



Université du Québec  
à Rimouski

**DÉVELOPPEMENT D'UN SIMULATEUR DYNAMIQUE  
POUR UN SYSTÈME HYBRIDE ÉOLIEN-DIESEL AVEC  
STOCKAGE PAR AIR COMPRIMÉ  
(SHEDAC)**

Mémoire présenté À

L'université de Québec à Rimouski

Comme exigence partielle du programme de maîtrise en Ingénierie

En vue de l'obtention du grade de Maître en sciences appliquées

(M.Sc.A)

PAR

**SIHEM BEN HAMED**

**Octobre 2016**

**Composition du jury :**

**Jean Brousseau, président du jury, Université du Québec à Rimouski**

**Adrian Ilinca, directeur de recherche, Université de Québec à Rimouski**

**Hussein Ibrahim, codirecteur de recherche, TechnoCentre éolien**

**Karim Belmokhtar, examinateur externe, TechnoCentre éolien**

Dépôt initial le 09 août 2016

Dépôt final le 03 octobre 2016



UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À RIMOUSKI  
Service de la bibliothèque

Avertissement

La diffusion de ce mémoire ou de cette thèse se fait dans le respect des droits de son auteur, qui a signé le formulaire « *Autorisation de reproduire et de diffuser un rapport, un mémoire ou une thèse* ». En signant ce formulaire, l'auteur concède à l'Université du Québec à Rimouski une licence non exclusive d'utilisation et de publication de la totalité ou d'une partie importante de son travail de recherche pour des fins pédagogiques et non commerciales. Plus précisément, l'auteur autorise l'Université du Québec à Rimouski à reproduire, diffuser, prêter, distribuer ou vendre des copies de son travail de recherche à des fins non commerciales sur quelque support que ce soit, y compris l'Internet. Cette licence et cette autorisation n'entraînent pas une renonciation de la part de l'auteur à ses droits moraux ni à ses droits de propriété intellectuelle. Sauf entente contraire, l'auteur conserve la liberté de diffuser et de commercialiser ou non ce travail dont il possède un exemplaire.

## DÉDICACE

*Je dédie ce mémoire*

*À mes chers parents,*

*Sources de ma réussite, ma force et ma joie*

*Vous serez toujours le modèle*

*PAPA, dans ta détermination, ta force et ton honnêteté*

*MAMA, dans ta bonté, ta patience et ton dévouement*

*Merci pour tous vos sacrifices et votre soutien afin que j'atteigne cet objectif*

*Merci de trimer sans relâche malgré les péripéties de la vie*

*Merci dieu d'être tout simplement mes parents*

*C'est à vous que je dois cette réussite*

*Et je suis fier de vous l'offrir*

*SIHEM*



## **REMERCIEMENTS**

Le travail de ce mémoire a été réalisé au sein du Laboratoire de Recherche en Énergie Éolienne (LREE) de l'Université du Québec à Rimouski (UQAR) et au TechnoCentre Éolien de Gaspé (TCE).

Ce travail n'aurait pas pu être effectué sans le soutien de nombreuses personnes envers qui je souhaiterais témoigner ma vive reconnaissance.

Tout d'abord, c'est un agréable plaisir pour moi d'exprimer mes remerciements à Monsieur Adrian Ilinca (directeur de projet de maîtrise) qui en acceptant de diriger ce travail de recherche m'a fait profiter de ses connaissances. Je le remercie également pour ses qualités humaines et de m'avoir supportée aussi moralement que financièrement pendant la durée de ce travail.

Je souhaite adresser un très grand remerciement à mon codirecteur Hussein IBRAHIM, directeur de recherche au TCE, pour son soutien, sa direction attentive, ses conseils si judicieux, son appui scientifique, sa méthodologie de travail, son aide très précieuse dans la compréhension de mes problématiques et pour avoir rendu possible l'accomplissement de ma maîtrise.

Je ne saurais passer sous silence l'immense contribution de Monsieur Karim Belmokhtar, chargé de projet de TCE, qui m'a généreusement aidé au niveau de la modélisation et la rigueur qu'il a portée au suivi de mon travail en a grandement haussé la qualité.

Je tiens à remercier tous les employés de TechnoCentre éolien et spécialement Monsieur Frédéric Côté (directeur de TCE), de m'avoir accueilli au sein de TCE pour la période de ma maîtrise ainsi de me réserver un bon environnement de travail et une très bonne ambiance afin de réussir cette mission.

Merci également aux étudiants de l'UQAR et aux stagiaires de TCE, de m'avoir fait profiter de leur expérience, pour leurs conseils, leurs encouragements et les bons moments passés ensemble. Parmi ces étudiants, je tiens particulièrement à remercier Gabriel Rosso, Marylise Clément, Marc Olivier Savage, Raeid Debibi, Hakim Chabour, Mehdi Hadhri, Ons Boujelben et Nicolas Martinez. Merci pour toutes ces discussions plus ou moins constructives, mais ô combien essentielles ! Je leur souhaite à tous le plus grand succès dans leurs projets respectifs.

Je remercie le Bon Dieu pour m'avoir assuré un encadrement paternel aussi exceptionnel. Je remercie du fond du cœur mes parents et mes sœurs, ils se sont beaucoup sacrifiés pour m'offrir toutes les conditions nécessaires afin que je puisse devenir ce que je suis. Ma reconnaissance envers eux est inexprimable.

Je ne saurais terminer sans remercier mes cousins et mes amis, pour s'être si souvent avec moi malgré la distance qui nous sépare, pour leurs conseils si précieux et leurs encouragements, ils furent ma source inépuisable de motivation.

Finalement, je remercie également mon fiancé Hatem, qui me soutient toujours tout en reconnaissant ses sacrifices et le bonheur qu'il m'apporte, pour sa patience, sa compréhension ainsi que son soutien moral, sentimental tout au long de ma maîtrise et surtout durant la période de la rédaction.

Que toutes les personnes qui ont contribué à l'élaboration de ce projet trouvent ici l'expression de ma profonde gratitude.



## RÉSUMÉ

Dans la plupart des régions isolées, la mise en place des systèmes réels de jumelage éolien-diesel (JED) avec stockage d'énergie est généralement précédée d'un ensemble d'études théoriques de faisabilité technique. Par contre, la complexité des modèles mécaniques, électriques et thermodynamiques utilisés pour représenter un système hybride rend le développement d'une stratégie de gestion et de contrôle une tâche difficile, surtout en termes de validation des modèles utilisés. Dans ce contexte, la création d'un outil de modélisation peut rendre possible la simulation du fonctionnement de ces systèmes pour une application envisagée. Des améliorations dans la modélisation et la conception sont toujours nécessaires pour rendre ces systèmes plus compétitifs dans les régions isolées. Ainsi, le travail de recherche présenté dans ce mémoire est une contribution à la simulation et à l'analyse d'un système hybride éolien-diesel avec stockage par air comprimé (SHEDAC). La mise en place d'un logiciel générique de SHEDAC a nécessité un passage par une revue des logiciels existant afin de justifier le choix de Matlab/Simulink comme environnement de développement de l'outil. Les étapes de conception du logiciel et ses différentes fonctionnalités sont aussi présentées, visant de faciliter sa compréhension et sa manipulation.

Vu la diversité des modèles disponibles de l'éolien et de groupes diesel, une mise à jour des modèles était nécessaire afin de choisir celui qui représente le mieux le comportement mécanique et électrique d'un système éolien-diesel avec stockage par air comprimé. Une fois les modèles développés et implémentés dans l'outil, les simulations numériques ont permis d'observer et d'analyser le comportement dynamique des éoliennes, des génératrices diesel et du système d'air comprimé, en modes individuels ou hybrides. Les différents sous-systèmes ont été simulés pour différents profils de charge. Des perturbations telles que la connexion d'une charge linéaire au système éolien ont été,

également, créées afin d'évaluer les systèmes de régulation et de contrôle utilisés. Deux modes de couplage ont été appliqués au SHEDAC : un couplage éolien-diesel sans stockage et un couplage avec le stockage par air comprimé. Les résultats de simulations ont démontré une bonne interaction entre les différentes sources d'énergie et l'influence de la production d'énergie éolienne sur le diesel et sur le système de stockage. De plus, l'ébauche d'une interface graphique pour le système éolien a été réalisée à partir d'une commande de logiciel de SHEDAC.

**Mots clés :** système hybride éolien-diesel, énergie éolienne, groupe diesel, stockage d'énergie, stockage par air comprimé, modélisation dynamique, simulation.

## **ABSTRACT**

In most isolated Canadian communities, the establishment of a real hybrid energy system such as wind-diesel with storage is generally preceded by a set of theoretical studies. The complexity of the mechanical, electrical and thermodynamic models used to represent a hybrid energy system makes the development of a strategy for the management and control system a difficult task especially in terms of validation of the different models used. In this context, the creation of a modeling tool renders possible the simulation of the operation of these systems for a specific application. However, improvements in modeling and design are always necessary to make the system more competitive in isolated areas. Thus, this dissertation presents a contribution to the simulation and analysis of a wind-diesel hybrid energy system with compressed air energy storage (SHEDAC). The implementation of generic software of SHEDAC required a review of existing software in order to justify the choice of Matlab / Simulink as the environment of the development for the tool. The stages of the software's conception and its various features are presented, facilitating afterward its understanding and manipulation.

Since various model of the wind turbine and diesel generator systems already exist in previous works, a detailed review of these models has been done in order to choose the better one which represents both mechanical and electrical behavior of the described system. Once the models are developed and implemented in the tool, numerical simulations were carried out to observe and analyze the dynamical behavior of wind turbines, diesel generators and the compressed air storage system, whether in individual or combined modes. The different subsystems were simulated for different load profiles and disturbances and were created to evaluate the performance of the developed control systems. Two coupling modes were applied to SHEDAC: a hybrid diesel-wind without an energy storage system and adding a compressed air energy storage system. The simulation results showed a good interaction between the different energy sources and the impact of the operation of

wind turbines on both diesel genset and energy storage system. Moreover, the outline of a friendly user graphic interface for the wind turbine system was developed with the SHEDAC control software.

*Keywords:* wind-diesel hybrid system, wind power, diesel generator, energy storage, compressed air storage, dynamic models, numerical simulation.

## TABLE DES MATIÈRES

<i>RÉSUMÉ</i> .....	<i>vx</i>
<i>ABSTRACT</i> .....	<i>xi</i>
<i>TABLE DES MATIÈRES</i> .....	<i>xiii</i>
<i>LISTE DES TABLEAUX</i> .....	<i>vx</i>
<i>LISTE DES ABRÉVIATIONS ET DES SYMBOLES</i> .....	<i>xxiii</i>
<i>CHAPITRE 1 INTRODUCTION GENERALE ET CONTEXTE SCIENTIFIQUE DU PROJET</i> .....	<i>1</i>
1.1 INTRODUCTION ET MISE EN CONTEXTE.....	1
1.2 TECHNOLOGIE EOLIEN DIESEL AVEC STOCKAGE PAR AIR COMPRIME DANS LES SITES ISOLÉS .....	28
1.3 CAMP ESKER ET LES ENJEUX DE SHEDAC DANS LE SITE .....	9
1.4 ETAT D'ART SUR LA TECHNOLOGIE SHEDAC.....	11
1.4.1 Catégorisation de la technologie SHEDAC.....	28
1.4.2 Type de SHEDAC .....	13
1.5 TRAVAUX ET ETUDES REALISES SUR LE SHEDAC.....	16
1.6 PROBLEMATIQUE DE PRESENT PROJET .....	19
1.7 OBJECTIFS .....	20
1.8 METHODOLOGIE .....	21
1.9 STRUCTURE DE MEMOIRE .....	23
<i>CHAPITRE 2 ETAT D'ART DES LOGICIELS ET DES MODELES</i> .....	<i>27</i>
2.1 INTRODUCTION .....	27
2.2 TYPES DE MODELE.....	28
2.2.1 Modèle des séries statistiques.....	29

2.2.2	Modèle dynamique .....	30
2.3	CATEGORIE DES LOGICIELS .....	32
2.4	CRITERES DE CHOIX DU LOGICIEL .....	64
2.5	SYNTHESE SUR LES LOGICIELS ET CHOIX D'ENVIRONNEMENT DE SIMULATION .....	69
2.6	CONCLUSION .....	73
<i>CHAPITRE 3 Composant du shedac et presentation du simulateur .....</i>		<i>75</i>
3.1	INTRODUCTION .....	27
3.2	ARCHITECTURE GENERALE DE L'OUTIL .....	28
3.2.1	Choix des composants du système .....	77
3.2.2	Paramètres et données.....	78
3.2.3	Interface de Gestion.....	80
3.2.4	Simulation et création du SHEDAC .....	86
3.2.5	Interface des données et interface graphique.....	93
3.3	CONCLUSION .....	100
<i>CHAPITRE 4 MODÉLISATION DU SYSTEME HYBRIDE ÉOLIEN DIESEL AVEC STOCKAGE PAR AIR COMPRIMÉ : SHEDAC.....</i>		<i>101</i>
4.1	INTRODUCTION .....	101
4.2	PRÉSENTATION ET CHOIX DE MODÈLE DE L'ÉOLIENNE.....	102
4.2.1	1 <sup>er</sup> modèle de l'éolienne.....	103
4.2.2	2 <sup>ème</sup> modèle de l'éolienne .....	115
4.2.3	3 <sup>ème</sup> modèle de l'éolienne .....	121
4.2.4	Comparaion et choix de modèle .....	28
4.2.5	Caractérisation des paramètres de système éolien.....	127
4.3	REVUE DES MODÈLES DE GÉNÉRATEUR DIESEL (GD) ET MODÈLE RETENU .....	138
4.3.1	1 <sup>er</sup> modèle de générateur diesel .....	139
4.3.2	2 <sup>ème</sup> modèle de générateur diesel .....	140

4.3.3	3 <sup>ème</sup> modèle de générateur diesel .....	141
4.3.4	4 <sup>ème</sup> modèle de générateur diesel .....	142
4.3.5	Critère de comparaison .....	143
4.3.6	Modèle de GD choisi et structure détaillé .....	144
4.4	MODÉLISATION DE SYSTÈME D’AIR COMPRIMÉ .....	152
4.4.1	Moteur asynchrone à cage d’écureuil.....	151
4.4.2	Modèle de compresseur à air .....	28
4.4.3	Modèle de réservoir .....	154
4.4.4	Modèle de l’échangeur .....	156
4.4.5	Modèle de filtre à air.....	157
4.4.6	Modèle de la vanne.....	157
4.5	COUPLAGE DE SYSTÈME ÉOLIEN DIESEL AVEC STOCKAGE PAR AIR COMPRIMÉ .....	159
4.6	CONCLUSION .....	160
CHAPITRE 5 SIMULATION ET VALIDATION NUMERIQUE .....		162
5.1	INTRODUCTION .....	161
5.2	RÉSULTATS DE SIMULATION DU SYSTÈME ÉOLIEN .....	161
5.2.1	Réponse de l’éolienne à une vitesse du vent et une charge constante .....	162
5.2.2	Réponse de aux variations de la vitesse du vent et de la charge.....	179
5.3	RÉSULTATS DE SIMULATION DE GROUPE ELECTROGÈNE DIESEL .....	166
5.3.1	Fonctionnement de GD dans le 1 <sup>er</sup> scénario .....	179
5.3.2	Fonctionnement de GD dans le 2 <sup>ème</sup> scénario.....	185
5.4	RÉSULTATS DE SIMULATION DE SYSTÈME DE L’AIR COMPRIMÉ .....	187
5.5	COUPLAGE DE SYSTÈME DE SHEDAC.....	190
5.5.1	Résultats de simulation de système éolien diesel sans stockage .....	191
5.5.2	Résultats de simulation de système éolien diesel avec stockage .....	195
5.6	INTERFACE GRAPHIQUE .....	201
5.7	CONCLUSION .....	203

CONCLUSION ET PERSPECTIVES .....	208
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES .....	213
ANNEXES .....	223



## **LISTE DES TABLEAUX**

<i>Tableau 1.1 : Taux de pénétration de l'énergie éolienne.....</i>	<i>6</i>
<i>Tableau 2.1 : Comapraison des caractéristiques des logiciels.....</i>	<i>69</i>
<i>Tableau 2.2 . : Comapraison des structures des logiciels.....</i>	<i>71</i>
<i>Tableau 4.1 . : Comapraison des modèles de groupe diesel .....</i>	<i>145</i>

## LISTE DES FIGURES

<i>Figure 1.1 : Répartition des collectivités autochtones (vert) et non autochtones (jaune).....</i>	<i>2</i>
<i>Figure 1.2 : Centrales des réseaux autonomes .....</i>	<i>3</i>
<i>Figure 1.3 : Décennie de croissance pour la capacité éolienne installée.....</i>	<i>4</i>
<i>Figure 1.4 : Puissance éolienne installée au Canada en 2015 .....</i>	<i>5</i>
<i>Figure 1.5 : Variation de la part d'utilisation des génératrices diesel et des éoliennes en fonction de la vitesse du vent .....</i>	<i>13</i>
<i>Figure 1.6 : Schéma d'une installation d'un SHEDAC à petite échelle .....</i>	<i>14</i>
<i>Figure 1.7 : Schéma d'une installation d'un SHEDAC à moyenne échelle.....</i>	<i>15</i>
<i>Figure 1.8 : Schéma de principe de l'admission directe de l'air comprimé dans le moteur.....</i>	<i>16</i>
<i>Figure 1.9 : Image du micro réseau de TechnoCentre éolien installé à Gaspé.....</i>	<i>18</i>
<i>Figure 2.1 : Espace de travail sous Homer.....</i>	<i>35</i>
<i>Figure 2.2 : Espace de travail sous Retscreen .....</i>	<i>37</i>
<i>Figure 2.3 : Espace de travail sous HYBRID2.....</i>	<i>39</i>
<i>Figure 2.4 : Espace de travail sous iHOGA.....</i>	<i>41</i>
<i>Figure 2.5 : Espace de travail sous HySys.....</i>	<i>42</i>
<i>Figure 2.6 : Espace de travail sous SHEDAC1.....</i>	<i>43</i>
<i>Figure 2.7 : Espace de travail sous MATLAB.....</i>	<i>46</i>
<i>Figure 2.8 : Espace de travail sous Simulink.....</i>	<i>47</i>
<i>Figure 2.9 : Espace de travail sous TRANSYS.....</i>	<i>49</i>
<i>Figure 2.10 : Espace de travail sous RAPSIM.....</i>	<i>50</i>
<i>Figure 2.11 : Espace de travail sous Dymola .....</i>	<i>52</i>
<i>Figure 2.12 : Espace de travail sous Hybrid Designer.....</i>	<i>55</i>
<i>Figure 2.13 : Espace de travail sous Energy Plan.....</i>	<i>60</i>
<i>Figure 2.14 : Espace de travail sous HySim .....</i>	<i>62</i>
<i>Figure 2.15 : Structure de modèle éolien.....</i>	<i>63</i>
<i>Figure 3.1: Architecture du logiciel SHEDAC.....</i>	<i>76</i>

<i>Figure 3.2: Environnement de programmation des données liés au système /Matlab</i> .....	79
<i>Figure 3.3: Bloc faisant référence au dimensionnement et à la modélisations système</i> .....	80
<i>Figure 3.4: Exemple des données et de dimensionnement du GD saisi dans un fichier script</i> .....	80
<i>Figure 3.5 : Appel des variables dans les blocs des modèles Simulink</i> .....	81
<i>Figure 3.6 : Fenêtre Simulink et création d'un nouveau modèle</i> .....	82
<i>Figure 3.7 : Blocs fonctionnels dans Simulink</i> .....	83
<i>Figure 3.8 : Extension Toolbox de Simulink/Matlab</i> .....	8
<i>Figure 3.9 : Modèle du système éolien</i> .....	84
<i>Figure 3.10 : Modèle du générateur diesel</i> .....	85
<i>Figure 3.11 : Modèle système d'air comprimé sur Simulink</i> .....	86
<i>Figure 3.12 : Bloc faisant référence à la simulation et aux interfaces de commande</i> .....	86
<i>Figure 3.13 : Bloc Powergui et ses fonctions l</i> .....	87
<i>Figure 3.14 : Environnement d'emplacement des sous-systèmes de SHEDAC sous Matlab</i> .....	89
<i>Figure 3.15 : simulateur SHEDAC implémenté sous Matlab/Simulink</i> .....	90
<i>Figure 3.16 : Exécution des fichiers des données du SHEDAC</i> .....	91
<i>Figure 3.17 : Simulation du SHEDAC sous Matlab/Simulink</i> .....	92
<i>Figure 3.18 : Bloc faisant référence aux développements des interfaces utilisateurs et des interfaces graphiques</i> .....	9
<i>Figure 3.19 : Interface utilisateur pour saisir les données de la turbine éolienne</i> .....	94
<i>Figure 3.20 : Interface utilisateur pour saisir les données du générateur diesel</i> .....	95
<i>Figure 3.21 : Interface utilisateur pour saisir les données du système d'air comprimé</i> .....	95
<i>Figure 3.22 : Interface utilisateur pour choisir la charge à simuler</i> .....	96
<i>Figure 3.23 : Interface Graphique SHEDAC/ Menu d'entrée du logiciel</i> .....	97
<i>Figure 3.24 : Interface Graphique de l'éolienne</i> .....	98
<i>Figure 3.25 : Interface Graphique du GD</i> .....	99
<i>Figure 4.1 : Structure de modèle éolien</i> .....	10
<i>Figure 4.2 : Division de la pale suivant la théorie de l'élément de pale</i> .....	105

<i>Figure 4.3 : Section d'un élément de la pale à un rayon <math>r</math></i> .....	105
<i>Figure 4.4 : Les forces appliquées sur la pale</i> .....	106
<i>Figure 4.5 : Schéma de programme principal</i> .....	110
<i>Figure 4.6 : Bloc de MSAP sous Matlab/Simulink</i> .....	114
<i>Figure 4.7 : Modèle de système éolienne <math>l</math></i> .....	115
<i>Figure 4.8 : Schéma du système aérodynamique sous Matlab/Simulink</i> .....	117
<i>Figure 4.9 : Schéma du système d'entraînement mécanique</i> .....	118
<i>Figure 4.10 : Structure du 2<sup>ème</sup> modèle de système éolien sous Simulink/SPS</i> .....	120
<i>Figure 4.11 : Modèle de <math>dq\_to\_abc</math></i> .....	121
<i>Figure 4.12 : Modèle de sous-système électrique de l'éolienne</i> .....	123
<i>Figure 4.13 : Schéma du 3<sup>ème</sup> Modèle de système éolien sous Matlab/Simulink</i> .....	12
<i>Figure 4.14 : Couple en fonction de la vitesse de rotation pour plusieurs vitesses du vent</i> .....	124
<i>Figure 4.15 : Tube de courant autour d'une éolienne</i> .....	129
<i>Figure 4.16 : Coefficient de puissance</i> .....	131
<i>Figure 4.17 : (a) Représentation des éléments aérodynamique de pale, (b) profil d'une section de la pale du rotor</i> .....	132
<i>Figure 4.18 : Profil de la pale du rotor</i> .....	132
<i>Figure 4.19 : Coefficient de puissance <math>C_p</math></i> .....	13
<i>Figure 4.20 : Principe de la commande MPPT : Tip speed ratio</i> .....	15
<i>Figure 4.21 : Modèle de la commande MPPT développée sous Matlab/Simulink</i> .....	16
<i>Figure 4.22 : Chaîne de la conversion éolienne avec les convertisseurs</i> .....	16
<i>Figure 4.23 : Modèle du système éolien Sous Matlab/Simulink</i> .....	18
<i>Figure 4.24 : Principe de fonctionnement du groupe diesel</i> .....	19
<i>Figure 4.25 : Structure de modèle de générateur diesel sur Matlab/Simulink</i> .....	19
<i>Figure 4.26 : Bloc de modèle de générateur diesel sur Simulink/SPS</i> .....	140
<i>Figure 4.27 : Structure de modèle de générateur diesel dans la librairie Simulink/SPS</i> ..	141
<i>Figure 4.28 : Modèle électromécanique de générateur diesel sous Simulink/SPS</i> .....	142
<i>Figure 4.29 : Modèle de GD implémenté sur Matlab/Simulink</i> .....	145

<i>Figure 4.30 : Bloc de modèle du fuel injecté.....</i>	<i>147</i>
<i>Figure 4.31 : Modèle de la machine synchrone dans la bibliothèque SPS/Simulink.....</i>	<i>148</i>
<i>Figure 4.32 : Bloc Simulink de modèle du régulateur de la tension de la MS.....</i>	<i>149</i>
<i>Figure 4.33 : Modèle du régulateur de la tension.....</i>	<i>149</i>
<i>Figure 4.34 : Modèle de la transmission à géométrie variable intégré dans le GD.....</i>	<i>150</i>
<i>Figure 4.35: Compresseur multi étage en série .....</i>	<i>152</i>
<i>Figure 4.36 : Implémentation du modèle de compresseur dans Simulink.....</i>	<i>153</i>
<i>Figure 4.37 : Implémentation de bloc du modèle de compresseur multi étage dans Simulink.....</i>	<i>15</i>
<i>Figure 4.38 : Implémentation de bloc du modèle du réservoir dans Simulink .....</i>	<i>155</i>
<i>Figure 4.39 : Implémentation de bloc du modèle de l'échangeur dans Simulink.....</i>	<i>156</i>
<i>Figure 4.40 : Implémentation de bloc du modèle de filtre dans Simulink .....</i>	<i>157</i>
<i>Figure 4.41 : Modèle du système d'Air comprimé développé sous Matlab/Simulink .....</i>	<i>158</i>
<i>Figure 4.42 : Schéma de simulateur SHEDAC sur Matlab/Simulink .....</i>	<i>159</i>
<i>Figure 5.1 : Comportement du système à une vitesse du vent et une charge constante.....</i>	<i>16</i>
<i>Figure 5.2 : Coefficient de puissance généré dans le système éolien .....</i>	<i>164</i>
<i>Figure 5.3 : Résultats du couple et de la vitesse de rotation de l'éolienne.....</i>	<i>164</i>
<i>Figure 5.4 : Comportement du système éolien pour une vitesse du vent variable.....</i>	<i>167</i>
<i>Figure 5.5 : Comportement du système éolien pour une vitesse du vent constante.....</i>	<i>167</i>
<i>Figure 5.6 : Dépassement de la puissance de l'éolienne à <math>t=7s</math>.....</i>	<i>170</i>
<i>Figure 5.7 : Tensions et courant délivrés par le système éolien diesel.....</i>	<i>17</i>
<i>Figure 5.8 : Tension délivrée par l'éolienne et celle du réseau.....</i>	<i>174</i>
<i>Figure 5.9 : Résultats de tension et des courants aux instants de variation de la vitesse du Vent à <math>t = 2s</math> et <math>t = 7s</math>.....</i>	<i>175</i>
<i>Figure 5.10 : Résultats de tension et des courants aux instants des variations de la charge .....</i>	<i>176</i>
<i>Figure 5.11 : Spectre harmonique des courants, (a) du réseau, (b) de la source.....</i>	<i>177</i>
<i>Figure 5.12 : Évolution de la vitesse de rotation de GD.....</i>	<i>180</i>
<i>Figure 5.13 : Évolution de couple de moteur diesel.....</i>	<i>180</i>

<i>Figure 5.14 : Évolution de débit du fuel injecté de MD.....</i>	<i>181</i>
<i>Figure 5.15 : Débit d'air dans la chambre de combustion de MD.....</i>	<i>182</i>
<i>Figure 5.16 : Évolution de rapport stœchiométrique du fuel.....</i>	<i>18</i>
<i>Figure 5.17 : La tension aux bornes de la génératrice diesel.....</i>	<i>184</i>
<i>Figure 5.18 : Évolution de la puissance mécanique dans les deux scénarios.....</i>	<i>185</i>
<i>Figure 5.19 : Vitesse de rotation dans les deux scénarios (Sc1 et Sc2 avec CVT).....</i>	<i>186</i>
<i>Figure 5.20 : Fuel injecté dans les deux scénarios (Sc1 et Sc2 avec CVT).....</i>	<i>186</i>
<i>Figure 5.21 : Résultat du fonctionnement du CAES.....</i>	<i>188</i>
<i>Figure 5.22 : Fonctionnement du système éolien Diesel sans stockage.....</i>	<i>192</i>
<i>Figure 5.23 : Qualité de l'onde électrique du système éolien Diesel.....</i>	<i>194</i>
<i>Figure 5.24 : Fonctionnement du système éolien diesel avec stockage par air comprimé.....</i>	<i>196</i>
<i>Figure 5.25 : Qualité de l'onde du système éolien-diesel avec CAES.....</i>	<i>199</i>
<i>Figure 5.26 : Ébauche de l'interface graphique de système éolien.....</i>	<i>202</i>

## LISTE DES ABRÉVIATIONS ET DES SYMBOLES

<b>SHEDAC</b>	Système hybride éolien-diesel avec stockage par air comprimé
<b>SHED</b>	Systèmes hybrides éoliens-diesel
<b>GES</b>	Gaz à effet de serre
<b>TPP</b>	Taux de pénétration en puissance éolienne
<b>TPE</b>	Taux de pénétration en énergie éolienne
<b>CAES</b>	Stockage par air comprimé (Compressed Air Energy storage)
<b>JED</b>	Jumelage éolien-diesel
<b>PE</b>	Production de l'éolienne
<b>GD</b>	Génératrice Diesel
<b>DOD</b>	Taux de décharge de la batterie
<b>NPC</b>	Coût actuel net
<b>CVT</b>	Système de transmission variable (continuously variable transmission)
<b>MPPT</b>	Maximum power point tracking
<b>PMSG</b>	Machine synchrone à aimant permanent (permanent magnet synchronous generator)
<b>MADA</b>	Machine asynchrone à double alimentation
<b>AVR</b>	Régulateur de tension automatique (Automatic voltage regulator)
<b>PV</b>	Photovoltaïque PV

## **CHAPITRE 1**

### **INTRODUCTION GÉNÉRALE ET CONTEXTE SCIENTIFIQUE DU PROJET**

#### **1.1 INTRODUCTION ET MISE EN CONTEXTE**

Le Canada est composé de dix provinces et de trois territoires et représente le deuxième plus grand pays du monde après la Russie avec une superficie totale de 9, 984, 670 kilomètres carrés [1]. Le territoire du Canada est également légèrement plus grand que celui des États-Unis, mais sa population est estimée à seulement 35 millions d'habitants. La majorité (81 %) des citoyens canadiens vivent en milieu urbain et le reste de la population se retrouve ainsi dispersée à travers un territoire vaste et peu peuplé [1]. Ces régions regroupent environ 300 communautés éloignées, abritant plus de 200,000 personnes [2]. En effet, les collectivités des territoires du Nord, dont la plupart sont autochtones comme la montre la figure 1.1, sont essentiellement petites, isolées et très éloignées les unes des autres sur une superficie immense. Seulement dans la province du Québec, on y trouve 30 communautés, réparties en six régions : les Îles-de-la-Madeleine, le Nunavut, la Basse-Côte-Nord, l'île d'Anticosti, la Haute-Mauricie et la région de Schefferville. La population totale de ces communautés compte à peine un peu plus de 34 000 habitants, qui ne sont pas connectés aux réseaux publics d'électricité [3] [4].





Figure 1.1 : Répartition des collectivités autochtones (vert) et non autochtones (jaune) [2]

Ces zones rurales disposent souvent de ressources hydrauliques, mais les habitants comptent davantage sur les combustibles à intensité carbonique comme le diesel que le reste du pays [5]. En effet, l'utilisation de moteurs diesel couplés à des génératrices électriques est la méthode la plus commune et fiable pour électrifier ces communautés isolées. C'est ce qu'on appelle des génératrices diesel ou des groupes électrogènes au diesel. On utilise également le terme « diesel » seul pour référer à ce type de production électrique. La génération d'électricité avec des génératrices diesel est bien éprouvée et fiable. Par contre, celles-ci sont peu efficaces, en particulier lorsqu'elles opèrent à faibles charges [6]. Elles sont également dispendieuses à opérer et rejettent d'importantes quantités de gaz à effet de serre (GES) dans l'atmosphère. De plus le coût d'achat et de transport du carburant, ajouté aux risques de son déversement, pousse les communautés isolées à étudier des alternatives aux groupes diesel [6].

La capacité des groupes diesel installés dans ces communautés est loin d'être négligeable puisqu'elle avoisine les 500 MW (Figure 1.2) sur l'ensemble du pays [7]. Dans la province même du Québec, cette capacité s'élève à 160 MW pour l'année 2015 [2]. Ainsi, la production totale des génératrices diesel dans les sites isolés au Québec est d'environ 300 GWh par année [8].

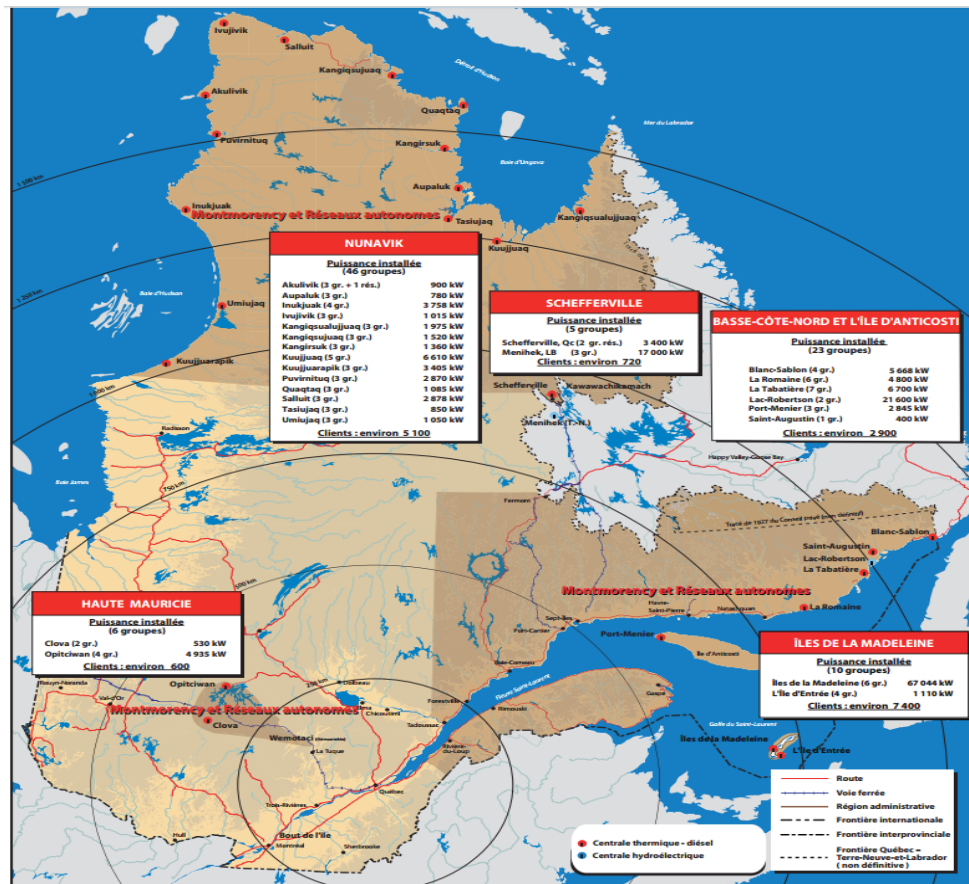


Figure 1.2 : Centrales des réseaux autonomes [9]

Dans le même contexte, le prix moyen de la vente d'électricité s'établit à environ 6 ¢/kWh alors que le prix de production à partir du diesel est de plus de 40 ¢/kWh dans le cas des réseaux autonomes. Certes, les pertes annuelles d'exploitation de ces réseaux par

Hydro-Québec résultant de l'écart entre le coût de production de l'électricité et sa tarification s'élèvent à 133 millions de dollars [10]. Donc, la valorisation de ressources naturelles pour réduire ce déficit d'exploitation est plus que souhaitable.

D'un autre côté, le territoire québécois possède le deuxième plus important gisement éolien au monde [11]. Compte tenu de l'immensité de son territoire, le potentiel éolien du Québec est très considérable dans une zone côtière où se trouvent la plupart des sites isolés. Ceci fait de l'énergie éolienne la principale option pour réduire : (1) la dépendance aux combustibles fossiles dans les réseaux autonomes, (2) les impacts environnementaux, et (3) les coûts élevés de la production d'énergie par des groupes diesel.

Au cours des deux dernières décennies, il y a eu un taux d'installation accéléré des éoliennes (figure1.3), sous forme des grands parcs connectés aux réseaux publics d'électricité tel qu'il est présenté dans les figures 1.3 et 1.4 où la puissance de l'énergie éolienne installée au Canada a atteint 11205 MW à la fin de l'année 2015 [12] (figure1.3).

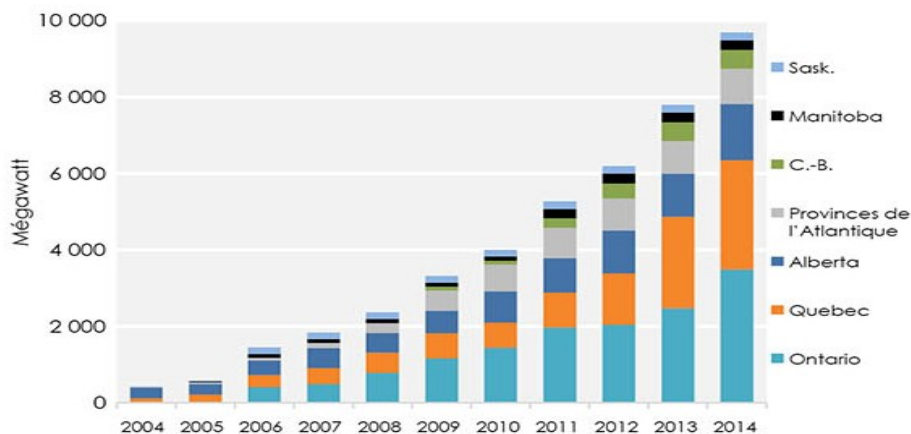


Figure1.3 : Décennie de croissance pour la capacité éolienne installée [13]

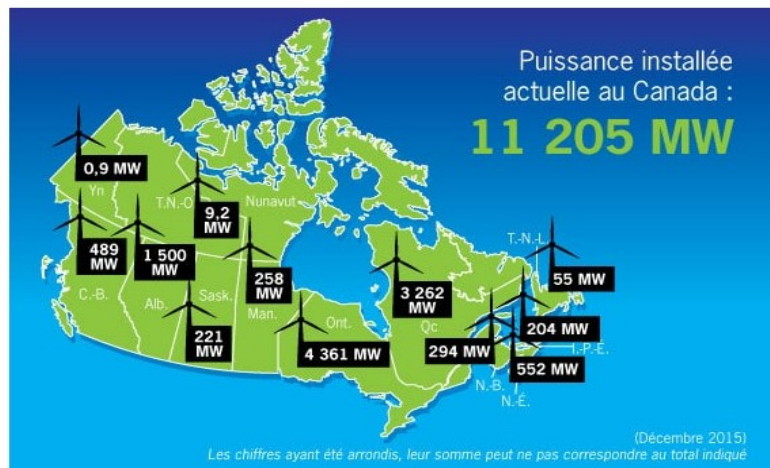


Figure 1.4 : Puissance éolienne installée au Canada en 2015

Même si la puissance éolienne installée dans les sites éloignés s'avère importante, l'intermittence de l'énergie éolienne est considérée comme l'un de facteurs principaux qui empêchent les parcs éoliens de fonctionner d'une façon autonome dans les sites isolés [2]. De plus, d'autres facteurs techniques sont mis en jeu tel que le fonctionnement en mode anti-ilotage et la magnétisation des machines électriques des éoliennes, etc. Comparativement à des sources d'énergie comme les combustibles fossiles, l'énergie éolienne est très fluctuante. La disponibilité du vent dépend de plusieurs facteurs tels que les variations de la température, la topographie du terrain et la présence des obstacles. En fait, les fluctuations de la valeur moyenne du vent influencent la productivité de l'éolienne, qui ne peut en conséquence fournir, à elle seule, la puissance demandée de façon continue [14].

Compte tenu des caractéristiques de cette source énergétique, les éoliennes doivent fonctionner en couplage avec un autre système de production d'énergie. Ainsi, le développement d'un système hybride, composé d'une ou de plusieurs éoliennes et d'un groupe diesel, est l'une des premières solutions qui étaient envisagées. Durant les dernières années, d'importants efforts ont été menés pour l'implémentation des de systèmes éolien-

diesel. Dans une étude réalisée à l'Université de Terre-Neuve, une réflexion sur une stratégie de la gestion de l'énergie a été effectuée [9]. Quelques années plus tard, de nouveaux projets ont été présentés pour un objectif d'implantation réelle de ces systèmes en Alaska [15] ou aux Îles de la Madeleine au Canada [11].

Les Systèmes Hybrides Éoliens-Diesel (SHED) s'imposent, donc, comme alternative intéressante aux génératrices diesel [10]. Le taux de pénétration en puissance (TPP<sup>1</sup>) éolienne est un facteur important pour la réduction de la consommation du carburant. Donc, les systèmes hybrides peuvent être classés selon trois classes du taux de pénétration en énergie renouvelable, soit faible, moyen ou élevé. Autrement dit, quand un système fonctionne avec un taux de pénétration élevé, il favorise puis l'utilisation des ressources renouvelables par rapport à l'exploitation du diesel. Le tableau 1.1 résume les classes de fonctionnement d'un système hybride de type éolien-diesel selon les niveaux de pénétration en énergie éolienne [16].

Tableau 1.1 : Taux de pénétration en énergie éolienne

<b>Classe des taux de pénétration</b>	<b>Caractéristiques d'opération</b>
Faible	-Diesel toujours en opération ; -Puissance éolienne réduit la charge nette sur le diesel ; -L'ensemble de l'énergie éolienne alimente la charge primaire ; -Pas de système de supervision et de contrôle ;
Moyen	-Diesel toujours en fonction ; -À une puissance éolienne produite élevée, il serait possible

<sup>1</sup> TPP – taux de pénétration en puissance (éolienne) représente le rapport entre la puissance éolienne et la puissance totale consommée par la charge primaire à un instant donné

	d'alimenter une charge secondaire, afin de maximiser le rendement du diesel ; -Besoin d'un système de contrôle simple ;
Élevé	-Diesel en arrêt lorsque la puissance éolienne est suffisante ; -Besoin d'un système de contrôle de la tension et de la fréquence auxiliaire pour l'éolienne ; -Besoin d'un système de contrôle complexe ;

Pour des questions de rentabilité, les SHED à TPP élevé n'arrivent pas à s'imposer, et ceci pour une raison simple : un important taux de dissipation de l'énergie éolienne a lieu durant les périodes où la puissance éolienne disponible est supérieure à la demande [3]. Le stockage d'énergie excédante est alors la solution pour retrouver la rentabilité recherchée. Des recherches récentes ([10, 17, 18] [19]) ont mené à conclure que la technique de stockage d'énergie sous forme d'air comprimé est la plus adéquate pour les applications SHED compte tenu de ses différents points forts comme le coût, la densité énergétique, la densité de puissance, la durabilité et l'efficacité. Cette technique est très mature et présente déjà à Huntorf en Allemagne [19] et Macintosh et Alabama aux États-Unis [10], mais combinée avec des turboréacteurs à gaz naturel connectés au réseau principal de l'électricité.

## **1.2 TECHNOLOGIE ÉOLIEN-DIESEL AVEC STOCKAGE PAR AIR COMPRIMÉ DANS LES SITES ISOLES**

Bien que les SHED présentent de nombreux avantages, cette technologie peut, néanmoins, rencontrer certaines problématiques. Par exemple, dans une telle configuration, si la puissance éolienne disponible est plus élevée que la charge, une partie de cette puissance doit alors être délestée. Ce phénomène entraîne, donc, une forte dissipation de puissance qui aurait pu être utilisée à travers un procédé annexe. C'est dans le but de

réduire cette problématique, et d'augmenter la part d'énergie renouvelable dans la production totale que des systèmes de stockage ont été envisagés. Le stockage d'énergie, quelle que soit sa forme, permet d'emmagasiner l'énergie renouvelable excédentaire, lorsque la demande en énergie est plus faible que la production. Cette énergie stockée est restituée ultérieurement pour réduire l'utilisation des génératrices diesel. La technologie de stockage d'énergie la plus répandue jusqu'à maintenant et la plus utilisée est le stockage par des batteries électrochimiques. La bonne connaissance de ce type de stockage (notamment dans le domaine automobile) explique pourquoi la plupart des études ont souvent favorisé son usage [20-23]. Néanmoins, la multitude des technologies de stockage d'énergie existantes a fait l'objet de plusieurs recherches. L'objectif est de trouver une façon de stocker le maximum d'énergie tout en optimisant au mieux le coût d'un tel système ainsi que son encombrement [24-26].

Dans le but de dégager une solution optimale, une étude, établie par plusieurs laboratoires au Québec, a présenté une analyse paramétrique entre neuf technologies de stockage [27, 28], visant à déterminer le type de stockage le plus adapté à un système éolien-diesel. Cette étude a démontré que le stockage par air comprimé se présente comme une solution prometteuse du stockage à long terme. En effet, au regard du coût, de la simplicité, de la contribution à la diminution de la consommation du carburant et des émissions de GES, de la durée de vie et des autres facteurs technoéconomiques, cette technologie semble être optimale par rapport aux autres systèmes de stockage. Les recherches de ces dernières années, jusqu'aux plus récentes, concernent, donc, l'élaboration et l'optimisation d'un système hybride éolien-diesel avec stockage par air comprimé (SHEDAC) [8] [29] [6].

Dans un SHEDAC, de l'air comprimé stocké est utilisé pour la suralimentation des moteurs diesel ce qui a comme effet d'augmenter le taux de pénétration en énergie éolienne. Ainsi, durant les périodes de forte production de l'éolienne (PE) (lorsque la PE

dépasse la charge), l'énergie excédentaire est utilisée pour produire et stocker de l'air à haute pression. Durant les périodes de faible PE (lorsque la PE ne suffit pas à la charge), l'air comprimé du réservoir sert à suralimenter le moteur diesel, ce qui augmente la puissance de ce dernier ou diminue sa consommation en carburant pour un même appel de puissance demandée (charge) [8]. Ainsi, des simulations numériques préliminaires ont démontré la possibilité de réaliser une économie de carburant d'environ 30 à 50% dépendamment de la vitesse moyenne du vent, de la puissance éolienne installée, du volume de stockage et de la taille du moteur diesel [8].

### **1.3 CAMP ESKER ET LES ENJEUX DE SHEDAC DANS LE SITE**

Plusieurs sites du Nord du Québec où se situent les mines possèdent une bonne ressource éolienne. L'exploitation du vent qui est une ressource locale gratuite, en complément du diesel qui est un carburant cher, polluant et importé, pourrait améliorer et diversifier l'offre énergétique de ces sites en couplant les génératrices diesel à des systèmes éoliens.

Dans ce contexte, le camp minier Esker de l'entreprise Tshiuetin, qui est un transporteur de produits miniers et de passagers par voie ferrée, partenaire de l'Institut Technologique de Maintenance Industrielle (ITMI) du CÉGEP de Sept-Îles, désire réduire sa dépendance vis-à-vis des carburants fossiles. La consommation du diesel du camp a été estimée à 400 000 L/an, alors que les prévisions des besoins dans deux ans sont de l'ordre de 600 000 L/an (soit une augmentation de 50% de la consommation), si le projet proposé du SHEDAC (subventionné par FQRNT MINES<sup>2</sup> pour Camp Esker) n'est pas réalisé. Le camp Esker se trouve sur une partie non électrifiée de la voie ferrée de la Québec North

---

<sup>2</sup> FQRNT : Fonds de recherche du Québec – Nature et technologies : est un organisme à but non lucratif et est mandataire du gouvernement du Québec qui présente des programmes de bourses et de subventions aux étudiants et aux chercheurs.



Shore and Labrador (QNS&L) qui est utilisée par plusieurs entreprises. Avec l'arrivée de nouveaux acteurs, le camp requiert des travaux d'agrandissements d'où découlent les nouveaux besoins d'électrification prévus pour l'année 2017. Afin de démontrer l'intérêt de la technologie de SHEDAC dans les sites éloignés, il serait pertinent de présenter les conditions énergétiques, économiques et environnementales lié à son fonctionnement tels que:

- Aspects énergétiques : Les avantages de la technologie de SHEDAC ont été démontrés par des validations numériques et expérimentales dans des laboratoires [45]. La communauté scientifique a reconnu ses contributions par la publication des plusieurs articles [6] [30] [31] [32]. Présentement, les performances de cette technologie sont validées à petite échelle sur le site expérimental du TechnoCentre éolien (TCE) à Rivière-au-Renard. Le déploiement de cette technologie très prometteuse, développée au Québec, à une plus grande échelle passe absolument par une démonstration sur un site réel. C'est l'opportunité qu'offre le camp Esker (Tshiuéti) pour son implantation.
- Aspects environnementaux : la technologie proposée permet d'augmenter l'efficacité d'utilisation du combustible en faisant fonctionner en tout temps les GD à un rapport air/fuel optimal. Par ailleurs, moins de carburant sera aussi requis pour le transport de ce même combustible fossile vers le camp. Ainsi, en plus de l'intégration d'une source d'énergie renouvelable, la technologie SHEDAC vient aussi augmenter l'efficacité des génératrices diesel afin de diminuer la consommation actuelle en carburant.
- Aspects économiques : certainement avec un nombre grandissant de projets miniers dans des zones non reliées au réseau d'électricité (investissement miniers de 2100M\$ en 2014 à 2500M\$ en 2016 [33]), les problématiques liées au coût de transport et de consommation de carburants prendront de

l'ampleur. Le diesel sera toujours requis pour assurer une partie de la charge et la sécurité d'alimentation, mais son coût de production électrique deviendra plus élevé que celui de l'éolien. L'hybridation pneumatique avec l'air comprimé stocké permettra une augmentation de la proportion de l'énergie éolienne et une efficacité améliorée de l'utilisation des GD.

Enfin l'aspect industriel pour Tshueticin se résume sur un impact de taille en raison de la conjoncture favorable qui lie son projet d'expansion à celui de production hybride. Avec les mêmes génératrices diesel, elle pourra assurer une production énergétique supplémentaire à coûts réduits et à impact environnemental moindre.

## 1.4 ÉTAT DE L'ART SUR LA TECHNOLOGIE SHEDAC

### 1.4.1 Catégorisation de la technologie SHEDAC

Afin de mieux envisager les particularités de la technologie SHEDAC, il est nécessaire d'introduire différentes notions propres aux systèmes hybrides telles que le taux de pénétration en énergie renouvelable, ici l'éolien, par rapport au besoin du système. En effet, les systèmes comme le SHEDAC peuvent se différencier en fonction du taux de pénétration en puissance éolienne (TPP) [34], qui se calcule comme suit :

$$TPP (\%) = \frac{P_{max}^{éolienne}}{P_{max}^{charge}} \times 100$$

De la même façon, le taux de pénétration en énergie éolienne (TPE) est défini comme le rapport entre l'énergie éolienne annuelle et l'énergie consommée annuellement par la charge, soit :

$$TPE (\%) = \frac{E_{annuelle}^{éolienne}}{E_{annuelle}^{charge}} \times 100$$

Pour un site donné, le TPP dépend, donc, du nombre et de la puissance unitaire des éoliennes installées alors que le TPE dépend du TPP ainsi que de la vitesse et de la fréquence du vent sur le site. À partir de ces informations, il serait, alors, possible de définir les classes et les modes opératoires du SHEDAC comme suit [8]:

a) *À faible pénétration en énergie éolienne* : cela concerne les systèmes dont le TPP est compris entre 5% et 50% et le TPE est inférieur à 20%. Dans ce cas-là, la ressource éolienne permet seulement de diminuer légèrement l'utilisation des génératrices diesel, mais celles-ci restent, bien souvent, toujours en fonctionnement.

b) *À moyenne pénétration en énergie éolienne* : cela concerne les systèmes dont le TPP est compris entre 50% et 100% et le TPE est compris entre 20% et 40%. Bien que les génératrices restent toujours en fonctionnement, la part d'énergie éolienne devient plus importante grâce au système de stockage qui peut être sollicité en cas de surproduction des éoliennes.

c) *À haute pénétration en énergie éolienne* : cela concerne les systèmes dont le TPP est compris entre 100% et 400% et le TPE est compris entre 40% et 100%. Dans ce cas-là, dès que la vitesse du vent le permet, le système éolien peut prendre le contrôle sur les génératrices diesel, jusqu'au même leur arrêt. Une gestion complexe est, donc, nécessaire afin d'anticiper les variations brusques de la vitesse du vent ou de la charge, avec la dissipation d'une surproduction éventuelle (en cas de vent fort), et la mise en marche/arrêt des génératrices si nécessaire. De manière générale, la part d'utilisation des génératrices diesel et des éoliennes en fonction de la vitesse du vent peut être représentée comme suit (Figure 1.5) [32] :

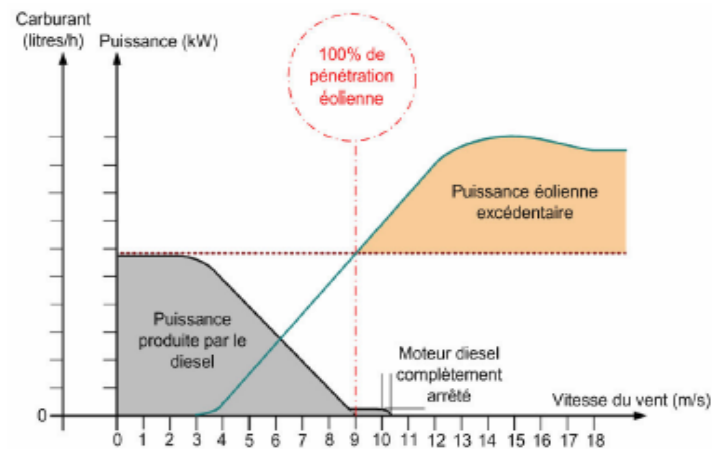


Figure 1.5 : Variation de la part d'utilisation des génératrices diesel et des éoliennes en fonction de la vitesse du vent [35].

#### 1.4.2 Types du SHEDAC

Maintenant que la technologie SHEDAC a été introduite avec les notions du taux de pénétration en puissance et en énergie éolienne, il est possible de rentrer plus en détail sur le fonctionnement et la gestion d'un tel système, ainsi que sur les sous-systèmes qui le composent. Pour ce faire, il est possible de présenter la technologie sous différents volets en fonction de l'application. Des systèmes à petite échelle et à moyenne échelle peuvent, alors, être distingués [3].

*a) SHEDAC à petite échelle :* L'utilisation d'un tel système hybride est proposée pour des applications à petites échelles comme des stations de télécommunication ou des petits sites isolés déjà alimentés par des génératrices diesel [36]. La technologie consiste alors en l'utilisation d'une petite centrale éolienne comme source d'appoint couplée à un moteur d'air comprimé équipé de deux machines (pneumatique et électrique). Le principe de fonctionnement de ce système est alors le suivant : lorsque le  $TPP > 100\%$ , l'énergie éolienne excédentaire est utilisée par un alternateur permettant d'entraîner le compresseur afin de recharger les réservoirs d'air comprimé [8]. Si l'énergie éolienne est insuffisante

( $TPP < 100\%$ ), l'air comprimé est alors détendu dans la machine pneumatique, entraînant alors, l'alternateur pour fournir de l'électricité. Dans de telles configurations, la génératrice diesel n'est utilisée que si la centrale éolienne et le dispositif de stockage ne peuvent assurer les besoins énergétiques [8]. Le schéma de principe de ce système est présenté dans la Figure 1.6. Il est important de souligner que ce genre d'hybridation permet de diminuer la consommation en carburant et de remplacer le démarrage intermittent des génératrices diesel, permettant ainsi de diminuer leur usure ainsi que les frais d'entretien [8, 36].

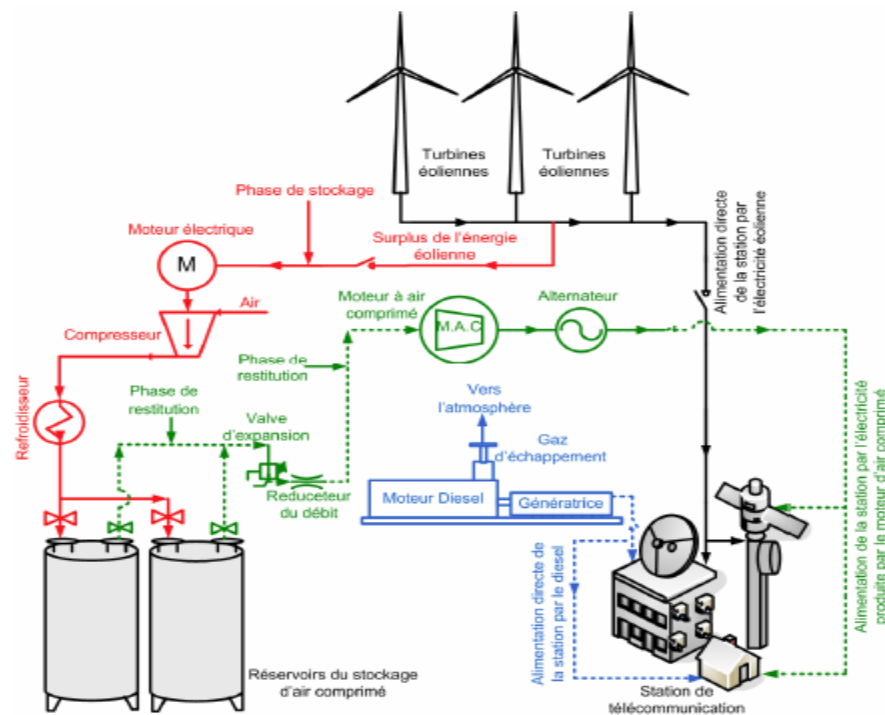


Figure 1.6 : Schéma d'une installation d'un SHEDAC à petite échelle [3].

b) *SHEDAC à moyenne échelle* : Ce genre d'hybridation est utilisé dans le cas des applications isolées de moyenne et de grande échelle dont l'utilisation des génératrices diesel est inévitable [1, 3]. La situation géographique provoque, ainsi, des coûts prohibitifs pour le transport du carburant. Comme précédemment, le principe de cette technologie consiste à mettre en œuvre une centrale éolienne ainsi qu'un système de stockage sous

forme d'air comprimé. Cependant, l'air comprimé stocké ne sera pas utilisé ici comme source énergétique directe, mais plutôt comme une source d'appoint pour améliorer les performances des génératrices diesel, tout en augmentant le taux de pénétration en énergie éolienne (Figure 1.7). Il s'agit, alors, de la « suralimentation supplémentaire » des moteurs diesels [25, 37] .

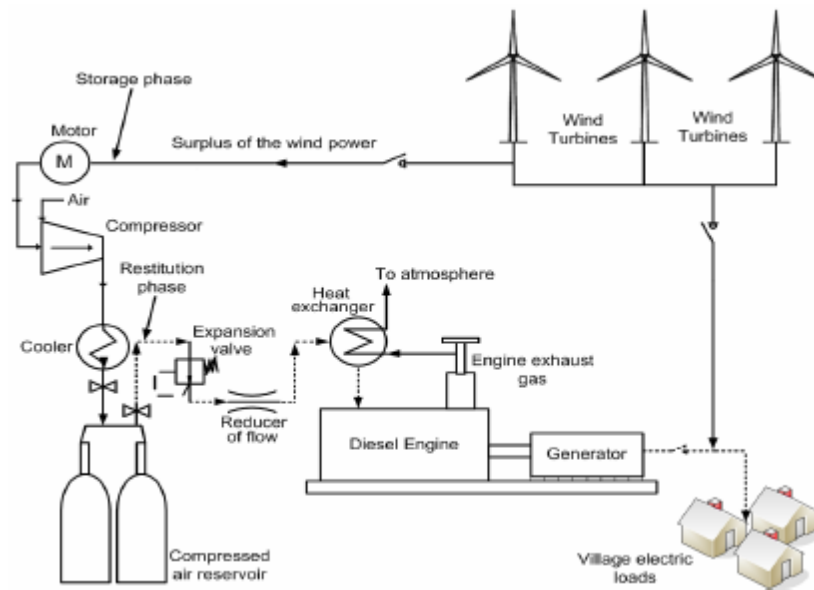


Figure 1.7 : Schéma d'une installation d'un SHEDAC à moyenne échelle [3].

Le procédé de la suralimentation consiste à élever la masse volumique de l'air à l'admission des moteurs pour en augmenter leur puissance spécifique. Lorsque le  $TPP > 100\%$ , le surplus de l'énergie éolienne est utilisé pour comprimer l'air qui est ensuite stocké. Dès lors que c'est nécessaire, l'air comprimé sert à suralimenter le moteur diesel afin d'en augmenter sa puissance. Cela permet, donc, de diminuer la consommation en combustible et de diminuer l'usure des moteurs. Différentes études et publications ont ainsi été réalisées dans le but de trouver la meilleure manière de suralimenter les génératrices diesel [3]. De ces travaux, elle a été déduite l'alternative de la suralimentation présentée dans la figure 1.8.

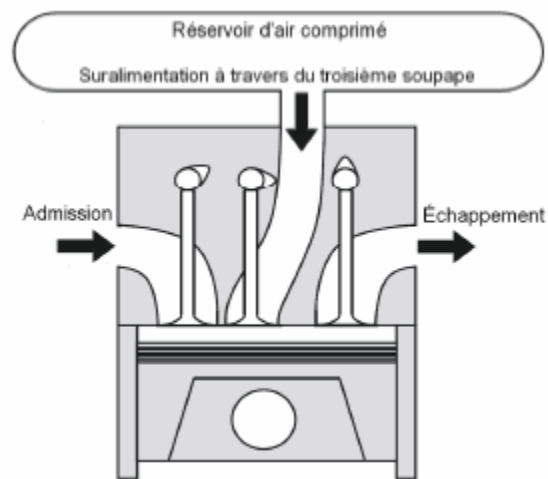


Figure 1.8 : Schéma de principe de l'admission directe de l'air comprimé dans le moteur [3]

À travers ce qui était présenté, la réflexion sur l'utilisation d'un moteur diesel avec de l'air comprimé ne s'est pas limitée à la suralimentation puisqu'il a été montré que les usages en mode pneumatique ou hybride-pneumatique peuvent s'avérer être des solutions pertinentes. Dans le cadre de ce projet de recherche, c'est la technologie de SHEDAC à moyenne échelle qui sera abordée.

## 1.5 TRAVAUX ET ÉTUDES RÉALISÉS SUR LE SHEDAC

Même si l'optimisation du couplage entre l'air comprimé et la génératrice diesel fait encore l'objet des différentes recherches, la réalisation d'une étude de dimensionnement et de faisabilité d'un SHEDAC a permis jusqu'à maintenant d'obtenir différents résultats permettant la validation de l'efficacité d'un tel système [3] [10] [24, 38] [39, 40]. Dans chaque cas d'étude, il a été démontré que l'utilisation d'un système hybride éolien-diesel avec stockage par air comprimé permet de réduire de façon non négligeable la fréquence d'opération des génératrices et par conséquent de diminuer la consommation en

diesel [15]. Actuellement, on dénombre quelques travaux qui se sont déjà penchés sur la question des stratégies d'opération pour un SHEDAC [41, 42] [43, 44].

De plus Marwa Elhadj et Hussein Ibrahim [8] [45], avaient travaillé sur le sujet et avaient mis en équations le problème pour le village de Tuktoyaktuk. Aussi Hermann Sayap avait déjà entrepris la réalisation d'un logiciel simulant le fonctionnement du SHEDAC[15].

Et récemment Nicolas Martinez [15] a mis au point un outil de dimensionnement et de faisabilité du SHEDAC. Cet outil permettra donc une première analyse des données de vent et de charges du lieu pour savoir si l'installation d'un tel système peut être envisagée ou non. Ainsi l'outil a été testé et validé pour le cas de site de Camp Esker et les résultats ont été comparés avec le logiciel Homer [46] pour confirmer la fiabilité de l'outil. Le travail de N. Martinez [15] a servi comme point de départ dans le cadre du projet de simulateur surtout en ce qui concerne les informations sur les différents composants et équipements à utiliser dans le SHEDAC dédié pour électrifier le camp Esker.

Outre la variété des travaux de recherche effectués, le besoin d'un banc d'essai pour un tel système est devenu nécessaire pour passer à une étape supérieure. Le TechnoCentre éolien, situé à Gaspé au Québec, a ainsi mis en place l'une des premières installations qui permet d'étudier de façon réelle le comportement d'un SHEDAC. La Figure 1.9 illustre le microréseau mis en place par le TechnoCentre, permettant l'utilisation de la technologie SHEDAC [15].





Figure 1.9 : Image du micro réseau de TechnoCentre éolien installé à Gaspé [47]

Le présent projet s’inscrit directement dans la continuité des travaux de recherche de TechnoCentre éolien (TCE) et dans l’amélioration du fonctionnement de leur système déjà installé.

À l’heure actuelle, la simulation de l’approvisionnement en énergie électrique pour des zones isolées intégrant les énergies vertes se fait grâce au logiciel Homer. Ce logiciel permet de comparer des solutions énergétiques comprenant des systèmes éoliens et solaires, des génératrices diesel ainsi que plusieurs types de stockage d’énergie. Au TechnoCentre éolien, des projets de recherche sont menés actuellement dans l’objectif de développer un simulateur dynamique pour un système de couplage éolien-diesel avec stockage d’énergie sous forme d’air comprimé. Ceci pourra ainsi couvrir une partie que l’outil Homer n’offre pas encore.

Il a donc été décidé de développer un simulateur sous Matlab/Simulink/SimPowerSystems permettant de modéliser et de simuler le fonctionnement de ce système SHEDAC. Le choix de l’environnement Matlab/Simulink pour bâtir le simulateur sera justifié dans le chapitre 2. D’un autre côté, des travaux ont déjà été réalisés au TCE à cet effet avec la modélisation

des parties électriques de GD et de système éolien, fonctionnant individuellement. À terme, le modèle doit pouvoir intégrer le modèle du système de stockage par air comprimé et le couplage des différents composants de SHEDAC. Ainsi les systèmes doivent intégrer des modèles qui abordent à la fois les parties électriques et mécaniques. Cet outil doit être capable de modéliser et de simuler des différentes stratégies du fonctionnement pour des systèmes énergétiques de différentes tailles.

## **1.6 PROBLÉMATIQUE DU PRÉSENT PROJET**

La mise en place des systèmes réels du jumelage éolien-diesel (JED) avec stockage d'énergie est généralement précédée d'un ensemble d'études théoriques de faisabilité technique. La création d'outils de modélisation rend possible la simulation du fonctionnement de ces systèmes pour l'application envisagée. Plusieurs logiciels commerciaux existent déjà permettant la simulation du système de JED. Cependant, aucun logiciel existant ne permet la simulation dynamique d'un système hybride éolien-diesel-air comprimé (SHEDAC) destiné à l'électrification des sites isolés. En effet, le SHEDAC rend le développement d'une stratégie de gestion et de contrôle pour ce système une tâche difficile qui prendra beaucoup de temps et nécessitera beaucoup d'efforts surtout en termes de validation des modèles utilisés. Ainsi, la réalisation de plusieurs scénarios d'opération pourrait durer longtemps avant d'obtenir des résultats concluants où plusieurs simulations devront alors être effectuées pour atteindre les objectifs. Le développement et la mise en place d'un logiciel générique pour la simulation du SHEDAC deviennent ainsi une nécessité pour surmonter ces contraintes. De plus, l'intégration des stratégies de planification et d'exploitation du SHEDAC (idem pour des JED sans air comprimé) dans le simulateur permettra un raffinement important de la représentation des stratégies d'exploitation réelles des groupes diesel seuls ou en présence de production éolienne. Ainsi, le simulateur pourra servir pour établir le « cas de référence » auquel se comparera l'intégration d'un système de jumelage éolien-diesel (avec et sans air comprimé). Il

permettra par la suite d'observer, en modes individuels ou hybrides, les phénomènes dynamiques des éoliennes, des génératrices diesel, du compresseur à air et du réservoir d'air comprimé. De plus, il offrira la possibilité d'analyser les perturbations de la tension, de la fréquence ou même du courant lors du fonctionnement du SHEDAC.

## 1.7 OBJECTIFS

Ce projet consiste à développer un outil d'analyse et de simulation souple et convivial, dans l'environnement Matlab/Simulink, permettant d'analyser et de mettre au point rapidement un SHEDAC pour un site donné et dans des conditions d'exploitation spécifiques. Les objectifs principaux sont :

- Développer un simulateur numérique d'un SHEDAC, comportant des entrées du vent ou d'une charge variable, capable d'assurer une haute pénétration de l'énergie éolienne sans compromettre l'efficacité du groupe électrogène diesel.
- Établir des modèles dynamiques et les implanter dans le simulateur, afin d'avoir une librairie de composants commerciaux susceptibles de se retrouver dans un SHEDAC, et pour lesquelles les spécifications techniques sont disponibles et pourrait ainsi être créées. L'environnement de simulation deviendra ainsi un véritable outil de conception assistée par ordinateur (CAO) pour la conception du SHEDAC.

Les objectifs secondaires et à long terme de ce projet sont :

- Mettre en disposition un outil de simulation et de modélisation dynamique permettant de contribuer à la formation adaptée à l'industrie et aux institutions d'enseignement.
- Effectuer le réglage des contrôleurs de manière à optimiser l'apport en énergie de l'éolienne tout en assurant une stabilité de la fréquence.
- Étudier les fluctuations en fréquence d'un système éolien-diesel pour différents taux de pénétration d'énergie éolienne dans le but de minimiser ces variations.

- Analyser les variations de la fréquence et évaluer la puissance produite par le système couplé en fonction des fluctuations du vent.
- Évaluer les variations de la consommation du carburant suite aux variations du vent.

## **1.8 MÉTHODOLOGIE**

Le projet consiste à développer un outil de simulation dédié au système SHEDAC. Le temps de développement d'un tel outil peut être réduit grâce à l'utilisation d'outils déjà disponibles : Matlab et Simulink. Il s'agit de logiciels de calcul puissants qui peuvent être exploités pour la modélisation et la simulation. Simulink offre une interface graphique permettant de travailler avec de blocs fonctionnels. Il dispose également d'algorithmes d'intégration performants pour la simulation des systèmes linéaires et non linéaires. Le simulateur doit inclure les modèles mécaniques et électriques. Le modèle mécanique permettra d'observer les phénomènes dynamiques des éoliennes, des génératrices diesel, du compresseur à air et du réservoir d'air comprimé, et ceci en modes individuels ou intégrés. Le modèle électrique permettra d'observer la qualité de l'onde (tension, courant, fréquence, harmoniques, etc.) à divers points du SHEDAC.

Le projet peut être divisé en plusieurs phases comme suit :

Phase 1 : compréhension du projet – revue de littérature : Cette phase consiste à réaliser une revue critique de tous les logiciels ou outils potentiels de simulations permettant de simuler le comportement dynamique d'un système hybride de production d'énergie intégrant plusieurs sources et technologies de stockage d'énergie. Cette étude servira, ainsi, à justifier le choix de l'environnement de simulation qui servira à bâtir le simulateur du SHEDAC.

Phase 2 : Identification des contraintes et mise en place de la structure du simulateur : Avant de développer les modèles des composants constituant le SHEDAC, il sera judicieux de définir les différentes contraintes qu'il faut prendre en compte lors du développement d'un outil de simulation pour le SHEDAC. Ainsi, il faudra développer et mettre en place

une structure souple, modulable du simulateur permettant l'intégration future des modèles d'autres composantes (sources, charges ou technologies de stockage) ainsi qu'un modèle de prédiction des ressources.

Phase 3 : Recherche et développement des modèles : Cette étape consiste à chercher/développer les modèles électromécaniques et thermodynamiques pour les différents composants du système hybride éolien-diesel-air comprimé. Ainsi, l'architecture électromécanique de l'ensemble du système doit être élaborée. Cela nécessitera l'accès aux résultats d'autres études comme celle de [15] dans le cadre du projet principal financé par le FQRNT surtout à propos de nombre, de type et de la taille des technologies (éolien, diesel, compresseur) utilisées.

Phase 4 : Implantation et validation des modèles électromécaniques (mécaniques et électriques) et thermodynamiques : Cette phase consiste à implanter, dans l'environnement de simulation identifiée dans la phase 1, les modèles électromécaniques de l'éolienne, du groupe diesel, du compresseur (partie mécanique/électrique) ainsi que ceux des charges électriques principale et secondaire et des équipements auxiliaires. Cette implantation doit prendre en considération la manière dont ces composantes sont connectées mécaniquement et électriquement selon l'architecture électromécanique élaborée. D'un autre côté, la simulation numérique) des modèles doit être effectuée individuellement sur chaque composante en premier temps. Cette simulation pourrait se faire en utilisant des paramètres disponibles dans la littérature. Une fois que le comportement des composantes s'avère correct, il serait, alors, possible de valider les modèles couplés. Ainsi, cette validation sur une étude de cas doit prendre en considération la fiabilité du couplage entre les modèles mécaniques et électriques.

Phase 5 : Validation de l'ensemble du simulateur : Cette phase consiste à valider l'ensemble du simulateur en fonction de différentes stratégies d'opération du SHEDAC et ceci pour un taux de pénétration en énergie éolienne élevé et en fonction de l'état de la suralimentation

du moteur diesel (atmosphérique, avec air comprimé). Cette validation pourrait être réalisée dans le cadre d'une étude de cas, en utilisant les paramètres réels des composants principaux et des sous-composants du micro-réseau (système hybride éolien-diesel-air comprimé) du TechnoCentre éolien. Ainsi, la validation de l'ensemble des modèles, connectés selon l'architecture électromécanique du SHEDAC, permettra de déterminer les sections dont une optimisation sera pertinente pour améliorer le fonctionnement et la précision du simulateur dans une étude future.

## **1.9 STRUCTURE DE MÉMOIRE**

Certains projets de recherche comportent une démarche empirique basée sur un banc de tests ou un système existant. Comparativement, la présente étude consiste à observer des phénomènes physiques dynamiques à partir d'une simulation numérique. Cette démarche s'avère tout aussi pertinente, car elle consiste en une étude préliminaire à une éventuelle application réelle d'un système éolien diesel avec stockage par air comprimé en vue de l'installer au site minier Camp Esker. Puisque l'installation d'une telle centrale s'avère coûteuse, il est plus avantageux de connaître préalablement le comportement d'un système réel. La réalisation de ce simulateur est rendue possible par une démarche structurée et rigoureuse. Le mémoire est organisé comme suit :

Le chapitre 1 porte sur les problématiques de l'électrification des sites isolés et l'état de l'art des systèmes hybrides tout en soulignant la position du projet SHEDAC parmi les systèmes hybrides existants ainsi que les travaux déjà réalisés sur ce système. On présente par la suite le site minier où le SHEDAC sera ainsi utilisé. Les objectifs, la méthodologie et la structure du mémoire sont aussi présentés en détail.

Le chapitre 2 permet de revoir l'ensemble des catégories de modèles existants et des exemples de simulateurs, dans l'objectif de déterminer le type de modèle qui répond le

mieux aux objectifs définis précédemment. À la lumière des modèles définis, le choix de l'environnement de simulation à adopter pour le présent projet sera justifié.

Le chapitre 3 expose la structure de simulateur à développer et son fonctionnement, les entrées et les sorties du logiciel, les modèles dynamiques à utiliser, les changements que le logiciel peut accepter. Ensuite, en se basant sur des critères techniques et énergétiques, une comparaison et une analyse sont réalisées entre plusieurs modèles existants implantés sur le même environnement de simulation.

Dans le chapitre 4, différents modèles de l'éolien comme de diesel sont présentés et analysés afin de retenir le modèle qui aborde en détail les phénomènes électromécaniques d'un système dynamique. Une fois les modèles sont choisis, une modélisation dynamique dans *Matlab/Simulink* est réalisée pour les différents composants de SHEDAC. Les paramètres de simulations sont déterminés à l'aide des ressources disponibles au TCE. Ces modèles, de types physiques et dynamiques, permettront de traiter plusieurs scénarios, et tiennent compte des différentes contraintes techniques et opérationnelles qui peuvent être envisagées lors de l'utilisation de SHEDAC dans l'électrification des sites isolés.

Dans le chapitre 5, les résultats des simulations numériques pour chaque composant sont présentés et analysés individuellement. Ensuite, les résultats de fonctionnement du simulateur selon plusieurs modes sont montrés et étudiés tout en relevant l'influence de couplage d'un composant avec un autre, ainsi les limites qui présentent le simulateur.

Enfin, la conclusion générale se présente comme une synthèse globale de tous les résultats obtenus dans le cadre de ce travail, en mettant en avant les principales contributions de ce projet, ainsi que les améliorations qui peuvent être apportées par le simulateur SHEDAC sur les méthodes de conception et de dimensionnement des systèmes hybrides. Des perspectives, des annexes, contenant en particulier la procédure de modélisation mécanique du couple aérodynamique, les paramètres de chaque composant

qui ont servis aux simulations numériques ainsi que les référencés bibliographiques, se trouvent à la fin du mémoire.





## CHAPITRE2

### ÉTAT DE L'ART DES LOGICIELS ET DES MODELES

#### 2.1 INTRODUCTION

La précision ainsi que la fiabilité des analyses numériques d'un SHED dépendent fortement de la granularité des modèles utilisés ainsi que l'environnement de simulation. Donc, il faut bien choisir les modèles et l'outil mathématique pour bien mener le dimensionnement et la modélisation d'un SHED. Une simulation numérique est une approche très avantageuse dans la mesure où elle permet de réduire les coûts de conception des SHED ainsi que les risques de bris des équipements réels. Chaque simulateur est basé sur un type de modèles représentant le comportement de chaque composant. En outre, le niveau de détail diffère d'un modèle à un autre dépendamment des objectifs de l'étude et ce qu'on cherche à présenter à travers le simulateur.

Parfois, il est difficile de choisir la méthode appropriée et le logiciel nécessaire pour étudier le comportement d'un SHED. Pour cette raison, une revue de littérature est essentielle pour explorer les capacités et les lacunes des techniques mathématiques disponibles et celles qui peuvent être développées pour mettre au point un simulateur des systèmes hybrides d'énergie.

La présentation des différentes catégories des modèles permettra de définir l'approche utilisée dans cette étude, les types des modèles et le logiciel le plus approprié répondant aux besoins et aux objectifs prédéfinis. Les deux types des modèles, soient les modèles statistiques et les modèles dynamiques seront présentés suivis par les catégories des logiciels. Un classement des différents types des logiciels existants sera effectué, suivi par une synthèse, basée sur un ensemble de critères, visant à justifier le choix de l'environnement de simulation pour un SHEDAC dans le cadre du présent projet.

## 2.2 TYPES DE MODELE

Le recours à la simulation numérique des SHED sert principalement à :

- ★ Comprendre et prédire le comportement réel électrodynamique du système.
- ★ Effectuer des études de cas à travers des validations sur des sites spécifiques et des données réelles typiques (puissance, profil de ressources renouvelables, profil de la charge).
- ★ Offrir une flexibilité large en matière de scénarios d'exploitation possibles en fonction de diverses contraintes environnementales et opérationnelles.
- ★ Optimiser le système hybride et réduire les coûts et les erreurs de la conception.
- ★ Tester plusieurs configurations et modes de fonctionnements probables ainsi que d'éventuelles solutions correctives.
- ★ Tester les réactions du système en cas de défauts en vue d'automatiser l'identification et la correction de ces dernières.

En se basant sur les fonctions identifiées précédemment, plusieurs approches pour modéliser et simuler les systèmes hybrides existent. Une certaine hiérarchisation de ces logiciels a été proposée par Hunter et Elliot dans [48]. On y trouve deux grandes catégories des logiciels : (1) les outils de simulations dynamiques faisant appel à des séries temporelles des données, et (2) les logiciels statistiques faisant appel à des séries statistiques et à des densités de probabilité. Le premier groupe sert à prédire l'évolution temporelle de l'état du système à court, moyen ou long terme, tandis que le second est plus utile pour les analyses économiques à long terme (sur une ou plusieurs années). Ainsi, les données d'entrée et de sortie sont spécifiques à chaque type des modèles.

### 2.2.1 Modèle des séries statistiques

Les modèles statistiques sont basés sur des fonctions probabilistes et des développements statistiques qui manipulent des données recueillies à partir des mesures

effectuées sur le terrain (profil de vent et de consommation d'énergie). Ces modèles sont empiriques et ne nécessitent pas une connaissance précise des composants du système hybride ou de leurs interactions.

En ce qui concerne les systèmes éoliens, ces modèles prennent comme données d'entrée des densités de probabilité de vitesse du vent (Van Der Hoven, Weibull, etc.) et de puissance de la charge. Ils fournissent des probabilités d'économie de carburant et d'autres données utiles aux évaluations d'ordre économique-financier (coûts de maintenance, prix du kWh produit, contribution à la réduction de l'émission de CO<sub>2</sub>, etc.).

Ces modèles sont donc difficilement transportables d'un site à l'autre et ne prennent pas en compte les spécificités, telles que le stockage d'énergie ou les flux d'énergie à travers le système. Néanmoins, des techniques d'évaluation du nombre d'arrêts/démarrages des groupes diesels ont été développées dans [48] et [49] à partir de ces modèles.

Bien que les modèles statistiques ne soient pas très utiles pour l'analyse du comportement dynamique d'un système, ils permettent une analyse très précise du comportement global en termes de fonctionnement annuel, et sont très utiles pour des analyses économiques. On peut ainsi évaluer la rentabilité ou l'efficacité d'un système hybride dans un site donné. Cependant, les objectifs du présent projet étant beaucoup plus techniques qu'économiques, les modèles dynamiques feront l'objet d'une attention particulière tout au long de cette étude.

### **2.2.2 Modèles dynamiques**

Selon les caractères observés et les éléments modélisés, les modèles dynamiques peuvent être regroupés dans trois groupes de modèles [48] :

### 2.2.2.1 **Modèle dynamique à très court terme**

Ces modèles sont utilisés pour l'analyse harmonique, la qualité des signaux, la stabilité transitoire des systèmes de production (fréquence, tension) et le dimensionnement des composants (diodes, thyristors, etc.). Les performances des régulateurs de tension et de vitesse sont également observées (temps de réponse, dépassements, modes oscillatoires, etc.).

Ces derniers permettent d'observer les dynamiques mécaniques et électriques ainsi que leurs interactions sur des courtes périodes de temps (quelques secondes). Ceci nécessite des pas de simulation de l'ordre des millisecondes, voire des microsecondes. Ces modèles sont basés sur un certain nombre d'équations mathématiques permettant un grand niveau de détail dans la simulation. En effet, les éléments sont analysés dans leur structure et leur comportement interne où les dynamiques les plus rapides peuvent être observées. Généralement, les investigations portent sur les réactions du système aux pics ou aux variations brusques des ressources renouvelables (vitesse du vent, radiation solaire...) ou de la puissance de la charge [50]. Toutefois, ces modèles ne prennent pas en compte l'effet du stockage et de la commutation des sources, et ne permettent donc pas de statuer sur les économies d'énergie.

### 2.2.2.2 **Modèle dynamique à court terme :**

Les modèles dynamiques à court terme permettent d'observer les flux de puissances (active et réactive) à travers la structure modélisée. On peut ainsi se concentrer sur le dimensionnement (en blocs) des équipements tels que les convertisseurs d'électronique de puissance, les turbines éoliennes, les groupes diesels, les roues d'inertie, les compensateurs, etc. À ce stade, on suppose que la résolution des problèmes s'effectue à très court terme et seules les dynamiques transitoires sont prises en compte.

Les stratégies de régulation et de contrôle liées à chaque sous-système ne sont pas remises en cause et chacun d'eux est supposé stable et représenté par ses paramètres transitoires. À cet effet, des hypothèses simplificatrices sont appliquées aux différentes équations dynamiques du système, pour réduire le nombre de variables dynamiques considérées dans l'implantation des modèles. Par exemple, dans le cas des machines de conversion électromécanique, certaines dynamiques électriques peuvent être négligées par rapport aux dynamiques mécaniques. Kundur [51] a étudié les effets de ces approximations dans le cas de la génératrice synchrone. Les intervalles d'investigation sont de l'ordre de quelques minutes et les périodes d'échantillonnage de l'ordre du dixième de seconde.

Les effets du stockage à court terme, la stabilité du réseau, la compensation, etc. sont étudiés dans ce type de modèles. Les entrées des modèles sont généralement des séries de valeurs de vitesse du vent et de consommation de la charge sur quelques minutes. Ainsi, on peut étudier les stratégies de commutation rapide entre les sources. Ces modèles peuvent aussi servir à rassembler des données utiles aux préoccupations d'ordre économique lorsque les informations sur les ressources renouvelables et la consommation de la charge sont connues avec précision.

### 2.2.2.3 Modèle dynamique à long terme

Les modèles dynamiques à long terme permettent d'étudier les performances à long terme tels que le stockage, le transfert d'énergie, ainsi que le temps d'opération des générateurs diesel. Ces modèles constituent, en fait, le laboratoire d'expérimentation des algorithmes de gestion globale de la production et de l'économie du carburant. Les simulations sont généralement effectuées sur de longues périodes de temps avec des échantillonnages de l'ordre de dizaines des minutes. Les informations fournies à ces modèles sont en général recueillies sur l'année et échantillonnées avec des intervalles de 10, voire 60 minutes. On peut aussi étudier les différents modes de fonctionnement éolien (W),

éolien-diesel (WD) et Diesel (D) ainsi que les logiques de commutation d'un mode à un autre. L'aspect économique du système peut aussi être étudié.

De façon globale, les modèles dynamiques permettent une étude hiérarchique des systèmes hybrides, où chaque niveau de modélisation s'attaque à des problèmes spécifiques. Cependant, ces modèles sont en général déterministes (bruits et incertitudes négligés) et sont axés sur l'aspect technique du jumelage, ce qui ne permet pas une étude optimale de l'économie d'énergie et des coûts de production.

### **2.3 CATEGORIE DES LOGICIELS**

Des nombreux et différents logiciels existent pour la mise en œuvre du micro-réseau. Ils n'offrent cependant pas les mêmes options et les mêmes fonctionnalités. Certains sont des outils d'aide à la décision dans la mesure où ils permettent à l'utilisateur de se prononcer sur la faisabilité et le dimensionnement d'un projet. D'autres permettent de simuler des systèmes conçus, voire même de les optimiser dans le cadre de leur dimensionnement [52].

Toutefois, on note des différences quant aux composants mis en jeu et aux objectifs attendus. Ainsi, les logiciels permettant de discuter et d'analyser les performances d'un système hybride de production d'énergie peuvent être classés en quatre catégories [10] : outils de dimensionnement, de simulation, de recherche et de conception des mini-réseaux.

Une compréhension globale est essentielle à propos de disponibilités des modèles du système hybride et des logiciels, de leurs caractéristiques et des besoins des utilisateurs. Dans les sections suivantes, les caractéristiques principales des plusieurs logiciels seront discutés et classés selon les quatre catégories.

### **2.3.1 Outils de dimensionnement**

Ce sont des outils conçus pour le dimensionnement d'un système donné et de ses différents composants. Certains permettent de minimiser explicitement le coût du système, tandis que d'autres s'intéressent à définir la taille selon des règles qui conduisent à un fonctionnement optimal. La plupart des outils de dimensionnement fournissent des informations détaillées sur les flux d'énergie entre les composants et des indications sur les périodes critiques de fonctionnement au cours de l'année.

Les outils de dimensionnement sont généralement des petits logiciels compilés. Ils ont une interface utilisateur conçue pour être rapide et facile à utiliser. C'est le type de logiciels les plus souvent utilisés par les installateurs de système (Homer, RetScreen, etc.).

#### **2.3.1.1 Exemples des logiciels**

##### **A- Homer**

Homer est un logiciel de dimensionnement et d'optimisation des systèmes de génération électrique, distribué et développé par le National Renewable Energy Laboratory (NREL) [46]. Homer est un exemple d'application de modèles utilisant des séries statistiques. Il effectue un bilan énergétique horaire tout au long d'une année pour chaque configuration de système effectuée par l'utilisateur. Par la suite, il est possible d'analyser plusieurs configurations pour ce même système afin d'en obtenir la solution la moins chère. Le modèle doit être renseigné par les informations sur les ressources disponibles, les options technologiques, les coûts et les charges à respecter par le système. Toutefois, les composants qui peuvent être modélisés sont des modules photovoltaïques, des éoliennes, des génératrices diesel, des batteries, des convertisseurs CA/CC, des électrolyseurs et des réservoirs d'hydrogène. Les éléments clés du modèle sont les bus CA et CC auxquels



chaque convertisseur doit être lié. Les charges peuvent être saisies en tant que profil de charge quotidien ou importé d'un fichier de données horaires.

Une liste des publications et études de cas mettant la lumière sur l'utilisation de Homer est disponible sur son page d'accueil [53]. Homer a déjà été utilisé pour évaluer le potentiel de l'énergie éolienne en Ethiopie [54], la faisabilité d'un système autonome hybride éolien-diesel en Arabie Saoudite [55], la faisabilité des maisons à zéro énergie [56], ainsi que l'étude d'un système hybride intégrant le stockage d'énergie sous forme d'hydrogène à Terre-Neuve, au Canada [57]. Enfin, Homer a déjà été utilisé pour dimensionner un système où 100% de la demande d'électricité a été satisfaite par des sources renouvelables [58].

Les principales limites de Homer sont les suivantes :

- Homer ne permet de minimiser qu'un seul objectif qui est le coût actuel net (NPC), or des problèmes multiobjectifs ne peuvent pas être formulés. Après le processus d'optimisation, Homer classe les configurations des systèmes hybrides optimisés selon le NPC et non pas selon le coût moyen actualisé de l'énergie.
- Homer ne considère pas la profondeur de décharge (DOD) de la batterie, un facteur qui joue un rôle très important dans l'optimisation des systèmes hybrides, puisque la durée de vie qui diminue quand la DOD augmente. Par conséquent, le DOD devrait être soit optimisé, soit inclus dans les entrées de l'étude de sensibilité d'Homer.
- Homer ne considère pas la variabilité intra-horaire
- Homer ne considère pas les variations de la tension du bus (AC, DC ou les 2 ?).

La figure 2.1 suivante présente l'espace de travail sous Homer.

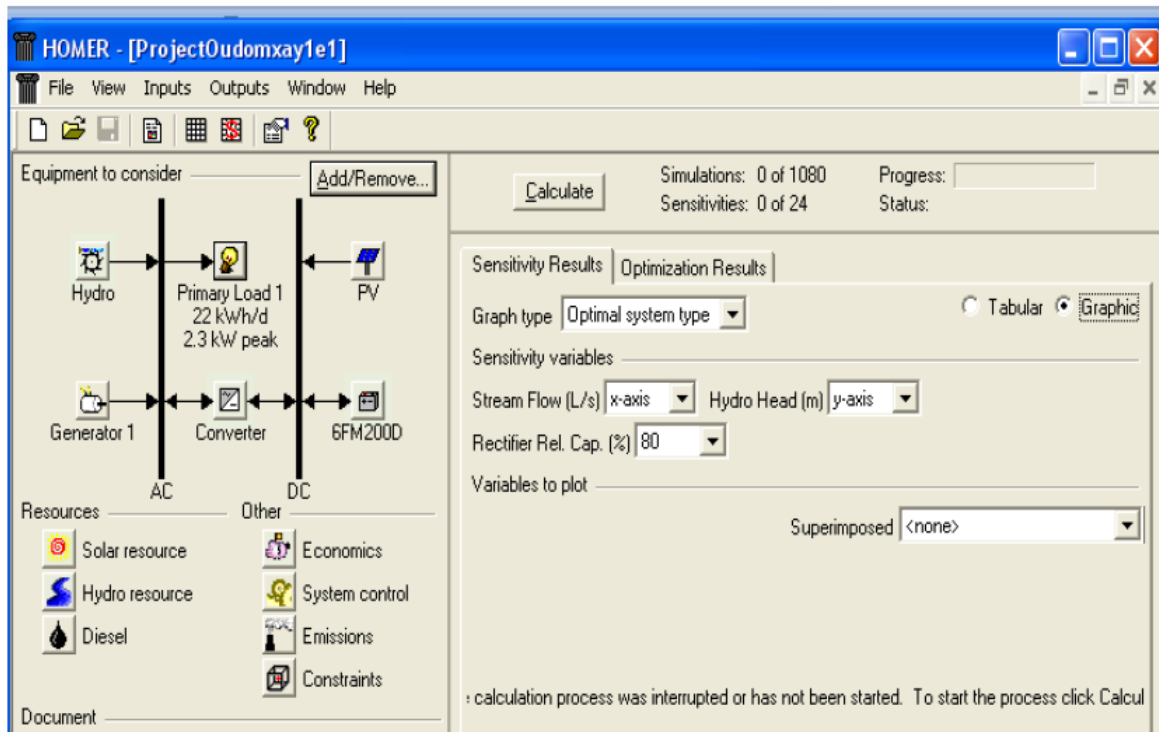


Figure 2.1: Espace de travail sous Homer [53]

## B- RETSCREEN

RETScreen est à la fois un outil d'études de sensibilité aux énergies propres, d'aide à la décision et de renforcement des compétences, développé par Ressources naturelles Canada en 1996 grâce aux contributions du gouvernement, de l'industrie et du milieu universitaire [59]. L'outil consiste en un logiciel standardisé et intégré, capable d'analyser des projets d'énergies propres et d'efficacité énergétique partout au monde en vue d'améliorer la production énergétique, les coûts du cycle de vie et les réductions d'émissions de gaz à effet de serre (GES)..

Chaque modèle de technologie d'énergie propre est développé dans un classeur Microsoft Excel individuel. Ensuite, chaque classeur est composé d'une série de feuilles de calcul. Ces feuilles de calcul ont un aspect commun et suivent une démarche standardisée.

En plus du logiciel, l'outil comprend des bases de données (produits, coûts et données météorologiques), un manuel en ligne, un site Web, un manuel d'ingénierie, des études de cas et un cours de formation [59].

RETScreen est fondamentale pour une comparaison entre « un cas de base », où la technologie classique est généralement utilisée, et « un cas proposé » qui est la technologie de l'énergie propre. La comparaison comprend tous les coûts et un certain nombre d'indices économiques comme le taux interne de rendement (IRR) et la valeur actualisée nette (VAN).

Le logiciel peut être appliqué à tout système d'énergie, allant des projets individuels à des applications mondiales. Toute la production thermique et les technologies renouvelables peuvent être comptabilisées dans RETScreen et il peut intégrer des mesures d'efficacité énergétique relativement faciles. Cependant, le seul dispositif de stockage considéré est le stockage de l'énergie avec des batteries.

Auparavant, RETScreen a été utilisé pour évaluer la faisabilité d'un parc éolien en Algérie [60], la faisabilité d'utiliser l'énergie solaire pour la production de l'eau chaude au Liban [61], la viabilité de l'énergie solaire photovoltaïque en Égypte [62], ainsi l'évaluation du potentiel d'un bâtiment intégrant un système PV [63] et les réductions de GES dans le secteur résidentiel. Une évaluation détaillée des projets et les résultats complets sont disponibles dans la section d'aide de RETScreen [64].

Les principales limites de RETScreen sont les suivants :

- Il ne prend pas en compte l'effet de la température dans le cas des systèmes PV.
- Pas d'option pour le fichier d'importation des données des séries chronologiques.
- Des options limitées pour la recherche de récupération et de visualisation des données.
- Présence de problème de partage de données.
- Il ne supporte pas des calculs très avancés.

La figure 2.2 montre l'espace de travail dans Retscreen.

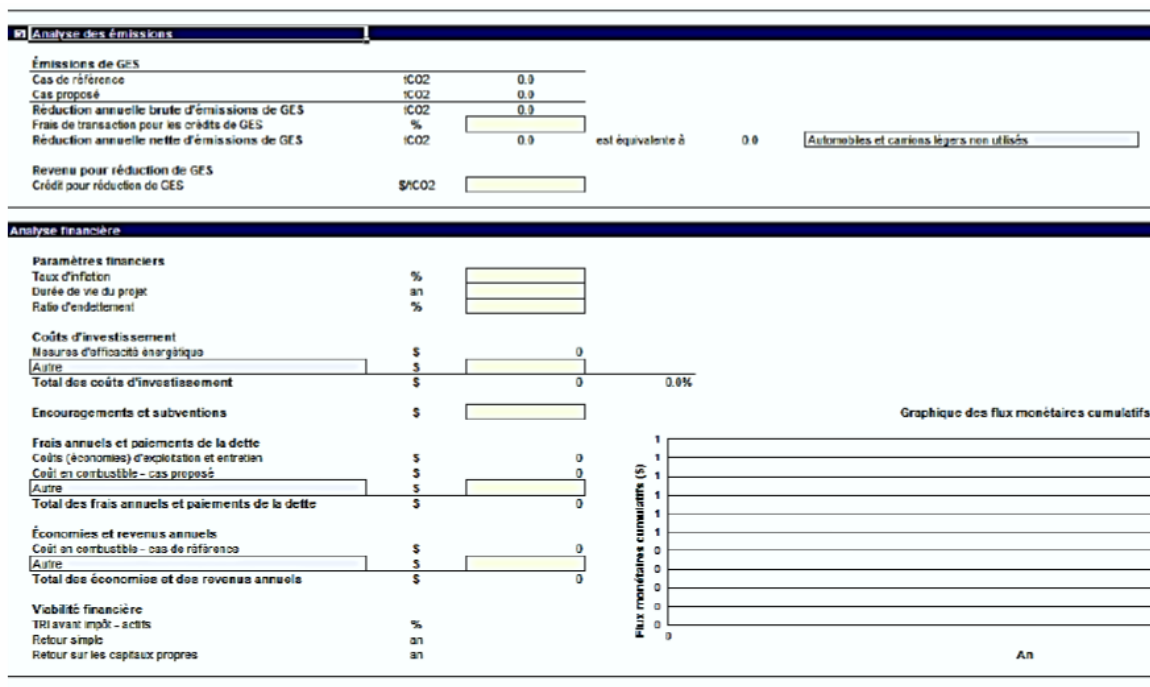


Figure 2.2: Espace de travail sous RetScreen [59]

## C- HYBRID2

Hybrid2 est développé par le Laboratoire de recherche de l'énergie renouvelable (RERL) de l'Université du Massachusetts, aux États-Unis avec l'appui du laboratoire national d'énergie renouvelable [65, 66]. Après Hybrid1 en 1994, Hybrid2 a été développé en 1996 et la plus récente version est 1.3b. Quelques changements ont été apportés sur la dernière version de Hybrid2, ainsi que des corrections sur l'ancienne version. Ce logiciel est programmé sur Microsoft Visual Basic et utilise la base des données de Microsoft Access. Hybrid2 est un modèle probabiliste qui utilise des méthodes statistiques pour tenir compte des variations de pas du temps. Il est capable d'étudier et d'analyser la performance détaillée d'un système à long terme ainsi que de prédire son potentiel économique. Il contient une disposition de simulation des séries chronologiques pour les intervalles de temps entre 10 minutes et une heure. Il offre la possibilité d'étudier des systèmes hybrides

comportant des éoliennes, des générateurs photovoltaïques, des génératrices diesel, des batteries, des convertisseurs de puissance et une charge de délestage.

Cet outil contient principalement quatre parties, à savoir l'interface graphique de l'utilisateur (GUI), le module de la simulation, le module de calcul économique et de la rentabilité et l'interface graphique des résultats (GRI). D'une part, l'utilisateur de l'interface graphique peut construire facilement des projets et développer des modèles. D'autre part, l'interface graphique des résultats (GRI) permet l'examen facile et détaillé des résultats de simulation, ainsi les modules de la simulation et d'étude économique permettent à l'utilisateur d'exécuter des simulations avec une relative facilité de contrôle de l'erreur de saisie des entrées. .

Ce logiciel manque de souplesse avec un accès limité aux paramètres, mais il dispose d'une librairie riche des données de diverses ressources [67] [68].

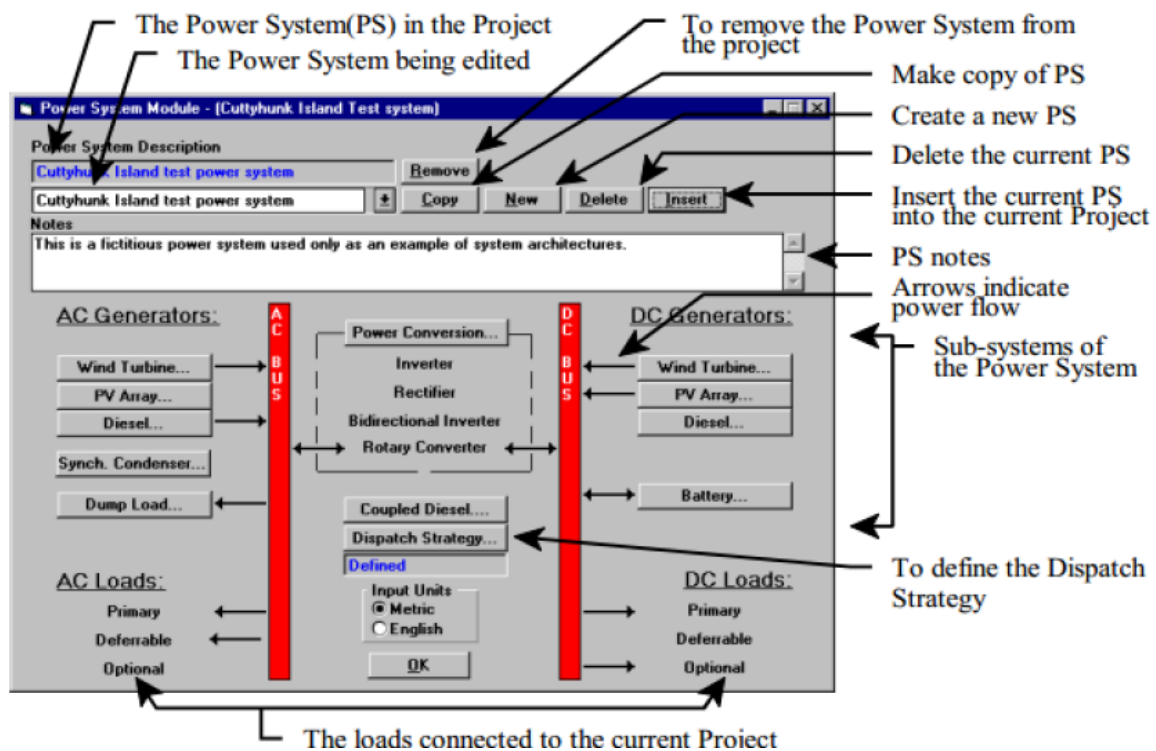


Figure 2.3 : Espace de travail sous HYBRID2 [69]

## D- iHOGA

iHOGA (Amélioration de l'optimisation hybride par l'algorithme génétique) anciennement connu sous le nom HOGA (optimisation hybride par l'algorithme génétique). C'est un outil d'optimisation des systèmes hybrides, utilisant le langage de programmation C ++ développé par José L. Bernal-Agustín et Rodolfo Dufo-López de l'université de Saragosse, en Espagne [70, 71]. HOGA est utilisé pour le dimensionnement optimal d'un système hybride d'énergie qui peut inclure un système photovoltaïque, des éoliennes, des turbines hydroélectriques, des piles à combustible, des réservoirs H<sub>2</sub>, des électrolyseurs, des systèmes de stockage, des régulateurs de charge pour les batteries, des onduleurs, des redresseurs et des génératrices à courant alternatif (CA). De plus, ce logiciel permet d'optimiser les systèmes dimensionnés, comme par exemple l'optimisation de la pente de la courbe de la puissance des panneaux PV et les calculs de cycle de vie de batterie, etc.

La nouvelle version iHOGA comprend beaucoup plus d'autres options d'optimisation comme la prise en compte de la durée de vie des composants, l'analyse de sensibilité, les nouvelles contraintes, une base de données de divers composants et une facilité de conversion des devises, etc. Il dispose de deux versions à savoir PRO+ et EDU.

PRO+ est une version payante qui peut être utilisée sans aucune limitation à toutes les fonctionnalités et se disposant même d'un support technique complet. Par contre, la version EDU qui est gratuite, elle n'est utilisée que pour des fins d'enseignement ou de formation et elle n'est pas autorisée dans les projets, les travaux d'ingénierie, d'installation et pour tout travail impliquant des transactions financières.

Les limites de la version EDU du logiciel sont les suivantes :

- Il ne peut simuler qu'une charge moyenne journalière totale de 10 kWh.
- Les analyses de sensibilité et de probabilité ne sont pas incluses.
- Le calcul économique n'est pas disponible.

La dernière version d'iHOGA (version 2.2, novembre 2013) peut fonctionner uniquement avec Windows XP, Vista, versions 7 ou 8. Ce logiciel nécessite une connexion internet pour obtenir la validité de la licence, sinon il ne fonctionnera pas.

La figure 2.4 suivante montre l'espace de travail sous iHOGA.

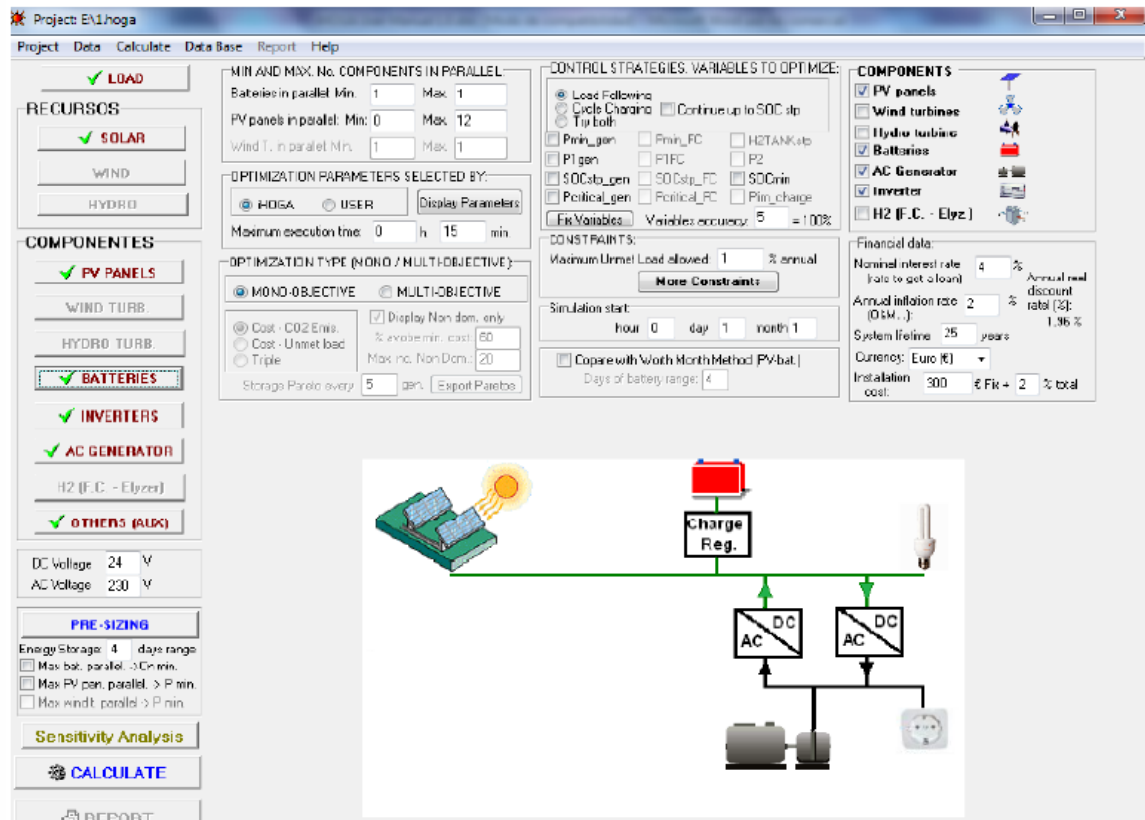


Figure 2.4: Espace de travail sous iHOGA [72]

## E- HySys

Hysys, est un outil de dimensionnement développé par le Centre espagnol de recherche pour l'énergie, l'environnement et la technologie (CIEMAT) [73]. Ce logiciel permet le dimensionner et analyser à long terme des systèmes hybrides pour les réseaux autonomes, comprenant principalement des panneaux PV, des éoliennes et des générateurs diesels. En 2003, la version 1.0 de ce logiciel a été développée, mais actuellement il est seulement utilisé en interne par CIEMAT [74].

La figure 2.5 suivante montre l'espace de travail sous HySys.

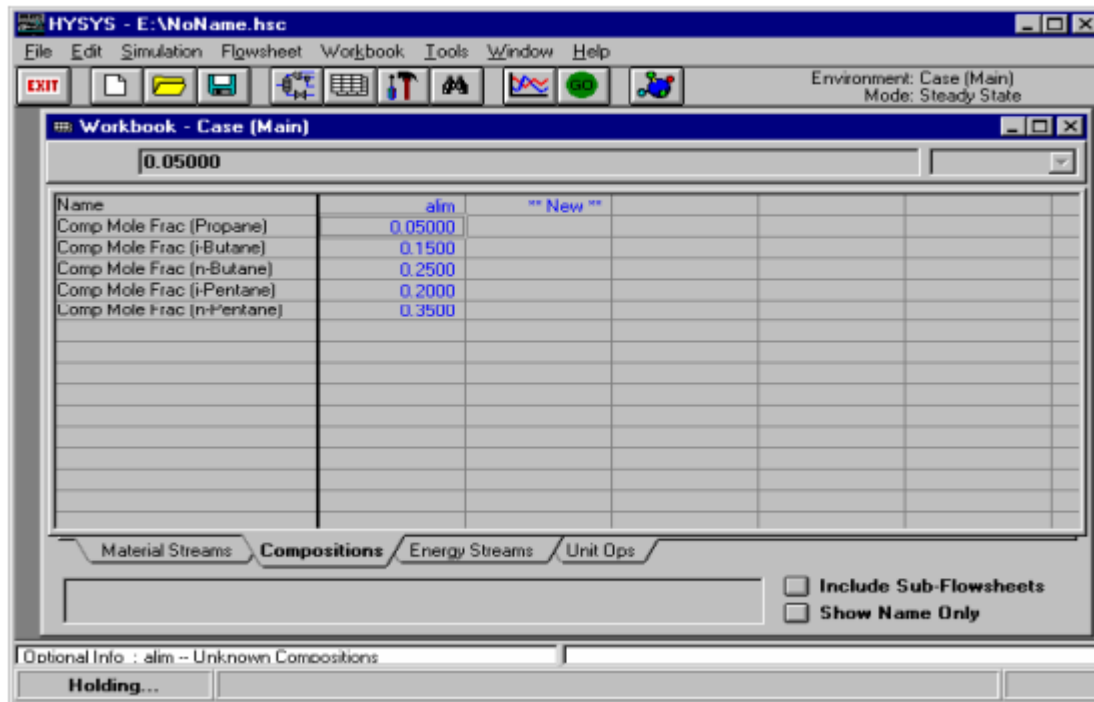


Figure 2.5 : Espace de travail sous HySys [9]



## F- SHEDAC1

C'est un logiciel développé par le laboratoire d'énergie éolienne (LREE) de l'Université de Québec à Rimouski (UQAR) et le TechnoCentre éolien en 2013. Cet outil permet l'étude de l'efficacité énergétique (consommation de carburant, fréquences d'opération...) d'un système hybride de type éolien-diesel avec stockage par air comprimé comparé à d'autres systèmes conventionnels. Une étude comparative avec un logiciel déjà existant et fiable, Homer, a été réalisée pour la validation des modèles physiques et numériques intégrés dans le logiciel SHEDAC1. La comparaison a démontré un écart inférieur à 10%, dans les résultats obtenus à l'aide du logiciel SHEDAC 1, lors d'une étude de cas appliquée au camp minier d'Esker, par rapport à ceux effectués par Homer. De plus, il a ainsi été prouvé que l'outil mis en place est pertinent pour l'analyse des systèmes hybrides d'énergie destinés pour l'électrification des sites isolés [15].

La figure 2.6 suivante montre l'espace de travail sous SHEDAC1.

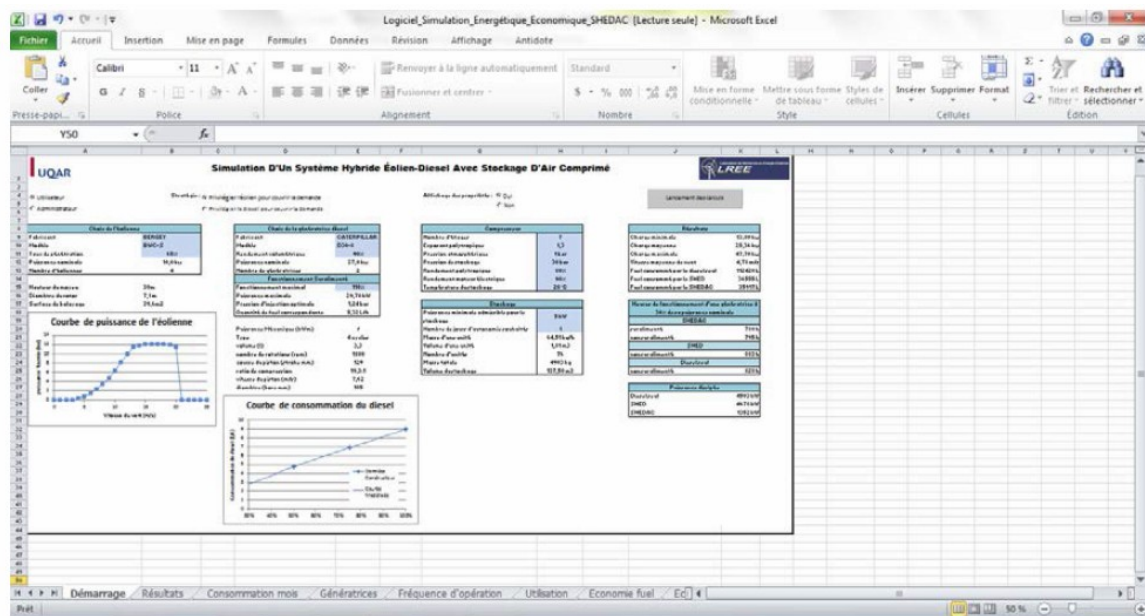


Figure 2.6: Espace de travail sous SHEDAC1

### 2.3.2 Outils de simulation

Contrairement aux outils de dimensionnement, l'utilisateur des outils de simulation doit préciser la nature et la taille de chaque composant, alors l'outil fournit une analyse détaillée de comportement du système.

Généralement, la résolution temporelle de la simulation (le pas de temps), varie selon les logiciels de simulation et dépend de niveau du détail requis et la disponibilité des données d'entrée (par exemple, données météo, radiation solaire, vitesse du vent, etc.). On trouve les simulations horaires, qui peuvent être utilisées pour vérifier la taille du système et pour étudier l'impact des changements futurs de la charge, tout en considérant les performances dans des conditions atypiques (par exemple, le pire des cas de la météo) [75].

Les outils de simulations permettent d'étudier la sensibilité de la conception de divers composants et d'analyser l'impact d'une panne ou d'une dégradation de leurs performances. Ils peuvent également fournir des informations sur les caractéristiques économiques et environnementales du système, tels que le coût du cycle de vie et les émissions de CO<sub>2</sub> [75]. De plus, ils peuvent être utilisés pour le calibrage des composants, où l'utilisateur doit identifier correctement les variables clés, puis il peut exécuter la simulation à plusieurs reprises, en ajustant les variables manuellement dans l'objectif de les converger pour un dimensionnement souhaité. Notant ici que certains outils automatisent ce processus[75] .

Les outils de simulation sont généralement compilés sur des logiciels distribués par les centres de recherche et les entreprises spécialisées. Par exemple Sandia National Laboratory aux États-Unis a évalué la capacité des outils de simulation pour le cas des systèmes de distribution électrique pour faire face à une forte pénétration des ressources

renouvelables dans les systèmes de distribution classiques [50]. Plusieurs autres logiciels vont être présentés dans ce qui suit, faisant partie de type des outils de simulation et de modélisation des systèmes.

#### 2.3.2.1 Exemples des outils de simulation

##### **A- MATLAB / SIMULINK**

MATLAB est un logiciel commercial développé par MathWorks en 1984 et mise à jour régulièrement [76]. C'est un système interactif et convivial de calcul numérique et de visualisation graphique permettant de modéliser, simuler, optimiser, contrôler et analyser des systèmes de nature très diverse (éolien, PV, diesel, batterie, air comprimé, pile à combustible, électronique de puissance, etc.). Il intègre des fonctions d'analyse numérique, de calcul matriciel, de traitement de signal et de visualisation graphique 2D et 3D, etc. La figure 2.8 suivante montre l'espace de travail sous MATLAB.

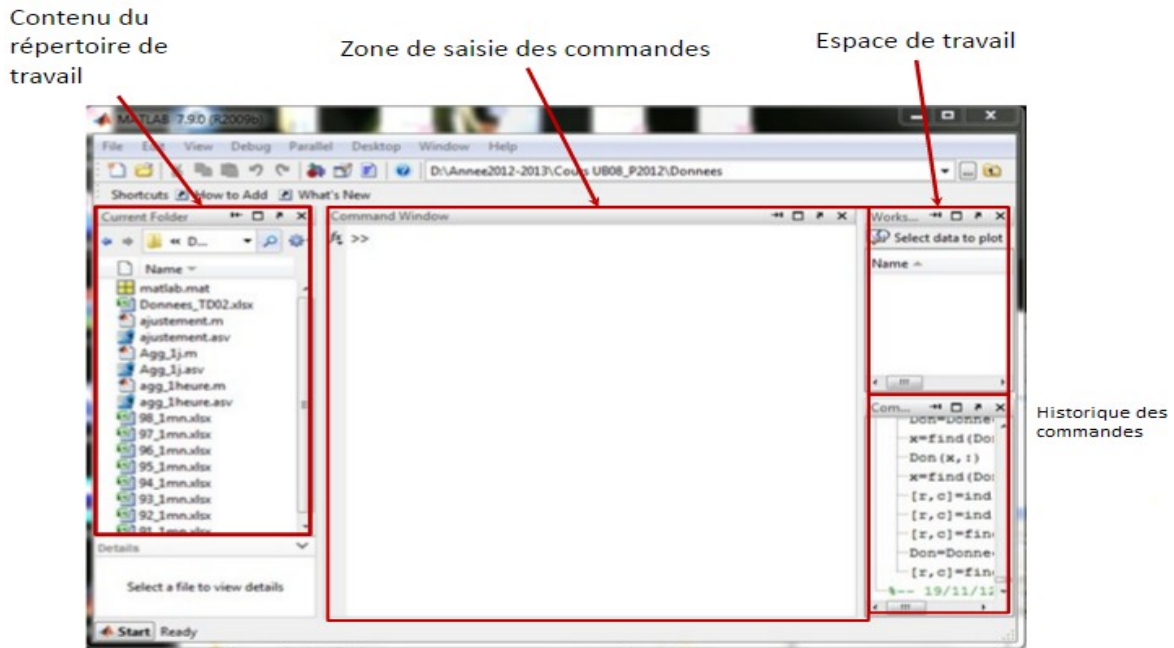


Figure 2.7: Espace de travail sous MATLAB [76]

SIMULINK™ est un produit connexe à MATLAB adapté à l'entrée graphique et la simulation des systèmes dynamiques. MATLAB, SIMULINK et leurs boîtes d'outils, forment un environnement complet pour la conception, la modélisation, la simulation et l'analyse des systèmes dynamiques. Depuis quelques années, la simulation du processus dynamique des réseaux électriques dans l'environnement de MATLAB®/SIMULINK™ a été un sujet de plusieurs études pour tirer avantage des facilités des logiciels MATLAB®/SIMULINK™ [77]. De plus, la définition des modèles dans l'environnement SIMULINK se fait par schémas blocs (diagramme structurel). Le diagramme structurel permet la représentation graphique d'un système d'équations linéaires et non linéaires. Il met en évidence la structure du système et il permet de visualiser les interactions entre les différentes grandeurs internes et externes. On distingue, alors, particulièrement bien les contre-réactions, les couplages réciproques, les non-linéarités, etc. Les éléments qui composent le diagramme structurel représentent des opérations mathématiques, à savoir

addition, soustraction, multiplication avec un coefficient, intégration et différentiation, ainsi que la multiplication et la division de deux variables et la fonction non linéaire d'une variable. SIMULINK possède une interface graphique pour visualiser les résultats sous forme des graphiques ou des valeurs numériques en cours de simulation. Les paramètres régissant le fonctionnement des systèmes peuvent être modifiés en ligne, c'est à dire en cours de simulation, et l'on peut observer leur effet immédiatement. SIMULINK est bâti autour d'une bibliothèque de blocs (librairies) classés par catégories [78].

Un outil antérieur à Simulink qui est le SimPowerSystems ou SPS est développé et qui est un des modules contenus dans Simulink. Il s'agit d'un des modules de modélisation physique. Il permet de modéliser et de simuler des réseaux électriques ainsi que des systèmes d'électronique de puissance détaillés. La distribution, la consommation et la gestion de la puissance dans un système pouvant être simulées. Également, des blocs multimètres permettent de connaître la tension ou le courant pour n'importe quel point du circuit [77].

En conclusion, MATLAB s'est imposé dans les milieux universitaire et industriel comme un outil puissant de modélisation, de simulation et de visualisation de problèmes numériques. Il est utilisé comme un simulateur de système commercial standard pour la simulation des systèmes techniques. Dans le monde universitaire, MATLAB est utilisé pour l'enseignement de l'algèbre linéaire, le traitement du signal, l'automatique, etc., ainsi que dans la recherche scientifique. En ce qui concerne le domaine industriel, il est utilisé pour la résolution et la simulation des problèmes d'ingénierie et de prototypage. La version actuelle est écrite en C. Sa disponibilité est assurée sur plusieurs plates formes : Sun, Bull, HP, IBM, Compatibles PC, Macintosh, XP et plusieurs machines parallèles.

La figure 2.8 suivante montre l'espace de travail sous Simulink.

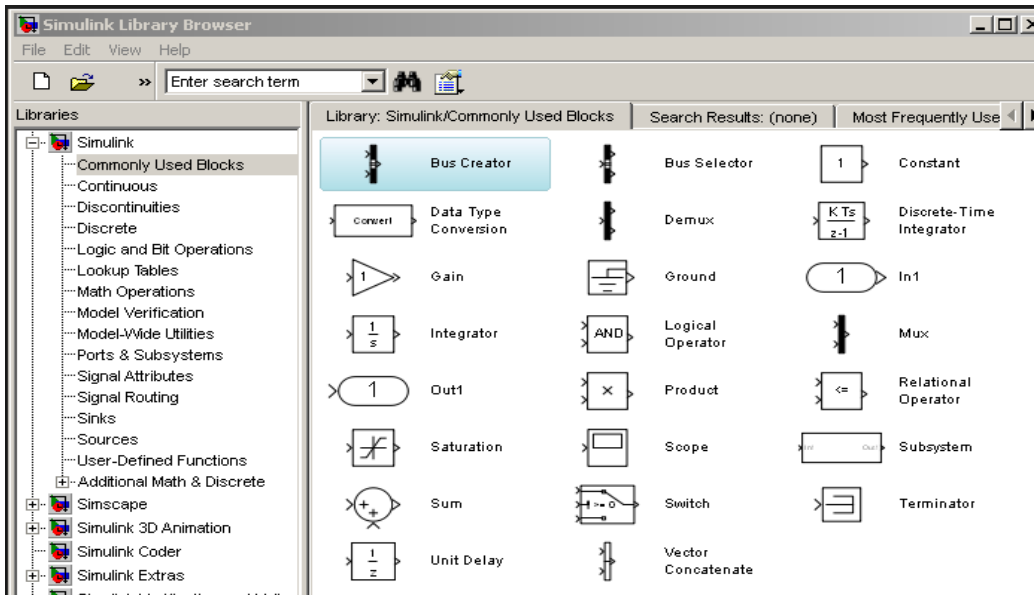


Figure 2.8: Espace de travail sous Simulink [76]

## B- TRNSYS

En 1975, l'Université du Wisconsin et l'Université du Colorado (États-Unis) ont développé conjointement un logiciel de simulation des systèmes énergétiques nommés TRNSYS (Transient Energy System Simulation Program) [79]. Initialement, il a été développé pour la simulation des systèmes thermiques, mais après une durée de plus de 35 ans, ce logiciel a été amélioré et ses caractéristiques ont été modifiées. En effet, actuellement, il inclut les systèmes photovoltaïques, les systèmes solaires thermiques et d'autres systèmes où il est devenu un simulateur pour les systèmes hybrides. Le seul stockage d'énergie électrique considéré par TRNSYS est le stockage d'énergie dans des batteries.

Ce logiciel est extrêmement flexible, utilisé pour simuler le comportement du système transitoire et incluant deux parties : un noyau et une bibliothèque. Le noyau traite le fichier d'entrée, il résout le système avec divers techniques et détermine sa convergence,

alors que la deuxième partie représente la bibliothèque qui comprend des différents modèles, qui peuvent également être modifiés par l'utilisateur.

TRNSYS ne propose pas d'option d'optimisation, mais il réalise la simulation avec une grande précision, en se basant sur des interfaces graphiques et sur d'autres détails. L'outil utilise un pas de temps défini par l'utilisateur, qui est compris entre 0,01 seconde et une heure. De plus, l'utilisateur peut analyser un horizon temporel de plusieurs années. À noter que cet outil facilite l'addition mathématique, et la capacité à interfacer avec d'autres programmes de simulation.

TRNSYS a été largement utilisé pour simuler les applications de l'énergie solaire, des bâtiments classiques, et même des processus biologiques. Parmi celles-ci on cite : une étude comprenant un prototype des systèmes d'énergie solaire thermique [80, 81] et une étude de modélisation d'un système hybride photovoltaïque-solaire thermique à Chypre [82]. TRNSYS a été utilisé pour simuler une pénétration des énergies renouvelables de 110% en secteur de l'électricité et 90% en secteur thermique [83].

La figure 2.9 suivante montre l'espace de travail sous TRNSYS.

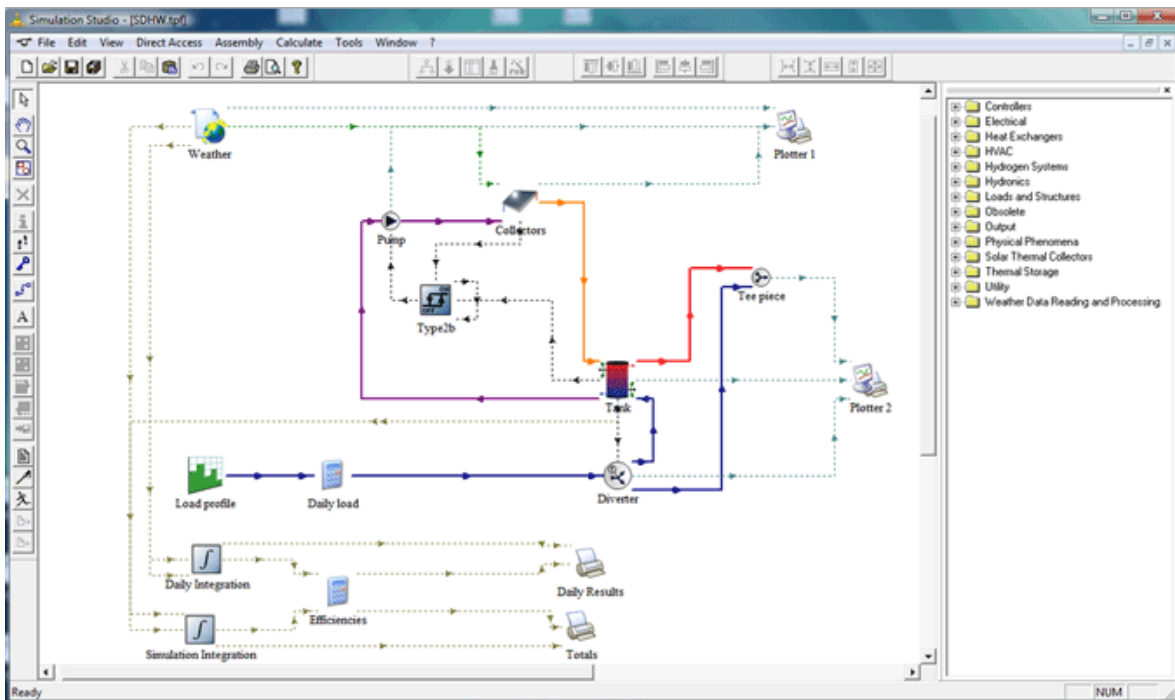


Figure 2.9: Espace de travail sous TRNSYS [79]

### C- RAPSIM

RAPSIM (Remote Area Power Supply Simulator) a été développé à l'Université de recherche de Murdoch dans un projet financé par le centre australien de recherche coopérative pour les énergies renouvelables (ACRE). C'est un logiciel de simulation des systèmes hybrides PV-éolien-diesel [84]. Il permet à l'utilisateur de sélectionner et de simuler un système hybride (PV et/ou éolienne et/ou diesel) et de calculer son coût total. De plus, il analyse des éléments tels que le profil de charge, les données météorologiques pertinentes. Cette analyse permet de voir comment les différents systèmes peuvent interagir dans un environnement particulier [84]. L'utilisateur a la possibilité également de modifier les paramètres à l'intérieur du système, tel que l'augmentation de la taille des



batteries, en ajoutant une autre éolienne ou en changeant la taille de la génératrice diesel [85, 86].

La figure 2.10 suivante montre l'espace de travail sous RAPSIM.

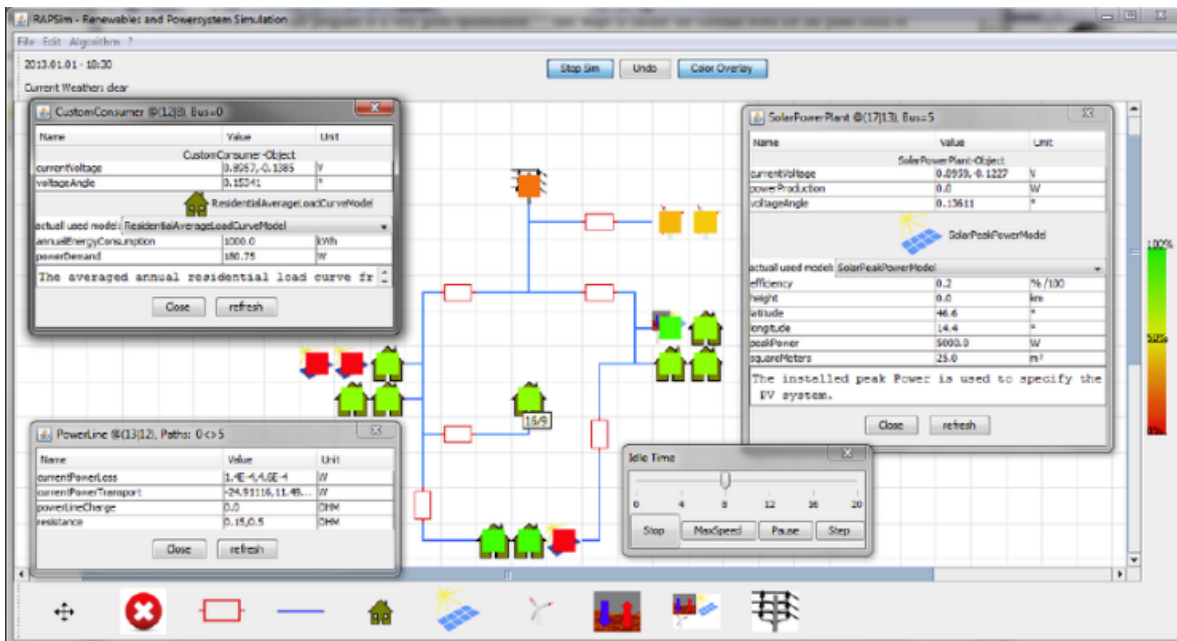


Figure 2.10: Espace de travail sous RAPSIM [9]

## D- SOMES

SOMES (Simulation and Optimization Model for Renewable Energy Systems) est un logiciel développé par l'Université d'Utrecht aux Pays-Bas en 1987. Ce logiciel peut simuler et analyser le fonctionnement des générateurs d'énergie renouvelable (éolien-PV-diesel avec stockage par des batteries) sur une base horaire. SOMES utilise des entrées comme les données météorologiques, la demande de la charge pour obtenir une performance technique et économique de la configuration particulière du système en étude [26]. Aussi, il peut effectuer la recherche des plus bas coûts de l'électricité en comparant

plusieurs combinaisons. Par contre, il ne permet pas de sélectionner une stratégie de fonctionnement optimale [84].

#### **E- SOLSIM**

SOLSIM a été développé par Fachhochschule Konstanz en Allemagne, c'est un outil de simulation des systèmes d'énergies renouvelables utilisant des panneaux photovoltaïques, des éoliennes, des génératrices diesel, des batteries et des systèmes bioénergétiques pour l'électricité et la génération de la chaleur.

SOLSIM permet d'optimiser l'angle d'inclinaison des panneaux PV et d'effectuer une analyse économique du système, où il est capable de calculer le coût du cycle de vie d'un système donné. Toutefois, les données créées dans chaque simulation peuvent être affichées sur un profil horaire, journalier, hebdomadaire ou mensuel. SOLSIM comprend une interface graphique qui permet à l'utilisateur de mieux comprendre et utiliser le programme [27]. Par contre, il demande une très grande quantité des données spécifiques à saisir pour le réglage de la simulation, qui est une des raisons de ses limitations en matière de commande.

#### **F- INSEL**

Le logiciel INSEL (Integrated Simulation Environment Language) est un outil de modélisation graphique, développé par l'Université d'Oldenburg en Allemagne qui permet aux utilisateurs de faire une structure à l'aide de sa bibliothèque avec un temps d'exécution spécifié [28]. Ce logiciel de simulation a la possibilité de créer des modèles et des configurations des systèmes pour la planification et le suivi des systèmes électriques et thermiques. Il dispose de sa propre base de données météorologiques de près de 2000 emplacements dans le monde ainsi que de ses modèles de systèmes photovoltaïques, de systèmes thermiques prédéfinis et d'autres données enregistrées comme l'ensoleillement solaire, la température, l'humidité et la vitesse du vent. Les données peuvent être générées à

l'aide de ce logiciel à partir des valeurs moyennes mensuelles pour tout emplacement et orientation donnée.

La flexibilité de créer des modèles et des configurations du système est une caractéristique très intéressante d'INSEL. Son inconvénient est qu'il ne permet pas d'optimiser les systèmes d'énergies renouvelables. Aussi, certains composants tels que le générateur diesel et les convertisseurs n'ont pas de modèles par défaut, ils doivent être créés par l'utilisateur [85, 86] [87].

La figure 2.11 suivante montre l'espace de travail sous INSEL.

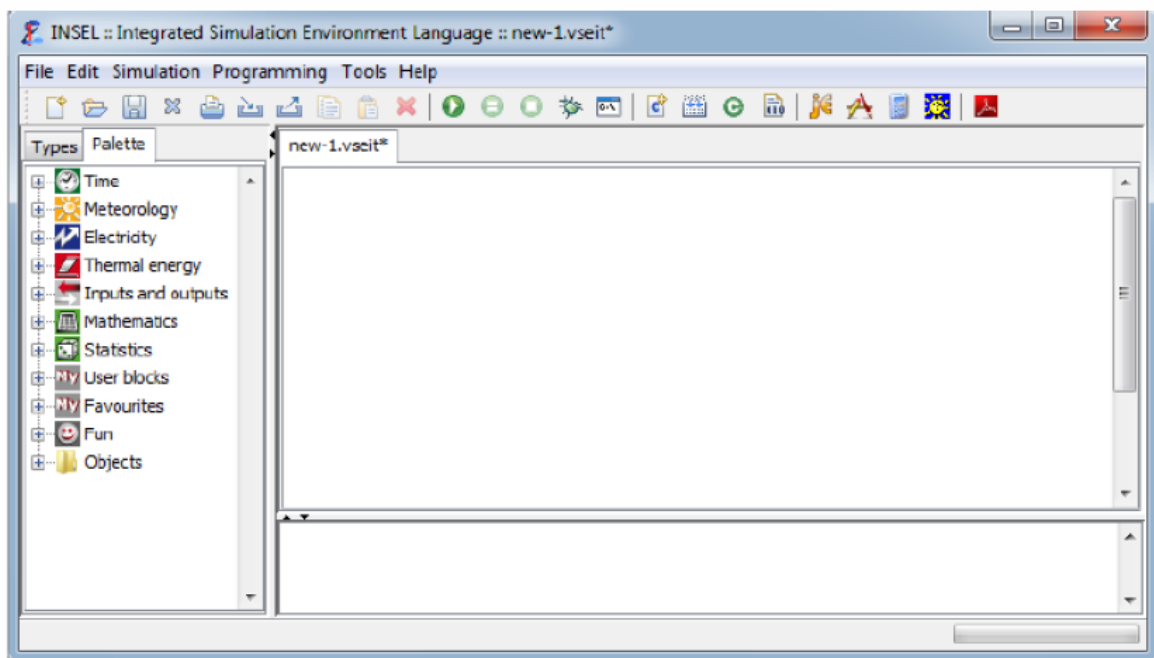


Figure 2.11: Espace de travail sous INSEL

## G- ARES

ARES (Autonomous Renewable Energy Systems) est un programme développé en 1995 et amélioré en 1997 à la faculté de génie à l'université de Cardiff au Royaume-Uni,

conçu pour la simulation de systèmes PV-éolien-batterie [88]. Le logiciel a deux versions : ARES-I et ARES-2 modifiées par Morgan et al [88].

ARES-I, composé de sous-programme dans l'ordre suivant : (1) les statistiques météorologiques, (2) la production de l'énergie photovoltaïque, (3) la production éolienne, (4) le calcul de la charge, (5) le courant de la charge et la source combinée (6) la tension de batterie, (7) l'action du contrôleur, et (8) la présentation des résultats. ARES-2 calcule la probabilité de pertes de charge et l'autonomie du système grâce à la prévision de la tension des batteries en ayant comme entrée le profil de la charge et les données météorologiques.

### **H- HybSim**

HybSim développé par Sandia National Laboratory, est un logiciel dédié pour l'analyse des coûts d'un système hybride comprenant de sources de production d'électricité utilisant des combustibles fossiles combinés à d'autres sources d'énergies renouvelables [89]. Cet outil nécessite un profil de charge détaillé, des caractéristiques de la batterie, les paramètres économiques de l'ensemble du système et les caractéristiques météorologiques.

HybSim utilise des données mesurées à des intervalles de temps de 15 minutes, ainsi il permet de comparer des coûts et d'évaluer des performances des différents composants du système hybride. La version1 (2005) de HybSim est disponible et en cours de développement [73].

### **I- IPSYS**

IPSYS (Integrated Power System) est un outil de modélisation et de simulation pour les systèmes installés dans les régions éloignées. Il simule des panneaux photovoltaïques, des éoliennes, des génératrices diesel, des batteries, des réservoirs hydrauliques et des piles à combustible. IPSYS utilise le langage C++ et aucune interface graphique n'est disponible actuellement, mais certains codes peuvent être utilisés pour analyser la sortie graphique [90, 91].

## **J- IGRHYSO**

IGRHYSO (Improved Grid-connected Renewable HYbrid Systems Optimization) [92] est la version améliorée du GRHYSO, qui est développé en C++. Ce logiciel est disponible uniquement en langue espagnole.

iGRHYSO simule et optimise les divers systèmes d'énergies renouvelables comme l'énergie photovoltaïque, l'éolien, la petite turbine hydraulique, et des systèmes de stockage, dont les batteries et l'hydrogène. Ce logiciel est connecté au site de la NASA [93] pour l'importation des données météorologiques comme les radiations solaires, les vitesses du vent, et les données de la température. Les effets de la température sur la production de l'énergie photovoltaïque et la production d'énergie éolienne peuvent être étudiés en utilisant ce logiciel.

## **K- Dymola**

Dymola est un outil de modélisation et de simulation développé par DASSAULT SYSTÈMES en 2006 en Suède, capable de simuler le comportement dynamique et les interactions complexes entre les systèmes de multiples domaines d'ingénierie : mécanique, électrique, thermodynamique, hydraulique, pneumatique et les systèmes de commande [94]. Ainsi, il est capable d'effectuer la modélisation des systèmes hybrides tel que les PV, les éoliennes, les génératrices diesel, les piles à combustible et les batteries. Cependant, le statut de ce logiciel reste, actuellement, inconnu [73].

La figure 2.12 suivante montre l'espace de travail sous Dymola.

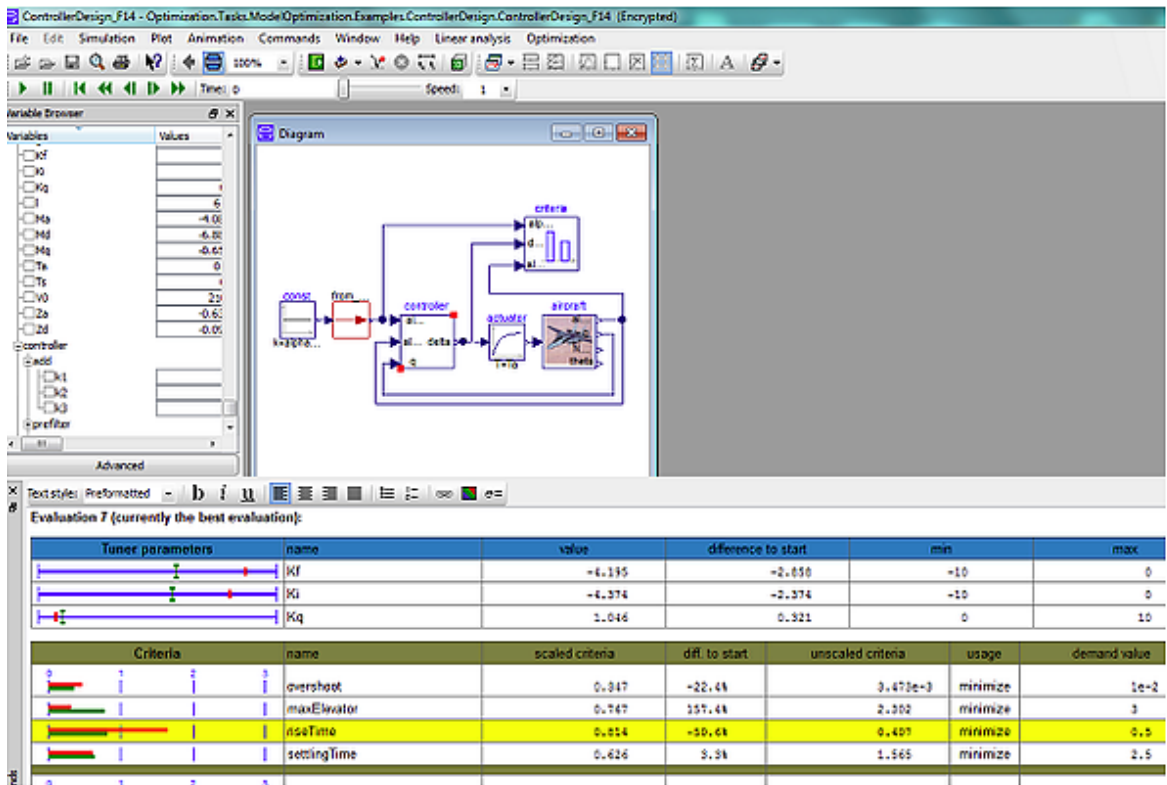


Figure 2.12: Espace de travail sous Dymola [95]

## L- AEOLUS

AEOLUS est un outil de simulation de répartition de puissance développé par l'Institut de la production industrielle à l'Université de Karlsruhe en Allemagne [78]. À ce jour, une seule version de l'outil a été créée. L'outil lui-même n'est pas vendu à des utilisateurs externes. Un acheteur peut payer pour l'achèvement d'une étude, avec des prix disponibles sur demande pour un projet défini. L'objectif principal d'AEOLUS consiste à analyser l'impact de l'augmentation du taux de pénétration en énergies fluctuantes tel que l'énergie éolienne et l'énergie solaire. L'analyse est effectuée en utilisant un pas de temps de 15 minutes sur une période maximale de 1 an.

L'outil simule le secteur de l'électricité pour toutes les technologies de génération d'électricité à partir des centrales thermiques, géothermiques ou d'énergies renouvelables. En outre, le stockage de l'énergie par pompage (centrale hydroélectrique) et par air comprimé peut être simulé. AEOLUS a été utilisé en conjonction avec l'outil de simulation PERSEUS-CERT pour analyser les effets d'intégration de l'énergie éolienne à grande échelle [78], et il a également été utilisé pour analyser le potentiel futur des énergies renouvelables dans l'Union européenne (UE) [96].

### **M- RAMSES**

RAMSES est un outil de simulation, développé par l'Agence danoise d'énergie, pour certains domaines de l'ingénierie comme la production de l'électricité et le chauffage urbain, [97]. Six versions majeures ont été mises au point et elles ne sont pas vendues à des utilisateurs externes, même si l'outil a déjà été utilisé dans le cadre des projets de recherche [98].

L'utilisation du RAMSES permet d'effectuer des simulations sur un horizon temporel de 30 ans avec un pas de temps défini par l'utilisateur : les pas de temps sont 1, 4, 6, 8, 12, et 24 heures. RAMSES est principalement utilisé pour analyser les systèmes hors réseaux. En conséquence, les résultats d'analyse sont la consommation d'énergie primaire, la pénétration en énergies renouvelables, les émissions de CO<sub>2</sub>, etc. Cet outil permet d'étudier différents systèmes et technologies tels que les technologies de génération thermiques, l'éolien, les pompes hydro, le photovoltaïque, la géothermie, la chaleur, le stockage de l'énergie hydroélectrique, le stockage de l'air comprimé, et le stockage de la batterie.

Pour mener à bien la simulation, RAMSES utilise une base de données centrale contenant des informations sur la consommation d'énergie électrique, la consommation de

chauffage urbain, le prix du carburant, les propriétés du carburant, la capacité d'échange, les impôts, les subventions, les coûts environnementaux, etc.

RAMSES a été utilisé au Danemark depuis les années 90 dans plusieurs projets servant à élaborer la politique énergétique, ainsi que dans des nombreuses publications portant sur le système énergétique danois [99].

### **2.3.3 Outils de recherche**

Bien que les outils de simulation traditionnels puissent effectuer des analyses de sensibilité étendue, ils ne permettent généralement pas à l'utilisateur de modifier les algorithmes qui déterminent le comportement et les interactions des composants individuels. Pour cela, une architecture ouverte est nécessaire pour les outils de recherche : le logiciel doit contenir une liste de section décrivant les composants, et une plate-forme pour relier ces sections ensemble. Ainsi, l'utilisateur est libre de modifier les paramètres et les sections ou d'en ajouter entièrement des nouvelles. Ces outils de recherche peuvent être soit mis en œuvre dans un environnement de simulation à usage général disponible dans la commerce, ou programmés et compilés dans un langage tel que Fortran, C ou Pascal. Cependant, le résultat est généralement un outil de dimensionnement ou de simulation traditionnelle.

Dans ce type d'outil, on peut trouver plusieurs logiciels cités précédemment comme Matlab/Simulink et TRANSYS qui font partie à la fois des outils de simulation et de recherche ainsi qu'un autre logiciel BALMORAL détaillé ci-dessous.

#### **2.3.3.1 Exemples des outils de recherche**

##### **A- BALMORAL**

BALMORAL est un outil conçu pour le secteur d'électricité et de la cogénération. Il a été développé et distribué sous deux sources depuis 2000, et peut être librement



téléchargé sur Internet [100]. L'outil est formulé en utilisant le langage de modélisation GAMS (General Algebraic Modeling System) [101] et environ 10 versions différentes ont été créées. De plus, ce logiciel fournit 100% des documents au niveau des codes, où tout utilisateur peut modifier l'outil en fonction des exigences spécifiques pour une application donnée. Le modèle formulé est résolu dans le logiciel standard de sorte qu'aucun nouveau code d'optimisation ne doit être écrit.

Pour exécuter une analyse utilisant BALMORAL, les données d'entrée et les résultats de calcul sont générés par rapport à une subdivision géographique et les aspects temporels sont traités avec des subdivisions de temps pour chaque année. BALMORAL peut simuler le secteur de l'électricité et une partie du secteur de la chaleur (chauffage urbain), mais pas le secteur de transport (technologies de transport ne sont pas représentées en tant que norme) même si certains projets [101] ont mis au point des modèles dans ce secteur.

Les différents types d'unités comprennent l'électricité, le chauffage urbain, la cogénération, le stockage de chaleur à court terme, l'énergie hydroélectrique, l'énergie éolienne et le solaire. Le stockage d'électricité peut aussi être représenté par le stockage d'hydrogène ou le stockage hydroélectrique.

BALMORAL a été utilisé dans plusieurs études effectuées au Danemark [97, 102, 103], Norvège [104], l'Estonie [104], la Lituanie [97], en Allemagne [105], et d'autres pays en dehors de l'Europe [97]. Il a été utilisé pour analyser la sécurité de l'approvisionnement en électricité [106, 107], le rôle de la réponse à la demande [102], le développement de l'énergie éolienne [103, 107], le rôle du gaz naturel [97], et le stockage de l'énergie par air comprimé [108]. De plus, il a été utilisé dans l'étude sur l'expansion du chauffage urbain à Copenhague [97] et l'expansion de la transmission de l'électricité [105]. Aussi, il a été utilisé dans l'analyse du développement des marchés internationaux pour les certificats verts et l'évaluation de la politique environnementale au Danemark [97].

### **2.3.4 Outils de conception des mini-réseaux**

Afin d'aider à la conception du réseau de distribution électrique des micros réseaux, des outils spécialisés sont disponibles qui permettent par exemple au concepteur de déterminer si un système d'électrification solaire autonome ou une connexion au système PV centralisé est la solution la plus rentable économiquement pour une seule maison dans un village. Les outils de conception des mini-réseaux d'un système de distribution sont orientés vers les applications autonomes, peuvent également être utilisés que si elles ont la capacité de modéliser des sources de production multiples au sein du réseau de distribution.

#### **2.3.4.1 Exemples des outils de conception Mini réseaux**

##### **A- HYBRIDS**

HYBRIDS est une feuille de calcul sous Microsoft Excel commercialement disponible. C'est un outil de conception produit par Maisons Solaris, qui permet l'évaluation du système d'énergie renouvelable [109]. Ce logiciel nécessite une charge moyenne quotidienne et des données environnementales estimées pour chaque mois de l'année. Dans tout cas, il ne peut simuler qu'une configuration à la fois, et il n'est pas conçu pour fournir une configuration optimisée.

##### **B- Hybrid Designer**

Hybrid Designer [110] a été développé par le centre de recherche sur l'énergie et le développement (EDRC) de l'Université de Cap ville en Afrique du Sud et il a été financé par le ministère de l'Environnement de l'Afrique du Sud. Cet outil est principalement utilisé pour des applications hors réseau en Afrique. C'est un logiciel convivial basé sur un algorithme génétique qui peut évaluer des différentes configurations avec un coût minimum. Hybrid Designer permet de simuler des différentes sources tels que le

photovoltaïque, l'éolien, les batteries et le générateur diesel. Il offre une solution complète avec les aspects techniques et les coûts du cycle de vie.

La figure 2.13 suivante montre l'espace de travail sous Hybrid Designer.

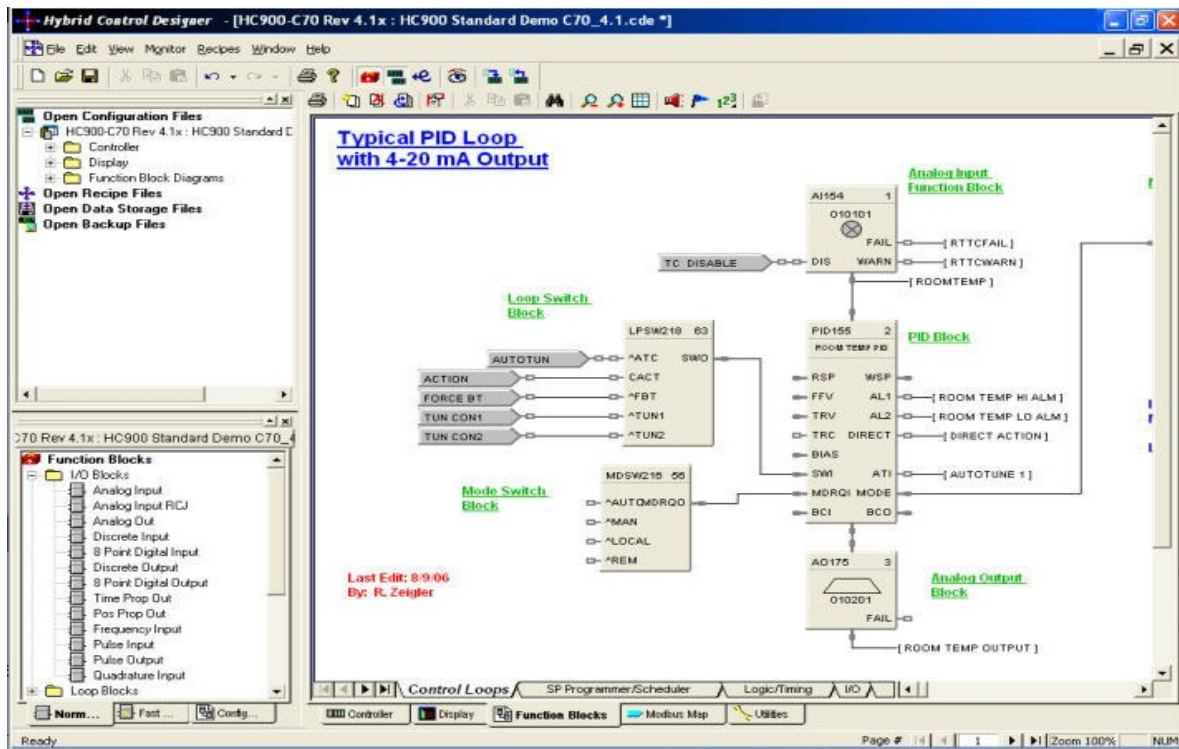


Figure 2.13: Espace de travail sous Hybrid Designer

### C- EnergyPLAN

EnergyPLAN a été développé et étendu depuis 1999 à l'Université d'Aalborg, au Danemark [111]. La version actuelle peut être téléchargée gratuitement [112] tandis que la période de formation requise peut prendre quelques jours à un mois, selon le niveau de la complexité nécessaire. EnergyPLAN est un outil convivial conçu sous une série des feuilles et programmé en Delphi Pascal. Le but principal de l'outil est la conception de la stratégie

de la planification nationale ou régionale de l'énergie en simulant l'ensemble du système énergétique de chaleur et d'électricité ainsi que le secteur de transport et de l'industrie.

L'énergie thermique et renouvelable, le stockage et la conversion, le transport et les coûts peuvent être modélisés par EnergyPLAN. C'est un outil déterministe d'entrée / sortie, où les entrées générales sont les exigences d'utilisateur, les sources d'énergies renouvelables, les différentes stratégies de régulation pour l'importation / exportation, et la production de l'électricité excédentaire. Les sorties sont les bilans énergétiques et les productions annuelles, la consommation de carburant, l'import / export de l'électricité, et le coût total.

Dans la programmation, toutes les procédures qui augmenteraient le temps de calcul ont été évitées, et le calcul pour un an ne nécessite que quelques secondes sur un ordinateur normal. Enfin, EnergyPLAN optimise le fonctionnement d'un système donné, par opposition à des outils qui optimisent les investissements dans le système.

Auparavant, EnergyPLAN a été utilisée pour analyser l'intégration de l'énergie éolienne à grande échelle [113], ainsi que des combinaisons optimales des sources d'énergies renouvelables [114], la gestion des surplus d'électricité [115], l'intégration de l'énergie éolienne [116], la mise en œuvre de la petite cogénération [117], les stratégies de développement des énergies renouvelables [99] et l'utilisation des déchets pour la production d'énergie [118]. Aussi, il était utilisé pour démontrer l'effet de stockage de l'énergie [119, 120], [121], spécifiquement le stockage d'énergie par air comprimé [122] et le stockage de l'énergie thermique [111, 113, 123] sur les systèmes futurs de production et distribution de l'électricité. EnergyPLAN a été, également, utilisé pour analyser le potentiel de la cogénération et les énergies renouvelables en Estonie, l'Allemagne, la Pologne, l'Espagne et le Royaume-Uni [97]. Un aperçu global du travail effectué à l'aide d'EnergyPLAN est disponible dans [124]. Enfin, EnergyPLAN a été utilisé pour simuler un

système à la base des énergies renouvelables à 100% pour l'île de Mljet en Croatie [125] ainsi qu'en Irlande et au Danemark [126].

La figure 2.14 suivante montre l'espace de travail sous EnergyPLAN.

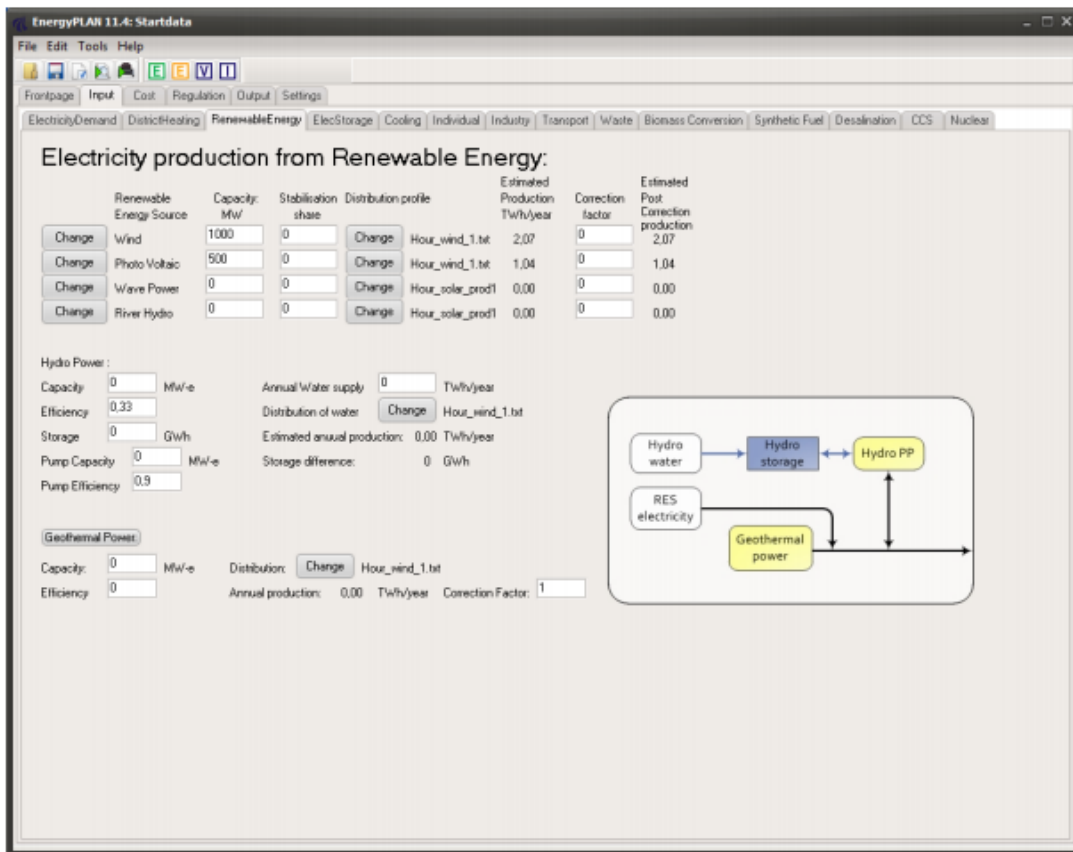


Figure 2.14: Espace de travail sous EnergyPLAN [112]

## D- HySim

HySim est un outil de simulation développé par Sandia National Laboratory [127] en 1987 dans l'objectif d'analyser des systèmes hybrides, des PV, des générateurs diesel et des batteries assurant une bonne fiabilité et qualité d'électricité fournie.

HySim porte sur l'analyse financière, y compris le cycle de vie, le carburant, le coût moyen actualisé de l'énergie, et les coûts d'exploitation et de la maintenance. De plus il permet la comparaison des coûts entre les différentes configurations. HySim n'a pas été utilisée depuis 1996.

La figure 2.15 suivante montre l'espace de travail sous HySim.

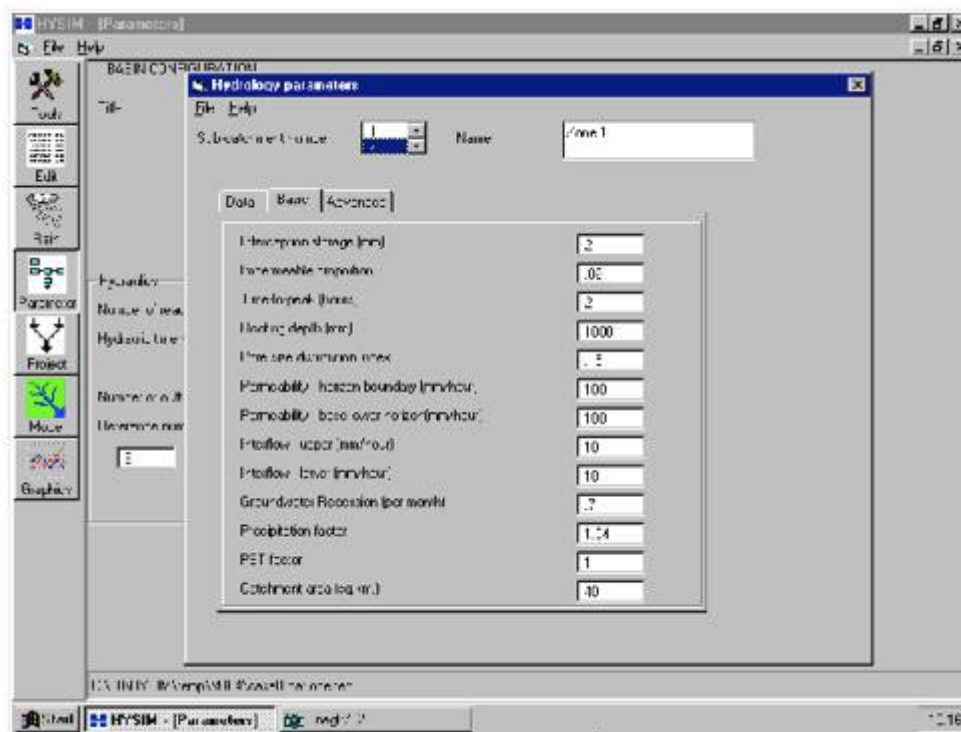


Figure 2.15: Espace de travail sous HySim [127]

## 2.4 CRITERES DE CHOIX DU LOGICIEL

Il est intéressant de pouvoir analyser et simuler des différents systèmes de production d'énergie à l'aide d'un seul logiciel. Néanmoins, peu de logiciels traitent à la fois des différents types d'énergie, des modèles des systèmes (électrique, mécanique...), des études de modélisation (dynamique, statistique...), de la conception et de la simulation.

Cependant, le choix du logiciel répondant le mieux aux objectifs déjà mentionnés est sujet à des critères et à des contraintes de fonctionnement qui doivent être pris en considération pour garantir un environnement simple et optimal du système.

Alors, l'analyse approfondie des certains logiciels a mené à l'identification des critères de choix suivants :

#### **2.4.1 Nature de l'étude**

Souvent on choisit le logiciel correspondant en fixant l'objectif de l'étude : économique, dimensionnelle ou une étude de modélisation et de simulation d'un système. Il est souvent réputé qu'on commence toujours par une analyse économique du coût de projet et de dimensionnement de la centrale électrique où l'utilisation de Homer et RETScreen sont les plus répandus dans cette section. Ainsi, une étude de modélisation est particulièrement importante pour la conception des systèmes hybrides suivie d'une simulation de comportement dynamique du système. Pour cela, l'environnement Matlab/Simulink est le plus répandu, étant donné la panoplie d'outils de simulation et des modèles disponibles dans sa librairie.

#### **2.4.2 Système hors réseaux**

Des systèmes peuvent comprendre plusieurs sources d'énergie (Diesel, éolien, PV) et des systèmes de stockage (batterie, air comprimé, hydrogène...). Vu le contexte du présent projet, le logiciel doit supporter au minimum la simulation pour la production des systèmes hybrides suivants : soit éolien-diesel, PV-diesel et éolien-PV-diesel avec des systèmes de stockage d'air comprimé ou des bancs des batteries, etc. Donc, il doit contenir un ensemble de bibliothèques qui peuvent être adaptées ou enrichies aux besoins du concepteur pour les systèmes susceptibles de se retrouver dans les réseaux autonomes.

### 2.4.3 Type de modèles

Les modèles qui doivent être implantés dans les logiciels sont basés généralement sur des diagrammes blocs, se composant de blocs et des connexions. Ainsi, essentiellement la librairie du logiciel doit avoir au minimum des générateurs de signaux, des composants de connexion entre les sources et des observateurs des signaux (gain, multiplexeur, etc.).

### 2.4.4 Échelle de temps

Dans le domaine de la simulation, aucun outil ne peut répondre simultanément à tous les besoins. On peut raisonnablement diviser en trois groupes les différents outils de simulation développés à ce jour, tenant compte du pas de temps. Premièrement, il y a les outils de simulation en régime transitoire (simulations dans le domaine du temps, sans contrainte sur la durée de simulation), par exemple la boîte à outil SimPower Systems de Matlab/Simulink, etc. Deuxièmement, il y a des logiciels en temps réel (régime temporel synchronisé en temps réel avec des entrées/sorties externes et en général avec des systèmes physiques externes) comme Matlab, HyperSim, TRNSYS, etc. Ces simulateurs destinés à étudier les régimes transitoires servent surtout à vérifier le comportement du nouvel équipement que l'on veut connecter au réseau. Troisièmement, il y a les logiciels d'analyse du réseau dans le régime fréquentiel, qui permettent le plus souvent d'effectuer des calculs d'écoulements de puissance, par exemple Hybrids, etc.

Afin de tester et vérifier les performances des modèles, des simulations hybrides en temps réel sont souhaitées. C'est pour cette raison, le logiciel qui sera choisi doit être capable de simuler le comportement du système en temps réel.

La simulation numérique en temps réel est une technique quasi expérimentale, qui permet de relever les contraintes critiques de l'ensemble des modèles et de suivre en temps réel les consignes et les grandeurs continues pendant les différentes phases. Les



avantages d'une simulation en temps réel sont : (1) le faible coût; (2) la maîtrise et le contrôle des différents paramètres du système ; (3) la prédiction des problèmes qui peuvent survenir lors du fonctionnement réel du système en vue d'éviter le danger, etc.

#### **2.4.5 Performances du système (rapidité, stabilité, erreur)**

**Rapidité** : Le temps de réponse et la rapidité de l'exécution des commandes ou des simulations sont deux critères indispensables pour le choix du logiciel et l'optimisation du système. Le temps de simulation doit être très rapide pour avoir le comportement le plus proche possible du système réel, réduisant ainsi le temps de développement du modèle (construction, modification, utilisation). Souvent le problème de rapidité est fortement lié au temps de calcul d'état atteignables pour les équations différentielles soumises à des perturbations.

**Stabilité** : C'est toujours un avantage de pouvoir agir sur le logiciel pour modifier le pas du temps afin de limiter le pas du temps sans trop affecter la stabilité du système et modèle simulé. Peu des logiciels permettent cette modification.

**Erreur** : La valeur d'erreur du logiciel est un critère mis en jeu pour la précision du modèle. C'est l'un des facteurs que peu des logiciels permettent sa correction.

#### **2.4.6 Manipulation des données**

Ce critère se traduit par la capacité de : (1) modifier des données déjà préétablies dans le logiciel et des modèles qu'un logiciel peut exécuter (matricielle ,numériques, fichier texte...), (2) pouvoir comprendre des fichiers externes ainsi changer les variables d'entrées du système à tout temps , (3) manipuler la quantité des données à rentrer sans affecter la performance du système, (4) simuler en parallèle plusieurs configurations , (6) changer des paramètres en cours de simulation, (5) déboguer des simulations en cours d'exécution dans l'objectif d'agir sur le système et d'observer le changement d'état du système. En plus, offrir la possibilité de changer le pas du temps et

d'analyser la réponse du système à plusieurs intervalles du temps, permettra de corriger des problèmes transitoires éventuels. Cette intervention permet de limiter l'intervalle du temps dans lequel le système est le plus stable et précis. Il est avantageux aussi qu'un logiciel permette d'effectuer une comparaison des résultats numériques par rapport à des résultats graphiques.

#### **2.4.7 Documentation disponible**

Bien entendu, la disponibilité de la documentation en ligne, et l'accessibilité à un tutoriel et à l'aide du logiciel sont primordiales. D'une part, le tutoriel permet à l'utilisateur de manipuler le logiciel sans aucune formation préalable. D'autre part, l'aide du logiciel quant à elle, permet d'obtenir des précisions sur les différentes données à fournir et sur le fonctionnement global du logiciel. Il est toutefois souhaité qu'un outil offre la possibilité d'un retour d'avis et d'envoi des commentaires pour le support technique ou de préserver une assistance par internet ou encore de consacrer des fichiers d'exemples.

#### **2.4.8 Principe de modélisation (déterministe ou probabiliste)**

La méthode déterministe consiste à tester la sécurité statique du système dans des situations spécifiques (par exemple : charge minimale/puissance éolienne maximale et charge maximale/puissance éolienne minimale). Or, l'approche probabiliste consiste à simuler le système sur une période donnée et à évaluer le risque de défaillance.

#### **2.4.9 Stratégies d'opérations**

Même s'il existe une stratégie d'opération optimale pour l'architecture choisie, au moins une autre stratégie doit être disponible pour la mise en œuvre à tout moment. L'opérateur doit être capable de changer et de modifier la stratégie d'opération pendant l'exploitation selon les disponibilités des ressources et le niveau de pénétration désiré.

#### **2.4.10 Coût du logiciel**

Souvent le coût du logiciel joue un rôle très important dans le coût global d'un projet. Ainsi, on peut trouver des logiciels gratuits, comme on peut trouver d'autres qui sont payants. Le coût d'achat d'un logiciel dépend du type de la licence demandée, avec des licences éducatives (pour usage exclusif de la recherche et de la formation), ou des licences plus commerciales, qui peuvent être utilisées dans tous les projets. Parfois, il faut ajouter au prix du logiciel le coût de sa maintenance, le coût du support, des mises à jour et de la qualité qui est souvent très utile pour améliorer les performances de processus. Il existe aussi d'autres logiciels qui sont développés à l'interne (laboratoire de recherche, entreprise. etc.), et qui ne sont pas commercialisés, à l'exception d'une certaine entente avec des prix disponibles sur demande pour un projet défini.

#### **2.5 SYNTHÈSE SUR LES LOGICIELS ET LE CHOIX DE L'ENVIRONNEMENT DE SIMULATION**

Les deux tableaux ci-après (2.1 et 2.2) font la synthèse des logiciels présentés précédemment et qui se distinguent par rapport à leur structure, leur fonctionnement, les applications envisagées et les composants qui peuvent intégrer. Dans le premier tableau, la synthèse des outils est faite en se basant sur les critères définis dans le paragraphe précédent. Pour ce qui est du tableau 2, son élaboration est faite afin de répondre parfaitement aux objectifs de la présente étude visant à bien déterminer l'outil approprié pour la modélisation dynamique de SHEDAC. Il était indispensable de comparer les logiciels par rapport aux sources d'énergie (PV, éolien, diesel) et les systèmes de stockage (batterie, air comprimé) qu'ils peuvent intégrer, ainsi que la nature de l'étude (économique, dimensionnement ou modélisation et simulation).



<b>Dymola</b>	En partie	En partie	En partie	ϕ	ϕ	x	ϕ	En partie	ϕ	ϕ
<b>Aeolus</b>	Limité	En partie	En partie	-	-	-	Limité	Limité	-	Interne
<b>RAMSES</b>	En partie	En partie	En partie	-	x	x	x	En partie	-	Interne
<b>Balmoral</b>	En partie	En partie	En partie	x	x	x	x	En partie	x	Gratuit
<b>Hybrids</b>	En partie	En partie	Limité	-	-	Limité	-	En partie	-	ϕ
<b>Hybrid Designer</b>	En partie	En partie	En partie	Limité	ϕ	ϕ	ϕ	En partie	x	Gratuit
<b>Energy Plan</b>	En partie	En partie	En partie	x	x	-	x	En partie	En partie	Gratuit
<b>HySim</b>	Limité	En partie	En partie	ϕ	ϕ	x	x	En partie	-	Gratuit

**Légende du tableau :**

Gratuit : le logiciel est disponible gratuitement

En partie : le logiciel satisfait à ce critère partiellement

Limité : le critère dans ce logiciel est très limité

ϕ : le statut du logiciel est inconnu par rapport à ce critère

x : le logiciel satisfait complètement à ce critère

- : Absence totale du critère

Tableau 2.2 : Comparaison des structures des logiciels

	Nature de l'étude			Système hors réseaux			Stockage	
	Économique	Dimensionnement	Modélisation & Simulation	Éolien	PV	Diesel	Batterie	Air comprimé
Homer	X	X	X	X	X	X	X	-
Retscreen	X	-	-	X	X	X	X	-
Hybrid2	X	-	X	X	X	X	X	-
iHOGA	-	-	X	-	X	X	X	-
HySys	-	X	-	X	X	X	-	-
SHEDAC1	-	X	-	X	X	X	X	X
MATLAB	-	X	X	X	X	X	X	X
TRANSYS	X	-	X	X	X	X	X	-
RAPSIM	X	-	X	X	X	X	X	-
SOMES	X	-	X	X	X	-	X	-
SOLSIM	-	-	X	X	X	X	X	-
INSEL	-	-	X	X	X	X	X	-
ARES	X	-	-	X	X	X	X	-
Hybsim	-	-	X	-	X	X	X	-
IPSys	X	-	X	X	X	X	X	-
IGRHYSO	-	-	X	X	X	-	X	-
Dymola	-	-	X	X	X	-	X	-
Aeolus	X	-	X	X	X	-	-	X

<b>RAMSES</b>	X	-	X	X	-	X	X	X
<b>Balmoral</b>	X	-	-	X	X	-	-	X
<b>Hybrids</b>	X	X	-	-	X	-	X	-
<b>Hybrid Designer</b>	X	-	-	X	X	X	X	-
<b>Energy Plan</b>	X	-	X	-	X	X	-	X
<b>HySim</b>	X	-	-	-	X	X	X	-

À partir de l'analyse des deux tableaux 2.1 et 2.2, une attention particulière a été attribuée à la capacité d'interconnectivité avec l'environnement Matlab/Simulink, étant donné qu'il offre des performances plus intéressantes que les autres logiciels à plusieurs égards. En effet, il permet d'intégrer tous les modèles des composants (PV, éolienne, Diesel, batterie, système d'air comprimé, etc.) et il permet entre autres la conception, la modélisation et l'optimisation des systèmes hybrides. Aussi, grâce à sa flexibilité, il permet de manipuler les entrées des systèmes et de modifier les algorithmes des commandes déjà prédéfinies dans sa librairie. De plus, Simulink fournit des solveurs pour soutenir la simulation d'une large gamme des systèmes, y compris le temps de simulation en temps continu (analogique), en temps discret (numérique), ou hybride (signal mixte).

D'un autre côté, les logiciels Homer, RETScreen, Hybrid2 et iHOGA représentent des outils efficaces pouvant aider à la décision sur le bien-fondé d'un projet grâce à l'analyse économique qu'ils permettent de faire. Entre les deux se trouvent les autres logiciels, qui servent à simuler et dimensionner des systèmes.

Évidemment, certains logiciels sont très performants et ayant participé à plusieurs projets, mais reste l'accès à l'outil est très limité.

## 2.6 CONCLUSION

Cette réflexion sur l'ensemble des logiciels destinés pour la modélisation des systèmes hybrides a permis de prendre une décision éclairée sur les méthodes et les outils pourront être sélectionnés dans la conception de l'outil de simulation d'un système d'énergie hybride éolien-diesel avec stockage par air comprimé. Les capacités des différents logiciels sont également soulignées, les limites et les zones de plus amples recherches ont également été identifiées.

Cette recherche, qui a mené à l'évaluation de produits complémentaires supportant l'approche en question, a finalement permis de sélectionner l'outil Matlab/Simulink comme environnement de développement et de modélisation du simulateur de SHEDAC répondant le mieux aux objectifs identifiés. Il faut souligner que les résultats de la simulation fonction non seulement des algorithmes de calcul du programme concerné, mais également dans une large mesure de la qualité des données d'entrée. Cette dernière dépend beaucoup de la connaissance technique et de l'expérience de l'utilisateur avec l'outil adapté. Ainsi, après avoir choisir l'environnement de développement de l'outil de SHEDAC, ce dernier fera l'objet du chapitre suivant où toutes les fonctionnalités et l'architecture de l'outil seront présentés.



## CHAPITRE 3

### COMPOSANTS DU SHEDAC ET PRESENTATION DU SIMULATEUR

#### 3.1 Introduction

Dans le cadre du présent projet, le développement d'un outil de simulation et de dimensionnement d'un système hybride éolien-diesel avec stockage par air comprimé (SHEDAC), constitue une phase importante et indispensable dans le contrôle et l'analyse du comportement d'un tel système, avant de passer au processus de la conception ou même de validation expérimentale.

Dans ce chapitre, on présente un logiciel de simulation pour un système SHEDAC développé sous l'environnement Matlab/Simulink®. Ce logiciel dispose d'une interface graphique, qui offre à l'utilisateur des simulations simples et conviviales. Ainsi, cet outil permettra de dimensionner les composants, d'étudier en temps réel le comportement des composants en mode hybride ou individuellement. De plus, il permet de définir de façon optimale les opérations de régulation et de contrôle des sous-systèmes. Dans les sections qui suivent, seront présentés l'architecture générale de cet outil, y compris les informations relatives aux infrastructures, composants, convertisseurs de puissance, ainsi qu'une présentation des interfaces dégageant les différentes fonctionnalités du logiciel. Par la suite, chacun des blocs des composants du simulateur, sera présenté et détaillé séparément.

#### 3.2 Architecture générale de l'outil

Le schéma ci-dessous (figure 3.1) montre l'architecture générale de l'outil et les étapes d'élaboration de l'outil.

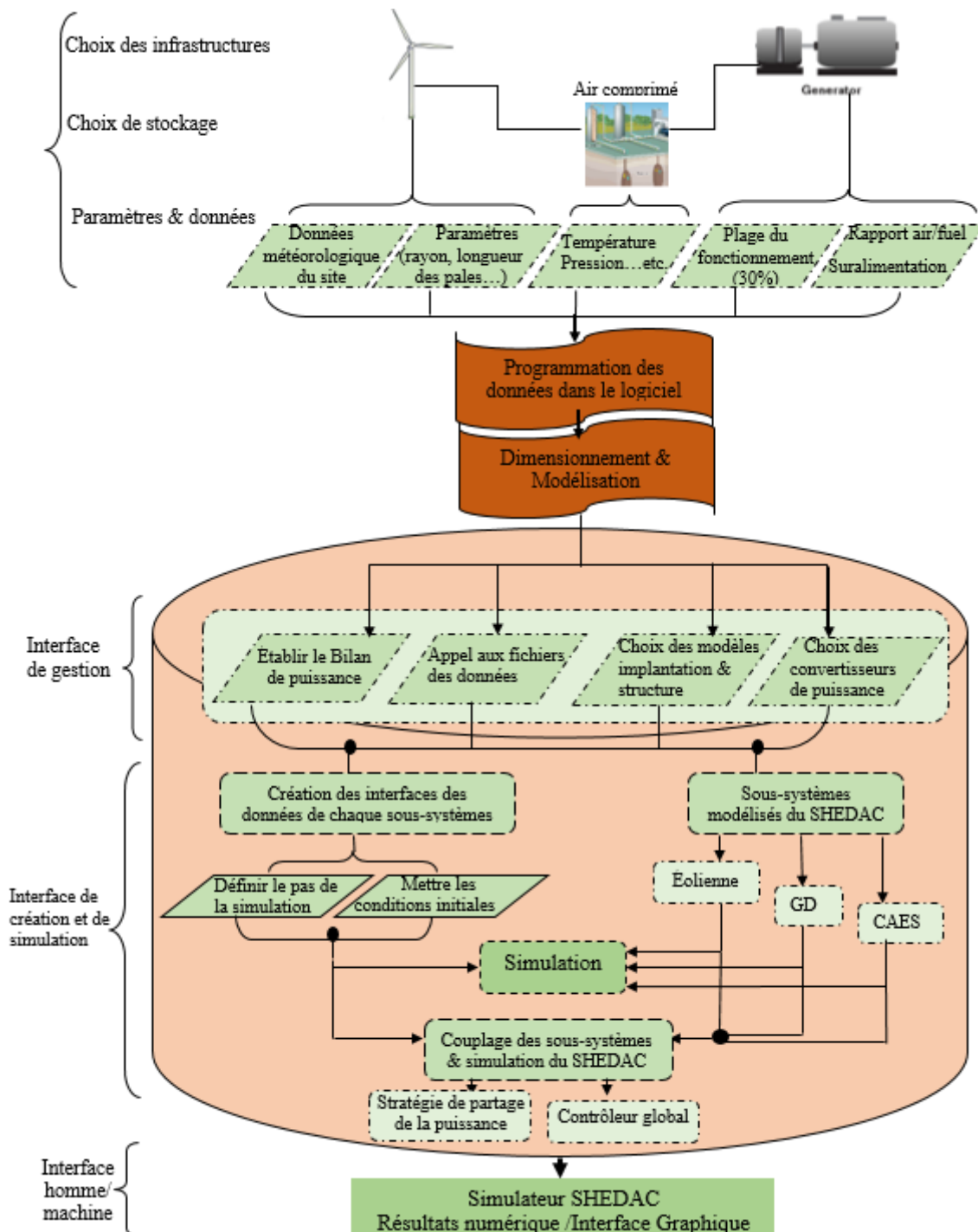


Figure 3.1 : Architecture du logiciel SHEDAC

### 3.2.1 Choix des composants du système

Le système hybride représentant l'objet de cette étude est de type éolien-diesel avec stockage par air comprimé. En plus des sources de production d'énergie, plusieurs éléments y sont utilisés, des charges principales linéaires et non linéaires, des charges secondaires, des convertisseurs de puissance et des dispositifs de contrôle. Toutefois, l'utilisateur peut intégrer d'autres sources d'énergie et de stockage comme le PV et les batteries. Dans les sections qui suivent, les systèmes utilisés seront présentés brièvement. D'autres détails concernant ces systèmes seront présentés dans le chapitre 4.

**Éolienne** : C'est une machine capable de convertir l'énergie cinétique disponible dans le vent en énergie électrique. La chaîne de conversion d'énergie est constituée de deux systèmes : (1) mécanique, qui permet la captation du vent et est constitué des pales, du rotor et d'un système d'entraînement mécanique ; (2) électrique qui permet la conversion de l'énergie mécanique de rotation en électricité via une génératrice électrique. Dans cette étude, nous travaillerons sur une éolienne tripale de type Berguey Excel de 10kW (voir Annexe D), reliée par transmission directe à une génératrice synchrone à aimant permanent (GSAP). L'éolienne est reliée au bus AC (bus de couplage des composants) par une interface de puissance (AC/DC/AC).

**Génératrice diesel** : La GD délivre l'énergie électrique au réseau avec une tension et une fréquence respectant les niveaux désirés en termes de la qualité de l'onde. Un gouverneur contrôle le flux de combustible injecté dans le moteur, pour assurer le fonctionnement de ce dernier dans la plage de vitesses nécessaires et pour pouvoir produire du courant alternatif avec la fréquence compatible avec le réseau. La GD utilisée, est de la compagnie CVT Corp d'une puissance de 50kW, composée d'un moteur diesel, d'un système de transmission variable (CVT en anglais) et d'une génératrice synchrone à rotor bobiné.

**Système d'air comprimé :** le système de stockage d'énergie principalement adopté pour le système faisant l'objet de la présente étude est le stockage d'énergie sous forme d'air comprimé. L'énergie éolienne excédentaire disponible pendant les périodes de faibles charges ou de haute production sera utilisée pour comprimer de l'air frais, via un compresseur, pour le stocker ensuite dans des réservoirs spécifiques. Pendant les périodes de faible production d'énergie renouvelable, l'air comprimé, déjà stocké, sera alors restitué et injecté dans les moteurs thermiques de GD, pour les suralimenter davantage, augmentant ainsi leur rendement et diminuer leur consommation en carburant et les émissions des gaz à effet de serre. Le système d'air comprimé est composé de six composants : un moteur asynchrone à cage d'écureuil, un compresseur à air, un réservoir, un échangeur, une vanne et une interface de puissance.

**Système de contrôle :** Le système de contrôle permet la surveillance de plusieurs composants en même temps. Pour ce faire, plusieurs éléments du système doivent être commandés en même temps et fonctionner en synchronisme. D'autres composants peuvent avoir des systèmes de contrôle intégré. Le gouverneur de vitesse et le régulateur de tension du groupe diesel sont des exemples des systèmes de contrôle intégrés individuellement. Ces systèmes de contrôle doivent être tous connectés au système de commande global.

### 3.2.2 Paramètres et données

Une fois les systèmes sont choisis, il faut rentrer les données liées aux composants (éolien, GD...) dans l'environnement Matlab. La figure 3.2 montre la fenêtre "Editor", qui est un fichier de type script « Mfile » et l'espace alloué à rentrer toutes les données du système. Cette fenêtre permet d'écrire des équations, de saisir des données et des programmes sous forme des lignes de code et des boucles algébriques (qui peuvent même convertir et lire des fichiers externes : Excel ou CSV (contenant par exemple des données météorologiques...etc.). Une fois les données sont saisies et le fichier est

enregistré dans votre espace de travail (par exemple C :), il faut appuyer sur le Play (bouton vert) pour exécuter le fichier. Ensuite, les données seront stockées dans l'espace Workspace (espace de stockage de tous les paramètres utilisés dans Matlab) tel que présenté dans la figure 3.2. Ainsi, ces données seront couramment appelées dans l'environnement de simulation des composants.

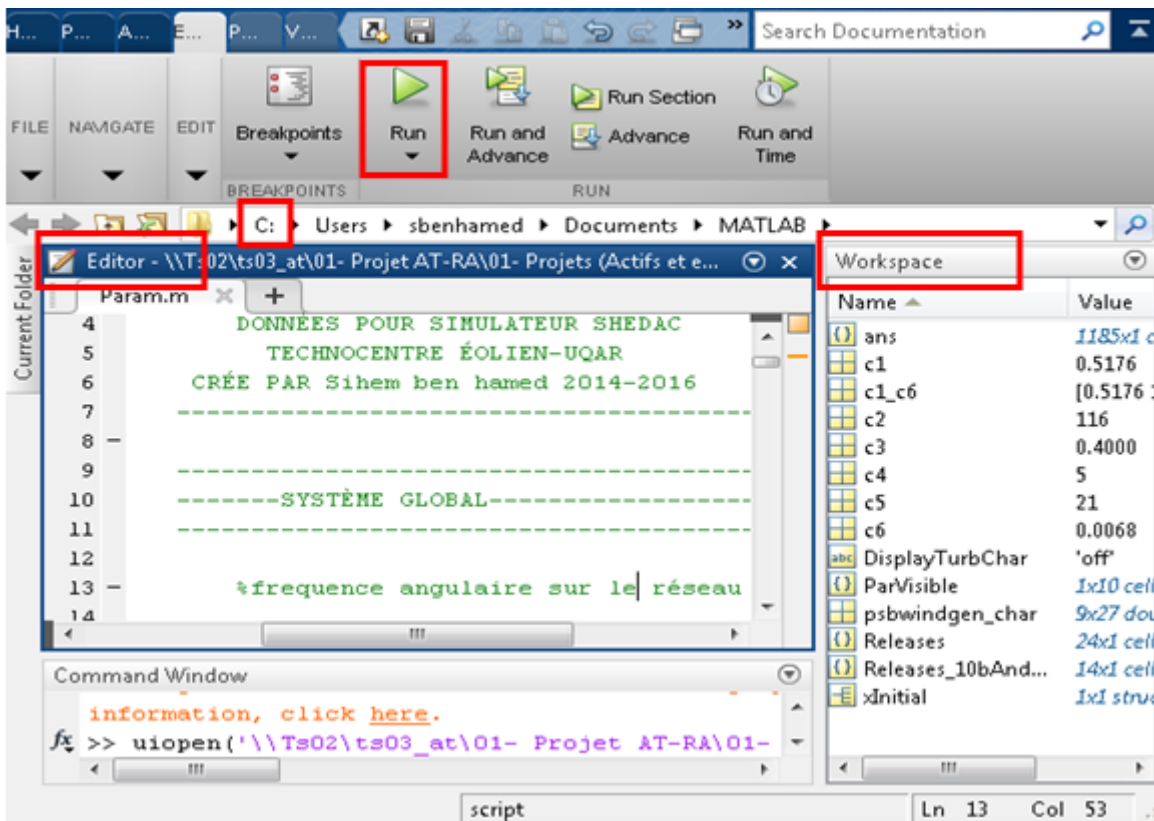


Figure 3.2 : Environnement de programmation des données liés au système /Matlab

### 3.2.3 Interface de gestion

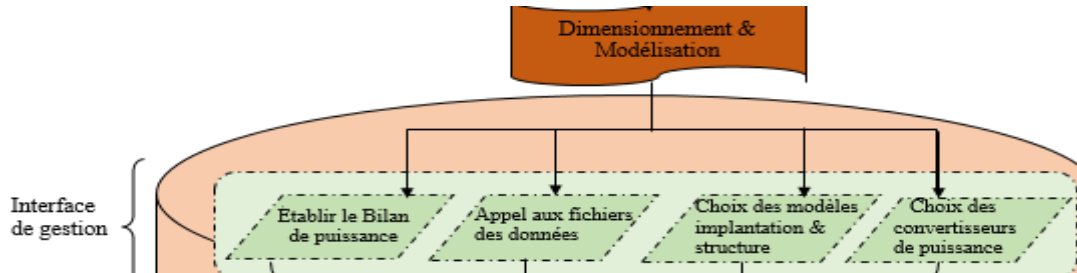


Figure 3.3 : Bloc faisant référence au dimensionnement et à la modélisation système

On commence ici par dimensionner les sous-systèmes (éolien, GD, air comprimé) et les systèmes de régulation et de contrôle. C'est possible de les dimensionner à partir des interfaces de l'utilisateur de chaque composant, qui sera développé dans la prochaine section. Ou aussi les systèmes peuvent être dimensionnés à partir d'un fichier script écrit sous forme des lignes de code, tel qu'elle montre la figure ci-dessous.

```

Editor - \\T:\02\ts\03_at\01- Projets AT-RA\01- Projets (Actifs et en développement)\Projet_0220_FQRNT-Mines\Projet Sise...
Param.m
39 %-----DIESEL CVT-----
40 C_CVT = 0.009; %cylindree du moteur (m^3)
41 T_CVT = 274+30; %Température à l'entrée du diesel (K)
42 a_CVT = 7.2e-2;
43 b_CVT = 1.8e-2;
44 c_CVT = -1.7e-4;
45 Tc_CVT = 1; % cte de temps de la dynamique d'admission de carburant
46 %paramètres pour la transmission de puissance - génératrice diesel CVT CORP
47 Jd_CVT = 0.1; % inertie diesel + partie de CVT
48 Bd_CVT = 0; % amortissement (friction) diesel + partie de CVT
49 Jg_CVT = 0.1; % inertie generatrice + partie de CVT
50 Bg_CVT = 0; % amortissement (friction) generatrice + partie de CVT
51 RappSup_CVT = 1000; %borne superieure CVT
52 RappInf_CVT = 0; %borne inferieure CVT
53 %paramètres machine synchrone rotor bobiné
54 Rs_CVT = 4.97;
55 Lsq_CVT = 0.065;
56 Lsd_CVT = 0.1;
57 Lprd_CVT = 0.005;
58 Lrrd_CVT = 0.1;
59 Rrd_CVT = 0.35;

```

Figure 3.4 : Exemple des données et de dimensionnement du GD saisi dans un fichier script

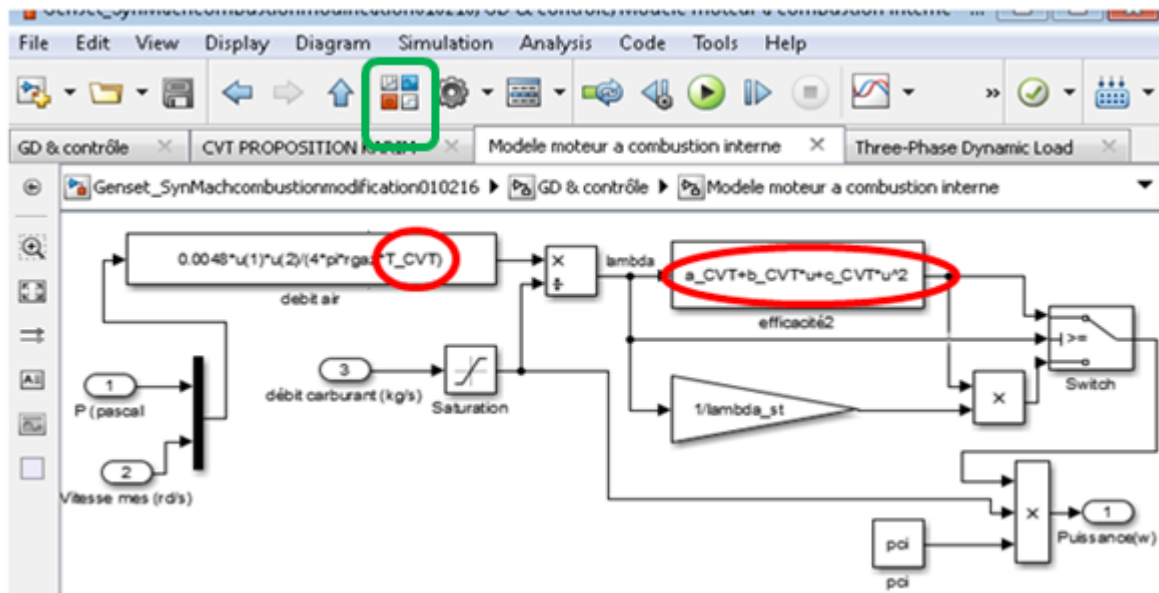


Figure 3.5 : Appel des variables (saisies en script) dans les blocs des modèles Simulink

Donc, les variables entourées avec un cercle rouge sur la figure 3.5, utilisées dans ce modèle Simulink, doivent être déclarées dans un fichier script (figure 3.4) dans l'environnement Matlab, au préalable avant d'exécuter la simulation.

Une fois l'étape de dimensionnement est terminée, c'est la modélisation des systèmes qui commence. Pour effectuer cette tâche, il faut bien choisir les modèles représentant le comportement dynamique des systèmes ainsi que les contrôleurs et les convertisseurs convenables capables d'assurer la commande et la régulation de ces derniers.

Il est à noter que la boîte à outils de Simulink a été choisie comme environnement de modélisation pour la raison des avantages déjà présentés dans le 2<sup>ème</sup> chapitre. Également, Simulink offre une librairie, contenant un ensemble des composants d'électronique de puissance, des modèles physiques, électriques, mécaniques et thermiques, etc., qui permettent le design précis d'un tel système. Il est à noter que la modélisation détaillée des systèmes fera l'objet du 4<sup>ème</sup> chapitre. En effet, dans ce paragraphe, seulement

la façon d'implémentation des modèles et les interfaces de contrôle et des données auxquelles l'utilisateur aura accès qui seront présentés.

Pour commencer la modélisation, il faut ouvrir l'extension Simulink (cadre vert sur la figure 3.5), ensuite ouvrir une nouvelle fenêtre dans Simulink pour chaque sous-système (éolien, GD, air comprimé) comme c'est illustré sur la figure 3.6.

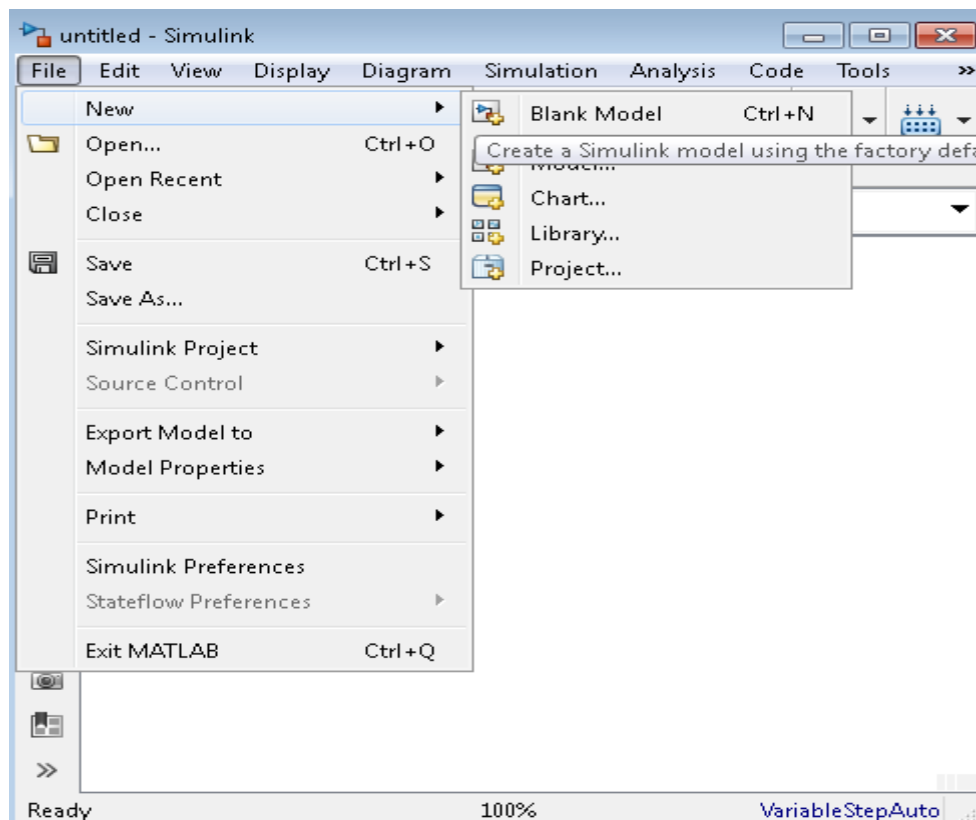


Figure 3.6 : Fenêtre Simulink et création d'un nouveau modèle

Dans l'environnement Simulink, les systèmes peuvent être modélisés à l'aide des équations différentielles en reliant des objets graphiques appelés blocs fonctionnels (blocs intégrateurs, gain, sommation) (figure 3.7), ou représentés à l'aide des modèles prédéfinis et disponibles dans l'extension Toolbox de Simulink (figure 3.8),



comme c'est le cas de l'éolienne à base de MSAP, l'éolienne à base de MADA, le PV, le redresseur, l'onduleur, etc..

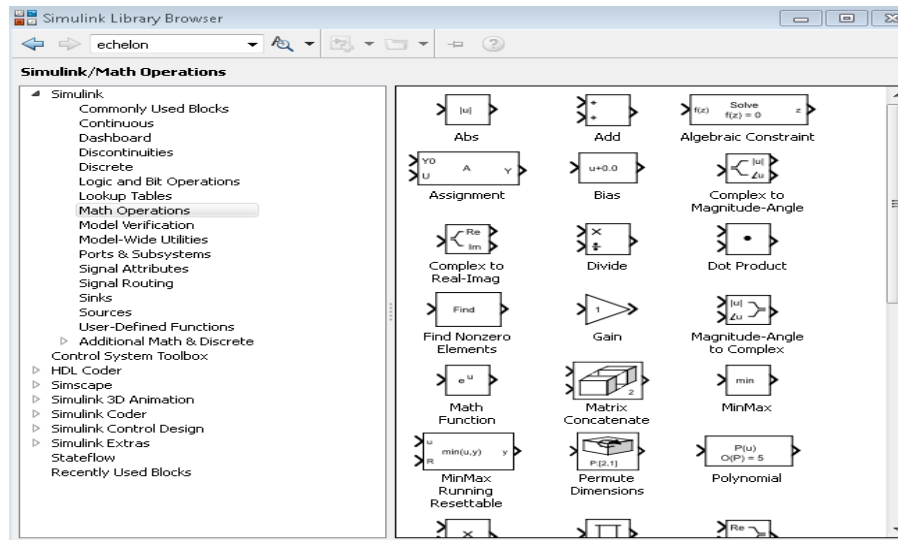


Figure 3.7 : blocs fonctionnels dans Simulink

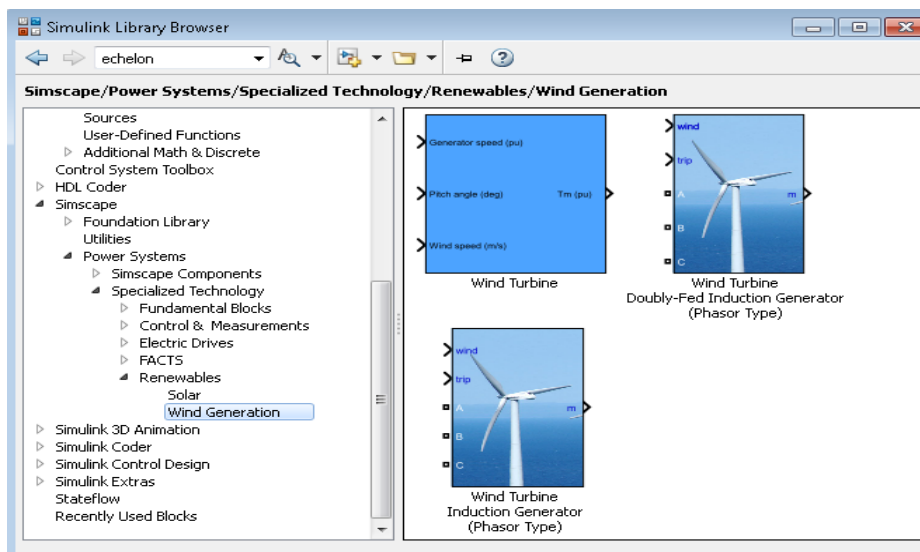


Figure 3.8 : Extension Toolbox de Simulink/Matlab



et mécanique de l'éolienne. Le bloc rose comporte les convertisseurs de puissances (régulateur et contrôleur). La commande des contrôleurs du système se fait à travers les blocs verts. Pour la couleur bleue, elle désigne la partie électrique du système éolien et les blocs de couleur orange représentent les charges utilisées. Les autres composants représentent les différentes équations, traduisant les conditions et les contraintes prises en considération dans le fonctionnement de l'éolienne (délai, ordre, etc.).

Les sorties du système sont : les puissances (actives et réactives), les couples, les vitesses de rotation, ainsi que tous les paramètres qui reflètent la qualité de l'onde délivrée (tension, courant, fréquence...). Ces résultats seront observés à partir des blocs scope (figure 3.9) entourés du rectangle vert.

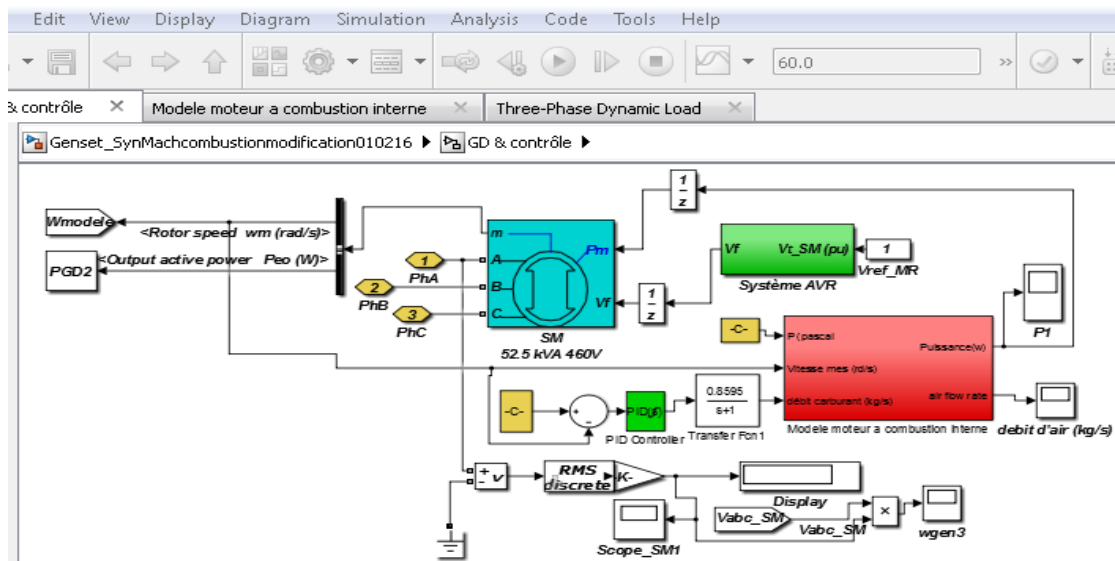


Figure 3.10 : Modèle du générateur diesel

Sur la figure 3.10, le moteur à combustion interne du générateur diesel est représenté par le bloc en rouge, et la génératrice synchrone par le bloc en bleu. Tous les blocs verts sont les convertisseurs de puissance et les régulateurs de vitesse et de tension. Les sorties de système du générateur diesel sont la puissance mécanique, le couple



Il est important de noter que dans ce type de modélisations, on a obligatoirement besoin du bloc de PowerGUI pour rentrer les conditions initiales du fonctionnement et pour pouvoir exécuter le modèle Simulink contenant des blocs de Toolbox.

Essentiellement le bloc Powergui (figure 3.13) permet de rentrer tous les paramètres liés au démarrage et de choisir le solveur adéquat pour la simulation (dépendamment du type de modèle utilisé, continu ou discret). De plus, il offre des outils pour l'analyse à l'état stable des résultats de simulation et pour leur visualisation en temps réel.

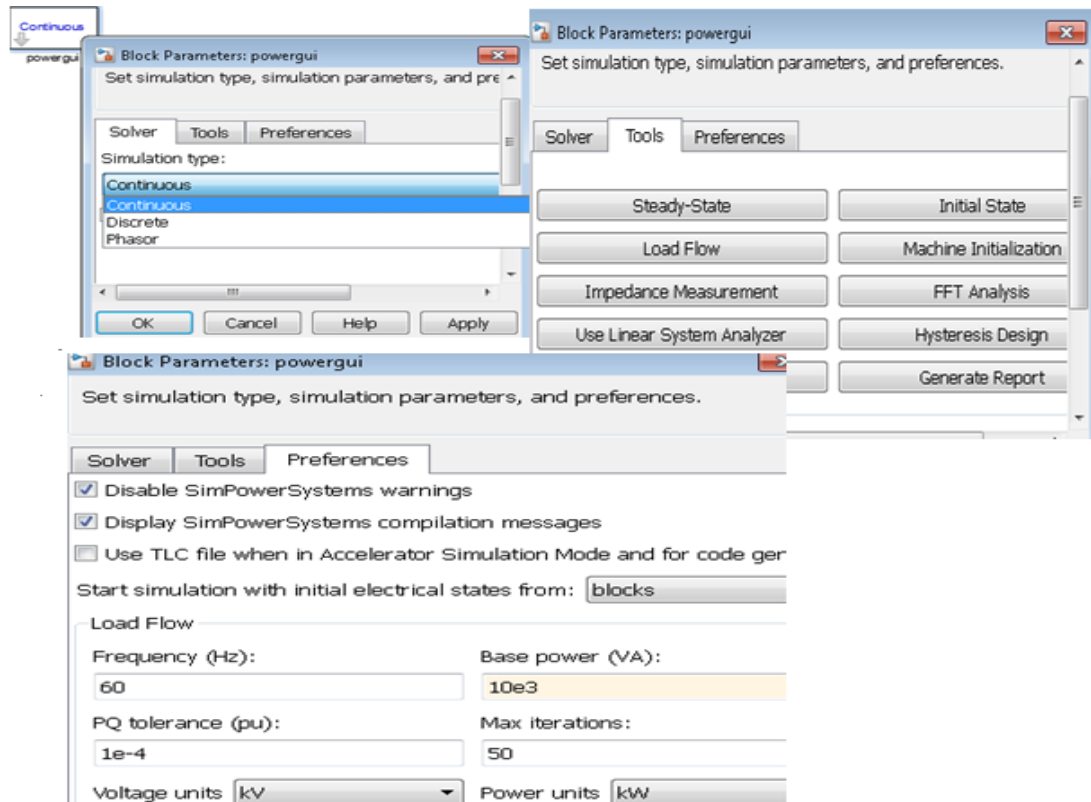


Figure 3.13: Bloc Powergui et ses fonctions

Une fois que les conditions initiales et les contraintes du système sont définies, le pas de simulation (exprimé toujours en seconde sous Matlab) peut être choisi et la simulation peut alors être lancée en appuyant sur « play ». Ainsi, la réponse du système en temps réel peut être observée. D'ailleurs, il est possible d'arrêter la simulation pour modifier des paramètres ou déboguer le programme.

À ce stade, les sous-systèmes de l'éolienne, du GD et du CAES sont validés numériquement d'une façon individuelle (en dehors du couplage), présentant des résultats graphiques qui seront analysés dans le dernier chapitre du présent mémoire.

Le dernier bloc (figure 3.12) constitue le couplage des sous-systèmes élaborés et leur implémentation dans le même environnement de simulation, et ce dans l'objectif de créer l'outil du SHEDAC.

Tout d'abord, il est nécessaire de mettre les fichiers des modèles Simulink de chaque sous-système dans le même dossier, appelé sous Matlab dans l'espace réservé « dossier en cours », tel qu'il est montré dans la figure 3.14.

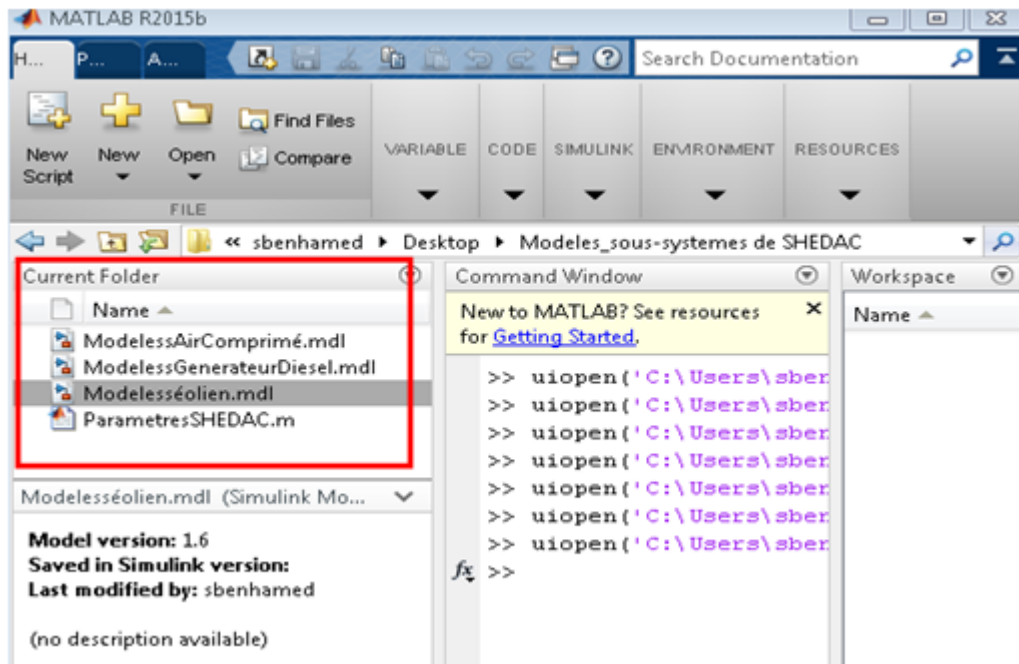


Figure 3.14 : Environnement d'emplacement des sous-systèmes de SHEDAC sous Matlab

La figure 3.14 présente l'espace de travail du logiciel de SHEDAC, et où les modèles de ses composants (éolien, diesel, CAES) sont créés.

Dans les sections qui suivent, la stratégie de couplage entre les composants sera présentée et l'interface de contrôle et de gestion d'énergie entre les différentes sources sera aussi développée, afin d'assurer le bon fonctionnement de simulateur et faciliter à l'utilisateur la manipulation de l'outil.

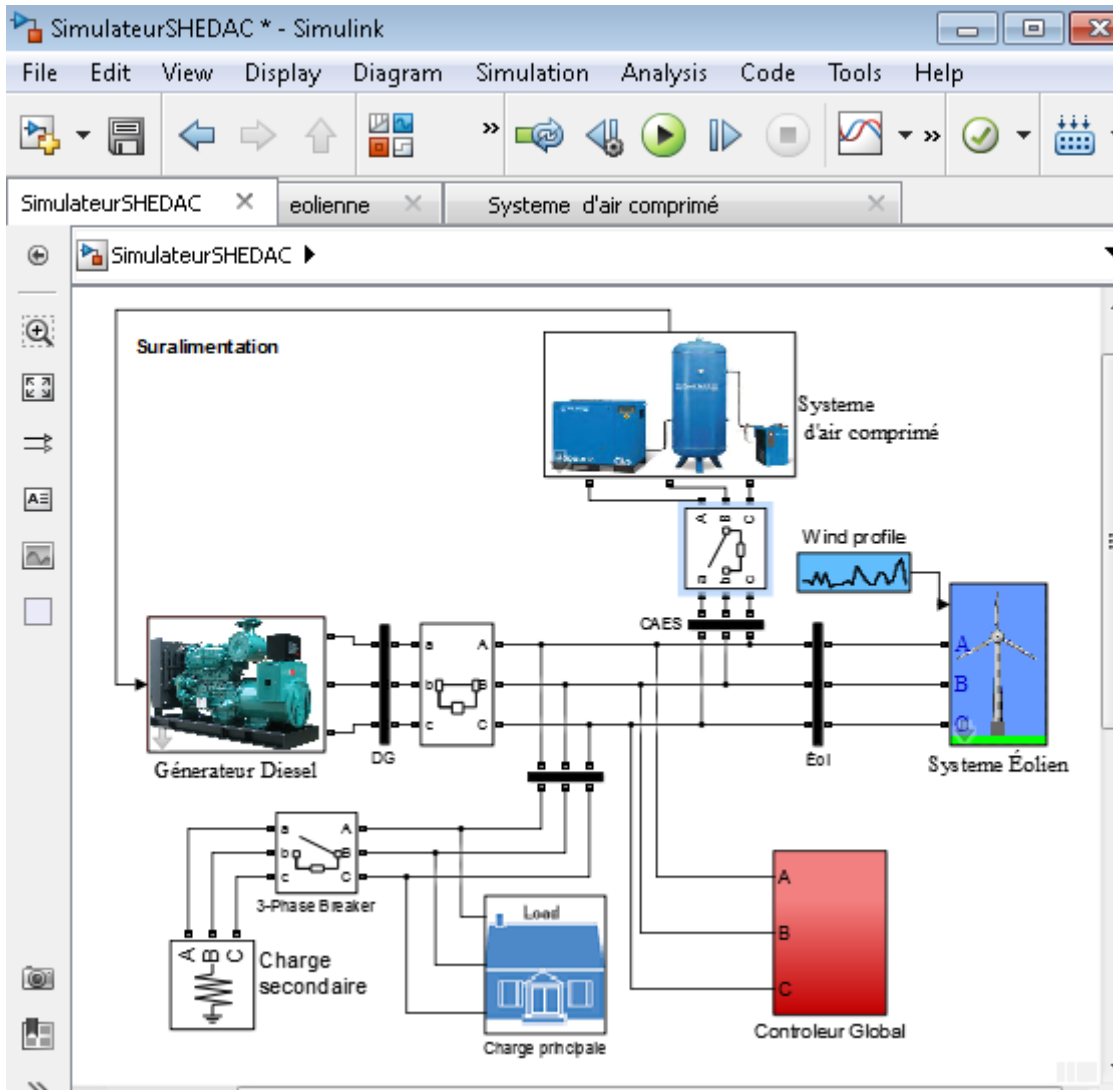


Figure 3.15 : Simulateur SHEDAC implanté sous Matlab/Simulink

La figure 3.15 montre le simulateur de SHEDAC implanté sous Matlab/Simulink avec ses différents composants (éolien, GD, air comprimé, charge principale et secondaire) et ses contrôleurs. Le couplage entre l'éolienne, le groupe diesel et la charge se fait à travers des signaux qui échangent des flux de puissance en triphasé. Pour ce qui est du système de stockage, il est connecté à l'éolienne aussi en triphasé et au diesel



à travers un signal comportant la quantité d'air comprimé, avec laquelle le moteur diesel peut être suralimenté. Le contrôleur de partage de la puissance entre les différents composants est un contrôleur de puissance, dont son fonctionnement sera décrit plus tard. Il est connecté aux différents sous-systèmes à travers des interrupteurs.

Pour lancer des simulations, il faut premièrement exécuter le fichier contenant tous les paramètres de SHEDAC qui s'intitule « ParametresSHEDAC.m ». Pour exécuter ce fichier, il faut sélectionner l'icône de la flèche verte indiquée sur la figure 3.16.

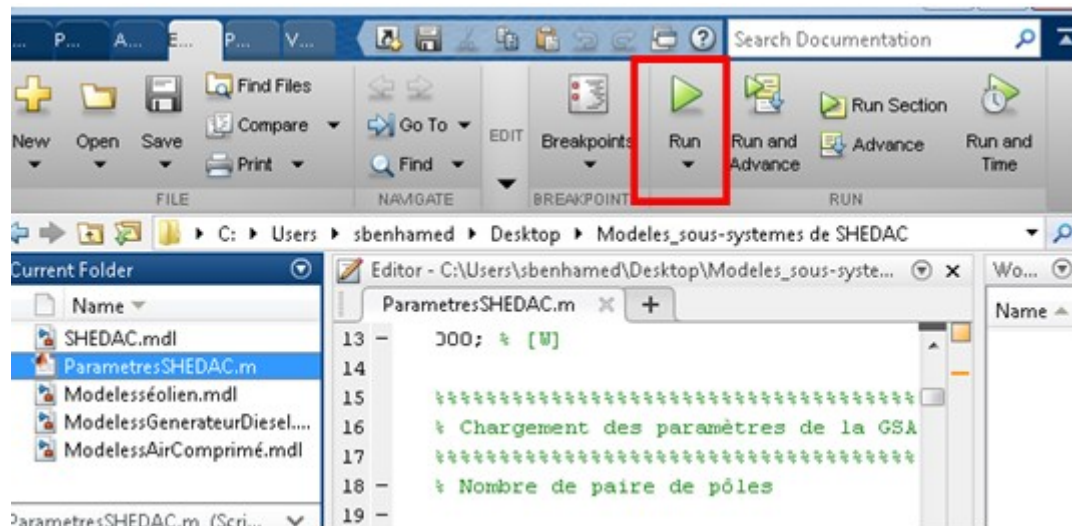


Figure 3.16 : Exécution des fichiers des données du SHEDAC

Pour lancer l'exécution du fichier Simulink de modèle du SHEDAC, il suffit d'ouvrir la fenêtre et sélectionner l'icône de la flèche noire indiquée sur la figure 3.17.

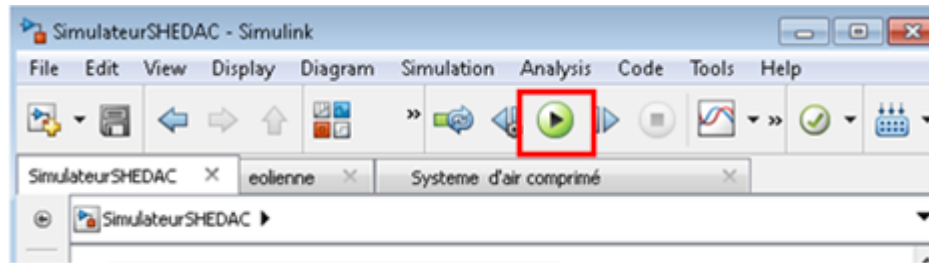


Figure 3.17 : Simulation du SHEDAC sous Matlab/Simulink

Le fonctionnement du système est comme suit : le contrôleur compare la puissance de la charge et de l'éolienne et produit une erreur. L'erreur est une valeur négative ou une valeur positive ou nulle, qui sera envoyée au contrôleur. Cette erreur peut démarrer ou arrêter le générateur diesel. Si l'erreur a une valeur négative, cela signifie que la consommation d'énergie de la charge est inférieure à la production d'énergie éolienne. Autrement dit, le fonctionnement du générateur diesel ne sera pas nécessaire. Dans cet état, l'interrupteur de GD sera OFF, ainsi la puissance mécanique est également nulle. Donc, la génératrice synchrone de GD ne génère aucun pouvoir et elle fonctionne comme condensateur.

Parallèlement, l'énergie excédentaire de l'éolienne est envoyée au système d'air comprimé, où elle sera stockée sous forme d'air. L'air comprimé détendu et réchauffé par la suite sera injecté dans le collecteur d'admission du moteur diesel, d'une façon directe. Toutefois, le CAES permet de réguler l'équilibre de la puissance échangée dans le système et la fréquence du réseau. Il peut arriver parfois que le système d'air comprimé soit saturé et qu'on ne puisse plus stocker de l'énergie. Dans cette situation, le contrôleur reçoit un signal pour arrêter l'envoi de l'énergie éolienne excédentaire au CAES et commande l'ouverture de l'interrupteur de CAES. Ensuite, la charge résistive secondaire est utilisée pour réguler la fréquence du système en maintenant un équilibre de puissance réelle (purent résistive), absorbant efficacement toute l'énergie éolienne excédentaire supérieure à la demande des consommateurs.

Si l'erreur est zéro ou a une valeur positive, cela signifie que la puissance demandée par la charge est supérieure à la production de l'éolienne. Dans cet état, l'interrupteur de GD sera ON et le GD ayant été suralimenté entre en fonction, un couple est produit, développant une puissance mécanique ( $P_m$ ) qui va démarrer la génératrice synchrone. Le GD démarre la génération et fournit l'alimentation supplémentaire, pour compléter la demande de la charge. Cette stratégie peut réduire le coût de fonctionnement et la consommation de carburant par le générateur diesel.

### 3.2.5 Interface des données et interface graphique



Figure 3.18 : Bloc faisant référence au développement des interfaces utilisateurs et des interfaces graphiques

Le développement d'un outil utilisant des interfaces homme/machine (figure 3.18), facilite davantage la compréhension et la manipulation du simulateur par d'autres utilisateurs. Ainsi, l'ajout des différentes interfaces graphiques est primordial pour rendre l'outil plus convivial, facile à utiliser et à modifier. L'ajout des nouvelles infrastructures ou l'intégration des nouvelles fonctions ou même des tests de simulations de performance et d'optimisation est aussi possible.

#### 3.2.5.1 Menu des données des composants dans Simulink

Commun à tous les sous-systèmes de SHEDAC, le menu utilisateur est indispensable pour permettre de changer les données des composants aisément dans l'outil. Pour afficher les caractéristiques d'un composant, il faut cliquer 2 fois sur son bloc. Par

exemple, en cliquant deux fois sur le bloc de l'éolienne, l'interface utilisateur apparait, tel qu'il est montré dans la figure 3.19.

Figure 3.19 : Interface utilisateur pour saisir les données de la turbine éolienne

Même principe décrit pour l'éolienne s'applique respectivement sur le générateur diesel (figure 3.20), le système d'air comprimé (figure 3.21) et la charge (figure 3.22). À chaque fois, l'utilisateur a une certaine flexibilité pour changer et modifier les données du système et puis choisir la taille et les options liées à ses composants et répondant à ses objectifs.

Block Parameters: Générateur Diesel

Générateur Diesel (mask)

Générateur Diesel	Moteur Diesel
Puissance génératrice (kw)	Puissance du moteur (kw)
50	50
Vitesse de rotation (rdm)	Rapport stochiométrique air/fuel
1800	14.6
	Débit d'air maximum (kg/s)
	0.036
	Pression admission(atm)
	1

Figure 3.20 : Interface utilisateur pour saisir les données du groupe diesel

Block Parameters: Systeme d'air comprimé 1

système d'air comprimé (mask)

Moteur	Compresseur
Puissance (kw)	Nombre d'étage de compression
52	3
Couple résistif (N.m)	pression maximale de stockage (bar)
200	345
Vitesse de rotation (rdm)	Pression admission initiale (bar)
1500	15
	Température (k)
	298.15
Réservoir	Filtre
Température stockage (k)	Pression entrée (bar)
298.15	345
Volume stockage (m3)	Prssion sortie max (bar)
20	30

Figure 3.21 : Interface utilisateur pour saisir les données du système d'air comprimé

Toutefois, l'utilisateur peut modifier la puissance de la charge demandée ainsi que de créer des perturbations sur la charge.

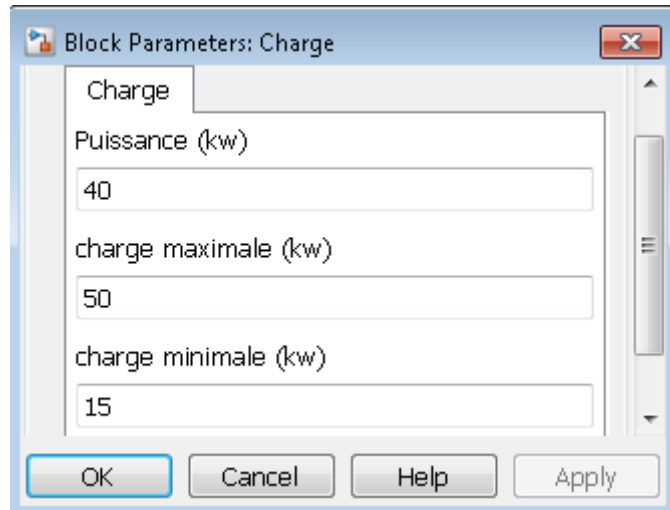


Figure 3.22 : Interface utilisateur pour choisir la charge à simuler

### 3.2.5.2 Interface graphique (GUI) du simulateur

Les interfaces graphiques (ou interfaces homme-machine) sont appelées GUI (pour Graphical User Interface) sous MATLAB. Elles permettent à l'utilisateur d'interagir avec un programme Matlab écrit en « lignes de code » ou avec des blocs Simulink, grâce à des différents objets graphiques (boutons, menus, cases à cocher...). Ces objets sont généralement actionnés à l'aide de la souris ou du clavier. Ils ont pour objectif de simplifier l'utilisation d'une application, afin de faciliter la prise en main de l'outil par l'utilisateur.

Dans l'interface graphique qui a été développée pour le simulateur du SHEDAC, on y retrouve tous les éléments d'une fenêtre classique (boutons, menus déroulants, etc.). Les informations introduites dans le GUI sont les données principales du simulateur et plusieurs autres options telles qu'il est présenté dans la figure 3.23. Par exemple, l'utilisateur peut choisir le type de la charge, la simulation d'un système éolien tout seul ou avec un GD et avec ou sans stockage.

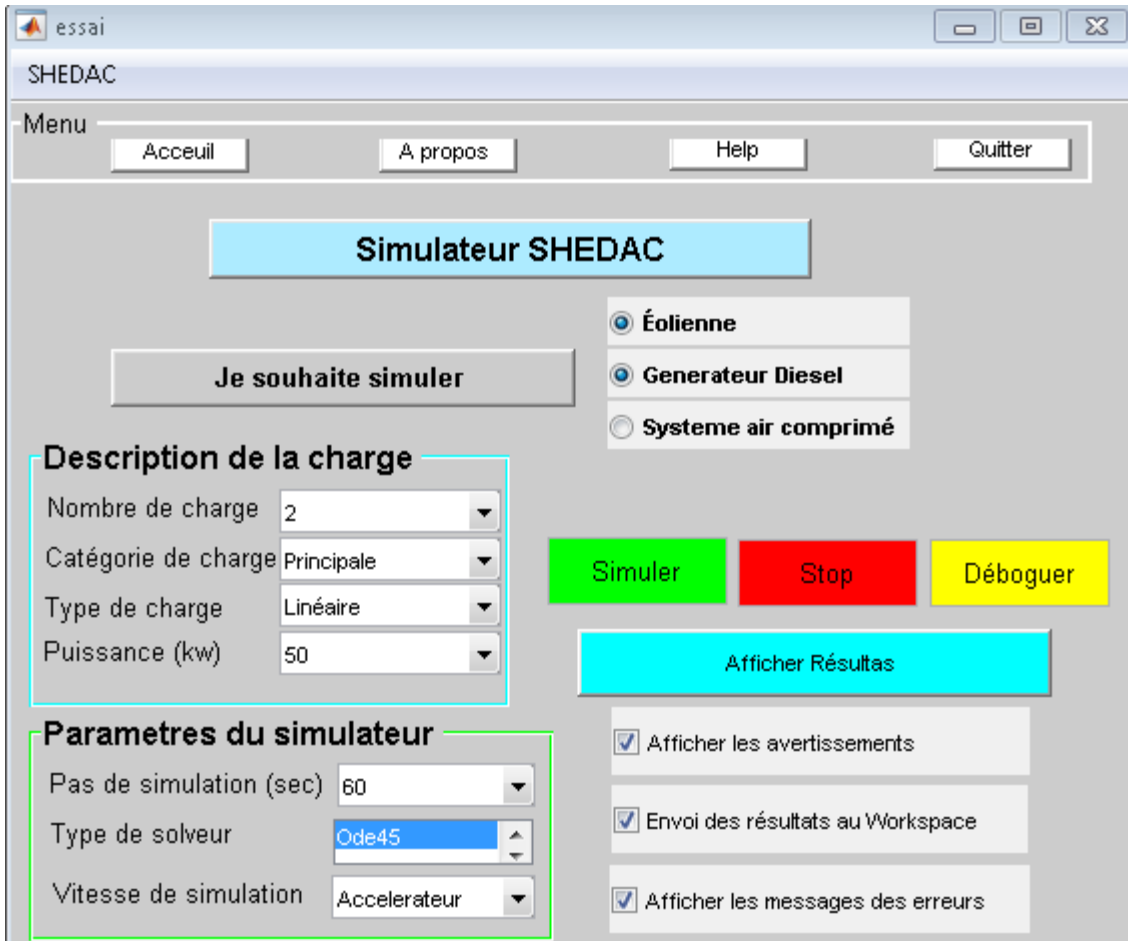


Figure 3.23 : Interface graphique SHEDAC/ Menu d'entrée du logiciel

Ainsi, en cliquant sur l'accueil, l'utilisateur peut faire le choix d'ouvrir l'interface graphique de l'éolienne, du GD ou du système d'air comprimé. Dans la présente étude, une interface graphique est créée pour le système éolien en dehors du couplage et une autre pour le groupe diesel. Par ailleurs, vu la contrainte du temps de ce projet, on n'a pas pu développer l'interface graphique du système d'air comprimé. Par conséquent, elle fera l'objet des travaux futurs.

The screenshot shows a software window titled 'Éolienne' with a menu bar containing 'Retour', 'Parametres éolienne', and 'Lancer la simulation'. The main area is titled 'Modélisation de l'éolienne' and contains several sections of parameters:

- Marque:** Berguey Excel
- Nb d'éolienne utilisée:** 5
- Rotor:**
  - Nombre des pales: 3
  - Diamètre en m: 8.5
  - Vitesse de rotation nominale (tr/mn): 80
  - Angle de calage: 0
- Génératrice:**
  - Type de génératrice: synchrone
  - Modèle de machine: MSAP
  - Puissance en Kw: 10
  - Multiplicateur: 1
- Données environnementales:**
  - Vitesse moyenne du vent(m/s): 10
  - Vitesse du vent maximale(m/s): 13
  - Température extérieure minimale (c°): -25

Figure 3.24 : Interface graphique de l'éolienne

Les informations introduites dans cette GUI sont les caractéristiques liées à l'éolienne (marque, nombre), au rotor (diamètre, nombre de pales, vitesse de rotation), à la génératrice (le type, le modèle, la puissance) et autant des données qu'il est possible de trouver le multiplicateur. De plus, on y trouve les données environnementales où l'utilisateur peut saisir la vitesse moyenne du vent et la température extérieure minimale du site. Une fois les données sont rentrées, il est possible de simuler le fonctionnement de l'éolienne par l'intermédiaire du bouton en haut à droite du GUI (figure3.24). Cette



dernière représente l'environnement de la simulation et indique clairement à quoi correspond chaque valeur qui modélise l'éolienne. On peut facilement observer graphiquement certaines relations, comme l'évolution de la puissance fournie en fonction de la vitesse du vent ou bien de représenter la simulation du point de vue de Simulink.

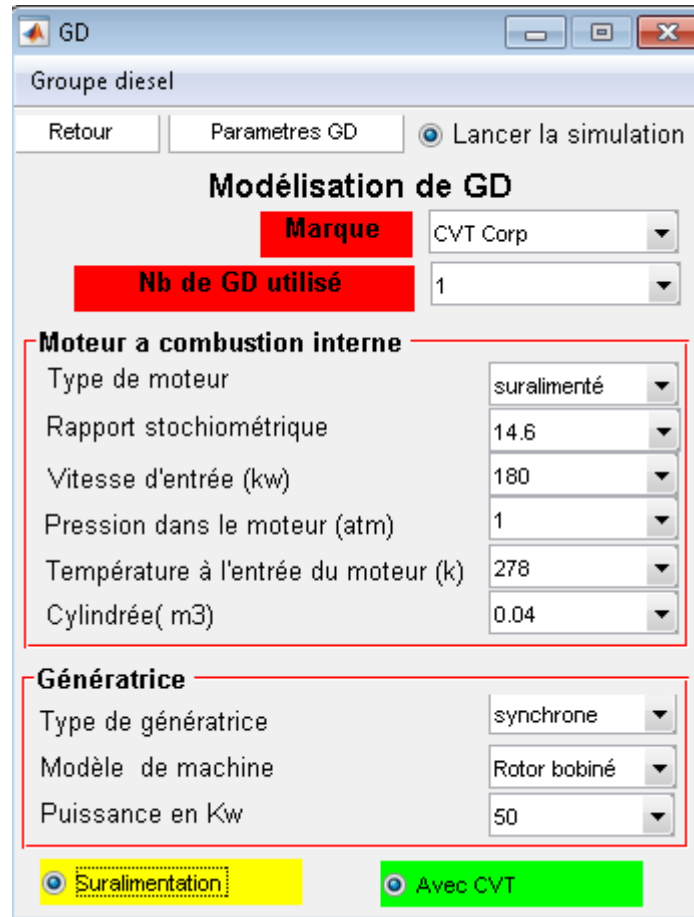


Figure 3.25 : Interface graphique du GD

Pareil que l'éolienne, le générateur diesel dispose d'une interface graphique offrant à l'utilisateur une manipulation rapide et une simple configuration du système. Également, on y trouve certaines fonctionnalités comme le choix de la marque du GD, les paramètres liés au moteur et les caractéristiques de la machine électrique. De plus,

l'utilisateur peut choisir, si le moteur va être suralimenté ou non et s'il s'agit d'un GD équipé d'un CVT (Transmission à variation continue) ou non.

Il faut attirer l'attention, que tous les résultats du simulateur seront présentés et analysés dans le 5<sup>e</sup> chapitre.

### **3.3 Conclusion**

En conclusion, le simulateur d'un système hybride éolien-diesel avec stockage par air comprimé a été développé, en suivant l'ordre des phases décrites dans l'architecture d'élaboration du logiciel, proposé au début de ce chapitre. Ainsi les différentes fonctionnalités du logiciel ont été présentées avec une description détaillée de la méthode de création des modèles et la stratégie du couplage des sous-systèmes. Par la suite, des interfaces graphiques ont été créées, dans l'objectif de rendre l'utilisation de cet outil plus souple et convivial, offrant une meilleure compréhension et manipulation de l'application pour n'importe quel utilisateur.

En particulier, il serait judicieux de mentionner que ces interfaces laissent la liberté à l'utilisateur de choisir les caractéristiques du SHEDAC et ses composants. Cependant, la personnalisation a été volontairement limitée parce que certains paramètres sont très complexes et leur valeur est très différente d'un système à un autre. Par exemple, on ne peut pas modéliser une éolienne de 10 kW avec un diamètre de 20 mètres ou coupler un GD de 50 kW avec une charge de 1MW. Une telle simulation ne serait pas envisageable, car la modélisation se doit d'être logique et cohérente avec la réalité. Alors, les contraintes du fonctionnement et les limites du simulateur seront respectées et étudiées lors du dimensionnement et de la modélisation du système, ce qui fera l'objet du prochain chapitre.

## **CHAPITRE 4**

### **MODÉLISATION DU SYSTÈME HYBRIDE ÉOLIEN DIESEL AVEC STOCKAGE PAR AIR COMPRIMÉ : SHEDAC**

#### **4.1 INTRODUCTION**

Le niveau de détail de l'utilisation d'un simulateur des systèmes éolien-diesel avec stockage par air comprimé dépend des objectifs recherchés. Le but du travail effectué dans ce chapitre est de déterminer les modèles capables de démontrer par approche numérique le comportement réel d'un système en vue d'installation au site de Camp esker, et le gain que le SHEDAC peut apporter au niveau de la consommation en carburant du moteur diesel.

Ce chapitre est consacré à la présentation ainsi qu'à la justification de choix des modèles du groupe électrogène, de l'aérogénérateur, de l'air comprimé et de leur couplage. Pour cela, une revue des modèles existants et développés est faite pour déterminer ceux qui sont les plus significatifs et qui seront adaptés dans le cadre de cette étude. Cependant, la revue des modèles se limite au système éolien et au groupe diesel (GD) en raison de la diversité des modèles existants et que les objectifs étaient plus concentrés sur le choix des modèles pour ces deux systèmes. Pour ce qui est du système d'air comprimé, le modèle développé est basé sur une étude validée dans le cadre d'un projet de doctorat [8], présentant une structure souple et modulable du système.

La présente étude utilise l'outil mathématique Matlab/Simulink afin de modéliser et de simuler les équations dynamiques des sous-systèmes mécaniques et électriques de chaque composant de SHEDAC [128]. Chaque partie est modélisée par des équations mathématiques rigoureuses issues des manuels de référence et d'articles scientifiques [8] [129] [6] [128]. Après avoir comparé et sélectionné le modèle du GD et de l'éolienne, le choix du modèle de couplage entre les principaux composants sera exposé. Le contrôle

global n'est pas détaillé dans cette étude, bien que les différentes grandeurs électriques et mécaniques puissent être visualisées pour divers points d'opération dans le chapitre 5. Toutefois, des contrôleurs locaux sont implémentés et peuvent être calibrés selon le besoin.

## 4.2 Présentation et choix du modèle de l'éolienne

Une éolienne est un système complexe constitué de plusieurs composants faisant appel à différentes disciplines d'ingénierie, telles que l'aérodynamisme, la mécanique, l'électricité et l'électronique. Chacun de ces composants compte des spécificités qui doivent être considérées dans le choix et la conception de son système [130].

Le modèle structurel d'un système éolien est standard ; il comprend une éolienne, une génératrice, un convertisseur de puissance et un contrôleur local. La vue d'ensemble de ce modèle est présentée à la figure 4.1.

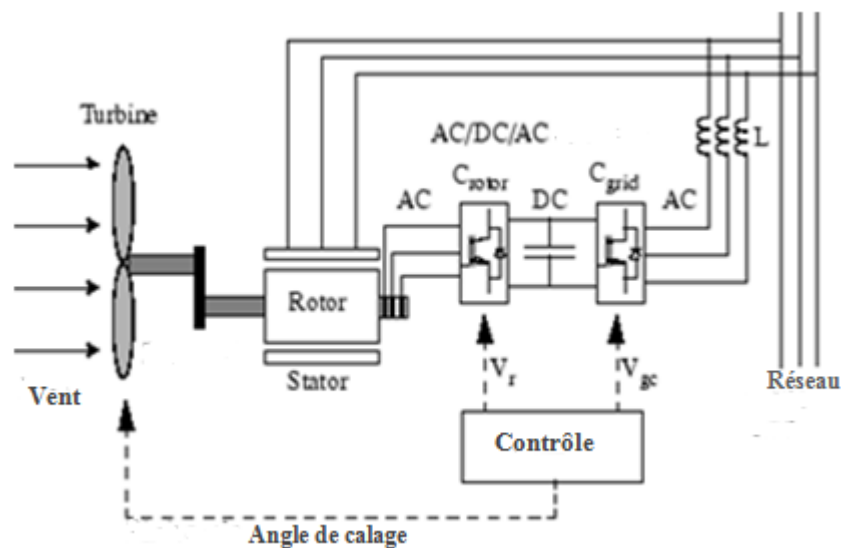


Figure 4.1 : Structure de modèle éolien

Il existe, cependant, différents types des modèles d'éoliennes, se distinguant d'après différentes approches et dépendant de plusieurs critères tels que : la nature de la

modélisation (électrique, mécanique, aérodynamique), le comportement du système (dynamique, statique), le niveau de détails, la possibilité de modification des paramètres, l'adaptation du système pour plusieurs types de charges, le niveau de difficulté de la manipulation du modèle, le niveau de complexité des expressions mathématiques utilisées, etc. Dans cette étude, trois modèles d'un système éolien développés sous Matlab sont présentés. Ces modèles seront par la suite détaillés tout en relevant leurs enjeux, afin de choisir le plus représentatif d'un comportement dynamique de l'éolienne et celui répondant le mieux aux objectifs mentionnés.

#### **4.2.1 1er modèle d'éolienne**

Dans le modèle aérodynamique d'une turbine éolienne, la vitesse incidente du vent influence le couple et la vitesse de rotation de la turbine, donc la puissance pouvant être fournie par l'éolienne. Ainsi, les familles de caractéristiques statiques de la puissance et du couple permettent l'étude dynamique du couplage entre la turbine et la génératrice de l'éolienne. Ces caractéristiques peuvent être modélisées, entre autres, à l'aide des courbes du coefficient de couple fournies par le constructeur. Cependant, cette approche a pour inconvénient de se limiter à un régime de fonctionnement pour une seule vitesse de vent donnée, soit la vitesse nominale. Il s'avère, donc, nécessaire de générer des familles de caractéristiques statiques de la puissance et du couple selon différents régimes de fonctionnement.

Le modèle présenté dans les sections qui suivent a pour objectif de générer ces caractéristiques statiques et de modéliser l'éolienne en se basant sur une étude aérodynamique très approfondie. Une partie de ce modèle était déjà développée dans un projet antérieur au TechnoCentre éolien et qui a fait l'objet d'un rapport interne [14]. Cependant une amélioration et une contribution sont apportées à ce modèle dans ce mémoire. Il a été développé à partir de la théorie des éléments de pale de l'éolienne. Ainsi,

les forces aérodynamiques et les vitesses s'exerçant sur chaque élément de pale sont calculées à partir des paramètres géométriques de l'éolienne, tels que la longueur de la corde, la variation du pas et la position de l'élément de pale par rapport au moyeu. Ce programme a été conçu en langage Matlab et pourra être adapté aux besoins d'un banc d'essai éolien.

#### 4.2.1.1 Théorie de l'élément de pale d'une éolienne

La Théorie de l'élément de pale se base sur deux hypothèses [131] : il n'existe aucune interaction aérodynamique entre les différents éléments et les forces agissant sur les pales ne s'expriment qu'en fonction des caractéristiques de portance et de trainée qui dépendent de la géométrie de pale. Ainsi les pales sont divisées en plusieurs segments tels qu'illustre la figure 4.2.

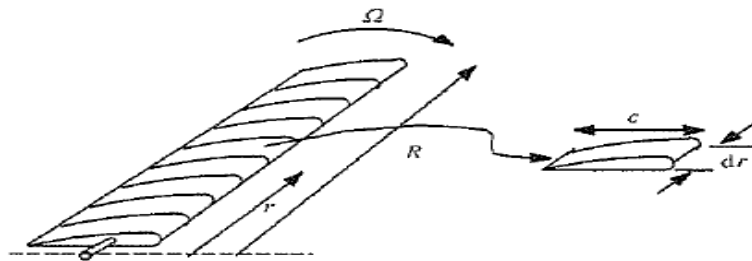


Figure 4.2 : Division de la pale suivant la théorie de l'élément de pale

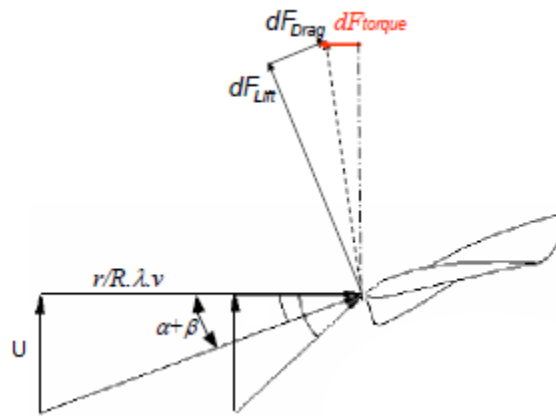


Figure 4.3 : Section d'un élément de pale d'un rayon  $r$  [131]

La vitesse relative  $V_r$  est la combinaison de la vitesse incidente du vent  $U$  et de la vitesse due à la rotation de la pale:

$$V_r^2 = U^2 + \Omega^2 \cdot r^2 \quad (4.1)$$

La vitesse du vent  $U$  est exprimé d'après la théorie du disque actuateur [131] comme une fonction de la vitesse de l'écoulement non perturbée  $V_\infty$  et du facteur d'induction axial  $a$  :

$$U = V_\infty \cdot (1 - a) \quad (4.2)$$

L'angle d'incidence  $\varnothing$ , qui est l'angle entre le plan de rotation de la pale et la vitesse du vent relative, est exprimé comme suit :

$$\varnothing = \tan^{-1}\left(\frac{U}{\Omega \cdot r}\right) \quad (4.3)$$

L'angle d'attaque  $\alpha$  est la différence entre l'angle d'incidence ( $\varnothing$ ) et l'angle de calage ( $\beta$ ) :

$$\alpha = \varnothing - \beta \quad (4.4)$$

L'ensemble des forces agissant sur la pale se divise en deux composantes : la portance et la traînée. La force de portance est perpendiculaire à la direction de l'écoulement de l'air et résulte de la différence de pression existant au-dessus et au-dessous de l'élément de pale (figure 4.3). Pour ce qui est la force de la traînée, elle est parallèle à la direction de

l'écoulement de l'air. Elle provient à la fois de la force de friction de viscosité existant à la surface de l'élément de pale et de la différence de pression qu'il y a entre la section de la surface du segment qui est face à l'écoulement et celle qui est derrière (figure 4.4).

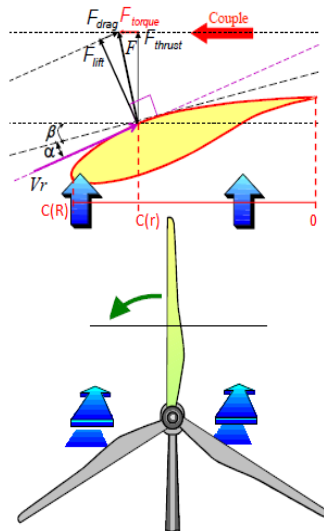


Figure 4.4 : Forces appliquées sur la pale

Dans cette théorie [131], les coefficients de la portance ( $C_l$ ) et de la trainée ( $C_d$ ) sont définis respectivement par :

$$C_l = \frac{\frac{L}{l}}{\frac{1}{2}\rho U^2 c} = \frac{\text{Force de portance par unité de longueur}}{\text{Forcedynamique par unité de longueur}} \quad (4.5)$$

$$C_d = \frac{\frac{D}{l}}{\frac{1}{2}\rho U^2 c} = \frac{\text{Force de Trainée par unité de longueur}}{\text{Forcedynamique par unité de longueur}} \quad (4.6)$$

Où  $\rho$ , est la densité de l'air [kg/m],  $c$ , est la corde, soit la variation du profil de la pale selon le rayon  $r$  [m].

Le coefficient d'induction axiale ( $a$ ) représente le taux de décroissance du vent traversant le plan de rotation des pales. Il agit sur la vitesse incidente alors que le coefficient d'induction



tangentielle ( $a'$ ), associé à la turbulence créée par la rotation des pales, diminue la vitesse de rotation. Ces quantités sont calculées à partir des relations suivantes [132] :

$$\frac{a}{1-a} = \frac{\sigma R}{8r} \left( \frac{C_l \cos \theta + C_d \sin \theta}{\sin^2 \theta} \right) \quad (4.7)$$

$$\frac{a'}{1+a'} = \frac{\sigma R}{8r} \left( \frac{C_l \sin \theta + C_d \cos \theta}{\sin \theta \cos \theta} \right) \quad (4.8)$$

Où :  $\sigma = \frac{Bc}{\pi R}$  avec B, le nombre de pales.

En isolant a et  $a'$ , on a :

$$a = \frac{\frac{\sigma R}{8r} \left( \frac{C_l \cos \theta + C_d \sin \theta}{\sin^2 \theta} \right)}{1 - \frac{\sigma R}{8r} \left( \frac{C_l \cos \theta + C_d \sin \theta}{\sin^2 \theta} \right)} \quad (4.9)$$

$$a' = \frac{\frac{\sigma R}{8r} \left( \frac{C_l \sin \theta + C_d \cos \theta}{\sin \theta \cos \theta} \right)}{1 - \frac{\sigma R}{8r} \left( \frac{C_l \sin \theta + C_d \cos \theta}{\sin \theta \cos \theta} \right)} \quad (4.10)$$

L'angle d'incidence et la vitesse relative peuvent être calculés en fonction des coefficients suivants :

$$\theta = \tan^{-1} \frac{U(1-a)}{\Omega r(1+a')} \quad (4.11)$$

$$V_r^2 = \frac{U(1-af)}{\sin^2 \theta} \quad (4.12)$$

Où f est le facteur de Prandtl. Ce facteur de correction tient compte des pertes marginales aux extrémités des pales [132]. Cette quantité comprise entre 1 et 0 est définie par :

$$F = \frac{2}{\pi} \cos^{-1} \left[ e^{-\frac{B(R-r)}{2 \sin \phi}} \right] \quad (4.13)$$

Elle peut également être formulée ainsi :

$$F = \frac{2}{\pi} \tan^{-1} \left[ \frac{\sqrt{1 - e^{-\frac{B(R-r)}{\sin \phi}}}}{e^{-\frac{B(R-r)}{2 \sin \phi}}} \right] \quad (4.14)$$

Puisque :

$$\cos^{-1} x = \tan^{-1} \frac{\sqrt{1-x^2}}{x} \quad (4.15)$$

Le calcul du couple élémentaire dT agissant sur chacun de ces segments équivaut à :

$$dT = \frac{1}{2} \rho V_r^2 r (C_l \sin \varnothing - C_d \cos \varnothing) B c dr \quad (4.16)$$

Afin d'obtenir le couple agissant sur l'ensemble de la pale, nous intégrons ces derniers résultats :

$$T = \int_0^R dT \quad (4.17)$$

Enfin, la puissance mécanique fournie par les pales est obtenue en multipliant ce couple par la vitesse de rotation.

#### 4.2.1.2 Méthode de résolution pour un élément de pale

Pour chaque élément de pale, un ensemble d'équations doit être résolu. Cela peut se faire par un processus itératif tel que celui présenté dans cette section (l'organigramme ci-dessous (figure 4.5)). Pour ce faire, il faut connaître les paramètres d'opération de l'éolienne (vitesse du vent  $U$ , vitesse de rotation du rotor  $\Omega$ , nombre de pales  $B$  et densité de l'air  $\rho$ ) et les informations sur chacun des éléments de la pale (position radiale  $r$ , longueur de la corde  $c$ , angle de calage  $\beta$ , coefficient de la portance  $C_l$  et de la trainée  $C_d$  des profils utilisés). On définit, en général, entre 10 et 20 éléments le long de la pale [133].

Pour chacun de ces éléments, le processus suivant permet de résoudre les équations présentées plus haut sous forme de fonctions Matlab programmées en ligne de code. Nous identifions d'abord l'ensemble des variables utilisées dans ce programme pour ensuite présenter chaque fonction en détail. Afin d'alléger le texte, le code est présenté en annexe B. Les variables que l'utilisateur peut modifier sont :  **$\beta$ ,  $\beta_{max}$ ,  $c$ ,  $ro$ ,  $r$ ,  $B$ ,  $rpm$ ,  $rpm_{min}$ ,  $twist$ ,  $vent$ ,  $vent_{min}$ ,  $nbrelement$ .**

Les variables calculées par les différentes fonctions du logiciel sont :

**$a$ ,  $a'$ ,  $\alpha$ ,  $C_l$ ,  $C_d$ ,  $f$ ,  $\phi$**

**Couple  $v\_b\_r$**  : résultats finaux du couple sous forme matricielle (3D)

**Delta\_beta** : variation de l'angle de calage

**Dumb** : valeur temporaire de l'angle d'incidence

**Intégrale** : intégration du couple tout au long de la pale

**$\phi 1$ ,  $\phi 2$**  : valeur temporaire de l'angle d'incidence (pour la comparaison)

**Puissance** : puissance mécanique de l'éolienne

**Puissance  $v\_b\_r$**  : résultats finaux de la puissance sous forme matricielle (3D)

**Torquee** : couple électrique

**$V\_rot$**  : vecteur des différentes vitesses de rotation utilisées

**$V\_vent$**  : vecteur des différentes vitesses du vent utilisé

**$Vr^2$**  : vitesse relative au carré

**$\Omega$**  : vitesse angulaire

Les variables associées au test de convergence sont :

**Critère** : moyenne des erreurs pour l'ensemble de la pale

**Erreur** : somme de la différence entre  $\phi 1$  et  $\phi 2$

**Incrément** : nombre d'itérations que le test de la convergence a effectué

**Test** : condition d'effectuation de test de la convergence

#### 4.2.1.3 Organigramme du programme principal

Le script `appel_fonc.m` est le programme principal qui gère l'ensemble des fonctions :



Pour n = 0 :2 :20

$\beta_0 = \beta_{\max} - n$

$\beta = \beta_0 + \text{twist}$

Dans cette boucle, p et q sont incrémentés de 1 à chaque itération :

Pour r = 0 :10 :20

p=1

rpm = rpmmin + r

L'utilisateur fournit les valeurs initiales de rpm,  $\beta$  et vent au début de l'exécution du programme. Les résultats sont formulés par la matrice torque\_rpm. Toutefois, elle ne tient pas compte de l'intégration du couple sur l'ensemble de la pale, et c'est pourquoi nous avons défini les matrices couple v\_b\_r et puissance v\_b\_r qui s'avèrent plus appropriées pour nos besoins. De plus, à chaque valeur de couple et de puissance calculée correspond une valeur particulière de la vitesse incidente du vent, de variation de l'angle de calage et de vitesse de rotation de la turbine. Ces données sont respectivement stockées dans les vecteurs v\_vent, delta\_beta et v\_rot. Ces derniers facilitent le traitement du résultat.

#### 4.2.1.4 Les fonctions du programme

**1- Définition vecteurs :** Cette fonction initialise les valeurs imposées au système. Elle définit d'abord les paramètres géométriques de la pale comme les rayons, les cordes, les twists (angles de torsion) et le nombre d'éléments de pale. Elle initialise ensuite les conditions d'opération, telles que le nombre des pales, la vitesse de rotation du rotor, l'angle d'attaque des pales et la densité de l'air.

Pour l'instant, la vitesse du vent est évaluée au rotor sans tenir compte de la hauteur de ce dernier. Pour une étude purement aérodynamique, la vitesse de vent utilisée, variant entre 3

m/s et 20 m/s, est considérée à la hauteur du rotor. Les valeurs de rayon, de twist et de la corde sont lues à partir de fichiers textes.

**2- Valeurs de base :** la fonction valeurs de base évalue la vitesse angulaire  $w_r$  (rad/s), la vitesse relative au carré  $V_{r2}$  (m/s), l'angle d'incidence  $\phi$  (degrés) et l'angle d'attaque  $\alpha$  (degrés) pour chaque élément de la pale. Pour ces calculs, les coefficients d'inductance axiale et tangentielle sont nuls.

**3-  $Cl_{Cd}$  :** la fonction calcule les coefficients de la portance et de la traînée pour chaque élément de pale.

**4-  $a_{aprim}$  :** la fonction calcule les coefficients d'induction de translation  $a$  et de rotation  $a'$ .

**5-  $appel_{conv}$  :** la fonction effectue l'appel à la fonction  $test_{conv}$  et s'arrête après un certain nombre d'itérations si jamais il y a divergence.

**6-  $Test_{conv}$  :** la fonction permet de fournir les variables  $a$ ,  $a'$ ,  $\phi$ ,  $Cl$  et  $Cd$  en fonction des coefficients d'induction, puis en respectant une convergence sur  $\phi$ . Elle se divise en deux blocs selon la valeur de la variable  $test$  qui est initialisée dans la fonction  $appel_{conv}$ . Dans chacun de ces blocs,  $a$ ,  $a'$ ,  $\phi$ ,  $\alpha$ ,  $Cl$  et  $Cd$  sont évalués à partir de  $\phi_1$  et  $\phi_2$ . Ces derniers vecteurs représentent respectivement la nouvelle et l'ancienne valeur de  $\phi$ . Enfin,  $Test_{conv}$  fournit la variable critère qui gère l'itération dans la fonction  $appel_{conv}$ .

**7-  $Calcul_{phi}$  :** la fonction évalue l'angle d'incidence en tenant compte des coefficients d'induction  $a$  et  $a'$  pour chaque élément de la pale.

**8-  $Calcul_{alpha}$  :** la fonction évalue l'angle d'attaque  $\alpha$ .

**9-  $Prandtl$  :** la fonction calcule le facteur  $f$  de Prandtl.

**10-  $V_{rel}$  :** la fonction calcule la vitesse relative au carrée en fonction de  $a$  et  $a'$ .

**11-  $Calcul_{torque}$  :** La fonction évalue le couple pour chaque élément de la pale. Le couple à l'extrémité est calculé avec les valeurs centrales du rayon et de la corde.

**12- Calcul int\_torque :** la fonction intègre le couple à partir de la méthode de trapèze. Étant basée sur la méthode d'intégration des trapèzes, la fonction multiplie le couple par le rayon pour chaque élément de la pale. Donc, chaque élément du vecteur intégral représente la surface d'un trapèze délimité par deux valeurs successives de rayon. La sommation est effectuée dans la fonction suivante.

**13- Calcul\_puissance :** la fonction évalue la puissance mécanique où la variable de la puissance est emmagasinée dans le vecteur intégral (nbrelement). La conversion de la puissance mécanique transmise au rotor en puissance électrique tient compte du rendement de l'éolienne. Ce dernier doit tenir compte des pertes du mécanisme (engrenages, frottement) et de la génératrice. En pratique, cette valeur se situe entre 90% et 97% [134]. Pour une étude strictement aérodynamique, nous la fixons à 100 %.

**14- Graphiques :** la fonction effectue les tracés des différentes valeurs du couple et de la puissance exprimée en fonction de la vitesse de rotation. La fonction a pour avantage de disposer l'ensemble des courbes associées à différentes valeurs de vitesses du vent, et de générer le couple mécanique de l'éolienne ainsi que les puissances équivalentes.

#### 4.2.1.5 Sous système électrique

La machine utilisée dans cette étude est une machine synchrone à aimant permanent (MSAP). Le modèle de MSAP utilisé dans cette étude est disponible dans la librairie SimPowerSystems de Matlab. C'est un modèle dynamique qui traite toutes les équations électriques et mécaniques. Les équations électriques sont exprimées dans le repère de Park<sup>3</sup> (plan dq). La figure 4.6 présente le bloc de la machine tel qu'il est dans Simulink.

---

<sup>3</sup> Transformée de Park : est un outil mathématique utilisé pour la commande vectorielle, afin de modéliser un système triphasé grâce à un modèle diphasé. Il s'agit d'un changement de repère [184].

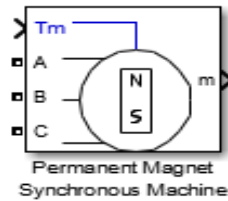


Figure 4.6: Bloc de MSAP sous Matlab/Simulink/SPS

Les pièces électriques et mécaniques de la machine sont représentées chacune par un modèle d'espace d'état de second ordre. De plus, le modèle suppose que le flux créé par les aimants permanents dans le stator est sinusoïdal, ce qui implique que les forces électromotrices sont sinusoïdales. Toute la démarche de modélisation de la machine est explicitée dans le volet «help» de la génératrice sous Matlab/Simulink [34]. Le mode de fonctionnement (moteur ou générateur) est déterminé par le signe du couple mécanique  $T_m$ , qui est négatif (mode générateur) dans notre cas et qui est généré par le programme élaboré précédemment dans ce modèle.

La connexion entre le système mécanique et électrique dans ce modèle sous Matlab est présentée dans la figure 4.7.

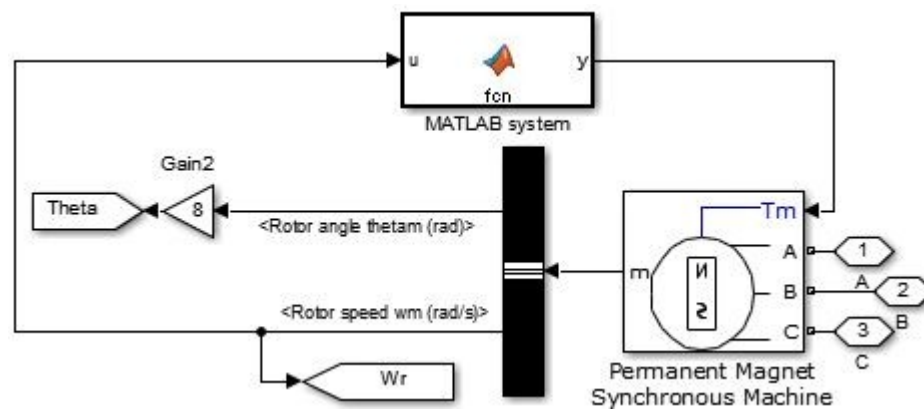


Figure 4.7: Modèle de système éolien



Le bloc de la fonction de transfert Matlab "fcn" intègre toutes les fonctions (sous forme de ligne de code) programmées dans le fichier Mfile de Matlab et il convertit la sortie "y" issue du programme en un signal d'entrée pour la machine synchrone (couple mécanique "Tm").

#### 4.2.2 2e Modèle de l'éolienne

La modélisation proposée ici divise l'éolienne en trois sous-systèmes : aérodynamique, mécanique et électrique. Chaque partie est exprimée par des modèles dynamiques issus de la bibliothèque de Matlab/Simulink et par des expressions mathématiques reliant les différents paramètres mécaniques et électriques de l'éolienne.

##### 4.2.2.1 Sous-système aérodynamique

La puissance produite par un vent traversant une surface S dépend du cube de la vitesse du vent V et de la densité de l'air  $\rho$  :

$$P_v = \frac{1}{2} S \rho V^3 \quad (4.18)$$

Où :  $S = \pi R_p^2$  , avec  $R_p$ : Rayon des pales.

Le modèle aérodynamique le plus simple est basé sur la théorie du disque [135] : un courant d'air traverse une section efficace, correspondant à la surface balayée par le rotor. Les théorèmes de conservation d'énergie et de conservation de la quantité de mouvement s'appliquent en aval et en amont du « disque ». Ce modèle ne comprend que la composante axiale de la vitesse incidente du vent et néglige l'influence du contrôle de lacet et des changements de direction du vent sur le couple résultant [136] . Évidemment, il ne doit caractériser que le fonctionnement du rotor et non le fonctionnement complet de l'éolienne [137]. Cette puissance est définie par [138]:

$$P_T = \frac{1}{2} S \rho C_p(\lambda, \beta) V^3 \quad (4.19)$$

Où :

$C_p(\lambda, \beta)$  : coefficient de puissance

$\rho$  : densité de l'air [ $\text{kg/m}^3$ ]

$S$  : surface des pales [ $\text{m}^2$ ]

$V$  : composante axiale de la vitesse du vent [ $\text{m/s}$ ]

Le couple aérodynamique ( $T_a$ ) est évalué en divisant la puissance disponible dans le vent par la vitesse de la turbine  $\Omega$  [130] :

$$T_a = \frac{P_a}{\Omega} = \frac{1}{2} \frac{v^3}{\Omega} \rho \pi R^2 C_p(\lambda) \quad (4.20)$$

Le schéma bloc de modèle Simulink du couple aérodynamique de l'éolienne est représenté sur la figure 4.8. Les variables d'entrée sont la vitesse du vent, l'angle de calage des pales et la vitesse de rotation de la turbine. La sortie est le couple aérodynamique.

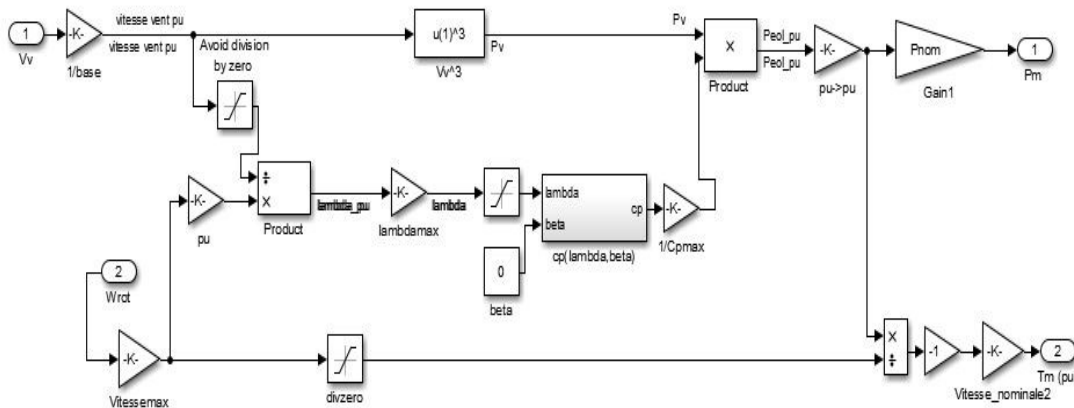


Figure 4.8 : Schéma du système aérodynamique développé sous Matalab/Simulink

#### 4.2.2.2 Sous système d'entraînement mécanique

L'entraînement mécanique permet la transmission de l'énergie captée par le rotor de la turbine vers l'arbre de la génératrice électrique. La dynamique au niveau de ce couplage peut être rigide ou flexible, explicitée par un modèle à une, deux ou trois masses en rotation.

Dans cette étude, le modèle adapté est à une seule masse en rotation et correspond à l'hypothèse d'un système à transmission dont le couplage est rigide. Selon [139-144], il est tout à fait acceptable de représenter l'entraînement mécanique d'une éolienne avec un modèle rigide à une masse. La difficulté majeure des modèles d'entraînement flexibles à deux ou trois masses est le paramétrage de la rigidité et de l'amortissement des arbres de transmission. De plus, il est à noter que la modélisation de la mécanique de l'éolienne utilisée dans la présente étude ne tient pas compte de la dynamique de déformation de la tour et des pales.

En plus des masses discrètes, l'entraînement mécanique peut être représenté par un modèle d'une génératrice à attaque directe ou avec une boîte de vitesse, représentée sur la figure 4.9 par  $G$  qui est le rapport entre les vitesses du rotor et de la génératrice :

$$G = \frac{\Omega_{méc}}{\Omega_{Turbine}} \quad (4.21)$$

La boîte de vitesse est un multiplicateur qui transforme la vitesse lente du rotor de l'éolienne en une vitesse beaucoup plus élevée et compatible avec la plage de la vitesse de fonctionnement de la génératrice électrique. Dans ce projet, la génératrice utilisée est de type synchrone à aimants permanents multi pôles. Cette machine fonctionne à basse vitesse, donc elle est compatible avec la vitesse de rotation de l'éolienne, dispensant l'utilisation de la boîte de vitesse. Par conséquent, le rapport de transmission du multiplicateur de vitesse sera fixé à 1:1, mais le modèle de ce dernier restera intégré dans le modèle global de la turbine éolienne. De cette façon, ce modèle pourra être utilisé dans des études futures pour n'importe quelle configuration d'éoliennes.

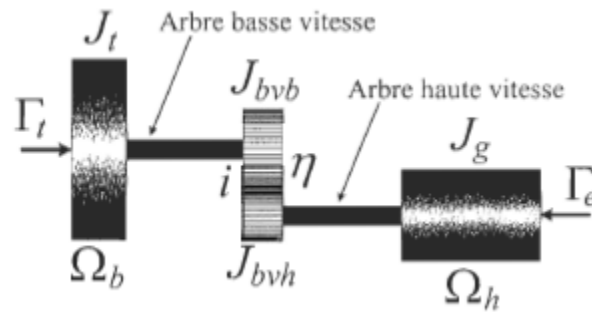


Figure 4.9 : Schéma du système d'entraînement mécanique [130]

Comme le couplage entre le rotor et la génératrice est considéré rigide, un seul terme regroupe l'ensemble des inerties des composantes en mouvement. Le terme rigide signifie que les arbres de transmission sont considérés comme infiniment rigides, c'est-à-dire qu'il n'existe jamais de différentiel de position entre les inerties  $J_t$  et  $J_{bvb}$  et les inerties  $J_{bvh}$  et  $J_{gén}$  [130].

$$J_{turbine} = J_{bvb} + J_t + (J_{bvh} + J_{gén})G^2 \quad (4.22)$$

$$J_g = \frac{J_{bvb} + J_t}{G^2} + J_{bvh} + J_{gén} \quad (4.23)$$

$J_t$  : inertie de rotation de la turbine [ $\text{kgm}^2$ ]

$J_{gén}$  : inertie de rotation de la génératrice [ $\text{kgm}^2$ ]

$J_{bvb}$ ,  $J_{bvh}$  : inerties des engrenages du multiplicateur de vitesse, côté lent et côté rapide [ $\text{kgm}^2$ ].

Ce système possède deux vitesses angulaires, soit  $\Omega_{turbine}$ , correspondant à la vitesse du rotor de l'éolienne (arbre à basse-vitesse) et  $\Omega_{mec}$ , correspondant à la vitesse du rotor de la génératrice (arbre à haute-vitesse). Le modèle devient alors un système à deux entrées [6], soit le couple aérodynamique et le couple électromagnétique de la génératrice, et à une sortie, soit la vitesse de rotation de l'arbre haute-vitesse. Pour notre système ayant une boîte de vitesse dont le rendement vaut 1, on s'est basé sur les équations de Newton pour représenter l'entraînement mécanique de l'éolienne comme suit [130] :

$$\dot{\Omega}_{mec} = \frac{1}{J_{turbine}} (T_{aér} - GT_{em}) \quad (4.24)$$

$$\dot{\Omega}_{gén} = \frac{1}{J_g} \left( \frac{T_{aér}}{G} - T_{em} \right) \quad (4.25)$$

Avec :

$\Omega_{mec}$  : vitesse de rotation de l'arbre du côté de la turbine [rad/s]

$\Omega_{gén}$  : vitesse de rotation de l'arbre du côté de la génératrice [rad/s]

$T_{aér}$  : couple aérodynamique [Nm]

$T_{em}$  : couple électromagnétique de la génératrice [Nm]

$J_{turbine}$  : inertie de rotation équivalente côté turbine [ $\text{kgm}^2$ ]

$J_g$  : inertie de rotation équivalente côté génératrice [ $\text{kgm}^2$ ]

$G$  : facteur de vitesse du multiplicateur

Et comme l'inertie de la génératrice est trop faible devant celle de la turbine, l'inertie globale de système devient [130]:

$$J = (J_{bvb} + J_{turbine}) \frac{\eta}{G^2} + J_{bvh} + J_g \quad (4.26)$$

Avec  $\eta$  : efficacité de l'engrenage

Et l'équation dynamique d'entraînement (1<sup>er</sup> ordre) devient alors :

$$\dot{\Omega}_{mec} = \frac{1}{J} (\eta T_{aér} - T_{em}) \quad (4.27)$$

#### 4.2.2.3 Sous-système électrique

Le sous-système électrique est représenté par la machine électrique, qui est responsable de la transformation de l'énergie mécanique en énergie électrique dans le système éolien. Sa représentation mathématique doit donc comporter une corrélation entre les deux types d'énergie. La machine électrique utilisée dans ce modèle est la même que celle utilisée dans le modèle précédent. Il n'est donc pas nécessaire de présenter sa modélisation détaillée.

La configuration globale du système éolien selon le 2<sup>e</sup> modèle est constituée du modèle aérodynamique, de l'entraînement mécanique et de la génératrice synchrone à aimants permanents. Les blocs interconnectés sont représentés sur la figure 4.10 :

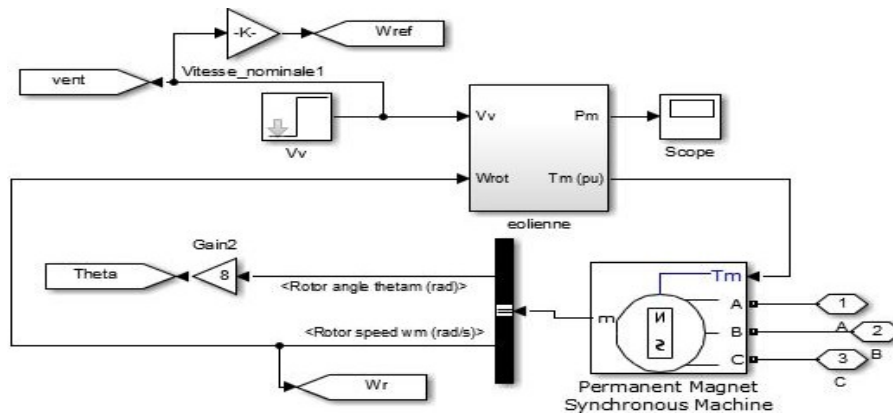


Figure 0.10 : structure du 2<sup>e</sup> modèle de système éolien sous Simulink/SPS

### 4.2.3 3e Modèle de l'éolienne

Les modèles de sous-système aérodynamique et de sous-système mécanique ici sont les mêmes que ceux utilisés dans le deuxième modèle de l'éolienne ; seul le modèle de sous-système électrique va subir des changements. Il est à noter que tous les systèmes sont modélisés dans Simulink/Matlab, sans aucun recours aux blocs de SPS.

Avant de procéder à la modélisation de la génératrice électrique, la théorie de transformation de référence doit être appliquée pour faciliter l'analyse de la machine et de la simulation.

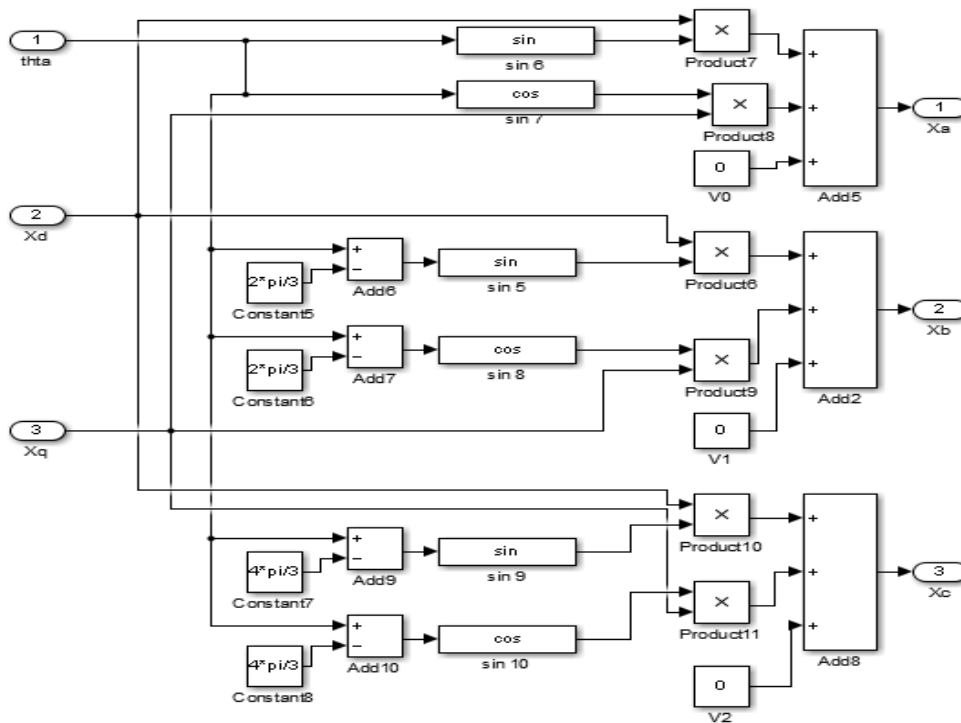


Figure 0.11 : Modèle de dq\_to\_abc

Si les équations différentielles de la machine synchrone sont exprimées dans le repère diphasé lié au stator (repère dq), le jeu d'équations différentielles régissant les tensions et les flux en fonction des courants est le suivant [129]:

Les tensions statoriques :

$$\begin{cases} V_d = R_s I_d + L_s \frac{dI_d}{dt} - \omega_r \Phi_{qs} \\ V_q = R_s I_q + L_s \frac{dI_q}{dt} + \omega_r \Phi_{ds} \end{cases} \quad (4.28)$$

Avec  $R_s$  ( $\Omega$ ) et  $L_s$  (H) sont la résistance et l'induction statoriques et  $I_q$ ,  $I_d$  sont respectivement les courants statoriques dans le repère de Park (A), et  $\Phi_{qs}$ ,  $\Phi_{ds}$  sont les flux statoriques dans le repère de Park (Wb).

Les flux statoriques :

$$\begin{cases} \Phi_{ds} = L_s \cdot I_d + \Phi_f \\ \Phi_{qs} = L_s \cdot I_q \end{cases} \quad (4.29)$$

Avec  $\Phi_f$  le flux efficace (Wb).

Le couple électromagnétique est exprimé comme suit [145] :

$$C_{em} = p (\Phi_{ds} I_q - \Phi_{qs} I_d) \quad (4.30)$$

Afin de pouvoir mettre en place des commandes mono-variables, une contre réaction non-linéaire capable de découpler le système sera élaboré à partir des équations régissant le régime dynamique du moteur. .

À partir des équations (4.28) (4.29) (4.30), il peut être écrit :

$$\begin{cases} V_d = R_s I_d + L_d \frac{dI_d}{dt} - \omega_r L_q I_q \\ V_q = R_s I_q + L_q \frac{dI_q}{dt} + \omega_r L_d I_d + \omega_r \Phi_f \end{cases} \quad (4.31)$$

Comme montré dans [145], après plusieurs transformations, le modèle électrique de la machine synchrone à aimants permanents peut être défini par les équations différentielles (écrites dans le domaine de Laplace) comme suit :

$$\begin{cases} \frac{I_d(p)}{V_d(p)} = \frac{1}{R_s + pL_d} \\ \frac{I_q(p)}{V_q(p)} = \frac{1}{R_s + pL_q} \end{cases} \quad (4.32)$$





#### 4.2.4 Comparaison et choix des Modèles :

Dans cette section, les limites et les avantages de chaque modèle sont comparés afin de déterminer le modèle éolien qui sera intégré dans le SHEDAC.

##### 1<sup>er</sup> modèle du système éolien :

Afin de démontrer les enjeux du premier modèle basé sur la théorie des éléments de pale, des résultats de simulation numérique ont été présentés (figure 4.14). Étant donné l'importance du couple mécanique de l'éolienne, qui est un des éléments les plus sensibles et les plus sollicités dans le couplage entre les parties mécanique et électrique d'un système éolien, il fera l'objet des critères d'évaluation de ce modèle.

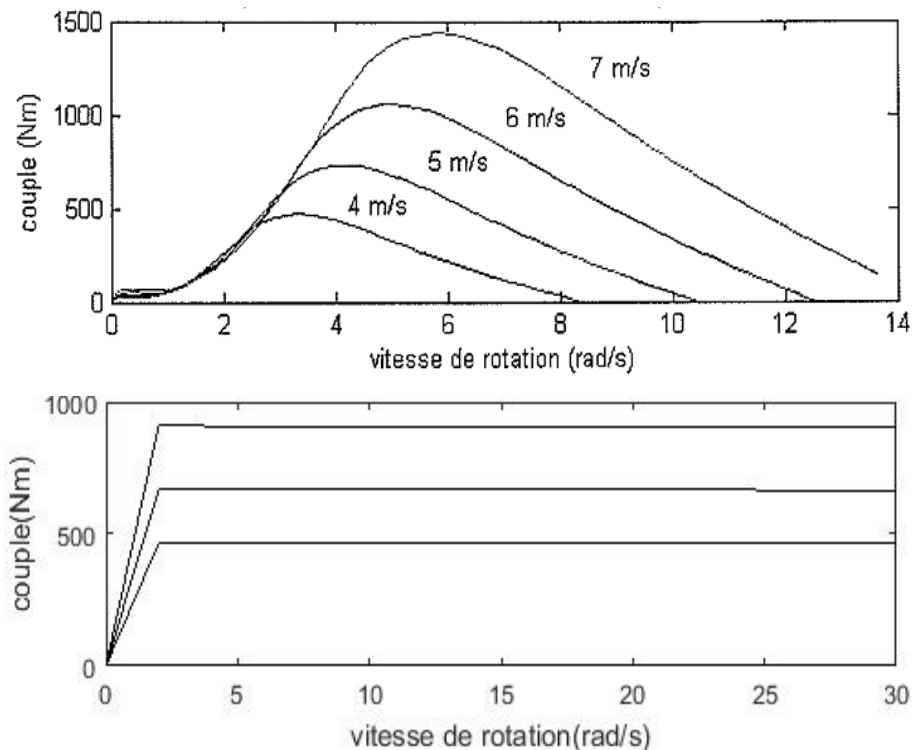


Figure 0.14 : Couple en fonction de la vitesse de rotation pour plusieurs vitesses de vent.

Dans un cas de test de ce modèle, la vitesse de rotation (2<sup>e</sup> figure) a été modifiée pour pouvoir évaluer le comportement du modèle et ainsi, sa flexibilité. Les simulations ont démontré que quand la vitesse de rotation devient trop élevée (2<sup>e</sup> figure 4.14), le programme n'est plus capable de générer le couple mécanique correspondant où ce dernier restera constant, quelque soit la vitesse de rotation. En effet, les fonctions  $a_{\text{prim}}$  et calcul  $\phi.m$  semblent être imposées dans plusieurs cas ( $\phi=90^\circ$  malgré qu'on a tenté d'utiliser d'autres expressions pour calculer  $a$  et  $a'$ , mais celle-ci menaient à des divergences). Le programme semble être trop restrictif ; une étude détaillée des valeurs possibles des coefficients d'induction serait nécessaire. Étant donné que le modèle prend en considération plusieurs aspects électriques et mécaniques, et qu'il aborde en détail le phénomène aérodynamique de l'éolienne, il prend beaucoup de temps de simulation (35 minutes) à cause de la grande quantité de boucles algébriques et de fonctions dans le programme principal. Par conséquent, ce modèle ne sera pas considéré, car il ne répond pas aux objectifs et son fonctionnement est limité tel qu'observé lors d'une augmentation de la vitesse de rotation de la génératrice où la simulation s'est complètement arrêtée.

### **2<sup>e</sup> et 3<sup>e</sup> modèle du système éolien :**

Les 2<sup>e</sup> et 3<sup>e</sup> modèles sont très similaires au niveau de la structure. Le 2<sup>e</sup> modèle est implémenté sur Simulink, mais utilise des modules de SPS tandis que le 3<sup>e</sup> modèle est élaboré seulement sur Simulink. La différence entre ces deux extensions de Matlab a été expliquée dans le 2<sup>e</sup> chapitre. Sans présenter de résultats numériques, la comparaison entre ces deux modèles pourrait se baser sur le type des modèles utilisés, le niveau de modélisation, du contrôle et de la flexibilité que présente chacun d'entre eux.

Le 2<sup>e</sup> modèle permet une analyse à long et à court terme et comprend des sous-modèles électriques et mécaniques détaillés indiquant une interaction entre les différentes variations. De plus, le branchement et la déconnexion d'appareils électriques ou d'électronique de

puissance sont très faciles à partir des blocs se trouvant dans la librairie de SPS. Il présente un degré de contrôle trop étendu. Toutefois, ce modèle utilise l'approche de suivi du point maximal de puissance « MPPT » (Maximum Power Point Tracking) qui est une commande pertinente pour le contrôle de la vitesse de rotation de l'éolienne. Ainsi, il intègre des blocs et des ports électriques au lieu des signaux, traitant l'amortissement des enroulements de la génératrice, les fluctuations de la fréquence du système et la stabilité de la tension. Il est judicieux de mentionner que ce modèle permet de contrôler plusieurs paramètres et de simuler le système pour plusieurs types et puissances de la charge.

Par contre, dans le 3<sup>e</sup> modèle sur Simulink, il faut implanter les équations mathématiques et les fonctions de transfert et ainsi, définir l'ordre de résolution du système. Cela peut ralentir la simulation du système et même l'arrêter complètement comme c'est arrivé à plusieurs reprises à cause de la quantité d'équations physiques et de problèmes dus à la non-linéarité de certaines équations.

Malgré que le 3<sup>e</sup> modèle soit trop détaillé, l'interaction entre les aspects électriques, mécaniques et aérodynamiques est difficile à observer. Ainsi, le 2<sup>e</sup> modèle est plus précis et rapide vis-à-vis la réponse aux perturbations. Il permet de concevoir avec précision des systèmes complexes multidomains et leurs commandes associées. Pour ces raisons, le 2<sup>e</sup> modèle est celui qui est retenu pour être intégré dans le SHEDAC.

## **4.2.5 Caractérisation des paramètres du système éolien**

### **4.2.5.1 Calcul de coefficient de puissance $C_p$**

Cette section est consacrée à la justification du choix des paramètres utilisés dans la modélisation de l'éolienne. La façon la plus simple pour caractériser le rotor est d'utiliser la courbe de coefficient de puissance, appelée courbe  $C_p$ . Le calcul de la courbe  $C_p$  est basé sur la géométrie du rotor et sur les principes d'aérodynamique des pales et de

conservation de la quantité de mouvement. Le rayon du rotor est le principal paramètre géométrique dans l'éolienne, mesurant dans le cas présent 8,3 m pour l'éolienne utilisée dans cette étude. La courbe exprimant la variation de  $C_p$  en fonction de la vitesse spécifique ( $\lambda$ ), caractérisant les performances aérodynamiques d'une éolienne, n'est pas toujours connue d'avance ou livrée par le manufacturier. C'est la raison pour laquelle une étude s'avère nécessaire pour définir le modèle de  $C_p$  qui doit être utilisé.

Une comparaison entre plusieurs modèles disponibles dans la littérature a été élaborée. Par la suite, les résultats des courbes de  $C_p$  issues des modèles ont été comparés par rapport à la caractéristique réelle du  $C_p$  d'une éolienne spécifique. Cette étude a permis d'adopter le modèle mathématique donnant la courbe la plus proche à la courbe réelle de  $C_p$ .

Réellement, il est impossible de récupérer 100% de l'énergie du vent en énergie mécanique pour une éolienne. La théorie de Betz est une approche simplificatrice découverte en 1920 par le physicien allemand Albert Betz. Elle donne la quantité maximale d'énergie cinétique que l'on peut extraire d'un flux d'air dans un domaine ouvert, indépendamment de l'éolienne utilisée [146], [147]. Il a déterminé cette limite en considérant les hypothèses suivantes :

- ★ l'écoulement est incompressible et stationnaire, et le raisonnement se fait en une dimension par des tranches uniformes.
- ★ l'air qui interagit avec le disque de l'hélice de l'éolienne est constitué d'un cylindre à l'infini amont, et d'un cylindre à l'infini aval.
- ★ l'interaction du vent environnant avec le sillage est négligeable.

Selon Betz, la puissance théorique maximale récupérable par un rotor d'éolienne est égale à  $16/27$  de la puissance incidente du vent qui traverse l'éolienne. Cette limite sera atteinte lorsque la vitesse du vent sera divisée par trois entre l'amont et l'aval de l'éolienne [148].

$$P_{extraite}^{max} = \frac{16}{27} P_{incidente} \quad (4.28)$$

La puissance incidente du vent est cinétique et dépend de la surface que le rotor de l'éolienne expose au vent, de la vitesse du vent et de la masse volumique de l'air. On peut regrouper ces paramètres selon ces formules [148] :

$$P_{incidente} = P_{cinétique} = \frac{1}{2} \rho S V_{amont}^3 \quad (4.29)$$

Et :

$$V_{aval} = \frac{1}{3} V_{amont}$$

Avec :

$\rho$  : masse volumique de l'air (1,20 kg/m<sup>3</sup> pour l'air à 20°C)

S : surface balayée par les pales de la turbine éolienne en m<sup>2</sup>

V<sub>amont</sub> : vitesse incidente (amont) du vent en m/s

La démonstration suivante permettra de mieux comprendre le processus de calcul pour obtenir le coefficient de puissance Cp. Cette démonstration repose sur les équations fondamentales de la mécanique des fluides (théorème de Bernoulli, théorème d'Euler) [127]. Pour toutes les variables ci-dessous, les indices 1 et 2 utilisés avec les variables correspondent respectivement à l'entrée et à la sortie des pales :

p: pression

V: vitesse de l'air

D<sub>m</sub> : débit massique d'air

F : force exercée par l'air sur le capteur éolien

P<sub>f</sub> : puissance développée par la force exercée

Dans le cas examiné, le débit massique est constant : D<sub>m</sub> = ρ.S.V = Cste

Considérons quatre points sur une même ligne de courant (figure 4.15) : un point en amont (sur  $S_1$ ), un point juste avant le capteur éolien proprement dit, un autre juste après, et un dernier en aval (sur  $S_2$ ).

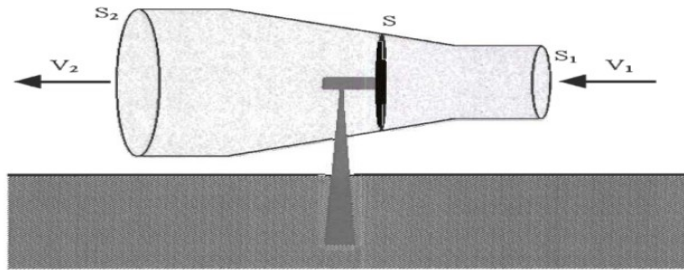


Figure 4.15 : Tube de courant autour d'une éolienne

D'une part, aux deux points loin du rotor, sur  $S_1$  et  $S_2$ , la pression est égale à la pression atmosphérique  $p_0$ . D'autre part, aux deux points proches du rotor, la section est égale à la surface  $S$ . De plus, comme le débit massique est constant, la vitesse du vent  $V$  est la même en ces deux points. En revanche, il y a une discontinuité de la pression entre ces deux points. En appliquant le théorème de Bernoulli deux fois, d'une part entre l'amont et le point juste avant, et d'autre part entre l'aval et le point juste après, on aura [127, 128]:

$$\frac{p_0}{\rho} + \frac{V_1^2}{2} = \frac{p_1}{\rho} + \frac{V^2}{2} \quad (4.30)$$

$$\frac{p_0}{\rho} + \frac{V_2^2}{2} = \frac{p_2}{\rho} + \frac{V^2}{2} \quad (4.31)$$

La soustraction de (4.30) – (4.31) donne :

$$p_1 - p_2 = \frac{\rho}{2}(V_1^2 - V_2^2) \quad (4.32)$$

La force exercée par le vent sur le capteur est décrite par :

$$F = (p_1 - p_2)S = \frac{\rho}{2}(V_1^2 - V_2^2)S = \rho S \frac{(V_1 + V_2)}{2} (V_1 - V_2) \quad (4.33)$$

Cette force peut aussi s'exprimer par l'application de la loi de Newton :

$$F = m \frac{dv}{dt} = Dm \cdot \Delta v = \rho S V (V_1 - V_2) \quad (4.34)$$

L'égalité des deux expressions (4.33) et (4.34) implique que :  $V = \frac{(V_1 + V_2)}{2}$ . La puissance développée par cette force peut s'écrire sous la forme de :

$$P_f = FV = \frac{\rho}{2}(V_1^2 - V_2^2)SV \quad (4.35)$$

On peut exprimer cette puissance en fonction de  $x$  (ratio de la vitesse), tel que  $x = \frac{V_2}{V_1}$ , et de  $P_0$  (la puissance incidente du vent non perturbé) comme suit :

$$P_0 = \frac{1}{2} \rho S V_1^3 \quad (4.35)$$

$$V = V_1 \frac{1+x}{2} \quad (4.36)$$

On obtient alors :

$$C_p = \frac{P_f}{P_0} = \frac{1}{2}(1 - x^2)(1 + x) \quad (4.37)$$

La figure 4.16 représente les variations du coefficient de puissance  $C_p$  de l'éolienne en fonction du ratio de vitesse  $x$ .

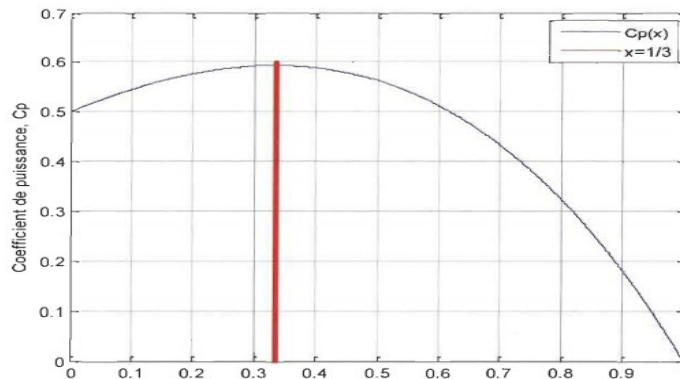


Figure 4.16: Coefficient de puissance.

Le maximum est atteint pour  $x = \frac{1}{3}$  et alors  $C_p = \frac{16}{27}$

On constate que la forme de la courbe de  $C_p$  est assez plate, ce qui signifie que le rendement reste légèrement bon même quand on s'éloigne significativement de



l'optimum. À ce niveau, l'éolienne considère la vitesse du vent en amont divisée par trois, et pour maintenir le même débit, la surface de sortie est multipliée par trois. C'est cette limite théorique, appelée limite de Betz, qui permet de fixer la puissance maximale extractible pour une vitesse du vent donnée. On définit, alors, un coefficient de puissance de l'aérogénérateur par la relation suivante :

$$C_p = \frac{P_{\text{extraite}}^{\text{max}}}{P_{\text{incidente}}} \quad (4.38)$$

Il est à noter que ce coefficient de puissance peut évoluer pour le même type de turbines en fonction du nombre de pales, mais sa valeur reste bien en dessous de la limite de Betz (0.59). D'ailleurs, le calcul est fait selon un certain nombre d'hypothèses qui font de ce maximum un majorant, et non un maximum atteignable [34], [135]. Cette limite n'est en réalité jamais atteinte et chaque éolienne est définie par son propre coefficient de puissance exprimée en fonction de la vitesse relative  $\lambda$ , représentant le rapport entre la vitesse de l'extrémité des pales de l'éolienne et la vitesse du vent. De plus, pour la même turbine, ce coefficient peut varier en fonction de l'angle de calage (beta), qui indique le degré d'inclinaison des pales.

Comme le montre la figure 4.17, le vent vu par la pale est un vent relatif, ayant une composante dans le sens de l'axe de rotation du rotor occasionnée par la masse d'air en déplacement, et une composante en quadrature avec l'axe de rotation occasionnée par le déplacement de la pale. Les performances du rotor ne peuvent pas être calculées pour un vent donné, puisque la pale voit un vent qui dépend de la vitesse de rotation. Évidemment, les performances du rotor doivent être calculées en fonction de l'angle d'incidence du vent relatif. La vitesse spécifique ( $\lambda$ ) est ainsi une grandeur adimensionnelle : le rapport de la vitesse tangentielle du bout de la pale  $w_r$  sur la vitesse du vent  $U$ , où  $r$  est la longueur de la pale (en m),  $w_r$  est la vitesse de rotation du rotor (rd/s) et  $U$  est la vitesse du vent (m/s).

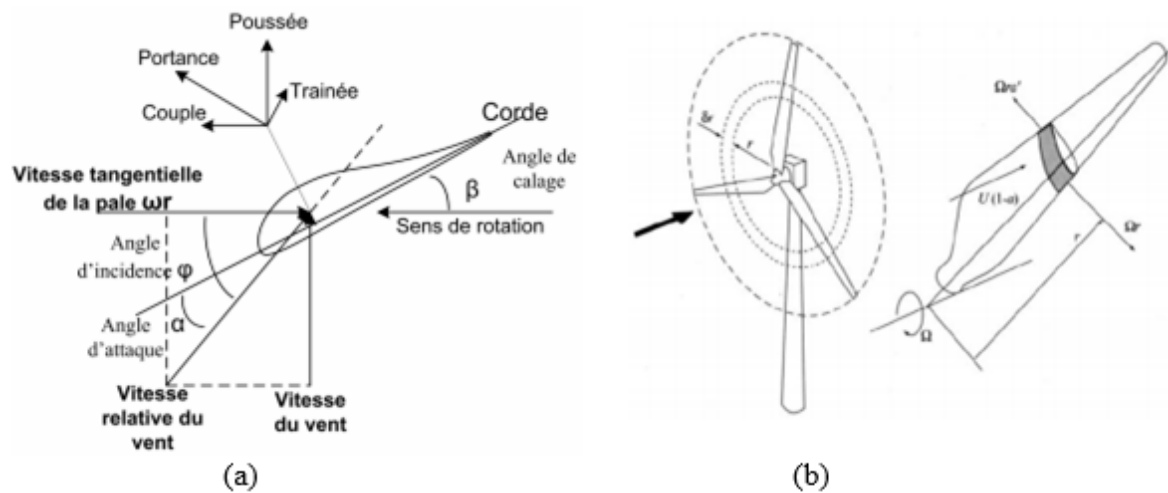


Figure 4.17 : (a) Représentation des éléments aérodynamique de pale, (b) profil d'une section de la pale du rotor [134].

Étant donné que le modèle de  $C_p$  est spécifique pour chaque éolienne, et que son calcul nécessite la connaissance de l'aérodynamique, certaines approximations numériques ont été développées et étudiées [141], [113]. Une revue des modèles numériques était nécessaire pour déterminer le modèle de  $C_p$  le plus convenable à intégrer dans cette étude. En effet, on a implémenté sur Matlab les modèles analytiques de  $C_p$  issus des travaux publiés dans [6], [137], [149], [150] pour des éoliennes utilisant une génératrice synchrone de type MSAP. Puis, une approche graphique a été utilisée pour comparer ces différents modèles avec un modèle réel de  $C_p$  livré par le TCE et propre à une éolienne Berguey Excel de 10 kW à base d'une génératrice MSAP.

Cinq modèles de coefficient de puissance ont été comparés, 4 modèles analytiques publiés dans des articles et des thèses se basant sur des modèles empiriques et un modèle réel de  $C_p$  (TCE). On présente les 4 modèles analytiques ci-dessous et le modèle de  $C_p$  de manufacturier (TCE) écrit sous forme de code sera présenté dans l'annexe C. Les expressions des 4 modèles sont comme suit :

**1<sup>er</sup> Modèle de Cp [137] :**

$$C_p = (0.144713\lambda - 0.00398(\lambda^2)) - 0.000286\lambda^3 - 0.34259047$$

**2<sup>e</sup> Modèle de Cp [149] :**

$$C_p = (0.36 - 0.00167(\beta - 2)) \times \sin\left(\frac{\pi(\lambda + 0.1)}{18.5 - (0.3(\beta - 2))}\right) - 0.00184(\beta - 3)(\beta - 2)$$

**3<sup>e</sup> Modèle de Cp [6] :**  $C_p = (0.5109 \times \left(\left(\frac{116}{\lambda_i}\right) - (0.4\beta) - 5e^{-\left(\frac{21}{\lambda_i}\right)}\right) + (0.0068\lambda)$

$$\lambda_i = \frac{(\lambda + (0.08\beta))(\beta^3 + 1)}{(\beta^3 + 1) - (0.035 \times (\lambda + (0.08\beta)))}$$

**4<sup>e</sup> Modèle de Cp [150] :**

$$C_p = 0.46 \times \left(\frac{151}{\lambda_i}\right) - 0.58\beta - 0.002 \times (\beta^2 - 13.2) \times e^{-\left(\frac{18.4}{\lambda_i}\right)}$$

$$\lambda_i = \frac{1}{\frac{1}{(0.02\beta + \lambda)} - \frac{0.003}{(\beta^3 + 1)}}$$

Ces équations ont été programmées sous forme des lignes de codes dans des fichiers script sous Matlab. Les résultats de cette étude, présentés dans la figure 4.18 ci-après, ont été générés sur Matlab en fonction de plusieurs vitesses spécifiques ( $\lambda$ ) et pour un même angle de calage (beta est fixe et égal à zéro).

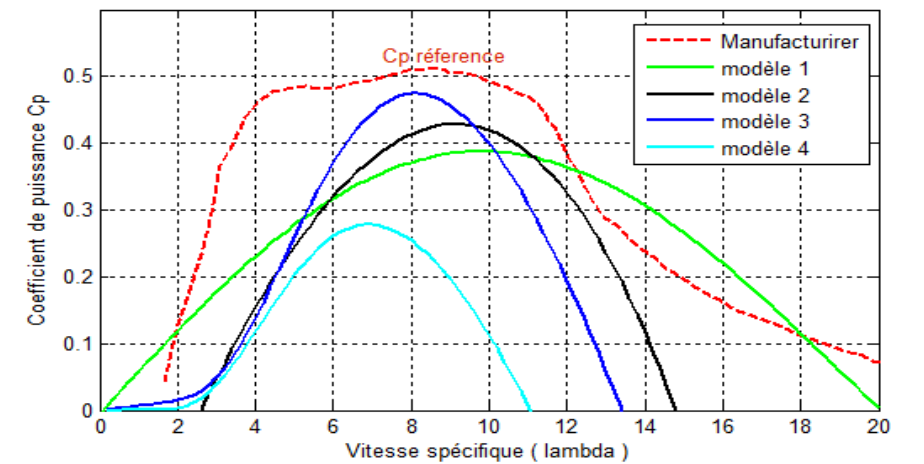


Figure 4.18 : Coefficient de puissance  $C_p$

Cette comparaison a permis de choisir le modèle analytique de coefficient de puissance le plus proche possible de celui du fabricant, et le plus efficace pour une extraction optimale de puissance dans le cas de notre éolienne.

Il est clair de constater sur cette figure que c'est le 3<sup>e</sup> modèle qui sera retenu, vu qu'il présente un coefficient de puissance assez proche de celui de la référence. En effet, le modèle 3 présente un coefficient de performance indiquant une efficacité de 46% pour une vitesse spécifique égale à 8.

Les modèles 1 [137], 2 [149] et 4 [150] ont été rejetés, car leurs coefficients de performance ne répondent pas au besoin de ce projet (ils conviennent à des éoliennes d'une puissance et de caractéristiques aérodynamiques différentes de celle de notre étude).

#### 4.2.5.2 Commande MPPT de l'éolienne

Il est important d'extraire le maximum de puissance et de limiter la puissance mécanique extraite pour les vitesses de vent supérieures à la vitesse nominale de l'éolienne. La limitation de la puissance peut être réalisée avec deux méthodes : électrique ou mécanique (contrôle du décrochage et de calage) [151]. Cependant, le contrôle

mécanique est présent uniquement dans les applications à grande échelle. Pour des applications de petite puissance, ce type de contrôle est quasiment absent, vu que cela induit des coûts supplémentaires, et qu'il est possible de substituer ce contrôle mécanique par un contrôle électrique, allégeant le coût de l'installation [151].

Le contrôle de la puissance par action électrique se fait en agissant sur la commande des interrupteurs de puissance, de manière à régler les paramètres électriques de sortie de l'alternateur, affectant la vitesse du rotor. La commande des circuits de l'électronique de puissance est gérée au moyen d'algorithmes qui cherchent constamment le point de fonctionnement permettant l'extraction de la puissance maximale. Ces algorithmes sont appelés « algorithme de recherche de puissance maximale » MPPT (Maximum Power Point Tracking) [151]. Ce type de contrôle est utilisé conjointement avec le contrôle mécanique pour des éoliennes de grande échelle. Il est caractérisé par un temps de réponse rapide. Pour les applications de petites puissances caractérisées par des éoliennes de calage fixe, le contrôle de la puissance MPPT est entièrement géré par la commande des dispositifs électriques [151].

Dans cette étude, la commande MPPT ne sera pas très détaillée, elle est juste utilisée dans l'objectif d'avoir plus de contrôle sur le système. Pour cela, on a appliqué une des approches de MPPT [152], qui est le tip speed ratio (TSR control)<sup>4</sup> [153], et on l'a intégré directement dans le modèle de l'éolienne sur Simulink tel qu'expliqué aux figures 4.19 et 4.20.

---

<sup>4</sup> TSR : est une méthode de contrôle qui force le système de conversion d'énergie à maintenir la vitesse de rotation de la turbine à la vitesse optimale. La vitesse relative en bout de pale  $\lambda$  (Tip Speed Ratio), calculée à partir de la vitesse du vent, de la vitesse de rotation de la turbine et du rayon de cette turbine.

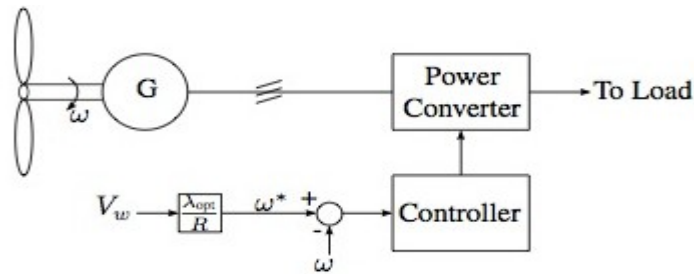


Figure 4.19 : principe de la commande MPPT : Tip speed ratio

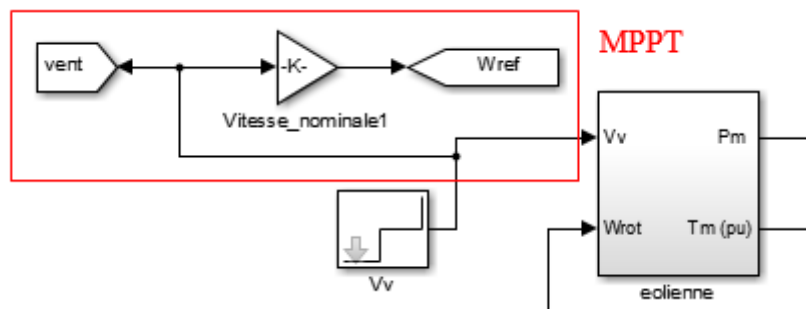


Figure 4.20 : Modèle de la commande MPPT développée sous Matlab/Simulink

#### 4.2.5.3 Contrôle et stabilité du système éolien : mise en place des convertisseurs

Pour contrôler la tension générée par la génératrice à aimants permanents, un convertisseur de puissance AC/DC/AC est utilisé (la même architecture adaptée au micro réseau du TCE).

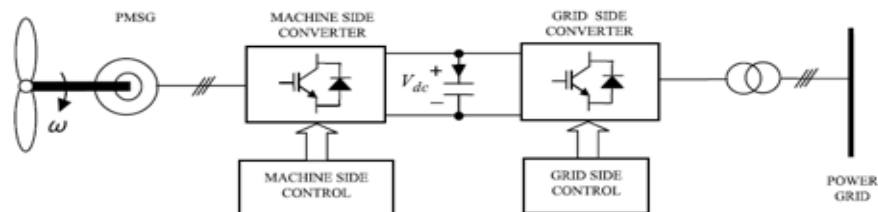


Figure 4.21 : Chaîne de conversion éolienne avec les convertisseurs

Tout d'abord, on connecte la PMSG (à travers les 3 phases A, B et C de la sortie de la PMSG dans le bloc de la turbine éolienne) à un redresseur suivi d'un bus continu tel que présenté à la figure 4.21. Pour ce redresseur (IGBT/Diode), on introduira la commande MPPT qui utilise la tension et le courant du bus, suivie d'un contrôle par hystérésis. Quant à l'onduleur (IGBT/Diode), qui présente le filtre actif, une commande indirecte est appliquée (expliquée au prochain paragraphe). Le filtre actif est nécessaire pour compenser et réduire au maximum les harmoniques des tensions et des courants, et ainsi, pour améliorer la qualité de l'énergie. Ensuite, le système peut être connecté au réseau ou couplé avec un GD. Des charges non-linéaires peuvent également être ajoutées pour évaluer le système et observer son comportement face à des perturbations, et s'assurer de la fonctionnalité prévue du filtre actif (cela sera présenté au chapitre 5).

❖ Commande du redresseur :

Après avoir effectué la commande MPPT (Figure 4.21), on prend l'erreur obtenue de la comparaison entre la vitesse de référence et la vitesse de la turbine et on effectue une transformation de Park inverse pour obtenir les courants de phase de référence. Puis, on les introduit avec les courants de phases mesurés dans un bloc d'hystérésis, ce qui permet de fournir les impulsions à envoyer à la gâchette des IGBT du redresseur.

❖ Commande indirecte des courants :

Cette commande est utilisée pour le filtre actif (onduleur IGBT/diode) illustré à la figure 4.22. Pour assurer cette commande, on a utilisé un régulateur PI qui permettra par la suite de comparer la tension du bus continu  $V_{dc}$  mesurée aux bornes du filtre actif avec une tension de référence  $V_{dc}$ . L'erreur ainsi obtenue sera utilisée comme entrée pour le régulateur PI, et la sortie de celui-ci sera une estimation du courant maximum de la source. Ce courant s'occupe de la puissance active que le filtre actif demande et des pertes de ce dernier. Ensuite, les tensions de la source des trois phases sont mesurées, et sont transformées en tensions unitaires, où elles seront multipliées par le courant maximum

qu'on a déterminé précédemment, afin d'obtenir les courants de référence des trois phases de la source. Puis, ces derniers seront comparés avec les trois courants de la source qu'on mesure et les erreurs obtenues seront utilisées pour la commande MLI (modulation par largeur d'impulsions).

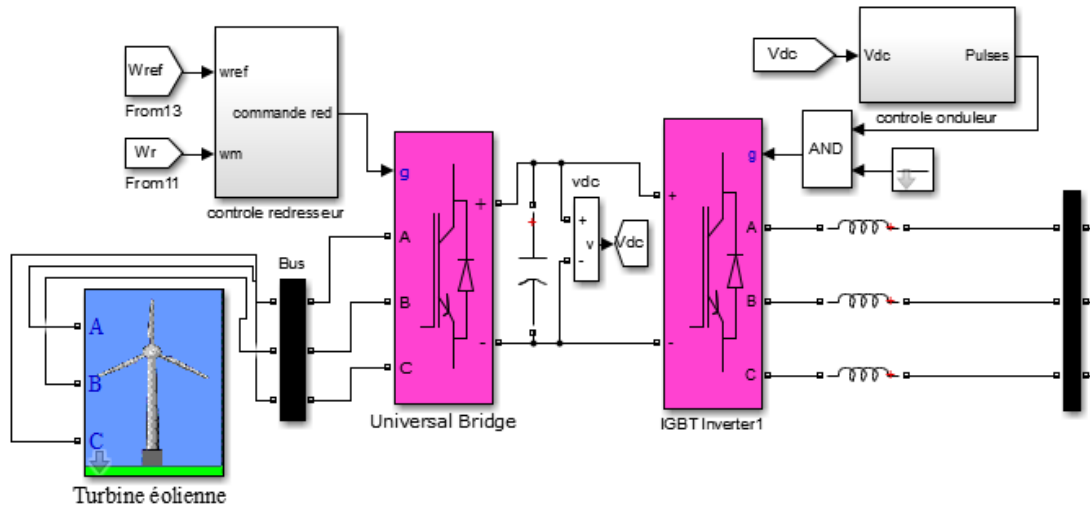


Figure 4.22 : Modèle du système éolien sous Matlab/Simulink

### 4.3 Revue des modèles de générateur diesel (GD) et modèle retenu

Diverses techniques de modélisation sont développées par les chercheurs pour modéliser le GD. Une revue bibliographique a permis d'identifier les modèles les plus pertinents dans le cadre de cette étude, et ainsi, de relever les avantages et les limites de chacun pour choisir celui qui représente le mieux la dynamique d'un GD. Quatre modèles ont été développés sous Matlab et analysés dans le cadre de l'étude du comportement dynamique du GD. Le plus approprié a été choisi.

Le GD est généralement composé d'un moteur diesel (MD) couplé à une génératrice synchrone (GS) tel qu'illustré sur la figure 4.23. La fréquence du courant alternatif à la sortie est maintenue par un régulateur de vitesse, qui fonctionne en ajustant le flux du



carburant entrant dans le moteur. Ce régulateur a pour objectif de garder la vitesse du MD et la vitesse du GS constante.

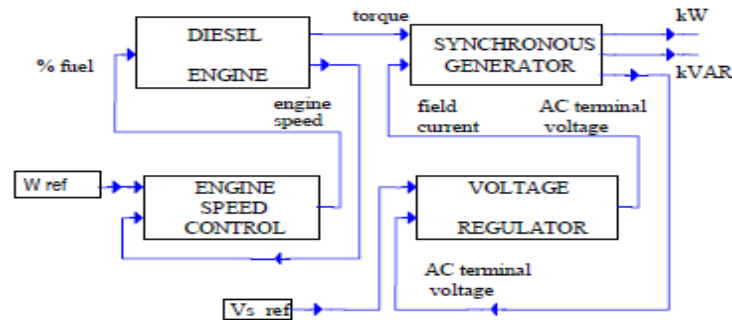


Figure 4.23 : Principe de fonctionnement du groupe diesel [154]

#### 4.3.1 1<sup>er</sup> Modèle du Générateur diesel

C'est un modèle développé sur Simulink décrit par des équations physiques, où chaque bloc et sous bloc est issu d'une équation (figure 4.24). La partie électrique du système est basée sur des lois de la physique, comme la transformation de Park pour modéliser la génératrice et le raccordement au réseau. Pour la partie mécanique, elle est représentée par un modèle de combustion interne [8], qui prend en considération le débit du carburant à injecter à partir d'une variation de la vitesse. De plus, l'efficacité thermodynamique du phénomène de la combustion et de la consommation du carburant peut être améliorée en optimisant l'air/carburant grâce à la possibilité de suralimenter par air comprimé.

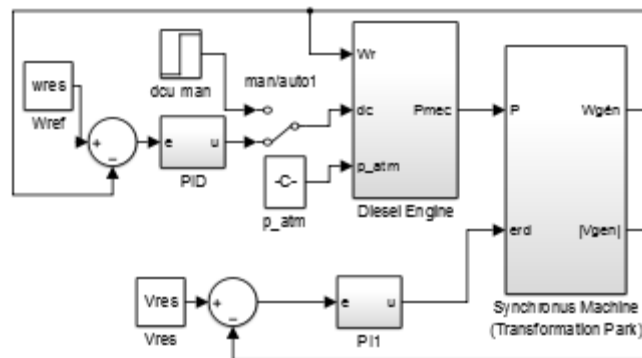


Figure 4.24 : Structure du modèle de générateur diesel sur Matlab/Simulink

Ce modèle est capable d'intégrer la suralimentation sauf qu'il prend beaucoup de temps pour la simulation, cela est dû à la grande quantité d'équations à traiter. Cette quantité de calcul est énorme pour la simulation dynamique et crée des problèmes de convergence à cause des boucles algébriques. En effet, cela ralentit la simulation et peut même parfois l'arrêter complètement. Malgré que la construction de ce modèle soit simpliste, sa simulation reste difficile, surtout que le modèle est fortement non-linéaire.

### 4.3.2 2<sup>e</sup> Modèle de générateur diesel

Ce modèle disponible dans la librairie Simulink de Matlab [155] est conçu pour les moteurs à essence. Il aborde des phénomènes purement mécaniques, tels que la modélisation du moteur à combustion interne à travers un contrôle de la valve d'injection de débit d'air et de pression à l'admission. Puisque ce modèle traite la partie mécanique d'un moteur en détail, on a tenté de l'adapter pour un générateur diesel en ajoutant la partie électrique (GS) avec des modifications apportées sur le bloc d'admission. La structure du modèle devient telle que montrée à la figure 4.25.

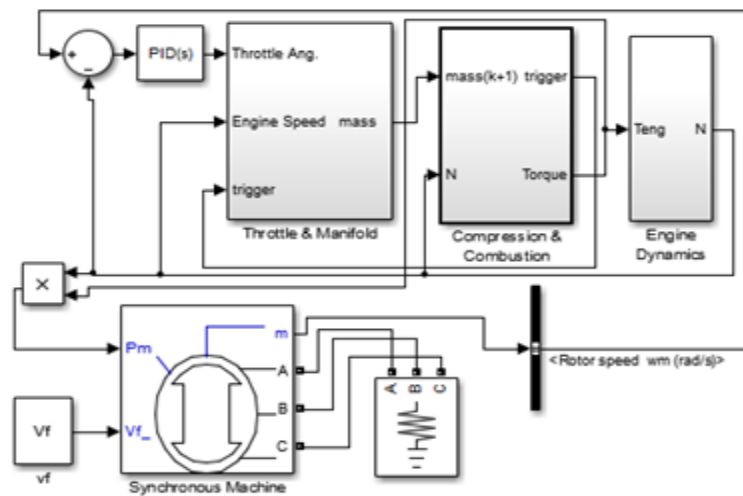


Figure 4.25 : Bloc de modèle de générateur diesel sur Simulink/SPS

Des principes physiques et des relations empiriques étaient utilisés pour décrire le comportement dynamique de ce système. Ce dernier a été en mesure de répondre, mais seulement pour de petites charges (de l'ordre de 10W) et pour un pas de temps trop réduit (de l'ordre de milliseconde). Le modèle ne présente pas une grande flexibilité du contrôle des paramètres ; ainsi il n'y a aucune interaction entre les paramètres mécaniques et électriques du GD. Toutefois, le modèle était trop spécifique et confirme sa validité pour une application spécifique se basant sur un moteur à essence.

### 4.3.3 3<sup>e</sup> Modèle de générateur diesel

C'est un modèle dynamique qui aborde des phénomènes électriques de stabilité. Il est utilisé dans la bibliothèque de Simulink [128] où la chaîne de modèle de combustion interne de moteur diesel est basée sur des actionneurs avec des modèles traditionnels simples pour représenter la partie mécanique de GD. La structure du modèle est présentée dans la figure ci-dessous 4.26.

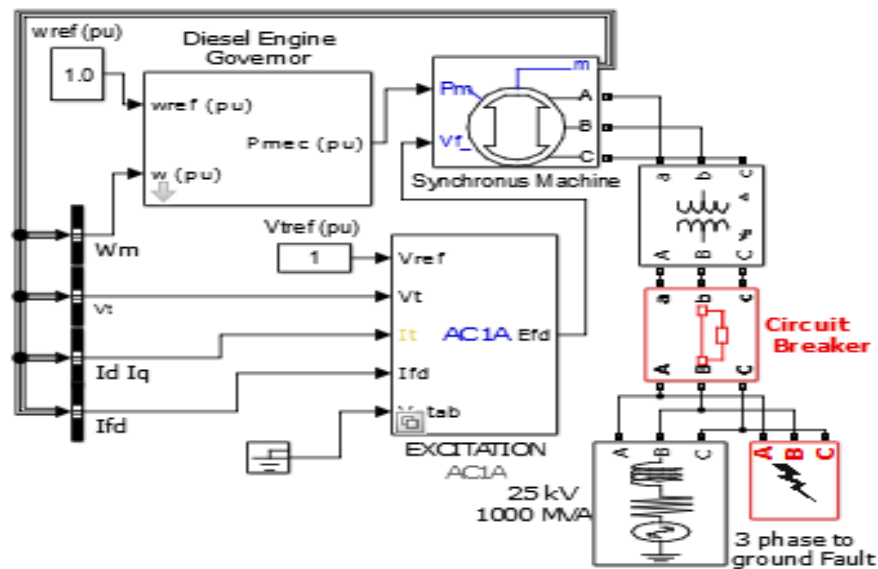


Figure 4.26 : Structure de modèle de générateur diesel dans la librairie Simulink/SPS

Bien que ce soit un modèle très enrichi permettant de voir les phénomènes de la stabilité électrique et les performances d'un GD (phénomènes transitoires de la tension et du courant, stabilité du système de puissance, étude de flux de la charge), les phénomènes mécaniques y sont absents. Le modèle mécanique du moteur diesel est considéré comme une entrée simple sous forme d'une fonction de transfert. Particulièrement, le modèle présente des réponses performantes seulement avec les centrales de grande puissance, mais ne répond pas aux systèmes de petites et moyennes puissances.

#### 4.3.4 4<sup>e</sup> Modèle de générateur diesel

C'est ce modèle qu'on a développé en se basant sur les points forts que présentait chaque modèle cité précédemment dans le but de créer un modèle dynamique complet qui aborde des phénomènes mécaniques et électriques en même temps. Le moteur diesel est basé sur un modèle mécanique de combustion interne [8] et la partie électrique est représentée par la génératrice électrique, tel que modélisé dans le 3<sup>e</sup> modèle (figure 4.27).

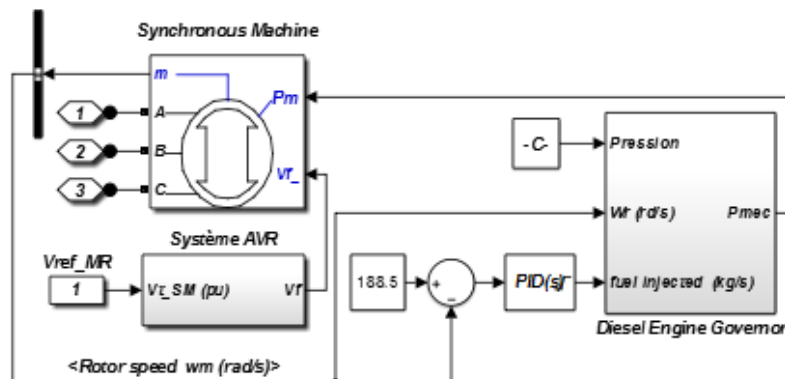


Figure 4.27 : Modèle électromécanique de générateur diesel sous Simulink/SPS

Le modèle est simple et représentatif, intégrant des structures modulaires électromécaniques. Il répond à des charges de différentes tailles, et ainsi, il présente les événements d'admission et de combustion du moteur. Ce système analyse les performances statiques et dynamiques et montre l'interaction entre le processus électrique et mécanique (entrée de débit massique de l'air, puissance du moteur mécanique, vitesse du générateur, carburant injecté). Ce qui est essentiel dans la création d'un modèle de ce type est de montrer la flexibilité d'agir sur plusieurs paramètres et d'observer immédiatement leurs effets sur le système. Par contre, du contrôle doit être intégré à ce modèle.

#### 4.3.5 Critères de comparaison

Pour choisir le modèle le plus représentatif d'un groupe diesel qui tient compte de la dynamique mécanique et électrique du processus de conversion d'énergie de combustion en électricité, plusieurs critères sont nécessaires :

- La modélisation de la partie mécanique et électrique du groupe électrogène (modèle à combustion interne, génératrice électrique ...)
- La flexibilité du modèle (changement de la charge, contrôle de débit du fuel, régulation de la vitesse ...)

- Le type d'application envisagée (application autonome, mobile)
- La possibilité d'intégrer la suralimentation dans le modèle (exemple : par air comprimé)
- La taille de la centrale autonome (grande, moyenne et petite puissance) : Cela veut dire si le modèle est capable de s'adapter à des systèmes de puissance différente ou non.
- Le type du modèle utilisé (comportementale ou fonctionnel, modèle bloc Simulink ou SPS)
- Les performances du modèle (précision, stabilité, erreur ...)
- Le niveau de complexité du modèle
- Le degré de liberté de la création des perturbations. Cet élément est nécessaire pour déterminer les limites de validité du modèle et son comportement.

#### **4.3.6 Modèle de GD choisi et sa structure détaillée**

Dans le tableau ci-dessous, les différents modèles sont classés selon les critères de choix définis dans la section précédente. Ce tableau permet de voir quel est le modèle qui répond le plus aux exigences de projet et qui représentera le mieux, le comportement dynamique d'un groupe diesel.

Tableau 4.1 : Comapraison des modèles de groupe diesel

Critère de choix	Modélisation mécanique & électrique	Flexibilité	Type d'application	Suralimentation	Taille de la centrale	Type du modèle utilisé	Performance	Niveau de complexité	Degré de liberté
Modèle de GD									
1 <sup>er</sup> Modèle	Électrique	Faible	Autonome	Oui	Oui	Bloc Simulink	Moyenne	Elevé	Faible
2 <sup>e</sup> Modèle	Mécanique	Faible	Mobile	Oui	Non	Bloc Simulink	Faible	Moyen	Très faible
3 <sup>e</sup> Modèle	Mécanique Électrique	Moyen	Autonome	Non	Non	Simulink /SPS	Elevé	Faible	Faible
4 <sup>e</sup> Modèle	Mécanique Électrique	Elevé	Autonome	Oui	Oui	Simulink /SPS	Elevé	Faible	Moyen

A partir de ce tableau, on peut déduire que c'est le 4<sup>e</sup> modèle qui se distingue parmi tous les autres modèles et qui répond majoritairement au critère de choix de groupe diesel, qui sera intégré dans le SHEDAC.

C'est un modèle permettant l'étude dynamique des interactions mécaniques, dépendamment d'une configuration particulière du système de conversion électrique. En effet, l'utilisation des équations électriques en régime permanent permet de mettre l'accent sur la dynamique des composantes mécaniques. De plus, une simulation basée sur un modèle mécanique détaillé représente une analyse préalable à un éventuel modèle global. Elle permet de cibler l'influence des composantes mécaniques sur la stabilité de la fréquence du système dans un modèle où la partie électrique est détaillée.

Le groupe électrogène modélisé dans cette étude se base sur les mêmes paramètres que celui installé au micro-réseau du TCE. C'est un groupe électrogène de la

compagnie CVT Corp d'une puissance de 50 kW, composé d'un moteur diesel, d'un système de transmission variable (CVT en anglais) et d'une génératrice synchrone à rotor bobiné. Le moteur diesel peut être suralimenté en air comprimé. Cet air provient de réservoir à air comprimé (voir section 4.4).

La figure 4.28 présente les blocs de modèle du GD avec le CVT tel qu'il est implémenté sur Matlab/Simulink.

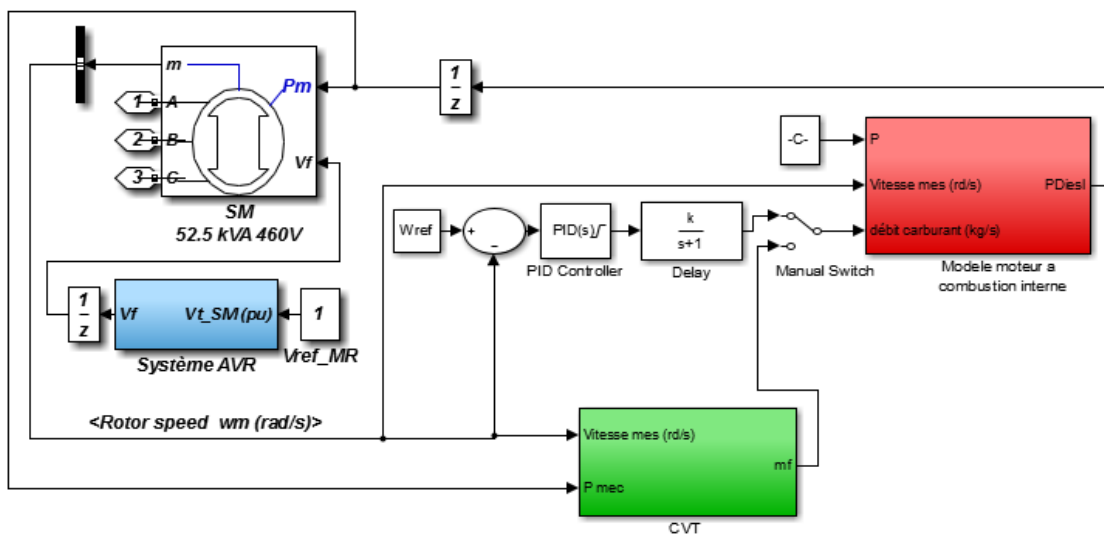


Figure 4.28 : Modèle de GD implémenté sur Matlab/Simulink

Pour modéliser ce système, quelques hypothèses doivent être préalablement prises en compte : les frottements sont négligés, la pression et la température en cours de processus d'injection et de combustion sont constantes. Même si cette particularité importe dans une étude thermodynamique et mécanique détaillée du moteur diesel, le niveau de modélisation de la présente étude n'en requiert pas une analyse exhaustive. Le processus de temps d'injection et le cycle thermodynamique de moteur ne seront considérés qu'implicitement dans une constante de temps  $T_c$  et un délai  $T_d$  associés au processus de combustion. Ainsi, en négligeant les dynamiques détaillées du cycle thermodynamique, la



modélisation du moteur diesel se résume en deux sous-systèmes : un relatif à l'aspect mécanique regroupant le système de l'admission, de la combustion, et le train de puissance, et l'autre, relatif à l'aspect électrique, représenté par la génératrice électrique et les régulateurs de vitesse et de tension (AVR).

#### 4.3.6. 1 Modèle de l'admission

À régime constant, le modèle de débit d'air se base sur l'équation de débit d'air théorique, qui peut remplir la cylindrée du moteur. Le débit d'air aspiré serait égal au débit d'air soufflé par le compresseur [8]. Notons qu'en cas d'une suralimentation par air comprimé, le débit d'air à l'entrée du moteur est contrôlé par une vanne à la sortie du réservoir d'air comprimé.

La quantité d'air admis dans le cylindre s'écrit comme suit :

$$\dot{m}_{DE} = \eta_{v_{DE}} \cdot W_{DE} \left( \frac{C_{y_{DE}}}{4\pi \cdot r} \frac{P_{in_{DE}}}{T_{in_{DE}}} \right) \quad (4.40)$$

Avec  $W_{DE}$ ,  $r$ ,  $P_{in_{DE}}$ ,  $T_{in_{DE}}$ , et  $C_{y_{DE}}$  sont respectivement : Vitesse angulaire du moteur diesel ( $\text{rd} \cdot \text{s}^{-1}$ ), constante des gaz parfaits ( $287 \cdot \text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ), pression d'air à l'admission du moteur diesel (Pa), température d'air à l'admission du moteur (K) et cylindrée totale de moteur diesel ( $\text{m}^3$ ).

Et  $\eta_{v_{DE}}$ , le rendement volumétrique de moteur modélisé par [32] :

$$\eta_{v_{DE}} = \alpha_0 + \alpha_1 W_{DE} + \alpha_2 W_{DE}^2 \quad (4.41)$$

Où les  $\alpha_i$  sont des constantes.

#### 4.3.6. 2 Modèle du fuel injecté

Le débit du fuel injecté est défini à partir d'une régulation de la vitesse de rotation de GS par rapport à la vitesse référence (1800 tr/min). Cette régulation est déterminée à l'aide d'un régulateur PID qui contrôle la différence entre la vitesse de référence et la vitesse de GS afin de définir la quantité de fuel à injecter dans le cylindre.

Ce régulateur est suivi d'un modèle de retard permettant de respecter la dynamique de l'actionneur et le temps de déplacement du piston en passant d'une action à une autre. Le modèle est présenté dans la chaîne de transfert ci-après (figure 4.29).

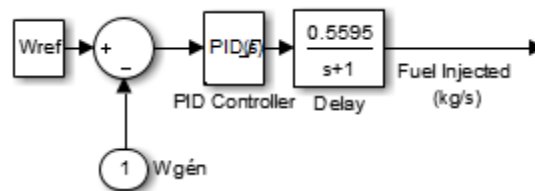


Figure 4.29 : Bloc de modèle du fuel injecté dans le cylindre

#### 4.3.6. 3 Modèle de moteur diesel

Le moteur fonctionne à régime constant (pour une charge donnée) afin de maintenir constantes la tension et la fréquence du courant fourni par l'alternateur. En fait, la modélisation du moteur diesel doit prendre en considération le débit de carburant injecté dans la chambre de combustion et le rendement indiqué du moteur [8]. Ainsi, la puissance mécanique de MD peut être exprimée par l'expression suivante [8] :

$$P_{mec} = f(W_{DE}\eta_{i_{DE}}) \quad (4.41)$$

Étant donné que le fonctionnement du moteur se fait toujours à régime constant (il n'y a pas de variations majeures, mais des changements d'un régime à un autre en fonction de la variation de la charge appliquée au moteur) et pour prendre en compte les limites physiques de la combustion, le rendement indiqué du moteur ( $\eta_{i_{DE}}$ ) a été modélisé comme suit et dépend seulement du rapport (air/fuel) [8] :

$$\eta_{i_{DE}} = a + b\lambda + c\lambda^2, \text{ si } \lambda > \lambda_{st}$$

$$\eta_{i_{DE}} = (a + b\lambda + c\lambda^2) \cdot \frac{\lambda}{\lambda_{st}}, \text{ si } \lambda < \lambda_{st}$$

a, b, et c sont des constantes, et  $\lambda_{st}$  est le rapport air/fuel stœchiométrique qui vaut 63 pour le carburant diesel [1].

#### 4.3.6. 4 Modèle de la machine électrique

La puissance mécanique  $P_{mec}$  fournie à la sortie du bloc « moteur diesel » est convertie en puissance électrique par une machine synchrone à rotor bobiné. Habituellement, les génératrices utilisées dans des groupes diesel sont des génératrices synchrones à rotor bobiné. Ces génératrices sont similaires à MSAP avec la différence que leur champ magnétique est généré par un électro-aimant (bobine) alimenté par circuit d'excitation auxiliaire. La machine synchrone peut fonctionner autant en mode moteur qu'en mode générateur. Elle est utilisée surtout en mode générateur dans le cas du groupe diesel. Le moteur diesel entraîne la génératrice dans les deux modes de fonctionnements : diesel seul (DO) et éolien-diesel (WD). Dans le cas où le vent est fort, l'éolienne est capable de servir seule la demande en puissance de la charge. La machine synchrone fonctionne comme compensateur synchrone ( $P_{mec}=0$ ) où son entrée est la puissance active provenant de l'éolienne afin de compenser les pertes dans la machine et fournit la puissance réactive dont la GS de l'éolienne a besoin. Le modèle de la machine synchrone utilisé dans cette étude vient de la librairie SPS/Simulink sous Matlab.

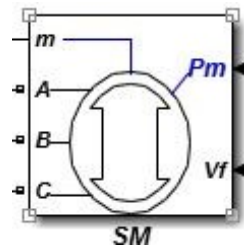


Figure 4.30 : Modèle de la machine synchrone dans la bibliothèque SPS/Simulink

#### 4.3.6. 5 Modèle du régulateur de tension AVR

Afin de contrôler la tension d'excitation de la MS et la quantité de puissance réactive générée ou absorbée, un circuit de commande doit être associé à la MS qui est résumée dans le régulateur de tension.

Le régulateur adopté dans cette étude convient à un modèle élaboré par Pierre Giroux [156], se trouvant dans la bibliothèque de Simulink, où les performances de régulation étaient testées et validées dans [156]. Son objectif principal est de contrôler l'angle de rotor et la tension aux bornes de la GS pour améliorer les propriétés de stabilité et pour obtenir une bonne réponse dynamique. Le modèle d'excitateur de la machine synchrone est représenté par le schéma Simulink dans les figures 4.31 et 4.32 (la fonction de transfert entre la tension d'excitation  $V_f$  et la tension du régulateur) :

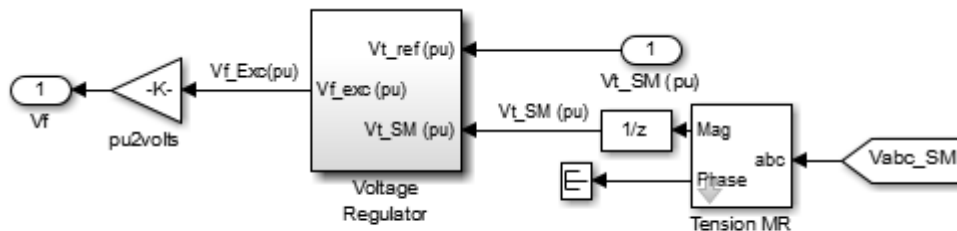


Figure 4.31 : Bloc Simulink de modèle du régulateur de la tension de la MS

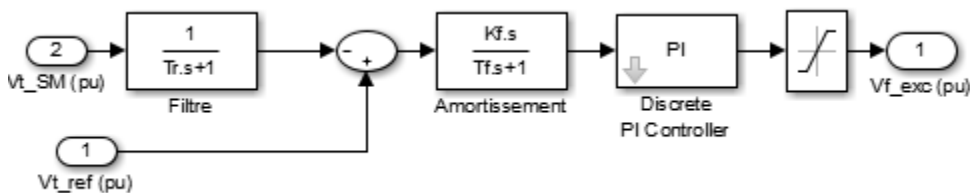


Figure 4.32 : Modèle du régulateur de la tension élaboré par [156]

Le régulateur de la tension comporte deux entrées : la première entrée est la tension de référence et la deuxième entrée est la tension provenant de la machine synchrone à laquelle le régulateur est branché. La tension d'excitation de la machine est obtenue en appliquant la racine carrée à la somme des carrés des tensions  $V_d$  et  $V_q$  de la MS. D'abord, un filtre est utilisé pour filtrer cette grandeur avant de la soustraire à la tension de référence  $V_{ref}$ . Un circuit d'amortissement est également introduit afin de retourner la sortie filtrée et soustraite. Ensuite, l'erreur totale est régulée à travers un simple proportionnel avec un filtre passe-bas. Enfin, la tension d'excitation passe par un limiteur avant d'être reliée à la génératrice (voir la figure 4.32).

#### 4.3.6.6 Modèle de transmission à vitesse continue (CVT)

L'ajout de la transmission à géométrie variable permet de contrôler le moteur diesel pour qu'il tourne à son meilleur régime. Ce régime de fonctionnement est évalué selon une table de correspondance entre la puissance du diesel et sa vitesse de rotation. La table de correspondance utilisée provient d'un document de la compagnie CVT Corp, où une courbe de puissance en fonction de la vitesse de rotation est illustrée dans l'annexe E.

Le modèle de CVT est intégré avec le même modèle du groupe électrogène présenté précédemment. Seul le modèle du fuel injecté est modifié pour introduire le modèle de CVT comme présenté sur la figure 4.33.

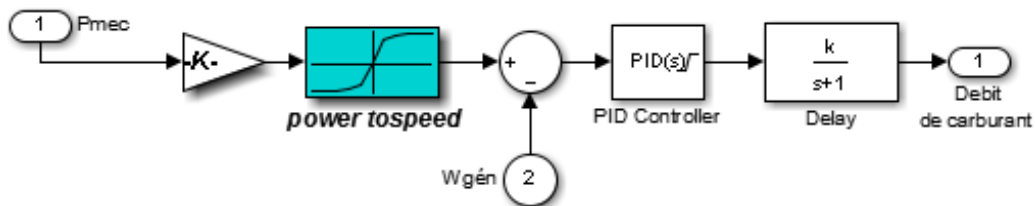


Figure 4.33 : Modèle de la transmission à géométrie variable intégré dans le GD

#### **4.4 Modélisation du système d'air comprimé**

Le sous-système d'air comprimé est composé de sept composants : un redresseur/onduleur, un moteur asynchrone à cage d'écureuil, un compresseur à air, un réservoir, un échangeur, un filtre à air et une vanne. Ce sous-système doit communiquer avec le groupe diesel. En effet, le système d'air comprimé doit connaître la pression dans les cylindres du moteur diesel et inversement, le moteur diesel doit connaître le débit d'air injecté par le réservoir d'air comprimé.

##### **4.4.1 Moteur asynchrone à cage d'écureuil**

Les moteurs électriques constituent le moyen le plus courant d'entraînement des compresseurs. En tant que moteurs d'entraînement, ils doivent délivrer une puissance suffisante pour démarrer le compresseur, l'accélérer jusqu'à sa pleine vitesse, et assurer son fonctionnement dans les diverses conditions prévues. La plupart des compresseurs d'air utilisent des moteurs électriques triphasés à induction classique. Le moteur entraînant le compresseur est mis en marche ou en arrêt en fonction de la pression de refoulement de la machine. Dans ce mode, un pressostat délivre le signal de marche/arrêt du moteur. Les stratégies de régulation tout ou rien conviennent généralement aux compresseurs d'une puissance inférieure à 30 HP [31].

Le modèle du moteur asynchrone adapté dans cette étude est pris de la librairie de Simulink. Ainsi, tous ses paramètres de dimensionnement sont extraits à partir de la fiche technique du moteur utilisé au micro réseau du TCE.

##### **4.4.2 Modèle du compresseur à air**

Le compresseur, caractérisé par son taux de compression, son débit de refoulement et le nombre d'étages de compression, est supposé être entraîné par un moteur électrique. Il doit pouvoir fournir un débit d'air qui varie en fonction du surplus de puissance éolienne variable absorbée directement par le moteur électrique. De plus, il doit

avoir un taux de compression élevé dans le but de diminuer le volume de stockage [8]. Le choix de type de compresseurs, leur nombre d'étages et leurs dispositions ne font pas partie de cette étude. Donc, on utilise ici un compresseur volumétrique alternatif à pistons qui a un débit de refoulement variable et qui se compose de trois étages associés en série (figure 4.34).

La compression multiétage permet un meilleur rendement volumétrique et une température moins élevée à la sortie de chaque étage, et ainsi une absorption très faible de la puissance [8]. Les compresseurs à piston multi-étages fonctionnent à faible vitesse et assurent un bon rendement sur toute la plage de régime du fonctionnement, assurant plus de fiabilité au système même en cas de panne ou de dysfonctionnement d'une machine. Toutefois, l'installation des refroidisseurs entre les étages est indispensable pour garantir un fonctionnement optimal du compresseur [8].

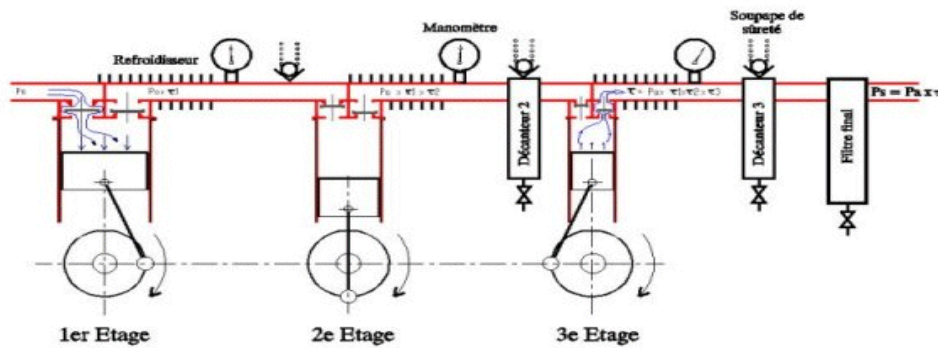


Figure 4.34 : Compresseur multi-étages en série

Les entrées du compresseur sont la vitesse du moteur électrique et le couple résistant appliqué au compresseur afin de déterminer la puissance de compresseur et pour pouvoir calculer le débit massique à la sortie du compresseur comme suit [35]:

$$\dot{m}_{comp} = P_{comp} \cdot \eta_{p_c} \left( \frac{1}{c_{p,c} T_{in,c}} \right) \left[ \frac{1}{(\pi_c)^{\frac{\gamma_A - 1}{\gamma_A}} - 1} \right] \quad (4.42)$$

$\gamma_A$  est le coefficient polytropique de l'air,  $\eta_{p_c}$  est le rendement polytropique du compresseur,  $C_{p_c}$  est la chaleur spécifique à pression constante de l'air comprimé traversant le compresseur et  $\pi_c$  est le taux total de compression défini en fonction du taux de compression dans chaque étage  $\pi_{i_c}$ , comme suit :

$$\pi_c = \frac{p_{ou_c}}{p_a} = (\pi_{i_c})^{N_c}$$

$$\pi_{i-c} = \frac{p_1}{p_a} = \frac{p_2}{p_1} = \frac{p_3}{p_2} = \frac{p_{N_c}}{p_{N_c-1}} = \frac{p_{ou_c}}{p_{N_c-1}}$$

Où  $N_c$  est le nombre d'étages du compresseur.

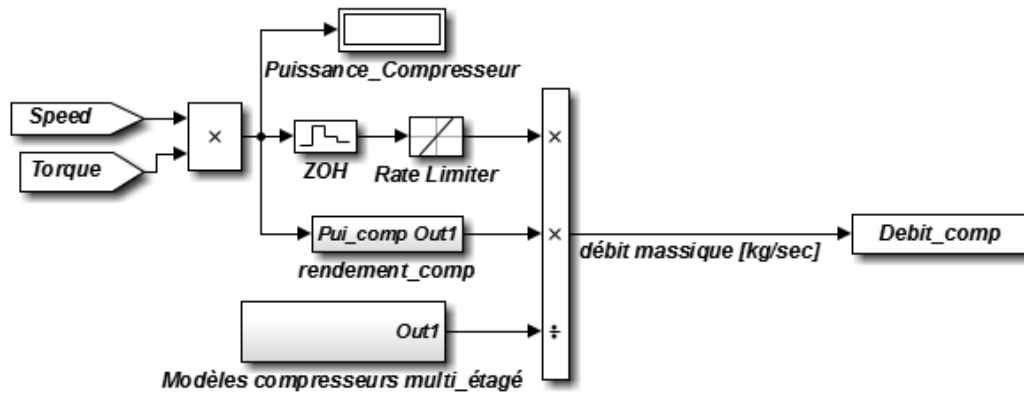


Figure 4.35 : Implantation du modèle de compresseur dans Simulink



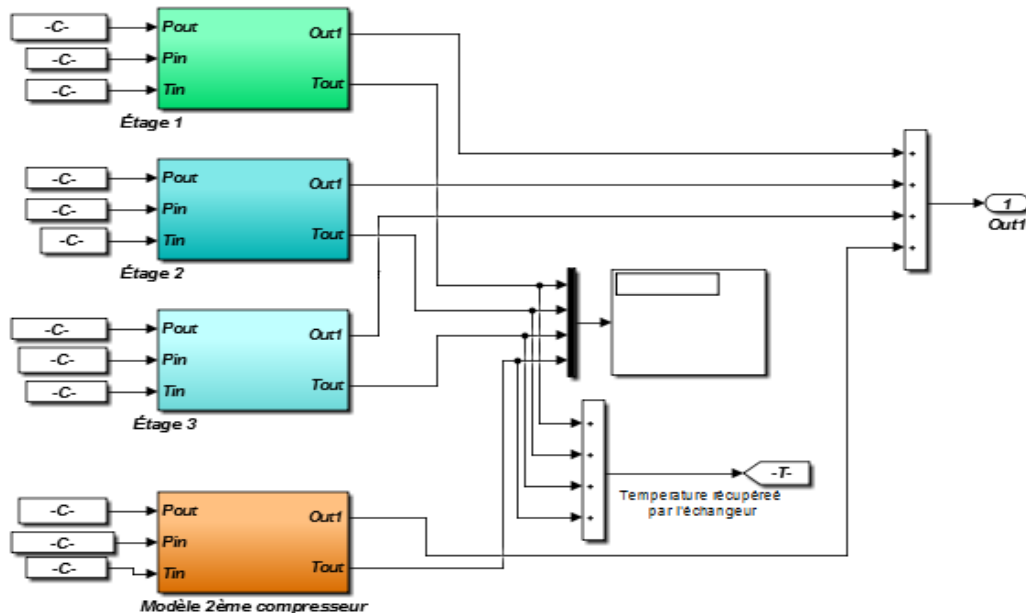


Figure 4.36 : Implantation de bloc du modèle de compresseur multi étage dans Simulink

#### 4.4.3 Modèle de réservoir

Le réservoir permet de stocker l'énergie excédentaire (produite en heures creuses par l'éolienne) sous forme d'air comprimé pour ensuite l'utiliser en heure de pointe. Ce stockage peut se faire de deux façons, soit à pression constante ou à volume constant. Dans le cas où la pression de stockage est constante, il convient de prévoir un réservoir d'eau supérieur pour compenser hydrauliquement les fluctuations de pression pendant le remplissage et la vidange afin de pouvoir maintenir constante la pression d'air à l'intérieur du réservoir de stockage. Dans le cas où le volume est constant, la pression varie en fonction de la charge et de la décharge du réservoir d'air comprimé. Le taux de variation de la pression dépend de la capacité de stockage, de l'autodécharge ainsi que de la quantité d'air comprimé chargé et déchargé du réservoir [8].

Le volume nécessaire pour un stockage à pression constante est toujours inférieur à celui pour un stockage à volume constant [36]. Néanmoins, ce dernier est la

solution adoptée dans ce projet vu que le système d'air comprimé installé au micro réseau du TCE à Rivière-au-Renard est basé sur le principe de stockage à volume constant. Notamment, ce choix est privilégié pour le SHEDAC pour plusieurs avantages et selon différents critères qu'on peut trouver en détail dans [8].

Le modèle de réservoir est exprimé par une équation mathématique gouvernant la pression obtenue à partir de la théorie des systèmes ouverts pour le cas polytropique. Le cas polytropique signifie que le produit  $p.V^m$  est constant, où  $m$  est le coefficient polytropique (défini  $m=1$  dans notre étude) [157]. La pression à la sortie du réservoir est exprimée comme suit :

$$\dot{p}_{stock} = \frac{m.R.T_{stock}}{V_{stock}} (\dot{m}_{in} - \dot{m}_{out}) \quad (4.43)$$

$R$  est la constante spécifique de l'air considéré comme gaz parfait,  $T_{stock}$  est la température dans le réservoir,  $V_{stock}$  est le volume du réservoir et  $\dot{m}_{in}$ ,  $\dot{m}_{out}$  sont respectivement les débits en entrée (compresseur) et en sortie des réservoirs. L'équation 4.42 est implémentée dans Matlab/Simulink à la figure 4.37.

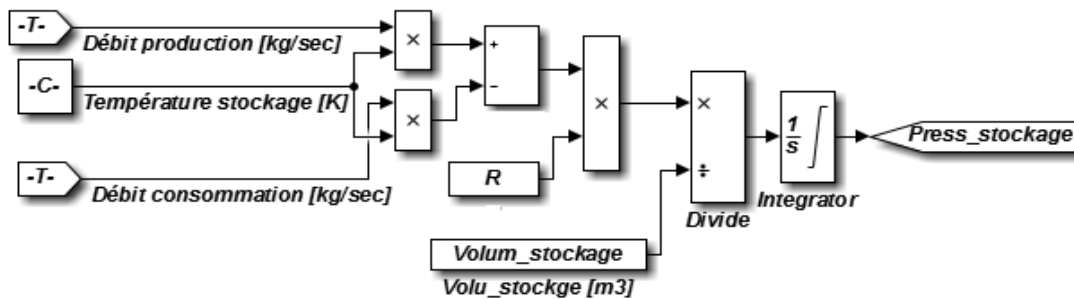


Figure 4.37 : Implémentation de bloc du modèle du réservoir dans Simulink.

#### 4.4.4 Modèle de l'échangeur

À la sortie du compresseur, il y a présence d'un échangeur à air qui permet de réduire la température de l'air comprimé qui se dirige vers le réservoir (figure 4.38). Le

refroidissement se fait à pression constante. La température de l'air à la sortie de l'échangeur  $T_{éch}$ , peut être calculée via l'équation 4.44 [158] :

$$T_{éch} = (1 - \eta_{éch}) \cdot T_{comp} + \eta_{éch} T_{air\_cool} \quad (4.44)$$

$\eta_{éch}$  est le rendement de l'échangeur et  $T_{air\_cool}$  est la température de l'air du refroidisseur.

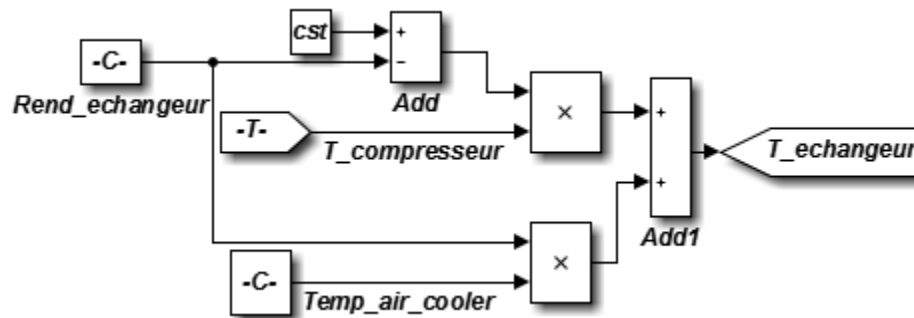


Figure 4.38 : Implémentation de bloc du modèle de l'échangeur dans Simulink.

#### 4.4.5 Filtre à air

Le filtre à air élimine l'humidité, l'huile et les impuretés de l'air comprimé. La température et la pression après le filtre à air peuvent donc être exprimées par les équations suivantes [30] :

$$P_{in\_FA} = p_{out\_FA} - \frac{\dot{m}_{CAES}^2}{\rho_{CAES}} \cdot k_{FA} \quad (4.45)$$

$$T_{out\_FA} = T_{in\_FA} \left( \frac{p_{out\_FA}}{p_{in\_FA}} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} \quad (4.46)$$

$\gamma$  est le coefficient adiabatique,  $k_{FA}$  est le coefficient des pertes de charge singulières dans le filtre à air,  $\dot{m}_{CAS}$  est le débit massique d'air comprimé traversant le filtre d'air,  $p_{in\_FA}$ ,  $T_{in\_FA}$ ,  $p_{out\_FA}$  et  $T_{out\_FA}$  sont respectivement les pressions et les températures d'air comprimé avant et après le filtre à air. Le modèle de filtre est développé sous Simulink dans la figure ci-après (figure 4.39) :

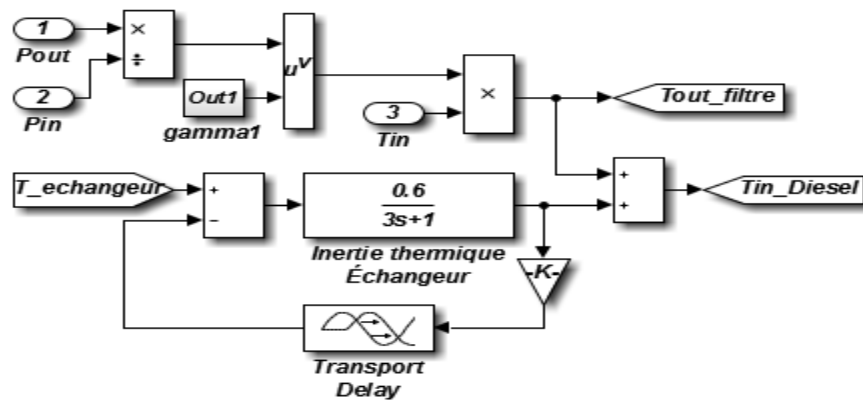


Figure 4.39 : Implémentation de bloc du modèle de filtre dans Simulink

#### 4.4.6 Modèle de la vanne de suralimentation

Le modèle de la vanne a été obtenu à partir de [159]. La vanne de suralimentation doit fournir au moteur le débit massique nécessaire pendant tout le processus de suralimentation. L'écoulement d'air à travers la valve est supposé être isentropique, l'expression est donnée par :

$$\dot{m}_v = u_v \cdot \frac{p_t}{\sqrt{R \cdot v_t}} \cdot \psi \left( \frac{p_t}{p_{im}} \right) \quad (4.46)$$

Où  $\Psi$  est la fonction de débit,  $u_v$  est le signal de commande de la valve,  $p_t$  est la pression du réservoir et  $p_{im}$  est la pression à l'admission du moteur Diesel.

En conclusion, le modèle du système d'air comprimé est développé sous Simulink, comme le montre la figure 4.40 ci-après, où la connexion entre les différentes composantes se fait à travers les ports du signal, reliant les sorties et les entrées d'un système à un autre.

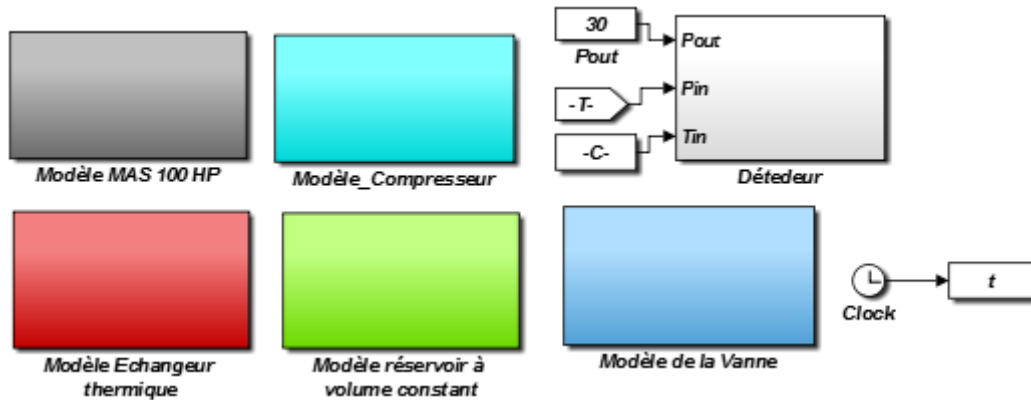


Figure 4.40 : Modèle du système d'air comprimé développé sous Matlab/Simulink

#### 4.5 Couplage du système éolien-diesel avec stockage par air comprimé

Plusieurs scénarios et stratégies existent pour connecter ces systèmes. Dans cette étude on a admis un scénario défini d'avance dans le plan du projet, où la modélisation du système hybride éolien diesel-stockage d'air comprimé se fait à moyenne échelle [8].

L'idée fondamentale consiste à transférer l'excès de l'énergie éolienne produit durant les périodes venteuses ( $TPP > 100\%$ ) aux périodes de demande élevée ou aux périodes moins venteuses ( $TPP < 100\%$ ), en utilisant seulement une fraction du combustible qui serait consommé par le moteur diesel. En effet, durant les périodes de haute pénétration ( $TPP > 100\%$ ), la centrale éolienne alimente la charge et l'énergie éolienne excédentaire disponible est utilisée pour comprimer de l'air frais avec un compresseur et le stocker à haute pression, après l'avoir refroidi via un échangeur de chaleur, dans des réservoirs souterrains. L'air comprimé détendu et réchauffé par le système de refroidissement du moteur sera ensuite injecté dans le collecteur d'admission du moteur diesel d'une façon directe.

Sachant que les éléments du SHEDAC sont modélisés (éolien, diesel, air comprimé), les blocs représentant chaque composante peuvent être connectés de la façon suivante (figure 4.41) pour obtenir le simulateur de SHEDAC.

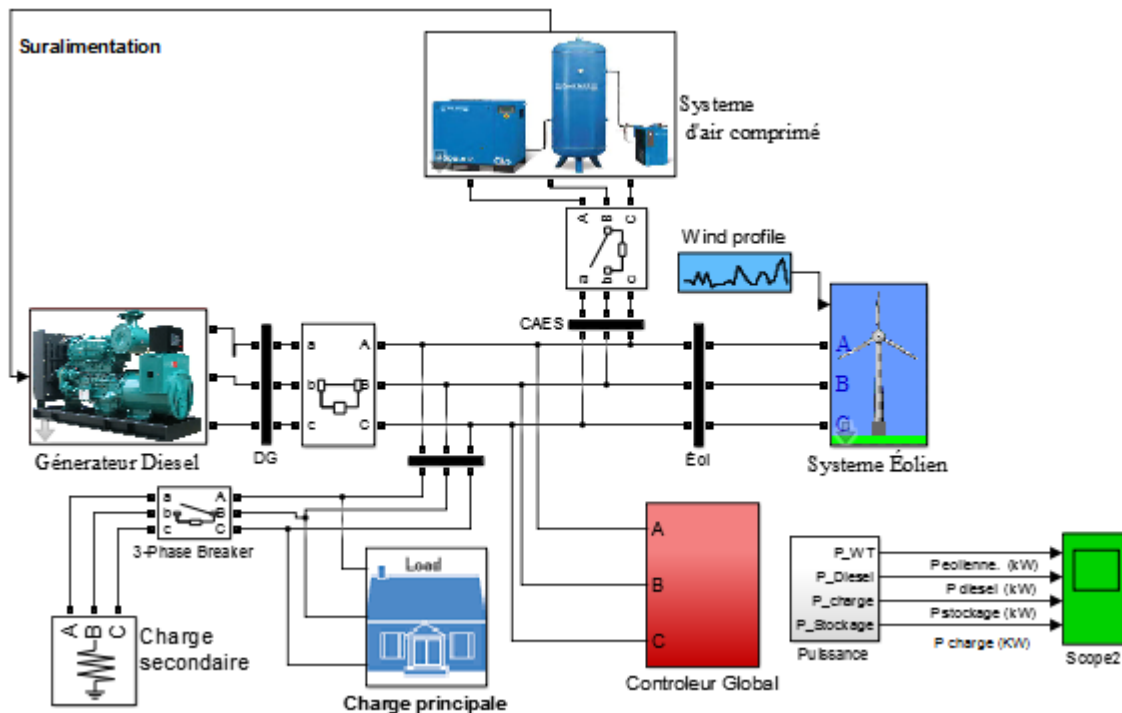


Figure 4.41 : Schéma de simulateur SHEDAC sur Matlab/Simulink.

Il est nécessaire de mentionner que le contrôle de ce système ne fait pas partie du projet. Par contre, un contrôleur global est intégré dans l'objectif de faire fonctionner ce système et de démontrer l'interaction entre les composantes et le partage de puissance de chaque sous-système (éolien, diesel, CAES) pour répondre à la charge. Donc, l'efficacité et la stabilité des échanges de puissance entre les différentes composantes de SHEDAC ne sont pas sollicitées dans cette étude.

#### 4.6 Conclusion

Ce chapitre a été dédié au choix et à la définition des modèles des composants du SHEDAC, tout en justifiant les paramètres de chaque sous-système. D'abord, les différents modèles de l'éolienne ont été présentés pour déterminer le modèle le plus pertinent pour notre étude. Par la suite, les paramètres caractérisant le modèle éolien et les convertisseurs

de contrôle et de commande ont été définis. Comme le modèle éolien, le modèle du GD a été choisi après une revue de 4 modèles, qui étaient présentés et discutés dans l'objectif de décider lequel correspondait le mieux aux objectifs du présent projet. Puis, les parties électriques et mécaniques du modèle retenu ont été détaillées, où on a développé le gouverneur du GD (admission, moteur à combustion interne) avec les différentes équations, ainsi le modèle de la génératrice synchrone avec ses régulateurs de tension et de vitesse. Le système d'air comprimé a été par la suite modélisé et détaillé à travers toutes ses composantes, en expliquant ainsi la suralimentation du moteur diesel à travers le modèle de la vanne.

Finalement, lorsque tous les modèles des sous-systèmes ont été mis en place, le couplage de ces derniers a fait l'objet de développement du modèle du SHEDAC à la fin de ce chapitre. Ainsi, l'architecture du couplage et la stratégie de partage de puissance ont été présentées.

Maintenant, il sera question de voir le comportement de ces systèmes fonctionnant individuellement et en hybridation. Pour ce faire, le chapitre suivant est consacré à la simulation numérique des systèmes, qui est indispensable afin de pouvoir valider les approches proposées et évaluer la pertinence des modèles développés.





## **CHAPITRE 5**

### **SIMULATION ET VALIDATION NUMÉRIQUE**

#### **5.1 INTRODUCTION**

Dans ce chapitre, les performances du SHEDAC en fonction de la charge appliquée et pour différentes vitesses de vent sont présentées en utilisant MATLAB/Simulink. Le début du chapitre démontre les résultats de simulation individuelle de chaque sous-système (Éolien, Diesel, CAES) validé numériquement en dehors du couplage. Par la suite, les résultats du système global SHEDAC sont obtenus en conservant les paramètres validés de chaque sous-système ainsi qu'en intégrant le contrôleur global nécessaire au système couplé.

Afin de valider les simulations et de disposer des résultats permettant d'évaluer la qualité du modèle de gestion réalisé, des données réelles délivrées par le TCE ont été utilisées pour les différents paramètres de chaque sous-système.

#### **5.2 RÉSULTATS DE SIMULATION DU SYSTÈME ÉOLIEN**

Puisque le vent est l'élément clé au fonctionnement d'une éolienne, sa vitesse est essentielle pour déterminer la puissance produite. Selon différents scénarios d'orientation de la vitesse du vent, sa mesure peut différer de la valeur réelle. L'utilisation des différents biais de mesure en simulation permet d'évaluer en pratique l'impact de ces scénarios sur les résultats de production de puissance éolienne. Dans cette étude, l'éolienne est simulée pour une vitesse du vent constante de 11m/s (approximativement la vitesse de vent moyenne annuelle du site de Camp Esker) et un palier des vitesses de vents testés jusqu'à 40% de variation (par rapport à 11m/s). Ainsi, le palier de vitesse du vent sera modélisé par une

valeur constante sous-estimée de 7m/s suivi d'une variation par échelon de 4m/s (11m/s). Une variation par échelon de 2m/s est ensuite modélisée pour une vitesse surestimée (13m/s).

Dans cette section, l'éolienne dotée par son propre système d'asservissement peut opérer de manière autonome. Toutefois, un réseau triphasé est branché avec l'éolienne afin de sécuriser l'alimentation en électricité à tout temps. Ceci permet d'apporter l'énergie supplémentaire lorsque l'éolienne ne peut pas répondre toute seule à la charge. De plus, le couplage au réseau sera pertinent pour analyser l'influence de la production en puissance de l'éolienne sur la fréquence et la stabilité de ce dernier.

Le système sera ensuite testé avec deux types de charges, une charge linéaire résistive et une charge non linéaire. Ces configurations permettront d'observer le comportement du système sous différentes perturbations et d'évaluer la robustesse des convertisseurs de puissance, de la méthode de contrôle ainsi que de la commande appliquée.

### **5.2.1 Réponse de l'éolienne à une vitesse du vent et une charge constante**

Dans un premier temps, les résultats de l'éolienne dans des conditions de fonctionnement optimal (vitesse du vent constante et charge constante) sont présentés. Il faut noter que la simulation démarre avec des conditions initiales : la vitesse mécanique est égale à la vitesse optimale de fonctionnement de l'éolienne ce qui produit une puissance électrique nulle. L'étude approfondie de la phase de démarrage de l'éolienne n'est pas prise en compte dans ce projet. Seulement le comportement de l'éolienne au cours du fonctionnement sera analysé ici.

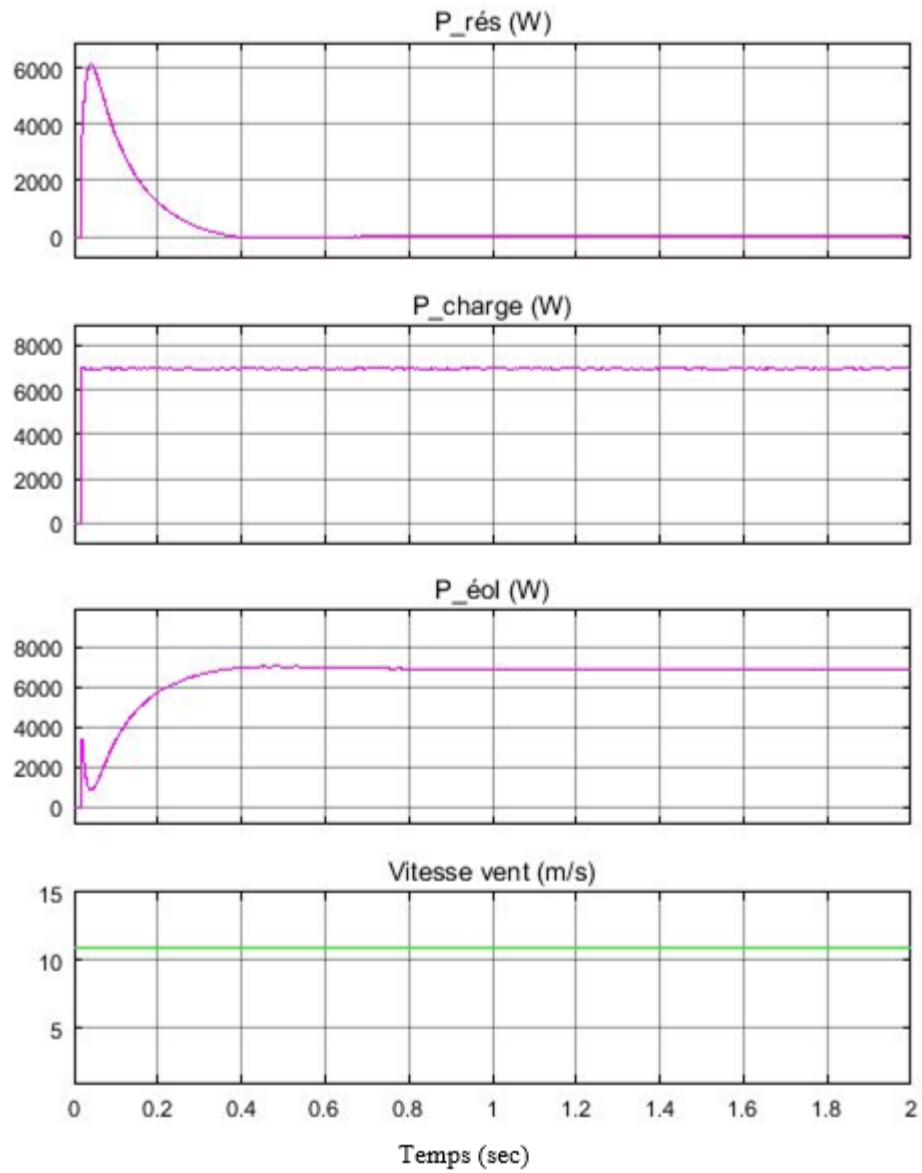


Figure 5.1 : Comportement du système à une vitesse du vent et une charge constante

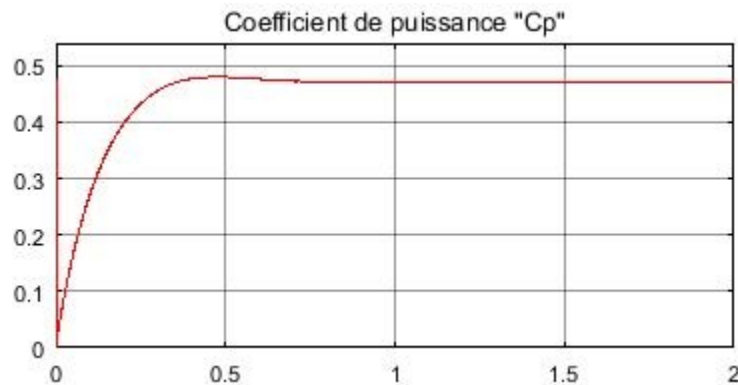


Figure 5.2 : Coefficient de puissance généré dans le système éolien

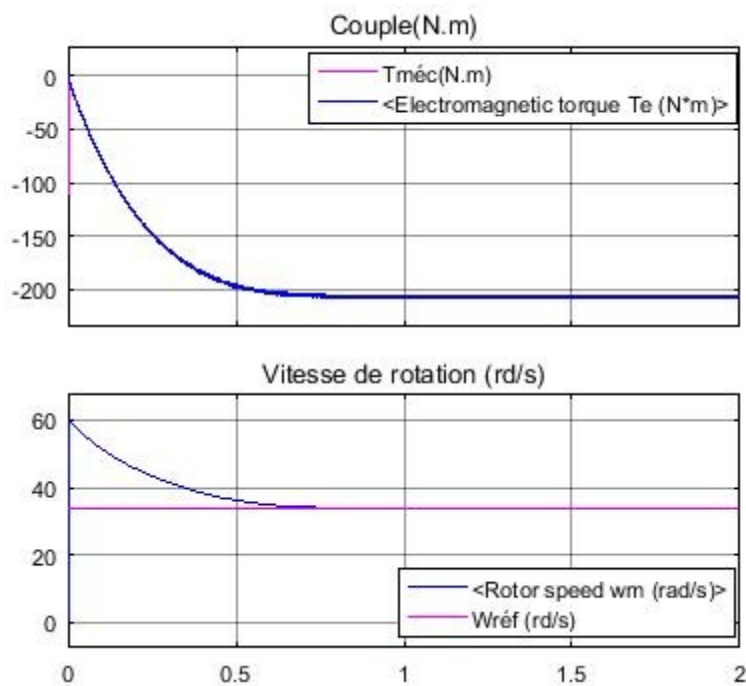


Figure 5.3 : Résultats du couple et de la vitesse de rotation de l'éolienne

La vitesse de démarrage de cette éolienne est de 5m/s. Lorsqu'une vitesse du vent constante (11m/s) est appliquée, tel que présenté dans la figure 5.1, l'éolienne prend un temps de 0.2s pour démarrer. La puissance augmente ensuite jusqu'à sa stabilisation à partir de  $t=0.4s$ . La courbe de puissance observée prend la même forme que la courbe de

puissance correspondant à l'éolienne Berguey 10 kW (Annexe D). Elle part d'une puissance nulle puis augmente jusqu'à atteindre la puissance nominale pour la vitesse du vent nominale de 11 m/s. Cette vitesse est parfois approximative et est propre à chaque éolienne. On remarque simultanément que l'évolution du coefficient de puissance (figure 5.2) prend la même forme que la courbe de puissance au démarrage et qu'il se maintient par la suite au  $C_p$  maximum tout au long de la zone de fonctionnement nominal. Il décline légèrement à  $t=0.7s$  où l'opération est à vitesse constante (figure 5.3). Dans cette zone, on constate que le régulateur de puissance joue bien son rôle puisque le coefficient de puissance diminue pour maintenir la puissance à 7 kW.

Les caractéristiques du couple et de la vitesse sont inversement proportionnelles. La vitesse augmente au démarrage pendant que le couple mécanique diminue, ce qui est désirable. On mentionne que la caractéristique négative du couple explique le fonctionnement de l'éolienne en mode générateur ( $T_m$  négative). Il est constaté dans la figure 5.3.a que le couple mécanique et le couple électromagnétique sont égaux et confondus grâce à la commande appliquée sur la génératrice et au contrôle du couple total. Sur la même figure 5.3, on observe que la vitesse mécanique de l'éolienne est bien asservie. Elle suit parfaitement sa consigne et est confondue avec la vitesse de référence.

Finalement, si l'on observe la série des résultats de la figure 5.1, on constate que la charge était fournie en permanence. Durant la phase de démarrage de l'éolienne de  $t=0$  à  $t=0.4s$ , le réseau fournit le manque en puissance nécessaire pour alimenter la charge. On constate que les courbes de puissances produites par l'éolienne et le réseau se complètent. La somme en tout point de ces courbes a pour résultat une puissance totale de 7 kW. À  $t=0.4s$ , l'éolienne atteint sa puissance mécanique nominale et alimente la charge de façon autonome. La puissance du réseau est ainsi nulle.

### 5.2.2 Réponse du système éolien aux variations de la vitesse du vent et de la charge

Dans cette section, sera analysé en détail le comportement de l'éolienne suite à des variations de la vitesse du vent et de la charge. Les précédents paramètres de l'éolienne et les conditions initiales de la simulation sont ici conservés. Le pas de calcul a, cependant, été augmenté pour visualiser l'impact des variations sur un intervalle de temps plus important et pour démontrer l'adaptabilité du système à plusieurs pas du calcul.

Le système sera simulé pour deux scénarios : le 1<sup>er</sup> scénario est obtenu avec un profil du vent variable. Ce profil prend la forme de paliers construits avec des entrées en échelon des 3 vitesses du vent [7, 11, 13] m/s (les résultats de 1<sup>er</sup> scénario se trouvent sur la première série de figures située à gauche, figure 5.4). Le 2<sup>e</sup> scénario est obtenu avec un vent constant. Il génère les résultats de la deuxième série de figures située à droite (Figure 5.5).

Initialement, le système éolien avec le réseau alimente une charge linéaire à caractère résistif de 7 kW représentant la puissance demandée par les consommateurs. La charge linéaire branchée est soumise à une variation de 20%. Une augmentation et une diminution sont respectivement présentes aux instants  $t = 3\text{s}$  et  $t = 5\text{s}$ .

À  $t = 9\text{s}$ , une charge non linéaire est branchée afin d'observer le comportement du système face aux problèmes créés par la connexion de cette dernière.

Les perturbations et les problèmes engendrés par la connexion et les variations des charges vont être analysés pour chaque scénario. Le comportement du système sera comparé et mis en évidence dans les deux scénarios en fonction du profil du vent appliqué. Notons que les variations de la charge sont les mêmes pour les deux scénarios.

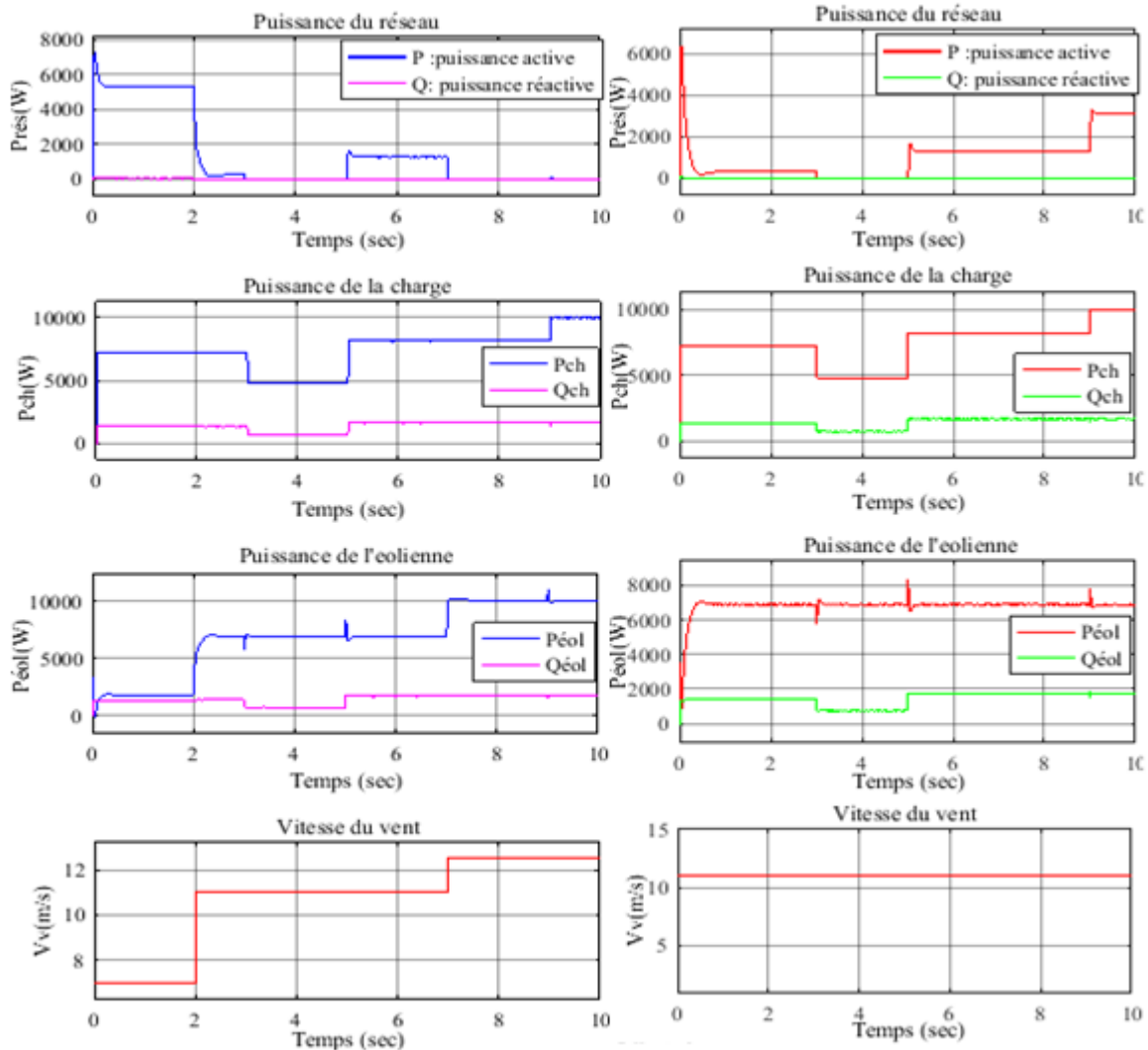


Figure 5.4 : Comportement du système éolien pour une vitesse du vent variable

Figure 5.5 : Comportement du système éolien pour une vitesse du vent constante

Les résultats des simulations présentés dans les deux séries de figures (Figure 5.4 et 5.5) seront analysés pour les intervalles du temps ci-dessous correspondant aux variations de la charge. La série de la figure 5.4 sera analysée pour les deux points critiques correspondant aux changements de la vitesse du vent :

De  $t = 0\text{s}$  à  $t = 3\text{s}$  : système au démarrage, charge de 7 kW.

De  $t = 3\text{s}$  à  $t = 5\text{s}$  : diminution de la charge de 7 kW à 5 kW.

De  $t = 5\text{s}$  à  $t = 9\text{s}$  : augmentation de la charge de 5 kW à 8.5 kW.

De  $t = 9\text{s}$  à  $t = 10\text{s}$  : connexion de la charge non linéaire (10 kW).

Les deux points critiques de la vitesse du vent :

$t = 2\text{s}$  : changement de la vitesse du vent de 7m/s à 11m/s.

$t = 7\text{s}$  changement de la vitesse du vent de 11m/s à 13m/s.

#### 5.2.2.1 Discussion des résultats au démarrage de $t = 0\text{s}$ jusqu'à $t = 3\text{s}$ et à l'augmentation de la vitesse du vent à l'instant $t = 2\text{s}$

De  $t = 0\text{s}$  à  $t = 3\text{s}$  la charge est de 7 kW. Dans la figure 5.4, l'éolienne commence à fournir une puissance active de 2.5 kW pour une vitesse du vent = 7m/s. Cette puissance produite n'est pas suffisante par rapport à celle demandée par la charge. Ceci explique la participation du réseau (figure 5.4) afin de fournir la différence de puissance nécessaire pour répondre à la charge.

À  $t = 2\text{s}$ , la vitesse du vent augmente et passe à 11m/s. La puissance de l'éolienne augmente proportionnellement et permet d'alimenter la charge à 95%. Cela limite la participation du réseau à une puissance considérée presque négligeable.

Dans le cas du 2<sup>e</sup> scénario de simulation où la vitesse du vent est maintenue constante à 11m/s (série des figures 5.5), la puissance du réseau augmente instantanément au démarrage et diminue après environ 0.5s (figure 5.5). La puissance de l'éolienne augmente simultanément jusqu'à se stabiliser à sa puissance nominale (figure 5.5). Elle alimente par la suite la charge en permanence dans cet intervalle ( $t = 0.5\text{s}$  à  $3\text{s}$ ) avec une présence très réduite du réseau.

Dans les deux séries de figures, bien que la charge n'ait pas augmenté, la puissance de l'éolienne est plus efficace au deuxième régime du vent (11m/s). Ainsi la



production de l'éolienne pour une vitesse du vent de 7m/s confirme bien l'hypothèse d'un vent sous-estimé où l'éolienne n'était même pas capable de produire 50% de sa puissance nominale. On observe d'ailleurs que le réseau est presque le responsable principal de l'alimentation de la charge.

#### **5.2.2.2 Discussion des résultats suite à la diminution de la charge de $t = 3s$ à $t = 5s$**

À  $t = 3s$ , le système subit une diminution de charge de 30% et la vitesse du vent est toujours constante à 11m/s. Dans les deux scénarios, l'éolienne prend en charge la satisfaction de la demande en puissance. Elle fournit de façon autonome ce dont la charge a besoin en puissance, par conséquent le réseau est totalement absent. La puissance produite de l'éolienne, qui est de 7 kW ici, dépasse la charge demandée (~ 5 kW). Ceci nous pousse à envisager une solution pour dissiper ou réutiliser cette puissance excédentaire. Cette remarque fera l'objet du recours au système de stockage qui sera présenté et détaillé dans des sections ultérieures.

#### **5.2.2.3 Discussion des résultats suite à l'augmentation de la charge de $t = 5s$ jusqu'à $t = 9s$ et de la vitesse du vent à $t = 7s$**

À  $t = 5s$  la charge augmente à 8.5 kW, dépassant la charge nominale (7 kW) pour laquelle le système était dimensionné. Toutefois, la vitesse du vent est maintenue constante à la même valeur de 11m/s jusqu'à  $t = 7s$ . Dans cet intervalle (5s à 7s), et dans les deux scénarios, l'éolienne est incapable de fonctionner seule pour satisfaire la charge. L'intervention du réseau est indispensable pour combler le déficit de puissance de la charge.

Par ailleurs, il faut noter ici que la puissance requise du réseau est beaucoup plus petite que celle dans l'intervalle de temps de  $t = 0s$  à  $t = 3s$ . Cela s'explique par le fait

que l'éolienne est plus productive pour des vitesses du vent plus importantes et qu'elle a juste besoin d'une source d'appoint pour toute augmentation imprévue de la charge.

À  $t = 7s$ , dans le 1<sup>er</sup> scénario (Figure 5.4) la vitesse du vent a augmenté jusqu'à 13 m/s (figure 5.4) et la charge est maintenue constante à 8.5 kW. À cet instant, la puissance de l'éolienne augmente et serait en mesure de répondre toute seule à la charge et ainsi de négliger la présence du réseau. En plus, dans cet intervalle on tombe dans la même situation d'excès d'énergie produite par l'éolienne. La solution précédemment mentionnée serait adaptée.

Par contre, il faut attirer l'attention sur l'instant  $t = 7s$  dans la figure 5.4. La production de l'éolienne a dépassé sa puissance maximale (10 kW) de 0.25% pour 0.5sec tel qu'observable sur la figure 5.6.

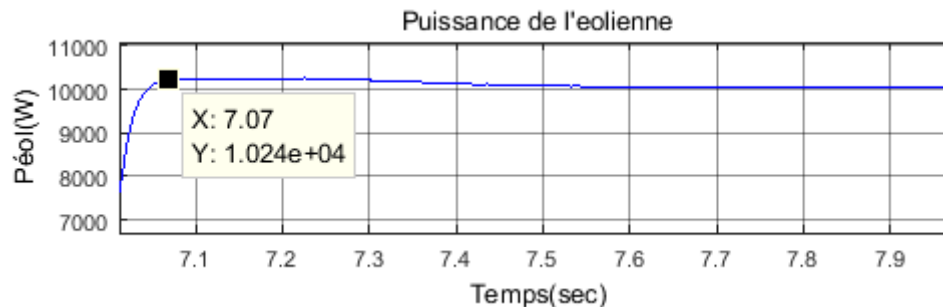


Figure 5.6 : Dépassement de la puissance de l'éolienne à  $t = 7s$

On constate dans cette figure que la réponse du système au dépassement fut très rapide par une limitation de la puissance grâce à la commande intégrée au sein de notre modèle. Avec un dépassement aussi petit, le système revient rapidement à un régime permanent après l'effet de la perturbation. Cela permet de confirmer la robustesse du contrôle et de la commande utilisée dans notre modèle.

En général, l'éolienne ne devrait cependant pas excéder sa puissance maximale afin de garder son efficacité et de limiter les pertes de puissance. De plus, lorsque

le vent est trop violent l'intensité des turbulences augmente ainsi que les risques de bris mécaniques et le niveau de bruit. Souvent, le freinage de l'éolienne est exigé dans cette situation afin d'éviter ces problèmes. À titre d'information, cette intervention peut être soit par système de freinage manuel, soit par système de freinage automatique qui sont davantage expliqués dans [160].

#### **5.2.2.4 Discussion des résultats lors de la connexion de la charge non linéaire à $t = 9s$**

Une charge non linéaire est connectée à l'instant  $t = 9s$  afin de perturber le système, d'observer son comportement suite à ces perturbations et de s'assurer ainsi que le filtre actif joue bien son rôle. On rappelle qu'il est connu d'avance que le branchement de ce type de charges cause des problèmes au fonctionnement du SHED. Dans le cas présent, cette perturbation se traduit par une augmentation de la charge à 10 kW et ainsi des perturbations qui se remarqueront sur la qualité d'onde. On les analysera dans la section dédiée à la discussion de la qualité d'énergie.

Dans le 1<sup>er</sup> scénario (figure 5.4), la puissance produite par l'éolienne est toujours maintenue à la puissance maximale 10 kW (figure 5.4). Cela permet de couvrir en totalité la puissance demandée par la charge. Dans le 2<sup>e</sup> scénario (figure 5.5), la vitesse du vent est toujours constante à 11 m/s et la puissance de l'éolienne est de 7 kW (figure 5.5). Ainsi l'éolienne alimente en partie la charge pendant que l'autre partie est assurée par le réseau.

En somme, les résultats de simulation ont démontré que la charge était alimentée à tout instant et dans tout intervalle du fonctionnement malgré les perturbations et les variations produites. Il a été observé que la présence du réseau était occasionnelle avec une puissance qui n'a pas dépassé 50% de la puissance de la charge, même dans les pires conditions du fonctionnement du système.

Par conséquent, la bonne production d'énergie éolienne était justifiée et cette dernière représente le système principal d'alimentation de la charge. Le réseau est considéré comme une source d'appoint et de sécurité dans le cas de ce système.

Toutefois, il a été constaté dans les deux scénarios que la puissance réactive dans le réseau était bien nulle et invariante tout au long de l'étude tandis que la charge et l'éolienne ont débité une puissance réactive avec des valeurs plus au moins faibles. En outre, les puissances réactives  $Q_{ch}$  et  $Q_{éol}$  dépendent directement des variations de la charge. Donc si la charge diminue, la puissance réactive  $Q$  diminue (dans la charge et dans l'éolienne). Si elle augmente, la puissance réactive augmente (figure 5.4 et figure 5.5).

Lors de la connexion de la charge non linéaire et malgré qu'il y avait eu une augmentation de la charge, les puissances réactives  $Q_{ch}$  et  $Q_{éol}$  restent constantes. Cela confirme que le filtre actif a bien joué son rôle dans la compensation. Ce phénomène est abordé de façon plus précise dans la mémoire de M.Rezkallah [161].

#### 5.2.2.5 Qualité de l'onde électrique du système éolien

La qualité de l'onde électrique produite par le système éolien couplé à un réseau triphasé et alimentant une charge variable doit être, dans cette section, maintenue à l'intérieur de certaines limites. Ce qu'on appelle la qualité de l'onde électrique représente en fait la stabilité de la tension, la stabilité de la fréquence, l'intensité des harmoniques, les interférences électromagnétiques, l'équilibre des phases et le facteur de puissance [6].

Spécialement dans ce système éolien, on s'intéressera à l'étude des deux caractéristiques : celle de la tension permettant d'analyser sa stabilité et celle des courants, permettant d'analyser l'intensité des harmoniques et l'équilibre des phases. Simultanément, les résultats des tensions et des courants permettront d'évaluer les régulateurs et les commandes utilisés.

L'étude de la qualité de l'onde électrique portera seulement sur le 1<sup>er</sup> scénario vu qu'il est davantage pertinent d'analyser un système perturbé suite aux variations de la charge et du vent.

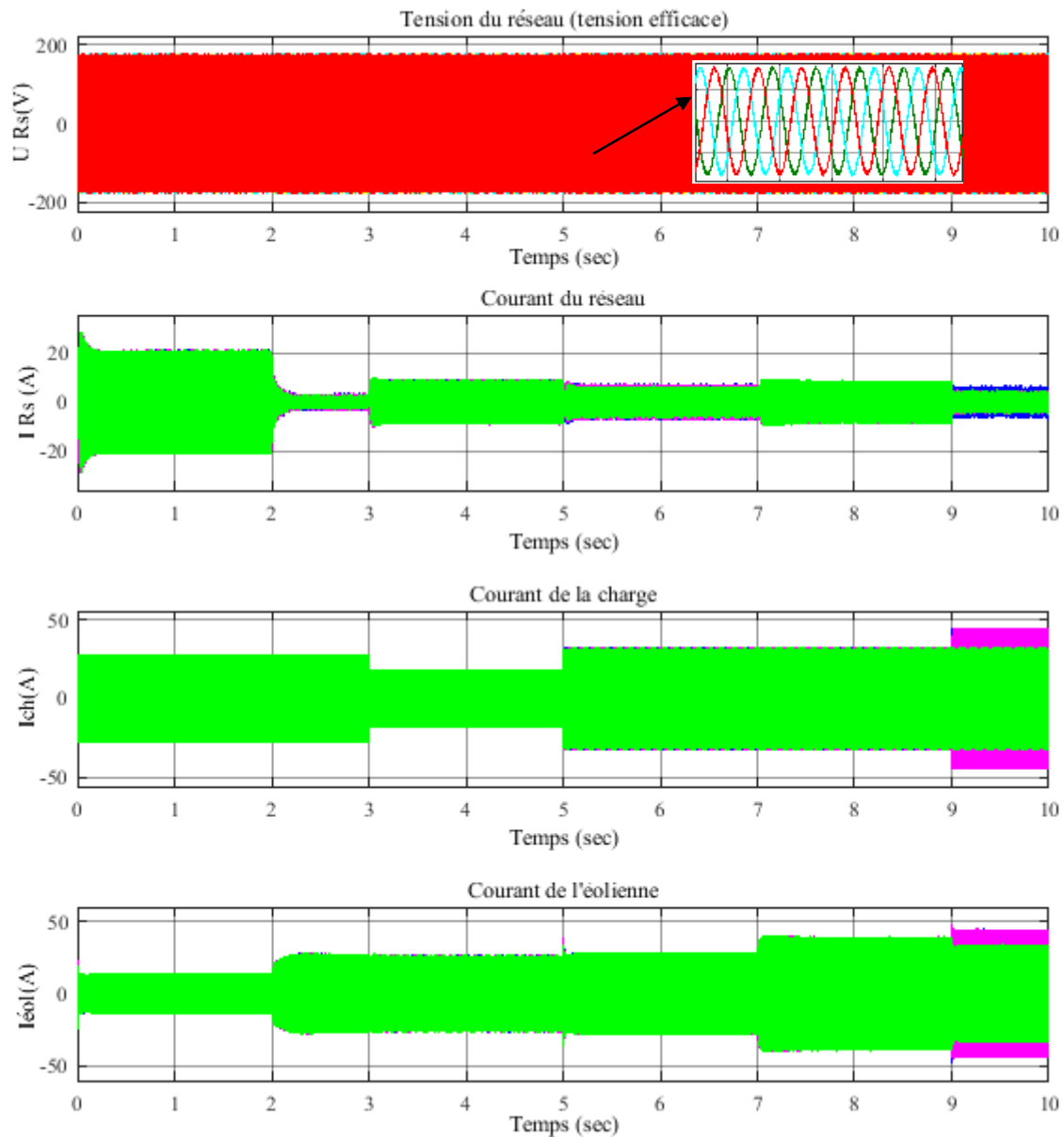


Figure 5.7 : Dépassement de la puissance de l'éolienne à  $t = 7s$

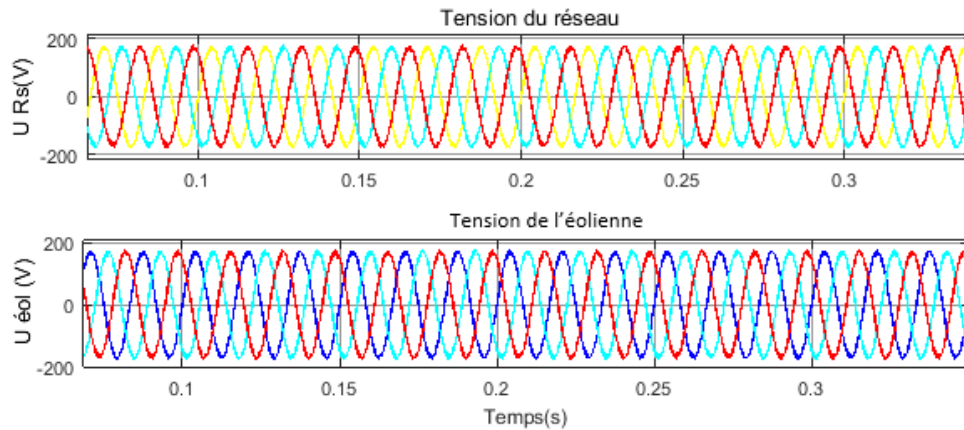


Figure 5.8 : Tension délivrée par l'éolienne et celle du réseau

Comme première constatation dans la série des figures 5.7, on remarque clairement des variations sur le courant aux instants critiques ( $t = 3s$ ,  $t = 5s$ ,  $t = 9s$  : variation de la charge et à  $t = 2s$ ,  $t = 7s$  : variation de la vitesse du vent). En revanche, la tension est maintenue constante à 163 V (tension efficace) et donc 283 V (ligne-ligne). Dans la figure 5.8 on peut observer que la tension fournie par l'éolienne et celle du réseau sont en phase et ont la même amplitude. La tension fournie par l'onduleur a gardé sa valeur nominale après avoir été redressé grâce au redresseur à MLI. Cela permet de fournir une tension constante, quel que soit la tension produite par la génératrice de l'éolienne, indépendamment des variations de sa puissance. Cela confirme la performance de la commande appliquée sur l'éolienne permettant de maintenir la stabilité de la tension émise au réseau.

Parmi les figures ci-dessous, on va faire un zoom aux instants critiques sur les résultats de la figure 5.7 afin de mieux observer et évaluer le comportement du système.

La figure 5.9 représente respectivement, la tension du réseau ( $U_{Rs}$ ), le courant de du réseau ( $I_{Rs}$ ), le courant de la charge ( $I_{ch}$ ) et le courant de la source ( $I_{éol}$ ) lors de l'augmentation de la vitesse du vent à  $t = 2s$  et à  $t = 7s$ .

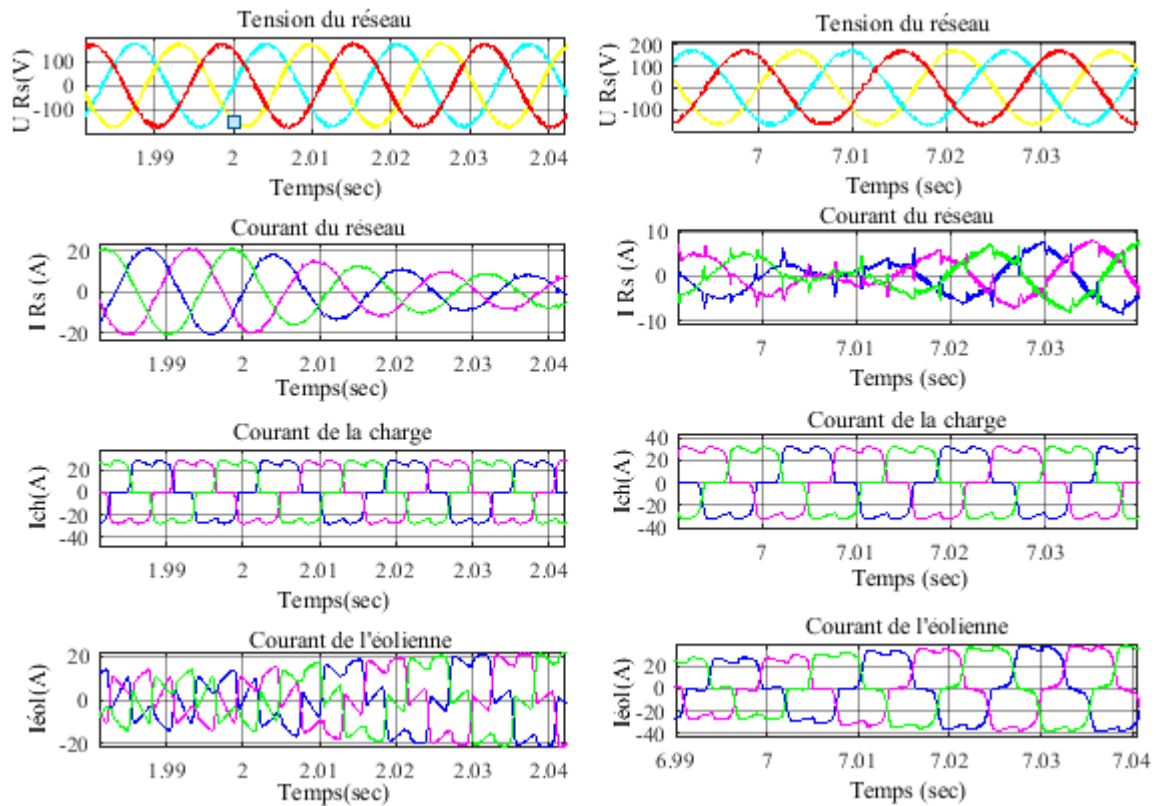


Figure 5.9 : Résultats de tension et des courants aux instants de variation de la vitesse du Vent :  $t = 2s$  (série des figures à gauche) et  $t = 7s$  (série des figures à droite)

En augmentant la vitesse du vent à 2s, on observe automatiquement l'augmentation du courant à la sortie de l'onduleur (injecté par l'éolienne) tandis que le courant dans le réseau diminue et que le courant de la charge reste constant. Cela revient à confirmer le comportement de l'éolienne dans la figure 5.4 : elle alimente en partie la charge et l'autre partie est assurée par le réseau. L'augmentation de la vitesse du vent jusqu'à 7s entraîne une augmentation du courant de l'éolienne. Le courant de la charge est toujours constant, mais cette fois le courant dans le réseau augmente. Cela peut s'expliquer par le fait que la charge est surchargée et que, donc, l'excès du courant est renvoyé dans le réseau.

La figure 5.10 représente respectivement, la tension du réseau ( $U_{Rs}$ ), le courant de du réseau ( $I_{Rs}$ ), le courant de la charge ( $I_{ch}$ ) et le courant de la source ( $I_{éol}$ ) lors de la diminution, l'augmentation et la connexion de la charge non linéaire, respectivement aux instants  $t = 3s$ ,  $t = 5s$  et  $t = 9s$ .

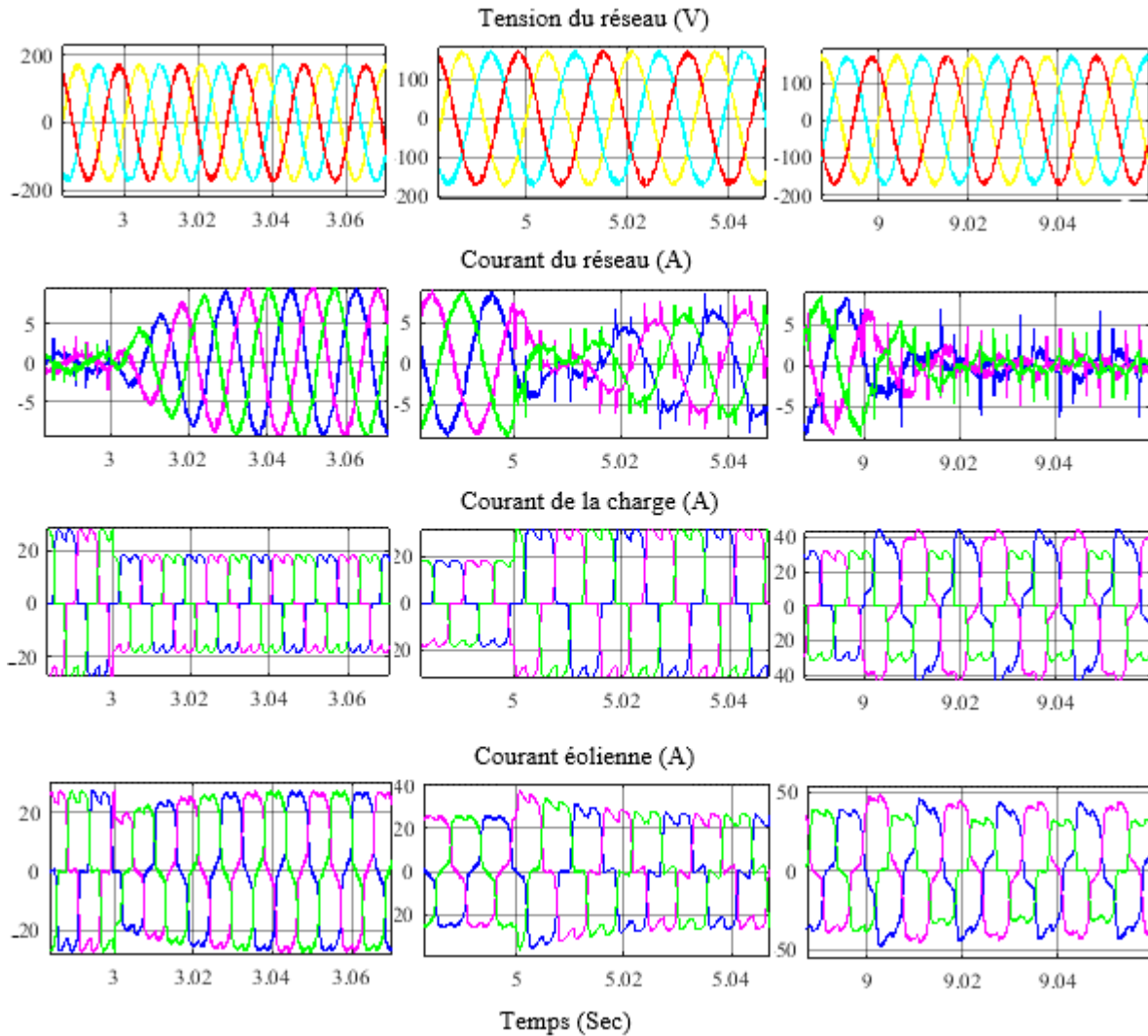


Figure 5.10 : Résultats de tension et des courants aux instants des variations de la charge à  $t = 3s$  (Série des figures à gauche),  $t = 5s$  (série des figures au milieu) et  $t = 9s$  (Série des figures à droite) pour la variation de la charge non linéaire.



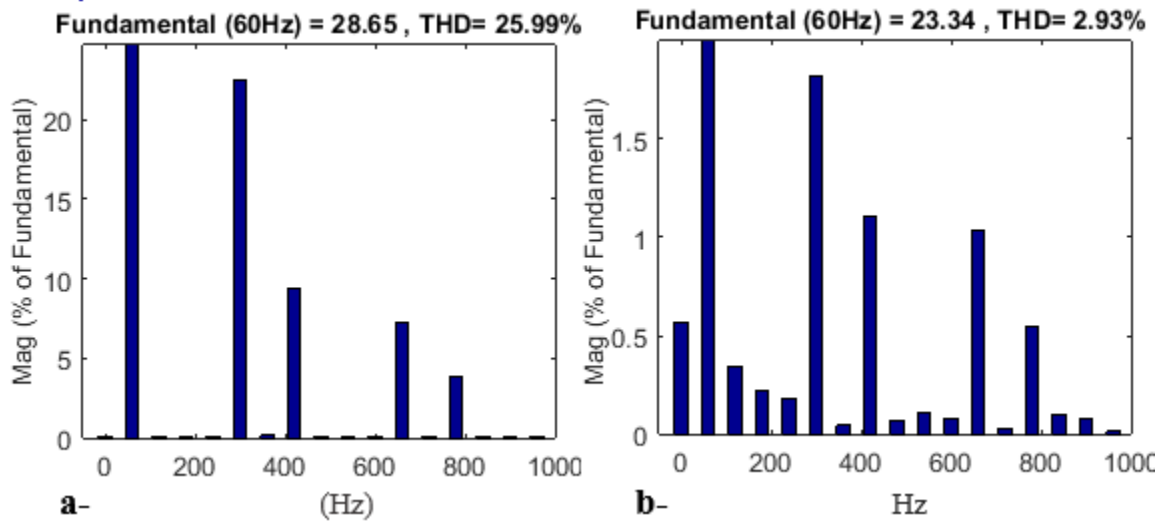


Figure 5.11 : Spectre harmonique des courants, (a) du réseau, (b) de la source

Selon les résultats de simulation obtenus jusqu'à maintenant (figure 5.9 et figure 5.10), et en prenant en considération les variations du vent ou de la charge, on conclut que le facteur de puissance est unitaire puisque la tension et le courant de source sont parfaitement en phase (figure 5.10).

Une diminution de la charge à l'instant  $t = 3s$  dans la figure 5.10, se traduit par une diminution du courant dans la charge, et ainsi une augmentation brusque et importante du courant dans le réseau. Ceci s'explique par le fait que la charge est pratiquement alimentée par le réseau et non l'éolienne puisque la vitesse du vent est faible à ce moment (figure 5.4). Toutefois, le courant de l'éolienne est perturbé pour quelque milliseconde, mais il reprend rapidement son régime permanent.

À  $t = 5s$ , la demande est augmentée, cela introduit une toute légère augmentation instantanée du courant à la sortie de l'onduleur, et évidemment une importante augmentation du courant dans la charge. Puisqu'on n'a pas augmenté à cet instant la vitesse du vent, le courant du réseau est perturbé suite à l'ajout de cette charge présentant des harmoniques et des fluctuations.

On connecte une charge non linéaire à  $t=9s$ , instantanément on remarque une dégradation de la qualité de l'onde dans toutes les sorties du système. Si l'on observe sur la figure 5.10, on constate un déséquilibre d'une phase dans le courant de la charge et de l'éolienne. De plus des fluctuations et des pics du courant du réseau sont constatés dans la figure du courant de réseau, qui se traduit par un taux harmonique de distorsion de 25.99% observé sur la figure 5.11.a. En contrepartie, ce taux est de 2.93 % pour le courant de la source (éolienne) (figure 5.11.b). Ce dernier est inférieur au 5% qui est la limite de taux harmonique de distorsion selon la norme standard de IEEE [161]. Le THD du courant de source est si faible grâce à la présence de filtre actif qui a bien joué son rôle dans la compensation des harmoniques.

Ces résultats mettent en lumière la pertinence des convertisseurs de puissance et des commandes utilisées qui étaient évalués surtout lors des perturbations créées par la charge. Ainsi l'influence des variations de la vitesse du vent sur le comportement de l'éolienne était fortement remarquée sur sa production, et sa stratégie de partage de puissance avec d'autres sources, pour répondre au besoin de la charge.

### **5.3 RÉSULTAT DE SIMULATION DE GROUPE ÉLECTROGÈNE DIESEL**

Le modèle développé dans cette étude est validé numériquement sur Matlab/Simulink. Les performances dynamiques mécaniques de GD sont démontrées à travers les résultats de l'évolution de la vitesse de rotation de GD et le débit du fuel injecté. Ainsi la stabilité électrique et la qualité de l'onde sont observées en traçant les graphiques de la tension aux bornes de la génératrice synchrone de GD.

Pour valider les lois de commande utilisées dans la stratégie du fonctionnement du générateur diesel, on procède aux simulations avec deux scénarios de fonctionnement.

- 1<sup>er</sup> premier scénario : on utilise une charge variable qui atteint 50 kW (le maximum de la charge réelle du site de Camp esker) ainsi une perturbation est créée sur la charge, pour juger les capacités dynamiques du système. Les résultats du modèle de GD développé dans ce scénario sont comparés avec les données réelles de GD du TCE.
- 2<sup>e</sup> scénario : on intègre le modèle de CVT avec le même type de charge (variable). Le CVT est introduit dans l'objectif de déterminer son influence sur le fonctionnement du générateur diesel et aussi pour démontrer l'efficacité et l'adaptation du modèle de GD avec plusieurs modes de fonctionnement.

Notons toutefois que le modèle diesel utilisé dans cette section est non suralimenté dans les deux scénarios. Les paramètres de générateur diesel dans notre étude sont les mêmes paramètres du générateur diesel installé dans le micro-réseau du TCE à Rivière-au-Renard.

### **5.3.1 Fonctionnement de GD dans le 1er Scénario**

Dans le 1<sup>er</sup> scénario, le modèle est simulé durant 60s pour une charge de 30 kW. Pour pouvoir analyser le comportement du gouverneur de vitesse, la charge a été variée à l'instant  $t = 40s$  (une diminution de 10 kW).

Puisque l'intérêt porte sur une étude électromécanique, il serait intéressant de présenter des résultats représentant le fonctionnement électrique et mécanique du GD. Pour ce faire, l'aspect électrique sera observé à travers la courbe de la tension de la génératrice diesel et la vitesse de rotation pour observer la qualité d'onde et la stabilité du système. L'aspect mécanique sera présenté par le débit du fuel injecté et le débit d'air dans la chambre de combustion du moteur diesel ainsi que par le couple moteur.

La figure 5.12 montre l'évolution de la vitesse de rotation de la génératrice diesel comparée à la vitesse de référence (1800tr/min) et la figure 5.13 montre le couple du moteur diesel.

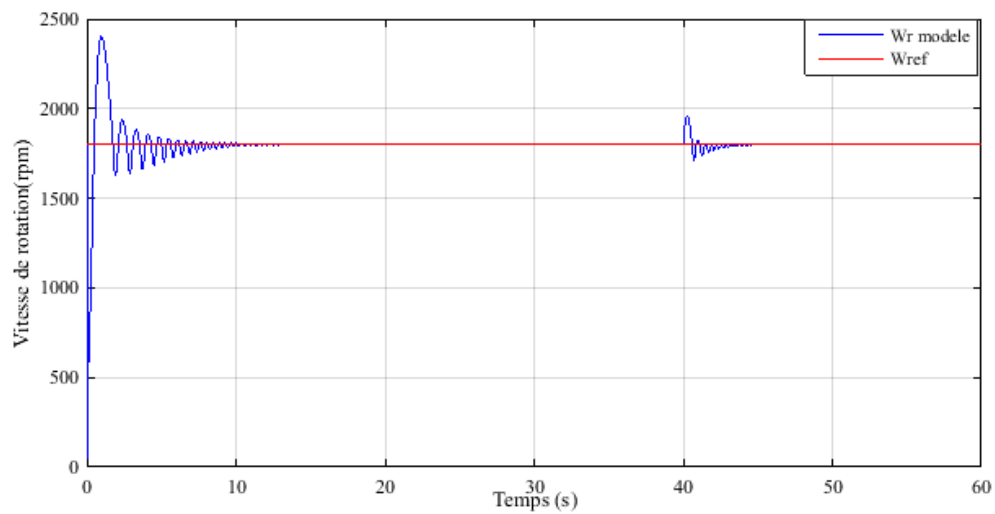


Figure 5.12 : Évolution de la vitesse de rotation de GD.

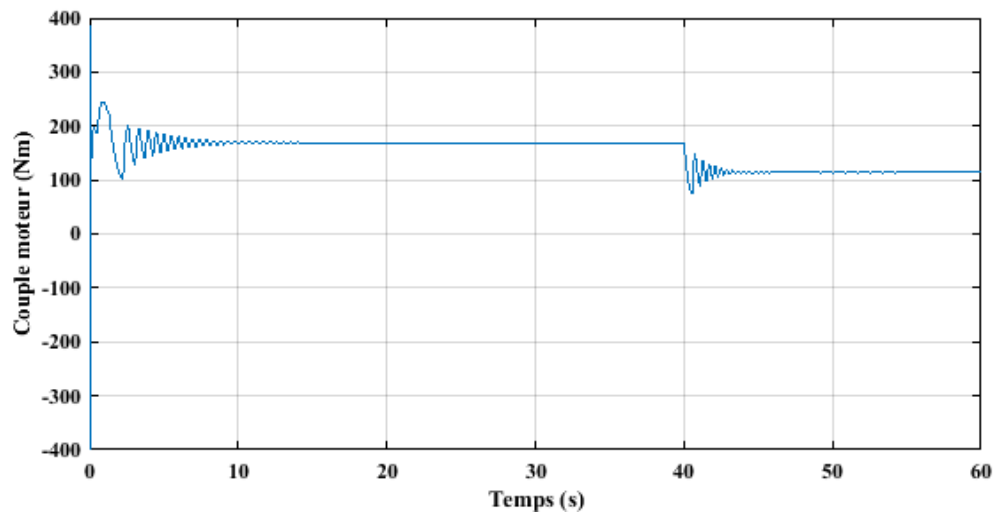


Figure 5.13 : Évolution de couple du moteur Diesel

La figure 5.12 montre la variation de la vitesse de la génératrice. Des oscillations allant jusqu'à 2300 tr/mn peuvent être remarquées lors de démarrage de GD. Après 8s, la réponse se stabilise et elle devient confondue avec la vitesse de référence à 1800tr/mn.

Lorsque la charge est diminuée à l'instant  $t = 40s$ , la vitesse est perturbée où une augmentation d'environ 5% pour une durée de 2s est observée, avant que la vitesse ne revienne à sa valeur initiale (1800 tr/mn). De là, c'est bien évident que la génératrice diesel fonctionne à vitesse constante, en raison de la nature de fonctionnement du moteur diesel (vitesse constante et couple variable). En effet la fréquence des tensions produites par le générateur respecte la loi [162] :

$$w_{sync} = \frac{w_e}{p_p} \text{ [rad/s]}$$

$W_{sync}$ , est la vitesse angulaire (vitesse synchrone) de l'arbre de la turbine diesel,  $W_e = 2\pi f$ ,  $f$  est la pulsation des courants statoriques de la génératrice synchrone du groupe, et  $p_p$  est le nombre de paires de pôles de la génératrice. Ainsi, la consigne de vitesse est appliquée sous forme de fréquence désirée et le système de régulation de la vitesse du moteur se charge d'ajuster le couple moteur  $T_m$  (Figure 5.13) de manière à maintenir la vitesse de rotation constante.

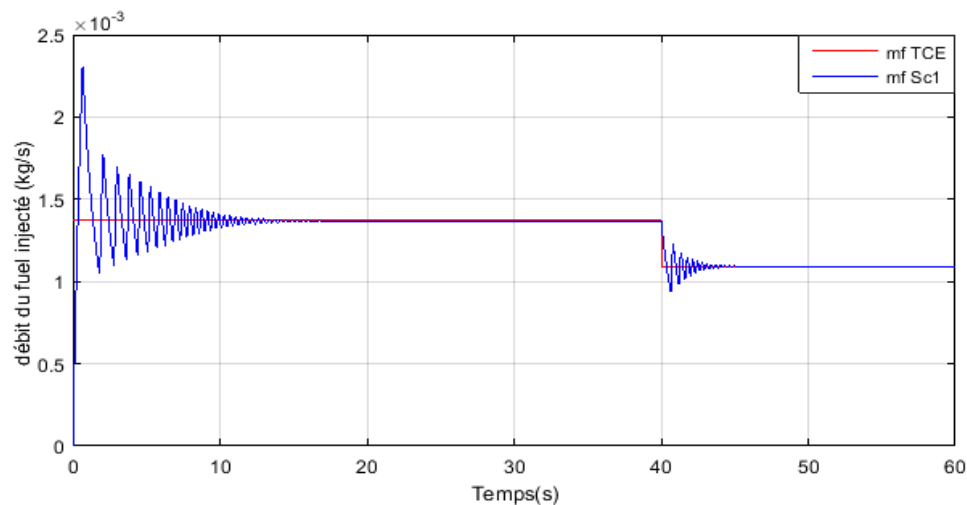


Figure 5.14 : Évolution de débit du fuel injecté de MD.

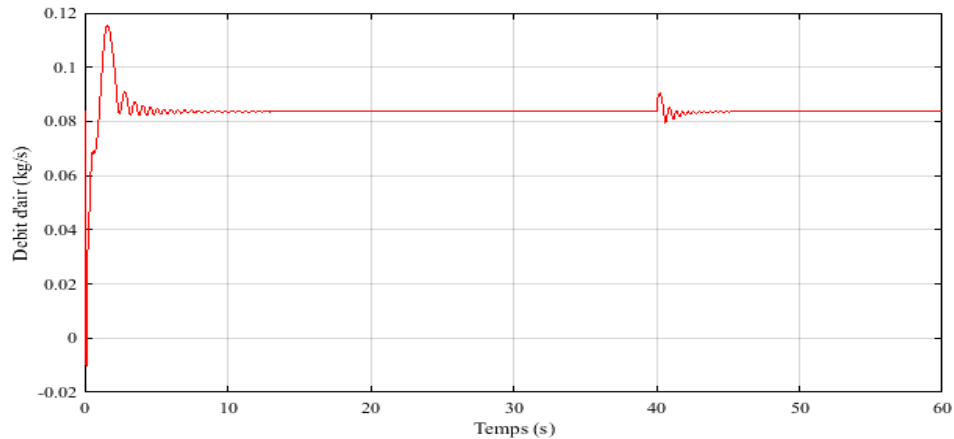


Figure 5.15 : Débit d'air dans la chambre de combustion de MD.

Comme le débit du fuel injecté est directement lié à la vitesse de rotation de GS tel que présenté précédemment dans le chapitre 4, ce dernier serait affecté alors par toutes variations de la vitesse. Tel qu'il est observé dans la figure 5.14, la diminution de débit du fuel injecté atteint 0.0012 kg/s à  $t=40$ s. Autrement dit, lorsque la charge diminue, la vitesse du moteur augmente (figure 5.12). Par conséquent, la régulation de vitesse agit sur les injecteurs pour diminuer la quantité de carburant injecté dans les cylindres (figure 5.14). Cependant, étant donné que la quantité d'air n'a pas encore diminué, la combustion n'est pas au total, et la vitesse continue à remonter, mais il faut quelques secondes pour se stabiliser.

À noter que les variations du débit d'air dépendent fortement du modèle de compresseur implémenté.

Il existe plusieurs solutions pour faire face à ce problème (non variation de débit d'air). Une possibilité consiste à fournir de l'énergie supplémentaire au moteur lors de la phase de retard de combustion, par exemple avec une machine électrique comme dans les véhicules électriques hybrides ou une autre possibilité qui consiste à intégrer la

suralimentation, ce qui sera présenté dans la prochaine section portant sur le couplage du GD avec le système d'air comprimé( CAES).

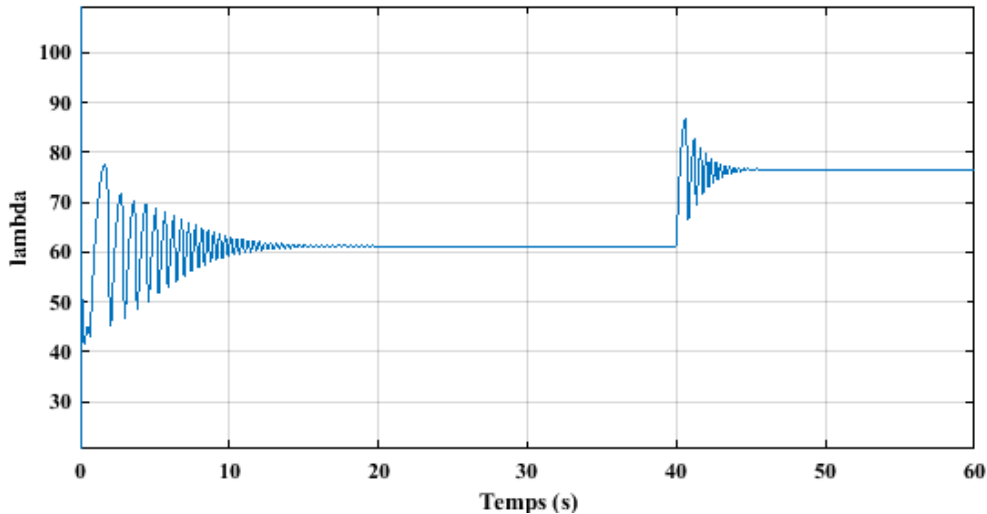


Figure 5.16 : Évolution de rapport stœchiométrique du fuel.

La figure 5.16 montre l'évolution du rapport stœchiométrique air/fuel dans la chambre de combustion de moteur diesel. Les résultats de simulation de ce rapport au démarrage montrent un écart inférieur à 8 % comparé au rapport maximal que le moteur diesel pourrait admettre [8]. Cet écart est dû à l'absence d'un contrôleur pour le mélange air/ fuel et au dynamique des cycles thermodynamiques dans le moteur, mais il reste toujours un écart théorique acceptable. Par contre l'augmentation de ce rapport lors de la variation de la charge est raison principalement des causes expliquées précédemment liées au modèle du débit d'air. Ce rapport est inversement proportionnel au débit du fuel injecté, donc l'augmentation de rapport air/fuel est conséquence de la diminution du débit de fuel injecté. Ainsi l'écart est supérieur à la limite acceptable de mélange air/fuel, cela peut être probablement corrigé dans la partie de suralimentation.

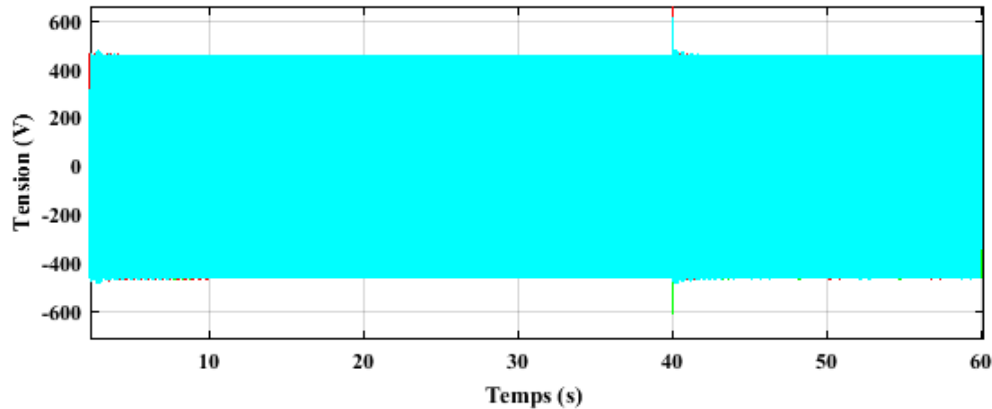


Figure 5.17 : La tension aux bornes de la génératrice diesel.

Dans la figure 5.17 la tension oscille autour de la valeur de consigne, soit 400V (tension efficace). Les fluctuations sont très rapides avec une amplitude très faible. Le pic de tension le plus marqué est à 40s, lors de la perturbation de la charge où la tension dépasse sa valeur nominale de 1 % pour une durée de temps très faible 0.1s. Cette valeur reste acceptable, tant que la tension reprend rapidement sa valeur normale de fonctionnement.

Les résultats de simulation montrés dans la figure 5.17, prouvent un bon fonctionnement et une stabilité du système. La tension et le courant sont parfaitement régulés et maintenus constants (tension et courant sont parfaitement en phase).

### 5.3.2 Fonctionnement de GD dans le 2e Scenario :

Dans le scénario 2, le modèle est simulé en utilisant les mêmes paramètres du 1<sup>er</sup> scénario, avec la technologie de CVT intégrée au modèle du GD. L'ajout de la transmission à vitesse variable permet de contrôler le moteur diesel pour qu'il tourne à son meilleur régime. Ce régime de fonctionnement est évalué selon une table de correspondance entre la puissance du diesel et la vitesse de rotation. La table de



correspondance implantée dans le modèle provient d'un document de la compagnie CVT Corp (Annexe E), fabricant de la génératrice diesel.

Dans ce scénario, on se limitera aux résultats de la puissance mécanique du moteur diesel, la vitesse de rotation et la quantité du fuel injecté, en vue d'étudier l'impact de CVT sur le comportement dynamique du système. Ces derniers ont été choisis en accord avec leur différence par rapport aux résultats du modèle dans le scénario 1. Les résultats dans les figures 5.18, 5.19 et 5.20 sont comparés par rapport au 1<sup>er</sup> scénario.

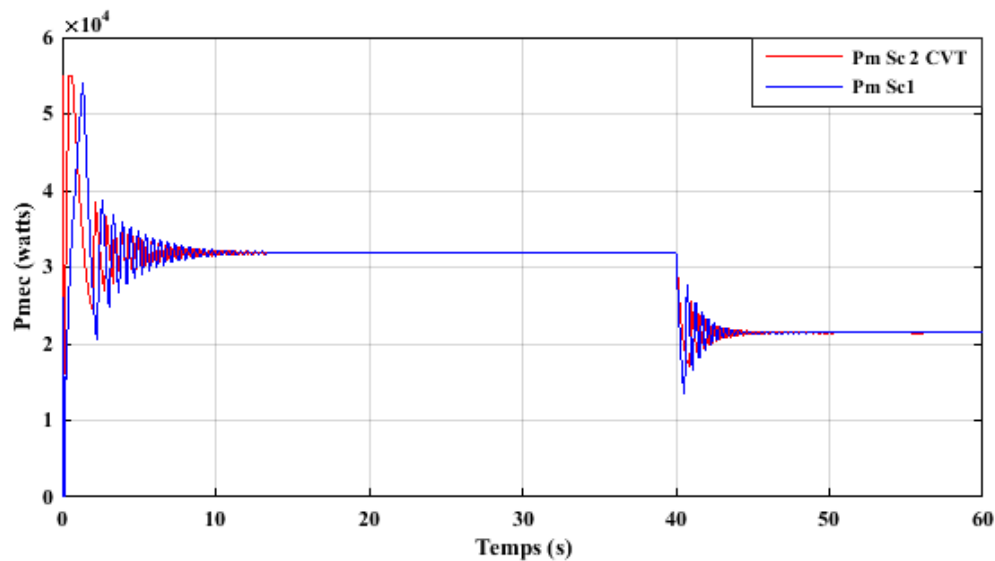


Figure 5.18 : Évolution de la puissance mécanique dans les deux scénarios

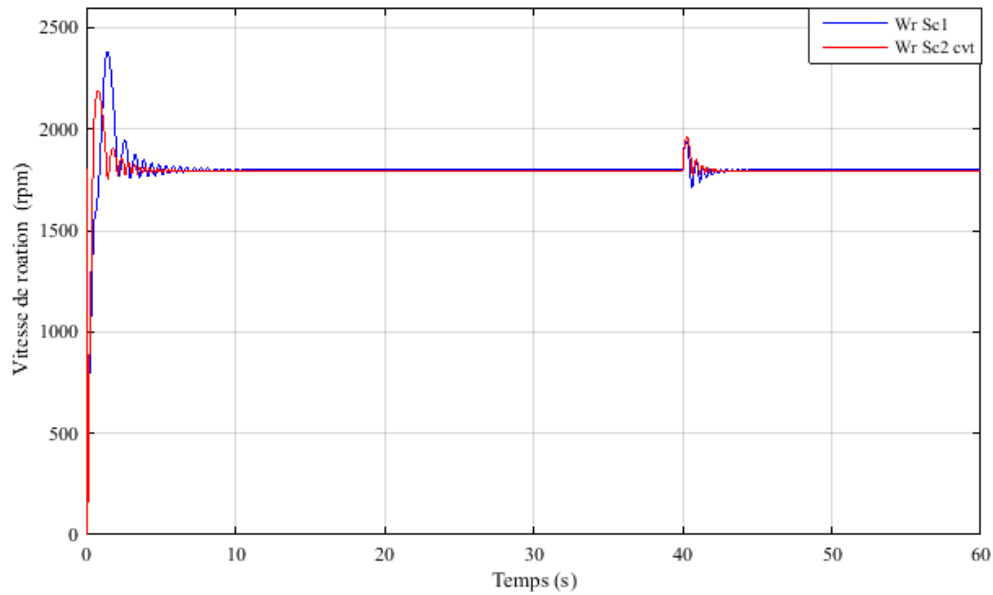


Figure 5.19 : Vitesse de rotation dans les deux scénarios (Sc1 et Sc2 avec CVT).

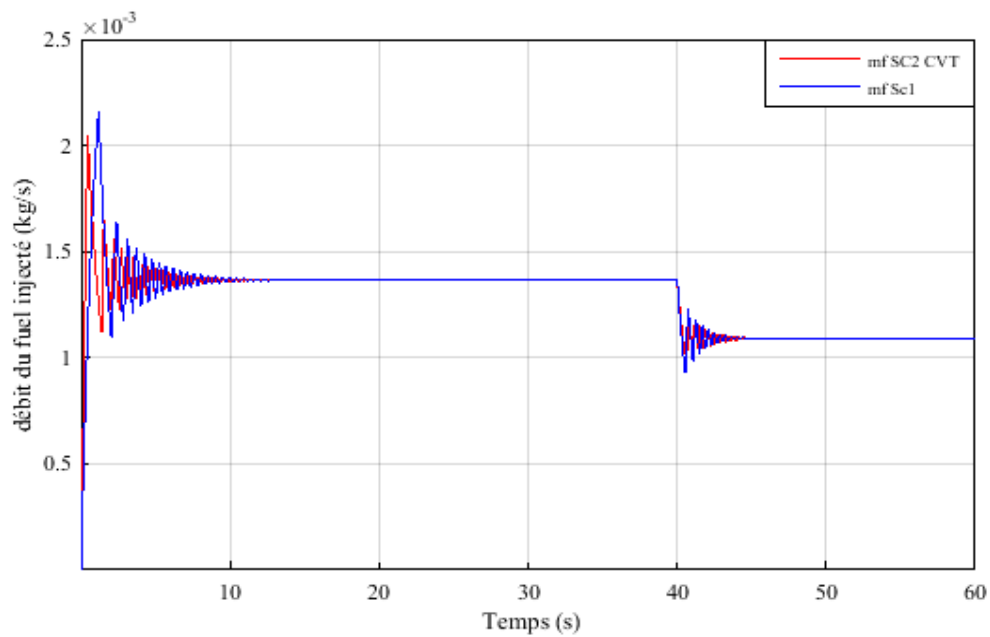


Figure 5.20 : Fuel injecté dans les deux scénarios (Sc1 et Sc2 avec CVT).

Les résultats montrent que les réponses de système dans le 2<sup>e</sup> scénario (courbe rouge) sont beaucoup plus performantes que celles de 1<sup>er</sup> scénario. . Le système est

beaucoup plus rapide et précis dans ce scénario, où on note des fluctuations moins intenses et pour des durées de temps très courtes

D'après les résultats de la figure 5.20, on remarque un meilleur contrôle sur la quantité de carburant injecté de sorte que les oscillations présentées au démarrage sont d'une amplitude plus faible comparé au scénario 1. De plus, il peut être remarqué que le système se stabilise rapidement pour doser la quantité du fuel nécessaire à injecter avec moins de pertes.

Par conséquent, la réponse du système présente un comportement amélioré avec l'ajout de CVT, où la dynamique du modèle devient plus rapide, plus stable et plus précise. On a observé que le système se stabilise après un seul dépassement, cela est dû aussi aux paramètres du contrôleur PID implémenté dans le modèle. Les performances de cette technologie (CVT) permettent de stabiliser la vitesse et de la garder constante ainsi d'apporter une économie de fuel plus ou moins remarquable comparée au premier scénario.

#### **5.4 Résultats de simulation de système d'air comprimé**

Dans cette section, est analysé le comportement dynamique du système d'air comprimé du point de vue du processus de stockage de l'air. On observera sa détente dans le moteur ainsi que le débit d'air délivré par le compresseur en suivant un profil de la demande.

Seuls les phénomènes électriques et énergétiques seront abordés où le comportement de système d'air comprimé (CAES) sera analysé vis-à-vis la présence ou l'absence de la demande et on ne rentrera pas dans une étude thermodynamique exhaustive de ce dernier.

Dans notre système, le volume est considéré constant. La pression varie alors en fonction de la charge et la décharge du réservoir d'air comprimé. Dans ce contexte, les figures ci-dessous présentent les résultats de simulation (sous Matlab) du CAES.

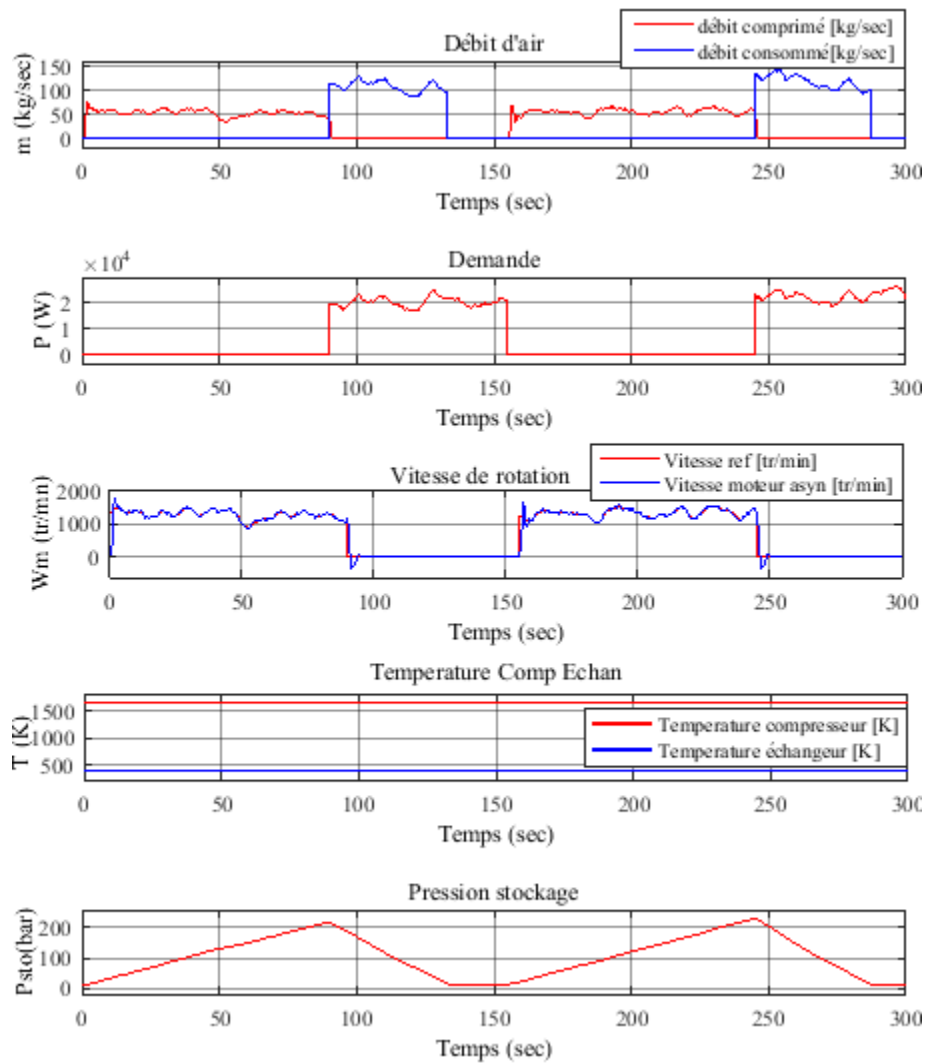


Figure 5.21 : Résultat du fonctionnement du CAES

Cette figure présente de haut en bas : le débit d'air comprimé et consommé, la demande de la charge, la vitesse de rotation du moteur asynchrone et sa référence, la température du compresseur et de l'échangeur, et finalement la pression du stockage.

À partir de cette figure, il peut être facilement observé que le moteur asynchrone du compresseur fonctionne (à sa vitesse nominale) quand il n'y a pas une demande de la charge. Cela montre que lorsque la puissance de la charge est nulle, le moteur asynchrone tourne à sa vitesse nominale 1500tr/mn pour comprimer l'air frais dans l'intervalle de temps entre 0 à 90s. Ainsi, le débit d'air comprimé dans cet intervalle est de 50kg/sec. De plus, on constate que le débit d'air comprimé et le fonctionnement du moteur (vitesse de rotation) varient proportionnellement avec la pression de stockage (du réservoir). Par conséquent, le moteur prend en considération la capacité du réservoir. Le compresseur comprime, par conséquent, l'air jusqu'à 90s et à cet instant le réservoir est plein. La pression de stockage atteint son maximum et il faut arrêter le processus de compression. Cette phase représente la charge de réservoir d'air comprimé.

Une fois le réservoir saturé, le moteur asynchrone est arrêté (vitesse de rotation nulle) et l'air comprimé sera consommé par la charge tel qu'on voit sur la figure 5.21. La consommation de l'air comprimé par la charge se maintient jusqu'à ce que la pression de stockage arrive à son minimum. En fait, cette phase représente la décharge de l'air comprimé du réservoir de stockage. À l'instant  $t = 140s$  de décharge, on constate que la charge n'est plus alimentée par le groupe diesel étant alimenté par le système d'air comprimé. Il faut envisager une autre source d'énergie pour être en sécurité d'alimentation. Cela peut être résolu avec la solution du couplage éolien-Diesel comprenant le CAES dans la prochaine section.

Cependant, on remarque que la vitesse du moteur asynchrone est une réplique de la vitesse de référence et qu'elle oscille autour de 1500tr/mn. Cela confirme les performances du régulateur PI utilisé pour contrôler la vitesse dans le système de CAES.

À partir de la figure 5.21, le fonctionnement du CAES dans l'hypothèse du couplage avec l'éolien et le diesel peut être expliqué de la manière suivante : à  $t = 90s$  jusqu'à  $t = 140s$ , le compresseur injecte de l'air comprimé dans le moteur diesel, ce qui représente la phase de consommation de l'air ayant été comprimé (de  $t = 0s$  à  $t = 90s$ ) et qui manifeste le phénomène de la suralimentation du moteur diesel.

La suralimentation du moteur diesel est un procédé qui consiste à élever la masse volumique de l'air à l'admission des moteurs pour en augmenter leur puissance spécifique (puissance par unité de cylindrée) [163]. En effet, ce procédé permet d'atteindre avec une même cylindrée des puissances deux à trois fois supérieures à la puissance d'un moteur non suralimenté grâce à des augmentations de masse et de volume de l'ordre de 10% [164].

Il faut remarquer ici que l'analyse de CAES dans cette étude s'est limitée à son fonctionnement d'un point de vue flux de puissance et stockage d'énergie sans aborder les aspects thermodynamiques de la pression, de la température et du rendement...etc. Les objectifs de cette étude excluent le processus thermodynamique du fonctionnement de CAES. Il serait cependant pertinent de mentionner d'autres travaux de recherche [8] qui ont abordé davantage ce processus et qui ont mis l'accent sur la suralimentation et la relation entre les différents paramètres thermodynamiques.

## **5.5 Couplage du système éolien-diesel avec stockage par air comprimé**

Comme mentionné dans cette étude, le simulateur développé comporte un système éolien-diesel avec stockage par air comprimé. Cependant, après avoir validé numériquement les systèmes de l'éolien, du diesel et du CAES d'une façon individuelle,

ces systèmes peuvent être mis en service conjointement avec ou sans stockage par air comprimé selon la stratégie décrite dans le chapitre précédent. Le modèle global du système éolien-Diesel-CAES était implémenté sous Matlab/Simulink et présenté dans le chapitre 4. Donc, les conditions d'opération et les modes de fonctionnement du système global seront détaillés dans les sections suivantes avec une analyse des résultats de simulation.

Il faut attirer l'attention que le système éolien validé précédemment se compose d'une seule éolienne de 10 kW. Par contre, dans le système global, 5 éoliennes de même type et de même taille seront utilisées. Autrement dit, on a multiplié le nombre des éoliennes par 5 afin d'avoir une production éolienne d'une puissance de 50 kW. Ainsi, on utilise le même générateur diesel de 50 kW et le système de stockage d'air comprimé validé individuellement dans les sections précédentes. En outre, le profil du vent appliqué au système global dans les différents modes de fonctionnement est le même. Ce profil est un palier des vitesses du vent avec des variations échelons de [8, 11, 13, 11] (m/s). De plus, la charge utilisée est une charge linéaire résistive de 35 kW, qui représente la puissance demandée par les consommateurs (Camp esker). Cette demande va subir des variations de 20% à 25%, dans le but d'évaluer le comportement du système suite aux perturbations.

Afin de pouvoir observer l'influence de stockage d'air comprimé sur le système global, le système sera étudié selon deux modes de fonctionnement : le 1<sup>er</sup> est un système de jumelage éolien – diesel sans stockage et le deuxième est un système éolien-diesel avec stockage par air comprimé.

### **5.5.1 Résultat de simulation du système éolien-diesel sans stockage**

Dans les figures ci-dessous seront présentés le bilan de puissance du système éolien-diesel et la qualité de l'onde délivrée par ce dernier. Il est nécessaire de noter ici que même dans les meilleures conditions de fonctionnement de l'éolienne, et même quand elle

satisfait la charge d'une façon autonome, le générateur diesel est obligatoirement maintenu en marche. En effet, il est reconnu que le fonctionnement d'un groupe diesel sous faible facteur d'utilisation est très néfaste au niveau de l'usure et entraîne des consommations élevées de carburant [29]. La préconisation à ce niveau est donc de maintenir le facteur d'utilisation des génératrices diesel supérieure à 30% [29].



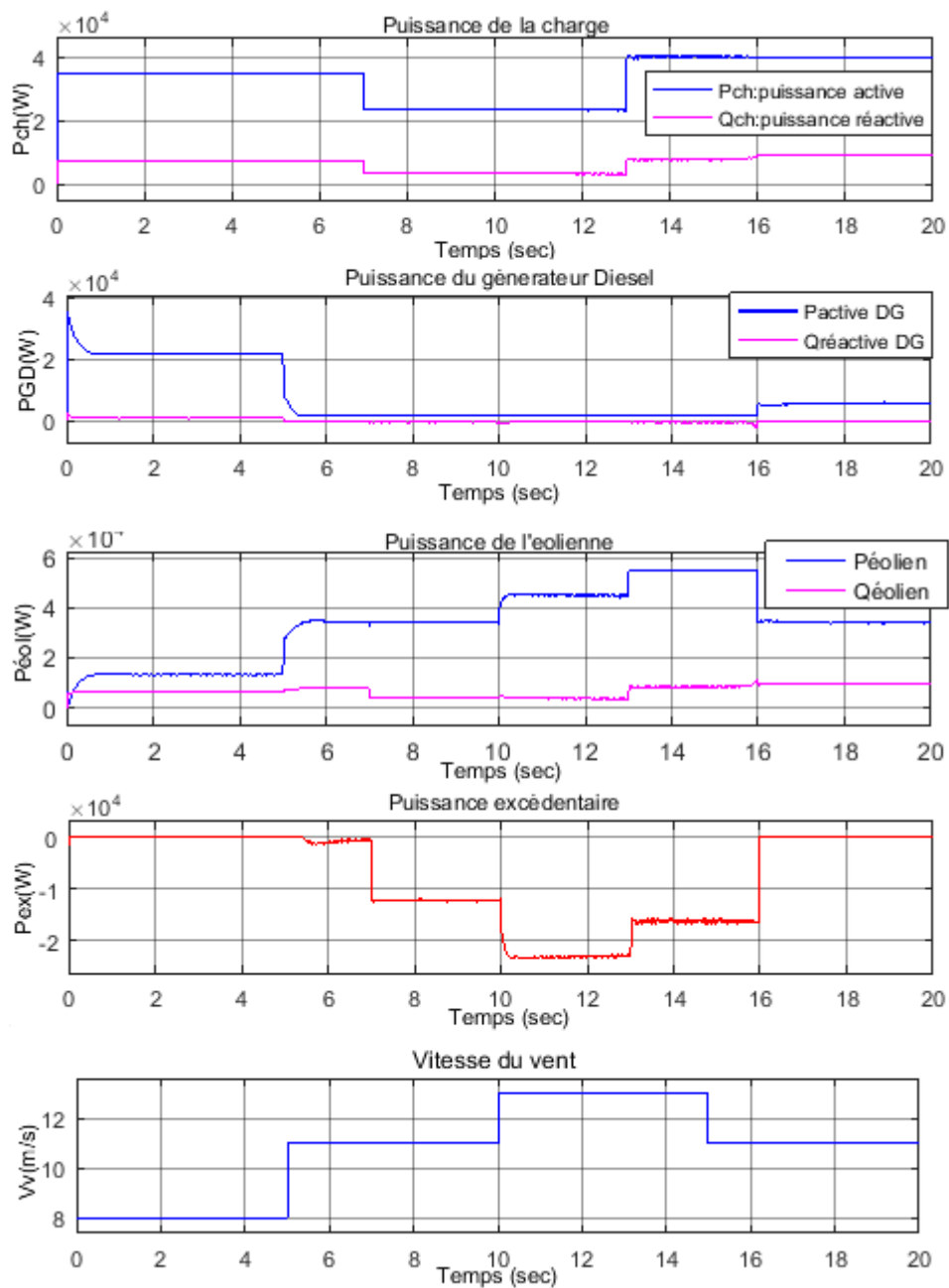


Figure 5.22 : Fonctionnement du système éolien Diesel sans stockage

Pour une vitesse du vent de 8m/s, les éoliennes ne sont pas capables de produire que 15% de leur puissance nominale ce qui nécessite le fonctionnement de GD afin d'assurer l'alimentation de la charge.

Alimentant toujours la même charge de 35 kW, à  $t=5s$  on augmente la vitesse du vent à 11m/s. La production des éoliennes augmente à ce moment et devient satisfaisante pour combler la demande. Malgré le fait que les éoliennes puissent alimenter toutes seules la charge, le diesel est maintenu en marche à sa limite de fonctionnement avec un facteur d'utilisation de 10%, afin d'assurer la régulation et le contrôle de la fréquence. Même si ce facteur d'utilisation est en dessous de la limite d'utilisation sécuritaire de 30% de GD, il est considéré acceptable tant que la durée de fonctionnement sous ce facteur est très courte et ne risque pas l'endommagement du GD. Il serait toutefois pertinent de prendre en compte cette limite et d'étudier le comportement de GD sous ce facteur dans des travaux futurs.

À  $t = 7s$ , une diminution de la charge est observée, mais les éoliennes répondent toujours à la demande de façon presque autonome. Avec l'augmentation de la vitesse du vent à  $t = 10s$ , la puissance de l'éolienne augmente et la charge reste la même. Par conséquent, un excès d'énergie est constaté sur la 3<sup>e</sup> figure de la série des figures 5.22. Cet excès d'énergie provenant de la production des éoliennes peut être absorbé par une charge secondaire ou dissipé sous forme de chaleur. Il peut, de façon, plus avantageuse être stocké et réutilisé au moment critique. Le stockage fera l'objet du 2<sup>e</sup> mode de fonctionnement.

On constate qu'une augmentation de 5 kW de la demande à l'instant  $t=13s$  n'a pas perturbé le fonctionnement du système tant que la production des éoliennes peut toujours couvrir cette puissance. À  $t = 15s$ , la vitesse du vent a diminué et la mise en service du diesel est obligatoire pour compléter le déficit de l'énergie de la charge.

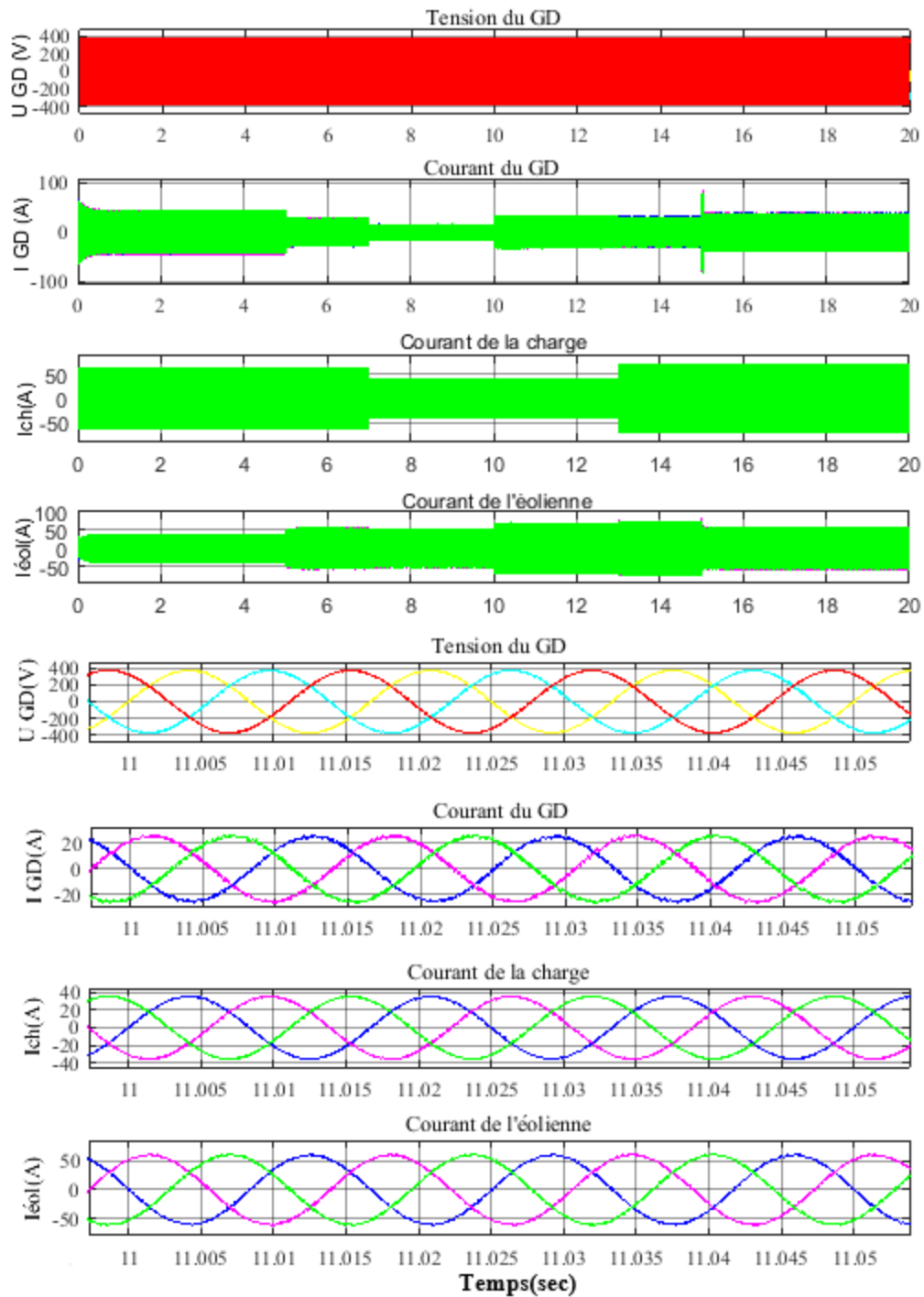


Figure 5.23 : Qualité de l'onde électrique du système éolien Diesel

Les résultats de simulation de la figure 5.23 montrent le bon fonctionnement de notre système hybride éolien-diesel. La tension et le courant sont en phase. La tension est constante et conserve la même amplitude malgré toutes les perturbations. Cela affirme les performances des systèmes de contrôle et de régulation utilisés dans le système global. De plus, on constate que le courant de l'éolienne et de la charge (figure 5.23) varie proportionnellement avec l'augmentation et la diminution de la puissance de ces dernières tel que présenté dans la figure 5.22. En revanche, le courant du diesel est perturbé à chaque changement de vitesse du vent ou variation de la charge. Cela revient à expliquer que le courant injecté par le diesel représente le courant du bus AC tel que le courant et la tension du bus sont contrôlés par le générateur Diesel. Ainsi, ces deux grandeurs dépendent fortement des variations des sources et de la charge du système global.

### **5.5.2 Résultat de simulation du système éolien-diesel avec stockage**

Le système à simuler dans cette section est un système hybride éolien-diesel avec stockage par air comprimé. On rappelle sa stratégie de fonctionnement : L'idée fondamentale de l'hybridation à moyenne échelle consiste à transférer l'excès de l'énergie éolienne produite durant les périodes venteuses aux périodes d'une demande élevée ou moins venteuses, en utilisant seulement une fraction du combustible qui serait consommée par le moteur diesel [8]. Cependant, durant les périodes de haute pénétration, la centrale éolienne alimente le village et l'énergie excédentaire disponible est utilisée pour comprimer de l'air frais avec un compresseur et le stocker à haute pression, après l'avoir refroidi via un échangeur de chaleur, dans des réservoirs souterrains. L'air comprimé ensuite sera injecté directement dans le moteur diesel, sachant d'avance la pression dans sa chambre de combustion et le débit d'air comprimé avec lequel le moteur va être suralimenté. Le générateur diesel fonctionnera dans les périodes où la vitesse du vent est trop faible ou nul, autrement dit quand la puissance éolienne est insuffisante à la charge.

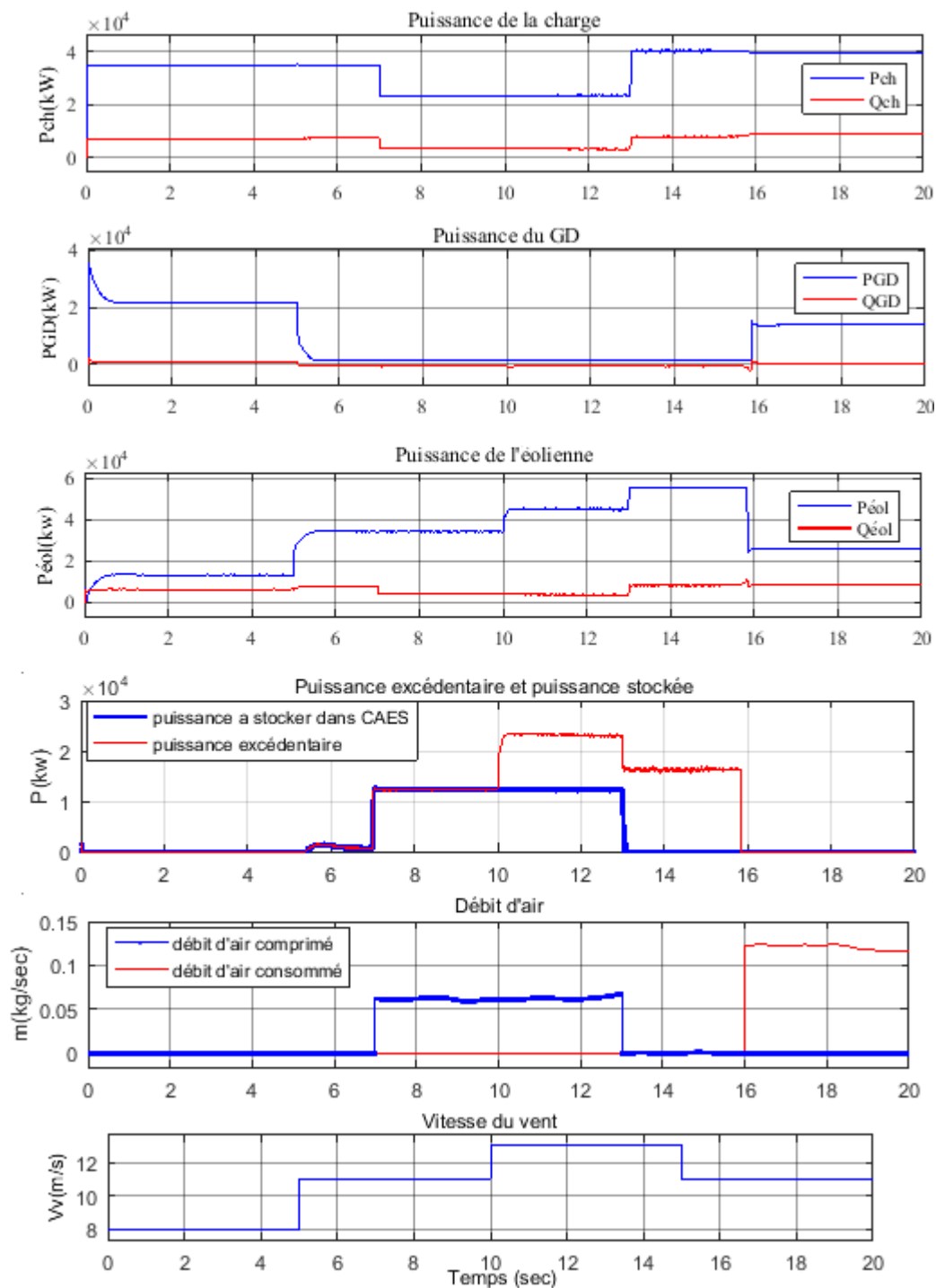


Figure 5.24 : Fonctionnement du système éolien diesel avec stockage par air comprimé

Le profil du vent et la charge sont les mêmes que ceux appliqués dans les modes de fonctionnement précédents. Les résultats obtenus sont présentés sur les figure 5.24 et Figure 5.25. Ces figures représentent le profil de la vitesse du vent, le profil de la demande, les variations de la puissance fournie par les éoliennes, par la génératrice diesel après l'hybridation avec les éoliennes et le système d'air comprimé (CAES), ainsi que les profils de la puissance excédentaire et destinée au stockage dans le CAES. De plus, le débit d'air comprimé et injecté dans le moteur diesel.

À partir de cette figure 5.24, on peut constater que pour une vitesse de vent variant entre 11 et 13 m/s, la puissance éolienne est satisfaisante pour la charge et le groupe diesel est maintenu à sa limite de fonctionnement. Particulièrement, avec une vitesse de 13m/s de  $t=10s$  à  $t=15s$ , la production des éoliennes dépasse la puissance maximale avec 5 kW (3<sup>e</sup> figure de la série des figures 5.24) quand la charge diminue à l'instant  $t = 13s$ . Par contre, entre les instants  $t = 15s$  et  $t = 16s$ , on remarque que la production de l'éolienne est maintenue à 55 kW malgré que la vitesse du vent ait diminué et la charge n'a pas changé. Celle-ci est finalement contrainte à cette valeur maximale tant que la vitesse du vent ne l'agrée pas, et on ne voit même pas une coordination avec le système de stockage pour renvoyer cette énergie. Cette première analyse permet de conclure que le régulateur de l'éolienne ne répond pas comme il faut aux objectifs du contrôle et cela est l'une des difficultés rencontrées dans le système éolien-diesel-CAES.

Il est possible d'observer dans la période entre  $t = 7s$  à  $t = 16s$ , que quand la production de la centrale éolienne dépasse le besoin de la demande, une énergie excédentaire est établie dans le système, dont une partie est stockée dans le système d'air comprimé (4<sup>e</sup> figure de la figure 5.24) et l'autre partie peut être soit absorbée par une charge secondaire, soit dissipée sous forme de chaleur. Parallèlement, on remarque sur la 5<sup>e</sup> figure de la figure 5.24 que le débit d'air comprimé injecté dans le réservoir augmente proportionnellement avec l'augmentation de la puissance et une fois la compression d'air dans le réservoir s'arrête, la puissance stockée décroît à zéro. Par conséquent, on peut

constater que le CAES n'a pas pu absorber toute l'énergie excédentaire et le processus d'expansion d'air comprimé doit être arrêté. Cela veut dire que le réservoir est plein et la pression dans le réservoir a atteint la pression maximale de stockage. Dans cette situation, il faut penser au redimensionnement du système de stockage ou à l'ajout d'une charge secondaire avec le système éolien-diesel-CAES.

À l'instant  $t = 16s$ , quand la vitesse du vent est faible et la production de l'éolienne est insuffisante pour combler la demande, le GD suralimenté comble le déficit d'énergie. En effet, dans cette phase le GD fonctionne en suralimentation où l'air ayant été comprimé sera injecté dans la chambre de combustion du moteur diesel et consommé par ce dernier. Dans cet intervalle de  $t=16s$  à  $t=20s$ , si on compare la 2<sup>e</sup> figure de la série 5.24 de la puissance développée par le GD et celle de la série des figures 5.23, on remarque que la puissance de GD a augmenté de 10 kW qui représente une augmentation de 10%. Cela revient à confirmer l'intérêt de la suralimentation tel que présenté précédemment dans le paragraphe 5.4 de ce chapitre.

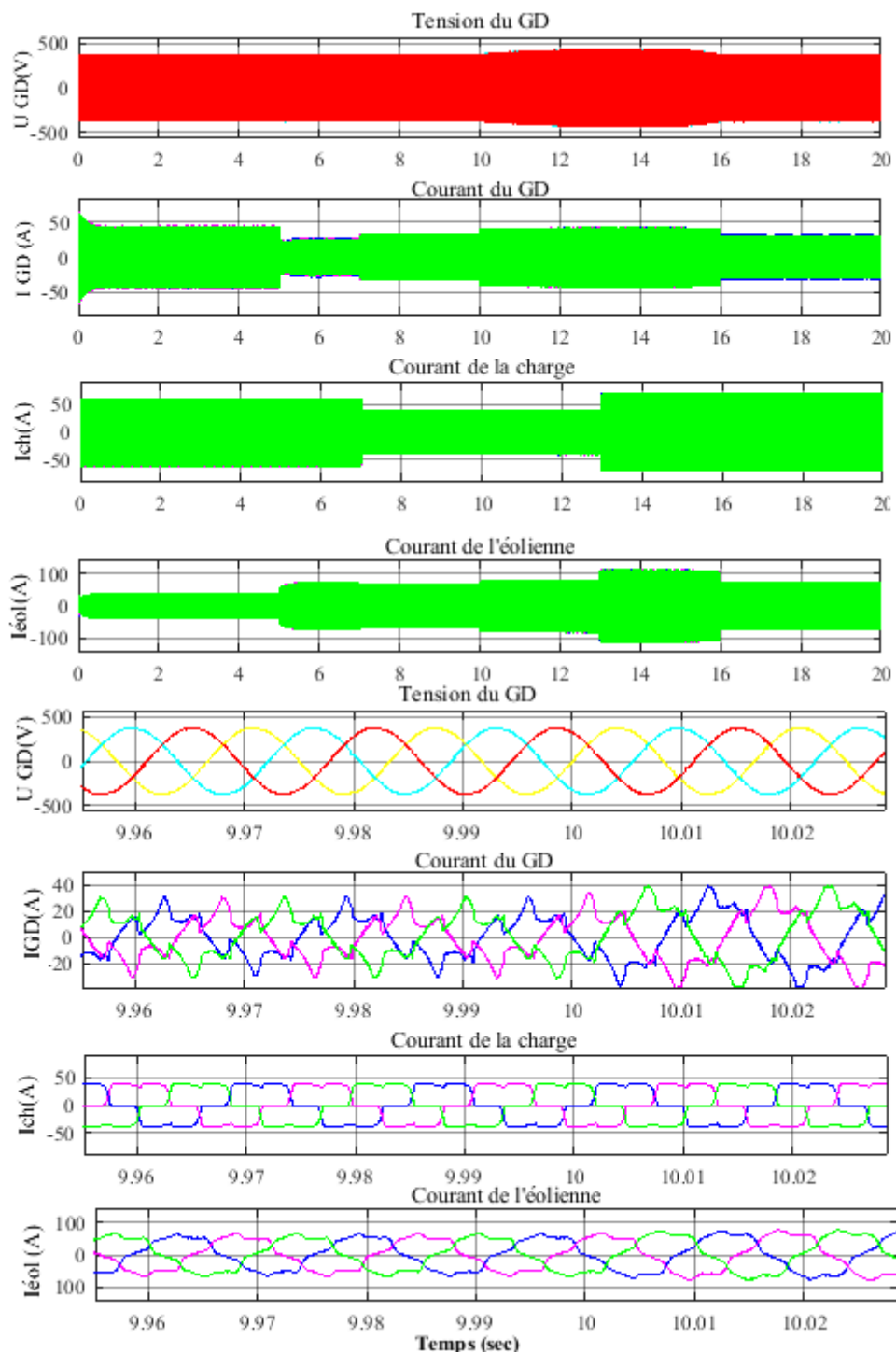


Figure 5.25 : Qualité de l'onde du système éolien-diesel avec CAES



La figure 5.25 présente la tension et le courant de GD, le courant de l'éolienne et de la charge. On peut constater facilement sur cette figure que la tension de GD n'est pas stable et change d'amplitude lors des variations de la vitesse du vent et de la charge. Ainsi la tension et le courant de GD ne sont pas en phase et la qualité de l'onde électrique est médiocre. Cela revient au fait que l'étude d'un système de contrôle global pour le SHEDAC n'était pas abordé en détail dans le cadre de ce projet. Ce qui pourrait faire partie des travaux futurs visant à optimiser le contrôle et le fonctionnement de système éolien-Diesel-CAES.

Toutefois il est nécessaire de mentionner que dans ce mode de fonctionnement, malgré que la charge fût alimentée en permanence, beaucoup des difficultés ont été rencontrées. Particulièrement la simulation du système s'est arrêté plusieurs fois à cause de la grande quantité des équations et des boucles algébriques et de l'absence d'un contrôleur performant capable de permuter d'un sous-système à un autre à travers la commande des interrupteurs d'activation et d'arrêt des sous-systèmes tel que présenté dans le modèle global/Simulink à la fin de 4<sup>e</sup> chapitre. Ces difficultés seront discutées davantage dans la partie « perspectives et travaux futurs ».

À partir des résultats de simulation de système éolien-Diesel avec et sans stockage, il était facile de conclure que le fonctionnement de système avec stockage est plus efficace. Cela est dit et évident, vu que le système de stockage permet toujours de réduire les pertes de systèmes, profiter de surplus d'énergie pour le réutiliser, participer à la stabilité et la régulation de la tension et la fréquence et surtout garantir un équilibre entre la production et la consommation d'énergie.

Cependant, il n'était pas facile de mettre en lumière les avantages de système de stockage dans le fonctionnement de SHEDAC en raison des problèmes du couplage et de la synchronisation entre les composants.

## 5.6 Interface graphique

Dans cette section, il a été attendu de présenter l'interface graphique de simulateur de SHEDAC, sauf que malheureusement les objectifs de projet ont tournés mal à la fin de l'étude de sorte qu'il était difficile de générer les interfaces graphiques du système global de SHEDAC après avoir designer et intégrer les paramètres de chaque sous-système dans le chapitre 3. Principalement, cette difficulté est en raison de la quantité des données et des équations des modèles de chaque composant de SHEDAC, de façon qu'il n'était pas évident de les connecter simultanément avec les contraintes de fonctionnement de chacun (éolien, Diesel, CAES). Cela nécessite beaucoup des disciplines et plus de temps pour finaliser le fonctionnement total de simulateur et de ses commandes. Par contre, on a pu faire l'ébauche de l'interface graphique de système éolien présentée dans la figure 5.26 dans son état actuel. Elle sert à simuler le sous-système éolien après avoir choisi les paramètres de l'éolienne et de l'environnement de simulation. D'abord, il faut exécuter le fichier des paramètres. Ensuite un bouton « Simuler » permet de lancer la simulation. En tout temps, il est possible de changer des paramètres spécifiques au cours d'une simulation ou avant d'en commencer une nouvelle.

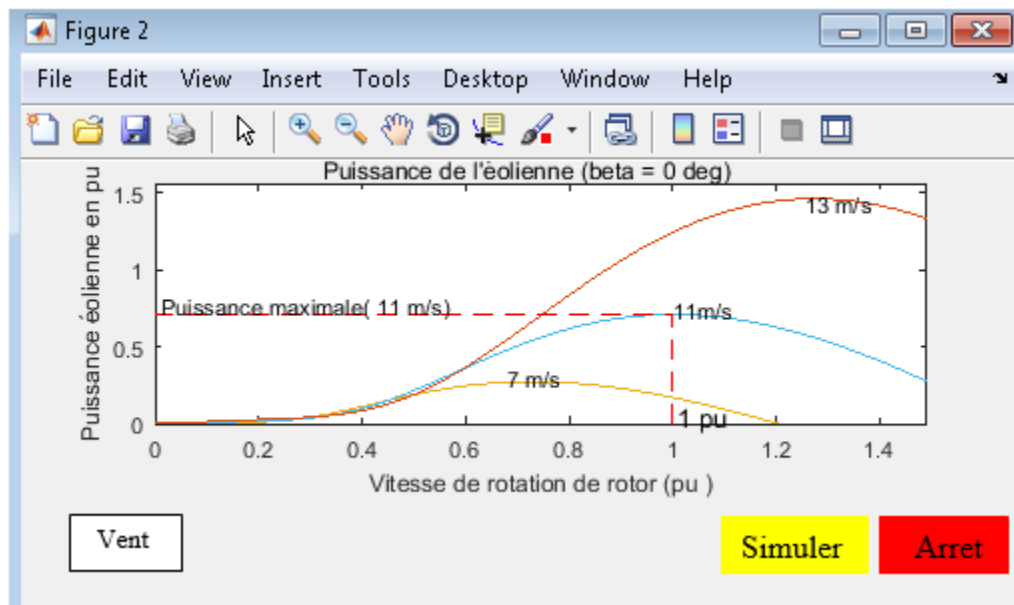


Figure 5.26 : Ébauche de l'interface graphique de système éolien

## 5.7 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons mis en évidence le comportement du système éolien, Diesel et CAES individuellement et en hybridation. Les résultats des simulations du système éolien couplé au réseau ont confirmé une bonne dynamique des différentes grandeurs mécaniques et électriques du système en soulignant ainsi la performance des régulateurs utilisés. Puis le générateur diesel a prouvé une bonne interaction entre la partie mécanique et électrique de GD. En outre, la boucle de régulation de la vitesse et de la tension a assuré une bonne qualité d'onde. Notamment, l'intégration du système de CVT dans le modèle de GD, a permis d'économiser la consommation du carburant et a démontré une meilleure dynamique de fonctionnement du GD. Pour ce qui est du CAES, il a été validé avec une charge de petite puissance, où l'analyse de résultats de simulation était plus concentrée sur le comportement du compresseur et du réservoir vis-à-vis la capacité de stockage. Ce dernier a confirmé une corrélation entre le phénomène de compression et la consommation de l'air comprimé.

Enfin, le système fonctionnant en jumelage éolien-diesel-CAES et sans CAES a permis d'évaluer une bonne interaction entre les différents sous-systèmes opérant conjointement et de montrer l'influence des perturbations engendrées par la production des éoliennes sur le groupe diesel et sur le CAES. De plus, le contrôleur global qui gère les transitions entre les modes de fonctionnement du système hybride (éolien diesel seul, éolien-diesel-CAES) a permis d'alimenter la charge en permanence, mais il n'a pas nécessairement satisfait l'atteinte des objectifs initialement fixés dans l'étude. Il était presque difficile de contrôler le SHEDAC et de synchroniser ses différents éléments. Par conséquent, il était conclu que les systèmes de contrôle se sont démarqués davantage lors de leur utilisation dans les sous-systèmes individuellement. L'ébauche de l'interface graphique de simulateur était seulement réalisable que pour le système éolien, en raison de la complexité de la simulation et des problèmes de convergence des systèmes.

## CONCLUSION ET PERSPECTIVES

### CONCLUSION

La modélisation permettant d'améliorer le fonctionnement des systèmes hybrides, est fortement nécessaire afin de rendre plus compétitive l'intégration des sources d'énergies renouvelables dans les systèmes électriques hors réseaux ou connectés aux réseaux publics. Le travail de recherche de ce mémoire avait pour but d'étudier le comportement dynamique d'un système hybride éolien-Diesel avec stockage par air comprimé (SHEDAC). Ce système est rendu possible grâce au développement de l'outil d'analyse et de simulation permettant l'évaluation du fonctionnement individuel ou en combinaison des différents sous-systèmes (éolien, Diesel, air comprimé).

En raison de la diversité des résultats économiques, techniques et énergétiques démontrés dans plusieurs études de littérature pour des systèmes hybrides, il a été exploré dans ce mémoire l'ensemble des logiciels destinés à leurs modélisations et permet de choisir le logiciel le plus approprié pour une étude dynamique d'un système hybride éolien diesel avec stockage par air comprimé (SHEDAC).

Cette réflexion sur les différents logiciels a permis de choisir Matlab/Simulink comme environnement de développement du nouvel outil, car il permet de mieux analyser les performances opérationnelles du système SHEDAC. Le choix de Matlab n'est pas seulement basé sur les avantages soulignés. Il résulte aussi du fait qu'il permet de développer des simulateurs adaptés à l'intégration de plusieurs sources d'énergie en site isolé (éolien, Diesel, PV, air comprimé) et facilite la manipulation des données.

Ainsi, le simulateur d'un système hybride éolien diesel-air comprimé (SHEDAC) a été développé avec une description détaillée de ses différentes fonctionnalités, de la méthode de création des modèles et de la stratégie du couplage. Cet outil représente un concept très

innovateur et promoteur. En effet il a été constaté que l'architecture de l'outil de SHEDAC, tel que proposé dans ce mémoire, n'a jamais fait l'objet d'un projet de recherche ou d'une étude scientifique faisant état de la modélisation et la conception d'un tel système.

Il a été démontré que la revue détaillée des modèles de la génératrice diesel ainsi que du système éolien et du système de stockage a permis de justifier le choix des modèles retenus qui sont intégrés dans le simulateur. La comparaison de ces différents modèles a permis de mettre en lumière l'approche de modélisation et la nature de modèle qu'un simulateur dynamique doit intégrer afin de mieux représenter les interactions électromécaniques et thermodynamiques entre les différents composants.

La flexibilité de modèle choisie offre une meilleure manipulation des données et une adaptation selon différents scénarios de fonctionnement du système. L'efficacité du système éolien dépend fortement de la caractérisation de ses paramètres tels que la détermination de son coefficient de puissance, de ses différents régulateurs et de la commande des convertisseurs. Il a ensuite été observé qu'un modèle abordant des phénomènes mécaniques et électriques de générateur diesel est pertinent pour une étude dynamique complète. Ainsi, un régulateur de vitesse et un régulateur de tension ont été modélisés pour assurer respectivement la régulation de la vitesse et de la fréquence de moteur, et le contrôle de la tension d'excitation de la génératrice synchrone. Pour ce qui est du système d'air comprimé CAES, il a été démontré que l'intégration des régulateurs de type PI permet d'assurer le contrôle de processus de compression et d'injection de l'air comprimé dans le moteur diesel.

Enfin, il a été démontré que le couplage des différents composants de SHEDAC se fait selon la stratégie de fonctionnement à moyenne échelle. La modélisation respecte l'idée fondamentale de l'hybridation à moyenne échelle de façon à transférer l'excès de l'énergie éolienne produite durant les périodes venteuses aux périodes d'une demande élevée ou

moins venteuse ; tout en utilisant seulement une fraction du combustible qui serait consommé par le moteur diesel. Principalement, cette stratégie de fonctionnement est assurée par le modèle de régulateur principal élaboré dans le modèle de SHEDAC.

Les résultats des simulations numériques des systèmes validés individuellement et en couplage font l'objet de la dernière partie du mémoire. Les simulations numériques de chaque sous-système ont démontré des performances énergétiques et un bon fonctionnement du système global. Les observations témoignent que la charge a été alimentée sans interruption et que la tension et les courants de système sont restés constants durant tous les modes de fonctionnement et malgré toutes les perturbations appliquées. Cela a été le cas même lorsqu'une charge non linéaire était connectée au système éolien ce qui a permis de confirmer la robustesse des systèmes de contrôles utilisés ainsi que les performances des commandes de redresseur et de la commande indirecte du courant appliquée à l'onduleur. De plus, les résultats obtenus en présence de cette charge ont montré la capacité du filtre actif à corriger les harmoniques de courant et à compenser l'énergie réactive. Pour ce qui est de groupe diesel GD, il a été conclu que l'intégration de CVT offre une réduction de consommation du fuel et un meilleur fonctionnement statique et dynamique de moteur diesel.

Finalement, le fonctionnement du système éolien diesel avec stockage par air comprimé était plus performant que le système éolien Diesel sans stockage. Le système disposant du stockage à air comprimé a permis d'assurer une bonne utilisation de l'énergie excédentaire à chaque fois que la production de la centrale éolienne a dépassé la demande. Ainsi, l'intérêt de la suralimentation du moteur diesel par air comprimé a été souligné et l'influence de son utilisation sur le fonctionnement du SHEDAC est nettement supérieure par rapport au système sans stockage.

Les résultats obtenus sont représentatifs du système dynamique de SHEDAC et ont permis de visualiser différentes grandeurs mécaniques et électriques. Ainsi, ces résultats permettront de confirmer le début de l'existence d'un simulateur dynamique pour le SHEDAC qui pourra plus tard être développé davantage grâce à la convivialité et au design graphique de l'outil.

### **PERSPECTIVES**

Ce mémoire représente seulement une étude préliminaire de modélisation et de simulation numérique sur chacun des sous-systèmes (éolien, Diesel, système d'air comprimé) du SHEDAC et le SHEDAC lui-même. Plusieurs problèmes de connexion des sources et d'optimisation restent encore à résoudre, notamment la confirmation des performances prédites par les analyses préliminaires à l'aide des modèles électromécaniques plus réalistes et la validation expérimentale de ces analyses.

En effet, l'accès à des données fiables de système a présenté des difficultés dans la simulation des systèmes, par exemple, il était difficile de récolter des données réalistes pour une éolienne de 55 kW vu qu'il n'existe pas une de cette puissance au micro réseaux du TCE. Il a alors fallu changer toute la stratégie de modélisation et de dimensionnement du système éolien pour réussir enfin à mettre en place 5 éoliennes de 10 kW.

De plus, la grande quantité d'équations à traiter, les problèmes de convergence, les problèmes de boucles algébriques et les problèmes d'utilisation des différents types de modèles (discret et continu) présentaient de vrais défis.

Plusieurs sources d'énergie et contrôleurs sont utilisés dans ce simulateur. Il a fallu vérifier quelle variable était en entrée et laquelle était en sortie pour que les différentes implantations des sous-systèmes soient capables d'être combinées ensemble dans l'outil. Au vu de l'absence d'un contrôleur global pertinent pour gérer toutes les transitions et les



connexions entre les différentes sources d'énergie, la synchronisation des sous-systèmes dans le même environnement de simulation a posé un problème majeur dans la validation de système global.

Il est essentiel dans les prochaines phases de développement du système de SHEDAC d'approfondir la stratégie de contrôle comme l'utilisation de lois de commandes avancées telles que l'intelligence artificielle. Il faudrait aussi définir un algorithme de gestion et de partage énergétique pour mettre en place efficacement le simulateur de SHEDAC.

Dans le système éolien, le convertisseur du côté réseau est également commandé afin de fournir de la puissance réactive en vue de renforcer le maintien de la production lors des défaillances. Un moyen de résoudre le problème de consommation de la puissance réactive pendant le creux de tension est de proposer l'utilisation de compensateurs statiques de puissance réactive, principalement le STATCOM. Ces compensateurs peuvent fournir la puissance réactive nécessaire pour conserver la tension à une valeur donnée, ainsi que pour atténuer les creux de tension.

Concernant le système diesel, une amélioration est également souhaitée dans le modèle de contrôleur qui ajuste la quantité de carburant injecté pour réguler la vitesse de rotation de la génératrice synchrone. Cela permettra d'atteindre une meilleure économie du carburant ainsi que d'améliorer les performances de fonctionnement de la génératrice diesel.

Pour le système d'air comprimé, il serait judicieux d'évaluer s'il est nécessaire de chauffer l'air sortant du réservoir avant de l'injecter dans le moteur diesel (il serait probablement très froid, car lorsqu'un gaz se dilate il refroidit). Une suralimentation avec de l'air trop froid pourrait nuire à la combustion.

L'interface graphique est à finaliser lorsque le simulateur sera mis au point. Des tests physiques sont également nécessaires pour valider les résultats de simulation. Enfin, une fois le fonctionnement du simulateur optimisé, une étude comparative complémentaire entre un système éolien-diesel avec stockage par air comprimé et un système éolien-diesel avec stockage par batteries serait pertinente pour démontrer les intérêts de SHEDAC.

Le passage du simulateur de SHEDAC à la validation expérimentale ou sur un banc d'essai permettrait de livrer une étude complète, qui avec des résultats réalistes concluants, représenterait une phase primordiale avant de passer à la conception.

Finalement, une dernière recommandation consiste à faire une étude de coût de système global qui sera intéressante et indispensable pour faciliter la commercialisation de l'outil et pouvoir installer le système.

## LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] [http://www.ge.com/ca/sites/www.ge.com.ca/files/FRENCH%20WHITEPAPER\\_0.pdf](http://www.ge.com/ca/sites/www.ge.com.ca/files/FRENCH%20WHITEPAPER_0.pdf), "production d'énergie décentralisée au canada - GE.com," ed. ,
- [2] "Gouvernement du Canada. Etat de la situation des collectivités éloignées /hors reseau au Canada.," Aout 2011.
- [3] T. M. Weis, A. Ilinca, and J.-P. Pinard, "Stakeholders' perspectives on barriers to remote wind–diesel power plants in Canada," *Energy Policy*, vol. 36, pp. 1611-1621, 2008.
- [4] K. Ah-You and G. Leng, "Renewable energy in Canada's remote communities," *CanmetENERGY, Varennes, Québec, Canada, Tech. Rep*, pp. 26-27, 1999.
- [5] d. l. e. e. d. r. n. Comité sénatorial permanent de l'énergie, "Énergiser les territoires du Canada."
- [6] D. Guérette, *Asservissement d'une éolienne à vitesse variable et à pas fixe dans le cadre d'un système de jumelage éolien-diesel à haute pénétration*: Université du Québec à Rimouski, 2010.
- [7] S. P. d. S. d. l'IREQ, "DEMANDE D'AVIS SUR LE DÉVELOPPEMENT DE L'ÉNERGIE ÉOLIENNE AU QUÉBEC."
- [8] H. Ibrahim, *Étude et conception d'un générateur hybride d'électricité de type éolien-diesel avec élément de stockage d'air comprimé*: Université du Québec à Chicoutimi, 2010.
- [9] "[http://publicsde.regie-energie.qc.ca/projets/40/DocPrj/R-3776-2011-B-0058-DEMANDE-PIECE-2011\\_08\\_01.pdf](http://publicsde.regie-energie.qc.ca/projets/40/DocPrj/R-3776-2011-B-0058-DEMANDE-PIECE-2011_08_01.pdf)," ed.
- [10] T. Basbous, *Hybridation pneumatique d'un moteur Diesel en vue de son utilisation dans un Système Hybride Éolien-Diesel avec Stockage d'Énergie sous forme d'Air Comprimé*: Université du Québec à Chicoutimi, 2013.
- [11] [https://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89nergie\\_%C3%A9olienne\\_au\\_Qu%C3%A9bec](https://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89nergie_%C3%A9olienne_au_Qu%C3%A9bec).
- [12] <http://canwea.ca/fr/marches-eoliens/national/> [Online].
- [13] New York State Department of Environmental Conservation, "Guidelines for conducting bird and bat studies at commercial wind energy projects," Division of Fish Wildlife and Marine Resources, Ed., ed. Albany, NY, 2009.
- [14] J. Lefebvre, *Modélisation mécanique d'une éolienne*, Université de Québec à Rimouski2010.
- [15] N. MARTINEZ, "Étude énergétique et modélisation d'un Système Hybride Éolien-Diesel avec stockage d'air comprimé (SHEDAC). UQAR," Avril 2015.
- [16] I. Baring-Gould and D. Corbus, "Status of Wind-Diesel Applications in Arctic Climates," in *The Arctic Energy Summit Technology Conference*, Anchorage, 2007.
- [17] D. HARVEY and S. BLAIS, "DIMENSIONNEMENT DU SYSTÈME HYBRIDE AUTONOME EOLIEN-DIESEL AVEC STOCKAGE D'AIR COMPRIME POUR TOUR DE MESURE ATMOSPHERIQUE EN REGION NORDIQUE ISOLEE," 2010.
- [18] S. p. A. C. p. l. R. Electricité. Stockage innovant de l'énergie.Projet SACRE [Online].
- [19] F. Crotogino, "Le stockage d'air comprimé de Huntorf : 20 ans de succès dans l'exploitation .Texte traduit disponible sur : <http://www.mines-energie.org/Dossiers/>

- Stock2006\_13.pdf," congrès du Solution Mining Research Institute (S.M.R.I.) à Orlando. Avril 2001.
- [20] A. Kaabeche and R. Ibtouen, "Techno-economic optimization of hybrid photovoltaic/wind/diesel/battery generation in a stand-alone power system," *Solar Energy*, vol. 103, pp. 171-182, 2014.
- [21] "MOUSTAFA, Nagham. 2013. Stratégies de fonctionnement du système hybride éolien-diesel solaire avec stockage dans des batteries. Rapport de stage. Université Libanaise, 57 p."
- [22] M. Y. Suberu, M. W. Mustafa, and N. Bashir, "Energy storage systems for renewable energy power sector integration and mitigation of intermittency," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 35, pp. 499-514, 2014.
- [23] "Kuo, Ming-Tse et Hao T. Wei. 2014. « Optimum sizing of PV/wind/battery hybrid microgrids consider the minimum electricity cost ». *Energies*."
- [24] H. Ibrahim, A. Ilinca, and J. Perron, "Energy storage systems—characteristics and comparisons," *Renewable and sustainable energy reviews*, vol. 12, pp. 1221-1250, 2008.
- [25] H. Ibrahim, R. Beguenane, and A. Merabet, "Technical and financial benefits of electrical energy storage," in *Electrical Power and Energy Conference (EPEC), 2012 IEEE, 2012*, pp. 86-91.
- [26] [http://www.web.co.bw/sib/somes\\_3\\_2\\_description.pdf](http://www.web.co.bw/sib/somes_3_2_description.pdf) [Online].
- [27] C. Schaffrin, "Solsim and Hybrid Designer œ Self Optimizing Software Tools For Simulation Of Solar Hybrid Applications " ."
- [28] <http://www.insel.eu/> [Online].
- [29] H. Ibrahim, A. Ilinca, and J. Perron, *Investigations des différentes alternatives renouvelables et hybrides pour l'électrification des sites isolés: rapport interne: Laboratoire de recherche en énergie éolienne, Université du Québec à Rimouski*, 2008.
- [30] H. Ibrahim, R. Younès, T. Basbous, A. Ilinca, and M. Dimitrova, "Optimization of diesel engine performances for a hybrid wind–diesel system with compressed air energy storage," *Energy*, vol. 36, pp. 3079-3091, 2011.
- [31] I. F. d. Cunha. (2007). *Guide de référence sur l'efficacité énergétique de L'AIR COMPRIMÉ*.
- [32] B. Abou, Y. Chamaillard, G. Corde, G. Gissinger, P. Higelin, N. Le Fort-Piat, et al., "Contrôle-commande de la voiture," *Traité IC2. G. Gissinger and N. Le Fort-Piat*, vol. 27, 2002.
- [33] I. d. l. s. Québec. [http://www.stat.gouv.qc.ca/statistiques/mines/investissement/mines\\_graph1.htm](http://www.stat.gouv.qc.ca/statistiques/mines/investissement/mines_graph1.htm) [Online].
- [34] "[http://www.mathworks.com/help/physmod/sps/powersys/ref/permanentmagnetsynchronoumachine.html?s\\_tid=srchtitle](http://www.mathworks.com/help/physmod/sps/powersys/ref/permanentmagnetsynchronoumachine.html?s_tid=srchtitle)."
- [35] H. IBRAHIM, M. DIMITROVA, A. ILINCA, and J. PERRON, "Système hybride éolien-diesel avec stockage d'air comprimé pour l'électrification d'une station de télécommunications isolée," *Revue internationale de génie électrique*, vol. 12, pp. 701-731, 2009.
- [36] J. L. Heilbron, *The Oxford companion to the history of modern science*: Oxford University Press, 2003.

- [37] H. Ibrahim, A. Ilinca, and J. Perron, "Integration of wind turbines with compressed air energy storage in remote area power supply system," *Proceedings of European Wind Energy Association (EWEA)*, 2012.
- [38] H. IBRAHIM, Mariya DIMITROVA, Adrian ILINCA et Jean PERRON. 2008. « Système hybride éolien-diesel avec stockage d'air comprimé pour l'électrification d'une station de télécommunication isolée ». *European Journal of Electrical Engineering*, volume 12, pp. 701-731. .
- [39] M.-T. e. H. T. W. O. s. o. P. w. b. h. m. c. t. m. e. c. E. KUO.
- [40] T. BASBOUS, Rafic YOUNES, Adrian ILINCA et Jean PERRON. 2012. « Pneumatic hybridization of a diesel engine using compressed air storage for winddiesel energy generation ». *Energy*, volume 38, numéro 1, pp. 264-275.
- [41] H. Ibrahim, R. Younès, A. Ilinca, and J. Perron, "Investigation des générateurs hybrides d'électricité de type éolien-air comprimé," *Numéro spécial CER*, 2007.
- [42] "Schaffrin C, Knoblich I, Seeling-Hochmuth GC, VanKuik E. Solsim and hybrid designer: self optimizing software tools for simulation of solar hybrid applications. EuroSun 98 1998; V.2.17-1."
- [43] T. Basbous, R. Younes, A. Ilinca, and J. Perron, "Required time response of a variable valve actuator equipping a hybrid pneumatic-combustion engine," *International Journal of Engine Research*, p. 1468087412450812, 2012.
- [44] T. Basbous, R. Younes, A. Ilinca, and J. Perron, "Fuel consumption evaluation of an optimized new hybrid pneumatic-combustion vehicle engine on several driving cycles," *International Journal of Engine Research*, p. 1468087411433250, 2012.
- [45] M. Elhajj, "ÉTUDE DE CAS DE L'ÉLECTRIFICATION D'UN VILLAGE NORDIQUE PAR UN SYSTÈME HYBRIDE ÉOLIEN-DIESEL AVEC STOCKAGE PAR AIR COMPRIMÉ À MOYENNE ÉCHELLE," 2009.
- [46] G. S. G. f. H. V. 2.1. (April 2005). *NREL (National Renewable Energy Laboratory)*
- [47] <https://www.eolien.qc.ca/fr/infrastructures/microreseau-couplage-eolien-diesel.html>. TECHNOCENTRE EOLIEN. « Micro réseau (couplage éolien-diesel) [Online].
- [48] H. Yang, L. Lu, and W. Zhou, "A novel optimization sizing model for hybrid solar-wind power generation system," *Solar energy*, vol. 81, pp. 76-84, 2007.
- [49] G. Capizzi and G. Tina, "Long-term operation optimization of integrated generation systems by fuzzy logic-based management," *Energy*, vol. 32, pp. 1047-1054, 2007.
- [50] A. Al-Alawi, S. M. Al-Alawi, and S. M. Islam, "Predictive control of an integrated PV-diesel water and power supply system using an artificial neural network," *Renewable energy*, vol. 32, pp. 1426-1439, 2007.
- [51] S. Shaahid and M. Elhadidy, "Technical and economic assessment of grid-independent hybrid photovoltaic-diesel-battery power systems for commercial loads in desert environments," *Renewable and sustainable energy reviews*, vol. 11, pp. 1794-1810, 2007.
- [52] A. Kébé, "Contribution au pré dimensionnement et au contrôle des unités de production d'énergie électrique en site isolé à partir des énergies renouvelables: Application au cas du Sénégal," Université Paris Sud-Paris XI, 2013.
- [53] HOMER Energy LLC. HOMER. <http://www.homerenergy.com/> [Online].

- [54] G. Bekele and B. Palm, "Wind energy potential assessment at four typical locations in Ethiopia," *Applied Energy*, vol. 86, pp. 388-396, 2009.
- [55] S. Rehman, I. El-Amin, F. Ahmad, S. Shaahid, A. Al-Shehri, J. Bakhshwain, *et al.*, "Feasibility study of hybrid retrofits to an isolated off-grid diesel power plant," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 11, pp. 635-653, 2007.
- [56] M. Iqbal, "A feasibility study of a zero energy home in Newfoundland," *Renewable energy*, vol. 29, pp. 277-289, 2004.
- [57] M. Khan and M. Iqbal, "Pre-feasibility study of stand-alone hybrid energy systems for applications in Newfoundland," *Renewable energy*, vol. 30, pp. 835-854, 2005.
- [58] T. Lambert, "Micropower System Modeling with Homer", in *Integration of Alternative Sources of Energy* by Felix A. Farret and M. Godoy Simoes," 2006.
- [59] G. J. Leng. RETScreen International Archives [Online].
- [60] Y. Himri, A. B. Stambouli, and B. Draoui, "Prospects of wind farm development in Algeria," *Desalination*, vol. 239, pp. 130-138, 2009.
- [61] A. Hourri, "Solar water heating in Lebanon: Current status and future prospects," *Renewable energy*, vol. 31, pp. 663-675, 2006.
- [62] M. El-Shimy, "Viability analysis of PV power plants in Egypt," *Renewable Energy*, vol. 34, pp. 2187-2196, 2009.
- [63] G. Bakos, M. Soursos, and N. Tsagas, "Technoeconomic assessment of a building-integrated PV system for electrical energy saving in residential sector," *Energy and buildings*, vol. 35, pp. 757-762, 2003.
- [64] G. e. a. Leng, " RETScreen International: results and impacts 1996–2012," *Minister of Natural Resources Canada*, 2004.
- [65] <http://www.ceere.org/rerl/projects/software/hybrid2> [Online].
- [66] <http://www.umass.edu/windenergy/research/topics/tools/software/hybrid2> [Online].
- [67] H. J. Green and J. F. Manwell, *HYBRID2: A Versatile Model of the Performance of Hybrid Power Systems*: National Renewable Energy Laboratory, 1995.
- [68] J. Manwell, A. Rogers, G. Hayman, C. Avelar, J. McGowan, U. Abdulwahid, *et al.*, "Hybrid2-a hybrid system simulation model, Theory manual. National Renewable Energy Laboratory, Subcontract No," XL-1-11126-1-12006.
- [69] <http://www.umass.edu/windenergy/research/topics/tools/software/hybrid2>.
- [70] <http://www.unizar.es/rdufo/user%20manual.pdf> [Online].
- [71] "<http://www.unizar.es/rdufo/hoga-eng.htm>," 03.04.13.
- [72] [http://personal.unizar.es/rdufo/index.php?option=com\\_content&view=article&id=2&Itemid=104&lang=en](http://personal.unizar.es/rdufo/index.php?option=com_content&view=article&id=2&Itemid=104&lang=en).
- [73] S. Sinha and S. Chandel, "Review of software tools for hybrid renewable energy systems," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 32, pp. 192-205, 2014.
- [74] "<http://www.iea-pvps-task11.org/id39.htm>," 03.04.13

- [75] H. Ibrahim, J. Lefebvre, J. Methot, and J. Deschenes, "Numerical modeling wind-diesel hybrid system: Overview of the requirements, models and software tools," in *Electrical Power and Energy Conference (EPEC), 2011 IEEE*, 2011, pp. 23-28.
- [76] [www.mathworks.com/products/matlab/](http://www.mathworks.com/products/matlab/) [Online].
- [77] Y. He, "Stratégie de commande unifiée du TCSC (" Thyristor-Controlled Series Capacitor") pour améliorer la stabilité des réseaux électriques," Université du Québec à Trois-Rivières, 2001.
- [78] M. L. Doumbia and A. Traoré, "Modélisation et simulation d'une machine asynchrone à cage à l'aide du logiciel Matlab/simulink," *MSAS, Bamako, July*, pp. 8-12, 2002.
- [79] <http://sel.me.wisc.edu/trnsys/> [Online].
- [80] M. Souliotis, S. Kalogirou, and Y. Tripanagnostopoulos, "Modelling of an ICS solar water heater using artificial neural networks and TRNSYS," *Renewable Energy*, vol. 34, pp. 1333-1339, 2009.
- [81] A. Hobbi and K. Siddiqui, "Optimal design of a forced circulation solar water heating system for a residential unit in cold climate using TRNSYS," *Solar Energy*, vol. 83, pp. 700-714, 2009.
- [82] S. A. Kalogirou, "Use of TRNSYS for modelling and simulation of a hybrid pv-thermal solar system for Cyprus," *Renewable energy*, vol. 23, pp. 247-260, 2001.
- [83] "Thermal Energy System Specialists. The Aldo Leopold Legacy Center Baraboo, Wisconsin. <http://www.trnsys.com/ProjectProfiles/ALFProjectProfile.pdf>," 2004.
- [84] A. KEBE, "Contribution au pré dimensionnement et au contrôle des unités de production d'énergie électrique en site isolé à partir des énergies renouvelables : Application au cas du Sénégal," 2013.
- [85] J. L. Bernal-Agustín and R. Dufo-Lopez, "Simulation and optimization of stand-alone hybrid renewable energy systems," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 13, pp. 2111-2118, 2009.
- [86] D. Turcotte, M. Ross, and F. Sheriff, "Photovoltaic hybrid system sizing and simulation tools: status and needs," in *PV Horizon: Workshop on photovoltaic hybrid systems, Montreal*, 2001.
- [87] S. Phrakonkham, J.-Y. Le Chenadec, D. Diallo, G. Remy, and C. Marchand, "Reviews on micro-grid configuration and dedicated hybrid system optimization software tools: application to laos," *Engineering journal*, vol. 14, pp. 15-34, 2010.
- [88] M. R. Morgan TR, Brinkworth BJ. ARES: a refined simulation program for the sizing and optimization of autonomous hybrid energy systems. Solar Energy Research Laboratory, Department Of Mechanical Engineering, 1997;59(4-6):205-15.
- [89] P. I. Kendrick KL, Weinstock I, Meiners D, Trujillo D. Hybrid generation Model simulator (SubSim). In: Proceeding softw EESAT conference, San Francisco, October 27-29, 2003.
- [90] "[http://www.iea-pvps-task11.org/htmlobj-167/gehrke\\_ipsys\\_valencia08.pdf](http://www.iea-pvps-task11.org/htmlobj-167/gehrke_ipsys_valencia08.pdf)," ed, accessed on 03/04/2013.
- [91] "[http://WWW/research/sustainable\\_energy/wind\\_energy/projects/ipsys](http://WWW/research/sustainable_energy/wind_energy/projects/ipsys)," ed, accessed 03.04.13.
- [92] "<http://www.unizar.es/rdufo/grhyso.htm>," ed, accessed 04.03.13.

- [93] "<http://power.larc.nasa.gov/>," ed, accessed 04.03.13.
- [94] <http://www.3ds.com/fr/products-services/catia/products/dymola>.
- [95] <http://www.dps-fr.com/dymola-technique>.
- [96] ([accessed 22.04.09]). <http://www.balmorel.com/>.
- [97] D. Connolly, H. Lund, B. V. Mathiesen, and M. Leahy, "A review of computer tools for analysing the integration of renewable energy into various energy systems," *Applied Energy*, vol. 87, pp. 1059-1082, 2010.
- [98] S. Jacobsson and K. Karltorp, "Formation of competences to realize the potential of offshore wind power in the European Union," *Energy Policy*, vol. 44, pp. 374-384, 2012.
- [99] H. Lund, "Renewable energy strategies for sustainable development," *Energy*, vol. 32, pp. 912-919, 2007.
- [100] H. B. Ravn, ed, <http://www.balmorel.com/> [accessed 22.04.09].
- [101] K. Karlsson and P. Meibom, "Integration of hydrogen as energy carrier in the Nordic energy system," in *16th World Hydrogen Energy Conference*, 2006.
- [102] F. Møller Andersen, S. G. Jensen, H. V. Larsen, P. Meibom, H. Ravn, K. Skytte, *et al.*, "Analyses of demand response in Denmark," Risø National Laboratory 2006.
- [103] E. E. Analyses, "50% wind power in Denmark in 2025," *Energy Agency, Copenhagen, Denmark*, 2007.
- [104] A. M. Heggedal, "Investment in new transmission capacity between Estonia and Finland—effects on the electricity market and welfare," Masters thesis, Department of Economics and Natural Resource Management, Norwegian University of Life Sciences, Ås, Norway, 2006.
- [105] M. Ball, M. Wietschel, and O. Rentz, "Integration of a hydrogen economy into the German energy system: an optimising modelling approach," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 32, pp. 1355-1368, 2007.
- [106] P. E. Morthorst, S. G. Jensen, and P. Meibom, *Investering og prisdannelse på et liberaliseret elmarked*, 2005.
- [107] S. G. Jensen and P. Meibom, "Investments in liberalised power markets: gas turbine investment opportunities in the Nordic power system," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 30, pp. 113-124, 2008.
- [108] J. Rud, "Systemanalyse af Compressed Air Energy Storage: Optimering, drift og implementering i det danske energimarked," Technical University of Denmark, DTU, DK-2800 Kgs. Lyngby, Denmark, 2009.
- [109] M. Patel and T. Pryor, "Monitored performance data from a hybrid RAPS system and the determination of control set points for simulation studies," in *ISES 2001 Solar World Congress*, 2001.
- [110] K. Schaffrin, Seeling-Hochmuth GC, VanKuik EN. Slim and hybrid designer: self optimizing software tools for simulation of solar hybrid applications, Euro Sun 98; September 14–17, 1998. p.1–7.
- [111] H. Lund and E. Münster, "Modelling of energy systems with a high percentage of CHP and wind power," *Renewable Energy*, vol. 28, pp. 2179-2193, 2003.



- [112] H. Lund, "Aalborg University. EnergyPLAN: Advanced Energy Systems Analysis Computer Model. Aalborg University, 2008," ed.
- [113] H. Lund, "Large-scale integration of wind power into different energy systems," *Energy*, vol. 30, pp. 2402-2412, 2005.
- [114] H. Lund, "Large-scale integration of optimal combinations of PV, wind and wave power into the electricity supply," *Renewable Energy*, vol. 31, pp. 503-515, 2006.
- [115] H. Lund and E. Münster, "Management of surplus electricity-production from a fluctuating renewable-energy source," *Applied Energy*, vol. 76, pp. 65-74, 2003.
- [116] H. Lund and W. Kempton, "Integration of renewable energy into the transport and electricity sectors through V2G," *Energy policy*, vol. 36, pp. 3578-3587, 2008.
- [117] H. Lund and A. N. Andersen, "Optimal designs of small CHP plants in a market with fluctuating electricity prices," *Energy Conversion and Management*, vol. 46, pp. 893-904, 2005.
- [118] M. Münster and H. Lund, "Use of waste for heat, electricity and transport—Challenges when performing energy system analysis," *Energy*, vol. 34, pp. 636-644, 2009.
- [119] B. V. Mathiesen, *Fuel cells and electrolyzers in future energy systems: Videnbasen for Aalborg UniversitetVBN, Aalborg UniversitetAalborg University, Det Teknisk-Naturvidenskabelige FakultetThe Faculty of Engineering and Science, Det Danske Center for MiljøvurderingThe Danish Centre for Environmental Assessment*, 2008.
- [120] B. V. Mathiesen and H. Lund, "Comparative analyses of seven technologies to facilitate the integration of fluctuating renewable energy sources," *IET Renewable Power Generation*, vol. 3, pp. 190-204, 2009.
- [121] M. B. Blarke and H. Lund, "The effectiveness of storage and relocation options in renewable energy systems," *Renewable Energy*, vol. 33, pp. 1499-1507, 2008.
- [122] H. Lund and G. Salgi, "The role of compressed air energy storage (CAES) in future sustainable energy systems," *Energy Conversion and Management*, vol. 50, pp. 1172-1179, 2009.
- [123] H. Lund and W. W. Clark, "Management of fluctuations in wind power and CHP comparing two possible Danish strategies," *Energy*, vol. 27, pp. 471-483, 2002.
- [124] H. Lund, *Renewable energy systems: the choice and modeling of 100% renewable solutions*: Academic Press, 2009.
- [125] H. Lund, N. Duić, G. Krajac, and M. da Graça Carvalho, "Two energy system analysis models: a comparison of methodologies and results," *Energy*, vol. 32, pp. 948-954, 2007.
- [126] D. Connolly, M. Leahy, H. Lund, and B. V. Mathiesen, "Ireland's pathway towards a 100% renewable energy-system:: The first step," in *5 th DUBROVNIK CONFERENCE ON SUSTAINABLE DEVELOPMENT OF ENERGY WATER AND ENVIRONMENT SYSTEMS*, 2009.
- [127] S. S. M. U. T. A. T. P. O. P. s. S. R. Klose T, Sand 2009-8258, December 2009.
- [128] T. Zabaïou, L.-A. Dessaint, and P. Brunelle, "Development of a new library of IEEE excitation systems and its validation with PSS/E," in *2012 IEEE Power and Energy Society General Meeting*, 2012, pp. 1-8.
- [129] Retif, Commande vectorielle des machines, <http://docinsa.insa-lyon.fr/polycop/download.php?id=160503&id2=1> [Online].

- [130] J. Lefebvre, *Analyse mécanique d'un système éolien diesel sans stockage basé sur un bilan de puissance*: Université du Québec à Rimouski, 2010.
- [131] T. Burton, D. Sharpe, N. Jenkins, and E. Bossanyi, *Wind energy handbook*: John Wiley & Sons, 2001.
- [132] R. E. Wilson and P. B. Lissaman, "Applied aerodynamics of wind power machines," Oregon State Univ., Corvallis (USA)1974.
- [133] L.-C. Forcier, "Conception d'une pale d'éolienne de grande envergure à l'aide de techniques d'optimisation structurale," École de technologie supérieure, 2010.
- [134] A. Abdelli, "Optimisation multicritère d'une chaîne éolienne passive," 2007.
- [135] M. O. Hansen, *Aerodynamics of wind turbines*: Routledge, 2015.
- [136] K. Uhlen, B. Foss, and O. Gjøsaeter, "Robust control and analysis of a wind-diesel hybrid power plant," *Energy Conversion, IEEE Transactions on*, vol. 9, pp. 701-708, 1994.
- [137] M. M. S. Camara, M. B. Camara, B. DAKYO, and H. GUALOUS, "Modélisation et commande d'une génératrice synchrone à aimant permanent pour la production et l'injection des énergies offshore dans un réseau," in *Symposium de Génie Électrique 2014*, 2014.
- [138] K. Uhlen, "Modeling and robust control of autonomous hybrid power systems," *Doktor ingeniøravhandling, Norges tekniske høgskole, Institutt for teknisk kybernetikk, Trondheim*, 1994.
- [139] J. Slootweg, S. De Haan, H. Polinder, and W. Kling, "General model for representing variable speed wind turbines in power system dynamics simulations," *Power Systems, IEEE Transactions on*, vol. 18, pp. 144-151, 2003.
- [140] S. Muyeen, R. Takahashi, T. Murata, J. Tamura, and M. Ali, "Transient stability analysis of permanent magnet variable speed synchronous wind generator," in *Electrical Machines and Systems, 2007. ICEMS. International Conference on*, 2007, pp. 288-293.
- [141] I. Munteanu, A. I. Bratcu, N.-A. Cutululis, and E. Ceanga, *Optimal control of wind energy systems: towards a global approach*: Springer Science & Business Media, 2008.
- [142] Y.-Y. Hong, S.-D. Lu, and C.-S. Chiou, "MPPT for PM wind generator using gradient approximation," *Energy Conversion and Management*, vol. 50, pp. 82-89, 2009.
- [143] I. Munteanu, A. I. Bratcu, and E. Ceangă, "Wind turbulence used as searching signal for MPPT in variable-speed wind energy conversion systems," *Renewable Energy*, vol. 34, pp. 322-327, 2009.
- [144] T. Senjyu, Y. Ochi, Y. Kikunaga, M. Tokudome, A. Yona, E. B. Muhando, *et al.*, "Sensor-less maximum power point tracking control for wind generation system with squirrel cage induction generator," *Renewable Energy*, vol. 34, pp. 994-999, 2009.
- [145] "Retif, Commande vectorielle des machines, <http://docinsa.insa-lyon.fr/polycop/download.php?id=160503&id2=1>, 2008."
- [146] M. El Mokadem, "Modélisation et simulation d'un système hybride pour un site isolé. Problématique liée aux fluctuations et variations d'énergie au point de couplage," PhD dissertation, GREAH laboratory, Université du Havre, France, 2006.
- [147] N. Laverdure, D. Roye, S. Bacha, and R. Belhomme, "Technologie des systèmes éoliens Intégration dans les réseaux électriques," *Revue 3EI*, pp. 14-25, 2004.
- [148] "https://fr.wikipedia.org/wiki/Limite\_de\_Betz," ed.

- [149] L. Croci, "Gestion de l'énergie dans un système multi-sources photovoltaïque et éolien avec stockage hybride batteries/supercondensateurs," Université de Poitiers, 2013.
- [150] M. E. C. D. U. AÉROGÉNÉRATEUR, À. M. A. À. D. ALIMENTATION, E. VUE, and D. P. D. C. DE SIMULATION, "MOKRANE SMAILI," 2013.
- [151] A. Zaimi, "Optimisation de la commande d'une éolienne à base de machine synchrone à aimants permanents. ," *Conservatoire National des arts et metiers . Centre du Maroc*, 2014.
- [152] Q. Wang and L. Chang, "An intelligent maximum power extraction algorithm for inverter-based variable speed wind turbine systems," *IEEE Transactions on power electronics*, vol. 19, pp. 1242-1249, 2004.
- [153] R. Aubrée, "Stratégies de commande sans capteur et de gestion de l'énergie pour les aérogénérateurs de petite puissance," Nantes, 2014.
- [154] J. T. Bialasiewicz, *Modular simulation of a hybrid power system with diesel and wind turbine generation*: Citeseer, 1998.
- [155] [www.mathworks.com/help/simulink/examples/engine-timing-model-with-closed-loop-control.html](http://www.mathworks.com/help/simulink/examples/engine-timing-model-with-closed-loop-control.html) [Online].
- [156] G. Sybille and P. Giroux, "Simulation of FACTS controllers using the MATLAB power system blockset and Hypersim real-time simulator," in *Power Engineering Society Winter Meeting, 2002. IEEE*, 2002, pp. 488-491.
- [157] Wikipédia, "[https://fr.wikipedia.org/wiki/Transformation\\_polytropicue](https://fr.wikipedia.org/wiki/Transformation_polytropicue)," T. polytropicue, Ed., ed: Article.
- [158] P. A, *Suralimentation par turbocompresseur. Technique l'ingénieur*, 1990.
- [159] N. Zsiga, C. Voser, C. Onder, and L. Guzzella, "Intake manifold boosting of turbocharged spark-ignited engines," *Energies*, vol. 6, pp. 1746-1763, 2013.
- [160] "[http://eolienne.f4jr.org/systeme\\_de\\_regulation\\_et\\_de\\_protection](http://eolienne.f4jr.org/systeme_de_regulation_et_de_protection)," ed.
- [161] M. Rezkallah, "Amélioration de la qualité d'énergie fournie au réseau autonome hybride éolien-diesel," École de technologie supérieure, 2010.
- [162] T. Tameghe and T. Andy, "Modelisation et simulation d'un systeme de jumelage eolien-diesel alimentant une charge locale," 2012.
- [163] H. Ibrahim, R. Younès, and A. Ilinca, "Optimal conception of a hybrid generator of electricity," *CANCAM02007 ETS-39, Toronto, Canada*, pp. 358-9, 2007.
- [164] "Bernard COLIN, Groupes électrogènes de secours, Techniques de l'Ingénieur, traité Génie électrique, D5180."



## ANNEXES

### Annexe A : Données de système : SHEDAC

#### Données de l'éolienne, 10 Kw Berguey Excel

##### Paramètres de rotor

Rp\_eol = 3.5 : longueur pales (m)  
 J\_eol = 2300 : inertie pales (kg/m<sup>2</sup>)  
 B\_eol = 0 : friction pales  
 beta\_eol = 0 : angle d'attaque des pales

##### paramètres de la génératrice : machine synchrone à aimant permanent (10Kw)

psi\_AP\_eol = 0.5 : flux aimant permanent [Wb]  
 Rs\_eol = 0.08 : résistance [ohm]  
 Lsq\_eol = 0.3 : inductance q [Henry]  
 Lsd\_eol = 0.3 : inductance d [Henry]  
 nPol\_eol=1 : nombre de paires de pôles

##### contrôle onduleur éolienne

Pond\_eol = 1;  
 Iond\_eol = 1;

##### contrôle redresseur éolienne

contrôleur PI

#### Données du groupe Diesel , 50Kw

##### Paramètres du moteur Diesel

c\_MD = 0.009 : cylindrée du moteur (m<sup>3</sup>)  
 T\_MD = 274+30 : Température à l'entrée du diesel (K)  
 a\_MD = 7.2e-2 : Constante  
 b\_MD = 1.8e-2 : Constante  
 cst\_MD = 1 : Constante de temps de la dynamique d'admission de carburant

##### Paramètres de la génératrice : Machine synchrone à rotor bobiné

J\_GD = 0.3987 : inertie diesel  
 Bd\_GD = 0.031 : amortissement (friction) diesel  
 p = 2 : paire de pole de la machine synchrone de GD  
 Rs\_GD = 0.181 : résistance stator de la machine synchrone (ohm)  
 Ll = 0.9e-4 : inductance stator (H)

Lmd = 0.02683 : inductance mutuelle d (H)  
 Lmq = 0.01187 : inductance mutuelle q (H)

Table de correspondance (données proviennent de la fiche technique de CVT)

Corp, TCE) données fournies par le TechnoCentre

Tablepuissance\_CVT = [40000 45000 50000 55000 60000 65000 70000 75000]

Tablevitesse\_CVT = [1200 1350 1480 1600 1800 2000 2300 2800]

Paramètres contrôleur du moteur diesel (régulateur de la vitesse)

P\_diesel = 0.008

I\_diesel = 0.008

Paramètres contrôleur de la machine synchrone de GD (Régulateur de tension)

Kp = 20

KI = 40

## Données de système d'air comprimé

Paramètres de COMPRESSEUR, RÉSERVOIR ET ÉCHANGEUR

temp\_stockage = 273.15+25 : Température de stockage [K]

R = 0.0029 : Constante de gaz parfait (m<sup>3</sup> \* bar) / (kg \* K)

Pn = 50e3 : Puissance nominale du compresseur [W]

gamma = 1.3 : Coefficient polytropique phase de Compression

gamma1 = 1.2 : Coefficient polytropique phase de Détente

Volum\_stockage = 20 : Volme du réservoir en [m<sup>3</sup>]

Press\_max = 345 : Pression maximale du stockage en [bar]

Press\_min = 15 : Pression minimale du stockage en [bar]

rend\_echangeur = 0.94 : Rendement de l'échangeur thermique

Temp\_air\_cooler = 273.15+25 : Température refroidisseur de l'échangeur en [K]

paramètres moteur asynchrone à cage d'écureuil

Rs = 0.03957 : resistance stator [Ohm]

Rr = 0.02215 : resistance rotor [Ohm]

Ls = 0.017 : inductance stator [H]

Lr = 0.017 : inductance rotor [H]

M = 0.01664 : inductance mutuelle [H]

Je = 1.3 : inertie de la machine à cage [kg/m<sup>2</sup>]

fe = 0.05543 : facteur de friction [N.m.s]

p = 2 : nombre de paires de pôle

f = 60 : fréquence[Hz]

contrôleur de la vitesse de moteur

Pond\_Comp = 4 : proportionnel

Iond\_Comp = 12: integrateur

## Annexe B : Code de modèle mécanique de l'éolienne :

```

[rayon,twist,corde,betamax,rpmmmin,pales,ventmin,nbrelement,ro]=definition
_vecteurs_I(); %appel de la fonction qui initialise tous les entrees du
programme 0
q=1;
for r=0:2:30
    6
    0
    p=1;
    rpm=rpmmmin+r; %vitesse de rotation du rotor en rd/s
    for n=0:2:4
        beta0=betamax-n;
        beta=beta0+twist; %angle de calage beta
        for m=1:3

            vent=ventmin+m;%vitesse du vent
            [wr,vr2,phi,alpha]=valeurs_de_base(rpm,rayon,vent,beta);
            [cl,cd]=cl_cd(nbrelement,alpha);
            dumb=phi;
            [a,aprim]=a_aprim(nbrelement,pales,corde,rayon,dumb,cl,cd);

[a,aprim,phi,phi1,phi2,alpha,cd,cl,erreur,critere,increment]=...

appel_conv(nbrelement,phi,pales,corde,rayon,vent,rpm,cl,cd,...
            a,aprim,beta);
            if increment<=1000

                f=prandtl(nbrelement,pales,phi,rayon);
                vr2=v_rel(phi,vent,a,f);

torque=calcul_torque(cl,phi,cd,vr2,rayon,corde,pales,nbrelement,ro);
            integrale=calcul_int_torque(torque,rayon,nbrelement);
            puissance=calcul_puissance(nbrelement,integrale,rpm);
                for k=1:4
                    w=m+1;
                    couple_v(w)=integrale(k);
                    puissance_v(w)=puissance(k);
                    v_vent(w)=vent;
                end
            end
            couple_v_b(:,p)=couple_v(:);
            puissance_v_b(:,p)=puissance_v(:);
            delta_beta(p)=beta0;
            p=p+1;
        end
    end
    couple_v_b_r(:,:,q)=couple_v_b(:,:,)
    puissance_v_b_r(:,:,q)=puissance_v_b(:,:,)

```

```

    v_rot(q)=rpm
    q=q+1
end
graphiques(couple_v_b_r,puissance_v_b_r,v_vent,v_rot,delta_beta)

function[rayon,twist,corde,betamax,rpmmmin,pales,ventmin,nbrelement,ro]=de
finition_vecteurs_I()
%lecture des fichiers%
%les donnees du rayon sont dans le rapport, mais ils etaient programmees
dans un fichier texte
fid=fopen('rayon.txt','r');
rayon=fscanf(fid,'%10g\t');
fclose(fid);
%les donnees du twist sont dans le rapport, mais ils etaient programmees
dans un fichier texte
fid=fopen('twist.txt','r');
twist=fscanf(fid,'%10g\t');
fclose(fid);
%les donnees du corde sont dans le rapport, mais ils etaient programmees
dans un fichier texte
fid=fopen('corde.txt','r');
corde=fscanf(fid,'%10g\t');
fclose(fid);
rayon=rayon';
twist=twist';
corde=corde';
betamax=5;
rpmmmin=input('vitesse de rotation minimale en rmp:');
ventmin=input('vitesse incidente minimale en m/s:');
pales=3;
nbrelement=length(rayon);
ro=1.250;

function [a,aprim]=a_aprim(nbrelement,pales,corde,rayon,dumb,cl,cd)
tic
sigma=zeros(0,nbrelement);
const=zeros(0,nbrelement);
a=zeros(0,nbrelement);
aprim=zeros(0,nbrelement);
%pour l'ensemble des elements de pale%
for k=1:nbrelement
    sigma(k)=(pales*corde(k))/(pi*rayon(nbrelement));
    %calcul de a %
    const(k)=(sigma(k)*rayon(nbrelement))*(cl(k)*cos(dumb(k)*pi/180))+...
        (cd(k)*sin(dumb(k)*pi/180));
    a(k)=const(k)/(const(k)+(8*rayon(k)*(sin(dumb(k)*pi/180)^2)));
    %calcul de aprim%
if abs(dumb(k))<0.008
    aprim(k)=-1;

```



```

elseif dumb==90
    aprim(k)=-1;
else
    const(k)=(sigma(k)*rayon(nbrelement)/(8*rayon(k)))*...
        (cl(k)*sin(dumb(k)*pi/180)-(cd(k)*cos(dumb(k)*pi/180)))*...
        / (sin(dumb(k)*pi/180)*cos(dumb(k)*pi/180));
    aprim(k)=const(k)/(1-const(k));
end
end
toc

function[a,aprim,phi,phi1,phi2,alpha,cd,cl,erreur,critere,increment]=...
appel_conv(nbrelement,phi,pales,corde,rayon,vent,rpm,cl,cd,...
    a,aprim,beta);
    if increment<=1000
        f=prandtl(nbrelement,pales,phi,rayon);
        vr2=v_rel(phi,vent,a,f);
    torque=calcul_torque(cl,phi,cd,vr2,rayon,corde,pales,nbrelement,ro);
        integrale=calcul_int_torque(torque,rayon,nbrelement);
        puissance=calcul_puissance(nbrelement,integrale,rpm);
        for k=1:4
            w=m+1;
            couple_v(w)=integrale(k);
            puissance_v(w)=puissance(k);
            v_vent(w)=vent;
        end
    end
    couple_v_b(:,p)=couple_v(:);
    puissance_v_b(:,p)=puissance_v(:);
    delta_beta(p)=beta0;
    p=p+1;
end
couple_v_b_r(:,:,q)=couple_v_b(:,:,);
puissance_v_b_r(:,:,q)=puissance_v_b(:,:,);
v_rot(q)=rpm*2*pi/60;
q=q+1;
end
graphiques(couple_v_b_r,puissance_v_b_r,v_vent,v_rot,delta_beta)

function dumb=calcul_phi(nbrelement,aprim,vent,a,rpm,rayon)
tic
%pour l'ensemble des elements de pale %
dumb=zeros(0,nbrelement);
for k=1:nbrelement
    if aprim(k)==-1
        dumb(k)=90
    else

```

```

        dumb(k)=(atan(vent*(1-a(k))/(((rpm/60)*2*pi...
            *rayon(k))*(1+aprim(k))))*(pi/180)
    end
end
toc

function[wr, vr2, phi, alpha]=valeurs_de_base(rpm, rayon, vent, beta)
%pour l'ensemble des elements de pale%
%calcul de wr%
wr=(rpm*2*pi)/(60*rayon);
%calcul preliminaire de vr2%
vr2=wr.^2+vent.^2;
%calcul preliminaire de phi en fonction du vent et de wr%
phi=atan(vent./wr)*180./pi;
%calcul preliminaire d'alpha en fonction de phi et de beta %
alpha=phi-beta;

function[c1, cd]=cl_cd(nbrelement, alpha)
%pour l'ensemble des elements de pale%
for k = 1:nbrelement
    % calcul de coefficient du portance%
    if alpha(k)<= 13.18
        cl(k)= -0.0037*(alpha(k)^2)+0.1188*alpha(k)+0.2593;
    else
        cl(k)=0.00000003*(alpha(k)^3)+0.0003*(alpha(k)^2)-
0.0453*alpha(k)+1.7496;
    end
    %calcul de Coefficient de trainee%
    cd(k)=-0.000006*(alpha(k)^3)+0.0004*(alpha(k)^2)-
0.0021*alpha(k)+0.0132;
end

function[a, aprim, phi, phi1, phi2, alpha, cd, cl, erreur, critere]=test_conv(test
, phi2, nbrelement, pales, corde, rayon, vent, rpm, cl, cd, a, aprim, beta)
if test>0
dumb=phi2;
[a, aprim]=a_aprim(nbrelement, pales, corde, rayon, dumb, cl, cd);
dumb=calcul_phi(nbrelement, aprim, vent, a, rpm, rayon);
phi1=dumb;
test=-test;
phi=phi1;
alpha=calcul_alpha(nbrelement, beta, phi);
[cl, cd]=cl_cd(nbrelement, alpha);
end
if test<0
dumb=phi1;
phi2=dumb;
[a, aprim]=a_aprim(nbrelement, pales, corde, rayon, dumb, cl, cd);
dumb=calcul_phi(nbrelement, aprim, vent, a, rpm, rayon);

```

```

test=-test;
phi=phi2;
alpha=calcul_alpha(nbrelement,phi,beta);
[cl,cd]=cl_cd(nbrelement,alpha);
end
    erreur=0;
    for k=1:nbrelement
        erreur=erreur+abs(phi1(k)-phi2(k));%pour l'ensemble de la pale %
    end
critere=erreur/nbrelement;%le critere est la moyenne de la difference
entre l'ancienne et la nouvelle valeur%

function f=prandt1(nbrelement,pales,phi,rayon)
tic
cosin=zeros(0,nbrelement);
f=zeros(0,nbrelement);
for k=1:nbrelement
    if phi<0.5
        cosin(k)=0.0;
        f(k)=1;
    else
        cosin(k)=exp(-pales*((rayon(nbrelement)-rayon(k))...
        ./ (2.*sin(phi(k).*pi./180))));
        f(k)=(2./pi).*atan((sqrt(1-cosin(k)))./cosin(k));
    end
end
end
toc

function[a,aprim,phi,phi1,phi2,alpha,cd,cl,erreur,critere,increment]=appe
l_conv(nbrelement,phi,pales,corde,rayon,vent,rpm,cl,cd,a,aprim,beta)
critere =1;%valeur par default superieur au critere d'arret%
increment=0;
phi2=phi;
test=1;
while critere> 0.005
    increment=increment+1;
[a,aprim,phi,phi1,phi2,alpha,cd,cl,erreur,critere]=test_conv(test,phi2,nb
relement,pales,corde,rayon,vent,rpm,cl,cd,a,aprim,beta);
    if increment>1000
        break;
    end
end
end

function alpha=calcul_alpha(~,phi,beta)
    alpha=phi-beta;

function integrale=calcul_int_torque(torque,rayon,nbrelement)
tic

```

```

    integrale=zeros(1,nbrelement-2);
    integrale(1)=-((torque(1)+torque(2))/2)*(rayon(2)-(rayon(1)-
(rayon(2)-rayon(1))/2));
for k=1:1:(nbrelement-1)
    integrale(k)=-((torque(k)+torque(k+1))/2)*(rayon(k+1)-rayon(k));
end
integrale(nbrelement-1)=((torque(nbrelement-1)+torque(nbrelement))/2)...
*((rayon(nbrelement)+(rayon(nbrelement)-rayon(nbrelement-1))/2)...
-rayon(nbrelement-1));
integrale(nbrelement)=0;
toc

function
torque=calcul_torque(cl,phi,cd,vr2,rayon,corde,pales,nbrelement,ro)
%calcul du couple mecanique
tic
    torque=zeros(1,nbrelement-2);
torque(1)=(cl(1).*sin(phi(1).*pi./180)-
(cd(1).*cos(phi(1).*pi./180))).*0.5.*ro.*vr2(1)...
*(rayon(1)-(rayon(2)-rayon(1))./2).*((corde(1)-(corde(2)-
corde(1))./2)*pales;
    for k=2:(nbrelement-1)
torque(k)=(cl(k)*sin(phi(k)*pi/180)-(cd(k)*cos(phi(k)*pi/180)))*0.5...
.*ro.*vr2(k).*rayon(k).*corde(k).*pales;
end
torque(nbrelement)=-((cl(nbrelement)*sin(phi(nbrelement)*pi/180)...
-
(cd(nbrelement)*cos(phi(nbrelement).*pi./180))).*0.5.*ro.*vr2(nbrelement)
...
*(rayon(nbrelement)+(rayon(nbrelement)-rayon(nbrelement-1))./2)...
*(corde(nbrelement)-(corde(nbrelement)-corde(nbrelement-1))./2)*pales;

function puissance=calcul_puissance(nbrelement,integrale,rpm)
for k=1:(nbrelement)
    puissance(k)=integrale(k)*2*pi*rpm/(60*1000);
end

function graphiques(couple_v_b_r,puissance_v_b_r,v_vent,v_rot,delta_beta)
%graphique de la puissance eolienne
x=v_rot;
y=puissance_v_b_r(1,1,:);
y=y(:);
y2=puissance_v_b_r(2,1,:);
y2=y2(:);
y3=puissance_v_b_r(3,1,:);
y3=y3(:);
y4=puissance_v_b_r(4,1,:);
y4=y4(:);
subplot(2,1,1);

```

```

plot(x,y,x,y2,x,y3,x,y4)
xlabel('vitesse de rotation(rad/s)');
ylabel('puissance(KW)');
title('Puissance éolienne en fontction de la vitesse de rotation pour
un\delta\beta=5');
fid=fopen('puissance.txt','w');
x=length(puissance_v_b_r);
for k=1:x
fprintf(fid,'%10g\t',puissance_v_b_r(:,1,k));
fprintf(fid,'\n');
end
%graphique du couple mecanique
x=v_rot;
y=couple_v_b_r(1,1,:);
y=y(:);
y2=couple_v_b_r(2,1,:);
y2=y2(:);
y3=couple_v_b_r(3,1,:);
y3=y3(:);
y4=couple_v_b_r(4,1,:);
y4=y4(:);
subplot(2,1,2);
plot(x,y,x,y2,x,y3,x,y4)
xlabel('vitesse de rotation(rad/s)');
ylabel('couple(Nm)');
title('couple en fonction de la vitesse de rotation pour
un\delta\beta=5');
fid=fopen('couple.txt','w');
x=length(couple_v_b_r);
for k=1:x
fprintf(fid,'%10g\t',couple_v_b_r(:,1,k));
fprintf(fid,'\n');
end

```

## Annexe C : Code de Modele de CP de Manufacturier (TCE)

### 4e Modele de CP de manufacturier (TCE)

#### %Cp (Données Manufacturier: TCE)

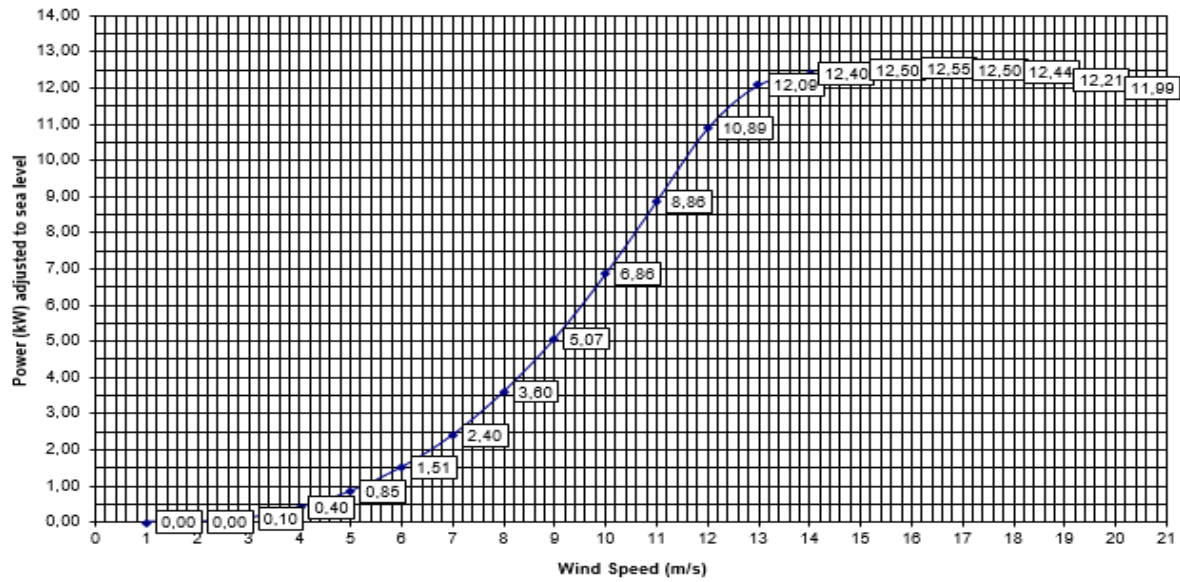
```

s=importdata('Cp.txt','t',2);
[m,n]=size(s.data);
data=s.data;
vent=(data(:,1));
Cp=(data(:,2));
plot(vent,Cp)
hold on

```

**Annexe D : Courbe de puissance de l'éolienne Excel Berguey 10Kw et Datasheet**

BWC Excel-S Power Curve (Sea Level)  
Excel 10 - USDA Data per IEC 61400-12



<b>WindCad Turbine Performance Model</b>				
<b>BWC EXCEL-S, Grid - Intertie</b>		USDA IEC 61400-12 Data		
Prepared For:	SWCC	<b>10 kW</b>		
Site Location:	N/A - Per AWEA 9.1-2009			
Data Source:	N/A - Per AWEA 9.1-2009			
Date:	2016-07-12			
<b>Inputs:</b>		<b>Results:</b>		
Ave. Wind (m/s) =	5	Hub Average Wind Speed (m/s) =	6,39	
Weibull K =	2	Air Density Factor =	0%	
Site Altitude (m) =	0	Average Output Power (kW) =	2,91	
Wind Shear Exp. =	0,250	Daily Energy Output (kWh) =	69,9	
Anem. Height (m) =	9	Annual Energy Output (kWh) =	25 522	
Tower Height (m) =	24	Monthly Energy Output =	2 127	
Turbulence Factor =	0,0%	Percent Operating Time =	88,7%	
<b>Weibull Performance Calculations</b>				
Wind Speed Bin (m/s)	Power (kW)	Wind Probability (f)	Net kW @ V	<b>Weibull Calculations:</b> Wind speed probability is calculated as a Weibull curve defined by the average wind speed and a shape factor, K. To facilitate piece-wise integration, the wind speed range is broken down into "bins" of 1 m/s in width (Column 1). For each wind speed bin, instantaneous wind turbine power (W, Column 2) is multiplied by the Weibull wind speed probability (f, Column 3). This cross product (Net W, Column 4) is the contribution to average turbine power output contributed by wind speeds in that bin. The sum of these contributions is the average power output of the turbine on a continuous, 24 hour, basis. Best results are achieved using annual or monthly average wind speeds. Use of daily or hourly average speeds is not recommended.
1	0,00	3,81%	0,000	
2	0,00	7,88%	0,000	
3	0,10	9,78%	0,010	
4	0,40	11,38%	0,046	
5	0,85	11,95%	0,102	
6	1,51	11,58%	0,175	
7	2,40	10,50%	0,252	
8	3,60	8,97%	0,323	
9	5,07	7,25%	0,368	
10	6,86	5,58%	0,382	
11	8,86	4,08%	0,362	
12	10,88	2,85%	0,310	
13	12,09	1,90%	0,230	
14	12,39	1,21%	0,150	
15	12,49	0,74%	0,092	
16	12,55	0,43%	0,054	
17	12,50	0,24%	0,030	
18	12,44	0,13%	0,016	
19	12,21	0,07%	0,008	
20	11,99	0,03%	0,004	
2011, BWC	Totals:	99,65%	2,913	
<b>Instructions:</b>				
<p><b>Inputs:</b> Use annual or monthly Average Wind speeds. If Weibull K is not known, use K = 2 for inland sites, use 3 for coastal sites, and use 4 for island sites and trade wind regimes. Site Altitude is meters above sea level. Wind Shear Exponent is best assumed as 0.18. For rough terrain or high turbulence use 0.22. For very smooth terrain or open water use 0.11. Anemometer Height is for the data used for the Average Wind speed. If unknown, use 10 meters. Tower Height is the nominal height of the tower, eg.: 24 meters. Turbulence Factor is a derating for turbulence, site variability, and other performance influencing factors – typical turbulence has already been incorporated into the model. Use 0.00 (0%) for level sites with limited obstructions. Use -0.10 (negative 10%) for flat, clear sites on open water. Use 0.05 to 0.15 (5% to 15%) for rolling hills or mountainous terrain.</p>				
<p><b>Results:</b> Hub Average Wind Speed is corrected for wind shear and used to calculate the Weibull wind speed probability. Air Density Factor is the reduction from sea level performance. Average Power Output is the average continuous equivalent output of the turbine. Daily Energy Output is the average energy produced per day. Annual and Monthly Energy Outputs are calculated using the Daily value. Percent Operating Time is the time the turbine should be producing some power.</p>				
<p><b>Limitations:</b> This model uses a mathematical idealization of the wind speed probability. The validity of this assumption is reduced as the time period under consideration (ie, the wind speed averaging period) is reduced. This model is best used with annual or monthly average wind speeds. Use of this model with daily or hourly average wind speed data is not recommended because the wind will not follow a Weibull distribution over short periods. The data used in creating the power curve was generated at the BWC test site in Norman, OK. Consult Bergy Windpower Co. for special needs. Your performance may vary.</p>				

**Annexe E : Courbe de la puissance de groupe diesel (Compagnie CVTCorp)**