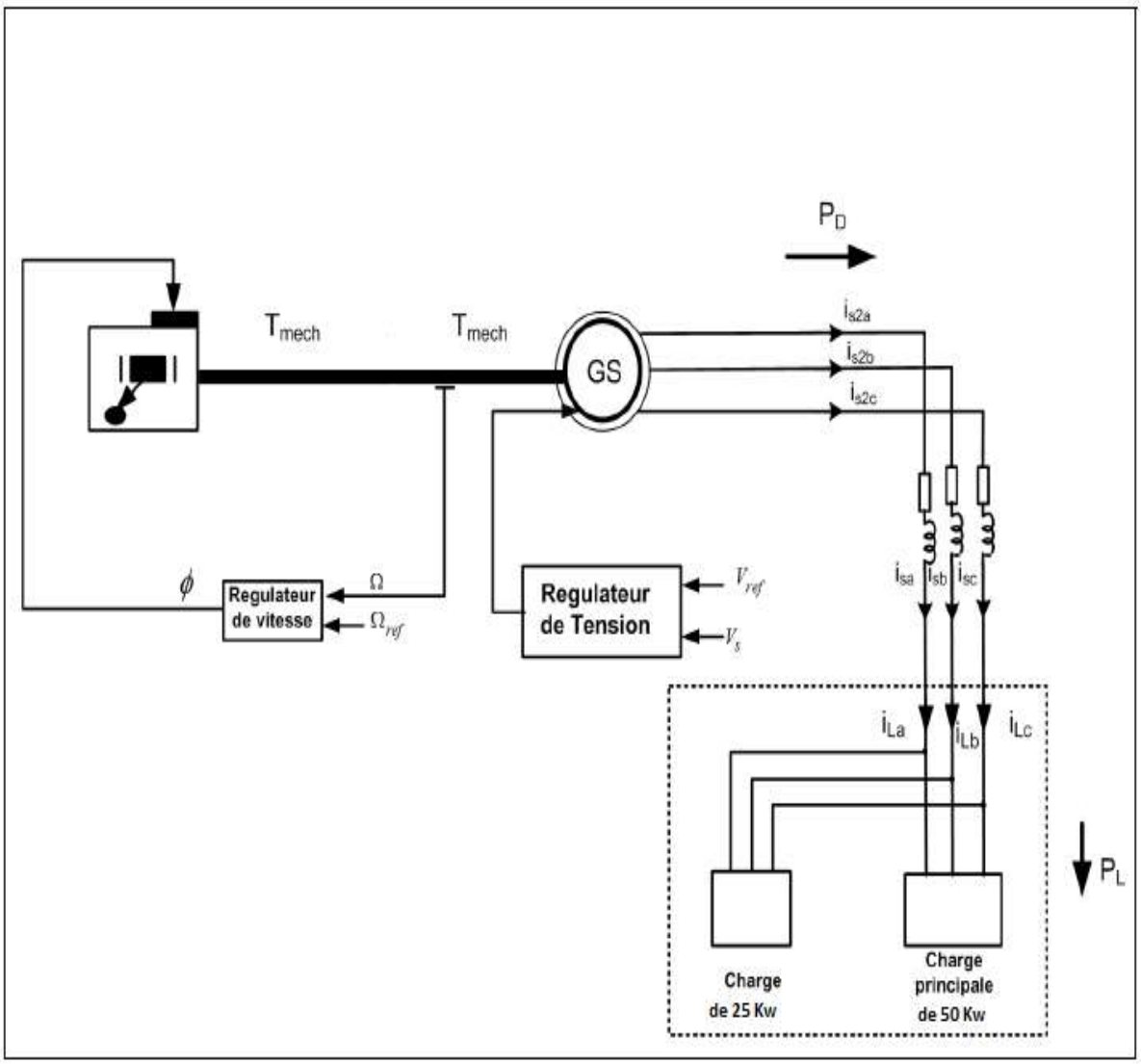


Figure IV.1 *Schéma de simulation du système du générateur diesel avec la charge.*

IV.2.1 Réponse dynamique et en régime permanent

Les formes d'ondes montrées dans la Figure IV.2, représentent la tension du réseau Vsa(V) et le courant de la charge i_{La} et la fréquence du réseau Fr(Hz).

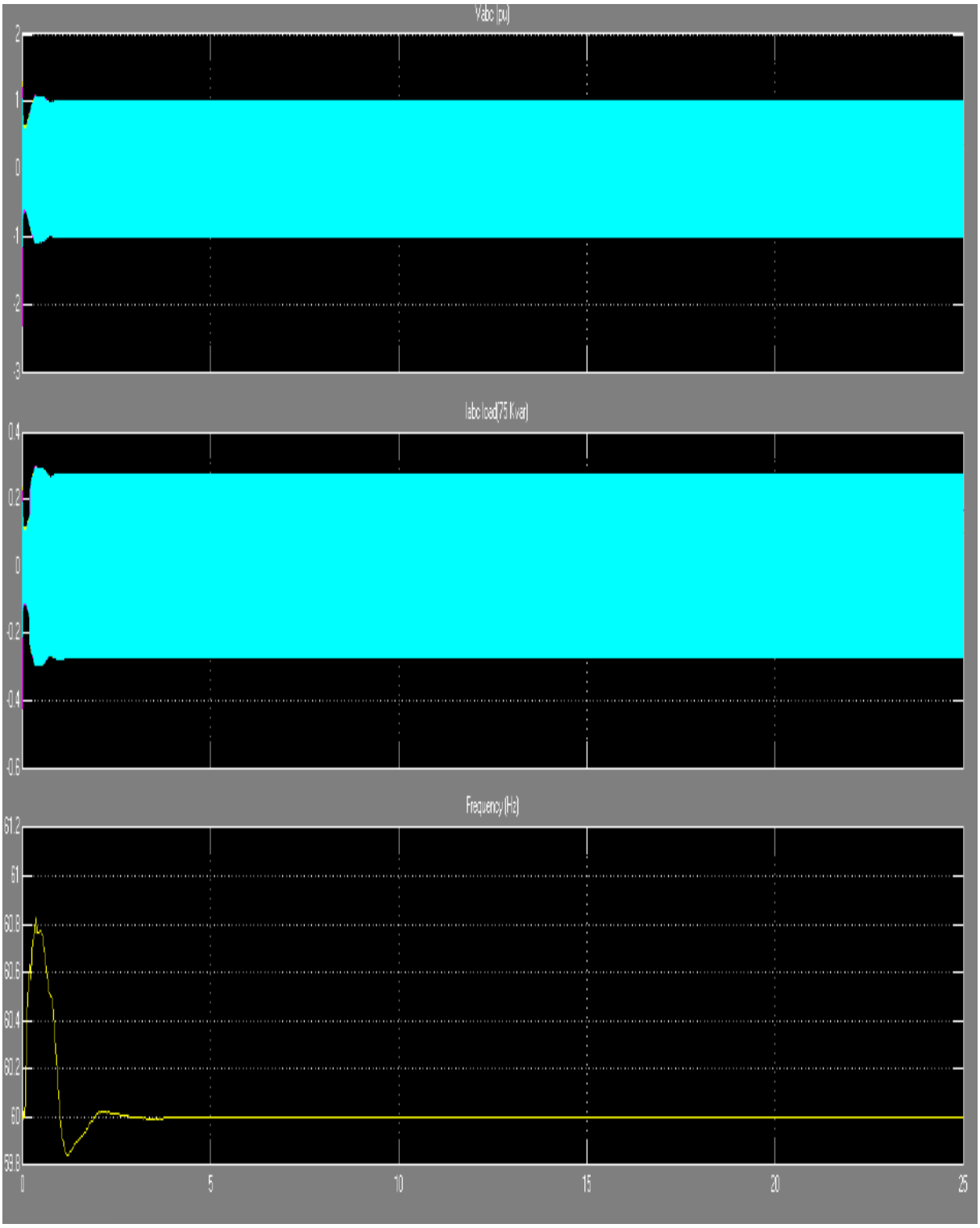
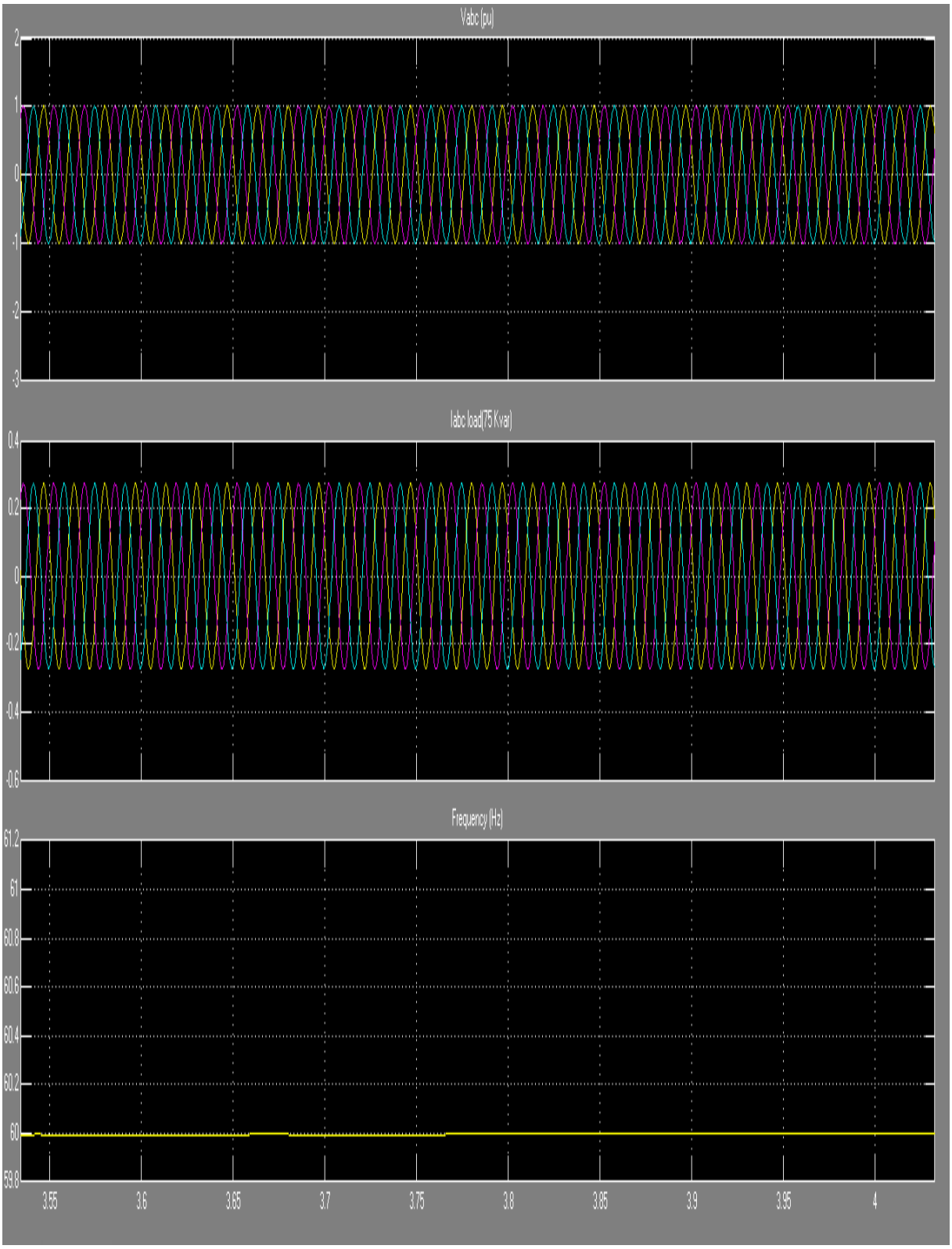


Figure IV.2 *Tensions de source, courant de la charge et la fréquence du réseau du générateur diesel seul.*



Zoom Figure IV.2

Les résultats de simulations montrés dans la Figure IV.2, prouvent le bon fonctionnement du système. La tension et la fréquence sont parfaitement régulées et maintenus constants.

IV.3 Modèle de l'éolienne seule

Le modèle de l'éolienne seule est montré à la Figure IV.3. Il est simulé pour valider le bon fonctionnement du régulateur de fréquence. La charge linéaire branchée est soumise à des variations de 50%.la vitesse du vent est maintenue constante et elle est égale à 10m/s durant toute la période de simulation.

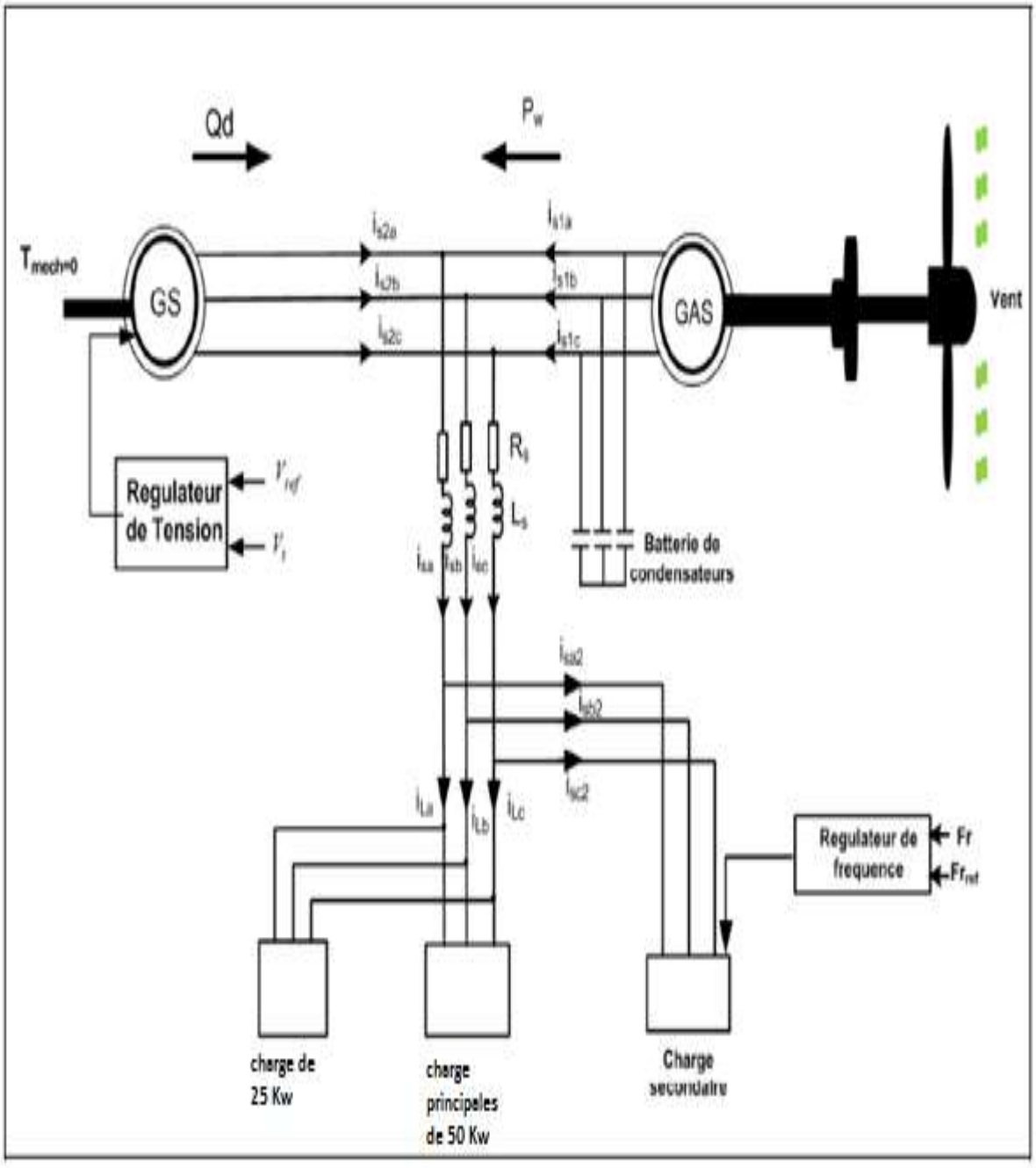


Figure IV.3 *Schéma de simulation du système éolien avec la charge.*

QD : La puissance réactive produite par le condenseur synchrone.

Pw : La puissance électrique débitée par l'éolienne.

IV.3.1 Réponse dynamique et en régime permanent

Les formes d'ondes montrées dans la Figure IV.4, représentent la tension du réseau Vsa(v); le courant de la charge secondaire isa2(A) et la fréquence du réseau Fr(Hz) et la vitesse de la machine asynchrone ; le courant de charge i_{la}(A).

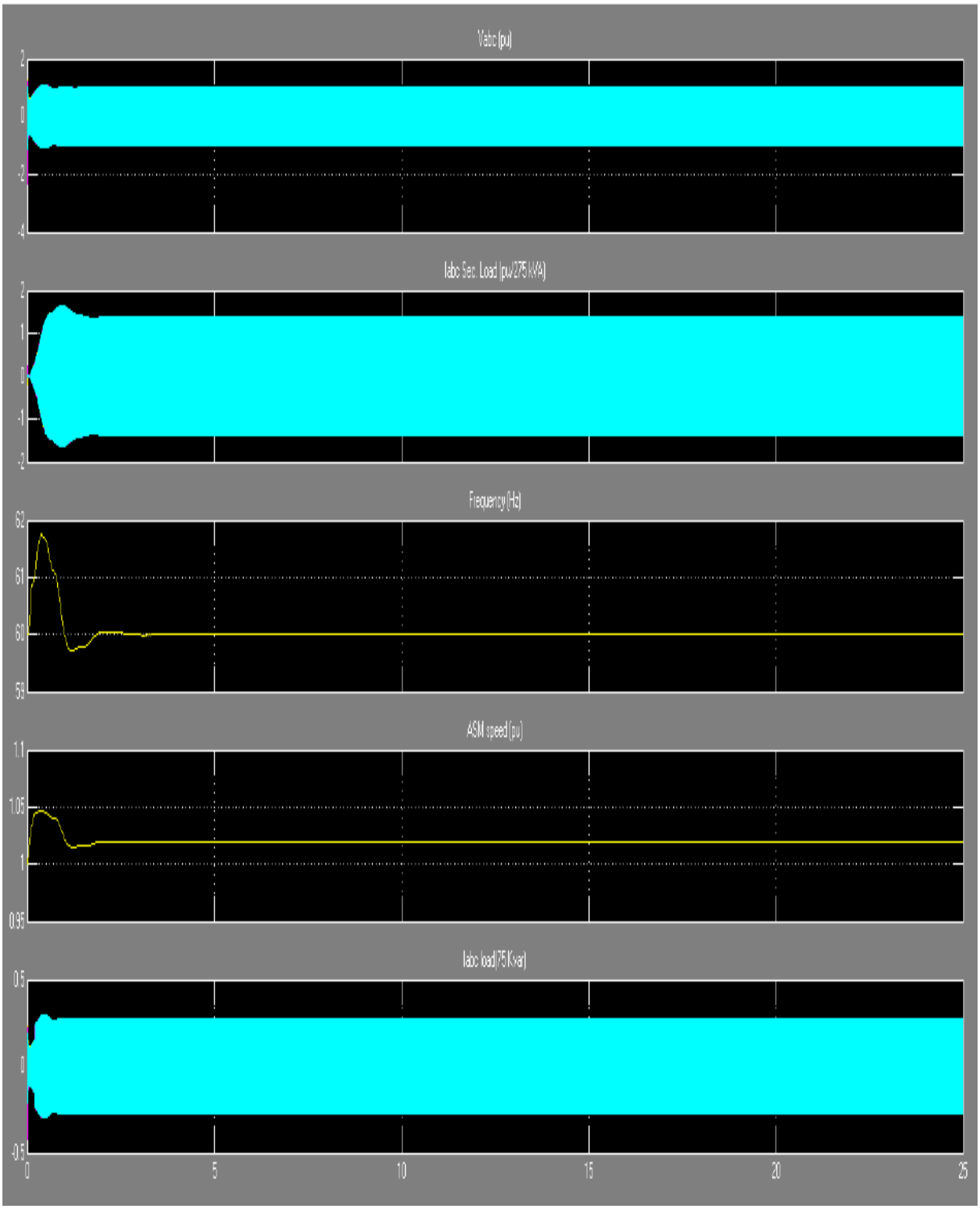
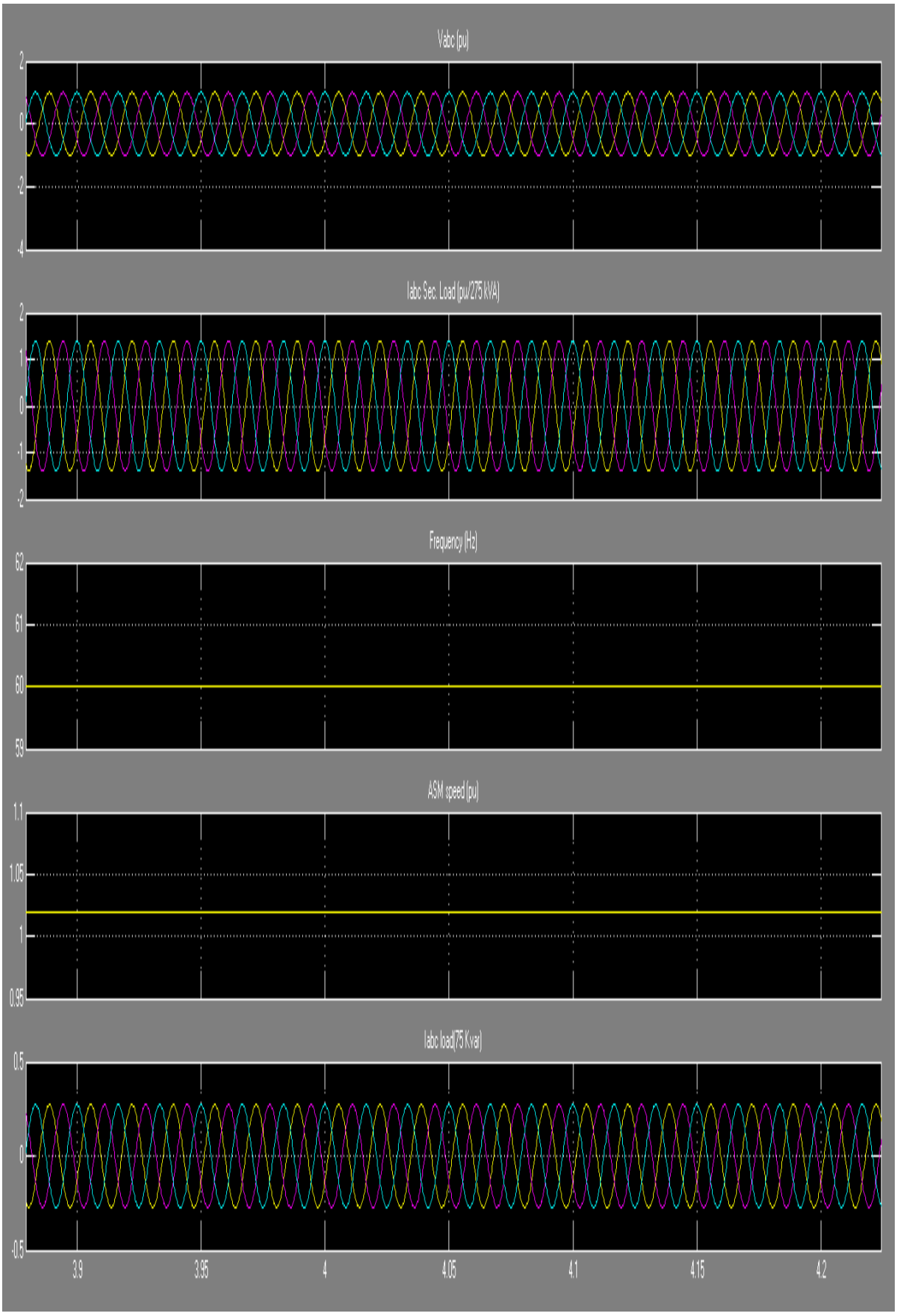


Figure IV.4 *Tensions de source, courant de charge secondaire et la fréquence, la vitesse de la machine asynchrone, le courant de charge du réseau de l'éolienne seule.*



Zoom figure IV.4

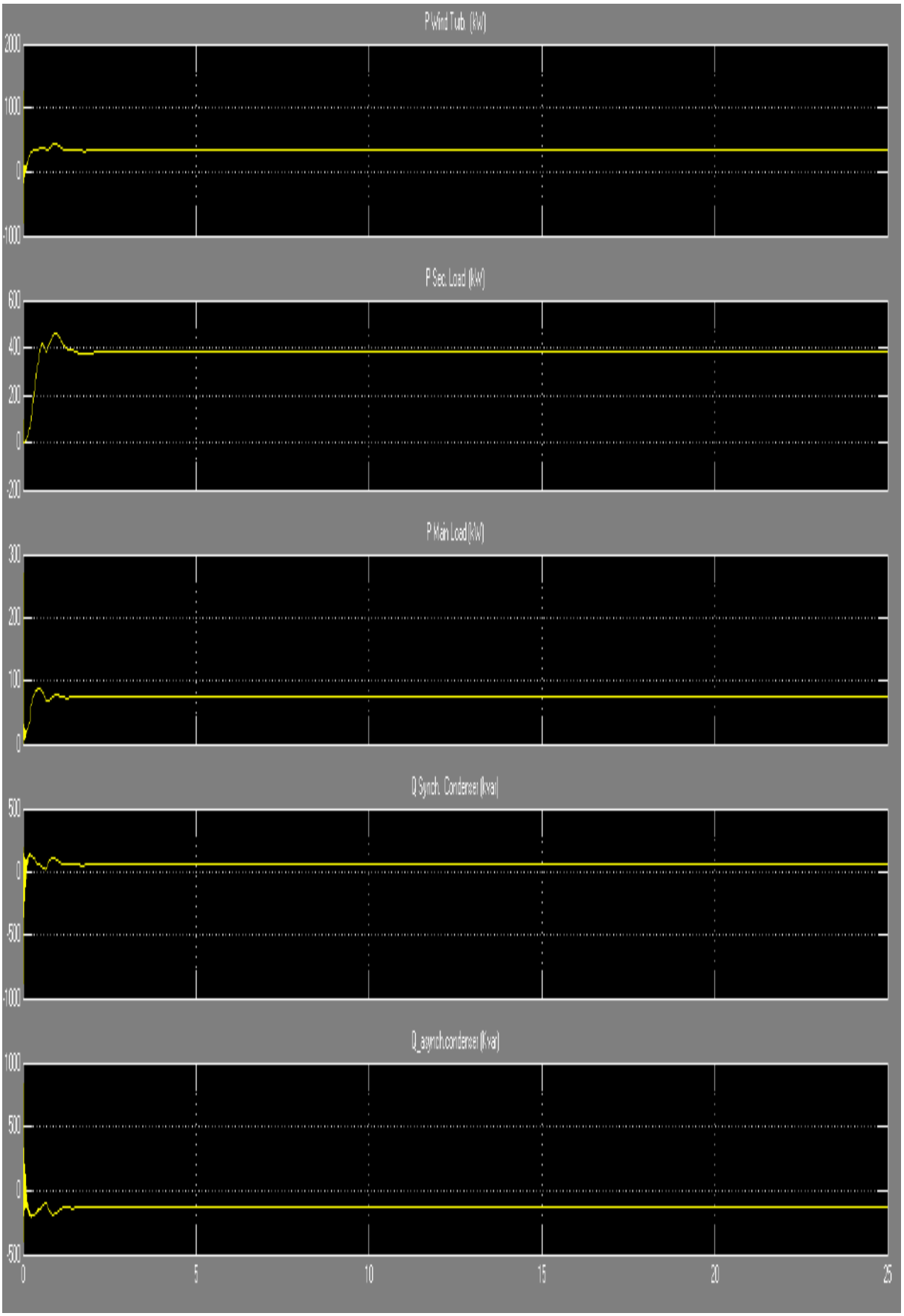


Figure IV.5 *Puissances active et réactive débitées et consommées du Système éolien*

Les résultats de simulations montrés à la Figure IV.4, démontrent que l'éolienne est capable de fournir l'énergie demandée par la charge en présence de vent fort. La charge secondaire a absorbé le surplus de puissance fournie par l'éolienne pour garder la fréquence constante. Le GS dans ce cas est utilisé comme CS. Il reçoit de l'énergie active de l'éolienne pour compenser les pertes en puissance et fournit de la puissance réactive nécessaire au GAS afin de garder la tension constante.

IV.4 Modèle complet du système

La Figure III.1, présente le modèle complet. Les deux sources d'énergie testées au paravent, afin de maintenir la tension et la fréquence de notre système autonome SHED constantes avec variation de la charge et vitesse du vent constante.

IV.4.1 Réponse dynamique et en régime permanent

Les formes d'ondes montrées dans la Figure IV.5, représentent la tension de source vsa(V), le courant de la charge secondaire isa2(A) et la fréquence du réseau Fr(Hz).

La Figure IV.6 montre les différentes puissances active et réactive produites par les deux sources d'énergies et celles consommées par la charge principale et secondaire.

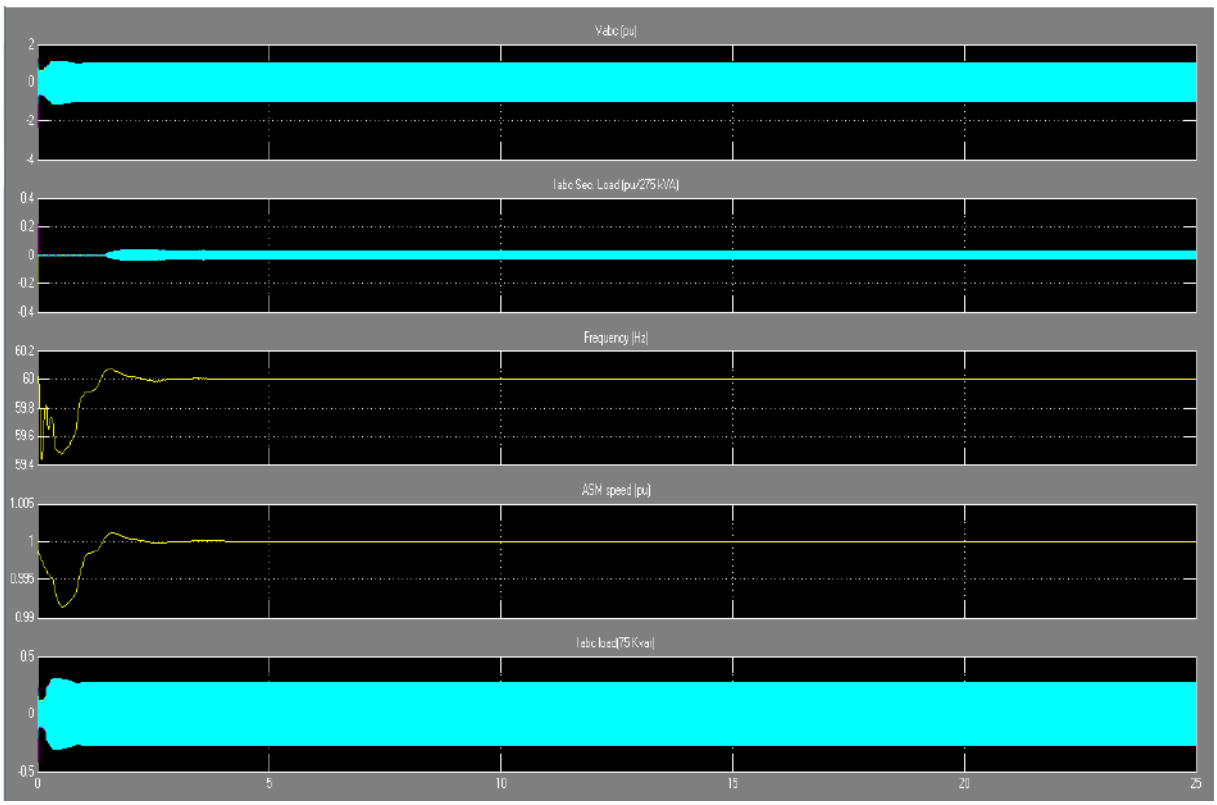
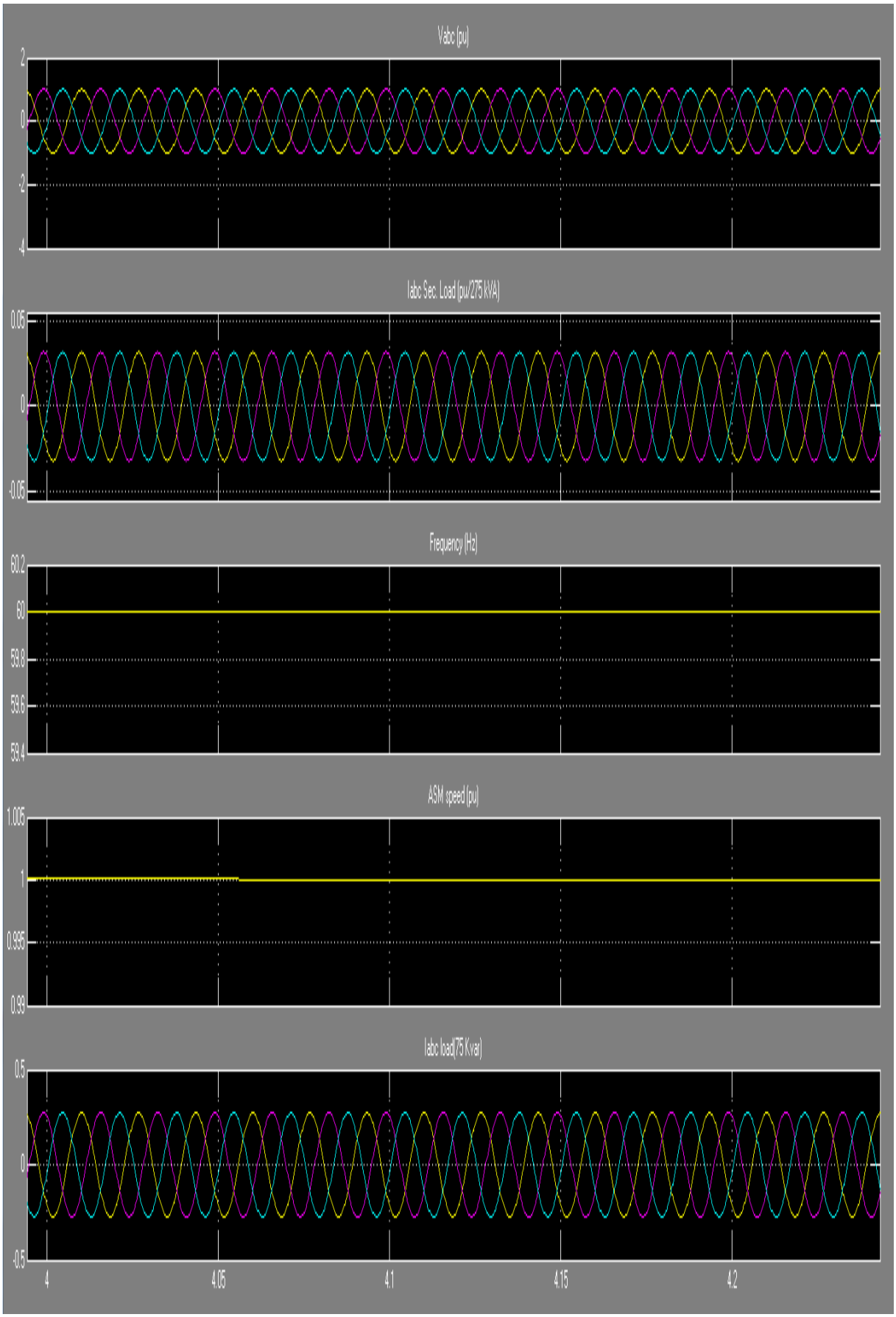


Figure IV.6 *tensions de source, , courant de charge secondaire et la fréquence du réseau ; vitesse de la machine asynchrone et le courant de charge du système hybride éolien-diesel.*



Zoom Figure IV.6

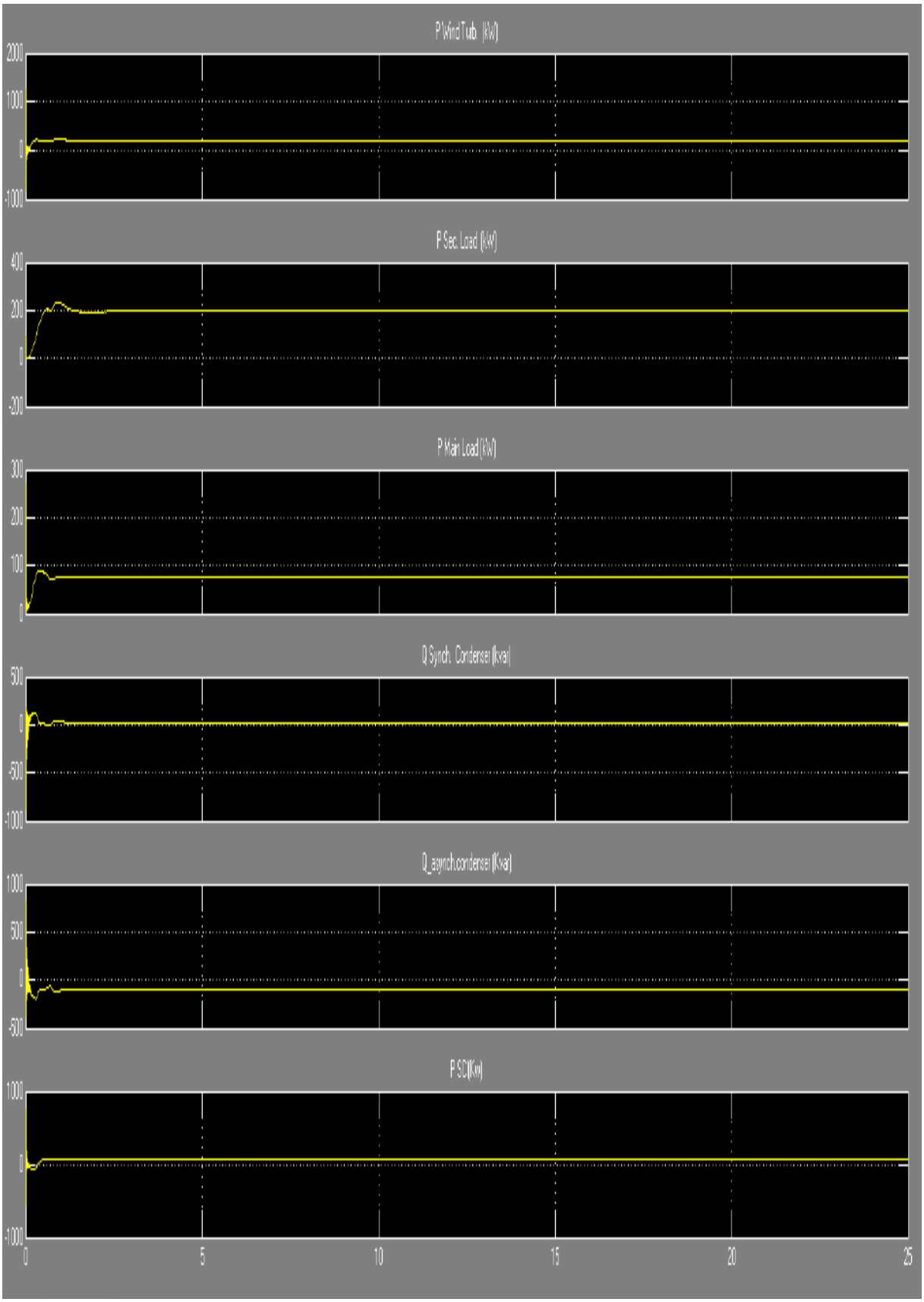


Figure IV.7 *Puissances active et réactive débitées et consommées du système éolien-diesel.*

Les résultats de simulation montrés aux Figures IV.6 et IV.7, montrent le bon fonctionnement de notre SHÉD. La tension et la fréquence sont maintenues constantes et la charge est servie en permanence durant tous les modes de fonctionnement.

IV.5 Conclusion

Les résultats obtenus prouvent le bon fonctionnement du système. La tension et la fréquence sont maintenues constantes autour de leurs valeurs nominales et la charge est alimentée en permanence.

Conclusion générale

La présente étude nous a permis d'aborder la modélisation d'un système de jumelage éolien-diesel (système hybride). Le système étudié met en œuvre un ensemble d'équipements, très différents, destinés à cohabiter dans une structure de cogénération alimentant une charge isolée.

Après un rappel sur les systèmes hybrides en général, leurs architectures et les outils de dimensionnement, le module turbine éolien à été modélisé en tenant compte de tous ses éléments : rotor éolien, transmission, générateur asynchrone et batterie de condensateurs. Le générateur diesel a été aussi modélisé en tenant compte de tous ses éléments qui sont : le moteur diesel et son gouverneur de vitesse, la machine synchrone et le régulateur de tension.
La régulation de la fréquence et de tension est assurée respectivement par la charge secondaire et le régulateur de tension du moteur diesel.

Nous avons donc pu concevoir et implantée un tel système hybride regroupant une source renouvelable (éolien) avec un générateur diesel.
Donc un profil de charge variant entre 50KW et 75KW, est alimenté complètement par le système hybride déjà vue dans les quatre chapitres du projet. La puissance en excès est délivrée aux charges secondaires (Charge de délestage).

Des simulations ont permis de tester les performances de chaque source d'énergie.
Les résultats obtenus ont montré que la charge est alimentée sans interruption, la tension d'alimentation et la fréquence de cette dernière sont restées constantes durant tous les modes de fonctionnement (DO, WO, DW).

Cependant nos études sur ce vaste qu'est la modélisation et la simulation du jumelage éolien-diesel, reste dans une dynamique d'amélioration et qui permettent de dégager des perspectives futures pour améliorer le rendement et l'efficacité de l'installation.

- Une première recommandation consiste à établir une synchronisation entre les deux sources d'énergie en présence de la variation de la charge et du vent.
- Afin d'optimiser l'énergie électrique produite par l'éolienne et de minimiser celle produite par le générateur diesel, nous recommandons un développement d'une méthode de contrôle (algorithme MPPT « maximum Power Point Tracking ») pour extraire la puissance maximale de l'éolienne aux différentes vitesses du vent.
- Une troisième recommandation consiste à trouver une stratégie d'amélioration de la qualité de l'énergie électrique pour remédier aux problèmes de pollution dans le cas du branchement d'une charge non linéaire.

Annexe 1:

Tableau 1 : ***Les paramètres du système autonome éolien-diesel***

paramètres	**Valeurs**	**Paramètres**	**Valeurs**
T1	0.01sec	**T6**	0.0384
T2	0.02sec	**k**	40
T3	0.2sec	**TD**	0.24
T4	0.25sec	**Tmax**	1.1 P.U
T5	0.009sec	**Tmin**	0 P.U

Tableau 2 : ***Paramètres de la machine asynchrone***

Paramètres du GAS			**Rr (pu)**	**Rs (pu)**	**Llr (pu)**	**Lls (pu)**	**Lm (pu)**	**H**	**D (pu)**	**Pp**
Sn (KVa)	**V_S (v)**	**Vitesse (tr/s)**								
275	480	1773	0.015	0.016	0.06	0.06	3.5	2	0	2

Tableau 3 : ***Paramètres de la machine synchrone***

Sn=300 KVa		**Vs**=480 V	
X_d = 3.23	X'_d = 0.21	X''_d = 0.15	X_q = 2.79
X''_q = 0.37	$\mathbf{X_1}$ = 0.09	T'_d = 4.4849	T''_d = 0.0681
T''_q = 0.1	**r_s (pu)** = 0.017	**D**(s) = 1	**Pp** = 2

Où

X_d , X_q : Réactance synchrones d'axe d et q, respectivement

X'_d : Réactance transitoire d'axe d.

X''_d , X''_q : Réactance sous-transitoires d'axe d et q respectivement.

T'_d : Constante de temps transitoire d'axe d en sec

T''_d , T''_q : Constante du temps sous-transitoires d'axe d et q respectivement.

Tableau 4 : ***Paramètres du régulateur de tension***

Paramètre	Valeur	Paramètre	Valeur
t_r	0.02 s	tb	0 s
ka	200	t_c	0s
ta	0.02 s	k_f	0.001
ke	1	t_f	0.1 s
t_e	0s	E_{fmin}	0pu
K_p	0	E_{fmax}	6pu

Où

Tr : constante du temps du filtre passe

Ka : Gain du régulateur.

t_a : constante du temps du régulateur.

Ke : constante de l'excitatrice.

Te : constante du temps du compensateur d'avance.

T_c : constance du temps du compensateur de retard.

K_f : constante du filtre d'amortissement.

t_f : constante du temps du filtre d'amortissement.

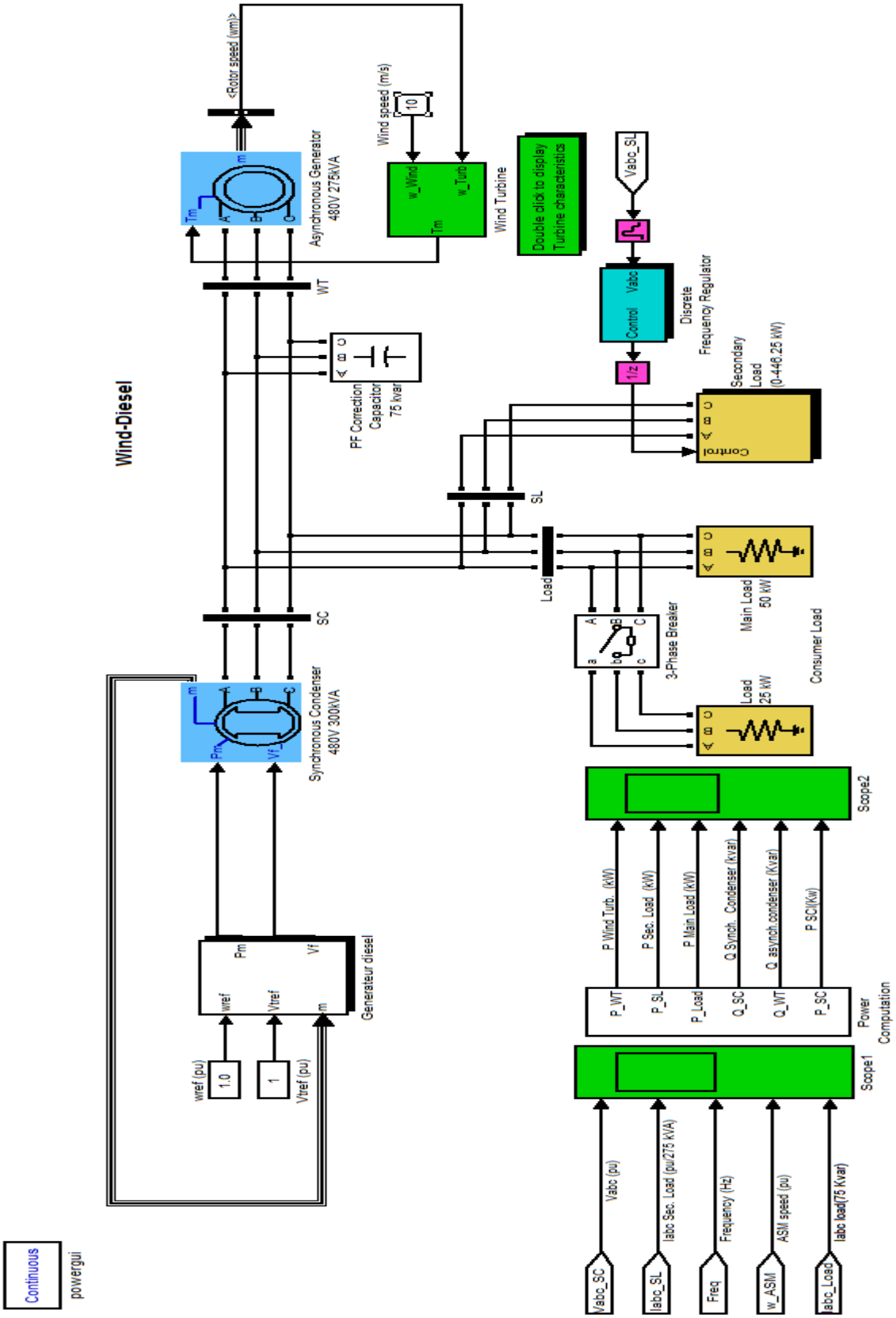
E_{fmin}, E_{fmax} : valeurs minimale et maximale de la tension d'excitation.

Tableau 5 : ***Paramètres du régulateur de la fréquence***

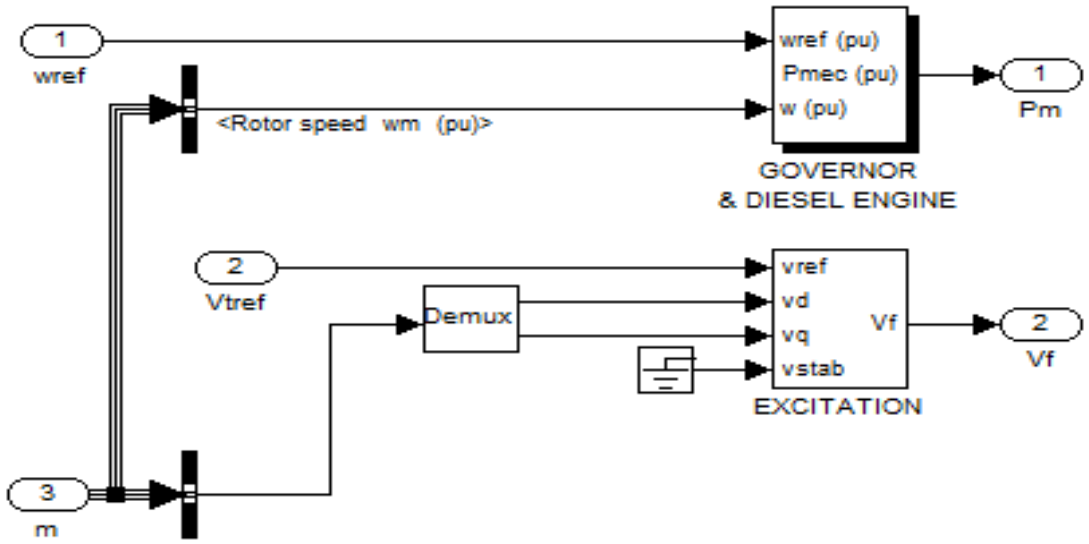
Fr ref =60Hz	Kp=100	Ki=0	KD=30

Annexe 2

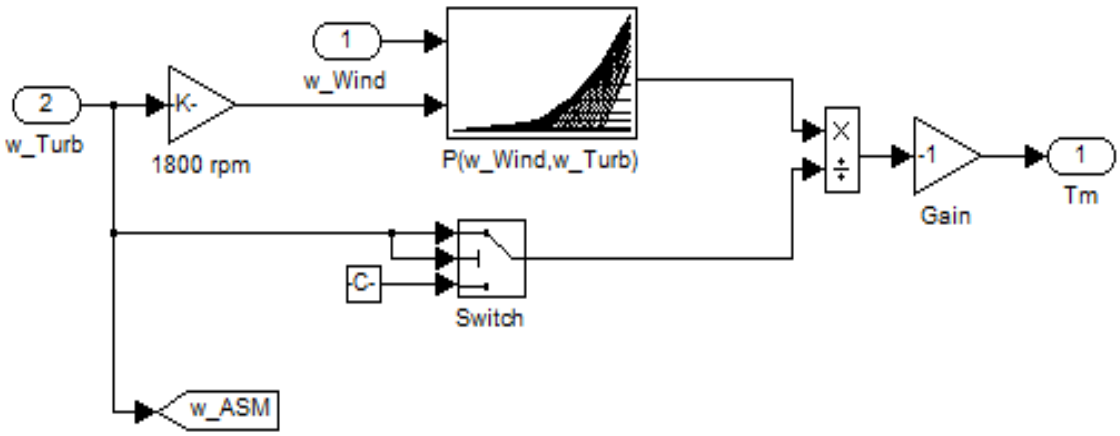
Schéma Simulink du système global (Eolien-diesel)



Modèle du Moteur diesel (couplé au régulateur de vitesse et le régulateur de tension)



Bloc de la turbine éolienne



La bibliographie:

1- **REZKALLAH Miloud** « AMÉLIORATION DE LA QUALITÉ D'ÉNERGIE FOURNIE AU RÉSEAU AUTONOME ». Thèse Doctorat, université de MONTRÉAL, 2010.

2- **BOUAFIA Asma NOURANI Fatima** « Stabilité transitoires des fermes éoliennes en présence du STATCOM ». Mémoire de Mastère académique, université kasdi Merbeh, Ouargla 2015.

3- **MOKHNACHE Madiha** « Etude de la stabilité d'une ferme éolienne connectée à un réseau électrique avec des dispositifs FACTS ». Mémoire de Magister, Université Ferhat Abbas SETIF, 2012.

4- **FEDDAOUI Omar** « Contribution à l'Etude des Systèmes Hybrides de Génération : Application aux Energies Renouvelables ». Mémoire de Magister, Université Mohamed Chérif Messaadia Souk-Ahras, 2014.

5- **LATRECHE Mohammed Tahar** « Commande Floue de la Machine Synchrone à Aimant Permanant (MSAP) utilisée dans un système éolien». Mémoire de Magister, Université Ferhat Abbas SETIF, 2012.

6- **Meghlaoui Issam** « Modélisation et simulation d'une chaîne de conversion éolienne de petite puissance à axe horizontal ». Mémoire de Magister, Université Badji Mokhtar Annaba, 2009.

7- **S. Belakehal, A. Bentounsi, M. Merzoug et H. Benalla** « Modélisation et commande d'une génératrice Synchrone à aimants permanents dédiée à la conversion de l'énergie éolienne **».** Revue des Energies Renouvelables Vol. 13 N°1 (2010) 149 – 161.

8- **Modou NDIAYE** et **Mamadou Kabirou «** TOURE Modélisation et simulation d'un moteur diesel en V 8 avec le progiciel MATLAB SIMULINK **».**

9- **TOMMY ANDY THEUBOU TAMEGHE** « modélisation et simulation d'un système de jumelage éolien-diesel alimentant une charge locale**» thèse doctorat université Québec Aout 2012**

10- **F. Kendouli**, **K. Nabti**, **K. Abed** et **H. Benalla** « Modélisation, simulation et contrôle d'une turbine éolienne à vitesse variable basée sur la génératrice asynchrone à double alimentation **»**. Revue des Energies Renouvelables Vol. 14 N°1 (2011) 109 – 120.

11- **Miloud Rezkallah** and **Ambrish Chandra** and **Bhim Singh** & **Ram Niwasand** **«** Modified PQ Control for Power Quality Improvement of Standalone Hybrid Wind Diesel Battery System **»**. 2012 IEEE.

12- **Lamri LOUZE «** Production décentralisée de l'énergie électrique : Modélisation et contrôle d'une génératrice asynchrone auto excitée **»**. Thèse doctorat, Université Mentouri ; Constantine 2010.

13- **Ibrahim YASSINE «** SYSTEME HYBRIDE PHOTOVOLTAIQUE – EOLIEN – DIESEL SANS STOCKAGE : Etudes, Modélisation et Contrôle en MATLAB/SIMULINK **»**. thèse d'ingéniorat ; université libanaise ; 2013.

14- **Pavel Kučera**, **Václav Píštěk «** VIRTUAL DIESEL ENGINE IN SIMULINK **»**.